

ANÁLISE DINÂMICA COMPARATIVA DE LINHAS DE ANCORAGEM

NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E FREQUÊNCIA

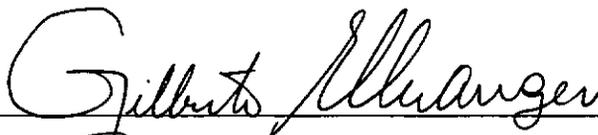
MARINA BARBOSA FACHETTI

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

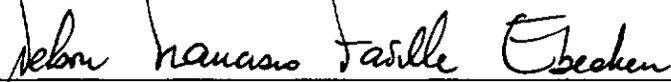
Aprovada por :



Edison Castro Prates de Lima, D.Sc.
(Presidente)



Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Nelson Francisco Favilla Ebecken, D.Sc.



Vitor Giordani Maciel, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1990

FACHETTI, MARINA BARBOSA

Análise Dinâmica Comparativa de Linhas de
Ancoragem nos Domínios do Tempo e da Frequência
[Rio de Janeiro] 1990

IX, 166 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia
Civil, 1990)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Linhas de Ancoragem 2. Domínio do Tempo

3. Domínio da Frequência I. COPPE/UFRJ

II. Título (série).

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edison Castro Prates de Lima, pela orientação e pelo incentivo dispensados durante a realização deste trabalho.

Ao professor Gilberto Bruno Ellwanger, pela co-orientação oferecida.

Ao André, pelo carinho de sempre e pela paciência dos últimos meses.

A minha família, sem a qual esta etapa nunca seria realizada.

Aos meus sogros, pelo estímulo que tenho recebido.

À Chefia, pelo incentivo profissional e pela compreensão nas horas decisivas.

Aos amigos Lena e Paulo Mauricio, pelo estímulo, apoio técnico e revisão deste trabalho.

À Ana Lúcia e ao Barusco, pela ajuda e empréstimo de bibliografia.

À Valéria, Cida, Carlos e especialmente à amiga Rosely pela dedicação e confecção gráfica.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ANÁLISE DINÂMICA COMPARATIVA DE LINHAS DE ANCORAGEM
NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

MARINA BARBOSA FACHETTI

Abril de 1990

Orientador: Prof. Edison Castro Prates de Lima

Programa : Engenharia Civil

O presente trabalho estuda o comportamento dinâmico de linhas de ancoragem em mar aberto em lâminas de água profundas. Inicialmente são apresentadas as duas metodologias adotadas para o cálculo da resposta dinâmica, baseadas na integração das equações no domínio do tempo e no domínio da frequência, e procedimentos para a determinação dos danos causados por fadiga. Estudos paramétricos foram efetuados para a avaliação da influência das não linearidades inerentes ao problema e, com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade dos conceitos contidos no trabalho, foram realizadas aplicações numéricas, cujos resultados são apresentados e comentados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

MOORING LINES COMPARATIVE DYNAMIC ANALYSIS IN THE TIME
AND IN THE FREQUENCY DOMAIN

MARINA BARBOSA FACHETTI

April, 1990

Thesis Supervisor : Prof. Edison Castro Prates de Lima
Department : Civil Engineering

This work deals with the dynamic behaviour of mooring lines at deep water on open sea. Initially are shown two dynamic response calculations approaches, based on the problem solution in the time domain and frequency domain, and procedures for fatigue damage determination. Parametric studies were carried out for problem non-linearities accounting. Numerical examples are presented and discussed at the end of the work to demonstrate the presented procedures.

INDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DA UNIDADE FLUTUANTE E DO SISTEMA DE ANCORAGEM	8
II.1 - Unidade Flutuante	12
II.2 - Sistema de Ancoragem	19

CAPÍTULO III

ANÁLISE DINÂMICA DA LINHA ISOLADA	
III.1 - Introdução	24
III.2 - Análise Dinâmica no Domínio do Tempo	30
III.3 - Análise Dinâmica no Domínio da Frequência	49

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DINÂMICA DA UNIDADE FLUTUANTE ANCORADA	
IV.1 - Introdução	58
IV.2 - Avaliação das Forças Médias Ambientais ..	61
IV.3 - Avaliação dos Movimentos de Primeira Ordem	67
IV.4 - Avaliação dos Movimentos de Segunda Ordem	69
IV.5 - Determinação do "Offset" Médio e Tensão Média	72

CAPÍTULO V

ESTUDO PARAMÉTRICO	75
V.1 - Análise da Unidade Flutuante Ancorada	81
V.2 - Análise Dinâmica da Linha Isolada no Domínio da Frequência	86
V.2.1 - Determinação dos Movimentos no "Fairlead"	86
V.2.2 - Determinação dos Espectros de Esforços de Tração	95
V.3 - Análise Dinâmica da Linha Isolada no Domínio do Tempo	99
V.3.1 - Geração das Séries Temporais dos Movimentos	101
V.3.2 - Determinação das Séries Temporais de Esforços de Tração	112
V.4 - Análises Suplementares	138
V.5 - Comparação de Resultados	143

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DE FADIGA	
VI.1 - Introdução	145
VI.2 - Cálculo do Dano por Fadiga utilizando o Método de Contagem de Ciclos ("Rainflow")	147
VI.3 - Cálculo do Dano por Fadiga utilizando o Processo de Banda Estreita ("Narrow Band Approximation")	148
VI.4 - Comparação dos Resultados obtidos pelos Dois Métodos	150

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES	157
BIBLIOGRAFIA	159
APÊNDICE I	163

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A descoberta de depósitos de petróleo em regiões marítimas, ocasionou, ao longo dos anos, a instalação de plataformas "offshore", com a finalidade de perfuração de poços e produção dos mesmos.

Em lâminas d'água de até 300 metros, consideradas rasas, as plataformas fixas tipo jaqueta, figura (I.1), são muito adotadas. No caso de águas mais profundas, o conceito de plataformas flutuantes amarradas através de um sistema de ancoragem, figura (I.2), ganha grande importância devido à sua conveniência, do ponto de vista técnico e econômico sobre as plataformas fixas.

Por sistema de ancoragem, entende-se um conjunto de linhas de ancoragem, figuras (I.3) e (I.4), compostas de amarras e ou cabos de aço que, trabalhando como catenárias simples ou compostas, conferem à unidade flutuante capacidade para conservar sua posição no mar e conseqüentemente são de fundamental importância nas características de operação e segurança da mesma.

A crescente utilização das unidades flutuantes ancoradas vêm proporcionando uma vasta área de desenvolvimento tecnológico, com aplicação em linhas de ancoragem. Vários procedimentos vêm surgindo, ao longo dos anos, com o objetivo de melhor interpretar os fenômenos físicos relacionados ao comportamento dinâmico de uma unidade flutuante ancorada.

O emprego destes sistemas flutuantes em caráter

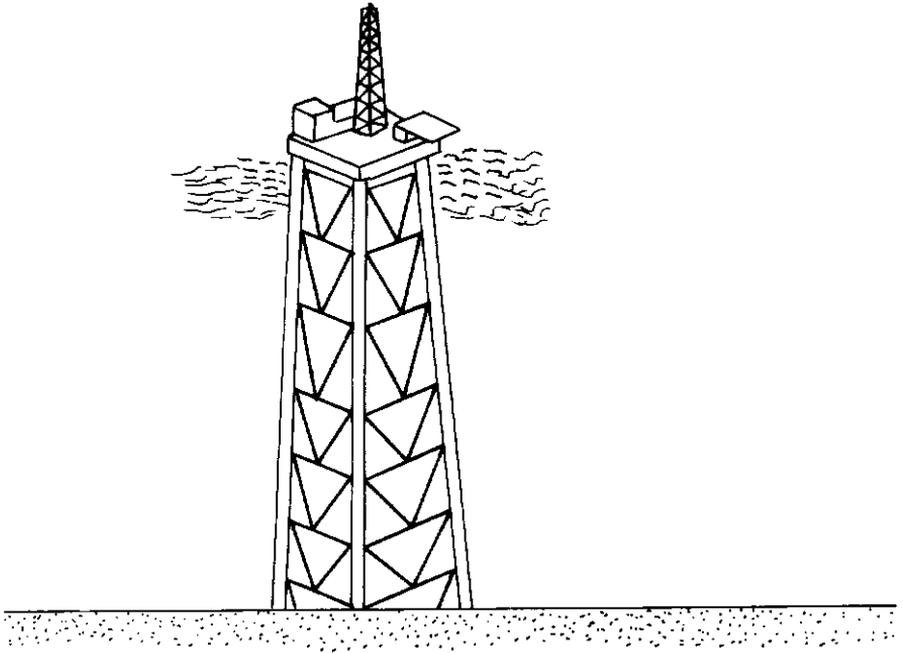


FIGURA I.1 — JAQUETA FIXA

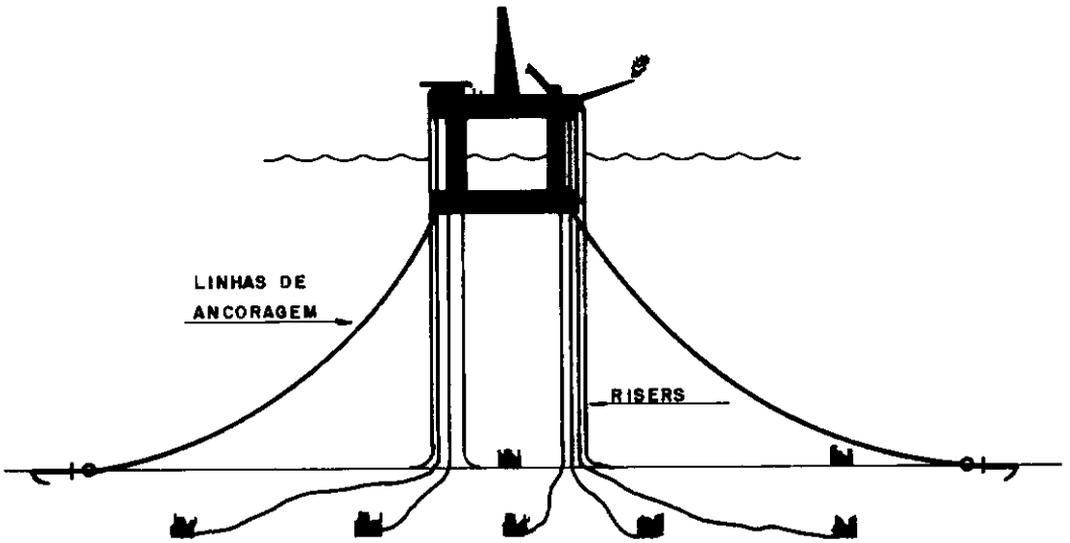


FIGURA I.2 — SISTEMA DE PRODUÇÃO FLUTUANTE (SPF)

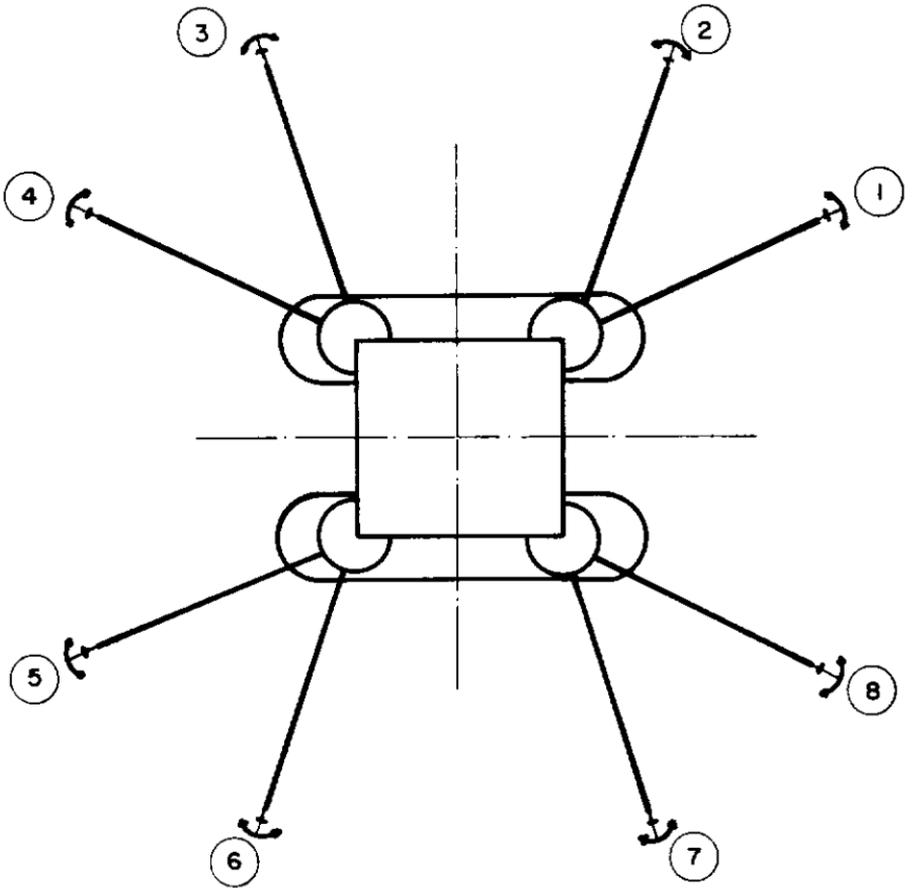


FIGURA I.3 - SISTEMA DE ANCORAGEM SIMÉTRICO.

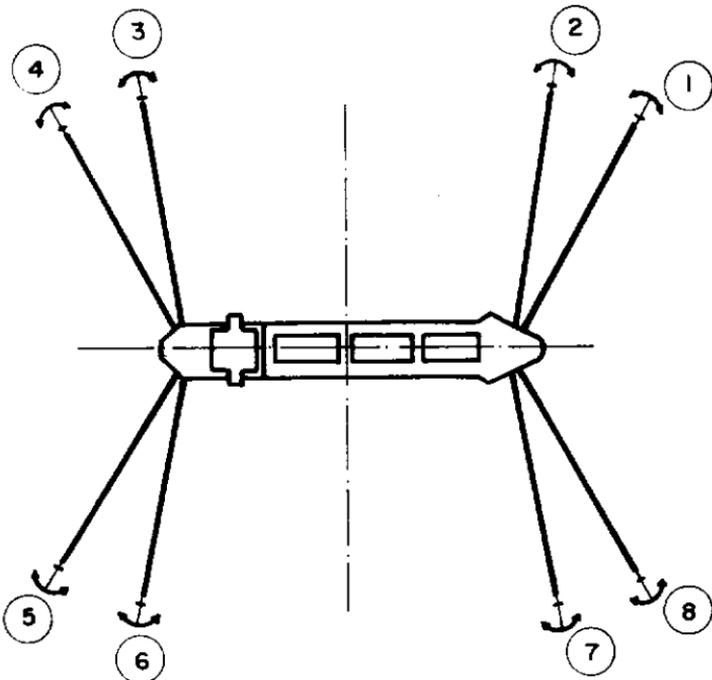


FIGURA I.4 - SISTEMA DE ANCORAGEM NÃO SIMÉTRICO.

permanente, ou seja, em atividades de produção, gera a necessidade de incluir no projeto, além de verificações estáticas e dinâmicas, uma estimativa da vida útil à fadiga.

O objetivo deste Trabalho é investigar e avaliar os principais problemas relativos à excitação, métodos de análise dinâmica e análise de fadiga de linhas de ancoragem para lâminas d'água profundas.

Em termos de engenharia, a linha de ancoragem é considerada um membro estrutural que possui uma relação diâmetro/comprimento de forma que os efeitos de flexão são desprezíveis, sendo necessário apenas a consideração da rigidez na direção axial. Entretanto a análise estrutural, das linhas de ancoragem, é complexa devida as não linearidades envolvidas ao problema.

São vários os aspectos que contribuem para tornar o problema não linear, tais como:

- . mudança da forma da linha à ação de um carregamento transversal;
- . força de arraste calculada pela expressão de Morison, que é função do quadrado da velocidade relativa entre a linha e o fluido;
- . contato da linha com o solo marinho;
- . variação da posição da extremidade superior da linha ("fairlead") ao longo do tempo, devido ao movimento imposto pela ação do mar na unidade flutuante ancorada.

Duas metodologias foram adotadas para avaliar o comportamento dinâmico de uma linha de ancoragem, com o

objetivo de estudar os aspectos mais relevantes e comparar resultados, a saber: Análise Dinâmica no Domínio da Frequência e Análise Dinâmica no Domínio do Tempo.

A análise dinâmica no domínio da frequência, [1,2,3,4] baseia-se no princípio da superposição, sendo necessário portanto, efetuar a linearização dos efeitos não lineares presentes no problema. Adota-se, neste caso, os seguintes procedimentos:

- . assume-se que os deslocamentos dinâmicos são pequenas perturbações em torno da posição estática, conseqüentemente, a análise dinâmica é realizada a partir da posição estática de equilíbrio;

- . o termo não linear na equação de Morison é linearizado, substituindo a relação quadrática da velocidade relativa por uma relação linear equivalente;

- . o comportamento não linear entre o solo marinho e a linha de ancoragem não pode ser diretamente representado no domínio da frequência, sendo substituído por um comportamento linear equivalente.

Na análise dinâmica não linear no domínio do tempo [5,6,7], todos os efeitos não lineares podem ser considerados. Entretanto, neste caso, o cálculo torna-se mais complexo e o tempo computacional cresce significativamente.

Nas duas análises a linha de ancoragem é modelada por elementos finitos, levando em consideração a elasticidade do cabo, as forças de arraste e inércia, e as forças de atrito entre cabo e fundo do mar.

A configuração estática e os movimentos da unidade flutuante ancorada, devido as forças ambientais, são gerados para ambas as análises, como condições de contorno, isto é, são aplicados ao ponto de conexão da linha de ancoragem com a unidade flutuante, denominado de "fairlead", a posição estática e os movimentos de primeira ordem da unidade flutuante.

A avaliação do dano por fadiga de pontos ao longo da linha de ancoragem foi realizada através das duas metodologias de cálculo de tensões, mencionadas a priori.

Para as aplicações numéricas foram utilizados o programa "DMOOR" [8], desenvolvido pela Noble Denton, para as análises no domínio da frequência e o programa "MODEX" [9], desenvolvido na Universidade de Chalmers, Noruega, para a execução das análises no domínio do tempo. Por fim, adotou-se o programa "RAINFLOW" [10] para o cálculo da vida útil das linhas de ancoragem.

O capítulo II traz um resumo do estado da arte relativo ao tema e a descrição do sistema utilizado.

Descreve-se no capítulo III as duas metodologias de análise dinâmica de uma linha isolada, no domínio da frequência e no domínio do tempo.

O capítulo IV, apresenta a metodologia de avaliação das principais condições de contorno, para a análise dinâmica da linha isolada, referentes a unidade flutuante ancorada.

O estudo paramétrico da análise dinâmica da linha isolada, pelas duas metodologias mencionadas anteriormente, é apresentado no capítulo V.

O capítulo VI apresenta dispositivos que permitem a avaliação do dano por fadiga de linhas de ancoragem e alguns exemplos ilustrativos.

Finalmente, o capítulo VII reúne algumas conclusões e sugestões, baseadas nos estudos desenvolvidos.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DA UNIDADE FLUTUANTE E DO SISTEMA DE ANCORAGEM

As empresas de prospecção de petróleo em mar aberto há muito utilizam unidades flutuantes ancoradas para as operações de perfuração de poços de petróleo, em função das facilidades de instalação e movimentação.

As unidades de perfuração, figura (II.1), possuem um caráter temporário, passando no máximo 1 ano em uma determinada locação. No caso do emprego destas unidades para a operação de produção, cujo caráter é permanente, a unidade pode passar as vezes vinte anos em uma só locação.

Para águas profundas, os sistemas de produção flutuantes (SPF) surgem como alternativas tecnicamente viáveis e econômicas e podem ser baseados num navio de processo, numa plataforma semi-submersível ou numa plataforma de pernas atirantadas, como mostrados nas figuras (II.2), (II.3) e (II.4), respectivamente. Com exceção das plataformas de pernas atirantadas, os SPF adotam sistemas de ancoragem tradicionais, constituídos de amarras e ou cabos de aço.

A PETROBRAS é a maior operadora destes tipos de sistemas para a produção, ou seja, em caráter permanente. Inicialmente, eram denominados de sistemas antecipados ou provisórios, até a instalação de uma plataforma fixa. Entretanto, devido a sua eficiência operacional, adquiriram características permanentes. Em função da rápida evolução na utilização dos SPF, não há critérios consolidados para o projeto de sistemas de ancoragem com finalidades

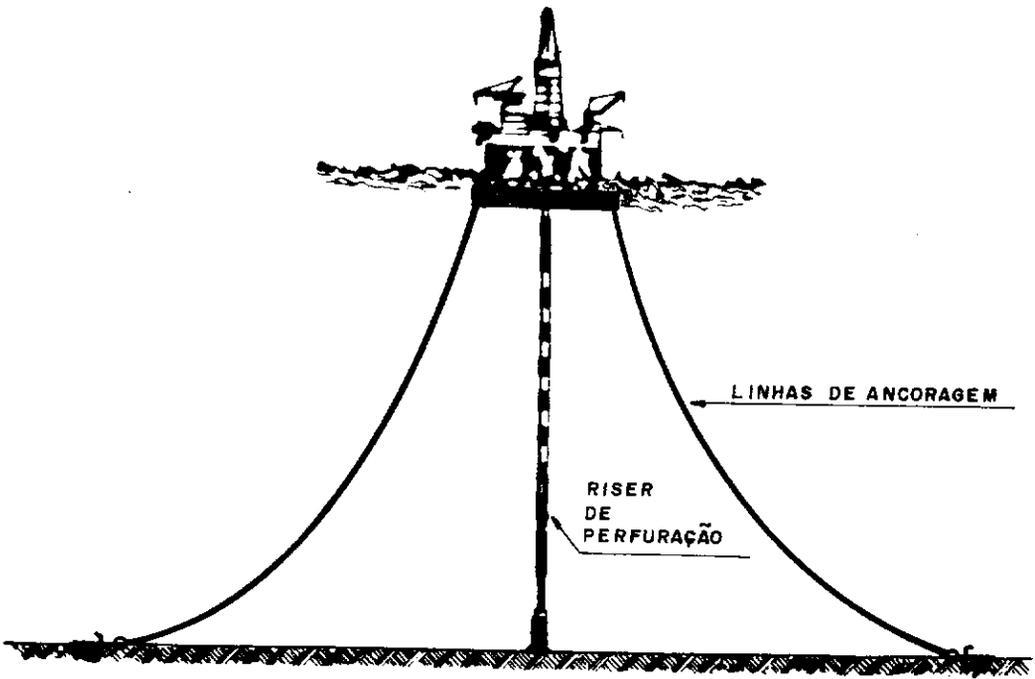


FIGURA II.1 — UNIDADE DE PERFURAÇÃO

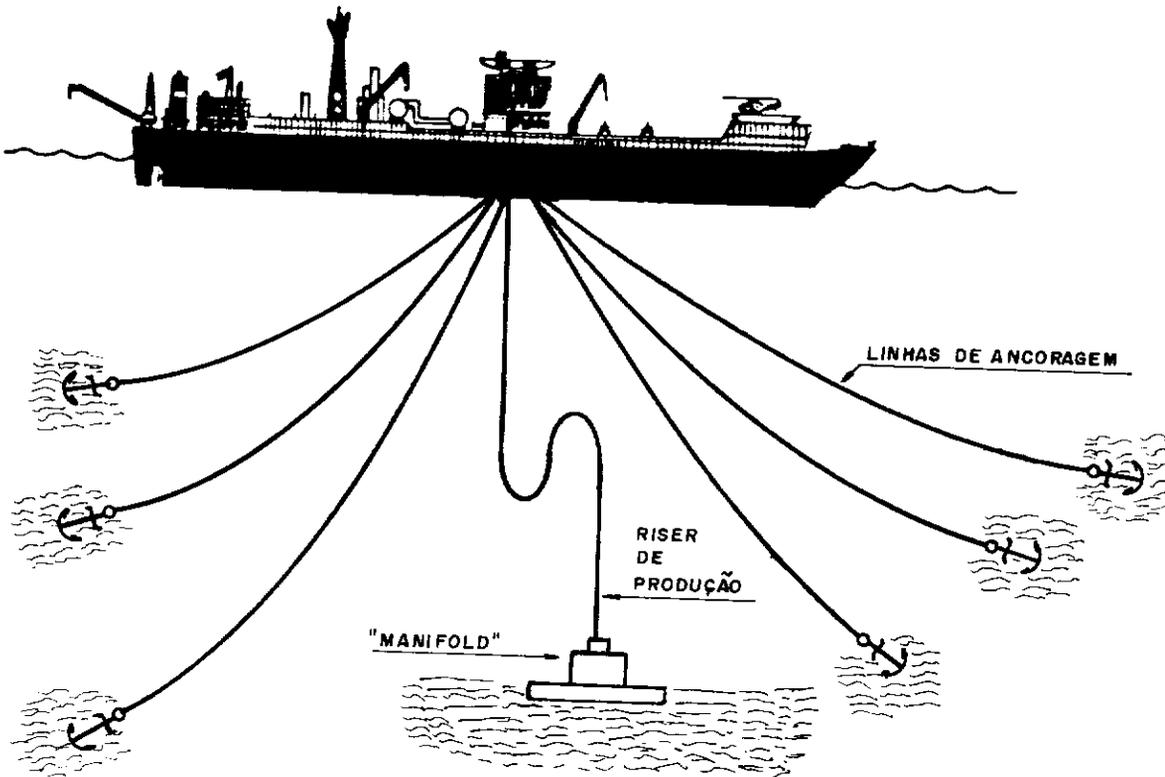


FIGURA II.2 — NAVIO DE PROCESSO

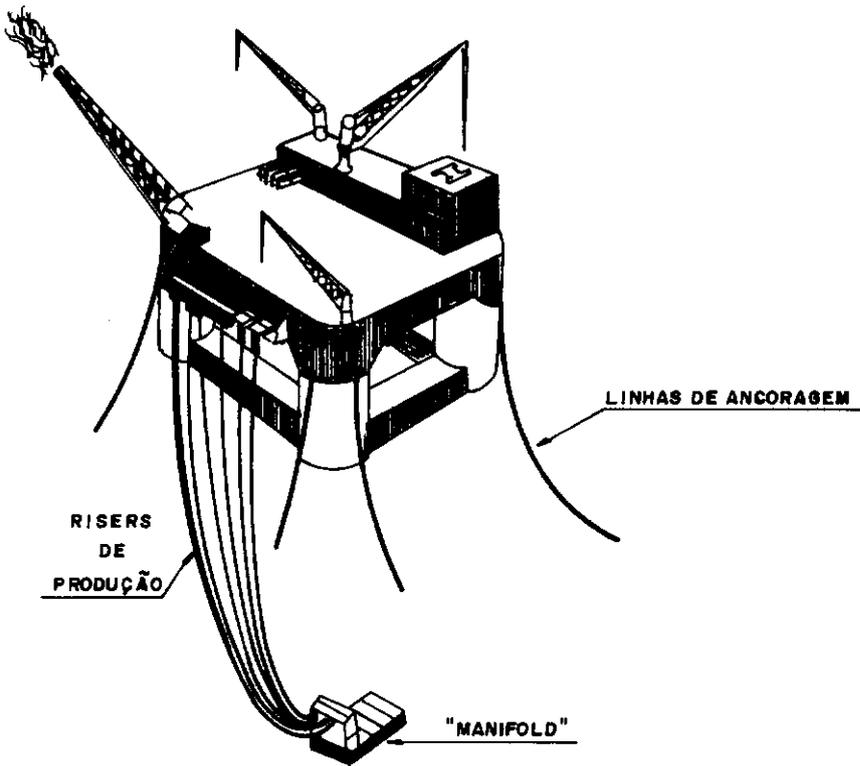


FIGURA II.3 — SEMI-SUBMERSÍVEL DE PRODUÇÃO

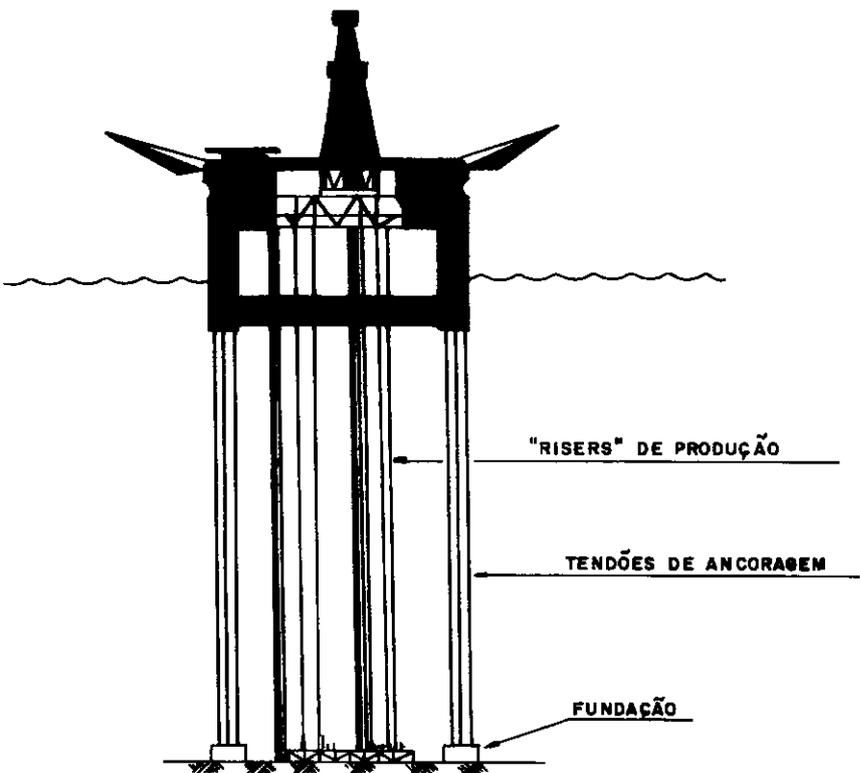


FIGURA II.4 — PLATAFORMA DE PERNAS ATIRANTADAS

permanentes. Os procedimentos adotados baseiam-se em normas e códigos para projeto de plataformas de perfuração, deparando, assim, com mudanças básicas na filosofia e condições de uso dos sistemas de ancoragem.

Devido a condição de utilização permanente em lâminas d'água profundas, surge a necessidade de melhor avaliar o comportamento dinâmico e a determinação dos danos devido à fadiga dos sistemas de ancoragem e a avaliação da vida útil.

Há inúmeros problemas sobre a dinâmica do flutuante ancorado, que ainda são objeto de pesquisa, tais como o efeito das oscilações de baixa frequência devido a ondas e ventos, a dinâmica da linha de ancoragem, a influência da linha sobre o conjunto, a influência do perfil de corrente agindo ao longo da linha, etc.

Neste trabalho foram realizados estudos paramétricos para a avaliação da influência das não linearidades inerentes à análise de linhas de ancoragem, baseando-se nos dados relativos a plataforma semi-submersível de produção, do tipo GVA-4500 de propriedade da Petrobrás, por representar uma estrutura de última geração com capacidade de operar em lâminas d'água acima de 1000 metros.

Este capítulo tem como finalidade descrever a semi-submersível e o sistema de ancoragem adotados e suas principais características.

II.1 - Unidade Flutuante

A unidade flutuante adotada nestas análises é uma semi-submersível GVA-4500 de produção, tipo catamarã com quatro colunas e convés duplo integrado, concebida para operar em 1000 metros de lâmina d'água, na Bacia de Campos. A sua configuração e principais dimensões estão mostradas, respectivamente, na figura (II.5) e na tabela (II.1), a seguir.

Deslocamento		35041.00 m ³
Comprimento do "pontoon"		89.70 m
Distância entre "pontoons"		54.72 m
Raio de Giração	"roll"	30.50 m
	"pitch"	29.40 m
	"yaw"	32.60 m
Calado		23.10 m

Tabela II.1 - Características da semi-submersível

A figura (II.6) mostra o aproamento da unidade flutuante em relação ao norte geográfico.

Apresentam-se, a seguir, as principais características da unidade, necessárias para o cálculo das forças ambientais e resolução do sistema, cuja direção de máximo carregamento ambiental refere-se a 135°, de acordo com as análises realizadas.

a - Coeficiente de Arraste de Vento

Os coeficientes de força de vento foram extrapolados de ensaios de túnel de vento. Estes

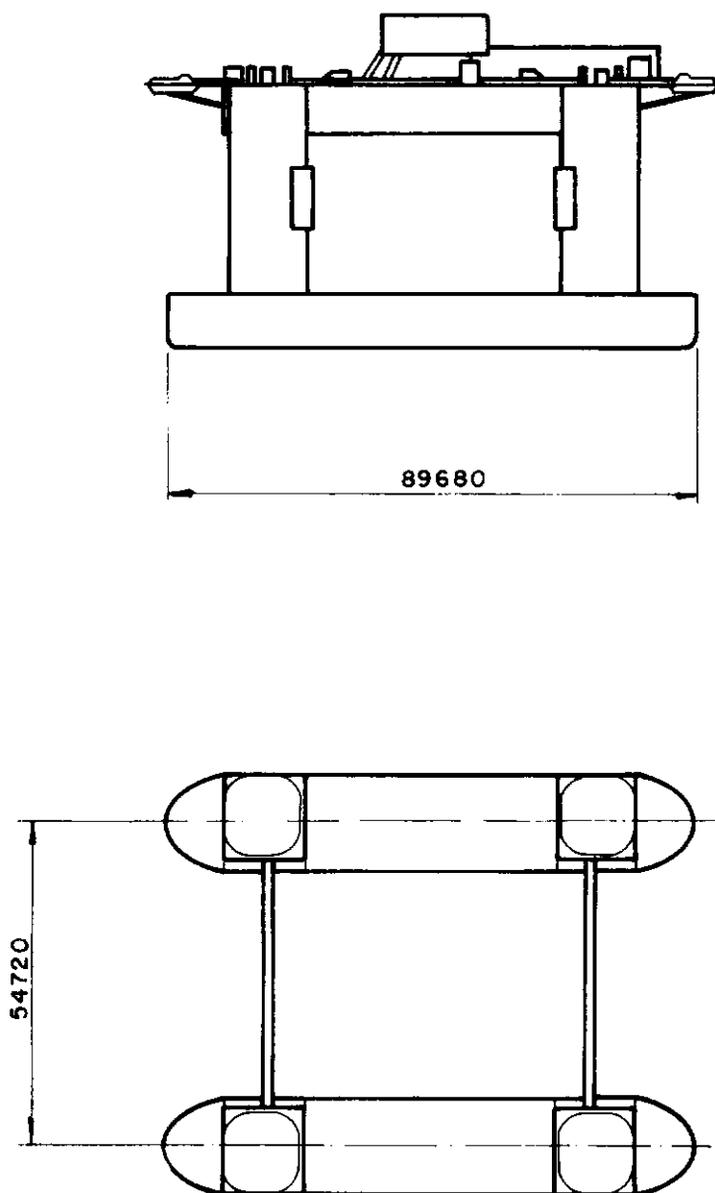


FIGURA II. 5 - SEMI-SUBMERSÍVEL GVA - 4500.

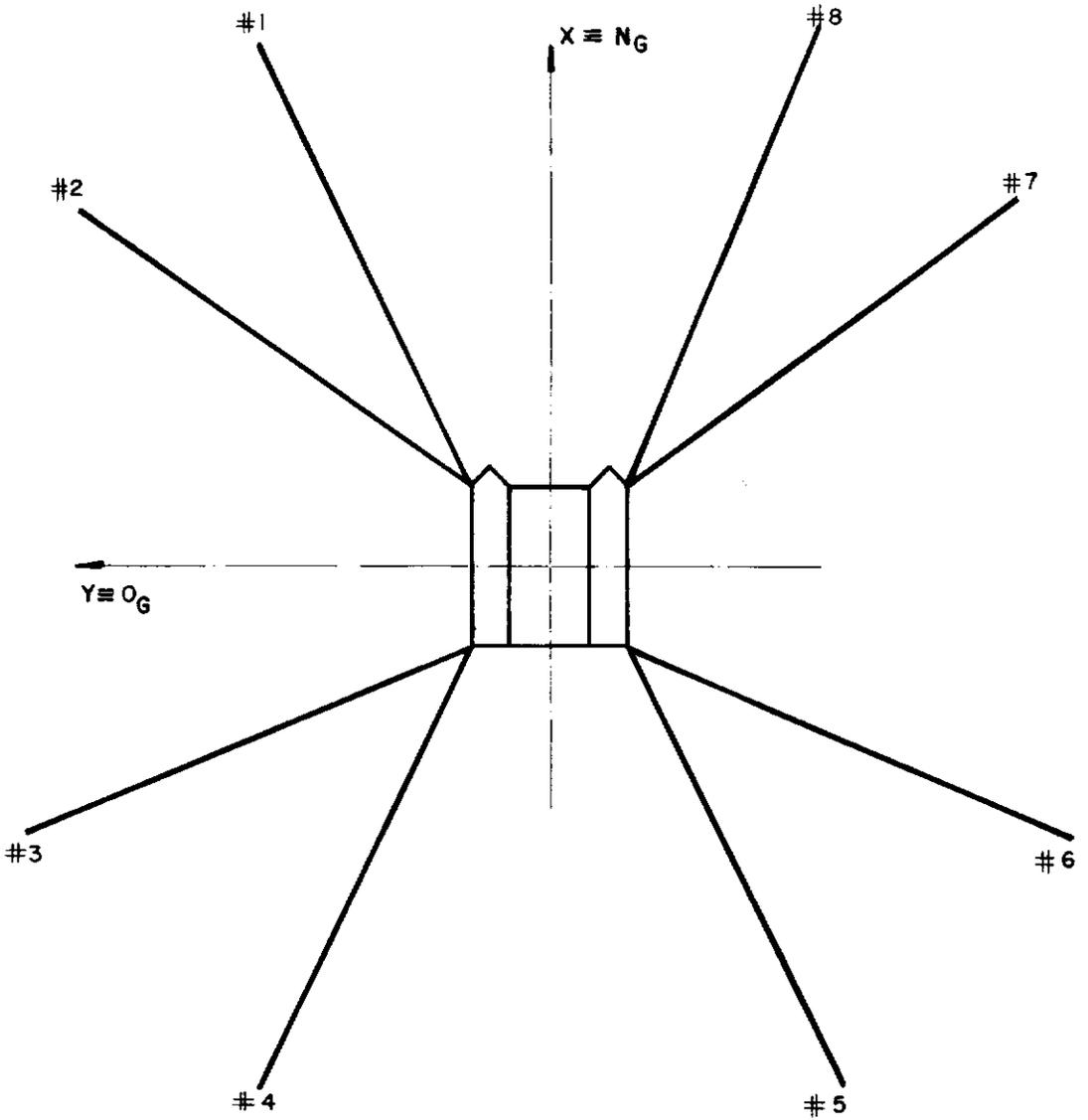


FIGURA II.6 - LOCAÇÃO DA UNIDADE FLUTUANTE.

coeficientes multiplicados pelo quadrado da velocidade do vento fornece a força total de vento atuante na unidade.

A tabela (II.2) apresenta o coeficiente de vento da unidade flutuante, na direção 135°.

Direção (°)	Coeficiente de Vento (KNs ² /m ²)
135	1.63

Tabela II.2

b - Coeficiente de Arraste de Corrente

Os coeficientes de força de corrente foram obtidos através de ensaios e interpolados para o calado atual. Determina-se a força total de corrente sobre a unidade, multiplicando-se o coeficiente de arraste pelo quadrado da velocidade da corrente superficial. Neste caso, necessitou-se considerar também a força de corrente atuante nos "risers". A tabela (II.3) apresenta o coeficiente de corrente da unidade.

Direção (°)	Coeficiente de Corrente (KNs ² /m ²)
135	599.

Tabela II.3

c - Coeficientes Hidrodinâmicos devido às ondas

Três fenômenos básicos, devido às ondas, atuam sobre uma unidade flutuante ancorada: o arraste médio estático, que provoca um deslocamento estático do conjunto, os movimentos de resposta da unidade às ondas, principalmente o "sway" e "surge" e, por fim, as forças oscilatórias de arraste de baixa frequência.

Os dois primeiros fenômenos são levados em conta através do coeficiente de arraste da onda e operadores de amplitude de resposta [RAO], obtidos pelo programa WADAM [11], da mesma forma que a massa adicionada da unidade, que é usada para o cálculo dos movimentos de baixa frequência.

Os [RAO] dos 6 movimentos da unidade flutuante, estão apresentados nas figuras (II.7) a (II.12).

A massa adicionada da unidade flutuante, para o calado de operação é:

Direção (°)	Massa Adicionada (ton)
135	19510.

Tabela II.4 - Massa Adicionada

O amortecimento linear horizontal utilizado na determinação dos movimentos de baixa e alta frequência, foi avaliado a partir de modelos reduzidos:

RAO "SURGE"

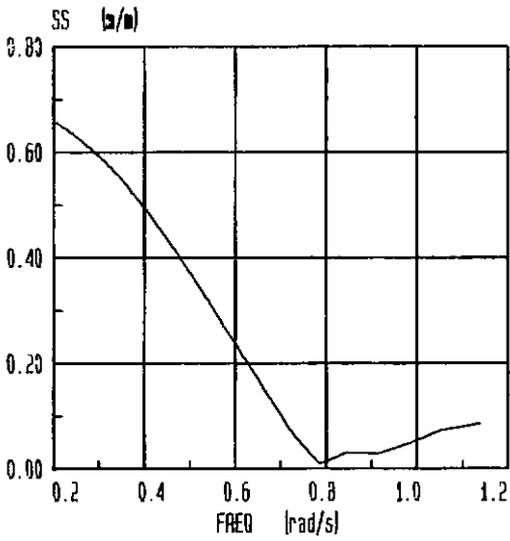


Figura II.7

RAO "SWAY"

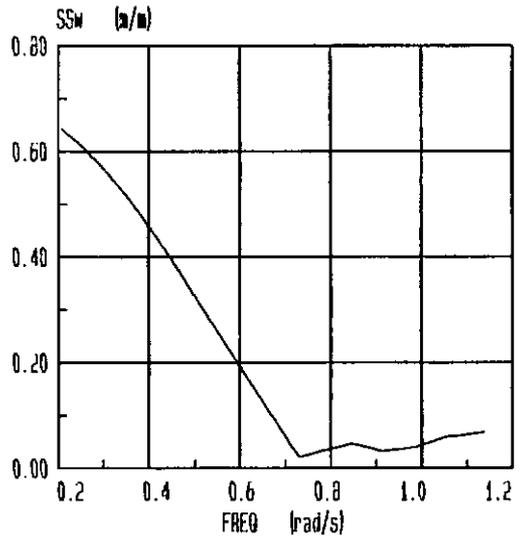


Figura II.8

RAO "HEAVE"

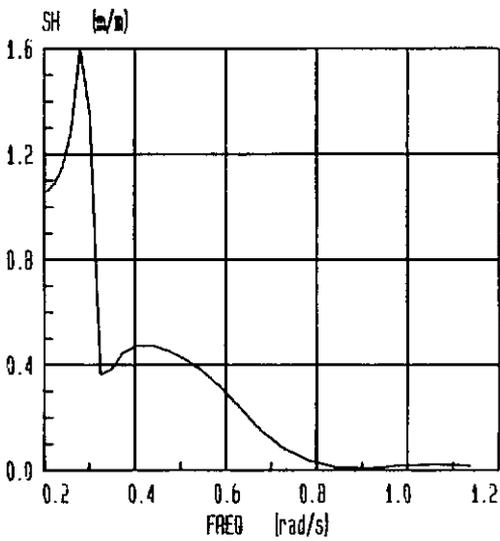


Figura II.9

RAO "ROLL"

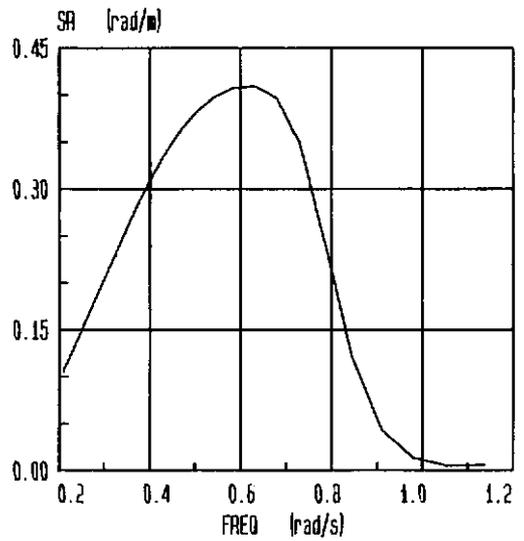


Figura II.10

RAO "PITCH"

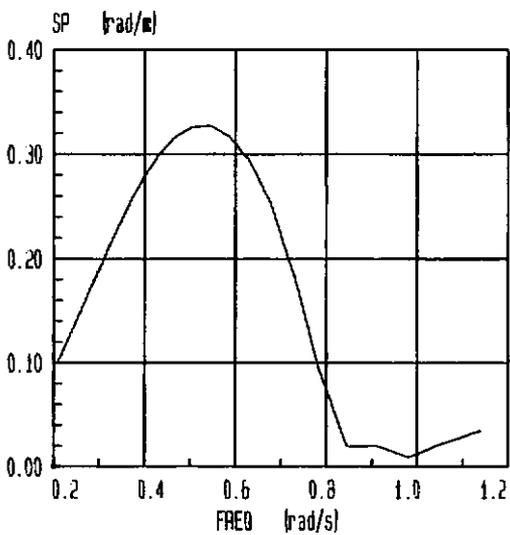


Figura II.11

RAO "YAW"

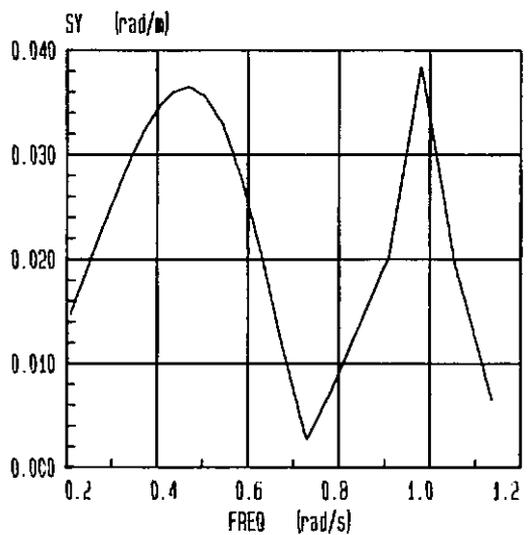


Figura II.12

Direção (α)	Amortecimento
135	0.13

Tabela II.5 - Amortecimento

II.2 - Sistema de Ancoragem

A escolha do padrão de ancoragem é feita através da análise de vários fatores, a saber:

- . função da unidade flutuante;
- . assimetria da unidade flutuante em relação a geometria e solicitações;
- . direcionalidade das condições ambientais.

Para as plataformas flutuantes de produção (SPF), o número de oito (8) linhas é normalmente utilizado. Provavelmente, para as novas gerações de semi-submersíveis de produção, em lâminas de água profundas, o número de linhas cresce, em função da necessidade de maior segurança e redundância e dificuldade de inspeção e manutenção.

A utilização de cabos de aço ou materiais sintéticos e ou amarras, na composição de uma linha de ancoragem está relacionada, diretamente com a razão entre a resistência e o peso próprio da linha.

No caso de águas profundas, o uso de cabos de materiais sintéticos, como o "Kevlar", possui um grande potencial, pois sua densidade é muito pequena, tendo alta resistência. Entretanto, a aplicação destes tipos de cabos, não está completamente avaliada, na prática.

O sistema de ancoragem analisado, com a semi-submersível ancorada a 1000 metros de lâmina d'água, consiste de oito linhas com 3150 metros de comprimento total. O esquema da distribuição é mostrado na figura (II.13), enquanto que a tabela (II.6) contém o resumo da posição de cada linha. A linha de ancoragem figura (II.14),

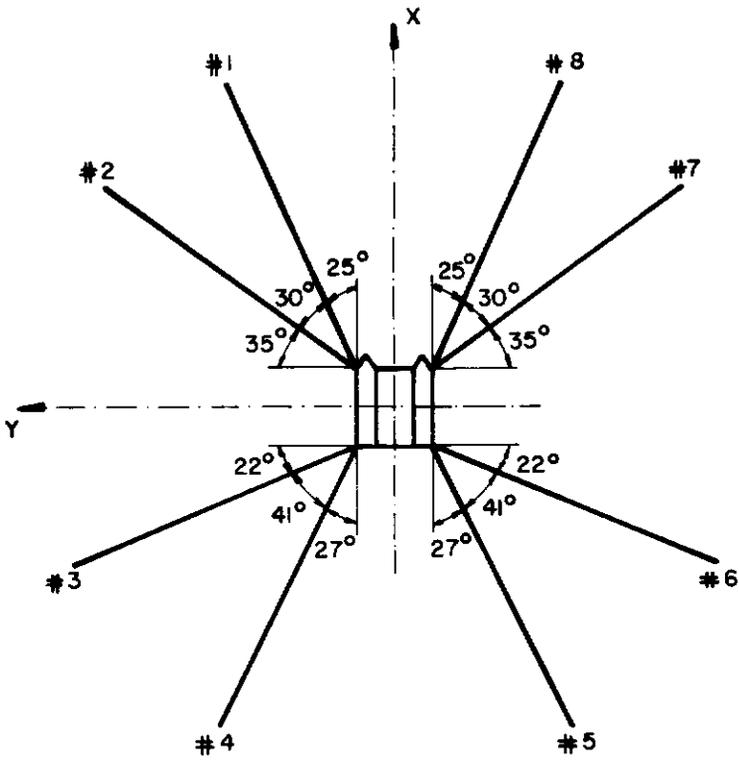


FIGURA II.13 - DISTRIBUIÇÃO DO ESQUEMA DE ANCORAGEM.

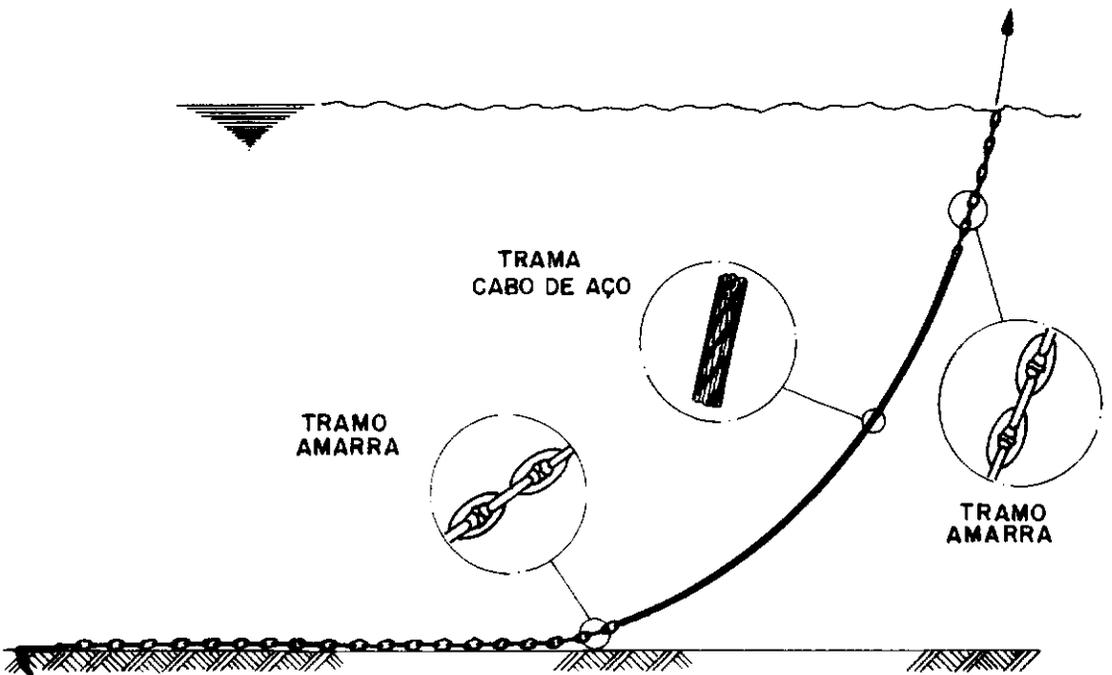


FIGURA II.14 - CONFIGURAÇÃO DA LINHA.

é composta por 3 segmentos, iniciando com 1500 metros de corrente a partir da âncora, passando para cabo com 1500 metros e finalizando com 150 metros de corrente até o "fairlead".

Linha	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	30.80	37.40	-3.95
2	25.50	37.40	-3.95
3	-25.50	37.40	-3.95
4	-30.80	37.40	-3.95
5	-30.80	-37.40	-3.95
6	-25.50	-37.40	-3.95
7	25.50	-37.40	-3.95
8	30.80	-37.40	-3.95

Tabela II.6 - Coordenadas dos "fairleads"

As características geométricas e propriedades físicas de cada segmento da linha são resumidas na tabela (II.7) e foram obtidas dos catálogos dos fabricantes.

Tipo	Amarra	Cabo	Amarra
segmento	1	2	3
diâmetro (mm)	92.	86.	87.
massa (Kg/m)	189.1	35.6	173.1
comprimento (m)	1500.0	1500.0	150.0
peso submerso (N/m)	1611.3	303.8	1474.9
densidade (N/m ³)	7800.0	7878.5	7800.0
massa adicionada (Kg/m)	25.9	6.0	23.2
EA (N)	5.24x10	6.33x10	6.66x10
UBL - carga última de ruptura (KN)	6540.0	6690.0	7700.0

Tabela II.7 - Propriedades geométricas e físicas dos segmentos da linha

Os coeficientes hidrodinâmicos, tabela (II.8), para cada segmento da linha, foram escolhidos baseados em recomendações da Norma API [4].

Parâmetro	Amarra	Cabo
coef. arraste normal	1.75	0.70
coef. arraste tangencial	0.40	0.01
coef. massa adicionada	3.72	1.00

Tabela II.8 - Coeficientes hidrodinâmicos

Na análise dinâmica da linha, no domínio do tempo, mais um parâmetro é necessário, o amortecimento interno do cabo ou amarra, o qual é apresentado abaixo e posteriormente explicado.

Amarra	diam = 92 mm	-	$C = 7.31 \times 10^6$ Ns
	diam = 87 mm	-	$C = 6.54 \times 10^6$ Ns
Cabo	diam = 86 mm	-	$C = 8.71 \times 10^6$ Ns

CAPITULO III

ANÁLISE DINÂMICA DA LINHA ISOLADA

III.1 - Introdução

Conforme mencionado anteriormente, o modelo dinâmico completo, para a solução de uma unidade flutuante ancorada, que considere os efeitos de primeira e segunda ordens acoplados, é extremamente complexo. Com base em hipóteses simplificadoras [4,12], pode-se dividir o sistema em três etapas, a saber:

- . consideração da unidade flutuante isolada, modelada como um corpo rígido, com seis (6) graus de liberdade, submetida à componente de primeira ordem da força de onda;

- . consideração da unidade flutuante ancorada, na posição correspondente ao "offset" estático, isto é, deslocada de sua posição inicial devido à componente estática das forças ambientais, oscilando em função da componente de segunda ordem da força de onda;

- . análise da linha de ancoragem, mais tracionada, isoladamente, submetida a uma tensão média, decorrente do "offset" estático mais a componente máxima do movimento de baixa frequência (efeito de segunda ordem). A linha é excitada pelos movimentos de primeira ordem da unidade flutuante, impostos à sua extremidade superior "fairlead".

Determinada, então a tensão média e a excitação, devida aos movimentos de primeira ordem, a serem aplicadas

no topo da linha, a questão reduz-se a uma linha vibrando em meio fluido, sujeita a peso próprio, empuxo, atrito com o solo, arraste provocado pela corrente, forças elásticas e forças de inércia. Duas técnicas de solução são descritas, a seguir:

. Análise não linear no Domínio do Tempo

Os efeitos não lineares podem ser considerados na análise e a equação de equilíbrio dinâmico é descrita em função do tempo. O movimento imposto à extremidade superior da linha é considerado através de um registro no tempo e a solução é normalmente obtida por um método de integração numérica e como resposta obtém-se históricos de deslocamentos, velocidades, acelerações e tensões, os quais podem também ser tratados estatisticamente.

. Análise no Domínio da Frequência

O modelo é linearizado, assumindo-se que a linha vibre com pequena amplitude, mantendo constante o ponto de contato com o solo, o termo da velocidade ao quadrado da equação de Morison é, também, linearizado e por fim o movimento imposto na extremidade superior da linha é representado por uma componente harmônica.

A equação de equilíbrio dinâmico é resolvida no Domínio da Frequência, obtendo a densidade espectral de resposta, em termos de deslocamentos, velocidades, acelerações e tensões. Uma vez obtida a densidade espectral de resposta, são calculados os parâmetros estatísticos, expressos através de desvio padrão, valor máximo esperado, etc.

A utilização do método dos elementos finitos

para discretizar a linha é adotada por ambos os métodos. Há vários estudos [13,14,15], sobre o tipo de elemento que melhor modele a linha, por ser esta considerada como um cabo em catenária.

A seguir, apresentam-se as equações básicas da catenária, segundo MOURELLE [14]:

A equação diferencial da catenária pode ser obtida a partir da consideração das condições de equilíbrio nas direções horizontal e vertical, de um segmento de cabo, como mostra a figura (III.1).

Equilíbrio Horizontal:

$$\frac{d}{dx_1} (T \cos \theta) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Equilíbrio Vertical:

$$\frac{d}{dx_1} (T \sin \theta) dx_1 + q dx_1 = 0 \quad (\text{III.2})$$

Dividindo por F_H a equação (III.2), tem-se:

$$F_H \frac{d}{dx_1} (\text{tg } \theta) = - q \quad (\text{III.3})$$

Dado que:

$$\text{tg } \theta = dx_2 / dx_1 \quad (\text{III.4})$$

$$q = p_r g ds / dx_1$$

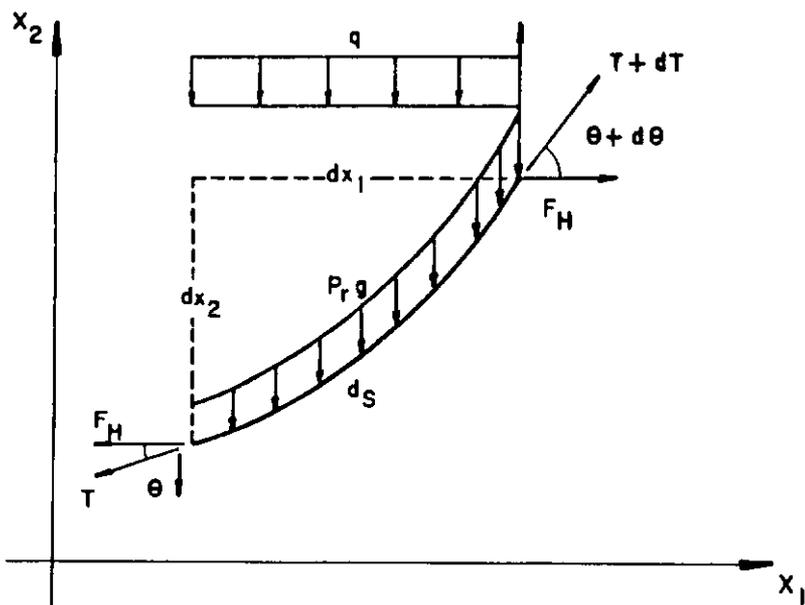


FIGURA III. 1 - ELEMENTO DE CABO.

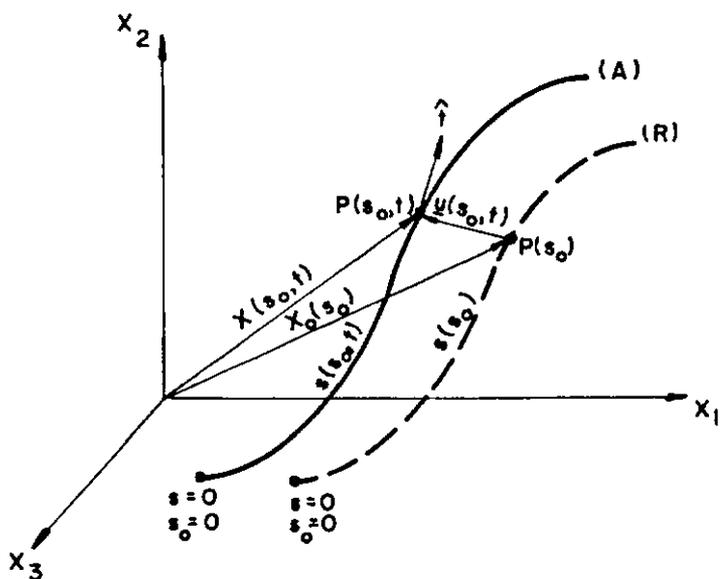


FIGURA III. 2 - CONFIGURAÇÕES DE REFERÊNCIA E ATUAL.

onde,

q = peso submerso do cabo;

p_r = massa específica submersa do cabo;

g = aceleração da gravidade.

Então:

$$F_H \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} dx_1 + p_r g ds = 0 \quad (\text{III.5})$$

Considerando, ainda que:

$$ds^2 = dx_1^2 \left[1 + \left(\frac{dx_2}{dx_1} \right)^2 \right] \quad (\text{III.6})$$

Tem-se:

$$F_H \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} dx_1 + p_r g dx_1 \left[1 + \left(\frac{dx_2}{dx_1} \right)^2 \right]^{1/2} = 0$$

(III.7)

Integrando a equação (III.7) duas vezes e considerando as condições de contorno, obtém-se:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = - \frac{\sinh (p_r g x_1 - \phi)}{F_H} \quad (\text{III.8})$$

$$x_2 = \frac{F_H}{p_r g} \left\{ \cosh \phi - \frac{\cosh (2 \lambda x_1 - \phi)}{H} \right\}$$

(III.9)

onde,

$$\phi = \sinh^{-1} \left[\frac{\lambda (V / H)}{\sinh \lambda} \right] + \lambda \quad (\text{III.10})$$

$$\lambda = \frac{p_r g H}{2 F_H} \quad (\text{III.11})$$

Para se obter o comprimento total do cabo L, calcula-se a integral:

$$L = \int_0^H \frac{ds}{dx_1} dx_1 = \int_0^H \cosh \left(\frac{p_r g x_1 - \phi}{F_H} \right) dx_1$$

(III.12)

$$L = \frac{2 F_H}{p_r g} \sinh \lambda \cosh (\phi - \lambda) \quad (\text{III.13})$$

Foram obtidas as expressões básicas de catenária, apenas para uma recordação. Nos itens seguintes, descrevem-se as duas metodologias de análise dinâmica da linha isolada.

III.2 - Análise Dinâmica no Dominio do Tempo

As linhas são consideradas como estruturas longas e esbeltas, levando-se em conta apenas o esforço de tração e desprezando-se esforços cortantes e momentos.

As mudanças de propriedades devido a ação de carregamentos transversais, as forças de arraste e as condições de contorno, como o contato da linha com o solo marinho, constituem os principais efeitos não lineares da análise, resultando em equações de movimentos não lineares e dependentes do tempo.

Há inúmeros estudos [1,5,6,7,14,16,17] sobre o comportamento dinâmico de cabos, diferenciando-se nas hipóteses adotadas. A teoria apresentada a seguir baseia-se em LINDAHL [5] e vários outros autores [12,15].

. Equações Dinâmicas Básicas de Movimento

As equações dinâmicas de movimento de uma linha de ancoragem, denominada aqui de cabo, são desenvolvidas a partir da segunda Lei de Newton. São apresentadas, a seguir as equações no sistema de coordenadas cartesianas, considerando a massa do cabo constante.

$$p_0 \{ \ddot{x} \} - \frac{\partial}{\partial s_0} (T \cdot \hat{t}) - \{ f_r \} = \{ 0 \} \quad (\text{III.14})$$

onde,

p_0 = massa do cabo por unidade de comprimento inextensível;

$\{ x \}$ = vetor posição do ponto P;

T = tração no cabo;

\hat{t} = vetor unitário tangente a curvatura do cabo no ponto P;

$\{f_r\}$ = vetor de forças atuantes no cabo, tais como, forças de volume e superfície, por unidade de comprimento inextensível;

s_0 = comprimento inextensível do cabo, até o ponto P.

Os símbolos, abaixo, referem-se a:

$$\dot{\quad} = \frac{\partial}{\partial t} ; \quad \{ \quad \} = \text{vetor};$$

$$\ddot{\quad} = \frac{\partial^2}{\partial t^2};$$

$$\prime = \frac{\partial}{\partial s_0} .$$

As variáveis T , t , $\{f_r\}$ e $\{x\}$ são funções das variáveis independentes s_0 e tempo t , nos respectivos intervalos $s_0 \in [0, L]$ e $t \in [0, T_t]$, onde L refere-se ao comprimento total do cabo e T_t ao tempo total de análise.

. Modelo Elástico

Para um pequeno elemento ds_0 , as expressões de deformação são definidas, por:

$$\epsilon = s' - 1 \quad (\text{III.15})$$

$$\tilde{\epsilon} = 1/2 (s'^2 - 1)$$

$$\tilde{\epsilon} = \frac{1}{2} (\{x'\} \cdot \{x'\} - 1) \quad (\text{III.16})$$

onde ϵ e $\tilde{\epsilon}$ relacionam-se pela equação,

$$(1 + \epsilon)^2 = 1 + 2 \tilde{\epsilon} \quad (\text{III.17})$$

o vetor unitário pode ser escrito por:

$$\hat{t} = \frac{x'}{1 + \epsilon} \quad (\text{III.18})$$

Assumindo que a Tração no cabo segue a relação constitutiva, equação (III.19) onde é função da rigidez axial e da deformação.

$$T = K \tilde{\epsilon} (1 + \epsilon) \quad (\text{III.19})$$

onde,

T = tração tangencial no cabo;

K = rigidez axial do cabo.

Restringindo a análise à pequenas deformações, $0 < \epsilon \ll 1$, tem-se a relação seguindo a Lei de Hooke ($T = K \epsilon$).

$$T = K \epsilon \cong K \tilde{\epsilon} \quad (\text{III.20})$$

Substituindo as equações (III.18) e (III.19) na equação (III.14), obtem-se:

$$p_0 \{\ddot{x}\} - \frac{\partial}{\partial s_0} (K \tilde{\epsilon} \{x'\}) - \{f_r\} = \{0\}$$

$$(\text{III.21})$$

É interessante relacionar os deslocamentos do cabo a uma configuração conhecida, denominada de configuração de referência (R), a qual é definida pelo vetor posição $\{x_0(s_0)\}$ e a deformação $\tilde{\epsilon}_0(s_0)$. A figura

(III.2) mostra as configurações de referência e atual.

Considerando, ainda, $\{u\}$ o vetor deslocamento e $\Delta\tilde{\epsilon}$ a deformação incremental entre as configurações atual (A) e de referência (R), tem-se:

$$\{x\} = \{x_0\} + \{u\}$$

$$\{u\} = \{u(s_0, t)\} \quad (\text{III.22})$$

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}_0 + \Delta\tilde{\epsilon}$$

substituindo-os na equação (III.21),

$$p_0 \{\ddot{u}\} - \frac{\partial}{\partial s_0} (K (\tilde{\epsilon}_0 + \Delta\tilde{\epsilon}) (\{x'_0\} + \{u'\})) - \{f_r\} = \{0\} \quad (\text{III.23})$$

$$\tilde{\epsilon}_0 = 1/2 (\{x'_0\} \cdot \{x'_0\} - 1)$$

$$\Delta\tilde{\epsilon} = 1/2 (\{u'\} \cdot \{u'\} + \{x'_0\} \cdot \{u'\})$$

$$(\text{III.24})$$

. Forças agindo no cabo

O vetor de forças $\{f_r\}$ agindo no cabo é composto por forças gravitacionais, forças hidrostáticas e forças hidrodinâmicas, as quais são descritas abaixo.

a. Forças gravitacionais e hidrostáticas

A força hidrostática em um elemento de cabo d_s é causada pela pressão hidrostática agindo na superfície do cabo. No caso de ser um elemento de corrente, é razoável

assumir que a pressão é distribuída por toda a superfície, incluindo as extremidades, pois cada elo da corrente é envolto pela água. Já no caso de cabo de aço, esta suposição não é exata, entretanto o erro induzido é desprezível.

Assume-se, então, que cada elemento ds é completamente envolto pela água e seu volume permanece constante.

A parcela da força, relativa as ações gravitacionais e hidrostáticas, é obtida pela diminuição do peso de água deslocada no peso do cabo, por unidade de comprimento.

$$\{f^1\} = [0 , - p_r g , 0]^T \quad (\text{III.25})$$

$$p_r = \frac{(p_c - p_{ag})}{p_c} p_0 \quad (\text{III.26})$$

onde,

p_r = peso submerso do cabo;

p_c = peso específico do cabo;

p_{ag} = peso específico da água;

g = aceleração da gravidade.

b. Forças hidrodinâmicas

As forças hidrodinâmicas são causadas pela velocidade relativa entre as partículas do meio fluido e o cabo e a aceleração do cabo.

Este estudo limitou-se a avaliar a velocidade do

. Tangencial ao cabo

$$\{f^2\} = 1/2 C_{dt} d_0 p_{ag} | \{v\} \cdot \hat{t} | \{v\} \cdot \hat{t} (1 + \epsilon)$$

(III.28)

onde,

$\{f^2\}$ = vetor de força de arraste tangencial ao cabo, por unidade de comprimento;

C_{dt} = coeficiente de arraste do cabo.

. Normal ao cabo

$$\{f^3\} = 1/2 C_{dn} d_0 p_{ag} | \{v\} - \{v\} \cdot \hat{t} \hat{t} | .$$

$$(\{v\} - \{v\} \cdot \hat{t} \hat{t}) (1 + \epsilon)$$

(III.29)

onde,

$\{f^3\}$ = vetor de força de arraste normal ao cabo, por unidade de comprimento;

C_{dn} = coeficiente de arraste normal ao cabo.

Finalmente, calcula-se a parcela de força de inércia devida a massa adicionada.

. Tangencial ao cabo

$$\{f^4\} = \Pi/4 C_{mt} d_0^2 p_{ag} (\{\ddot{u}\} \cdot \hat{t}) (1 + \epsilon)$$

(III.30)

onde,

$\{f^4\}$ = vetor de força de inércia tangencial ao cabo,
por unidade de comprimento;

C_{mt} = coeficiente de massa adicionada tangencial.

. Normal ao cabo

$$\{f^5\} = \Pi/4 C_{mn} d_0^2 p_{ag} (\{\ddot{u}\} - \{\ddot{u}\} \cdot \hat{t}\hat{t}) (1 + \epsilon)$$

(III.31)

onde,

$\{f^5\}$ = vetor de força de inércia normal ao cabo, por
unidade de comprimento;

C_{mn} = coeficiente de massa adicionada normal ao cabo.

Desprezando a parcela de força de inércia na direção tangencial, a força resultante agindo no cabo é expressa como:

$$\{f_r\} = \{f^1\} + \{f^2\} + \{f^3\} + \{f^5\}$$

Substituindo as equações das forças na equação (III.23) e utilizando a equação (III.18) para as devidas modificações, obtém-se a equação de movimento completa.

$$p_0 \{\ddot{u}\} + C_1 (1 + \epsilon) \{\ddot{u}\} - (C_1 / (1 + \epsilon)) (\{\ddot{u}\} \cdot \{x'\}) \{x'\}$$

$$- \frac{\partial}{\partial s_0} (K \tilde{\epsilon} \{x'\}) - \{f\} = \{0\}$$

(III.32)

$$\{f\} = [0, -p_r, g, 0]^T + C_2 \{v\} \cdot \{x'\} |(\{v\} \cdot \{x'\}) \{x'\} 1/(1+\epsilon)^2 +$$

$$C_3 [\{v\} \cdot \{v\} - 1/(1+\epsilon)^2 (\{v\} \cdot \{x'\})^2]^{1/2}.$$

$$(\{v\} - (\{v\} \cdot \{x'\}) \{x'\} 1/(1+\epsilon)^2) (1+\epsilon)$$

onde,

$$C_1 = \Pi/4 C_{mn} d_0^2 P_{ag}$$

$$C_2 = 1/2 C_{dt} d_0 P_{ag}$$

$$C_3 = 1/2 C_{dn} d_0 P_{ag}$$

. Solução Numérica

As equações de movimento (III.32) são constituídas de equações diferenciais parciais não lineares, as quais podem ser transformadas em equações diferenciais ordinárias pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais. BATHE [15] faz uma descrição da utilização do Princípio dos Trabalhos Virtuais em uma análise de elementos finitos.

Considerando o cabo sujeito a um pequeno deslocamento $\{\delta u\}$ em relação a sua configuração atual (A) no tempo t , o Trabalho Virtual realizado pelas forças é expresso, pela integração, ao longo do comprimento L do cabo, do produto escalar de $\{\delta u\}$ pela equação (III.32):

$$\int_0^L (p_0 \{\ddot{u}\} + C_1 (1+\epsilon) \{\ddot{u}\} - (C_1 / (1+\epsilon)) (\{\ddot{u}\} \cdot \{x'\}) \{x'\}) \cdot \{\delta u\} - \{f\} \cdot \{\delta u\} + K \tilde{\epsilon}\{x'\} \cdot \{\delta u'\}) ds_0 - (K \tilde{\epsilon}\{x'\} \cdot \{\delta u\})_0^L = 0$$

(III.33)

O último termo da equação (III.33) é obtido pela integração parcial da expressão:

$$\int_0^L \frac{\partial}{\partial s_0} (K \tilde{\epsilon}\{x'\}) \cdot \{u\} ds_0 \quad (\text{III.34})$$

e representa o Trabalho Virtual realizado pelas forças agindo nas extremidades do cabo.

O cabo, agora, é composto por n_e elementos independentes, com comprimentos inextensíveis l_j . Para cada elemento j , o comprimento s_0 é expresso por:

$$s_0 = s_j + \xi_j l_j \quad (\text{III.35})$$

$$s_0 \in [0, L], \xi_j \in [0, 1] \text{ e } L = \sum_1^{n_e} l_j$$

onde há uma troca da variável s_0 por ξ_j .

Considerando por simplicidade, o último termo da equação (III.33) nulo e substituindo a equação (III.35),

tem-se:

$$\sum_{j=1}^{n_e} \int_0^1 \left[\left[p_0 \{\ddot{u}\} + C_1 (1+\epsilon) \{\ddot{u}\} - \frac{C_1}{(1+\epsilon) l_j^2} (\{\ddot{u}\} \cdot \{\partial x\}) \frac{\{\partial x\}}{\partial \xi_j} \right] \cdot \{\delta u\} - \{f\} \cdot \{\delta u\} + \frac{K \tilde{\epsilon}}{l_j^2} \frac{\{\partial x\}}{\partial \xi_j} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_j} (\delta u) \right\} \right] l_j d\xi_j = \{0\}$$

(III.36)

Para cada elemento finito j , todas as variáveis são consideradas contínuas e aproximadas pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 \cdot \{u(\xi_j, t)\} &= [A(\xi_j)] \{p_j(t)\} \\
 \cdot \{x_0(\xi_j)\} &= [A(\xi_j)] \{r_{0j}(t)\} \\
 \cdot \{x(\xi_j, t)\} &= [A(\xi_j)] \{r_j(t)\} \\
 \cdot \{v(\xi_j, t)\} &= [A(\xi_j)] \{v_j(t)\} \\
 \cdot \{v_c(\xi_j, t)\} &= [A(\xi_j)] \{v_{cj}(t)\} \\
 \cdot \{\delta u(\xi_j, t)\} &= [A(\xi_j)] \{\delta p_j(t)\}
 \end{aligned}
 \tag{III.37}$$

$$\xi_j \in [0, 1] \quad \text{e} \quad j = 1, n_e$$

$$[A] = \begin{bmatrix} (1-\xi_j) & 0 & 0 & \xi_j & 0 & 0 \\ 0 & (1-\xi_j) & 0 & 0 & \xi_j & 0 \\ 0 & 0 & (1-\xi_j) & 0 & 0 & \xi_j \end{bmatrix}$$

$$\tag{III.38}$$

onde,

$\{u(\xi_j, t)\}$ = vetor de deslocamentos num ponto dentro do elemento j ;

$\{p_j\}$ = vetor de deslocamento nodal do elemento j ;

$[A]$ = matriz de funções de forma linear.

A partir das equações (III.22), (III.27) e (III.37), tem-se:

$$\{r_j\} = \{r_{0j}\} + \{p_j\}$$

$$\{v_j\} = \{v_{cj}\} - \{\dot{p}_j\}$$

onde,

$\{r_j\}$ = vetor posição nodal do elemento j na configuração (A);

$\{r_{0j}\}$ = vetor posição nodal do elemento j na configuração (R);

$\{v_j\}$ = vetor de velocidade relativa do elemento j ;

$\{v_{cj}\}$ = vetor de velocidade do fluido no elemento j .

No propósito de obter uma fácil inversão da matriz de massa, algumas aproximações são adotadas com respeito às acelerações e deslocamentos virtuais associados às forças de inércia.

$$\{\ddot{u}(\xi_j, t)\} = [\tilde{A}] \{\ddot{p}_j(t)\}$$

(III.39)

$$\{\delta u(\xi_j, t)\} = [\tilde{A}] \{\delta p_j(t)\}$$

$$[\tilde{A}] = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 & \psi_2 & 0 & 0 \\ 0 & \psi_1 & 0 & 0 & \psi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \psi_1 & 0 & 0 & \psi_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

onde,

$$\psi_1 = 1 \quad \text{e} \quad \psi_2 = 0 \quad \text{para} \quad \xi_j \in [0, 1/2]$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{e} \quad \psi_2 = 1 \quad \text{para} \quad \xi_j \in [1/2, 1]$$

Os vetores nodais do elemento j são relacionados com os vetores globais através da matriz de conexão $[C_j]$, como por exemplo:

$$\{p_j\} = [C_j] \{p\}$$

$$\{r_{0j}\} = [C_j] \{r_0\} \quad (\text{III.41})$$

$$\{\delta p_j\} = [C_j] \{\delta p\}$$

Substituindo as equações (III.37), (III.39) e (III.41) na equação (III.36), obtem-se:

$$\sum_{j=1}^{n_e} \int_0^1 \{\delta p\}^T \left(([C_j]^T l_j (p_0 + C_1 (1 + \epsilon_j)) [E_2] [C_j] \{\tilde{p}\} - [C_j]^T (C_1 / (1 + \epsilon_j) l_j) [D_2] \{r_j\} \{r_j\}^T [D_2]^T [C_j] \{\tilde{p}\} - [C_j]^T l_j [A]^T \{f\} + [C_j]^T [G] \{r_j\} \kappa \tilde{\epsilon}_j / l_j) d\xi_j = \{0\} \right)$$

onde,

$$[B] = \left[\frac{\partial A}{\partial \xi_j} \right] \quad [E]_2 = [\tilde{A}]^T [\tilde{A}]$$

$$[G] = [B]^T [B] \quad [D]_2 = [\tilde{A}]^T [B]$$

Como $\{\delta p\}$ pode ser arbitrado, obtém-se as equações de movimento na forma abaixo:

$$[M] \{\ddot{p}\} = \{R\} - \{F\} \quad (\text{III.43})$$

onde,

$[M]$ = matriz de massa do sistema;

$\{R\}$ = vetor de forças externas;

$\{F\}$ = vetor de esforços do cabo.

Sendo,

$$[M] = \sum_{j=1}^{n_e} [C_j]^T \{m_j\} [C_j] \quad (\text{III.44})$$

$$\{R\} = \sum_{j=1}^{n_e} [C_j]^T (\{R_j^1\} + \{R_j^2\} + \{R_j^3\}) \quad (\text{III.45})$$

$$\{F\} = \sum_{j=1}^{n_e} [C_j]^T \int_0^1 K \tilde{\epsilon}_j / l_j [G] \{r_j\} d\xi_j \quad (\text{III.46})$$

BERGDAHL [9] propôs acrescentar às forças internas, equação (III.46), o amortecimento interno do elemento, cuja introdução dá-se por:

$$T_c = C \dot{\epsilon} \quad (\text{III.47})$$

$$T = K \tilde{\epsilon} (1 + \dot{\epsilon}) + C \dot{\epsilon} \quad (\text{III.48})$$

Substituindo as equações em (III.46), tem-se:

$$\{F\} = \sum_{j=1}^{ne} [C_j]^T \int_0^1 (K \tilde{\epsilon}_j / l_j + C \dot{\tilde{\epsilon}}_j / (1 + 2\tilde{\epsilon}_j) l_j) [G] \{r_j\} d\tilde{\epsilon}_j$$

(III.49)

O amortecimento interno é determinado, segundo KAWASHIMA e KIMURA [9], como:

$$C = C_c A_0 \quad (III.50)$$

onde,

C = amortecimento interno;

C_c = amortecimento interno por unidade de área seccional;

A_0 = área seccional.

. Equações de Equilíbrio

Para resolução do sistema, é necessário inicialmente, obter o equilíbrio estático da linha às forças gravitacionais e hidrostáticas.

A configuração de referência (R) é definida pelo vetor de coordenada nodal global $\{r_0\}$, o qual deriva das equações de equilíbrio. Considerando adicionalmente, a reação do solo, através de molas bilineares elásticas e as condições de contorno, tem-se:

$$\{R^1\} - \{F_0\} + \{R_s\} = \{0\} \quad (III.51)$$

onde,

$\{R^1\}$ = vetor forças gravitacionais e hidrostáticas;

$\{F_0\}$ = vetor de forças internas do cabo;

$\{R_s\}$ = vetor de reações do solo.

As equações (III.51) são resolvidas iterativamente com respeito a $\{r_0\}$, ou seja, são realizadas sucessivas atualizações da configuração de referência correspondente aos aumentos graduais no nível das forças gravitacionais e hidrostáticas. A configuração estática final $\{r_0\}$ é obtida quando o valor total das forças gravitacionais e hidrostáticas estiver agindo no cabo e, refere-se a condição inicial da análise dependente do tempo. A implementação computacional da resolução da equação (III.51), pode ser feita através de qualquer método numérico iterativo.

. Equações de Movimentos Discretizados

Considerando na equação (III.43) as condições de contorno nas extremidades do cabo, tem-se:

$$[M] \{\ddot{p}\} = \{\tilde{R}\} - \{\tilde{F}\} \quad (\text{III.52})$$

Pré-multiplicando a equação (III.52) por $[M]^{-1}$, obtem-se:

$$\{\ddot{p}\} = [M]^{-1} (\{\tilde{R}\} - \{\tilde{F}\}) \quad (\text{III.53})$$

Para considerar as condições de contorno, algumas modificações são necessárias, tais como, deslocamentos prescritos nas extremidades do cabo, contato com o solo marinho, etc.

Na análise no tempo, simula-se o solo marinho como rígido e absorvendo energia. Apenas consideram-se forças de atrito agindo na direção oposta ao movimento do nó. Admitindo que o nó k se move ao fundo com uma velocidade $\{\dot{p}_3\}$, a formulação da força de atrito é obtida da figura (III.3), como:

$$F_f = \begin{cases} \frac{\dot{p}_3^k}{C_v} v |R_k^1| & , \dot{p}_3 < C_v \\ v |R_k^1| & , \dot{p}_3 > C_v \end{cases} \quad (\text{III.54})$$

onde,

F_f = força de atrito;

$|R_k^1|$ = forças gravitacionais e hidrostáticas do nó k ;

v = coeficiente de atrito;

C_v = tolerância para evitar problemas numéricos;

\dot{p}_3^k = velocidade na direção horizontal do nó k .

Para cada nó que tenha contato com o solo marinho, calcula-se a força de atrito e adiciona-se na equação (III.53) que pode ser reescrita na forma:

$$\{\ddot{\tilde{p}}\} = f(\{\tilde{p}\}, \{\dot{\tilde{p}}\}) \quad (\text{III.55})$$

A equação (III.55) é considerada como um sistema de equações ordinárias com coeficientes constantes, cujo significado é de que qualquer conjunto de expressões que

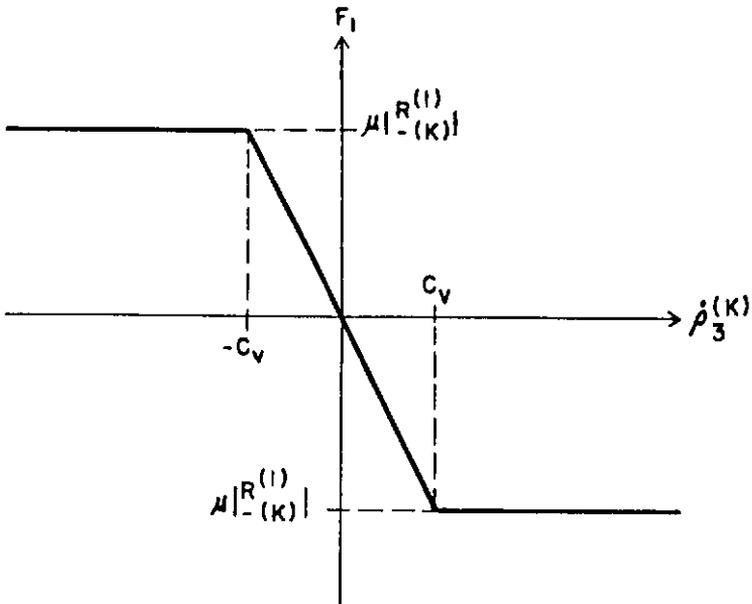


FIGURA III. 3 - FORÇA DE ATRITO.

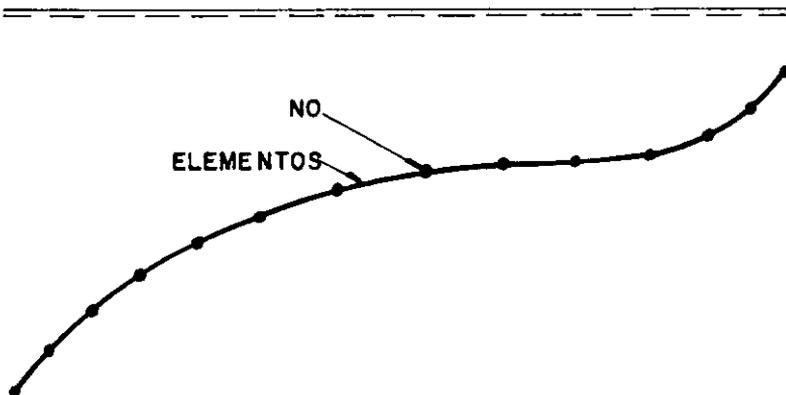


FIGURA III. 4 - SISTEMA DISCRETIZADO.

aproxima acelerações e velocidades como função dos deslocamentos pode ser utilizado, no entanto, algumas formas de aproximação já foram identificadas como mais eficientes. Um procedimento preciso na solução destes problemas é o método das diferenças centrais.

A integração no tempo das equações (III.55), pode ser resolvida por um método numérico explícito. Assumindo que $\{\ddot{p}\}$ no tempo t e $\{\ddot{p}\}$ nos tempos t e $t - \Delta t/2$, são conhecidos, as acelerações no tempo t podem ser, então calculadas da seguinte forma:

$$\{\ddot{p}^t\} = f(\{\dot{p}^t\}, \{\ddot{p}^t\}) \quad (\text{III.56})$$

então, através de diferenças centradas, tem-se:

$$\{\ddot{p}^{t+\Delta t/2}\} = \{\ddot{p}^{t+\Delta t/2}\} + \Delta t \{\ddot{p}^t\} \quad (\text{III.57})$$

e, por extrapolação:

$$\{\ddot{p}^{t+\Delta t}\} = \{\ddot{p}^{t+\Delta t/2}\} + 1/2 (\{\ddot{p}^{t+\Delta t/2}\} - \{\ddot{p}^{t-\Delta t/2}\})$$

$$(\text{III.58})$$

finalmente, os deslocamentos são obtidos também pela fórmula de diferenças centradas:

$$\{\ddot{p}^{t+\Delta t}\} = \{\ddot{p}^t\} + \Delta t \{\ddot{p}^{t+\Delta t/2}\} \quad (\text{III.59})$$

Nesta solução, é necessário que as equações de equilíbrio sejam resolvidas corretamente a cada intervalo de tempo, sob o risco de se acumular erros que não poderão

ser corrigidos posteriormente. Para garantir a solução correta, é necessário que se utilize intervalos de tempo pequenos. Para esta aplicação, o limite superior de Δt é dado por:

$$\Delta t < l_{j\min} / C_0 \quad (\text{III.60})$$

$$C_0 = [K / p_0]^{1/2}$$

onde,

$l_{j\min}$ = menor comprimento do elemento;

C_0 = velocidade longitudinal da onda no cabo ou
velocidade da tensão longitudinal.

Esta aplicação é um caso típico de propagação de ondas, cuja principal característica é o número grande de modos naturais que são excitados, ficando difícil determinar uma frequência de corte, a partir da qual a estrutura responda estaticamente.

O método de integração explícita parece ser ineficiente, comparado com o método implícito para solução da equação (III.55), por ter que considerar pequenos intervalos de tempo. Entretanto, o esforço computacional de cálculo para cada Δt é muito menor, tornando-o eficaz.

III.3 - Análise Dinâmica no Domínio da Frequência

A linha de ancoragem (cabo) é modelada por elementos finitos, desprezando os esforços cortantes e momentos, e apenas considerando o esforço de tração.

Conforme mencionado, a priori, são realizadas algumas linearizações das equações.

. Equações Dinâmicas Básicas de Movimento

A forma geral das equações de movimento do sistema global, correspondente aos deslocamentos nodais, para o caso de um sistema com comportamento linear:

$$[M] \{\ddot{p}(t)\} + [C] \{\dot{p}(t)\} + [K] \{p(t)\} = \{F(t)\}$$

(III.61)

onde,

[M] = matriz de massa total do sistema;

[C] = matriz de amortecimento;

[K] = matriz de rigidez do sistema;

{p} = vetor de deslocamentos nodais global;

{F} = vetor de forças nodais externas.

A matriz de massa total [M] do sistema é dada por:

$$[M] = \sum_{j=1}^{ne} [C_j]^T [m_j] [C_j] \quad (\text{III.62})$$

onde,

[m_j] = matriz de massa do elemento j.

$$[m_j] = \int_0^1 p_0 [A(\xi_j)]^T [A(\xi_j)] l_j d\xi_j$$

(III.63)

A matriz [C] representa a parcela de amortecimento, a qual contabiliza a energia dissipada durante a vibração, pela introdução de forças de amortecimento, dependentes da velocidade.

A matriz de rigidez linear do sistema [K] é obtida, a partir de:

$$[K] = \sum_{j=1}^{ne} [C_j]^T [k_j] [C_j] \quad (\text{III.64})$$

onde,

$[k_j]$ = matriz de rigidez do elemento j.

Os elementos j são modelados por elementos lineares, os quais seguem a relação constitutiva $T = K \epsilon$, portanto a matriz de rigidez pode ser escrita por:

$$[k_j] = \int_0^1 (EA_j / l_j) [B]^T [B] d\xi_j$$

(III.65)

$$[B] = \left[\frac{\partial A_j}{\partial \xi_j} \right] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(III.66)

onde,

E = módulo de elasticidade do elemento;

A_j = seção transversal do elemento.

O vetor $\{F\}$ representa o somatório das forças externas que atuam sobre o elemento.

Na descrição da análise dinâmica no domínio do tempo, foram apresentadas as formulações das forças externas, considerando as não linearidades. No caso do domínio da frequência, algumas linearizações são adotadas.

a. Forças gravitacionais e hidrostáticas

A parcela da força relativa às forças gravitacionais e hidrostáticas, é considerada constante durante a análise e é obtida por:

$$\{f^1\} = ((\{p_c\} - \{p_{ag}\}) / p_c) p_0 A_j$$

(III.67)

b. Forças hidrodinâmicas

As forças hidrodinâmicas são causadas pela velocidade relativa entre as velocidades do meio fluido e a do cabo ao quadrado e a aceleração do cabo. Sem o emprego de técnicas de simulação, é necessário recorrer a técnicas de linearização da força de arraste.

A força de arraste é decomposta em uma componente normal e outra tangencial, expressas como:

$$\{v\} = \{v_c\} - \{\dot{u}\}$$

$$\{v_t\} = \{v\} \cdot \hat{t} \hat{t} \quad \text{(III.68)}$$

$$\{v_n\} = \{v\} - \{v_t\}$$

$$|v| \{v\} = |v_c| \{v_c\} - |v_c| \{u\}$$

. tangencial ao cabo

$$\{f^2\} = 1/2 C_{dt} d_0 P_{ag} (|v_{ct}| \{v_{ct}\} - |v_{ct}| \{\dot{u}_t\})$$

(III.69)

. normal ao cabo

$$\{f^3\} = 1/2 C_{dn} d_0 P_{ag} (|v_{cn}| \{v_{cn}\} - |v_{cn}| \{\dot{u}_n\})$$

(III.70)

As parcelas normal e tangencial da força de inércia, devida a massa adicionada, são adicionadas à massa do sistema e são determinadas por:

. Tangencial ao cabo

$$\{f^4\} = - \Pi / 4 C_{mt} d_0^2 P_{ag} \{\ddot{u}_t\} \quad (III.71)$$

. Normal ao cabo

$$\{f^5\} = - \Pi / 4 C_{mn} d_0^2 P_{ag} \{\ddot{u}_n\} \quad (III.72)$$

A força resultante agindo no cabo é expressa,

como:

$$\{F\} = \{f^1\} + \{f^2\} + \{f^3\} \quad (\text{III.73})$$

Considerando na forma incremental as equações de movimentos (III.61), tem-se:

$$[M] \{\Delta\ddot{p}(t)\} - [C] \{\Delta\dot{p}(t)\} + [K] \{\Delta p(t)\} = \{\Delta F(t)\}$$

$$(\text{III.74})$$

onde,

$$\Delta p = p^{t+\Delta t} - p^t$$

A aproximação clássica para analisar os movimentos induzidos pelo mar, carregamento aleatório em forma de densidade espectral, é transformar as equações incrementais para o domínio da frequência e utilizar técnicas de superposição.

Analisando $\{F(t)\}$, como uma excitação harmônica, pode-se expressar pela parte real de:

$$\{F(t)\} = \text{Re} (\{F_0\} e^{i\omega t}) \quad (\text{III.75})$$

onde,

$\{F_0\}$ = vetor que contém as amplitudes complexas.

Portanto, quando a excitação for expressa por (III.75) a solução do regime permanente do sistema de equações (III.74) é dada pela parte real de:

$$\{p(t)\} = \text{Re} (\{P_0\} e^{i\omega t})$$

$$\{\dot{p}(t)\} = iw \{p(t)\} \quad (\text{III.76})$$

$$\{\ddot{p}(t)\} = -w^2 \{p(t)\}$$

As técnicas de obtenção da resposta aleatória no domínio da frequência, permitem determinar a densidade espectral da resposta $S_p(w)$ diretamente, a partir da densidade espectral da solicitação $S_f(w)$, em função da resposta em frequência da estrutura $H(w)$, através da seguinte relação:

$$[S_p(w)] = [H(w)] [S_f(w)] [\hat{H}(w)] \quad (\text{III.77})$$

onde,

$[\hat{H}(w)]$ = matriz complexa conjugada da transposta de $[H(w)]$.

$$[H(w)] = [-w^2 [M] + iw [C] + [K]]^{-1}$$

$$(\text{III.78})$$

A função da resposta em frequência do sistema estrutural é obtida resolvendo a equação (III.78) para um número suficiente de frequências.

$$[-w^2 [M] + iw [C] + [K]] [H(w)] = [I]$$

$$(\text{III.79})$$

. Determinação dos valores extremos esperados

E uma vez conhecida a densidade espectral

da resposta da estrutura, por exemplo $S_x(w)$, os parâmetros estatísticos da mesma podem ser determinados, como o desvio padrão da resposta, a frequência média esperada, o valor máximo esperado da resposta em função da duração T da solicitação, etc.

A análise espectral, neste trabalho, é utilizada para dois propósitos. Primeiramente, para simular os movimentos da unidade flutuante a partir de um espectro de mar e por fim, para analisar os resultados da série temporal de tensões no cabo.

Os valores estatísticos importantes para a avaliação dos espectros de resposta, são fornecidos a seguir.

Os momentos espectrais m_n de um espectro $S_x(w)$, são definidos como:

$$m_n = \int_0^{\infty} w^n S_x(w) dw \quad (\text{III.80})$$

Em particular, o momento de ordem zero está diretamente relacionado com o desvio padrão da variável, representando a área sob a curva do espectro $S_x(w)$.

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^{\infty} S_x(w) dw \quad (\text{III.81})$$

onde,

$m_0 = \text{variância.}$

Denomina-se variância a dispersão do valor X com respeito a média, ou seja, a diferença entre o valor médio

quadrático e o valor médio ao quadrado. Desenvolvendo a expressão, tem-se:

$$\sigma^2 = E[x^2] - (E[x])^2 \quad (\text{III.82})$$

onde,

$E[x^2]$ = valor médio quadrático;

$E[x]$ = valor médio.

sendo o desvio padrão, a raiz quadrada da variância:

$$\sigma = [m_2]^{1/2} \quad (\text{III.83})$$

Outra característica do espectro $S_x(w)$ é a frequência média de "zero up-crossing", w_z :

$$w_z = [m_2 / m_0]^{1/2} \quad (\text{III.84})$$

E por fim, a largura do espectro $S_x(w)$, definida por :

$$\epsilon = [1 - m_2^2 / m_0 m_4]^{1/2} \quad (\text{III.85})$$

A partir da largura do espectro ϵ , pode-se determinar se o processo é de banda estreita ou banda larga. Nos casos extremos de $\epsilon = 0$, o processo é de banda infinitamente estreita e de $\epsilon = 1$, o processo é de banda infinitamente larga.

Para um processo de banda estreita, $\epsilon \rightarrow 0$, a distribuição de máximos segue a distribuição de Rayleigh:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2} ; 0 < x < \infty$$

(III.86)

O valor máximo esperado que pode ocorrer uma vez em N ciclos, é obtido, estatisticamente utilizando a formulação de LONGUET-HIGGINS [18].

$$E [x_{\max}] = 2m_0 [(\ln N)^{1/2} + 0.2886 (\ln N)^{-1/2}]$$

(III.87)

Desprezando o último termo, tem-se:

$$E [x_{\max}] = \sigma [2 \ln N]^{1/2} \quad \text{(III.88)}$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DINÂMICA DA UNIDADE FLUTUANTE ANCORADA

IV.1 - Introdução

A análise dinâmica da linha isolada, seja no domínio da frequência ou no domínio do tempo, requer dados iniciais relativos ao comportamento da unidade flutuante ancorada, tais como, o equilíbrio estático do sistema e os movimentos da unidade na extremidade da linha.

O fluxograma apresentado na figura (IV.1) contém a sequência básica de análise de uma linha de ancoragem.

A partir das características geométricas e hidrodinâmicas da unidade flutuante e do sistema de ancoragem, juntamente com os dados ambientais, determinam-se as forças estáticas ambientais, os movimentos de primeira e segunda ordens devido à onda.

A combinação das forças estáticas ambientais com os movimentos de segunda ordem devido à onda fornece a configuração estática da unidade flutuante ancorada e conseqüentemente, a linha de ancoragem mais solicitada.

As condições de contorno para a execução da análise dinâmica da linha isolada, são constituídas da configuração estática adicionada dos movimentos de primeira ordem da unidade flutuante.

Os movimentos de primeira ordem são fornecidos, na análise no domínio da frequência, na forma de função de densidade espectral de movimentos, já para o caso de integração no tempo, os movimentos são fornecidos na forma

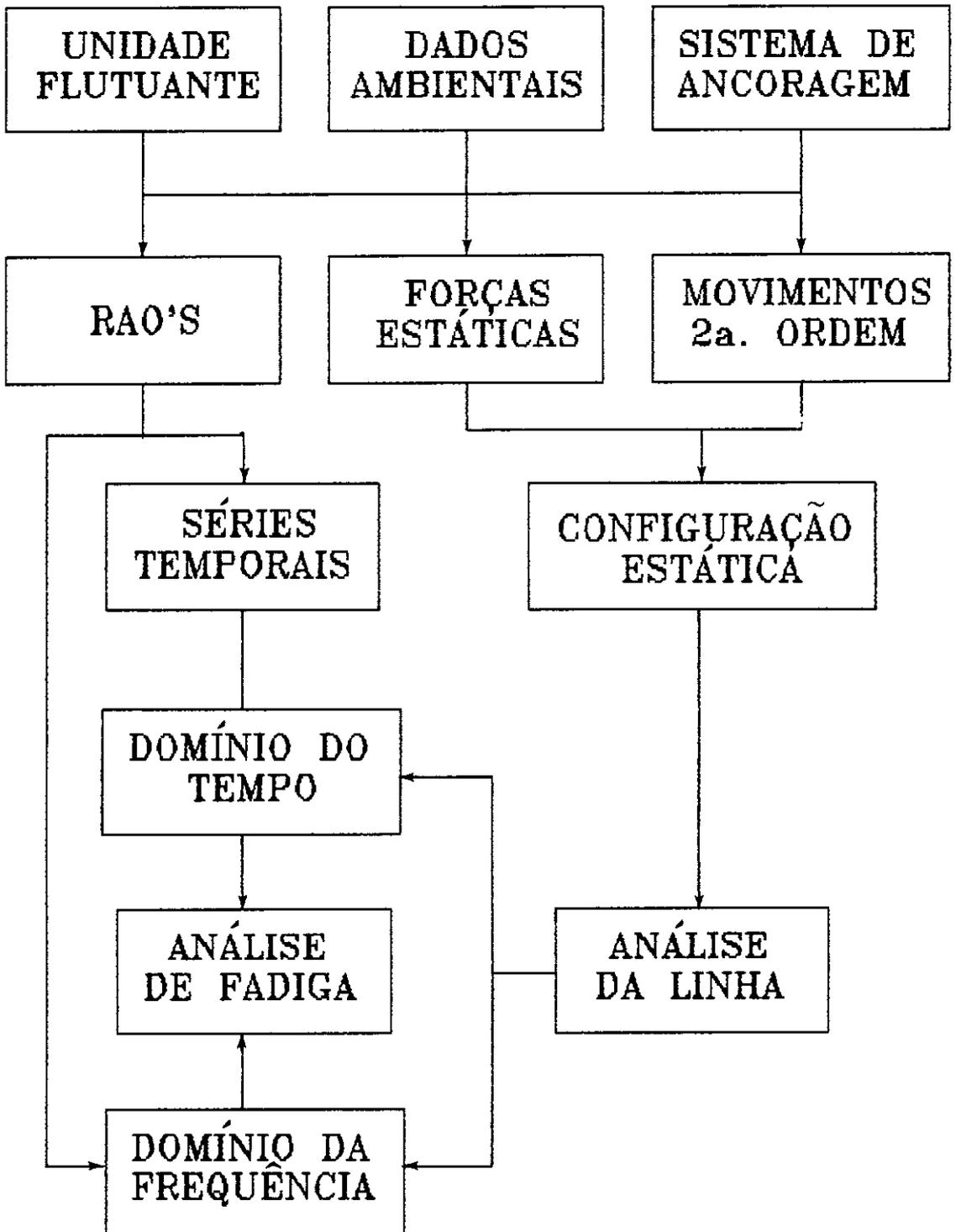


FIGURA IV.1 - FLUXOGRAMA DA ANÁLISE

de séries temporais de movimentos

Neste trabalho, a análise dinâmica no domínio da frequência é usada para dois propósitos. O primeiro é para simular os movimentos da unidade, a partir de um espectro de mar e o segundo é para analisar a linha dinamicamente. Este capítulo é reservado para a primeira parte, tratando da determinação do equilíbrio estático, tensões médias e "offset" máximo da unidade flutuante.

Em função do comportamento dinâmico de um sistema flutuante ser complexo, algumas hipóteses simplificadoras são adotadas neste trabalho, a saber:

- . os movimentos de corpo rígido da unidade ("surge", "sway", "heave", "roll", "pitch" e "yaw") não são afetados pelo sistema de ancoragem;

- . as componentes estáticas de força de arraste devido a onda, vento e corrente são invariáveis no tempo e atuam sobre a unidade deslocando-a, estaticamente, de sua posição inicial de equilíbrio;

- . a componente de segunda ordem da força de onda (baixa frequência) causa um movimento oscilatório de baixa frequência, em relação à posição de equilíbrio deslocada da unidade flutuante;

- . os movimentos de primeira ordem da unidade, impostos à extremidade da linha ("fairlead"), resultam em uma componente dinâmica de tensão nesta linha.

Portanto, o sistema flutuante é analisado considerando, a priori, a aplicação das forças estáticas ambientais, as quais produzem um deslocamento ("offset") estático do sistema.

Os movimentos de primeira e segunda ordens são considerados como processos físicos independentes, cujos valores podem ser obtidos desacopladamente e posteriormente combinados, para calcular o deslocamento total dinâmico do sistema flutuante.

IV.2 - Avaliação das Forças Médias Ambientais

A análise do sistema de ancoragem requer a avaliação das forças ambientais devido a onda, vento e corrente sobre a unidade flutuante, assim como os movimentos da mesma. As ações de onda, vento e corrente, figura (IV.2), produzem forças estáticas e são baseados nos valores extremos dos parâmetros ambientais. Estas forças são avaliadas individualmente e, posteriormente, totalizadas. A resultante destas forças fornece o deslocamento total estático, função da rigidez do sistema de ancoragem.

. Força de Vento

A força de arraste estática de vento (F_v), é calculada de acordo com a seguinte formulação :

$$F_v = C_v (V_{10})^2 \quad (\text{IV.1})$$

$$C_v = 1/2 C_{dv} p_{ar} A_v \quad (\text{IV.2})$$

onde,

C_v = coeficiente de forma, determinado por teste em túnel de vento ou fórmulas empíricas;

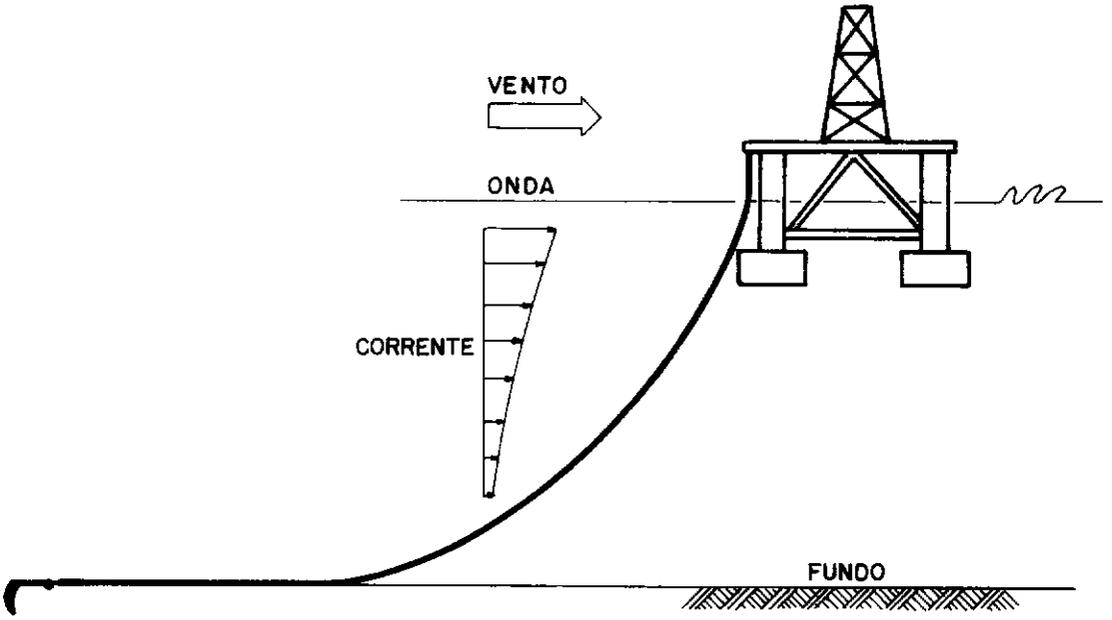


FIGURA IV. 2 - CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

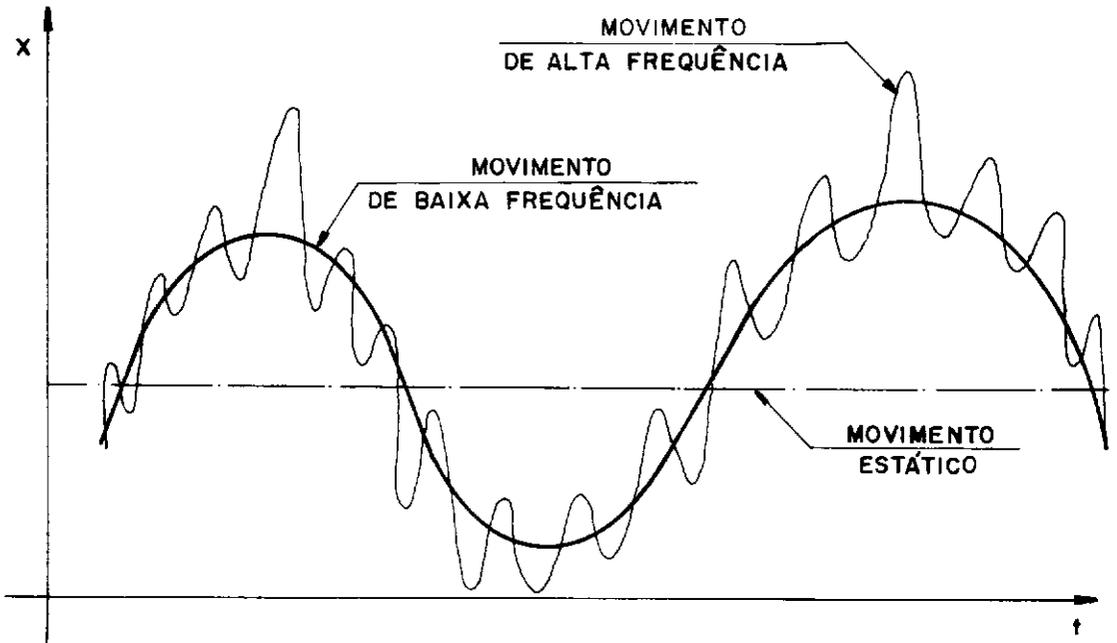


FIGURA IV. 3 - MOVIMENTOS DEVIDOS A AÇÃO DAS ONDAS.

V_{10} = velocidade do vento a 10 metros acima da superfície;

C_{dv} = coeficiente de arraste do vento;

p_{ar} = densidade do ar;

A_v = área de obstrução.

A melhor maneira de se determinar o coeficiente adimensional de forma do vento, é através da utilização de modelos reduzidos em túneis de vento. Entretanto, esta facilidade nem sempre pode ser utilizada, podendo assim adotar valores empíricos.

. Força de Corrente

A força de corrente (F_c) é calculada pela parcela de arraste da equação de Morison, atuando sobre a unidade flutuante .

$$F_c = C_c (V_c)^2 \quad (\text{IV.3})$$

$$C_c = 1/2 C_{dc} p_{ag} A_c \quad (\text{IV.4})$$

onde,

C_c = coeficiente de forma, obtido por ensaio em modelo reduzido ou por fórmulas empíricas;

V_c = velocidade da corrente na superfície;

C_{dc} = coeficiente de arraste;

p_{ag} = densidade da água;

A_c = área de obstrução.

Como em relação ao vento, a melhor avaliação do coeficiente de arraste devido a corrente na superfície, é através de modelo reduzido em tanques de provas. Caso haja impossibilidade, deve-se utilizar valores empíricos.

. Força de arraste médio da onda

Três fenômenos básicos, devido a ação das ondas, afetam uma unidade flutuante ancorada, figura (IV.3). O primeiro são os movimentos de resposta da unidade na frequência das ondas, o segundo são as forças oscilatórias na frequência próxima a frequência natural da unidade flutuante ancorada e o terceiro é a força de arraste médio estático.

A força de arraste médio estático é induzida pela componente estática da força de onda de segunda ordem e sua determinação requer utilização de testes em modelo reduzido ou programas computacionais de análise hidrodinâmica.

$$F_d(w) = \rho_{ag} \int_0^{\infty} S(w) R^2(w) dw \quad (IV.5)$$

sendo,

$F_d(w)$ = força de arraste média da onda;

g = aceleração da gravidade;

$S(w)$ = valor da densidade de energia espectral da onda para a frequência w ;

$R(w)$ = coeficiente de arraste da onda ou de reflexão, para a frequência w ;

w = frequência da onda.

A força média total ambiental é a soma destas três parcelas, sendo considerada estática em cada estado de mar.

. Equilíbrio estático

A ação das forças médias ambientais sobre a unidade flutuante ancorada determina o passeio horizontal ("offset") estático, em relação à posição de equilíbrio.

$$F_{\text{est}} = F_v + F_c + F_d \quad (\text{IV.6})$$

Este "offset" estático é determinado através de uma análise estática, na qual a unidade é modelada como um corpo rígido e cada linha de ancoragem é representada por molas não lineares.

Inicialmente, é necessário calcular a mola não linear de uma linha de ancoragem, que consiste em determinar a relação entre a componente horizontal da força resultante e o deslocamento horizontal imposto à extremidade superior da linha.

Com o objetivo de calcular a mola equivalente são utilizadas as equações, descritas por vários autores [2,5,14], cuja a linha é modelada como uma catenária inelástica. No caso de linhas compostas por segmentos com propriedades geométricas e físicas diferentes, convém discretizar a linha em elementos finitos, onde cada elemento corresponde a um trecho de linha homogênea.

Uma vez calculadas as molas equivalentes às linhas de ancoragem, precisa-se determinar a posição final

de equilíbrio estático.

Uma técnica usual, consiste em levantar a matriz de rigidez do sistema de ancoragem, na posição de equilíbrio inicial, para as direções de "surge", "sway" e "yaw" da unidade.

Assume-se que o sistema é linear, isto é, o deslocamento devido a força externa é determinado pela equação:

$$[K]_s \{X\}_e = \{F\}_e \quad (\text{IV.7})$$

$$\{X\}_e = [K]_s^{-1} \{F\}_e \quad (\text{IV.8})$$

onde,

$[K]_s$ = matriz de rigidez do sistema;

$\{X\}_e$ = vetor de deslocamento estático;

$\{F\}_e$ = vetor de forças externas estáticas.

Determinada esta primeira estimativa para o vetor de deslocamento, uma nova matriz de rigidez é calculada em torno deste ponto. O processo é iterativo até obter, em duas posições consecutivas, os deslocamentos iguais ou a diferença entre eles menor que uma dada tolerância.

IV.3 - Avaliação dos Movimentos de Primeira Ordem

Denominam-se as oscilações da unidade flutuante no em torno do período predominante das ondas, por movimentos de primeira ordem, figura (IV.4).

O cálculo, pelo método da análise espectral consiste, basicamente, de três passos, a saber:

1. Estabelecer os operadores de amplitude de resposta (RAO) de movimentos em ondas regulares de unidade de amplitude, para várias direções da unidade flutuante. Estes operadores podem ser determinados no intervalo de frequências de interesse, utilizando a Teoria de Difração ou por ensaios em tanques de prova.

2. Definir o estado de mar através do tipo de espectro, altura significativa, período de "zero up-crossing" da onda e direções. Geralmente utiliza-se, para a costa brasileira, o espectro de mar unimodal do ISSC, a ser apresentado no capítulo V.

3. Calcular o espectro de resposta em mares irregulares, baseado no princípio da superposição linear, utilizando a técnica de análise espectral, equação (IV.9). A faixa de frequência, a ser analisada, deve conter períodos de onda variando de 4 a 30 segundos. A partir da integração e extração da raiz quadrada do espectro de resposta, equação (IV.10), obtem-se o desvio padrão da resposta.

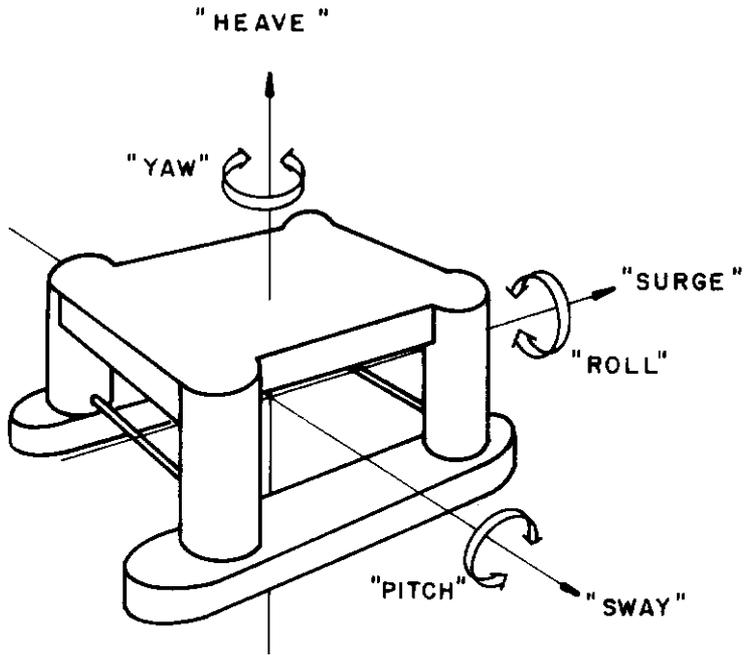


FIGURA IV. 4 - MOVIMENTOS DE UMA PLATAFORMA.

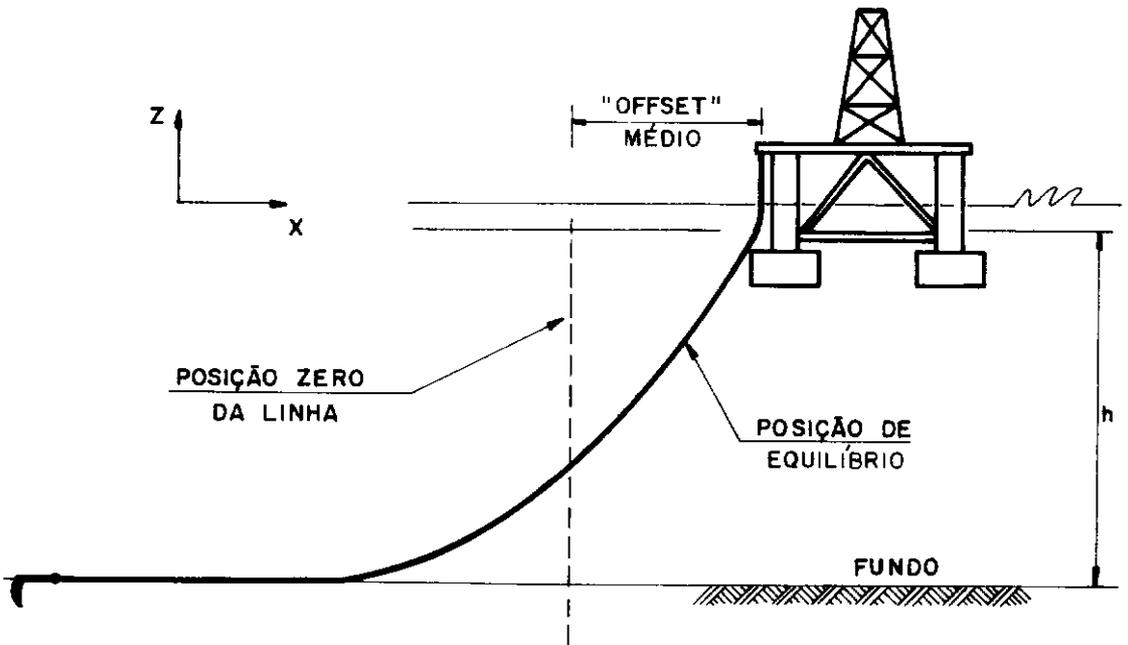


FIGURA IV. 5 - POSIÇÃO DE EQUILÍBRIO.

$$S_{ri}(w) = [RAO]_i^2 S_w(w) \quad (IV.9)$$

onde,

$S_{ri}(w)$ = espectro de resposta de movimento na direção i , em função da frequência w ;

$[RAO]_i$ = operador de amplitude de resposta para o movimento na direção i ;

$S_w(w)$ = espectro de energia da onda em função da frequência w .

A partir do espectro de resposta, pode-se obter os valores estatísticos, tais como o desvio padrão.

$$\sigma_i = \left[\int_{w_1}^{w_2} [RAO]_i^2 S_w(w) dw \right]^{1/2} \quad (IV.10)$$

onde,

σ_i = desvio padrão do movimento na direção i .

IV.4 - Avaliação dos Movimentos de Segunda Ordem

Consideram-se movimentos de segunda ordem ou de baixa frequência, as oscilações ressonantes em torno da posição média de equilíbrio dos movimentos de "surge", "sway" e "yaw", causados pelas forças cíclicas de baixa frequência, tais como, onda, vento e força de restauração não-linear.

Os movimentos de baixa frequência são dependentes das forças de onda e do comportamento dinâmico da unidade flutuante (rigidez da ancoragem e amortecimento da unidade no meio fluido). Ambos os parâmetros são não lineares,

portanto a resposta de baixa frequência não pode ser diretamente calculada em uma análise no domínio da frequência.

Existem em estudo, várias formulações para avaliação dos movimentos de segunda ordem.

Neste trabalho, adotou-se uma metodologia de linearização da análise no domínio da frequência, segundo [1,3], a qual consiste basicamente em:

1. considerar a unidade flutuante ancorada como um sistema de um grau de liberdade
2. calcular o período natural do sistema;
3. calcular a densidade espectral da excitação de baixa frequência devido a onda;
4. assumir, conservativamente, um valor baixo de amortecimento da unidade;
5. calcular o desvio padrão da resposta.

As formulações são apresentadas a seguir:

. Espectro de força de arraste de baixa frequência

$$S_f(\mu) = 2 p_{ag} g \int_0^{\infty} S(w) S(w + \mu/2) R^4(w + \mu/2) .dw$$

$$\mu = w - w_p$$

(IV.11)

onde,

$S_f(\mu)$ = espectro de força de arraste de baixa frequência;

μ = diferença entre a frequência w e a

frequência de pico w_p do espectro de ondas.

Vale observar que em um espectro de banda estreita, qualquer frequência w é sempre próxima à frequência central do espectro w_p , de forma que a diferença é sempre pequena, resultando em uma variação muito lenta da força de segunda ordem.

. Período natural do sistema

$$T_n = 2 \pi [(M + A) / K]^{1/2} \quad (\text{IV.12})$$

onde,

T_n = período natural;

M = massa total da unidade;

A = massa adicionada da unidade;

K = rigidez do sistema de ancoragem.

. Movimento de segunda ordem

$$S_{1f}(\mu) = S(\mu) [X_{1f}^2(\mu)] \quad (\text{IV.13})$$

$$X_{1f}(\mu) = 1 / \left[[(M + A) \mu^2 - K] + \beta^2 \mu^2 \right]^{1/2}$$

(IV.14)

$$\sigma_{1f} = \left[\int_0^\infty S_{1f}(\mu) d\mu \right]^{1/2} \quad (\text{IV.15})$$

onde,

$S_{1f}(\mu)$ = espectro de resposta de baixa frequência;

$X_{1f}(\mu)$ = resposta linear de baixa frequência;

β = coeficiente de amortecimento, adotado igual a 10%;

σ_{1f} = desvio padrão da resposta.

IV.5 - Determinação do "Offset" Médio e a Tensão Média

Define-se por "offset" médio, o movimento horizontal estático máximo da unidade para uma dada condição ambiental, figura (IV.5). Seu valor é calculado pelo somatório do "offset" estático com o máximo "offset" devido ao movimento de segunda ordem.

O movimento horizontal máximo do sistema devido às cargas cíclicas, incluindo os movimentos de primeira e segunda ordens, é denominado de "offset" dinâmico máximo.

FYLLING [3] propõe um procedimento para adicionar o movimento extremo de primeira ordem com o de segunda, o qual é descrito abaixo.

$$X_{\text{totmax}} = [(X_{\text{wfmax}}^2) + (X_{\text{1fmax}}^2)]^{1/2}$$

(IV.16)

onde,

X_{totmax} = máximo "offset" dinâmico medido a partir do "offset" médio, no tempo t ;

X_{wfmax} = máximo "offset" devido ao movimento de

primeira ordem, no tempo t;

X_{lfmax} = máximo "offset" devido ao movimento de segunda ordem, no tempo t.

Uma estimativa, conservativa, da tensão dinâmica da linha é obtida aplicando-se o movimento de primeira ordem sobre o "offset" médio, ou seja, considera-se que parte representativa do movimento de segunda ordem é adicionada no "offset" estático.

$$\tilde{X}_{lf} = X_{totmax} - X_{wfmax} \quad (IV.17)$$

Os valores extremos de "offset" são calculados, utilizando as expressões estatísticas da análise espectral, descritas no capítulo III.

. Primeira ordem

$$X_{wfmax} = \sigma_{wf} [2 \ln (T / T_z)]^{1/2}$$

(IV.18)

onde,

σ_{wf} = desvio padrão do movimento de primeira ordem;

T = tempo de recorrência, adotado igual a 2 horas;

T_z = período de "zero-upcrossing" da onda.

. Segunda ordem

$$X_{1fmax} = \sigma_{1f} [2 \ln (T / T_n)]^{1/2}$$

(IV.19)

onde,

σ_{1f} = desvio padrão do movimento de segunda ordem;

T_n = período natural do sistema.

Portanto, o "offset" médio pode ser expresso, como:

$$X_{med} = X_{est} + \tilde{X}_{1f} \quad (IV.20)$$

onde,

X_{med} = "offset" médio.

A tensão média é finalmente obtida a partir do "offset" médio, utilizando a mesma metodologia descrita no equilíbrio estático.

Esta posição média estática será a condição de contorno para a análise dinâmica da linha isolada.

CAPITULO V

ESTUDO PARAMÉTRICO

Neste capítulo apresenta-se o estudo paramétrico realizado, utilizando as duas metodologias de análise dinâmica da linha isolada, integração nos domínios do tempo e frequência, descritas no capítulo III.

O estudo paramétrico consiste, primeiramente, na avaliação da configuração estática da unidade flutuante ancorada, que serve de subsídio para a determinação da linha de amarração mais solicitada. Posteriormente, são calculados os movimentos de primeira ordem da unidade flutuante, que constituem as fontes de excitação da linha.

Uma vez obtidas as condições de contorno, as análises dinâmicas da linha isolada são efetuadas e os resultados comparados e comentados.

As principais características da unidade flutuante e do sistema de ancoragem estão apresentadas no capítulo II.

A unidade analisada foi projetada para ser instalada no Campo de Marlim, localizado na Bacia de Campos, a aproximadamente 125 km da costa e em uma lâmina d'água de 1000 metros.

Os dados ambientais foram obtidos do Relatório GLENN [18] e de medições feitas recentemente pela Petrobrás.

A seguir, relacionam-se todos os dados ambientais necessários para as análises:

. Onda

Os estados de mar são assumidos unidirecionais e classificados como sendo de projeto ou de fadiga.

Dentre os espectros comumente adotados, pode-se citar o espectro de Pierson - Moskowitz modificado (ISSC), como o mais indicado para o litoral brasileiro.

Este espectro é baseado em dois parâmetros, a altura de onda significativa H_s e o período de onda de "zero up-crossing" T_z e é expresso como:

$$S(w) = A w^{-5} e^{-B/W^4} ; 0 < w < \infty \quad (V.1)$$

sendo,

$$A = 125 H_s^2 / T_z^4$$

$$B = 496 / T_z^4$$

Altura da onda significativa H_s (m)	Período de "zero-up-crossing" T_z (s)	Período de recorrência (anos)
5.1	7.9	1
6.3	8.5	10
7.6	9.2	100

Tabela V.1 - Estados de mar de projeto

Altura da onda significativa H_s (m)	Período de "zero- up-crossing" T_z (s)	Duração em 1 ano (s)
0.75	5.24	712000
1.25	5.27	8067600
1.75	5.77	12279600
2.25	6.26	6177600
2.75	6.89	2764800
3.25	7.72	1026000
3.75	7.89	248400
4.25	8.20	205200
4.75	9.00	54000
T O T A L		31536000

Tabela V.2 - Estados de mar de fadiga

Dentre os estados de mar de projeto e de fadiga, escolheram-se sete para a realização das análises, com a finalidade de abranger, da melhor maneira possível, os principais estados de mar da região. A tabela (V.3) a seguir, apresenta os valores representativos dos estados de mar analisados.

N	H _s (m)	T _z (s)	Duração em 1 ano (s)
1	1.25	5.27	8779600
2	1.75	5.77	12279600
3	2.75	6.89	8942400
4	3.75	7.89	1274400
5	5.10	7.90	259200
6	6.30	8.50	-
7	7.60	9.20	-

Tabela V.3 - Valores representativos dos estados de mar

. Corrente

Adotaram-se recentes medições realizadas no local, considerando-se ainda a direcionalidade e o perfil ao longo da profundidade.

Das oito linhas que compõem o sistema de ancoragem da unidade flutuante, escolheu-se a linha mais tracionada para a realização das análises (linha 7), cuja direção refere-se a 135°.

A tabela (V.4) apresenta os perfis de corrente para os períodos de recorrência de 1, 10 e 100 anos, respectivamente.

Profundidade (m)	Vel.corrente p/per.recorrência - v_c (m/s)		
	1 ano	10 anos	100 anos
5	0.93	1.30	1.67
20	0.91	1.29	1.66
40	0.84	1.21	1.57
60	0.73	1.05	1.36
80	0.73	1.05	1.36
100	0.73	1.05	1.36
150	0.53	0.80	1.07
200	0.37	0.55	0.74
250	0.32	0.52	0.71
300	0.23	0.37	0.50
400	0.23	0.37	0.50
500	0.23	0.37	0.50
600	0.23	0.37	0.50
600 a 1000	0.23	0.37	0.50

Tabela V.4 - Perfil de corrente ao longo da profundidade

. Vento

A tabela (V.5) mostrada a seguir, apresenta as velocidades de vento relacionadas a uma duração de 10 minutos e medidas a 10 metros acima da lâmina d'água, para a direção de 135° .

Tempo de recorrência (anos)	Vel. do vento v10 (m/s)
1	22.4
10	28.4
100	33.4

Tabela V.5 - Velocidades de vento

A tabela (V.6) apresenta, para cada caso estudado, as combinações dos carregamentos ambientais relativos a onda, corrente e vento.
corrente e vento.

N	Características Ambientais			
	Onda		Corrente	Vento
	H_s (m)	T_z (s)	v_c (m/s)	v_v (m/s)
1	1.25	5.27	0.93	22.40
2	1.75	5.77	0.93	22.40
3	2.75	6.89	1.30	28.40
4	3.75	7.89	1.30	28.40
5	5.10	7.90	1.30	28.40
6	6.30	8.50	1.67	33.40
7	7.60	9.20	1.67	33.40

Tabela V.6 - Características Ambientais

V.1 - Análise da Unidade Flutuante Ancorada

A análise da unidade flutuante ancorada, foi realizada com o programa "DMOOR" [8], utilizando-se os módulos estático, frequência da onda (alta frequência) e baixa frequência.

O objetivo da análise da unidade flutuante ancorada é determinar:

- . forças ambientais totais agindo no conjunto;
- . a configuração estática do conjunto;
- . a linha mais solicitada;
- . os movimentos de primeira ordem devidos as ondas, na extremidade ("fairlead") da linha mais solicitada.

Na tabela (V.7) há um resumo das forças totais ambientais atuantes na unidade flutuante.

A tabela (V.8) apresenta os desvios padrões dos movimentos de baixa e alta frequências, para o cálculo do deslocamento máximo estático.

Estado de mar			Forças Ambientais Estáticas			Total (KN)
N	H _S (m)	T _Z (s)	Vento	Corrente	Arraste Onda	
1	1.25	5.27	597.1	666.0	9.2	1272.3
2	1.75	5.77	597.1	666.0	21.7	1284.8
3	2.75	6.89	888.1	1288.0	25.0	2201.1
4	3.75	7.89	888.1	1288.0	30.4	2206.5
5	5.10	7.90	888.1	1288.0	56.1	2232.2
6	6.30	8.50	1450.0	3794.0	67.5	5311.5
7	7.60	9.20	1450.0	3794.0	73.8	5317.8

Tabela V.7 - Forças Totais Ambientais

Estado de mar			Alta Frequência	Baixa Frequência	A ₁	
N	H _S (m)	T _Z (s)	σ_{wf} (m)	σ_{lf} (m)	T _n (s)	
1	1.25	5.27	0.024	1.617	208.17	2.606
2	1.75	5.77	0.048	1.612	208.200	2.552
3	2.75	6.89	0.145	2.320	200.876	2.453
4	3.75	7.89	0.287	2.345	200.787	2.262
5	5.10	7.90	0.392	2.534	200.374	2.166
6	6.30	8.50	0.569	3.077	172.157	2.140
7	7.60	9.20	0.812	3.098	172.103	1.939

Tabela V.8 - Desvios Padrões dos Movimentos de Primeira e Segunda Ordens da Unidade

Sendo:

$$X_{wfmax} = \sigma_{wf} [2 \ln (T / T_z)]^{1/2}$$

$$X_{lfmax} = \sigma_{lf} [2 \ln (T / T_n)]^{1/2}$$

$$X = [X_{wfmax}^2 + X_{lfmax}^2]^{1/2} \quad (V.2)$$

$$\tilde{X}_{lf} = X - X_{wfmax}$$

$$A_1 = \tilde{X}_{lf} / \sigma_{lf}$$

De acordo com os resultados obtidos da análise da unidade flutuante ancorada, a linha 7 é a mais solicitada, sendo esta a escolhida para a análise dinâmica isolada.

A configuração estática, as coordenadas do "fairlead" e os esforços estáticos ao longo da linha são calculadas para a posterior análise dinâmica da linha isolada e estão resumidas na tabela (V.9).

A tabela (V.10) apresenta, para cada estado de mar, os comprimentos totais da linha que permanecem encostados ao solo marinho na configuração estática. Adicionalmente, a figura (V.1) mostra estas configurações para os estados de mar 2, 4 e 7.

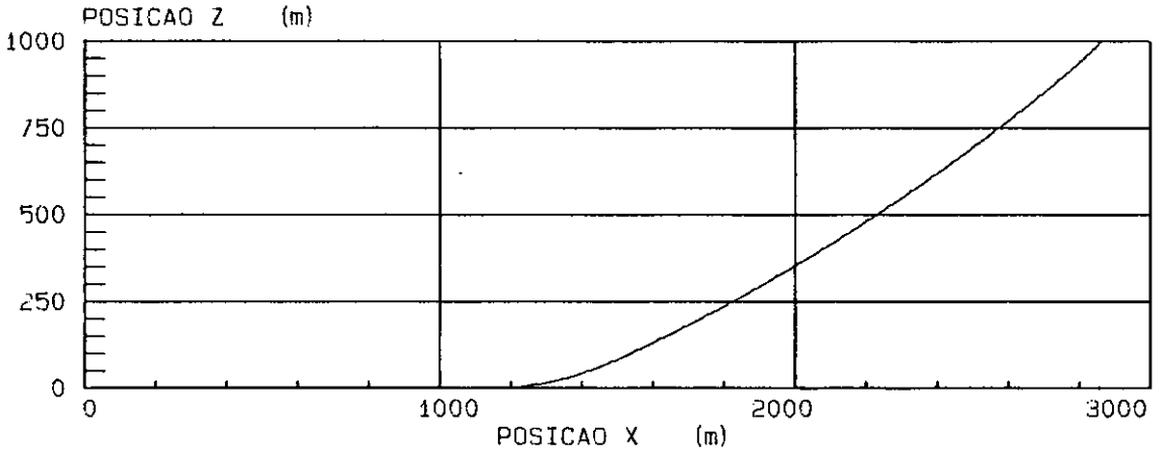
Estado de mar			Coordenadas "Fairlead"		Esforço Estático na Linha (KN)		
N	H _s (m)	T _z (s)	X (m)	Z (m)	Pto1	Pto2	Pto3
1	1.25	5.27	2859.50	995.30	1372.25	1618.75	1768.89
2	1.75	5.77	2859.64	995.30	1374.30	1621.32	1772.98
3	2.75	6.89	2878.72	995.30	1791.02	2030.22	2171.72
4	3.75	7.89	2878.42	995.30	1784.42	2023.57	2165.19
5	5.10	7.90	2879.12	995.30	1800.15	2039.19	2180.52
6	6.30	8.50	2928.66	995.30	3363.10	3579.70	3700.80
7	7.60	9.2	2928.13	995.30	3344.20	3561.10	3688.40

Tabela V.9 - Configuração estática - domínio da frequência

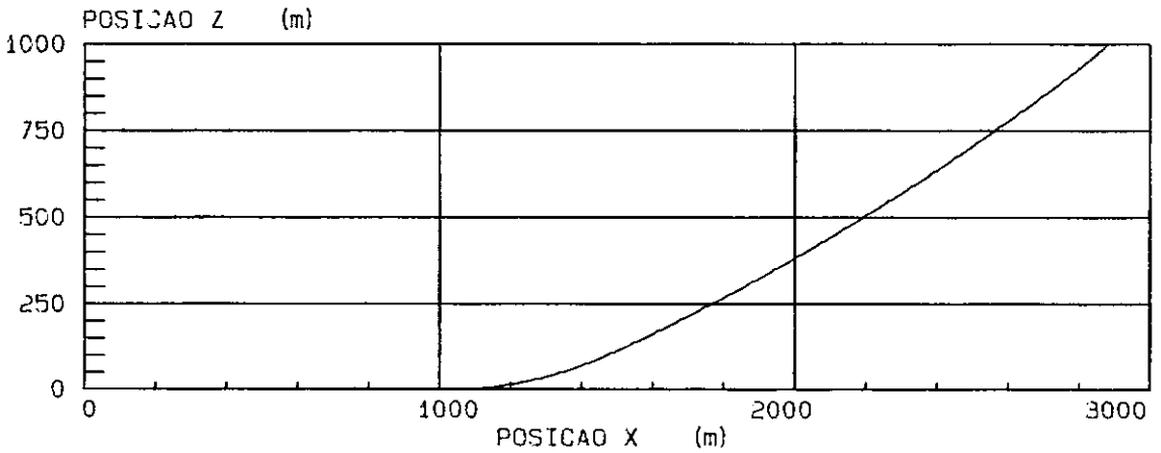
Estado de mar	Comprimento da Linha (m)	
	no solo	suspense
1	1125.	2025.
2	1125.	2025.
3	1000.	2150.
4	1000.	2150.
5	1000.	2150.
6	625.	2525.
7	625.	2525.

Tabela V.10

ESTADO DE MAR 1



ESTADO DE MAR 4



ESTADO DE MAR 7

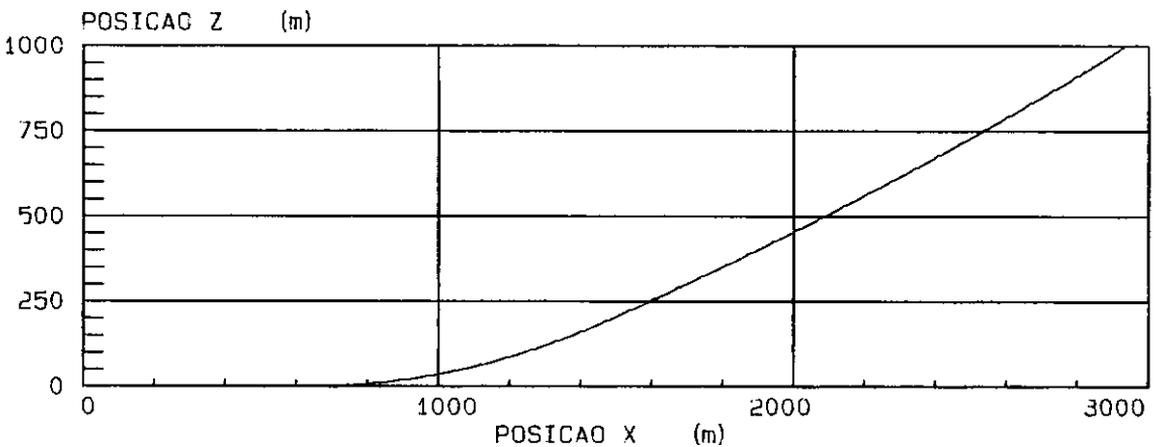


Figura V.1 - Configurações Estáticas da Linha

V.2 - Análise Dinâmica da Linha Isolada no Domínio da Frequência

O programa "DMOOR" [8], módulo de frequência, foi adotado para a realização das análises.

As propriedades geométricas e físicas da linha de ancoragem foram definidas no capítulo II. A figura (V.2) mostra um esquema da linha e os diferentes segmentos. Os locais analisados ao longo da linha, foram os pontos 1, 2 e 3 ("fairlead") por representarem pontos de mudança de tipo de elemento e conseqüentemente maior variação de tensões.

A linha de ancoragem foi modelada, considerando 50 elementos finitos, de comprimentos iguais começando da âncora até o "fairlead", como mostra a figura (V.3).

A configuração estática (coordenadas e tração média) e o espectro de movimentos de primeira ordem na extremidade da linha são as condições de contorno para a análise dinâmica.

V.2.1 - Determinação dos Movimentos no "Fairlead"

Os movimentos no "fairlead" são gerados na análise no domínio da frequência da unidade flutuante ancorada.

As figuras (V.4) a (V.10) apresentam os espectros de movimentos da unidade flutuante no plano da linha, obtidas através do módulo Wavfreq do programa "DMOOR" [8] e a tabela (V.11) fornece os valores estatísticos dos mesmos.

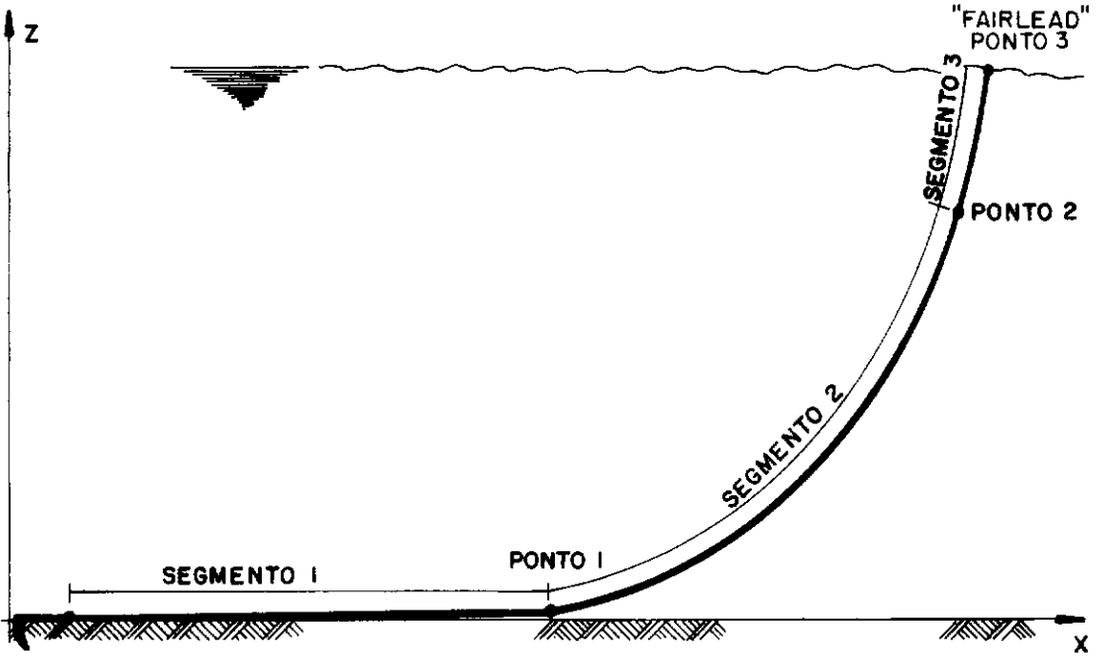


FIGURA V.2 - CONFIGURAÇÃO DA LINHA.

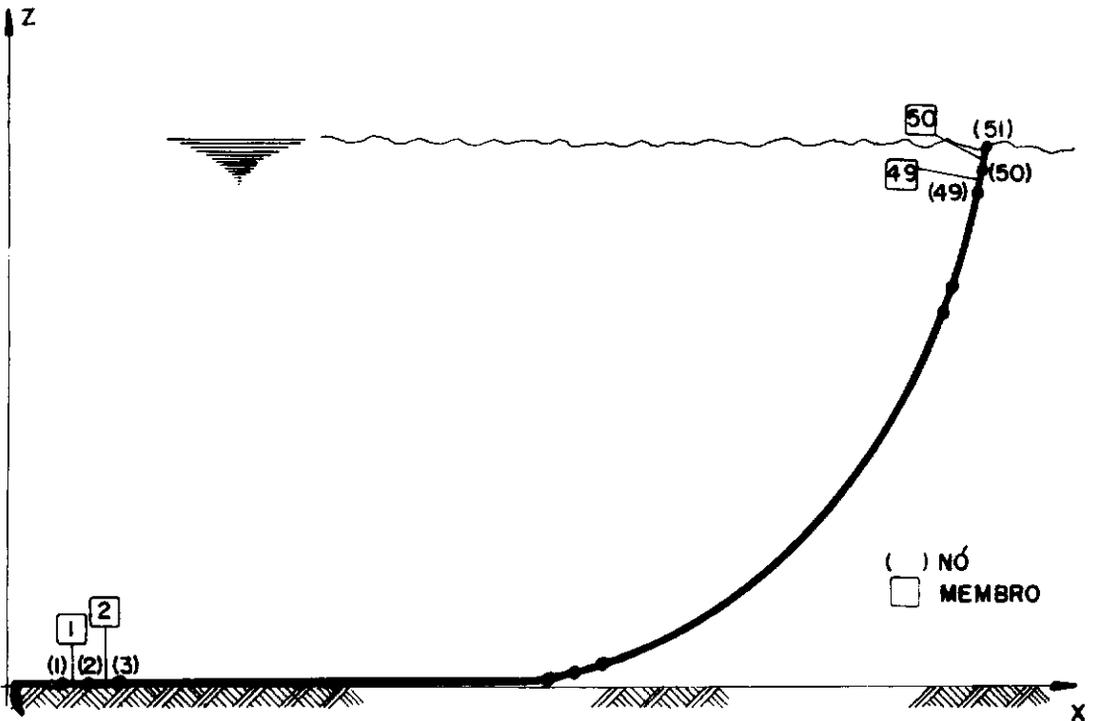
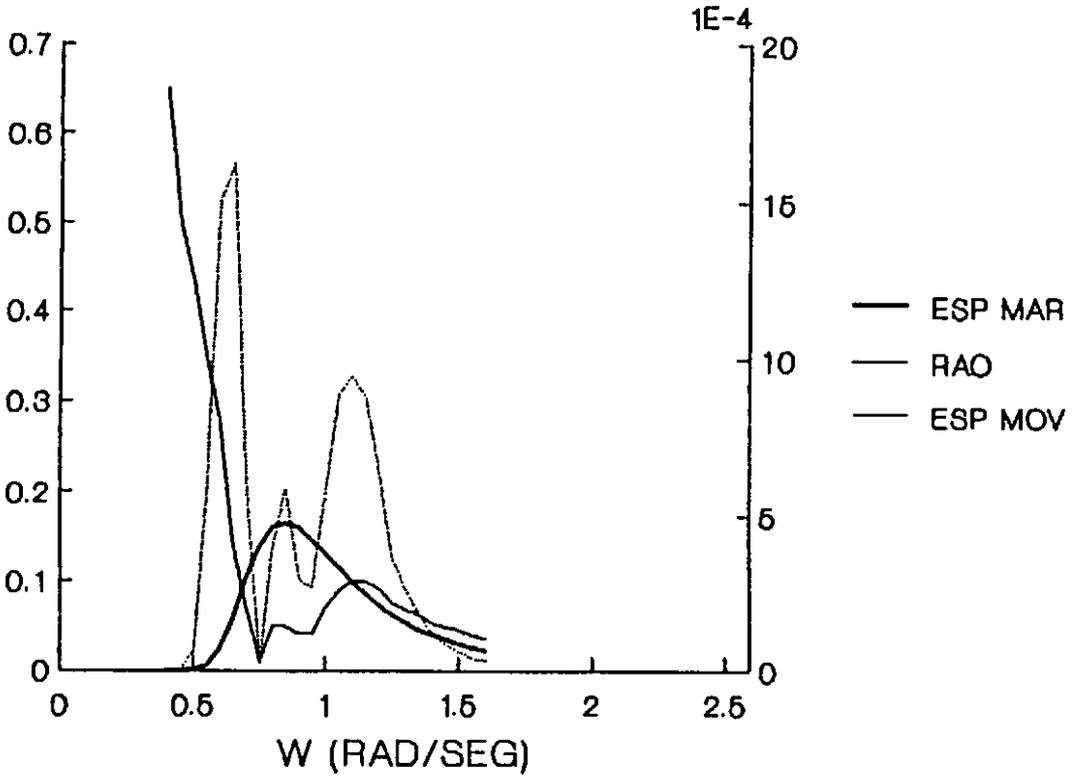


FIGURA V.3 - MODELO DA LINHA "DMOOR".

ESTADO DE MAR 1 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 1 - MOVIMENTO Z

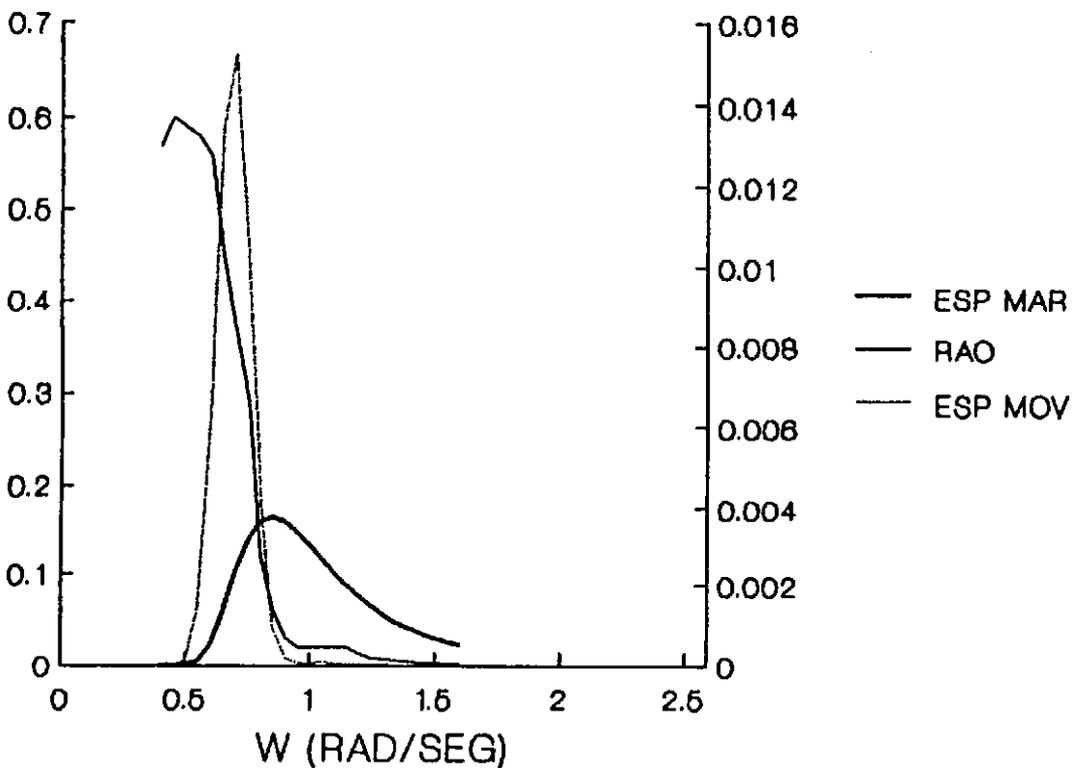
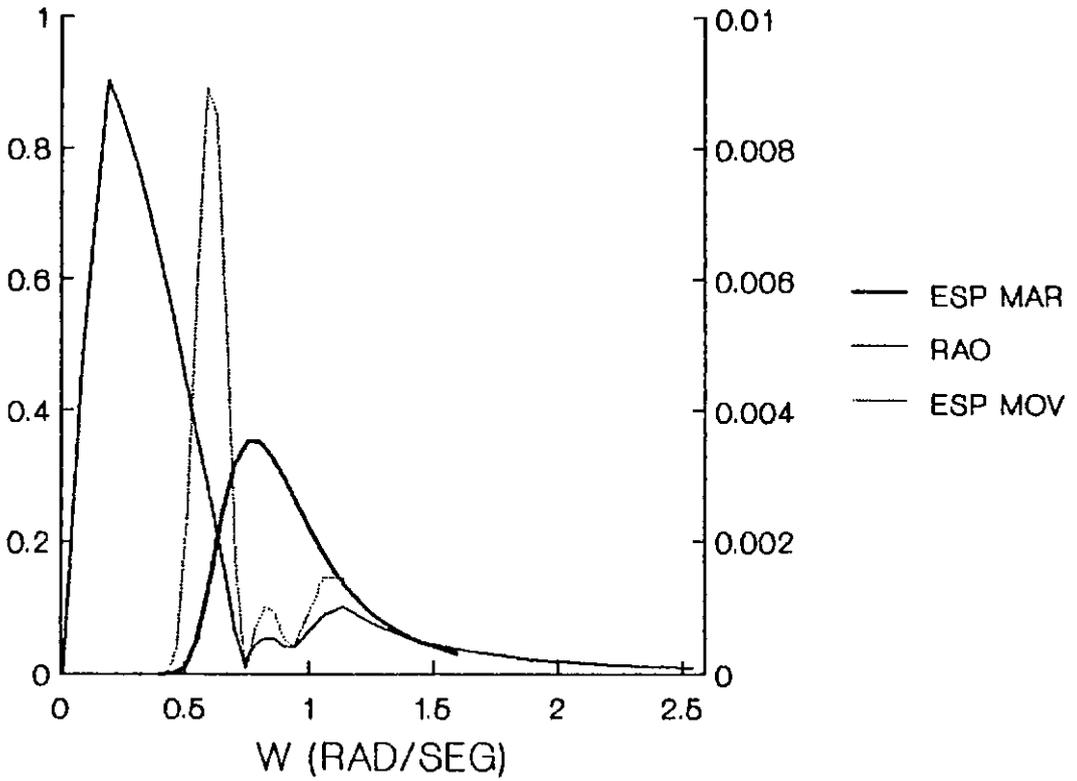


Figura V.4

ESTADO DE MAR 2 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 2 - MOVIMENTO Z

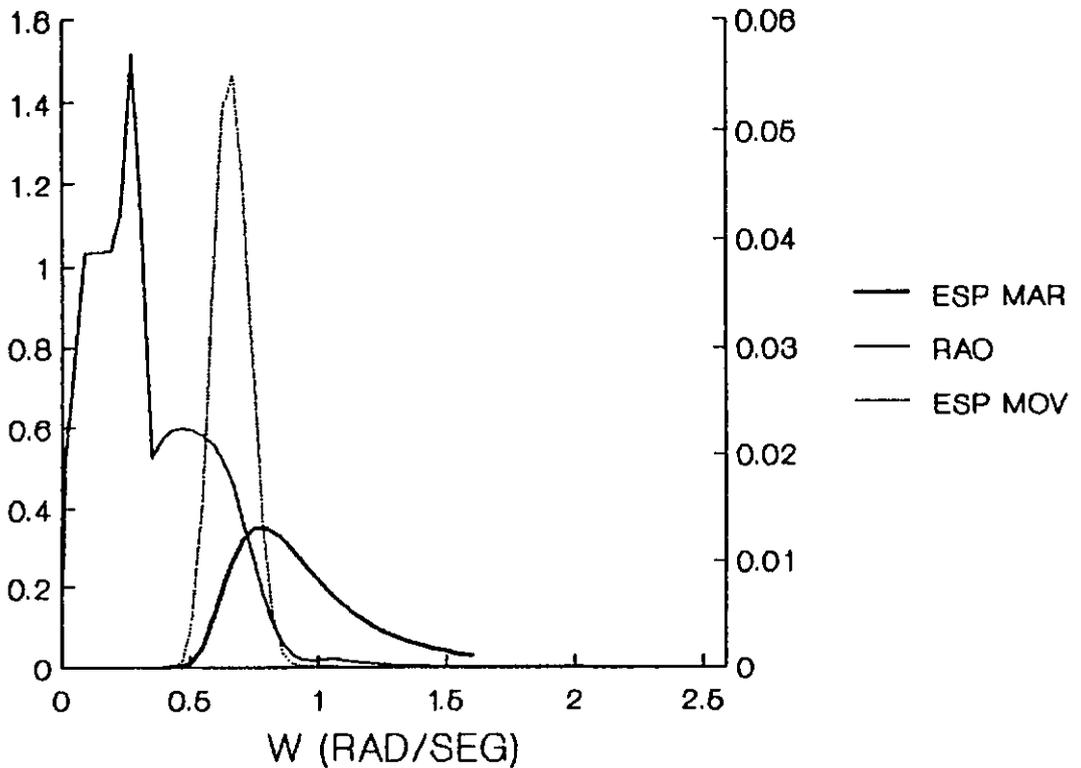
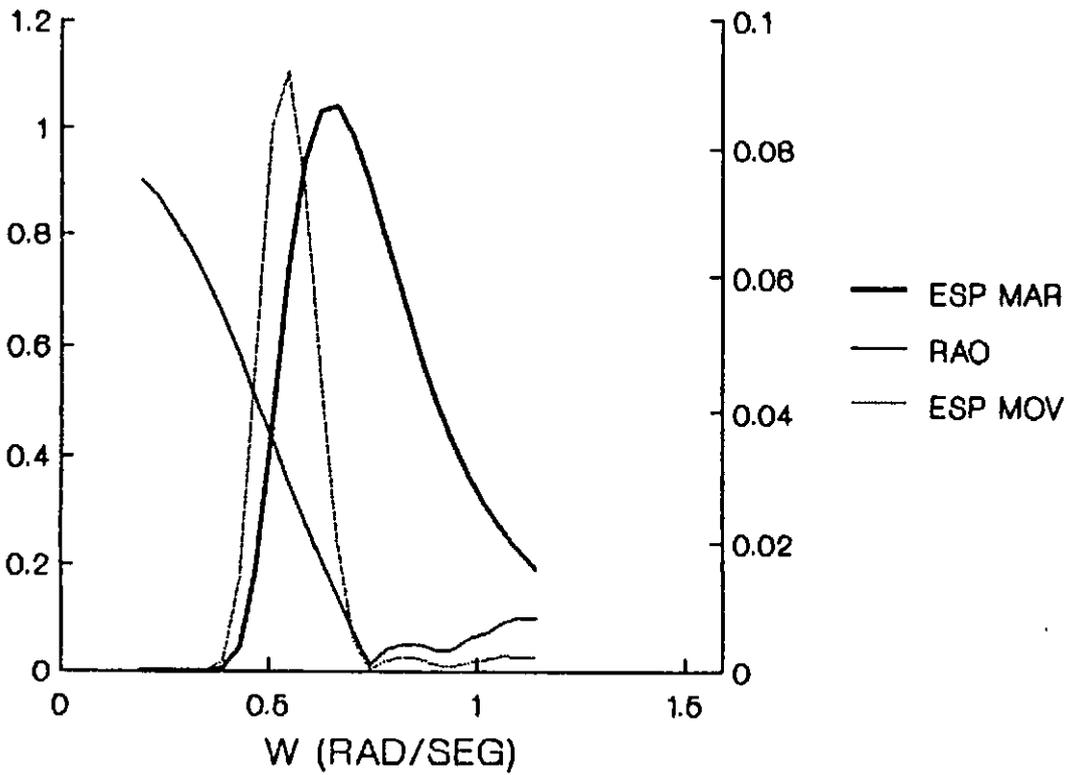
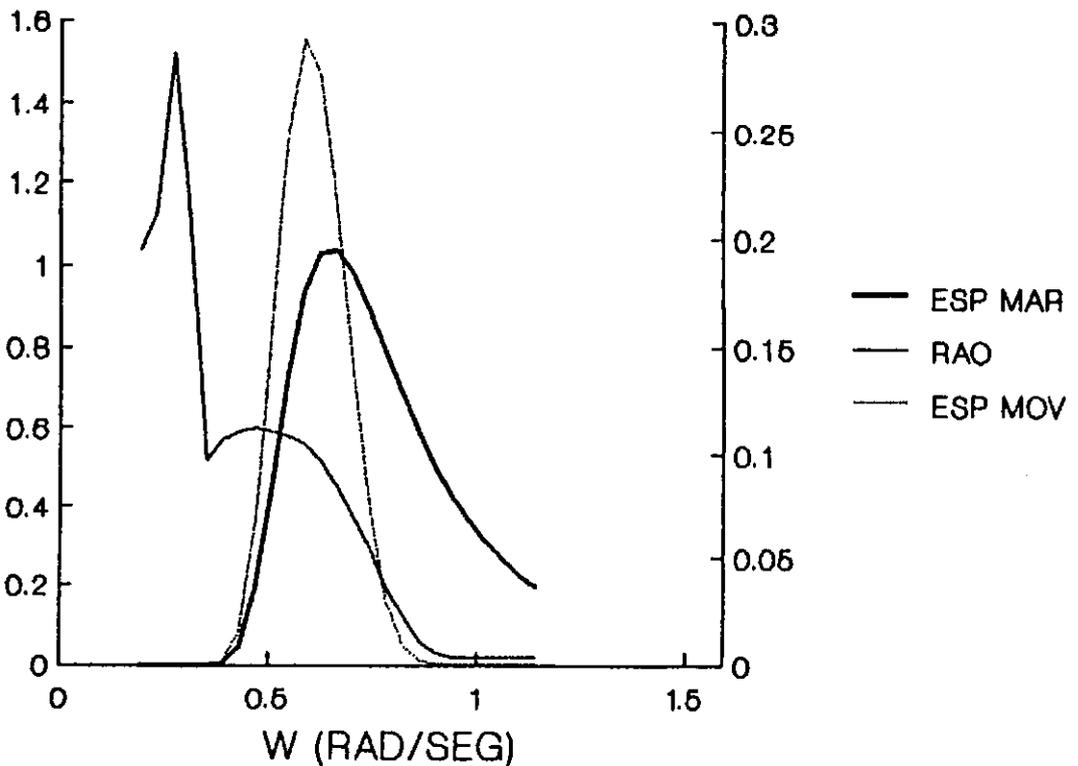


Figura V.5

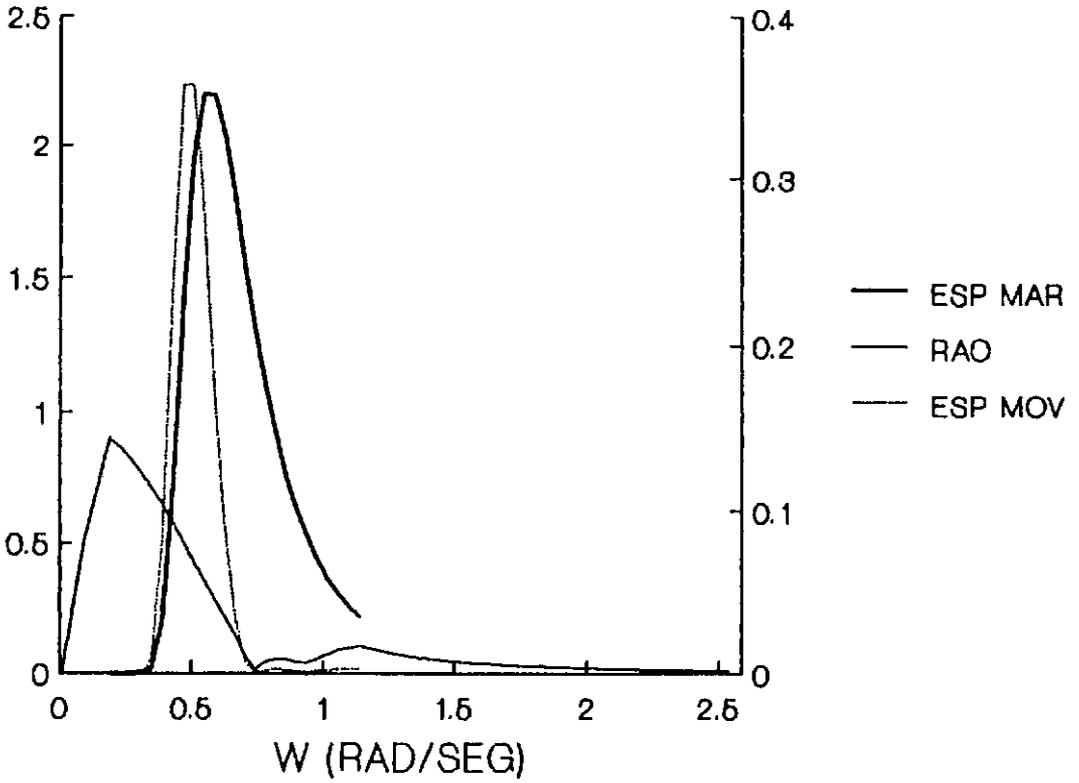
ESTADO DE MAR 3 - MOVIMENTO X



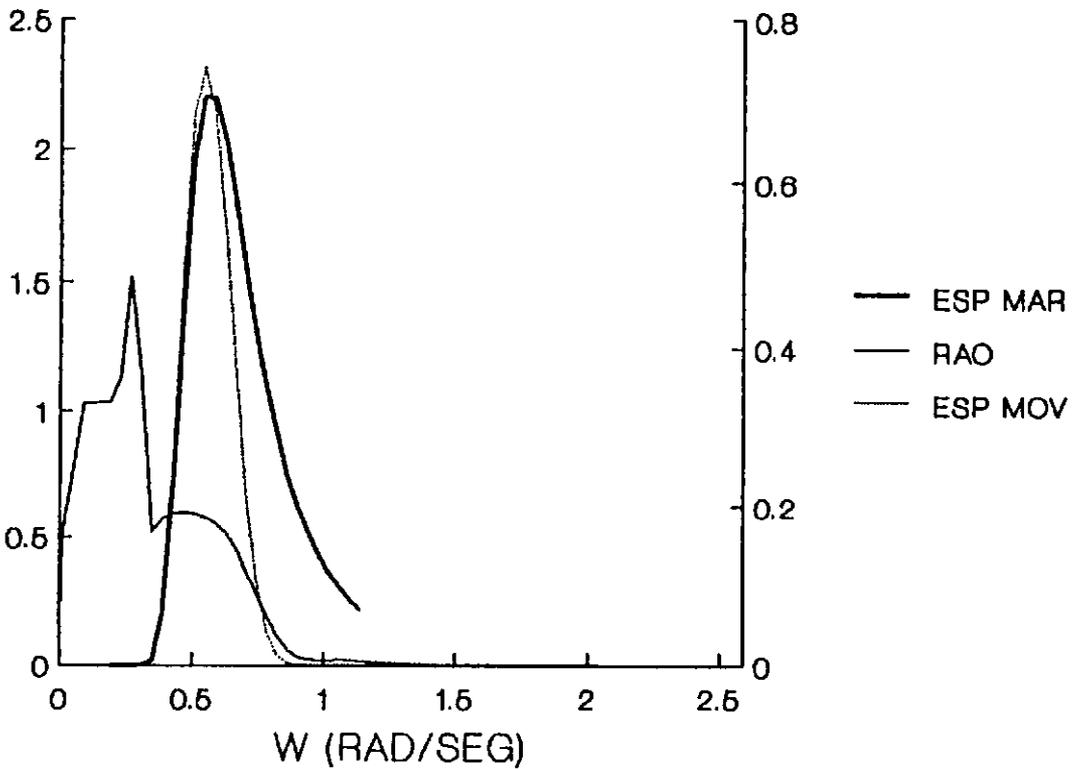
ESTADO DE MAR 3 - MOVIMENTO Z



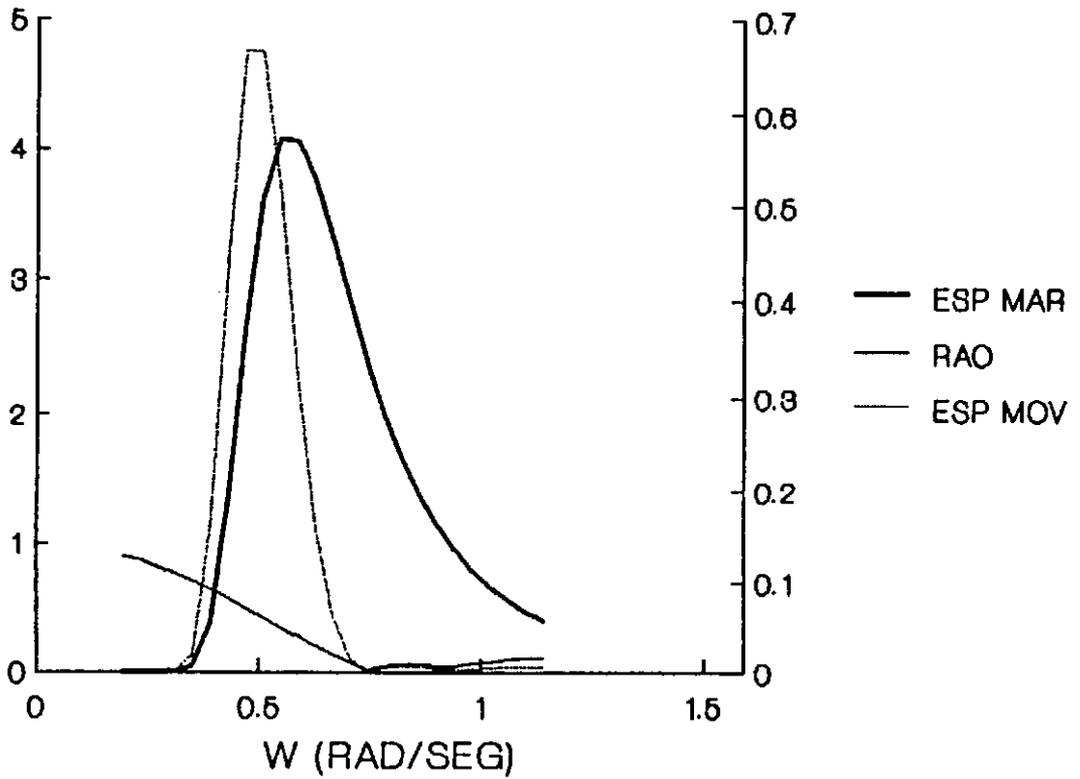
ESTADO DE MAR 4 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 4 - MOVIMENTO Z



ESTADO DE MAR 5 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 5 - MOVIMENTO Z

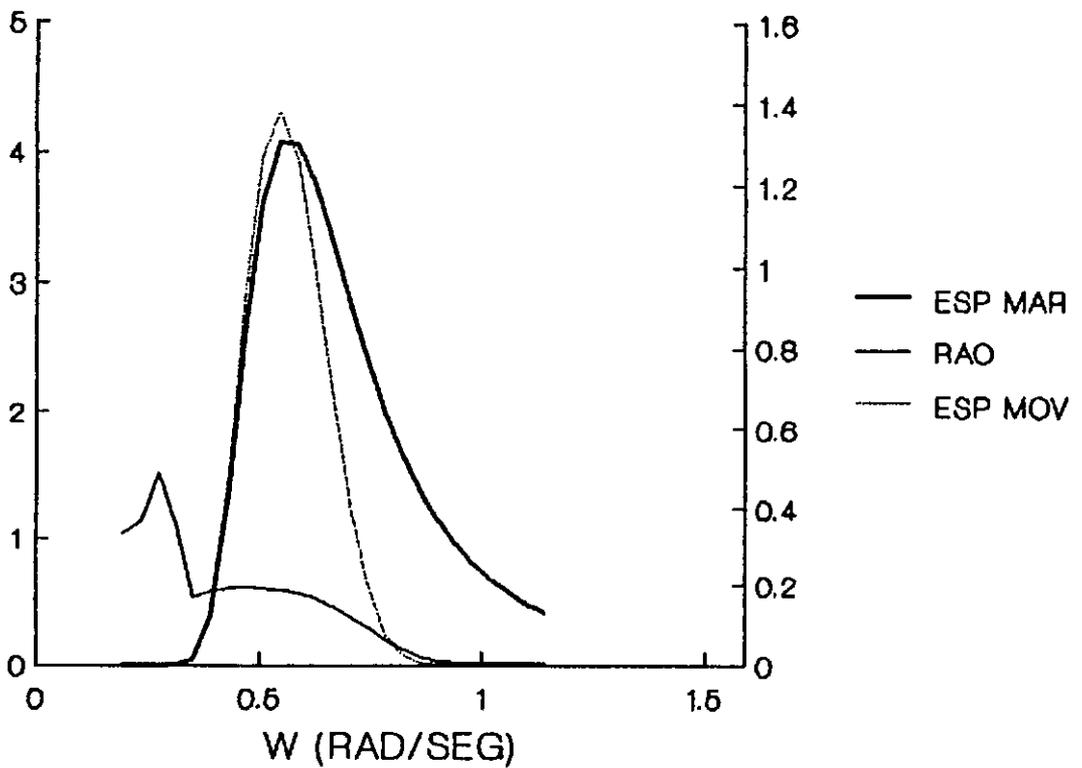
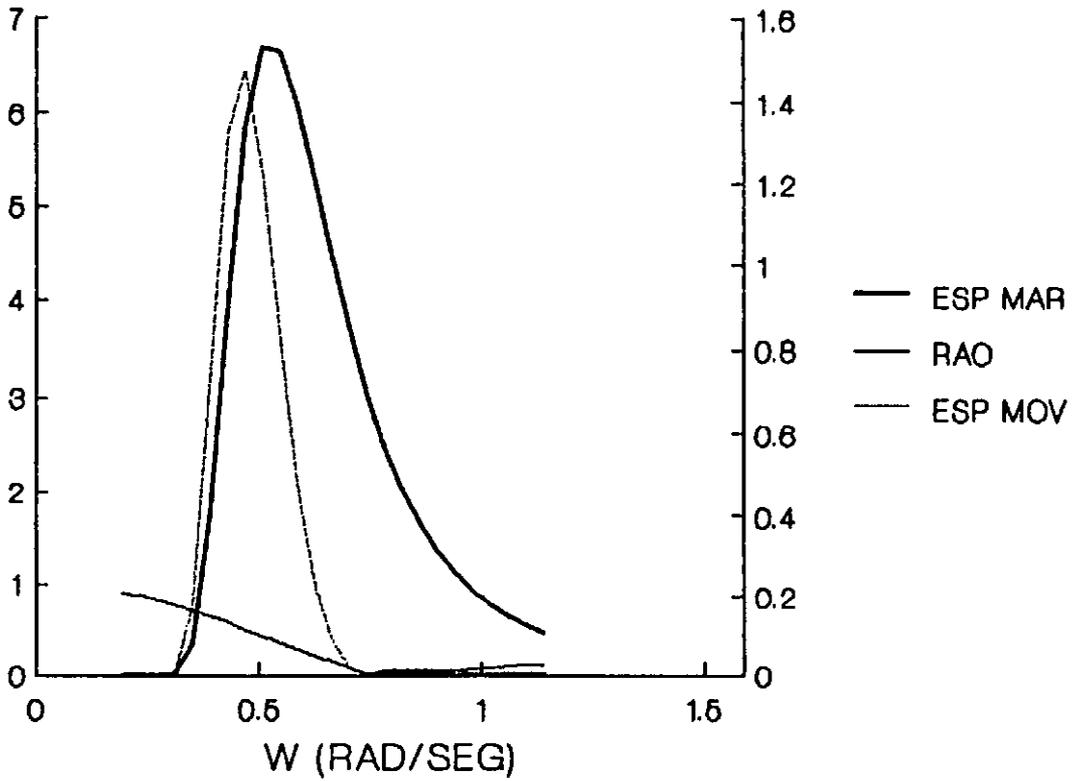


Figura V.8

ESTADO DE MAR 6 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 6 - MOVIMENTO Z

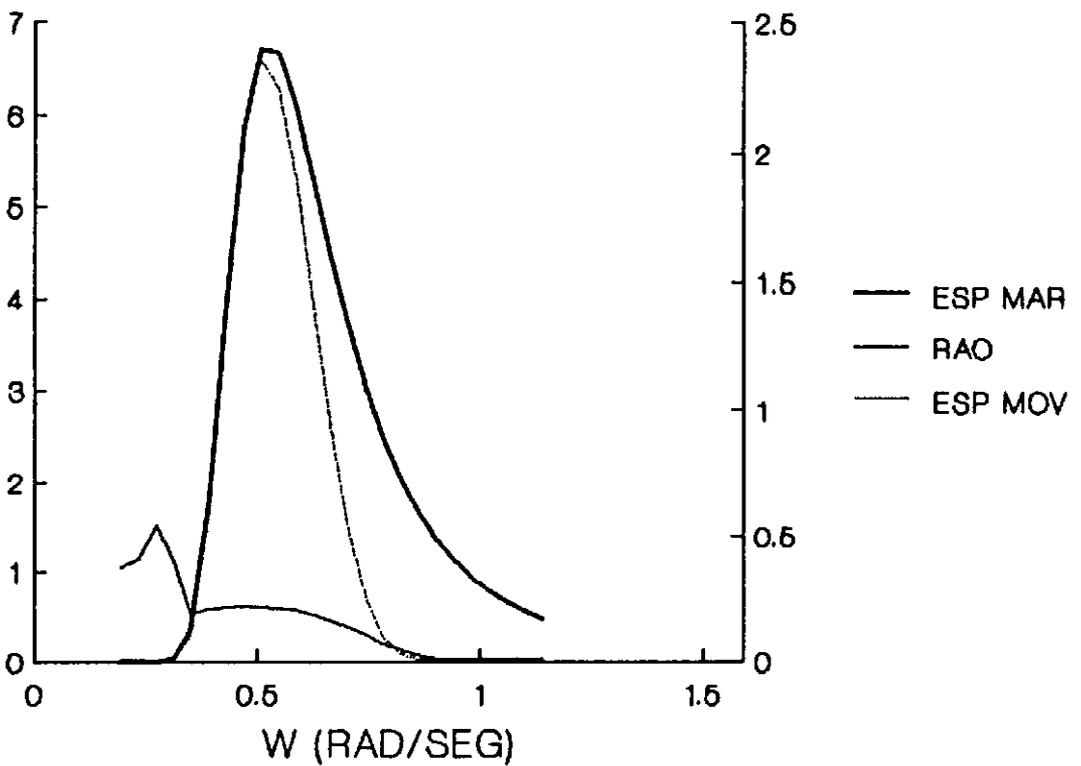
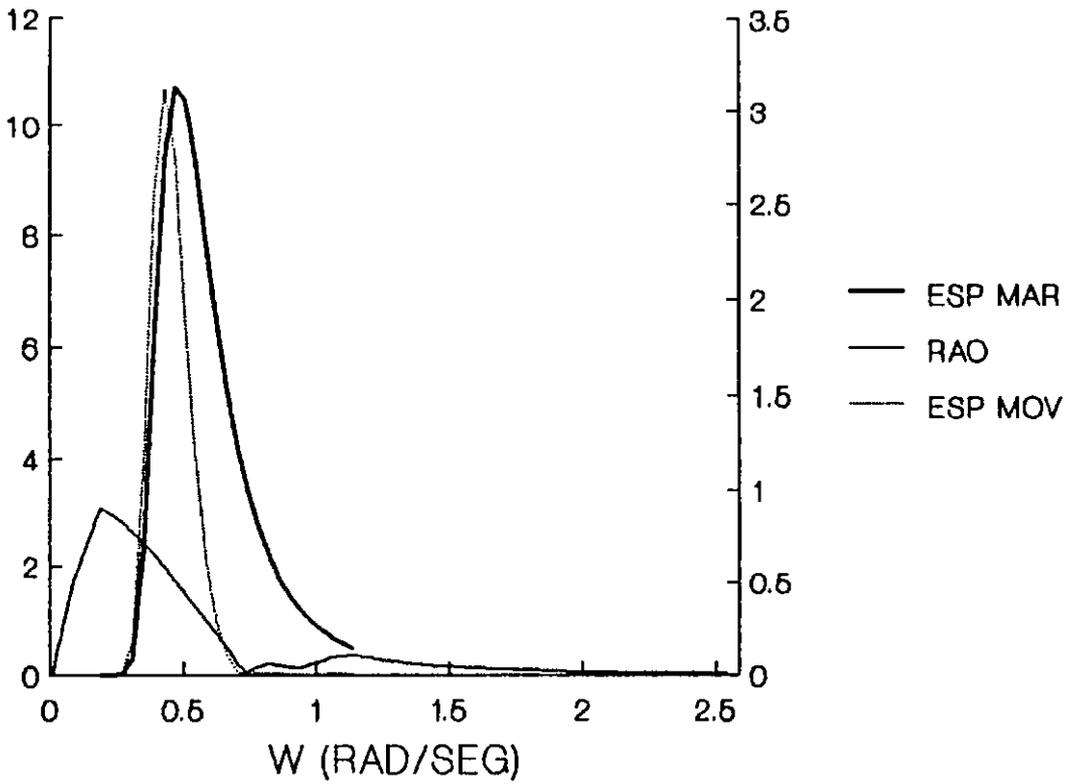
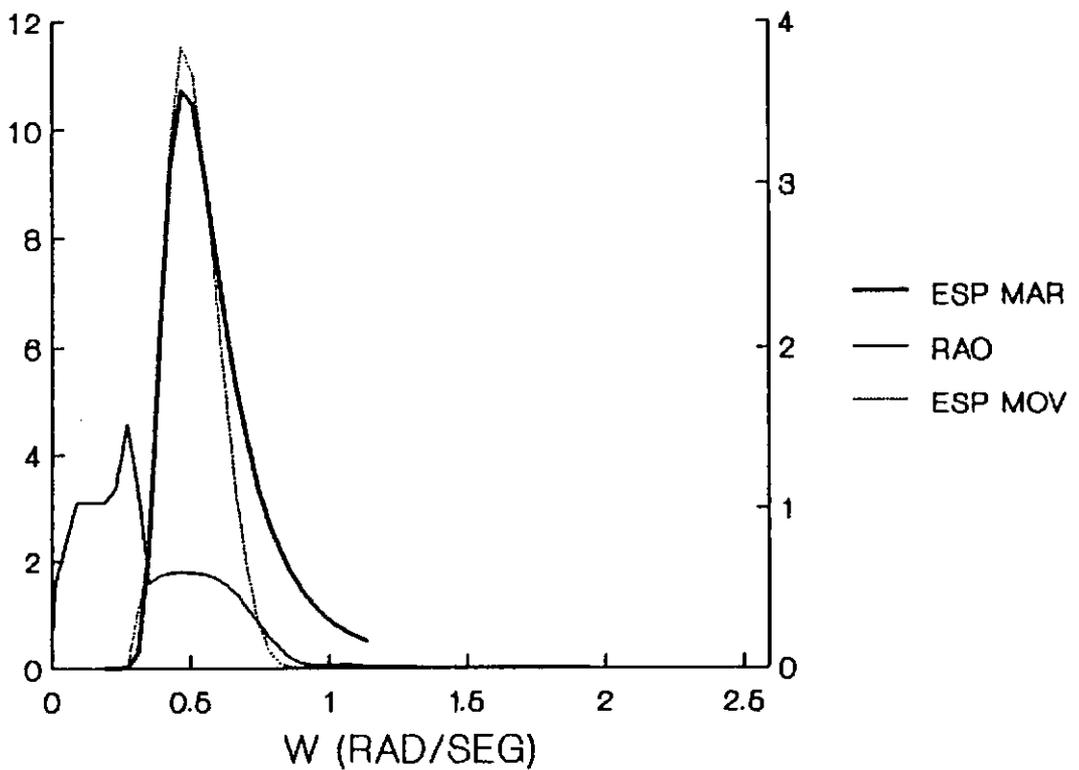


Figura V.9

ESTADO DE MAR 7 - MOVIMENTO X



ESTADO DE MAR 7 - MOVIMENTO Z



Estado de mar		Espectros de Movimentos X e Z						
N	H_s (m)	T_z (s)	σ_x (m)	T_{zx} (s)	ϵ_x	σ_z (m)	T_{zz} (s)	ϵ_z
1	1.25	5.27	0.0228	6.70	0.440	0.0514	9.03	0.205
2	1.75	5.77	0.0416	8.13	0.486	0.0990	9.42	0.218
3	2.75	6.89	0.1246	10.96	0.404	0.2449	10.25	0.259
4	3.75	7.89	0.2529	12.11	0.354	0.4066	10.97	0.296
5	5.10	7.90	0.3449	12.16	0.332	0.5537	10.98	0.296
6	6.30	8.50	0.5089	12.75	0.345	0.7362	11.43	0.319
7	7.60	9.20	0.7383	13.54	0.345	0.9550	12.07	0.353

Tabela V.11 - Valores estatísticos dos espectros de movimentos

V.2.2 - Determinação dos Espectros de Resposta dos Esforços de Tração

A análise dinâmica da linha no domínio da frequência fornece os espectros de resposta dos esforços de tração, os quais são tratados estatisticamente para determinar os valores máximos esperados, para o tempo de recorrência desejado.

A tabela (V.12) apresenta os valores de esforços de tração, em termos de média, desvio padrão e máxima para os respectivos três pontos da linha e estados de mar, analisados.

N		1	2	3	4	5	6	7
H_s (m)		1.25	1.75	2.75	3.75	5.10	6.30	7.60
T_z (s)		5.27	5.77	6.89	7.89	7.90	8.50	9.20
PONTO 1	F_{med}	1372	1374	1791	1784	1800	3363	3344
	σ_F (KN)	12.03	17.71	49.0	74.0	101.8	180.1	231.0
	F_{max}	1418	14537	1968	20051	2167	4008	40168
PONTO 2	F_{med}	1619	1621	2030	2024	2039	3579	3561
	σ_F (KN)	13.5	18.8	49.8	74.1	100.5	175.6	225.1
	F_{max}	1669	1690	2211	2291	2403	4208	4364
PONTO 3	F_{med}	1769	1771	2172	2165	2181	3701	3682
	σ_F (KN)	14.4	19.5	49.7	73.6	99.1	171.6	220.1
	F_{max}	1822	1842	2352	2431	2538	4315	4467

Tabela V.12 - Esforços de tração obtidos pelo domínio da frequência

$$F_{max} = \sigma_F [2 \ln T / T_z]^{1/2} + F_{med} \quad (V.3)$$

onde,

F_{max} = esforço máximo de tração esperado para o tempo T;

F_{med} = esforço de tração estático;

T = tempo de de recorrência, 7200 s;

T_z = período de "zero up-crossing" do espectro de esforços de tração.

Para a execução das análises dinâmicas no domínio da frequência, através do programa "DMOOR", utilizou-se o computador de grande porte IBM - VM/3090, instalado na Petrobrás, cujo tempo de máquina de computador ("cputime") foi de aproximadamente 4 minutos.

Nas tabelas (V.13) a (V.15) são apresentados os valores estatísticos dos espectros de tração para os três pontos analisados da linha de amarração.

Valores Estatísticos dos Espectros de Tração

Estado de Mar			Tração no Ponto 3		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	14.41	7.30	0.357
2	1.75	5.77	19.53	8.10	0.387
3	2.75	6.89	49.72	10.05	0.266
4	3.75	7.89	73.56	10.70	0.291
5	5.10	7.90	99.12	10.85	0.292
6	6.30	8.50	171.62	11.85	0.303
7	7.60	9.20	220.12	12.51	0.331

Tabela V.13

Estado de Mar			Tração no Ponto 2		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	13.49	6.79	0.356
2	1.75	5.77	18.82	7.88	0.389
3	2.75	6.89	49.79	9.68	0.261
4	3.75	7.89	74.08	10.70	0.288
5	5.10	7.90	100.53	10.35	0.295
6	6.30	8.50	175.58	11.81	0.305
7	7.60	9.20	225.06	12.47	0.333

Tabela V.14

Estado de Mar			Tração no Ponto 1		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	12.34	6.57	0.380
2	1.75	5.77	17.12	7.65	0.394
3	2.75	6.89	49.03	9.98	0.281
4	3.75	7.89	74.09	10.69	0.242
5	5.10	7.90	101.89	10.82	0.293
6	6.30	8.50	180.12	11.78	0.309
7	7.60	9.20	231.09	12.43	0.336

Tabela V.15

V.3 - Análise Dinâmica da Linha Isolada no Domínio do Tempo

O modelo utilizado na análise dinâmica da linha no domínio do tempo é semelhante ao adotado no item anterior, com algumas modificações. Adotou-se o programa "MODEX" [9] para a realização das análises.

Com a finalidade de utilizar elementos ao longo da linha com relações de rigidez e massa similares, o modelo foi discretizado em 66 elementos finitos, como mostram a figura (V.11) e a tabela (V.16).

Desta forma, obteve-se um valor de incremento de tempo compatível para que não houvesse problemas de convergência, durante a integração numérica.

O tempo total de simulação foi de 1074 s, desprezando os 50 primeiros segundos para não considerar a parcela transiente da análise.

Segmento	Número de Elementos
1	30
2	30
3	6

Tabela V.16 - Modelo do Modex

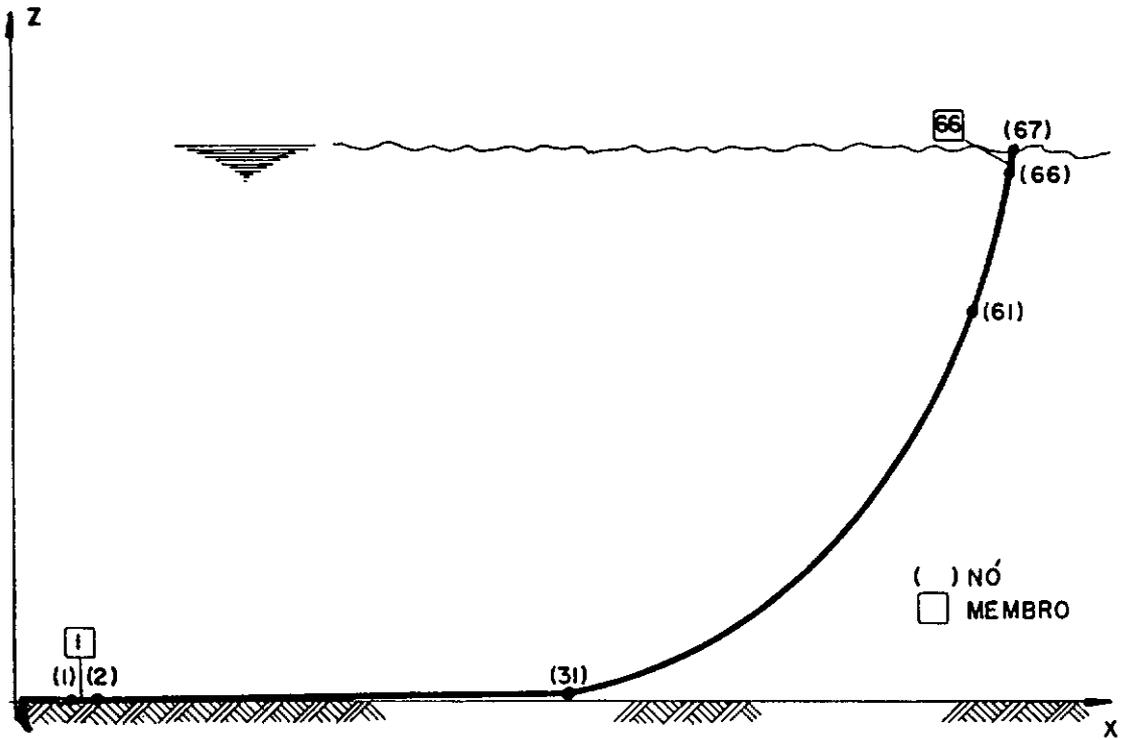


FIGURA V. 11 - MODELO DA LINHA "MODEX".

V.3.1 - Geração das Séries Temporais dos Movimentos

A partir dos espectros de movimentos obtidos na análise dinâmica da frequência, foram geradas as séries temporais utilizando a Transformada de Fourier, segundo PRESS [19].

O procedimento simplificado da geração das séries é apresentado a seguir:

- . obtenção dos [RAO] dos movimentos X e Z, em termos de amplitude $X(w_i)$ e $Z(w_i)$ e ângulos de fase $\theta_x(w_i)$ e $\theta_z(w_i)$, no plano da linha;

- . geração do espectro do mar $S(w_i)$;

- . determinação dos limites (inferior e superior) das frequências w_1 e w_2 e do número de frequências a ser analisado N;

- . o processo é modelado entre o intervalo de frequências w_1 a w_2 , assumindo que cada incremento de frequência Δw_i é gerado aleatoriamente;

- . consideração de uma fase aleatória ψ_i , distribuída entre 0 e 2π .

- . cálculo das séries temporais dos movimentos $X(t)$ e $Z(t)$.

$$X(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 S(w_i) \Delta w_i} X(w_i) \cos(w_i t + \theta_x(w_i) + \psi_i)$$

$$Z(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 S(w_i) \Delta w_i} Z(w_i) \cos(w_i t + \theta_z(w_i) + \psi_i)$$

(V.4)

De acordo com as normas vigentes, recomenda-se calcular os valores máximos esperados de deslocamentos e esforços, para um tempo de recorrência de duas horas.

Entretanto, torna-se inviável a realização de uma análise dinâmica no domínio do tempo, considerando um tempo total de simulação de duas horas, pois ter-se-á aproximadamente 1440000 (200x7200) pontos de intergração.

Portanto realizou-se um estudo com a finalidade de reduzir o tempo total de simulação sem perder a precisão e confiabilidade dos resultados.

O estudo baseiou-se na avaliação dos esforços dinâmicos máximos no "fairlead" da linha, para o estado de mar 7, considerando 4 séries temporais de movimentos geradas com os respectivos tempos totais de simulação, a saber: 562 s, 1074 s, 4146 s e 8242 s.

A tabela (V.17) apresenta os resultados em termos de valores estatísticos e tempo de CPU. Analisando-os, observa-se que os valores obtidos com o tempo de simulação de 1074 s são compatíveis com os de 8242 s, tendo como vantagem o menor tempo de CPU.

Neste trabalho as séries temporais de movimentos foram geradas com duração total de 1074 segundos e com intervalos de tempo de 1 segundo, considerando um número de 100 frequências aleatórias.

As séries temporais geradas foram tratadas estatisticamente em termos de desvio padrão, período de "zero up-crossing" e largura de banda, para compará-las com os valores estatísticos dos espectros.

Séries Temporais no "Fairlead"								
Excitação			Esforços de Tração					
N	T _{sim}	Δt	F _{med}	σ _F	F _{max}	T _z	ε	CPU
	(s)	(s)	(KN)	(KN)	(KN)	(s)		(h)
1	562	1.0	3640	221.6	4312	11.9	0.71	0:30
2	1074	1.0	3641	232.6	4418	12.1	0.68	0:56
3	4146	1.0	3642	231.0	4479	12.3	0.44	3:35
4	8242	1.0	3641	230.7	4451	12.3	0.42	7:00

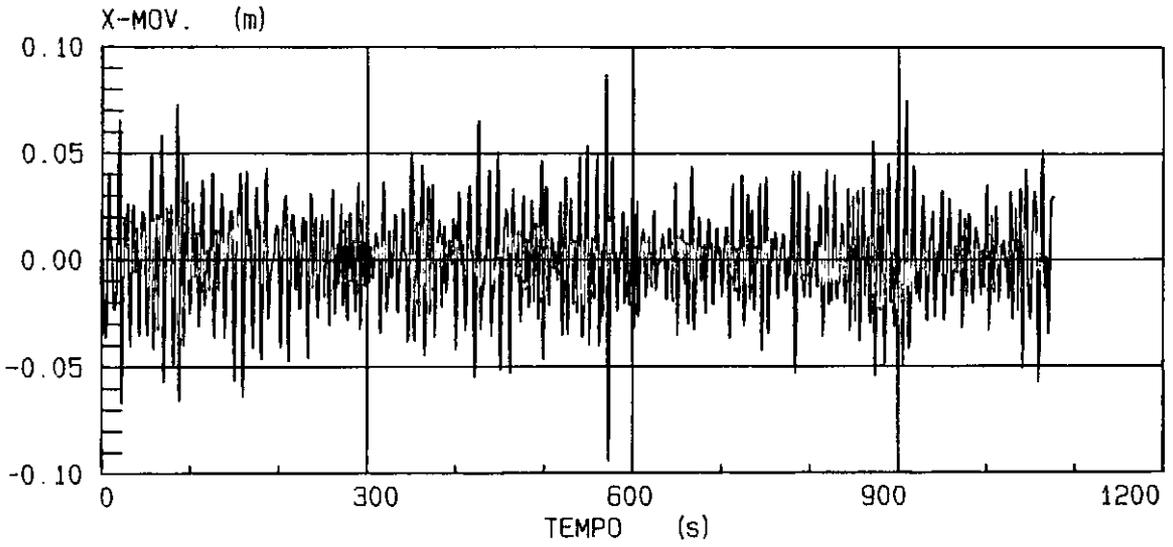
Tabela V.17 - Estudo comparativo de tempo de simulação

O objetivo é obter séries temporais que simulem corretamente os espectros de movimentos. De modo a assegurar a compatibilidade da área do espectro, do período médio e do intervalo de frequências, a transformada inversa de Fourier foi aplicada sobre a série temporal, determinando, novamente, o espectro de movimento de acordo com PRESS [19].

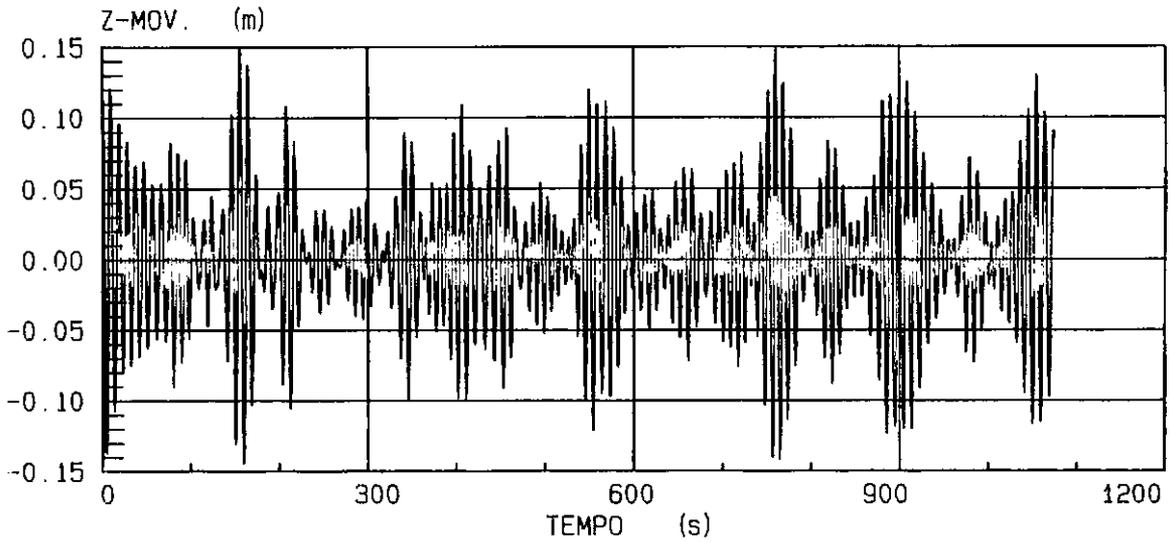
Os valores estatísticos calculados para as séries temporais estão resumidos na tabela (V.18). A comparação com os valores obtidos dos espectros é apresentada na tabela (V.19).

As figuras (V.12) a (V.18) apresentam as séries temporais e os respectivos espectros de movimentos.

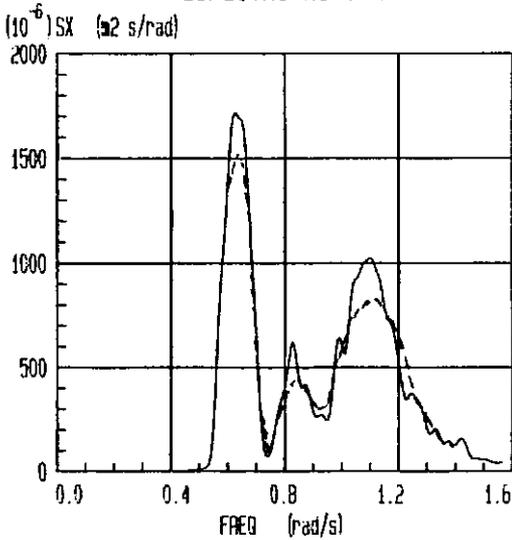
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 1



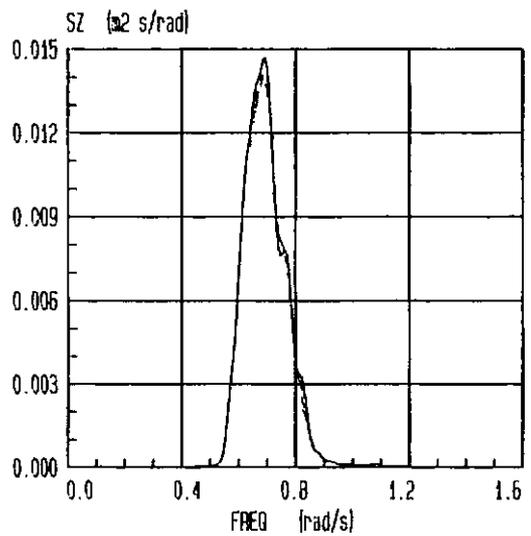
MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 1



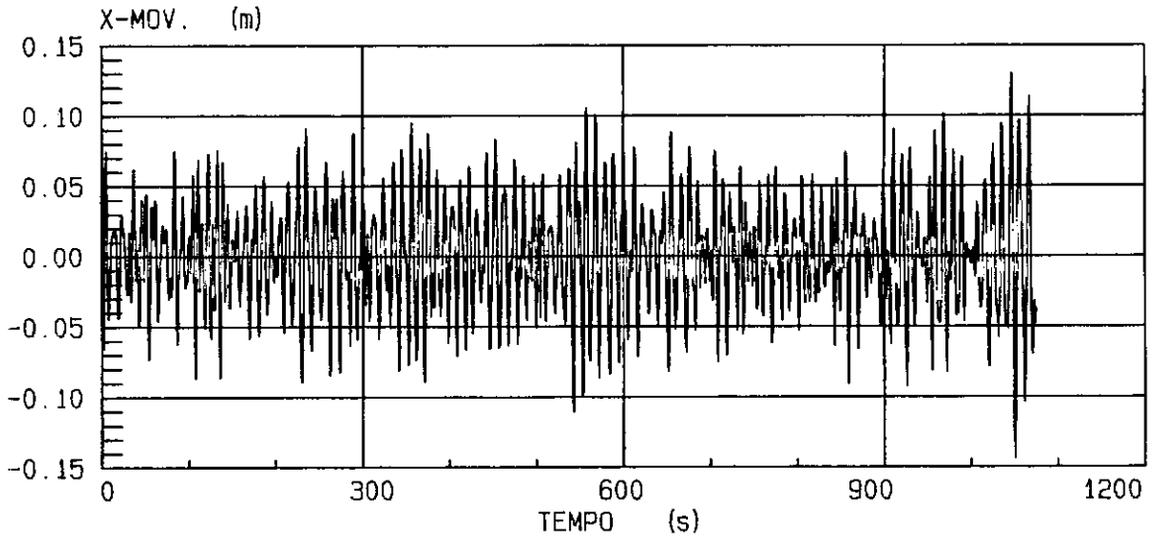
ESPECTRO MOV. X



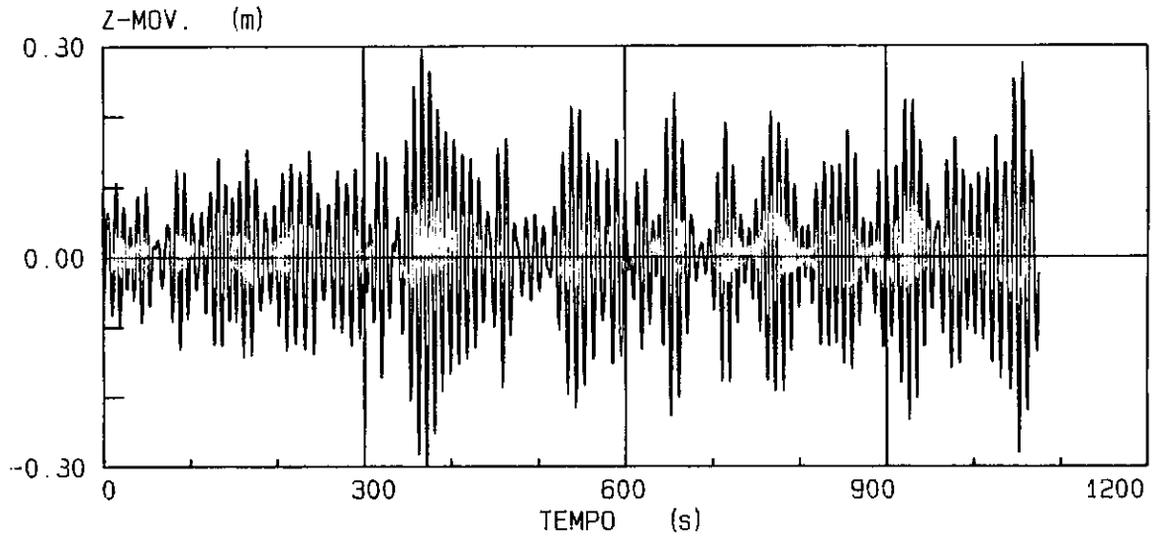
ESPECTRO MOV. Z



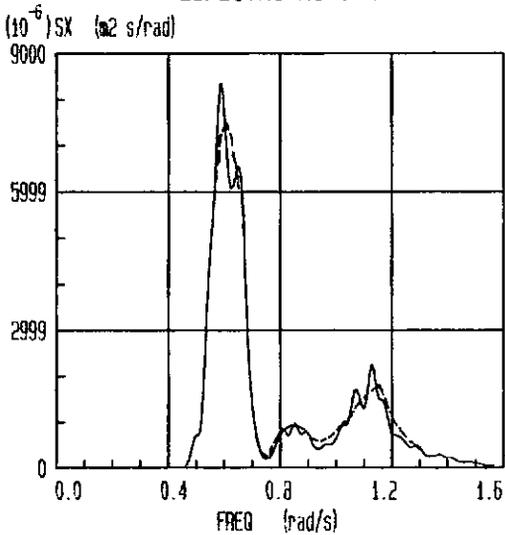
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 2



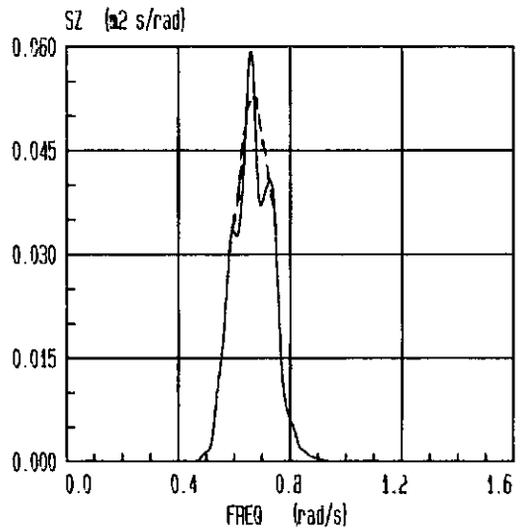
MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 2



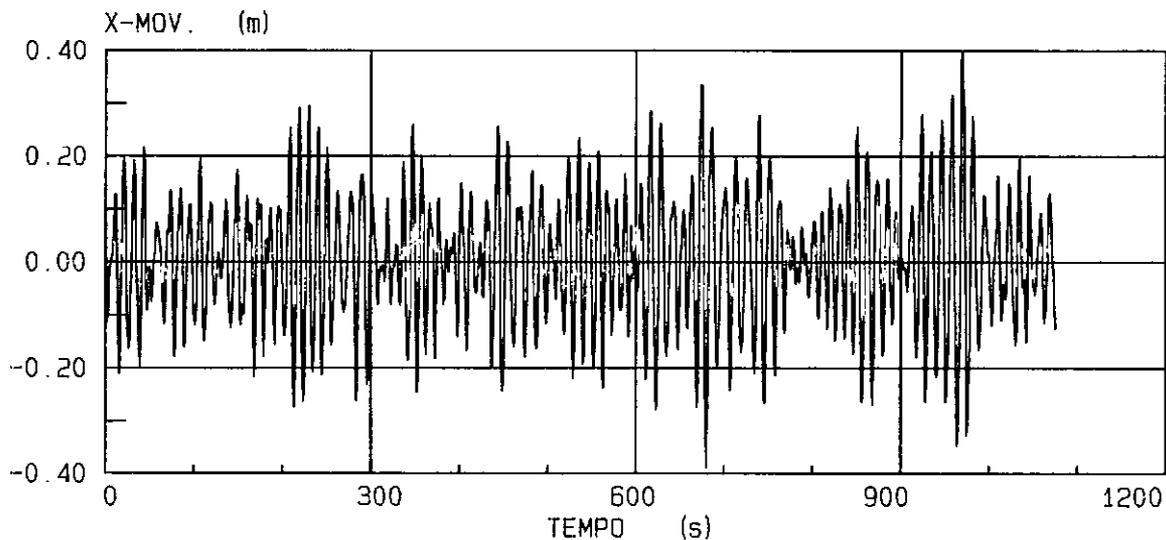
ESPECTRO MOV. X



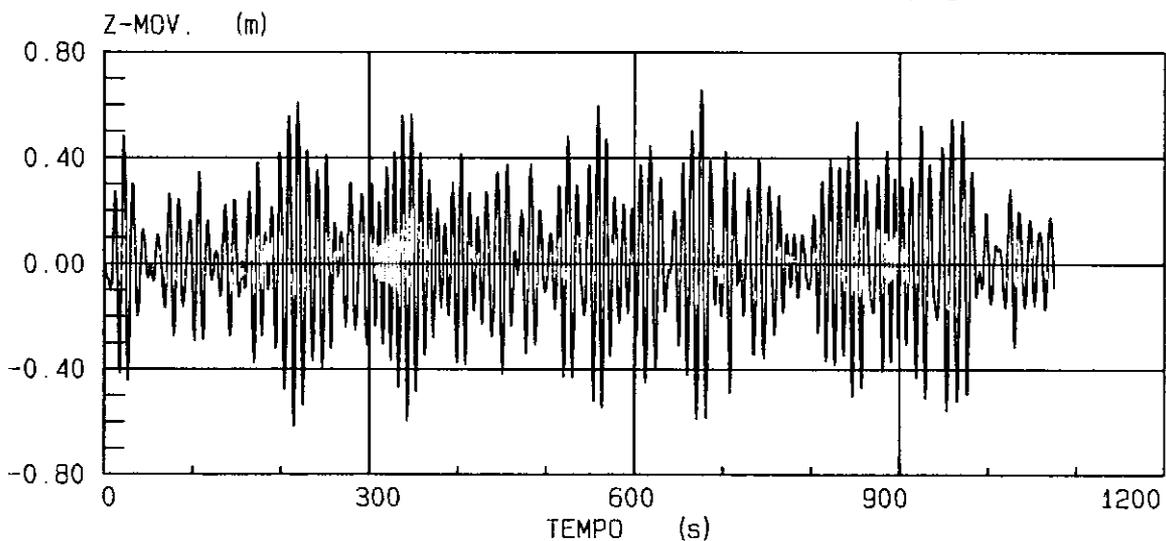
ESPECTRO MOV. Z



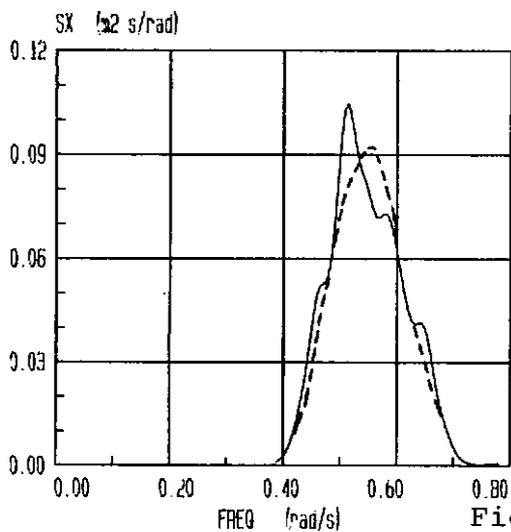
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 3



MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 3



ESPECTRO MOV. X



ESPECTRO MOV. Z

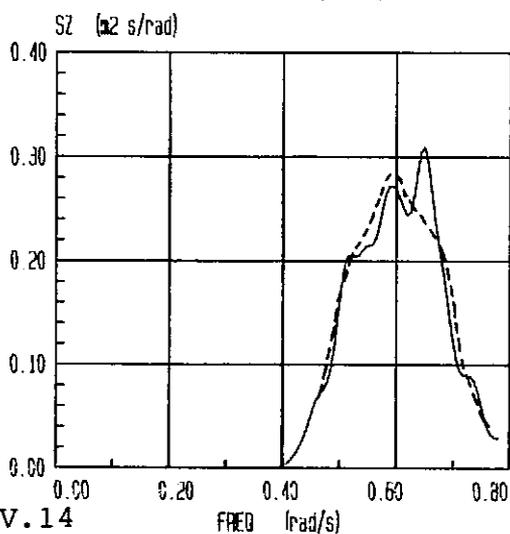
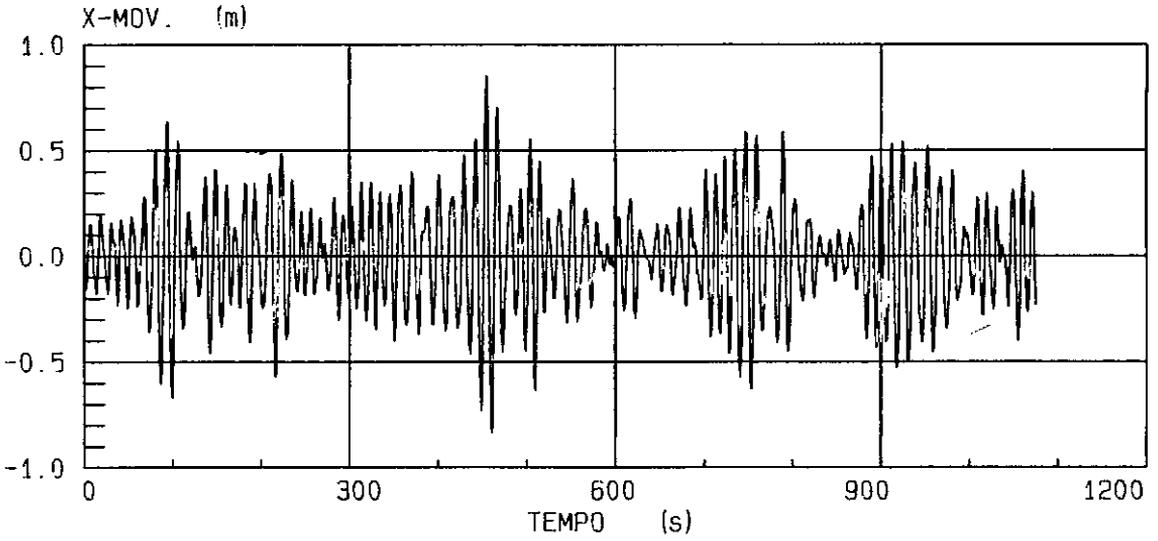
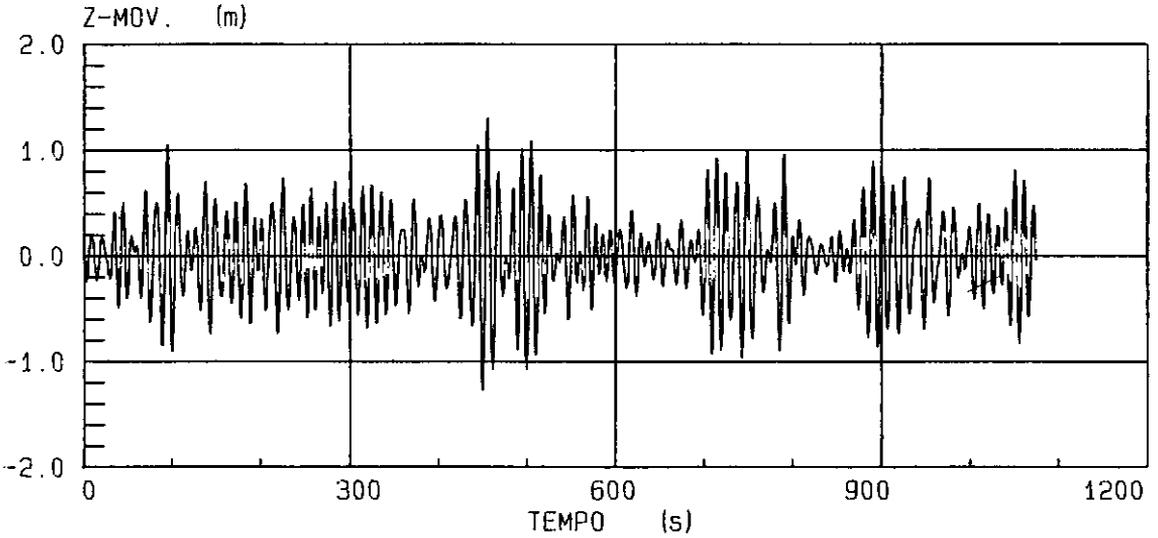


Figura V.14

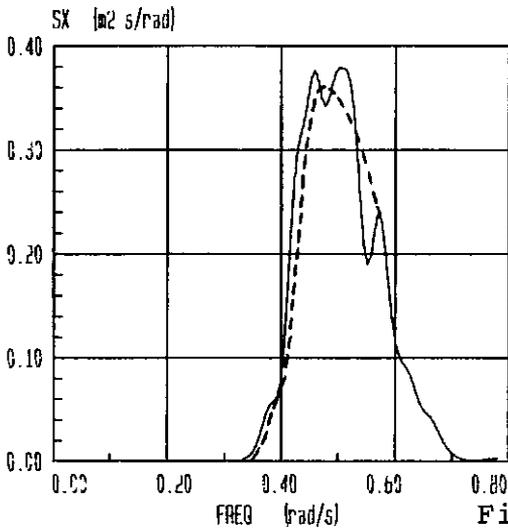
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 4



MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 4



ESPECTRO MOV. X



ESPECTRO MOV. Z

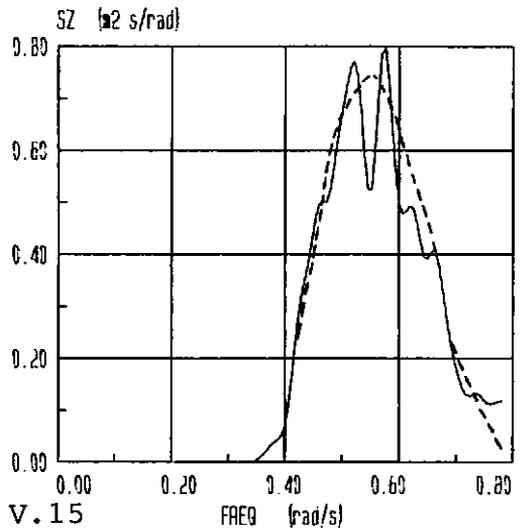
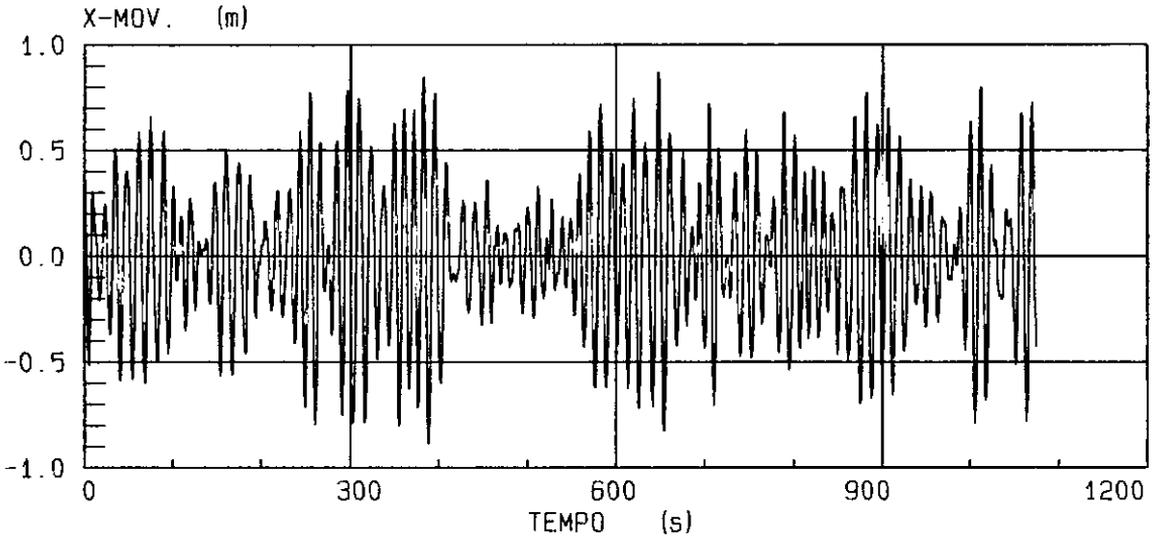
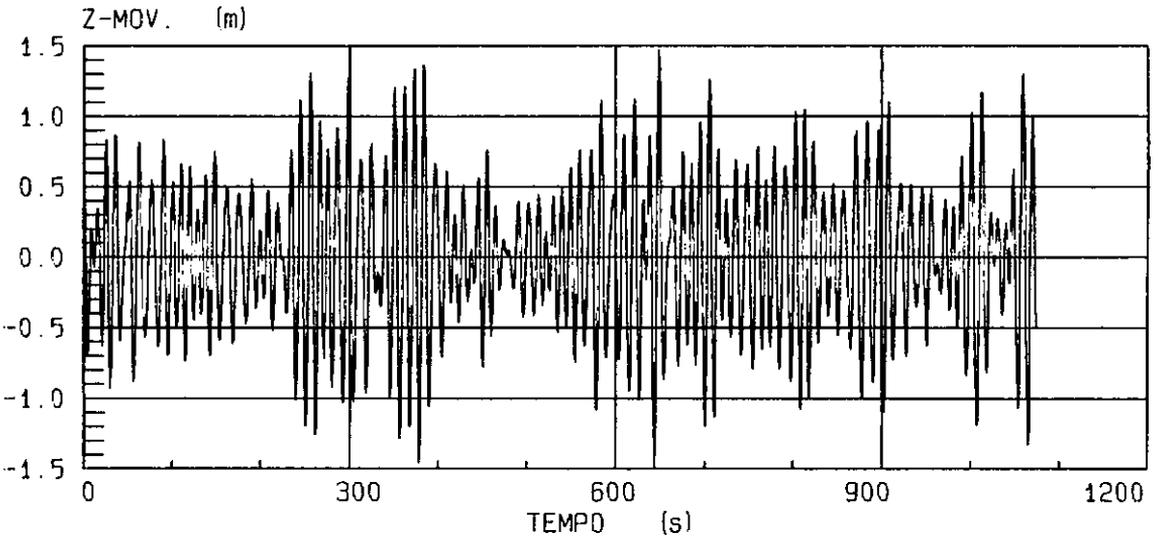


Figura V.15

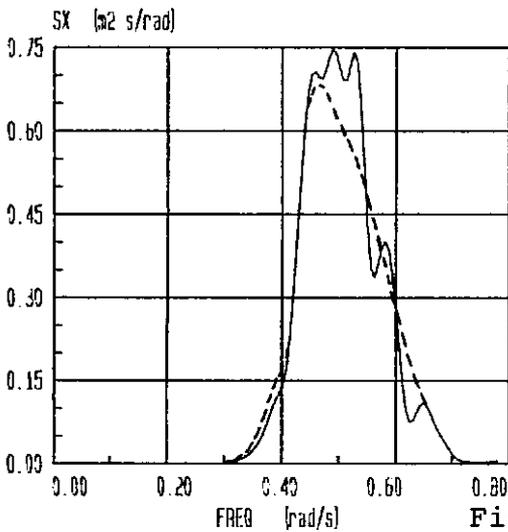
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 5



MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 5



ESPECTRO MOV. X



ESPECTRO MOV. Z

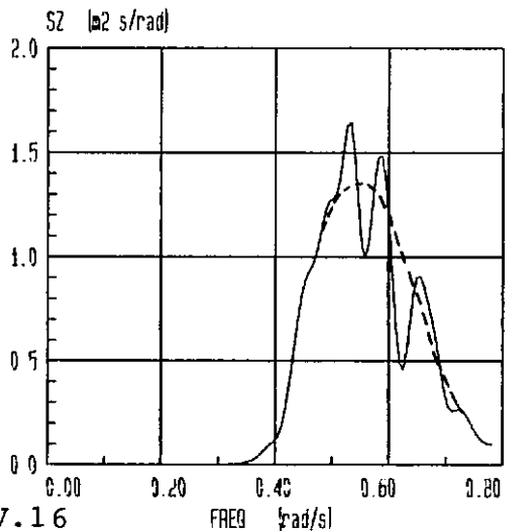
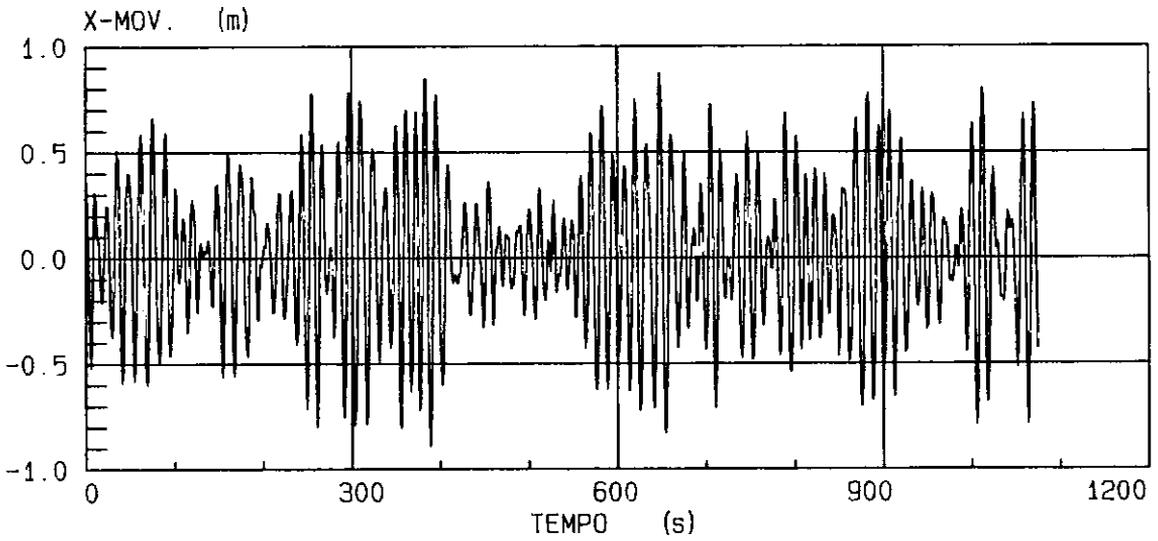
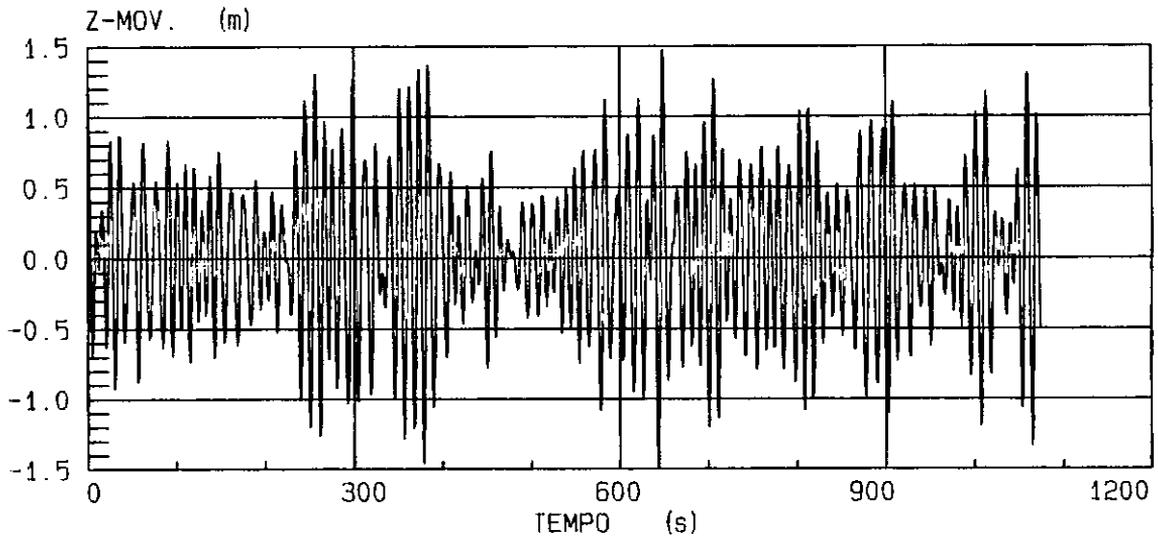


Figura V.16

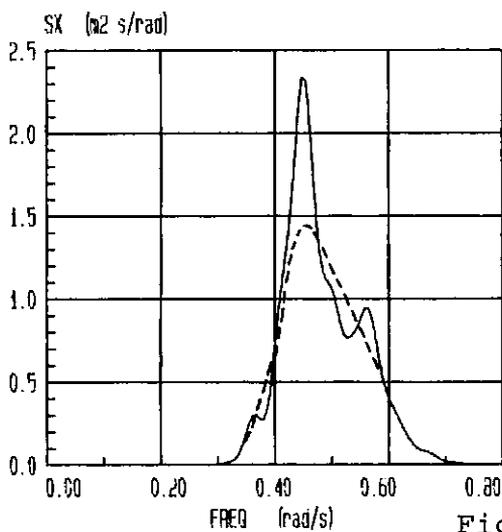
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 6



MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 6



ESPECTRO MOV. X



ESPECTRO MOV. Z

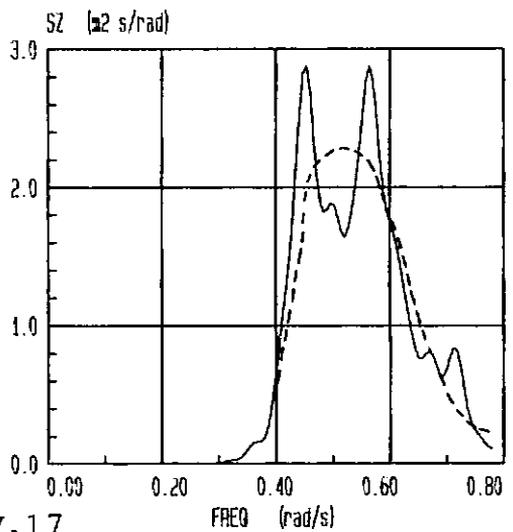
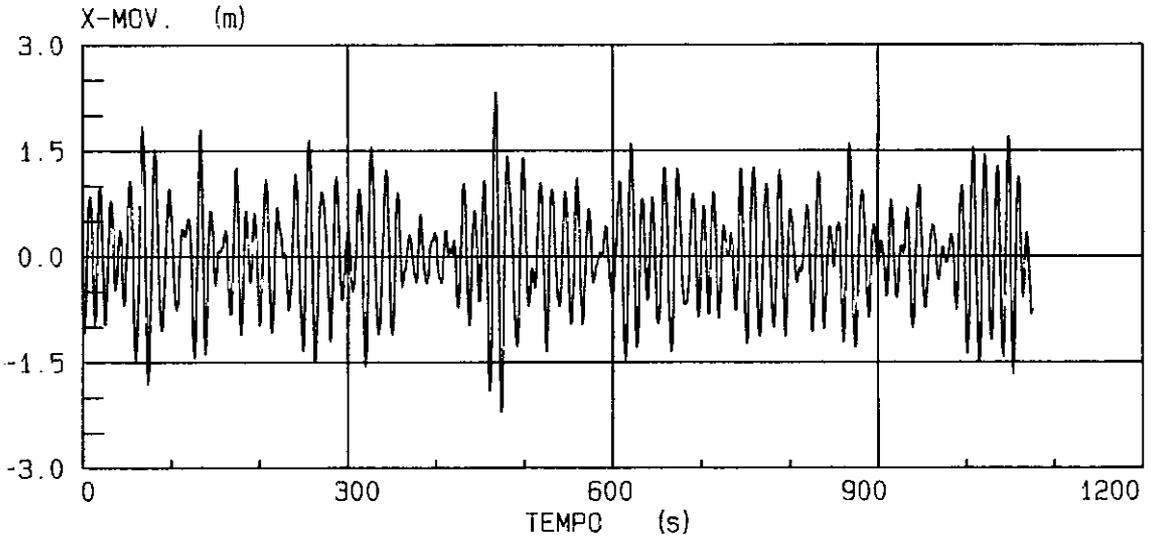
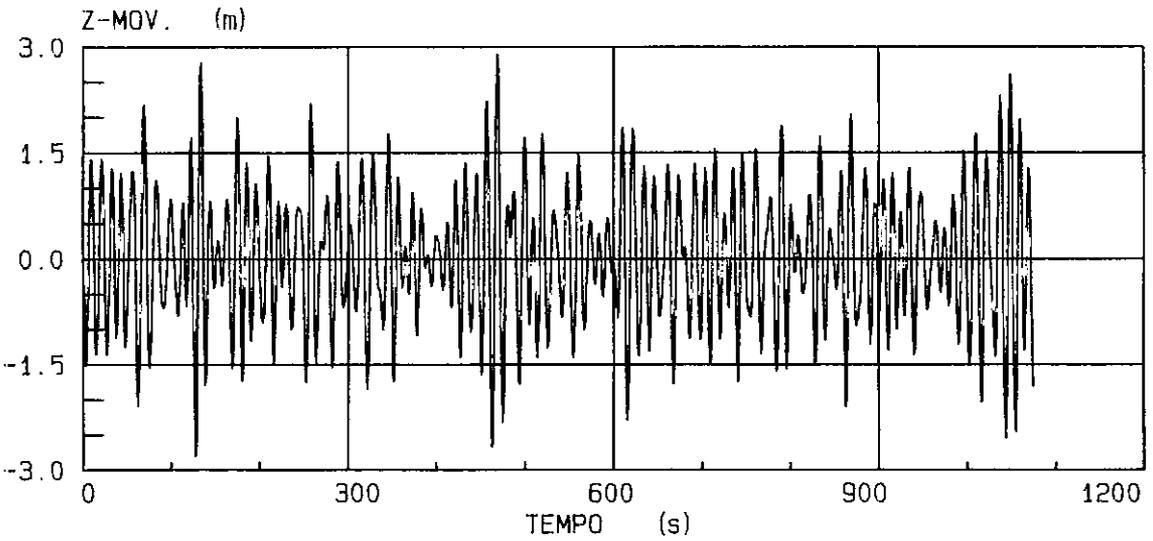


Figura V.17

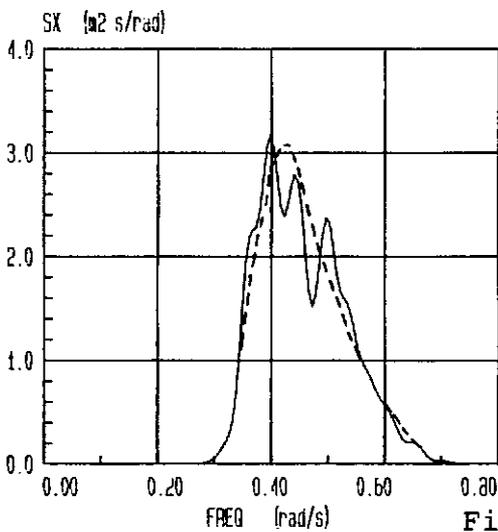
MOVIMENTO X "FAIRLEAD" MAR 7



MOVIMENTO Z "FAIRLEAD" MAR 7



ESPECTRO MOV. X



ESPECTRO MOV. Z

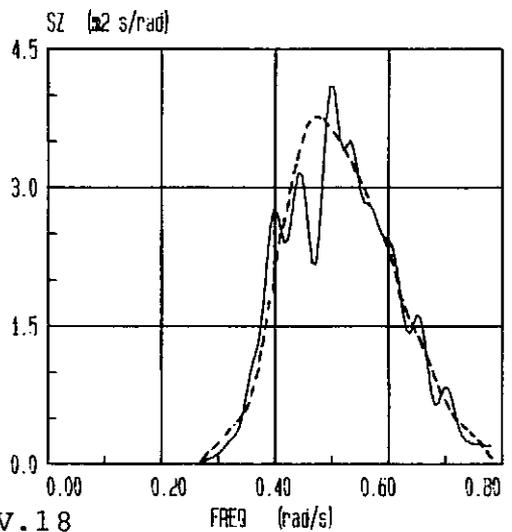


Figura V.18

Estado de mar		Espectros de Movimentos X e Z						
N	H_s (m)	T_z (s)	σ_x (m)	T_{zx} (s)	ϵ_x	σ_z (m)	T_{zz} (s)	ϵ_z
1	1.25	5.27	0.0224	6.57	0.425	0.0510	8.94	0.129
2	1.75	5.77	0.0412	7.97	0.556	0.0970	9.65	0.188
3	2.75	6.89	0.1261	10.81	0.523	0.2387	10.37	0.270
4	3.75	7.89	0.2534	12.08	0.440	0.4005	10.73	0.198
5	5.10	7.90	0.3507	12.02	0.506	0.5511	11.04	0.280
6	6.30	8.50	0.5132	12.41	0.257	0.7452	11.33	0.343
7	7.60	9.20	0.7367	13.44	0.441	0.9597	12.05	0.292

Tabela V.18 - Valores estatísticos das séries temporais

Estado de mar	Comparações dos valores estatísticos							
	Movimento X			Movimento Z				
N	H_s	T_z	σ_s / σ_e	T_{zs} / T_{ze}	ϵ_s / ϵ_e	σ_s / σ_e	T_{zs} / T_{ze}	ϵ_s / ϵ_e
1	1.25	5.27	0.98	0.98	0.97	0.99	0.99	0.63
2	1.75	5.77	0.99	0.98	1.14	0.98	1.02	0.87
3	2.75	6.89	1.01	0.99	1.30	0.97	1.01	1.05
4	3.75	7.89	1.00	1.00	1.25	0.98	0.98	0.67
5	5.10	7.90	1.02	0.99	1.51	1.00	1.01	0.94
6	6.30	8.50	1.01	0.97	0.75	1.01	0.99	1.07
7	7.60	9.20	1.00	1.05	1.28	1.01	1.00	0.83

Tabela V.19 - Comparação entre os valores estatísticos das séries temporais e dos espectros de movimentos

V.3.2 - Determinação das Séries Temporais de Esforços de Tração

Inicialmente fez-se uma análise estática da linha, considerando forças de peso próprio e empuxo e a coordenada estática do "fairlead" resultando em uma configuração inicial, sobre a qual foi realizada a análise dinâmica, propriamente dita. Aproveitou-se para comparar os resultados com o da análise estática do programa "DMOOR". A tabela (V.20) apresenta os resultados.

Estado de mar		Coordenadas "fairlead"		Tração estática na linha (KN)			
N	H _S (m)	T _Z (s)	X (m)	Y (m)	Pto1	Pto2	Pto3
1	1.25	5.27	2859.50	995.30	1334	1593	1735
2	1.75	5.77	2859.64	995.30	1338	1597	1739
3	2.75	6.89	2878.72	995.30	1750	2002	2136
4	3.75	7.89	2878.42	995.30	1742	1994	2129
5	5.10	7.90	2879.12	995.30	1761	2013	2147
6	6.30	8.50	2928.66	995.30	3323	3553	3668
7	7.60	9.20	2928.13	995.30	3301	3531	3646

Tabela V.20 - Configuração estática - Domínio do tempo

O programa "MODEX", adotado para as análises no domínio do tempo, foi executado no computador de grande porte VAX - 8650, instalado na Petrobrás, cujo tempo de máquina de computador ("cputime") para a realização de cada

análise foi de 56 minutos.

A tabela (V.21) apresenta os resultados dos esforços dinâmicos de tração, para os três pontos analisados da linha.

N		1	2	3	4	5	6	7
H_s (m)		1.25	1.75	2.75	3.75	5.10	6.30	7.60
T_z (s)		5.27	5.77	6.89	7.89	7.90	8.50	9.20
PONTO 1 (KN)	F_{med}	1334	1338	1747	1739	1756	3318	3296
	σ_F	12.5	16.9	47.0	74.8	100.0	191.5	2369.8
	F_{max}	1388	1405	1927	1997	2114	3964	4047
PONTO 2 (KN)	F_{med}	1593	1597	1999	2007	2008	3548	3526
	σ_F	13.6	18.6	49.7	77.7	102.5	189.6	236.6
	F_{max}	1649	1672	2194	2282	2369	4196	4288
PONTO 3 (KN)	F_{med}	1735	1739	2134	2126	2142	3663	3641
	σ_F	14.6	19.7	50.9	79.2	104.2	189.2	235.5
	F_{max}	1799	1827	2340	2396	2522	4319	4418

Tabela V.21 - Esforços dinâmicos de tração obtidos no domínio do tempo

Semelhante ao caso dos movimentos no "fairlead", os históricos de tração no tempo foram tratados estatisticamente, obtendo os valores de desvio padrão, período de "zero up-crossing" e largura de banda, os quais estão resumidos nas tabelas (V.22) a (V.24).

Adicionalmente aplicaram-se sobre os históricos a transformada inversa de Fourier determinando os espectros de energia de tração.

Estatística das Séries Temporais de Esforços de Tração

Estado de Mar			Tração no Ponto 3		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	14.61	7.07	0.544
2	1.75	5.77	19.70	7.85	0.545
3	2.75	6.89	50.89	9.78	0.433
4	3.75	7.89	79.24	10.38	0.553
5	5.10	7.90	104.20	10.67	0.497
6	6.30	8.50	189.20	11.60	0.545
7	7.60	9.20	235.50	12.15	0.681

Tabela V.22

Estado de Mar			Tração no Ponto 2		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	13.56	6.59	0.480
2	1.75	5.77	18.63	7.65	0.539
3	2.75	6.89	49.73	9.69	0.475
4	3.75	7.89	77.74	10.46	0.518
5	5.10	7.90	102.50	10.59	0.509
6	6.30	8.50	189.60	11.39	0.578
7	7.60	9.20	236.60	11.78	0.641

Tabela V.23

Estado de Mar			Tração no Ponto 1		
			σ_F (KN)	T_z (s)	ϵ
1	1.25	5.27	12.49	6.37	0.482
2	1.75	5.77	16.87	7.35	0.531
3	2.75	6.89	47.00	9.54	0.470
4	3.75	7.89	74.85	10.29	0.515
5	5.10	7.90	100.00	10.46	0.544
6	6.30	8.50	191.50	11.50	0.560
7	7.60	9.20	239.80	11.92	0.599

Tabela V.24

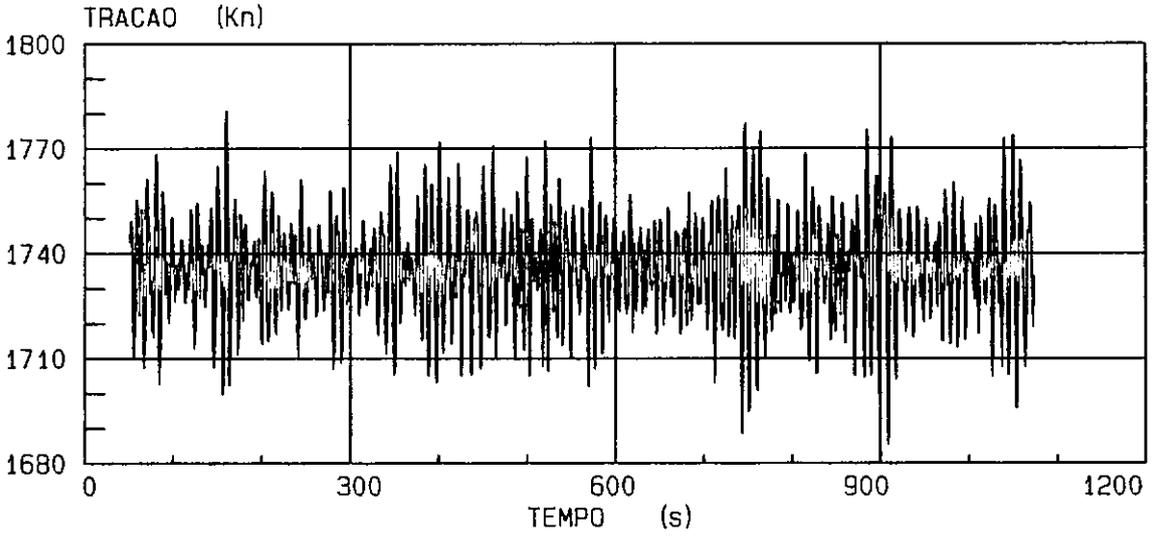
A comparação entre os resultados obtidos das análises dinâmicas, integradas nos domínios da frequência e do tempo, em termos de tensões, é resumida na tabela (V.25).

	N	1	2	3	4	5	6	7
	Hs	1.25	1.75	2.75	3.75	5.10	6.30	7.60
	Tz	5.27	5.77	6.89	7.89	7.90	8.50	9.20
PONTO 1	σ_{Fs}/σ_{Fe}	1.01	0.99	0.96	1.01	0.98	1.06	1.04
	T_{zs}/T_{ze}	0.97	0.96	0.96	0.96	0.97	0.98	0.96
	ϵ_s/ϵ_e	1.27	1.35	1.67	2.12	1.85	1.81	1.78
PONTO 2	σ_{Fs}/σ_{Fe}	1.01	0.99	1.00	1.05	1.02	1.08	1.05
	T_{zs}/T_{ze}	0.97	0.97	1.00	0.98	1.02	0.96	0.94
	ϵ_s/ϵ_e	1.34	1.38	1.81	1.79	1.72	1.89	1.92
PONTO 3	σ_{Fs}/σ_{Fe}	1.01	1.01	1.02	1.08	1.05	1.10	1.07
	T_{zs}/T_{ze}	0.97	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.97
	ϵ_s/ϵ_e	1.52	1.40	1.63	1.90	1.70	1.79	2.06

Tabela V.25 - Comparação entre os resultados obtidos através das séries temporais e dos espectros de tração

As figuras (V.19) a (V.39) apresentam as séries temporais de tração e os respectivos espectros, para cada estado de mar.

TRACAO "FAIRLEAD" MAR 1



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 1

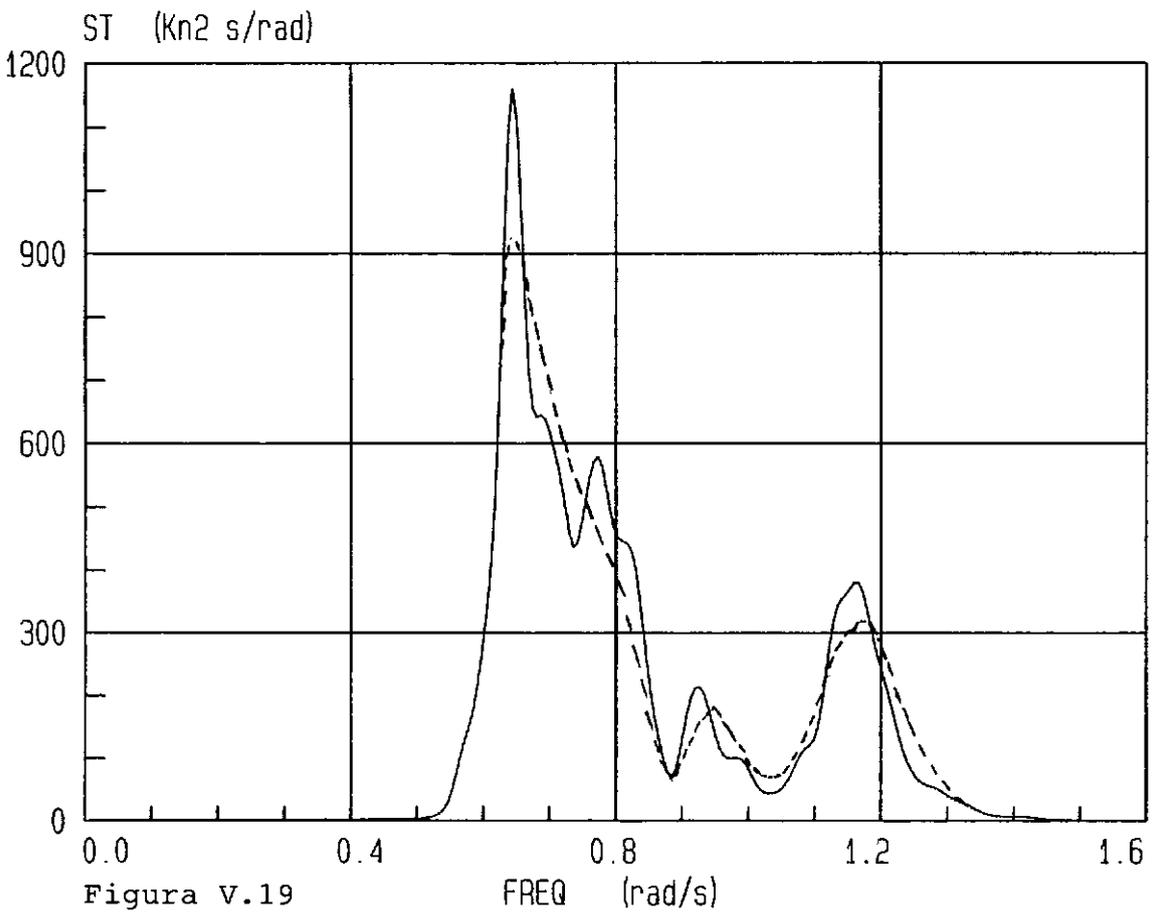


Figura V.19

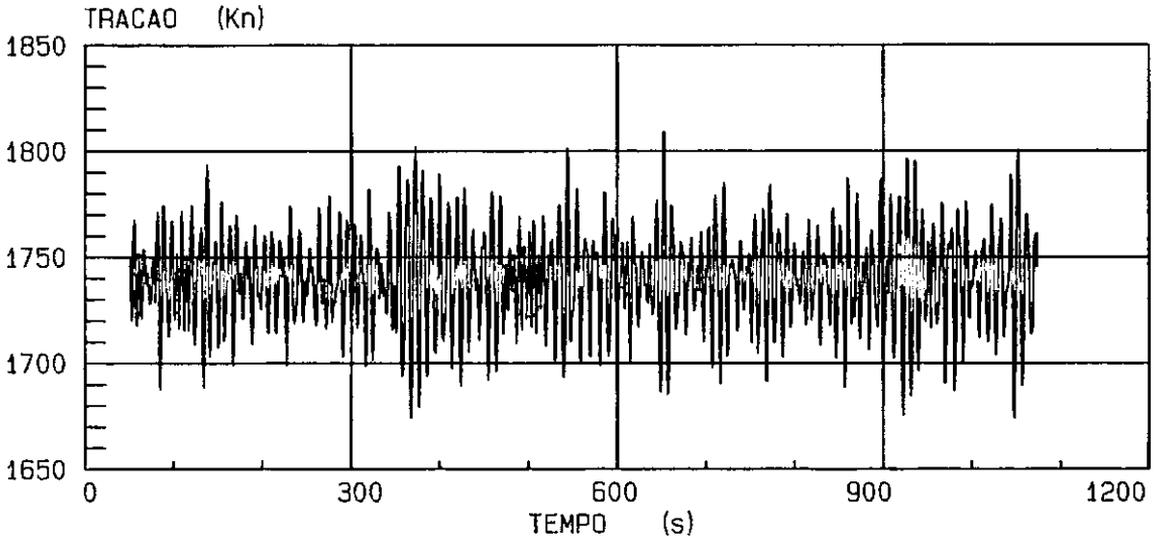
Figura V.20

FREQ (rad/s)

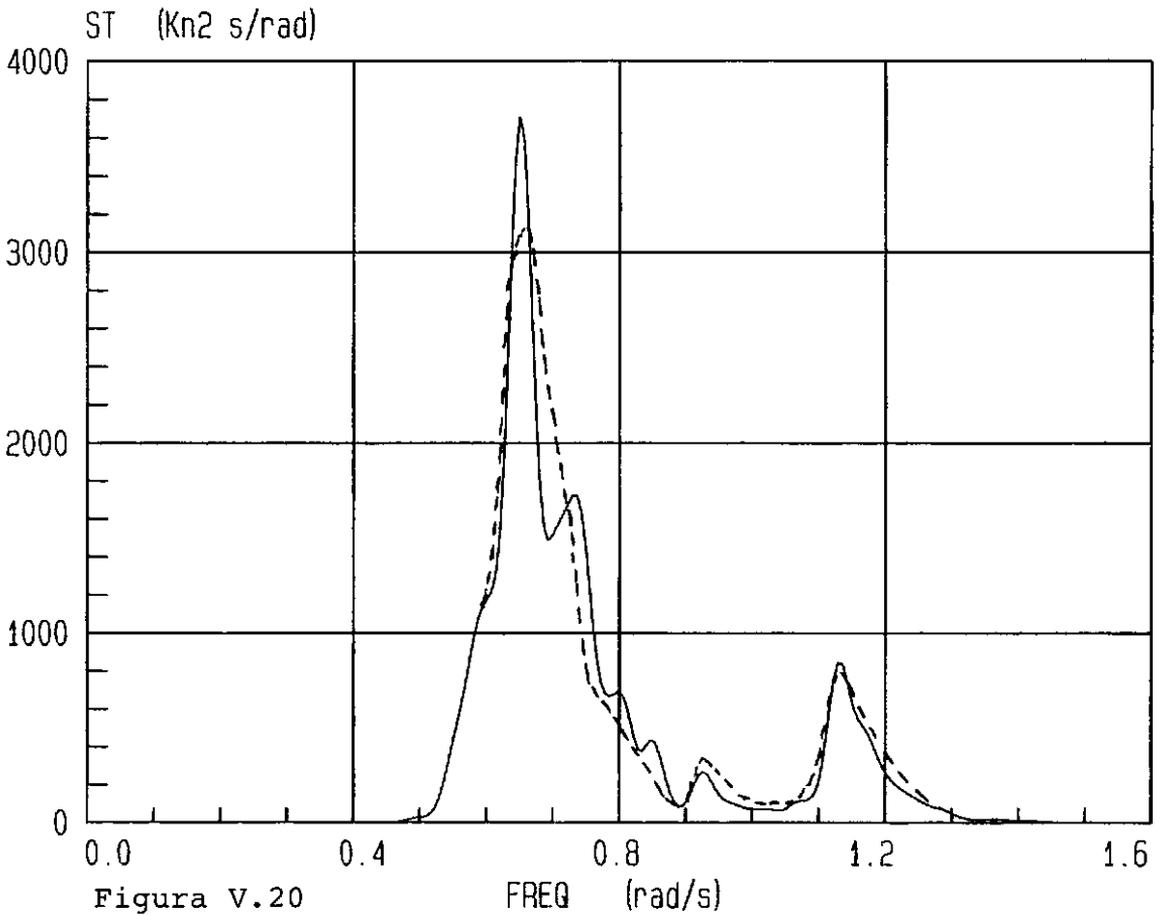
Figura V.21

FREQ (rad/s)

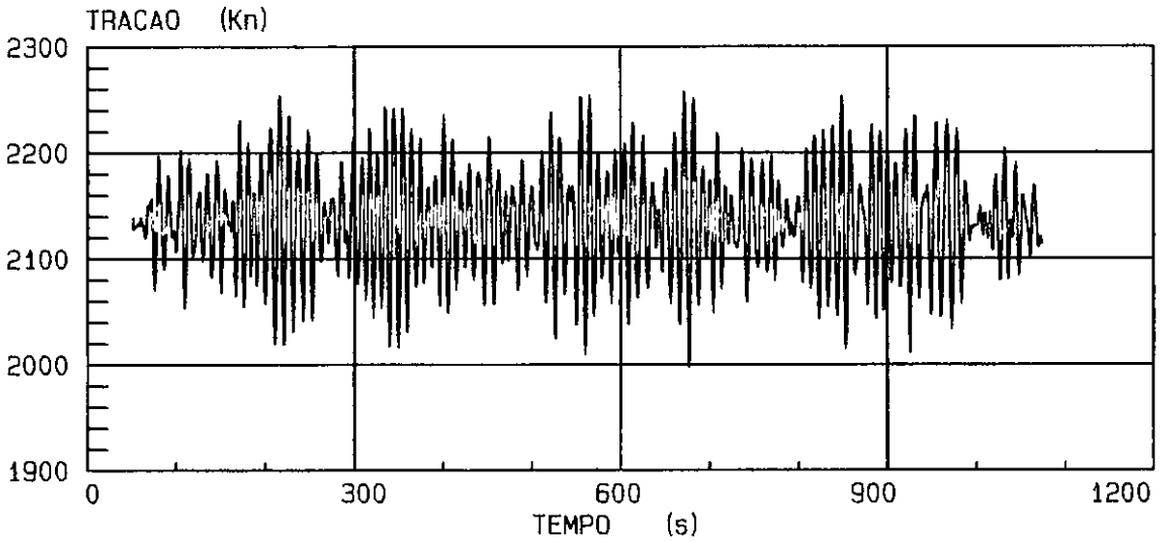
TRACAO "FAIRLEAD" MAR 2



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 2



TRACAO "FAIRLEAD" MAR 3



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 3

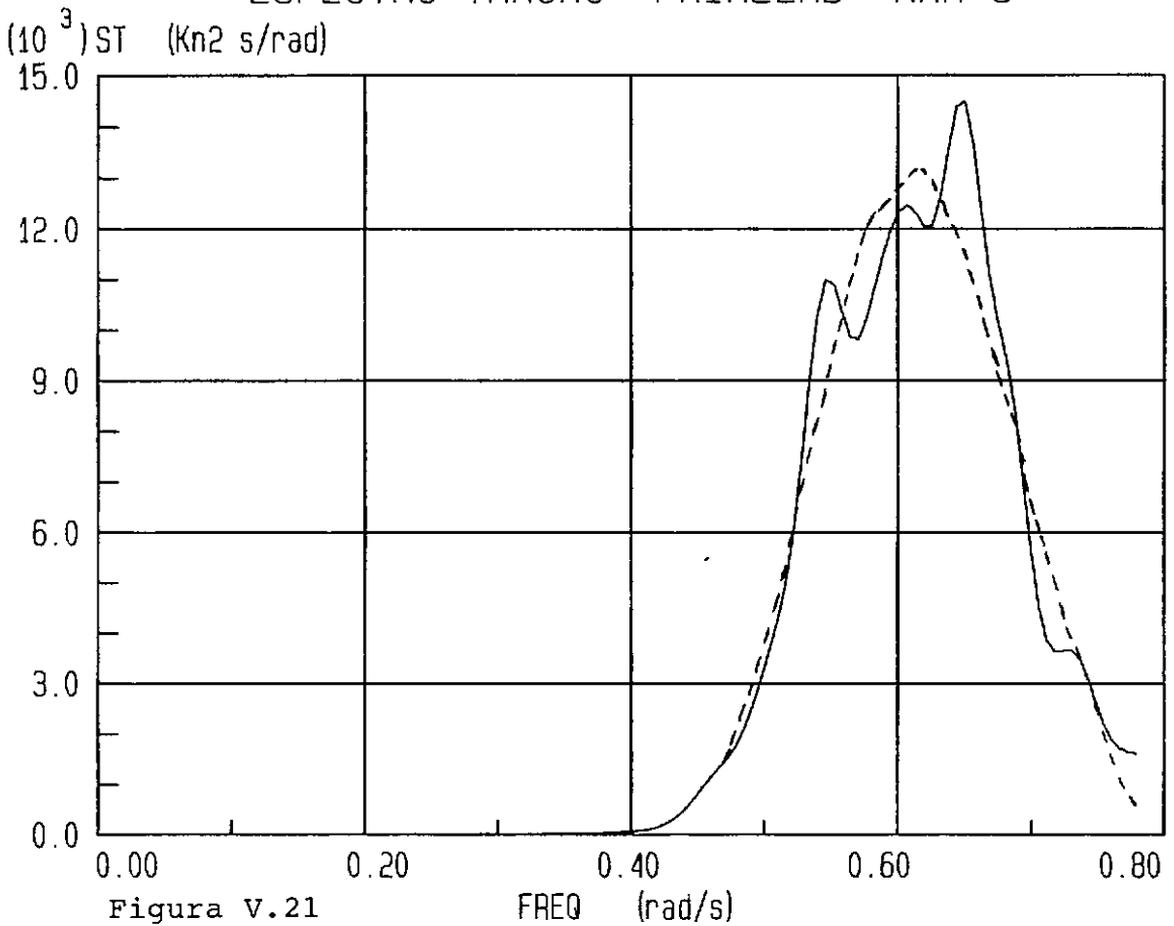
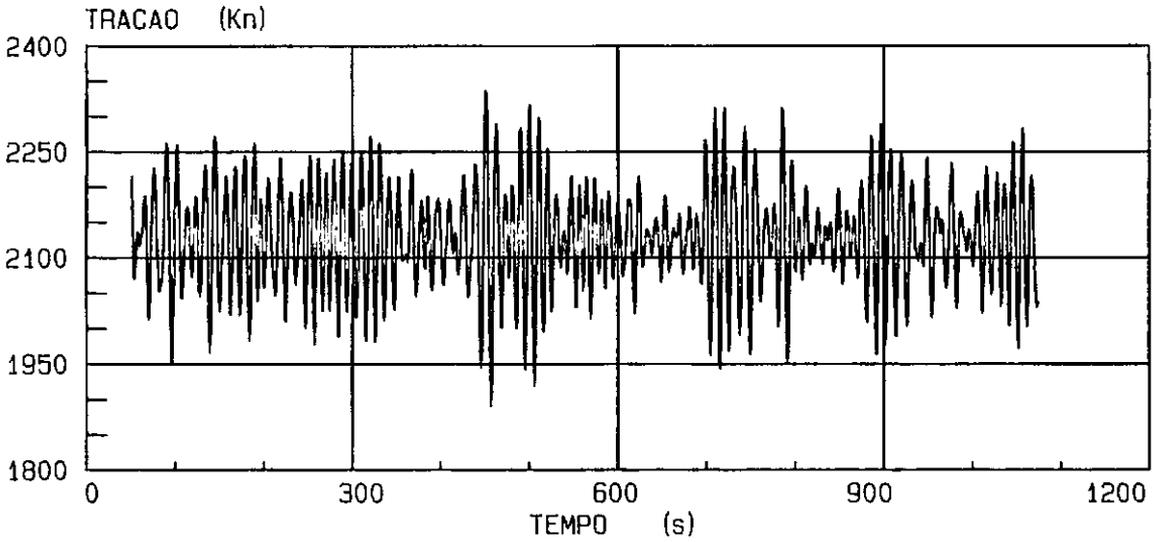


Figura V.21

TRACAO "FAIRLEAD" MAR 4



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 4

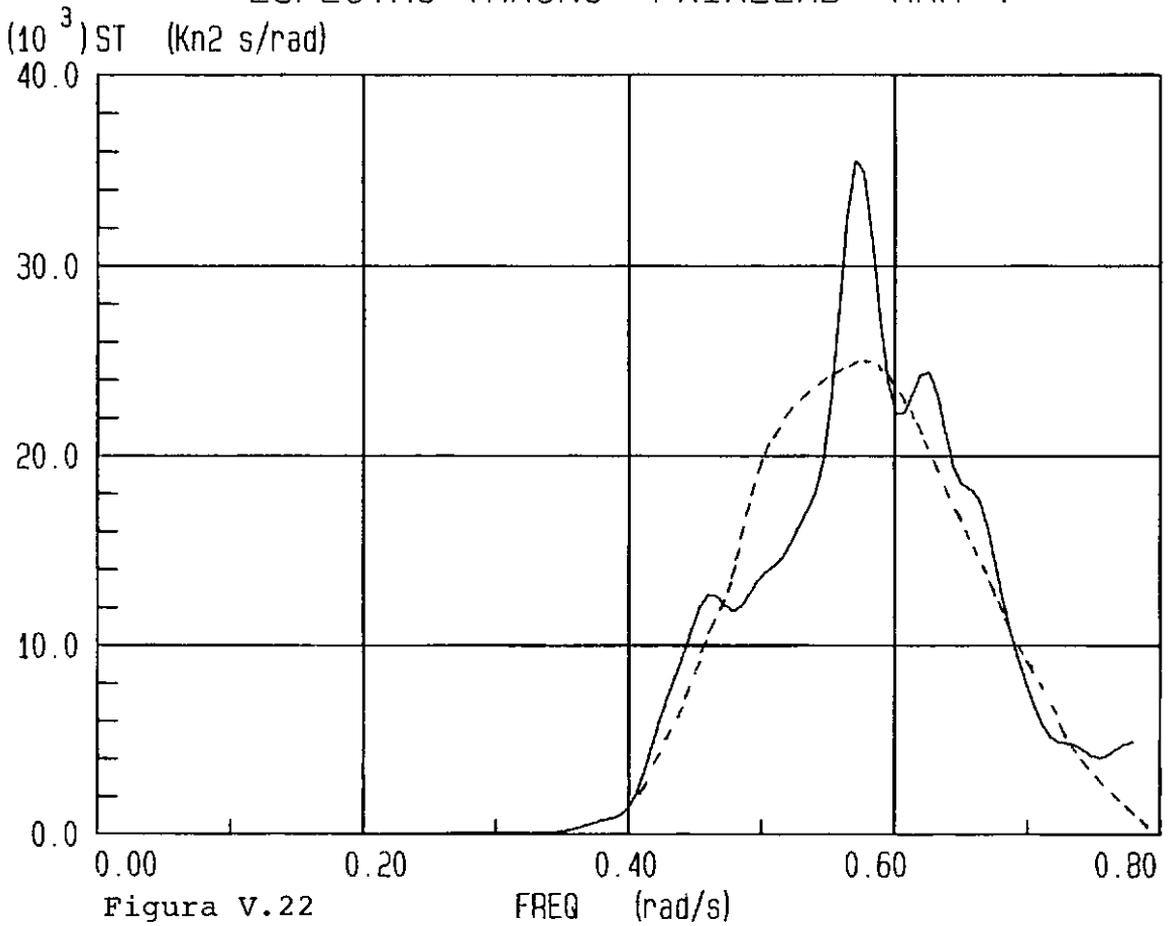
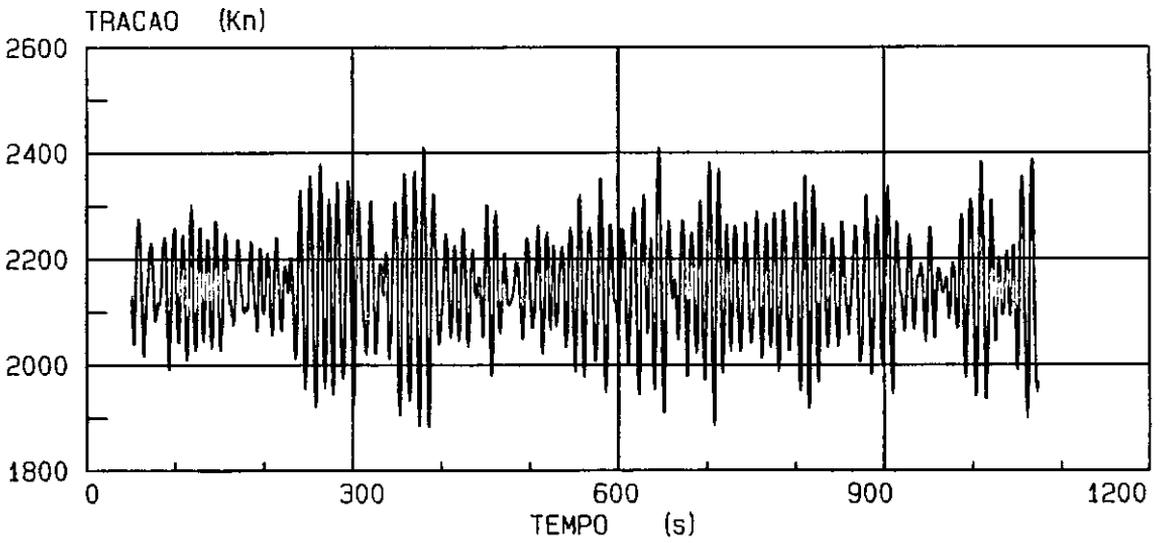


Figura V.22

TRACAO "FAIRLEAD" MAR 5



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 5

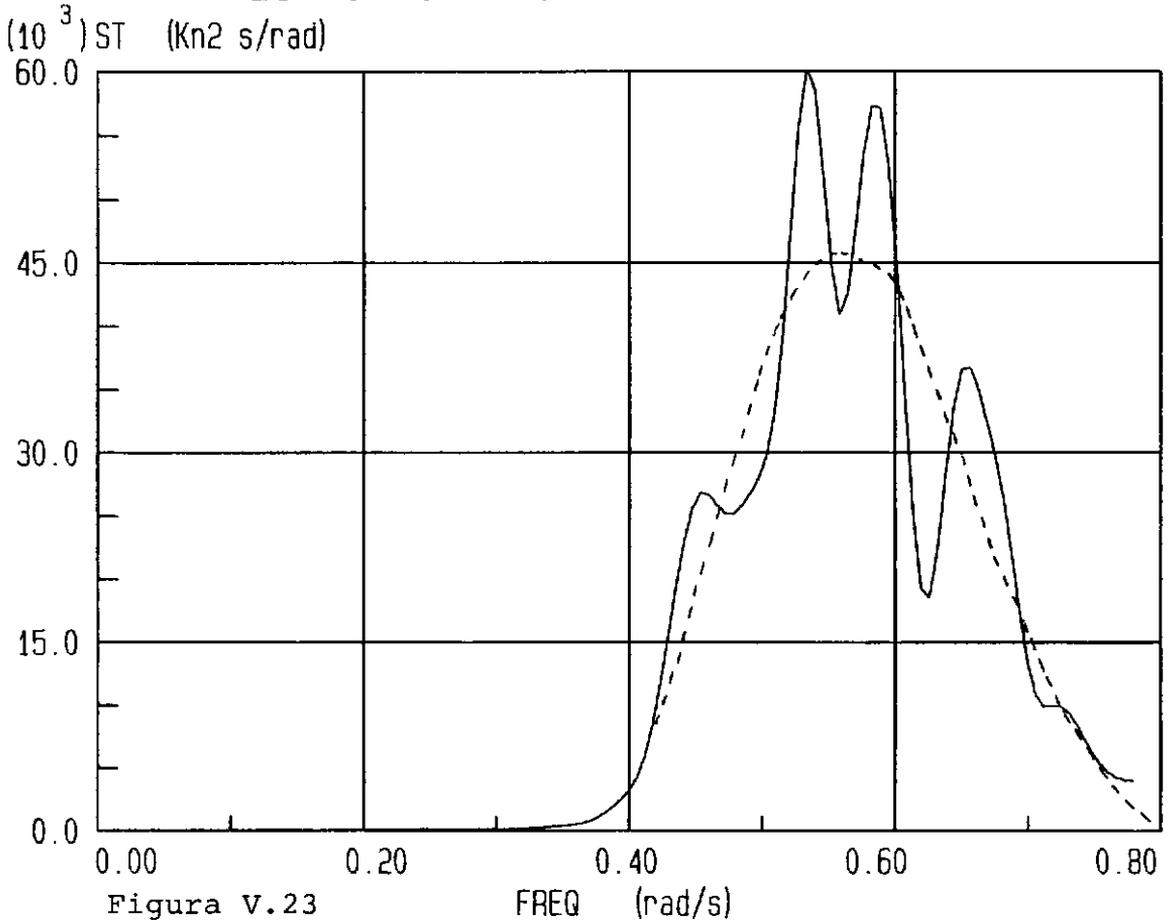
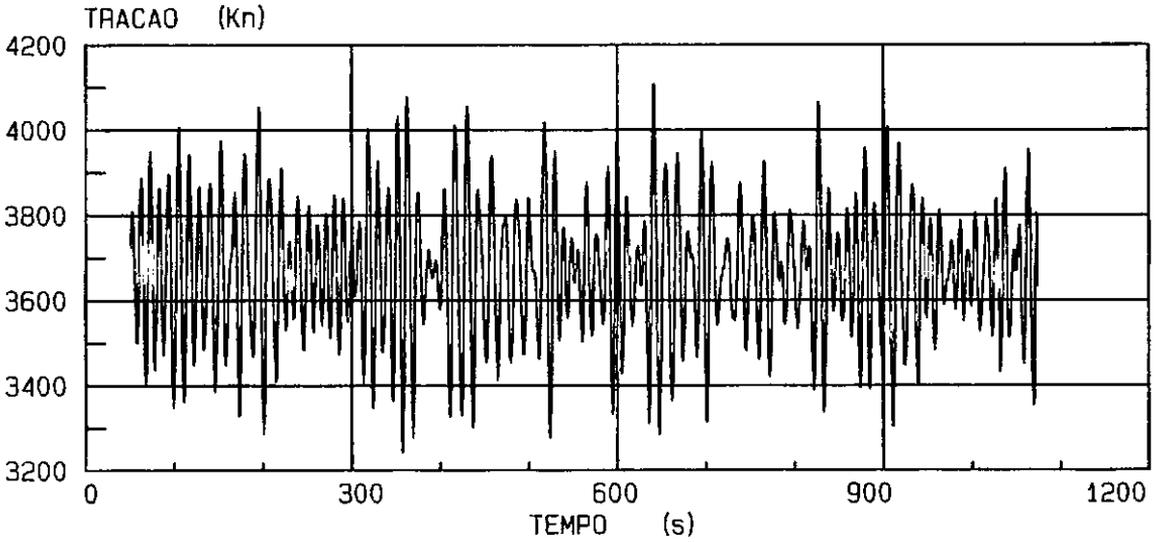


Figura V.23

TRACAO "FAIRLEAD" MAR 6



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 6

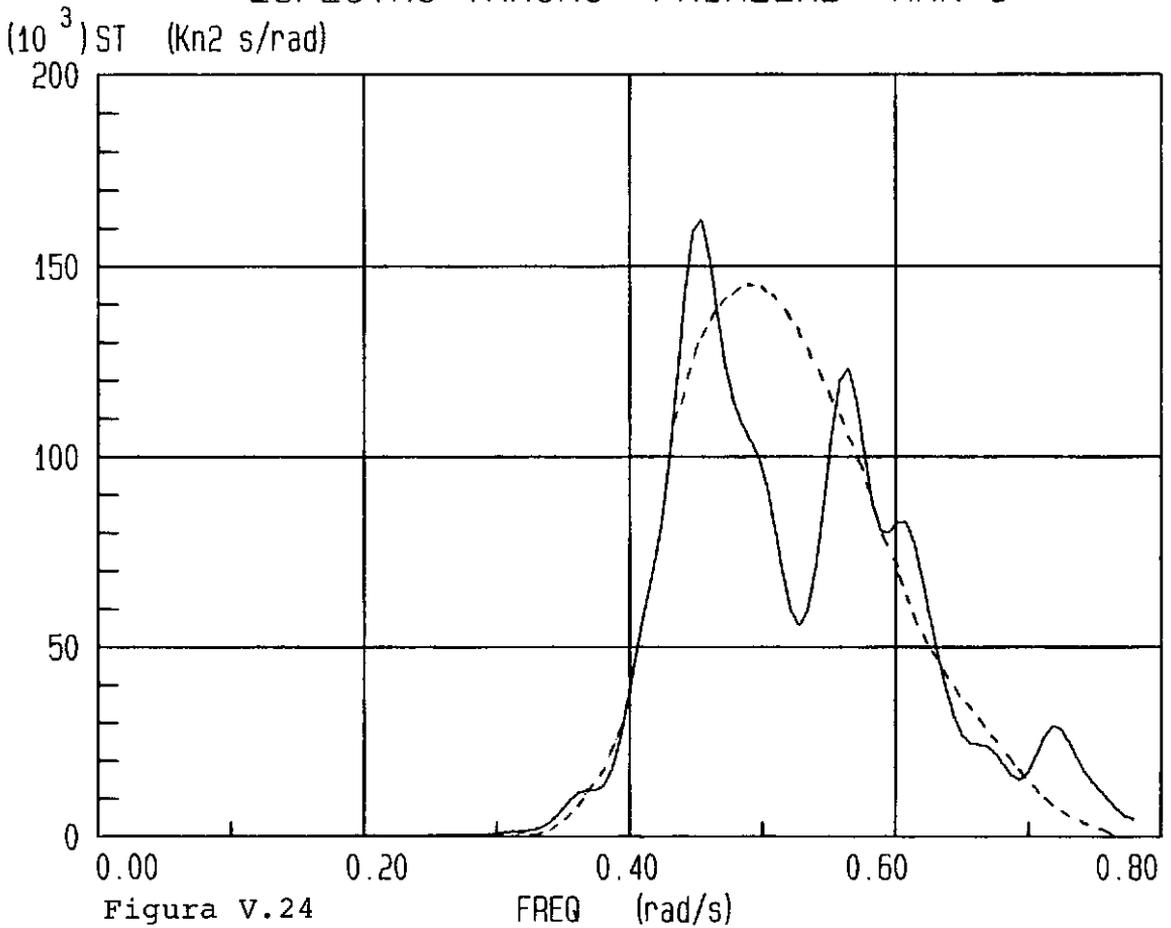
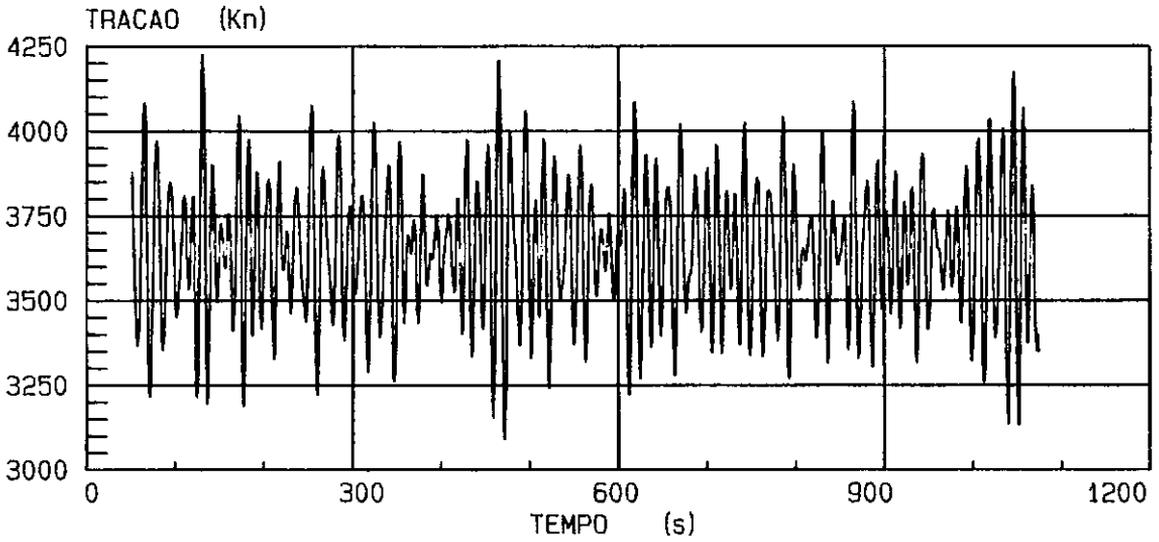


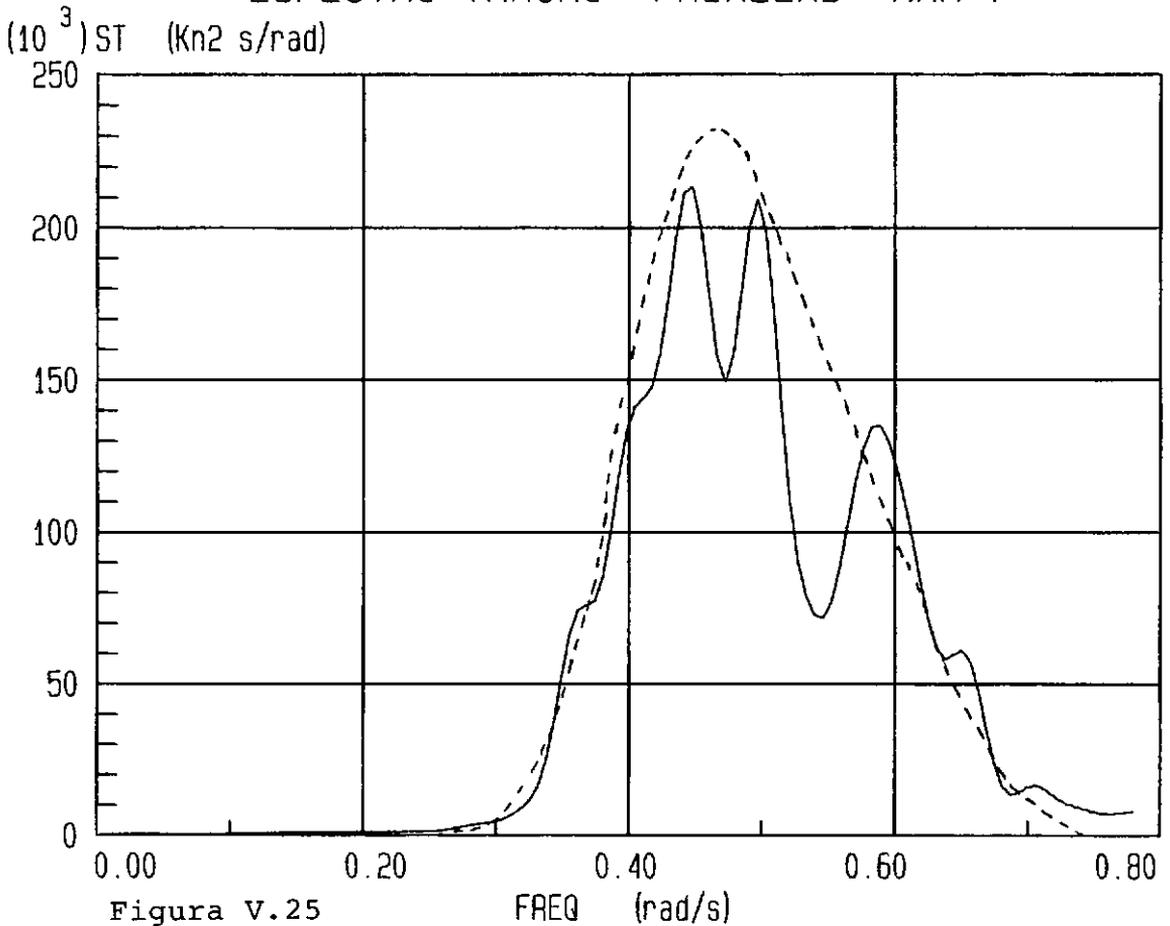
Figura V.24

FREQ (rad/s)

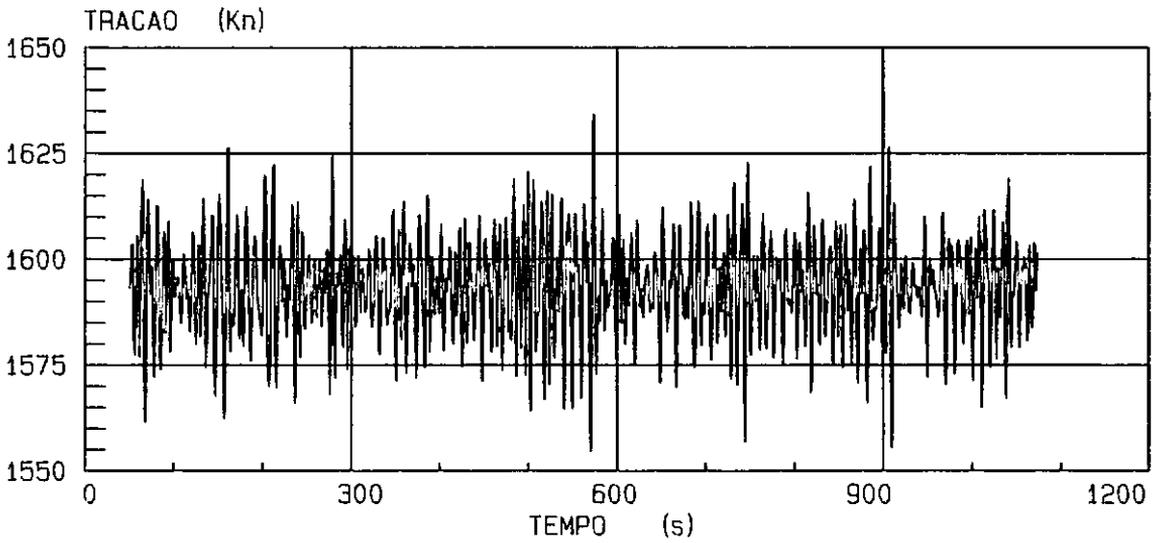
TRACAO "FAIRLEAD" MAR 7



ESPECTRO TRACAO "FAIRLEAD" MAR 7



TRACAO PONTO 2 MAR 1



ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 1

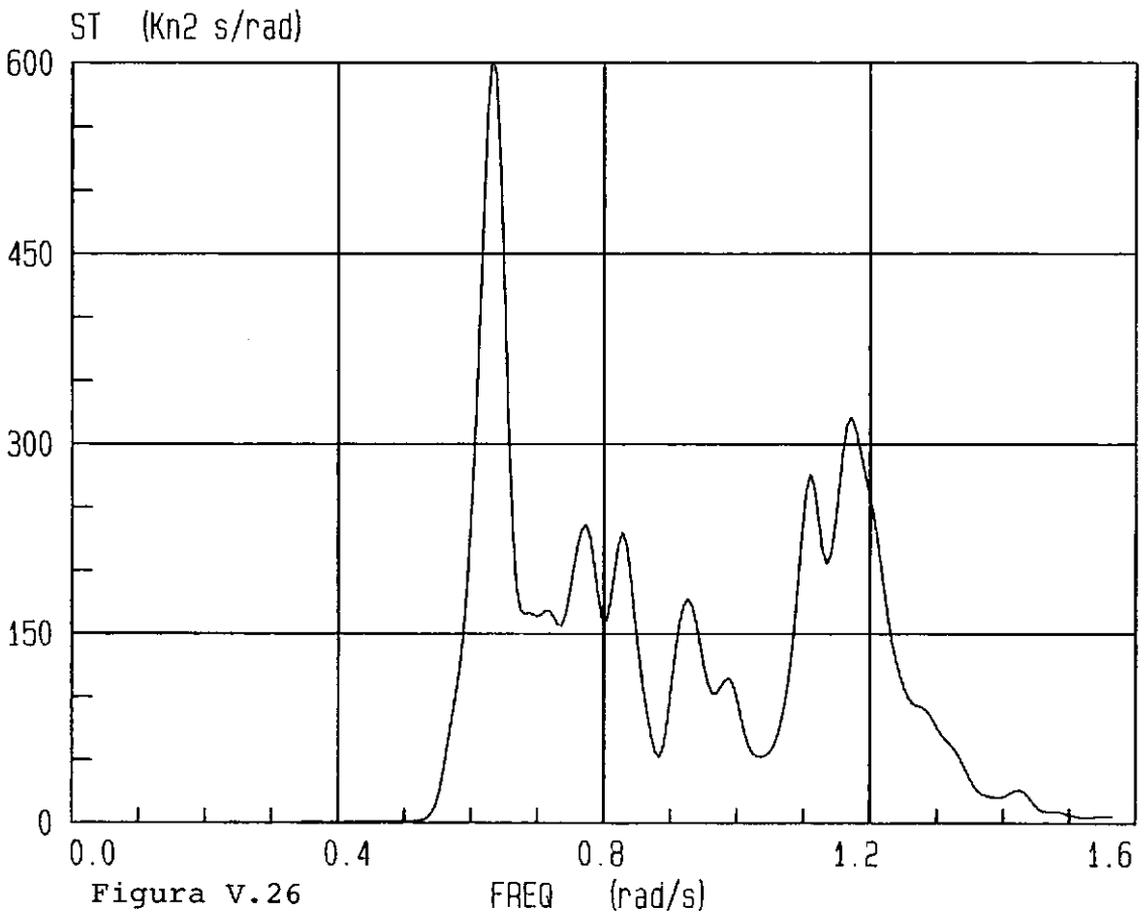
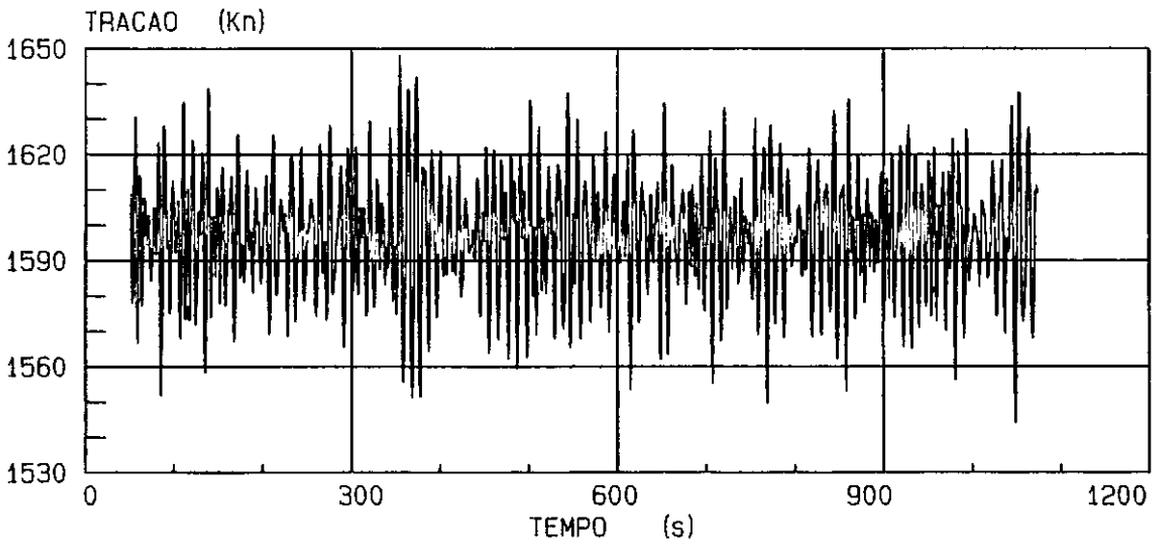


Figura V.26

TRACAO PONTO 2 MAR 2



ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 2

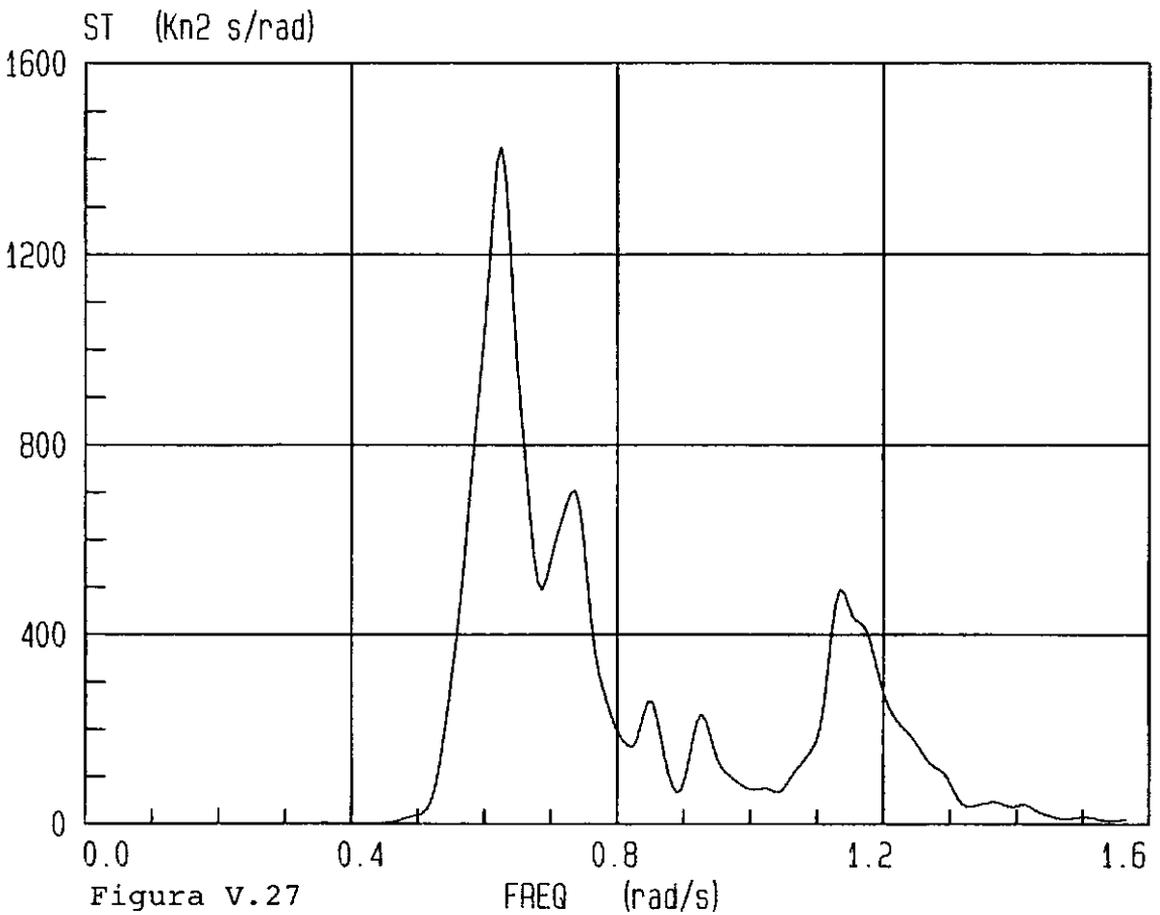
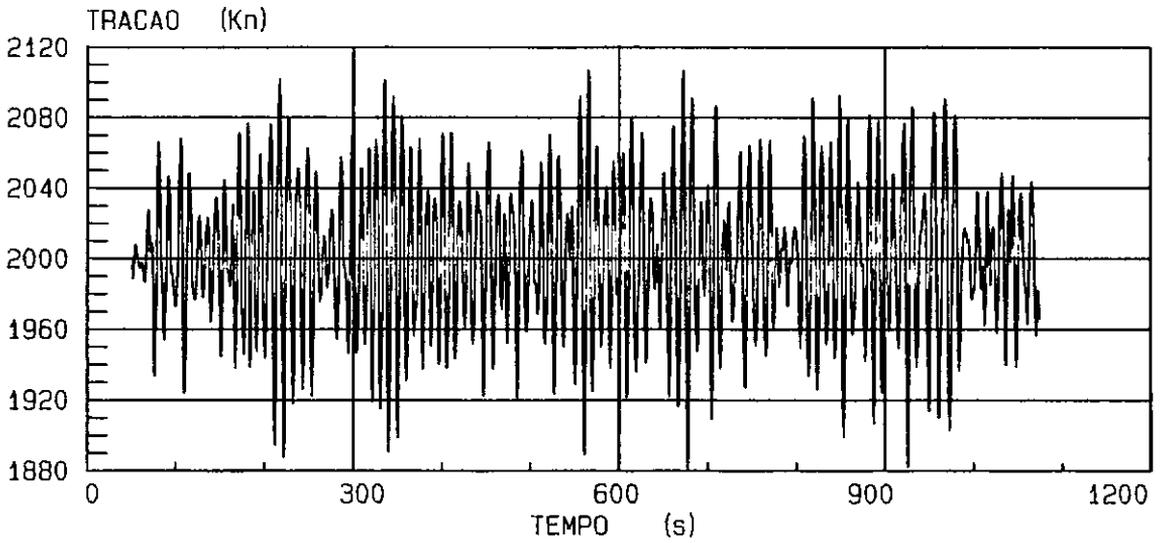


Figura V.27

FREQ (rad/s)

TRACAO PONTO 2 MAR 3



ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 3

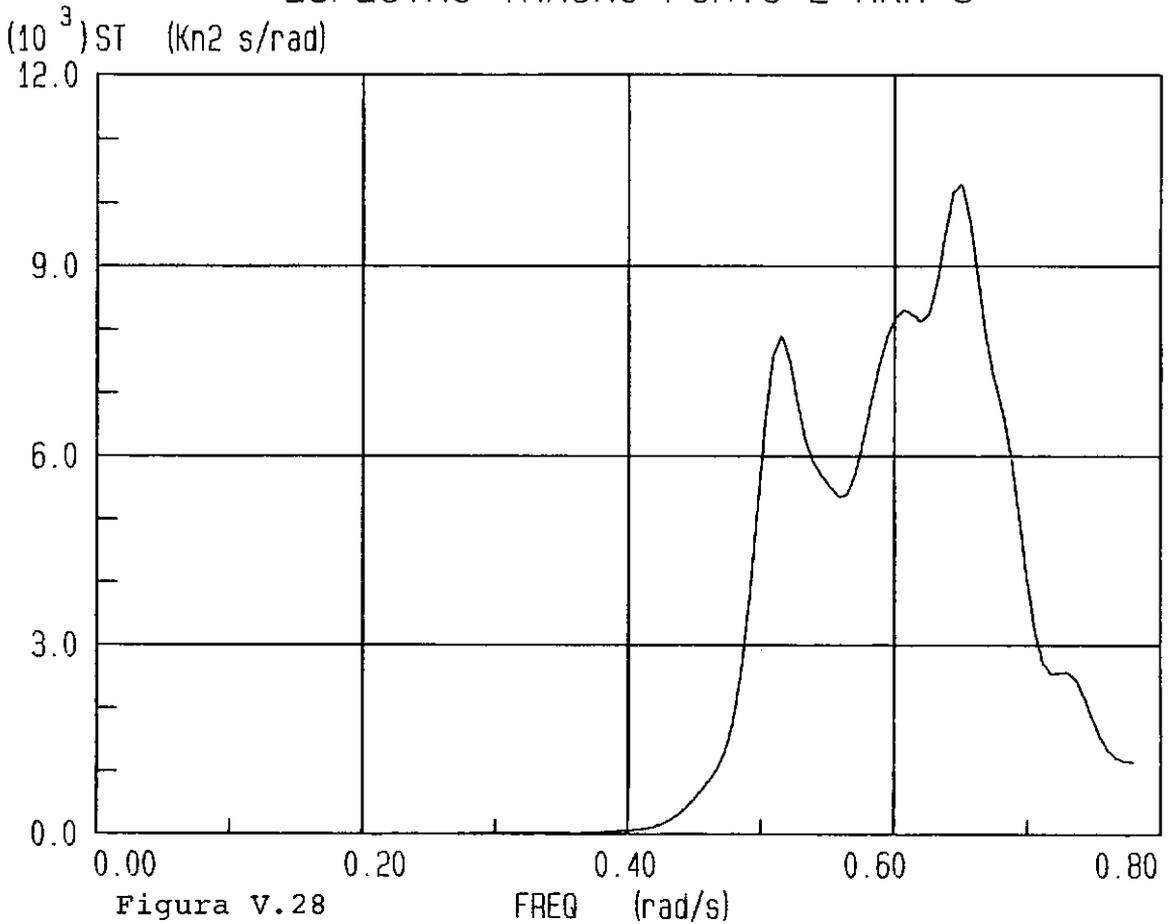
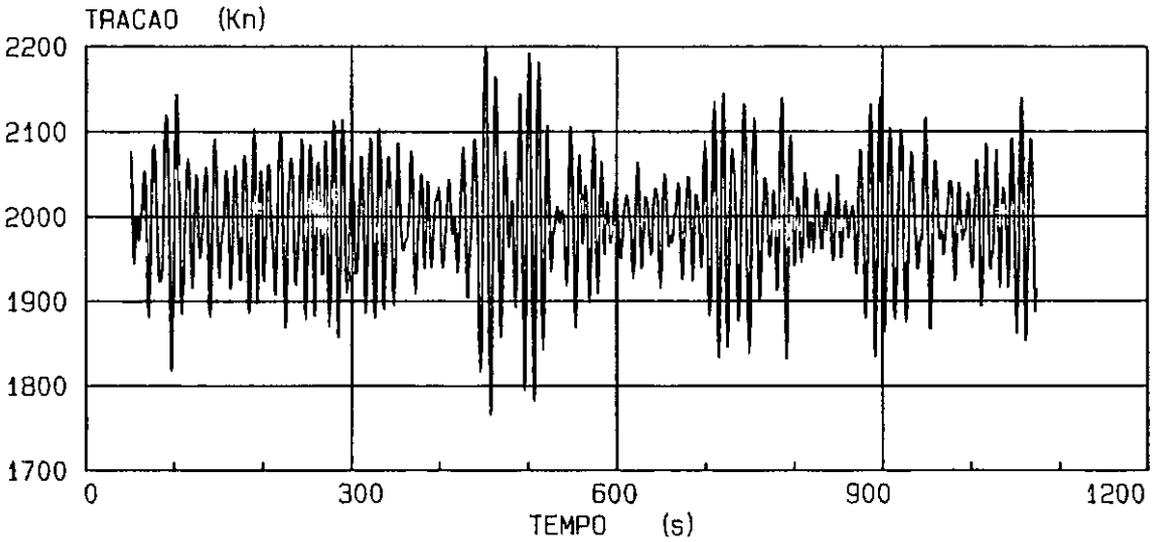


Figura V.28

TRACAO PONTO 2 MAR 4



ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 4

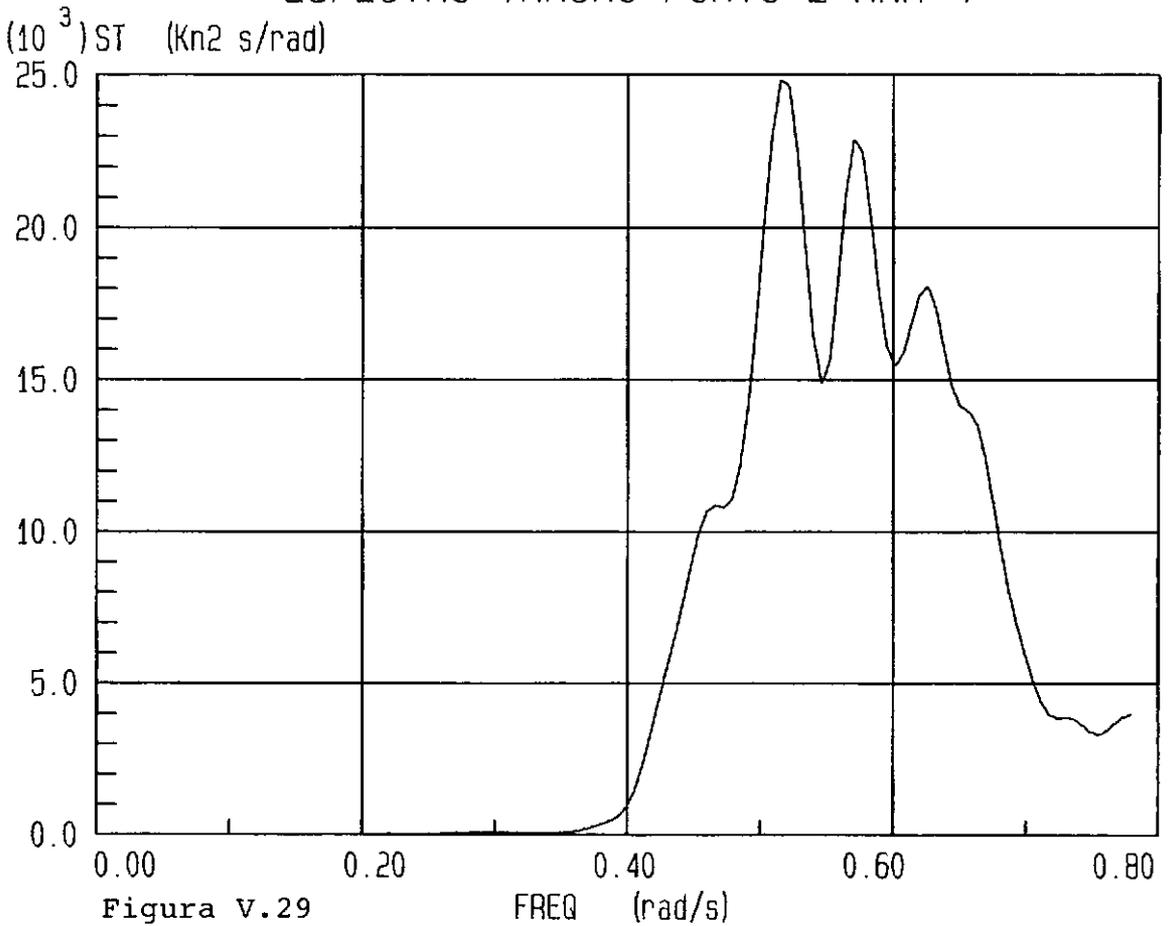
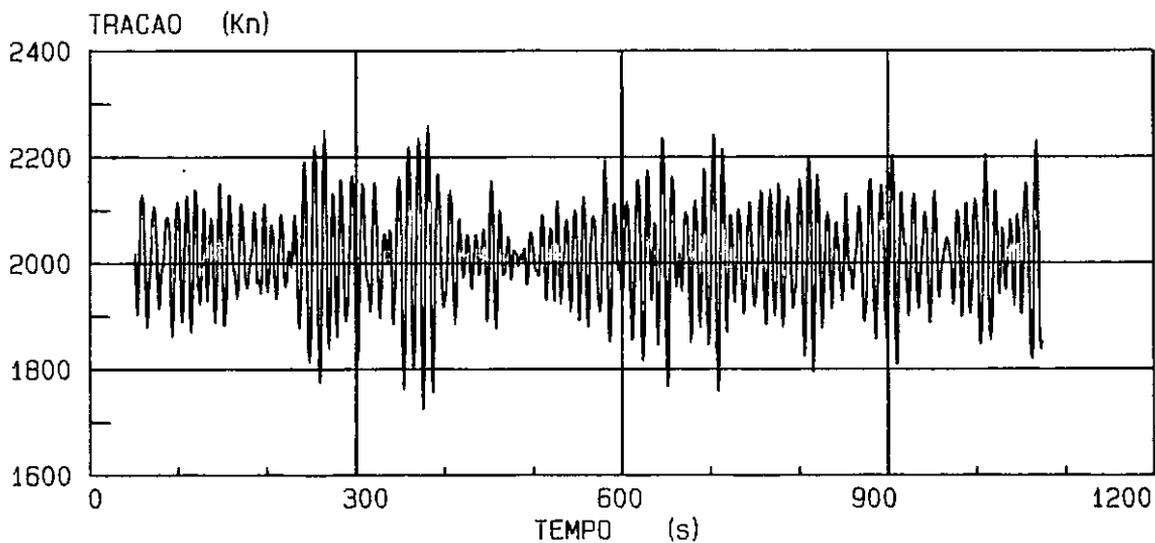
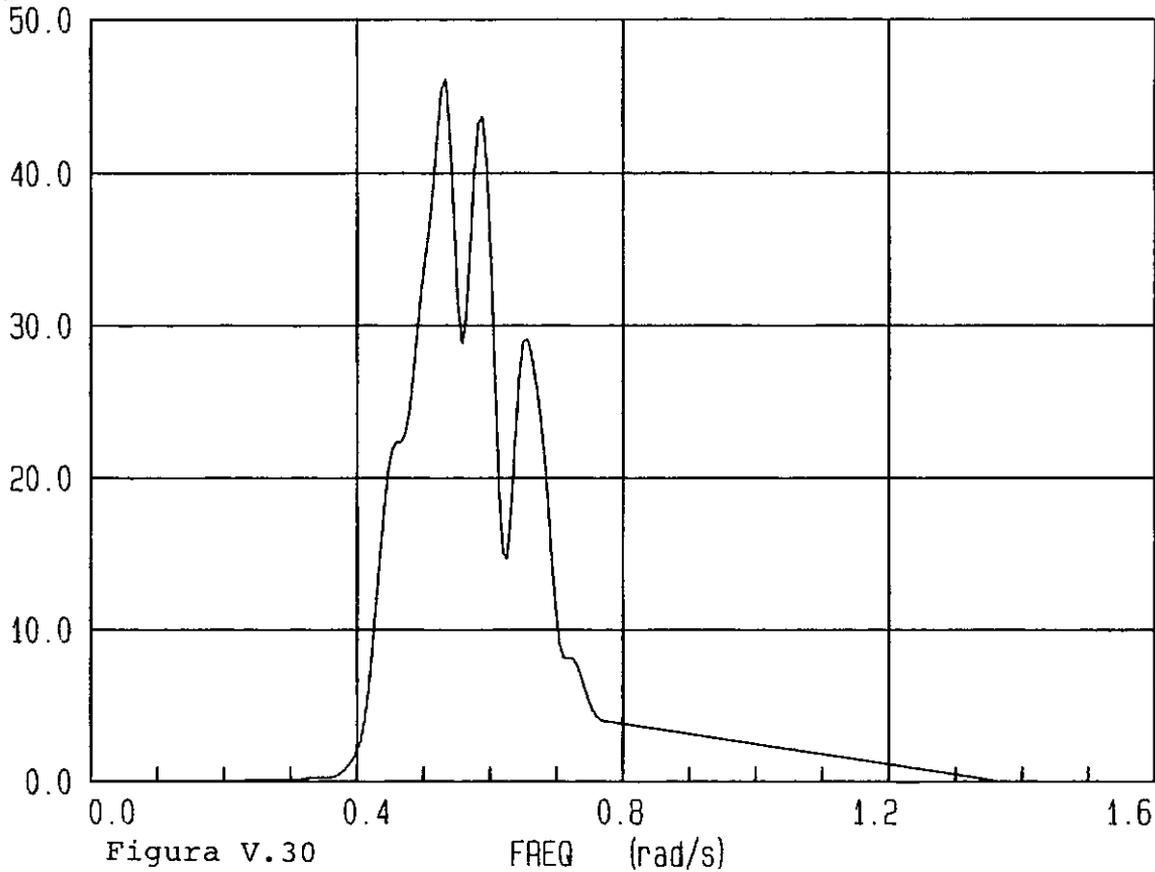


Figura v.29

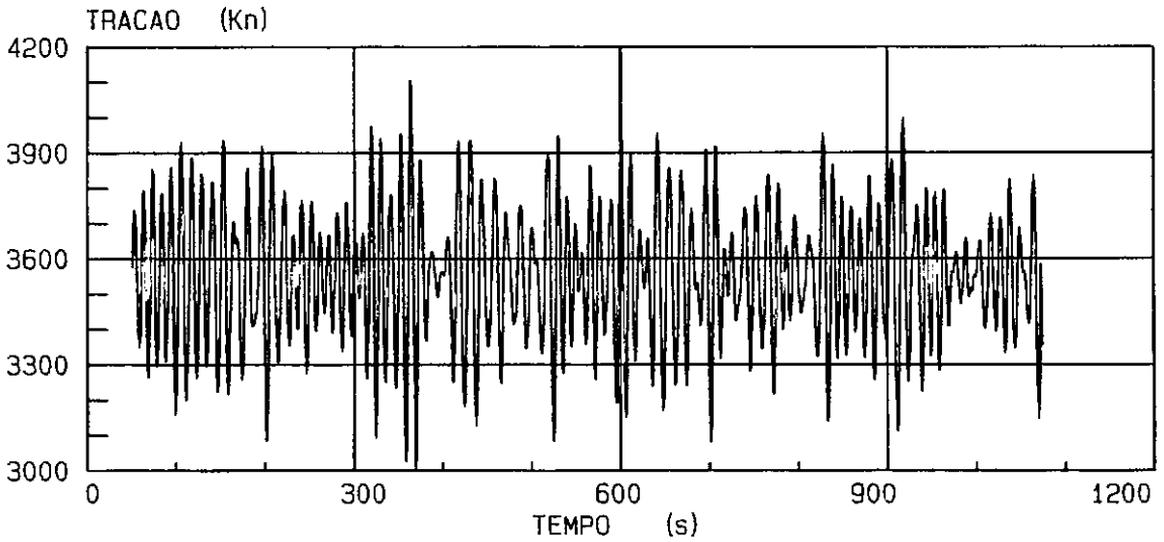
TRACAO PONTO 2 MAR 5



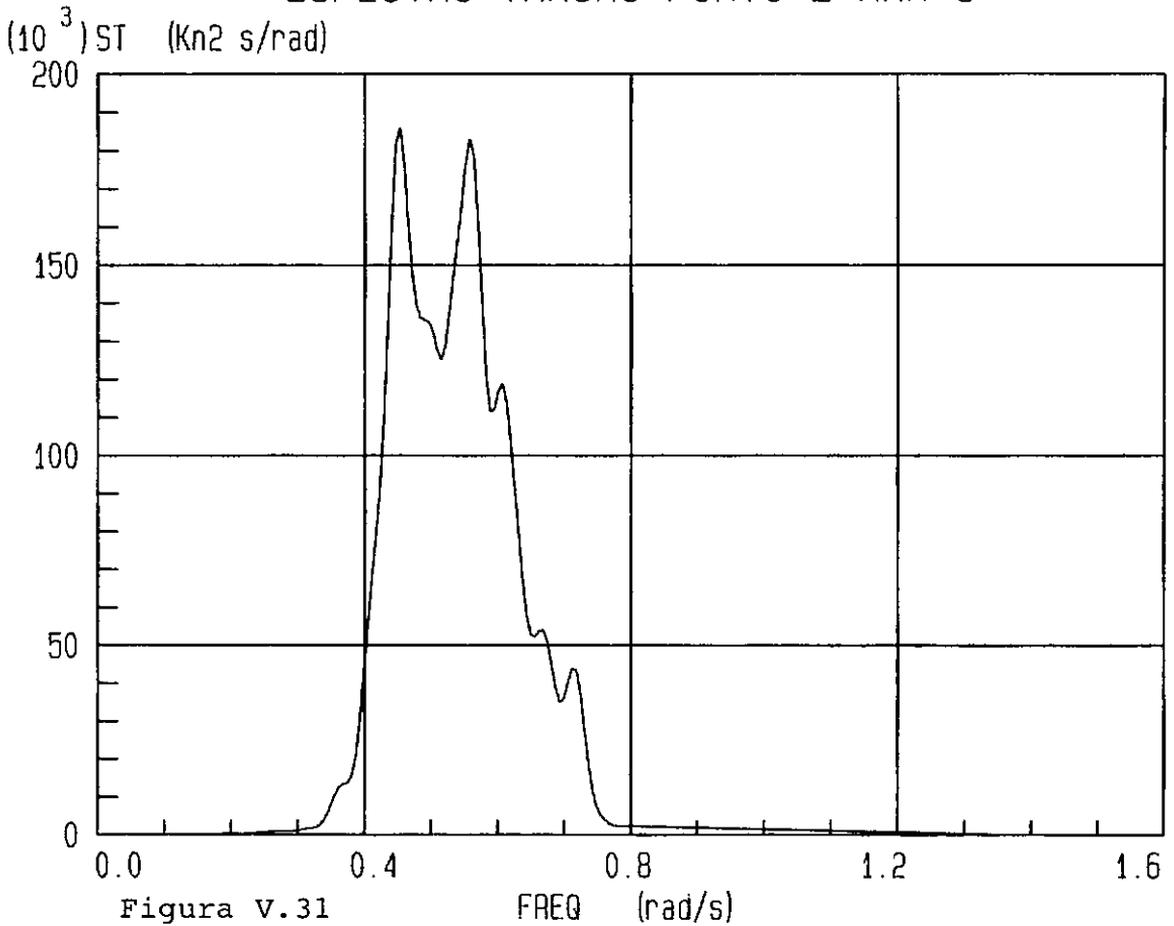
ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 5

 $(10^3) ST$ (Kn² s/rad)

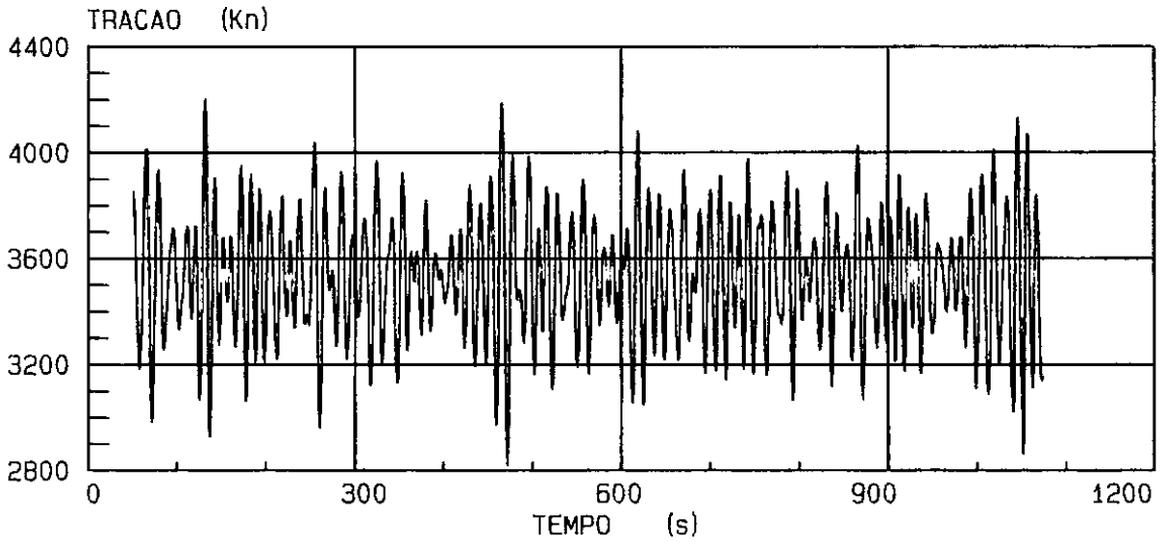
TRACAO PONTO 2 MAR 6



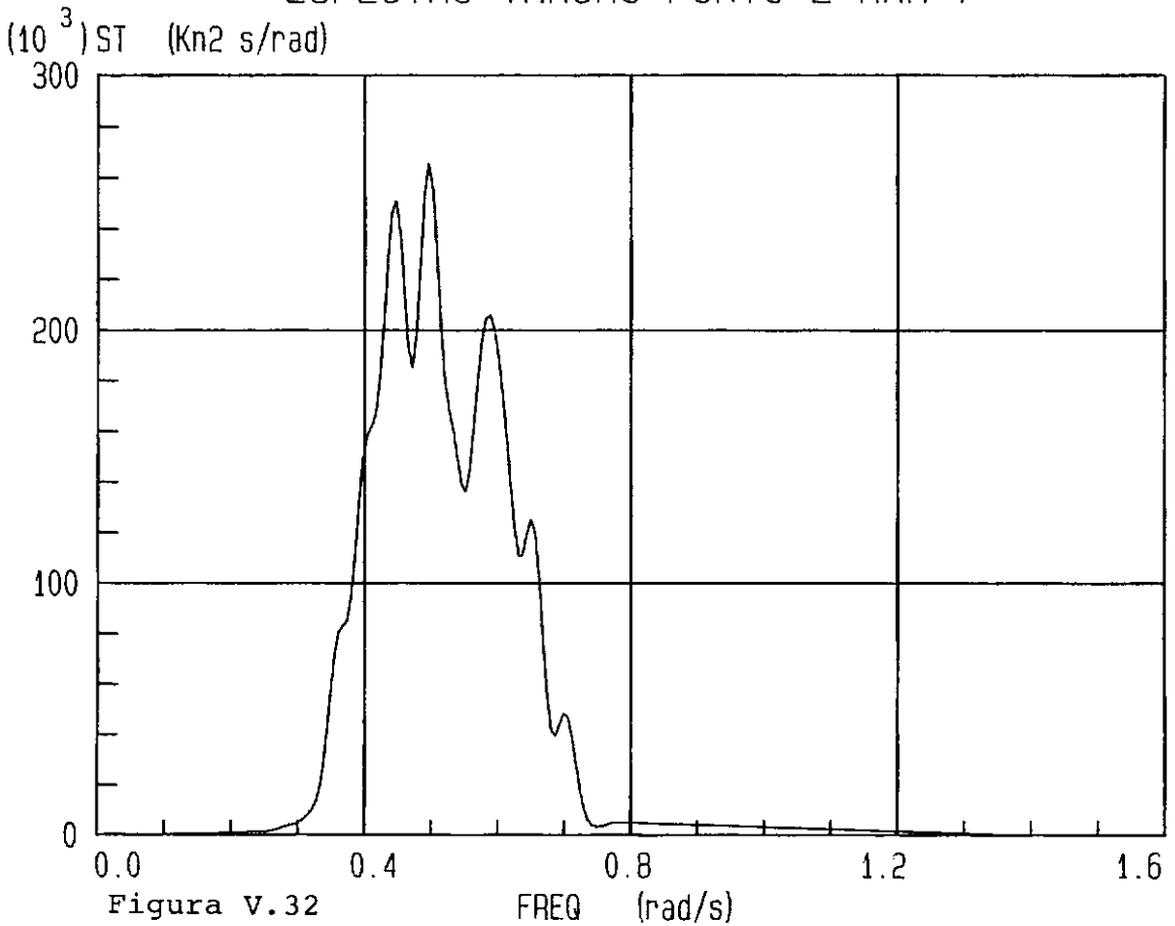
ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 6



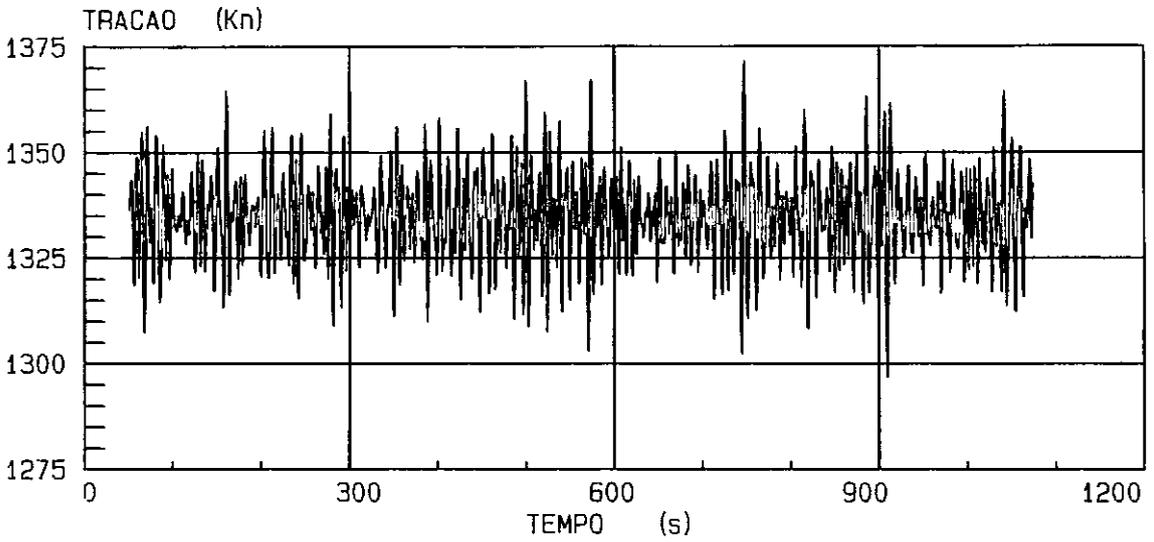
TRACAO PONTO 2 MAR 7



ESPECTRO TRACAO PONTO 2 MAR 7



TRACAO PONTO 1 MAR 1



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 1

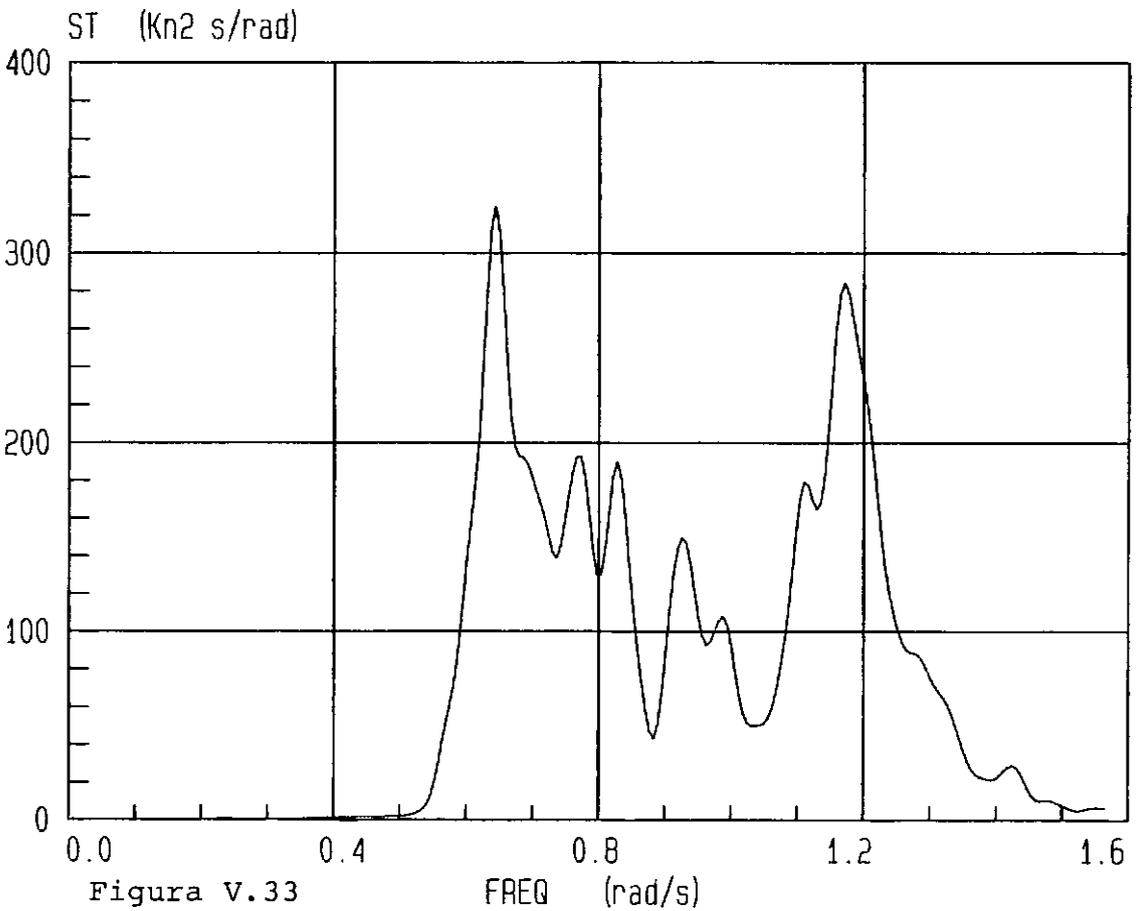
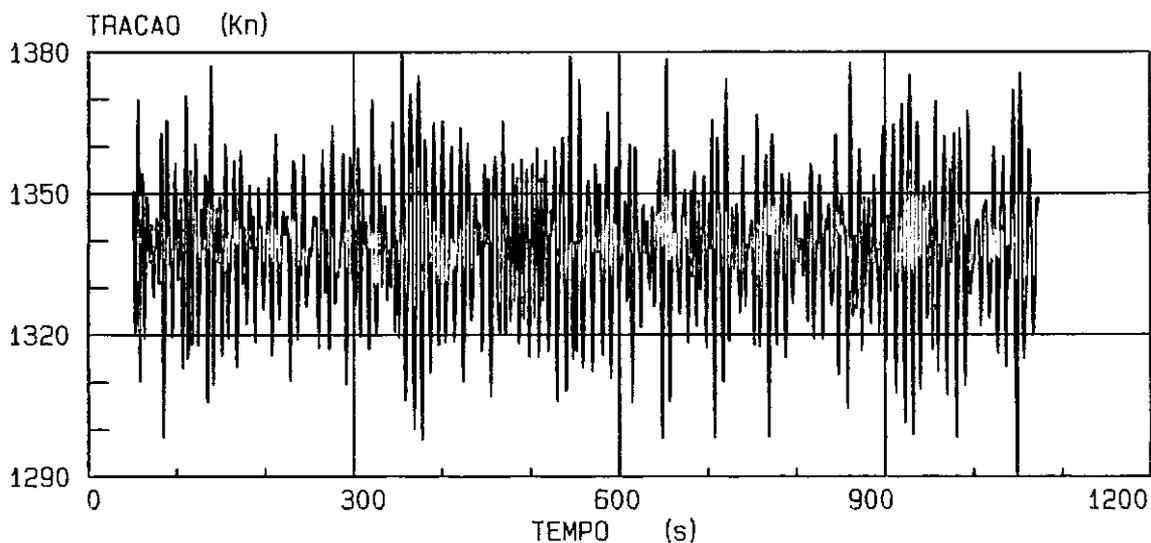


Figura V.33

TRACAO PONTO 1 MAR 2



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 2

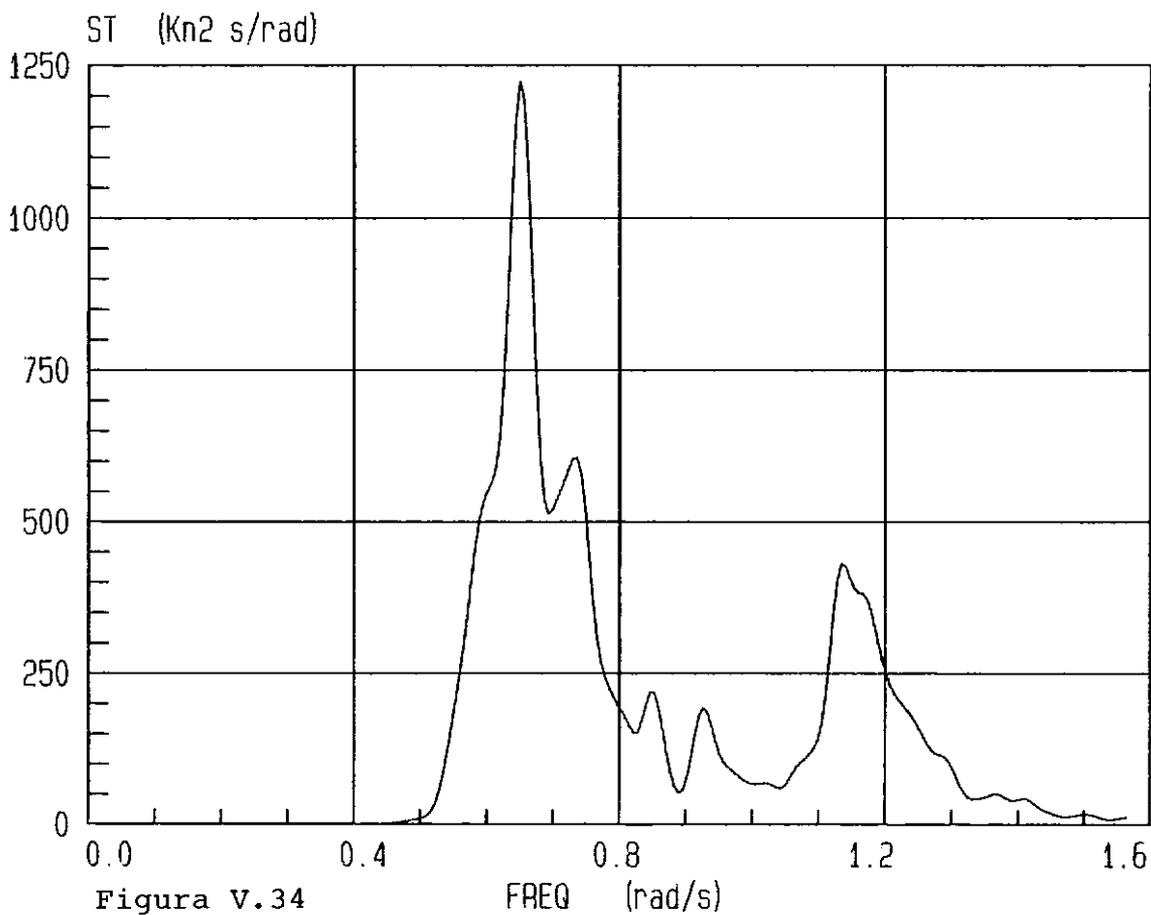
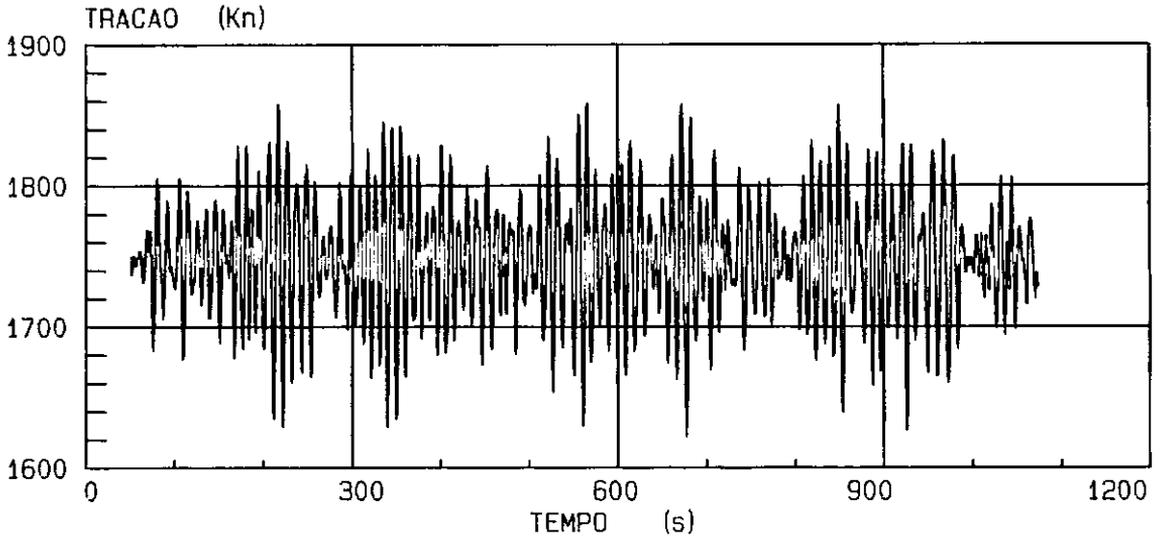


Figura V.34

TRACAO PONTO 1 MAR 3



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 3

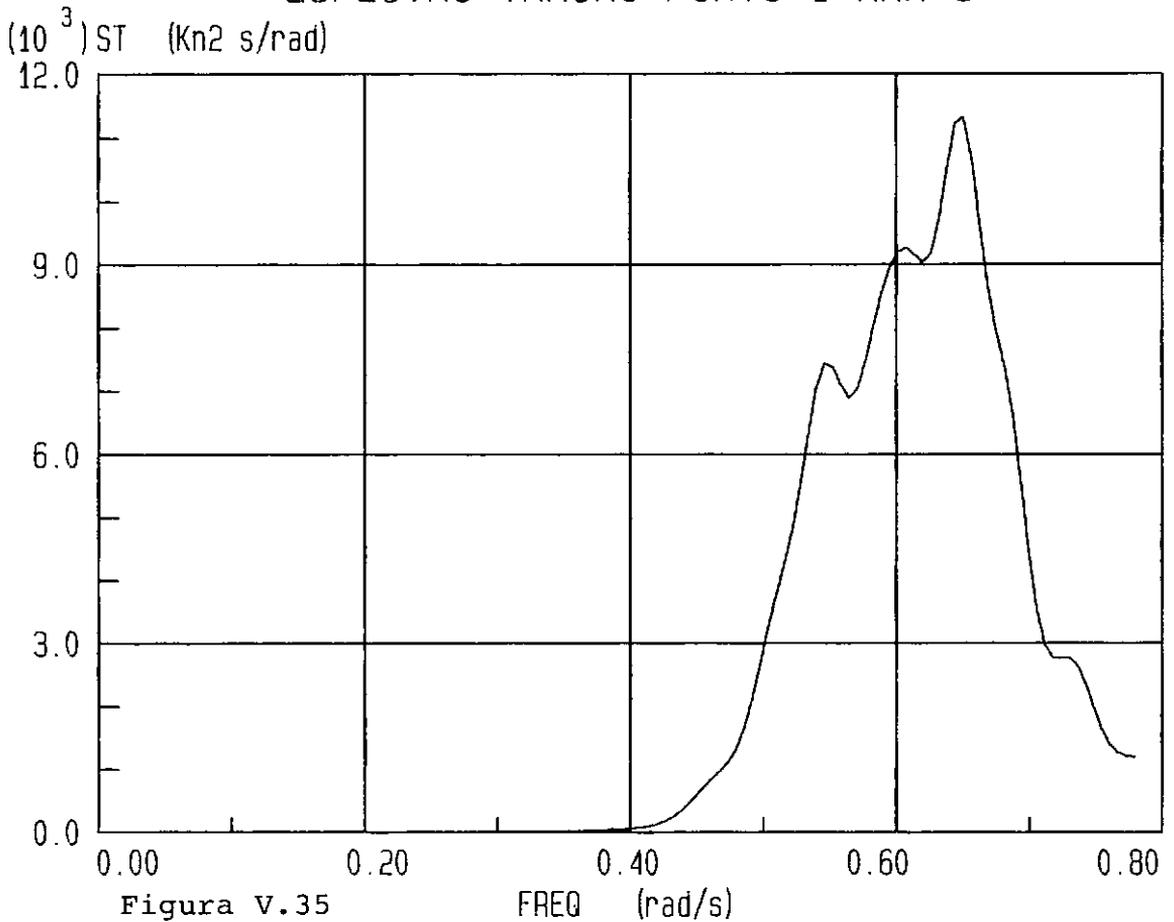
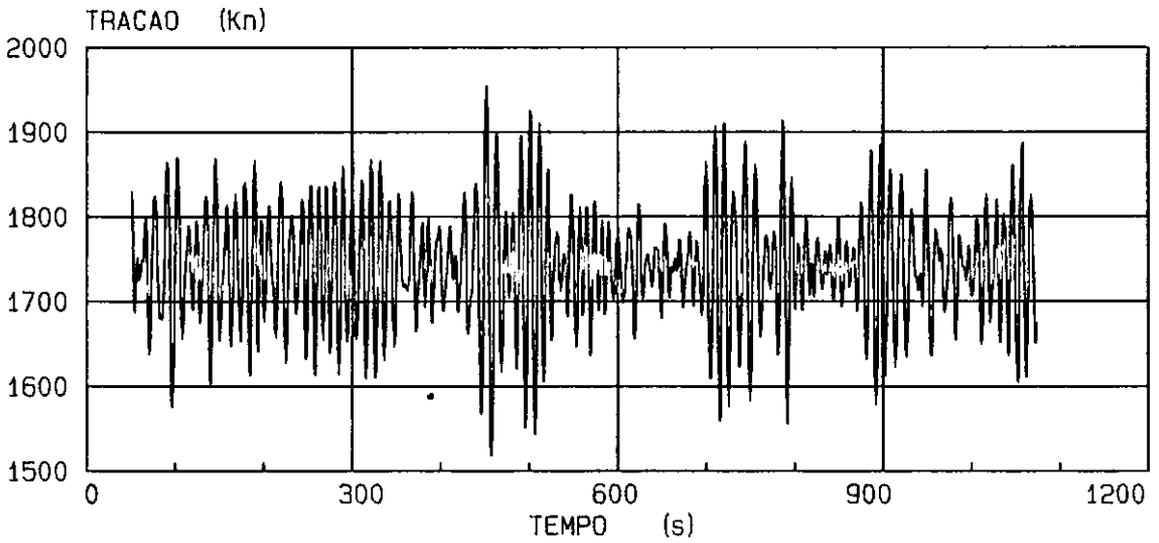


Figura V.35

TRACAO PONTO 1 MAR 4



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 4

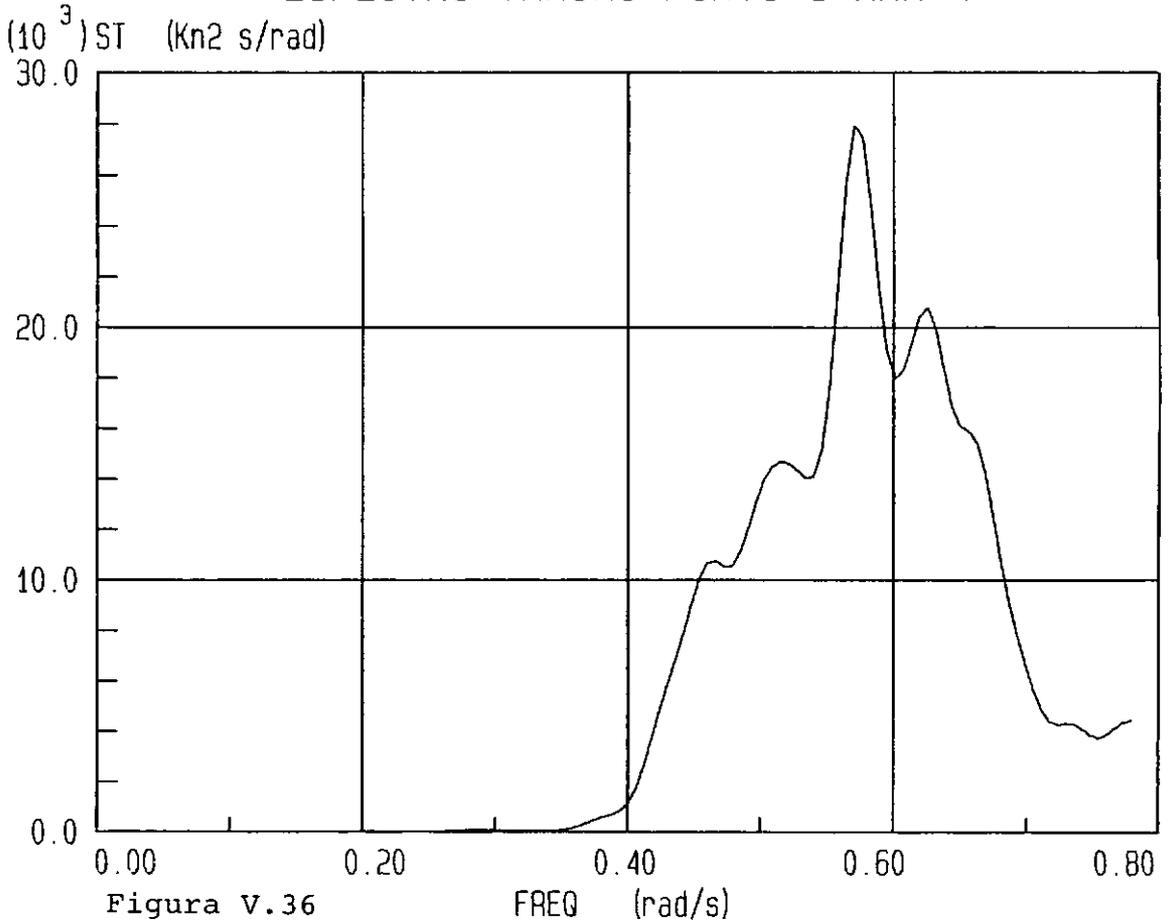
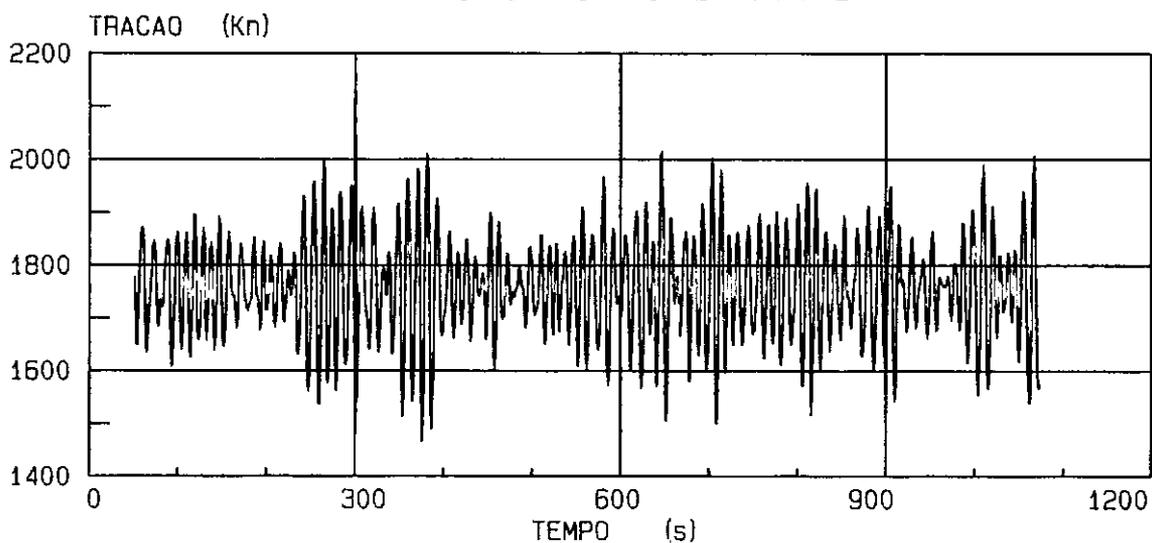


Figura V.36

TRACAO PONTO 1 MAR 5



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 5

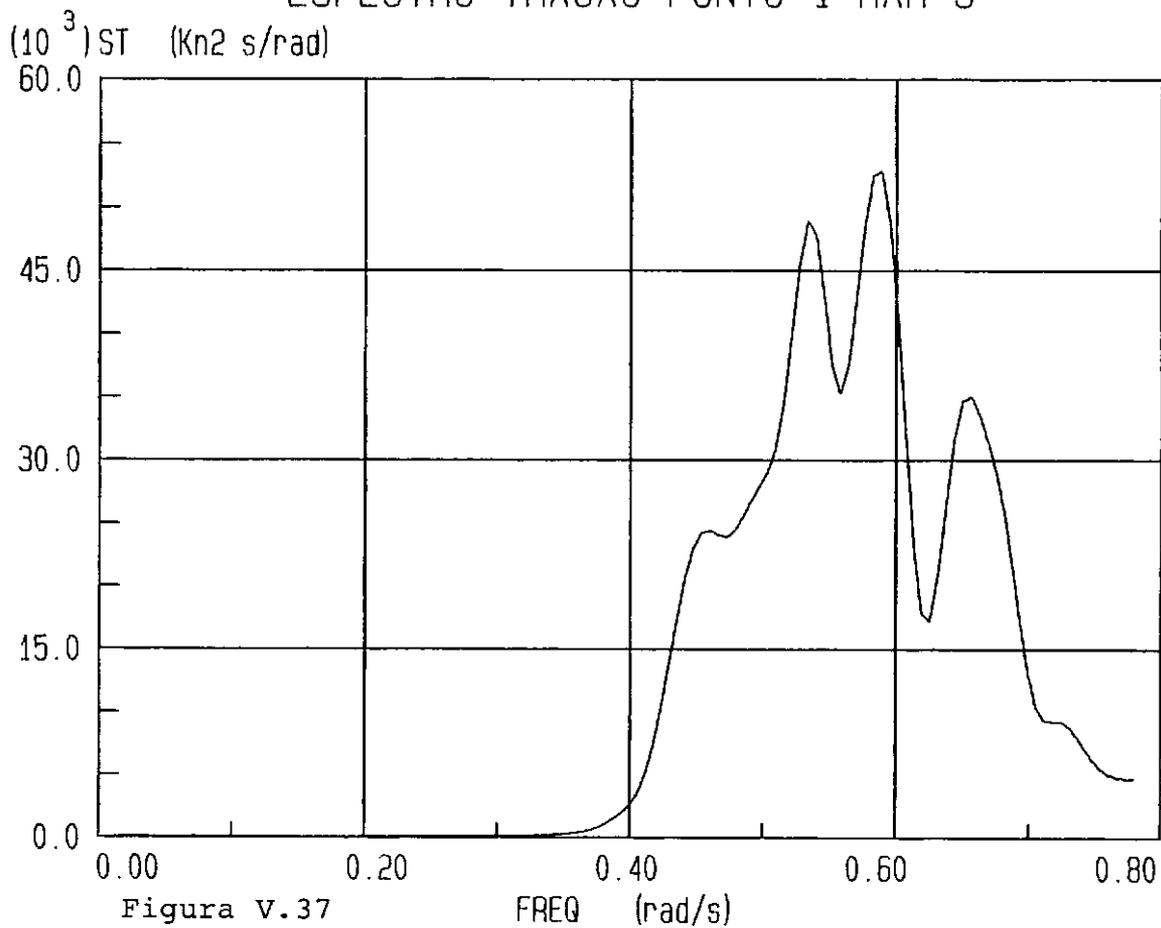
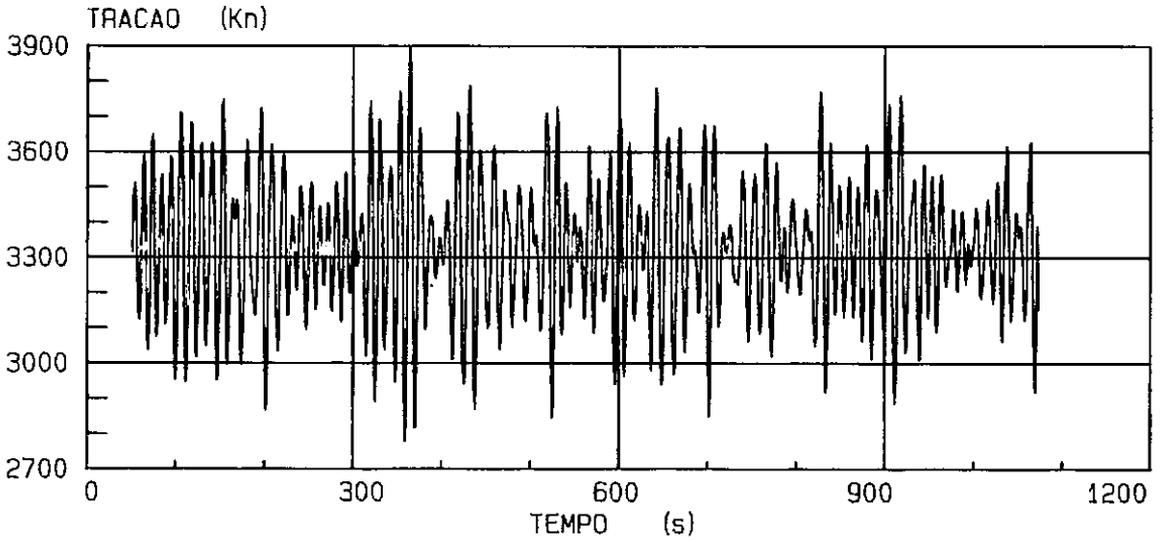


Figura V.37

TRACAO PONTO 1 MAR 6



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 6

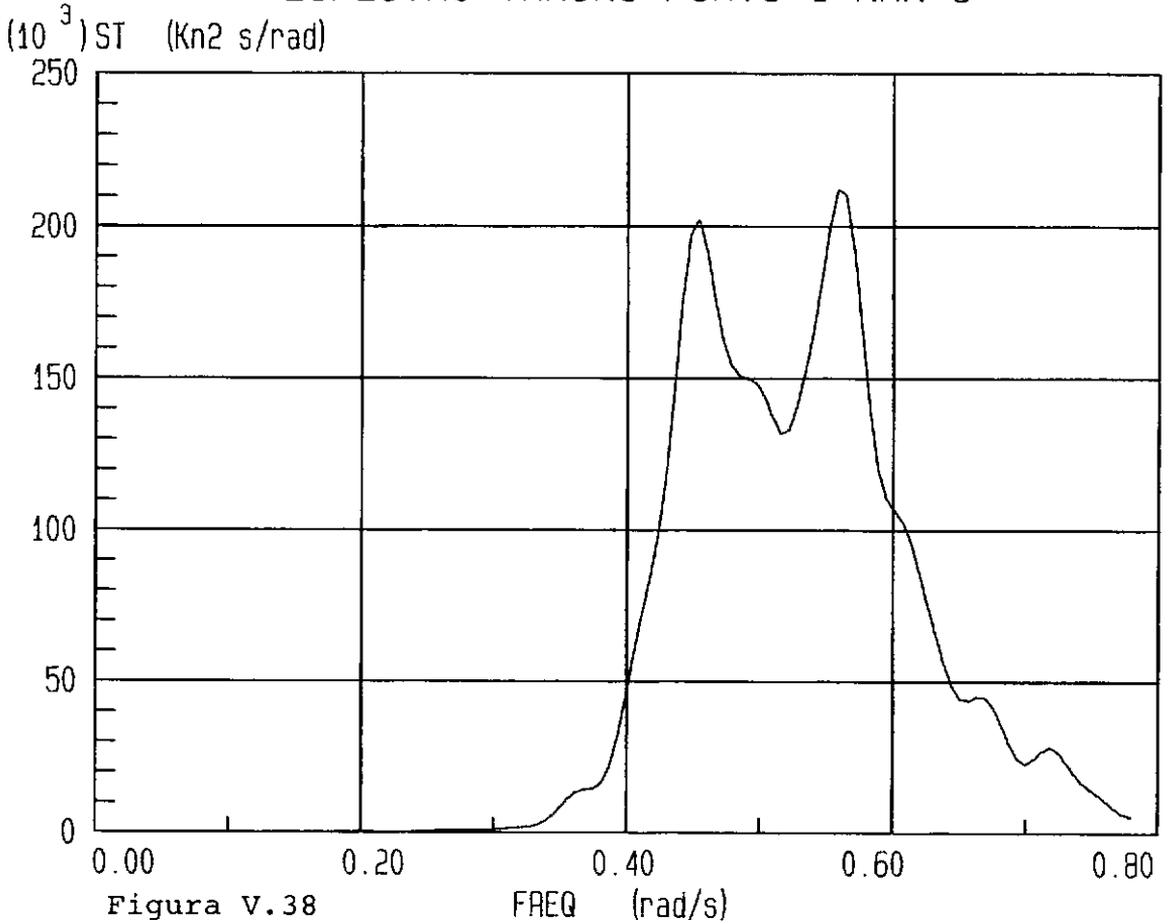
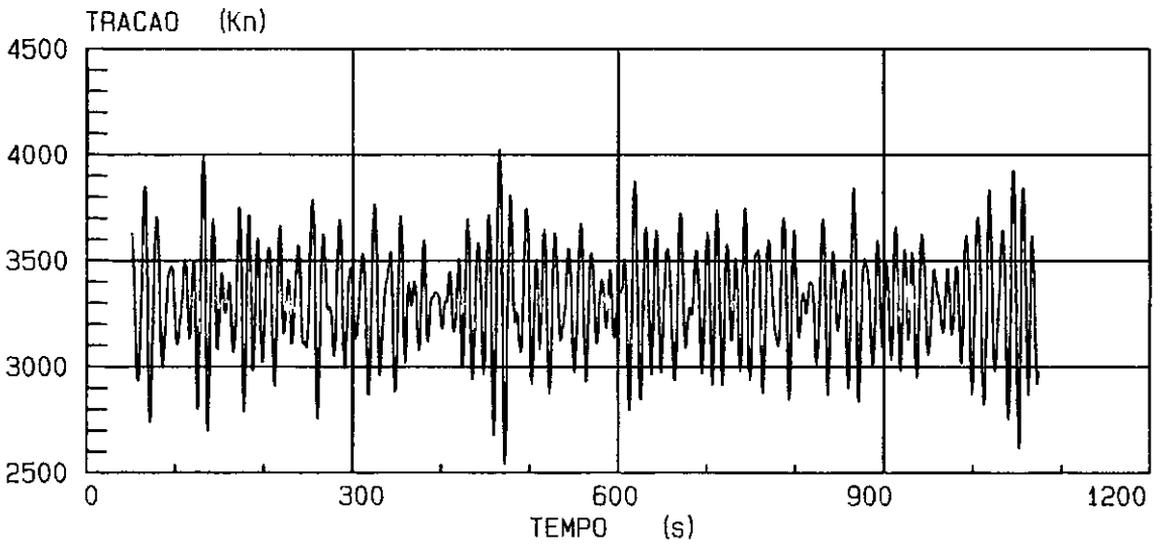


Figura V.38

TRACAO PONTO 1 MAR 7



ESPECTRO TRACAO PONTO 1 MAR 7

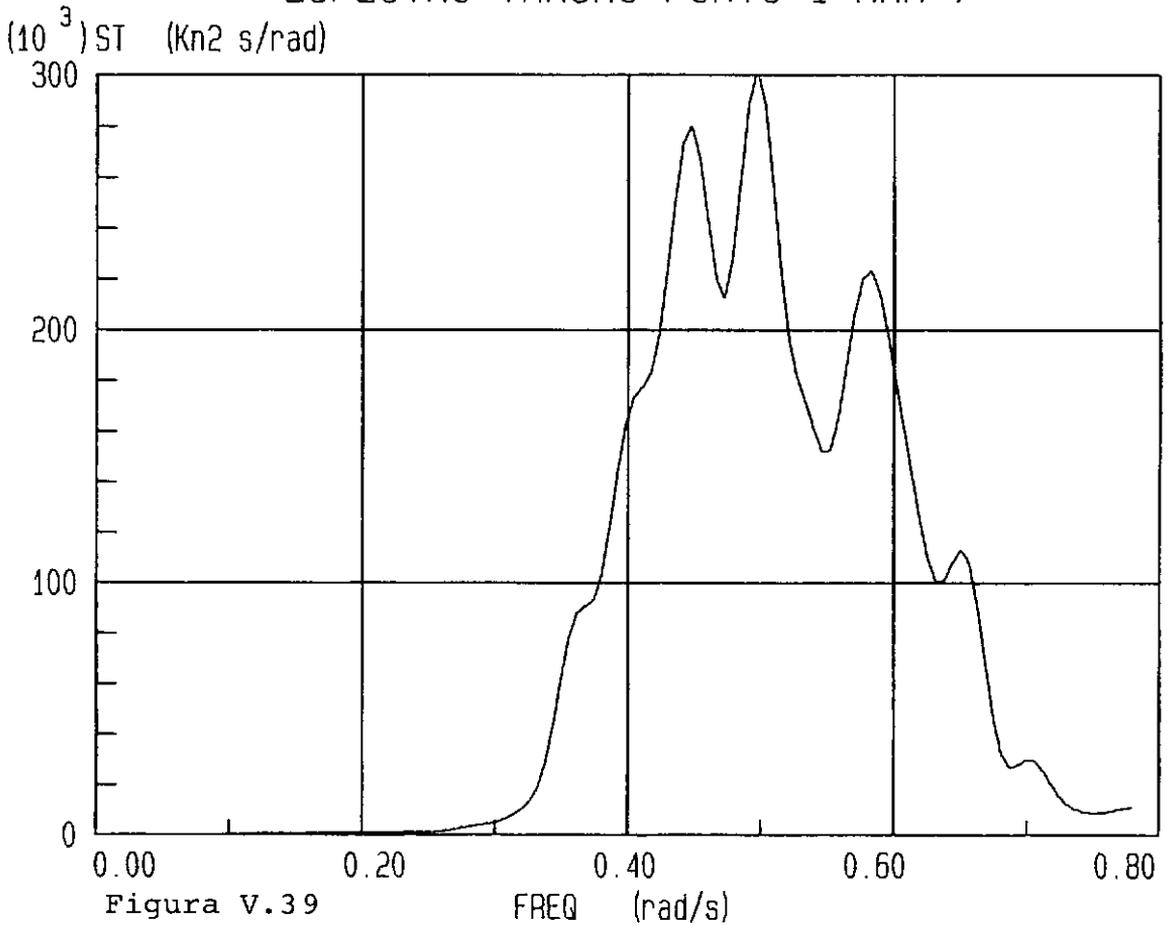


Figura V.39

V.4 - Análises suplementares

Foram calculados os períodos naturais e respectivos modos de vibração de três casos de linha, para analisar a variação do período em relação a rigidez da linha, cujos valores encontram-se relacionados na tabela (V.26) e os três primeiros modos de vibração nas figuras (V.40) a (V.42).

N	Período Natural T_n (s)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	15.33	10.33	7.41	7.02	5.77	5.08	4.38	3.92
4	14.24	10.27	7.54	6.92	5.57	4.72	4.19	3.64
7	13.37	12.38	8.84	6.63	5.61	4.63	4.14	3.61

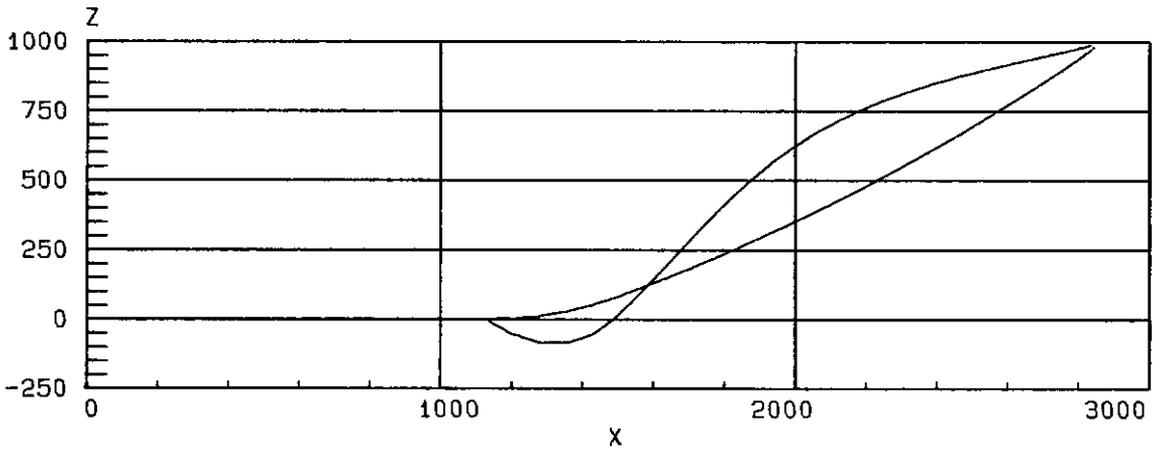
Tabela V.26 - Período Natural das Linhas

Foram analisados, também, três casos da linha levando em consideração o perfil de corrente ao longo da profundidade. Os estados de mar 1, 4 e 7 com respectivos perfis de corrente de 1, 10 e 100 anos.

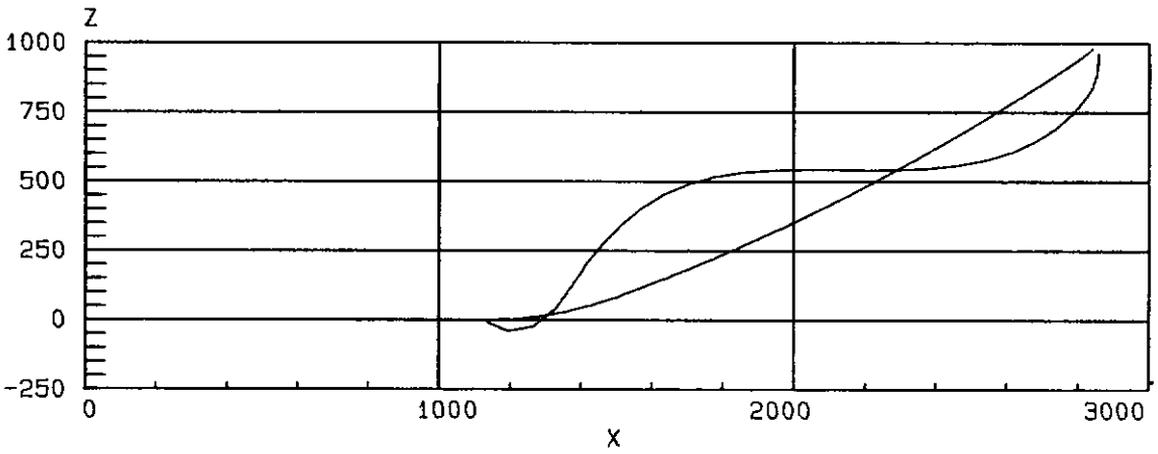
No entanto, na avaliação dos resultados observou-se que os acréscimos ocorridos no desvio padrão e no valor máximo dos esforços de tração foram muito pequenos, devido aos pequenos diâmetros dos segmentos da linha, decidindo assim por desprezá-los.

Os resultados dos três casos analisados estão resumidos na tabela (V.27).

ESTADO DE MAR 2 MODO 1 - 15.33 s



ESTADO DE MAR 2 MODO 2 - 10.33 s



ESTADO DE MAR 2 MODO 3 - 7.41 s

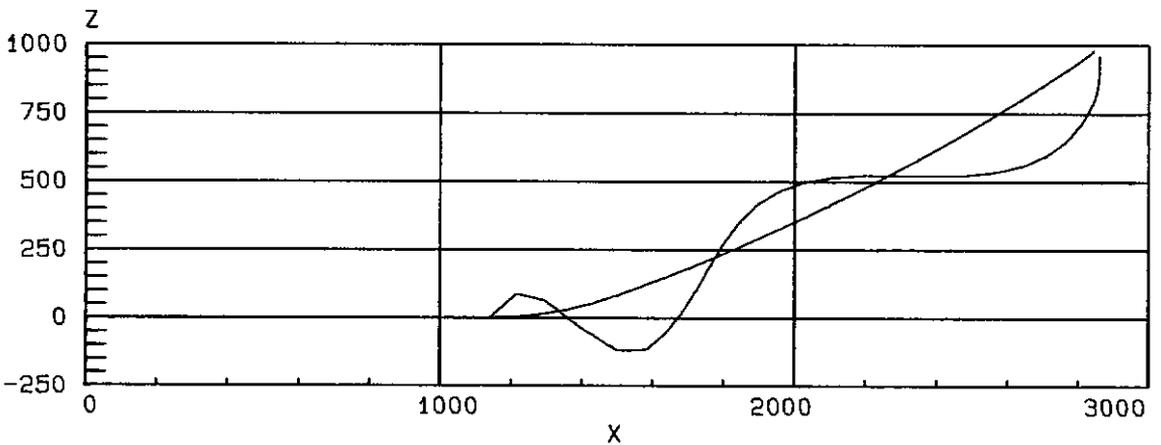
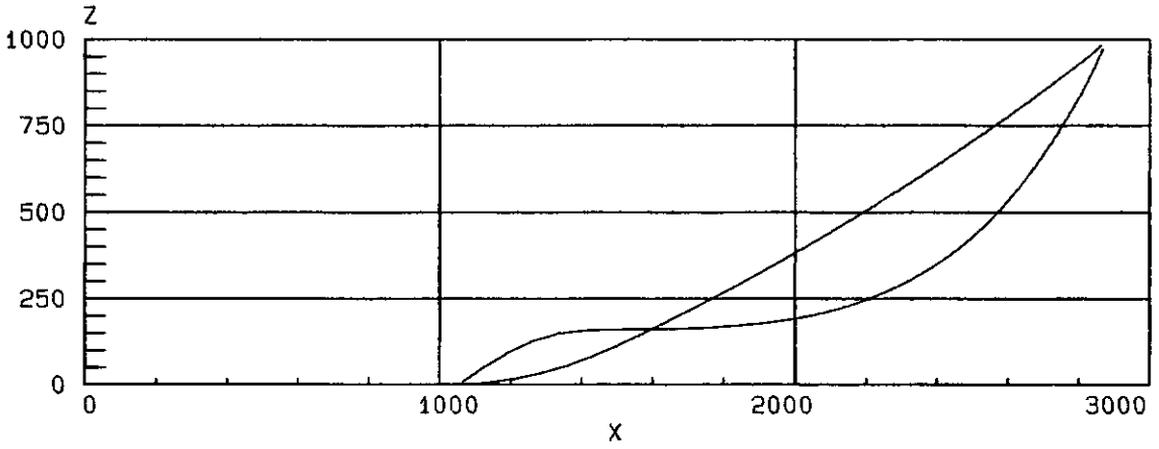
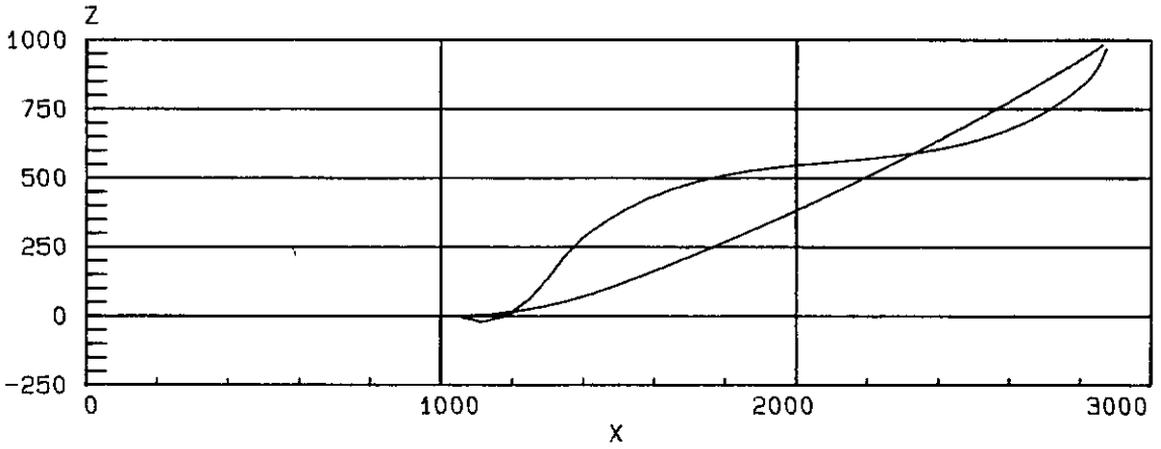


Figura V.40 - Modos de Vibração

ESTADO DE MAR 4 MODO 1 - 14.24 s



ESTADO DE MAR 4 MODO 2 - 10.27 s



ESTADO DE MAR 4 MODO 3 - 7.54 s

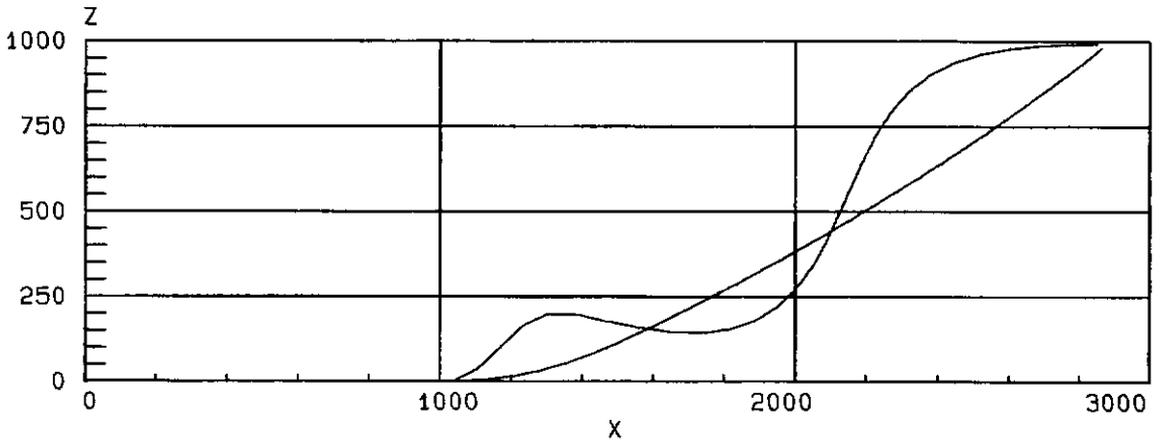
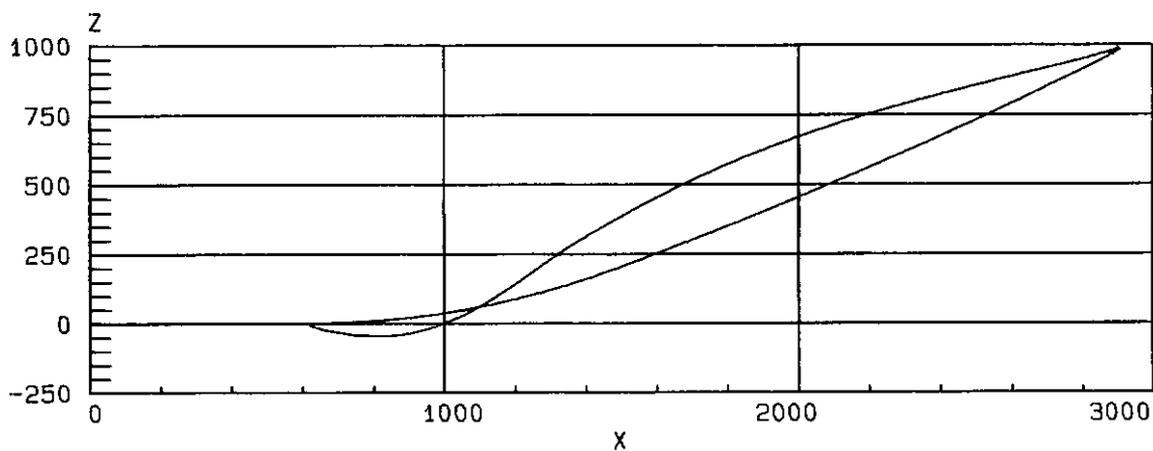
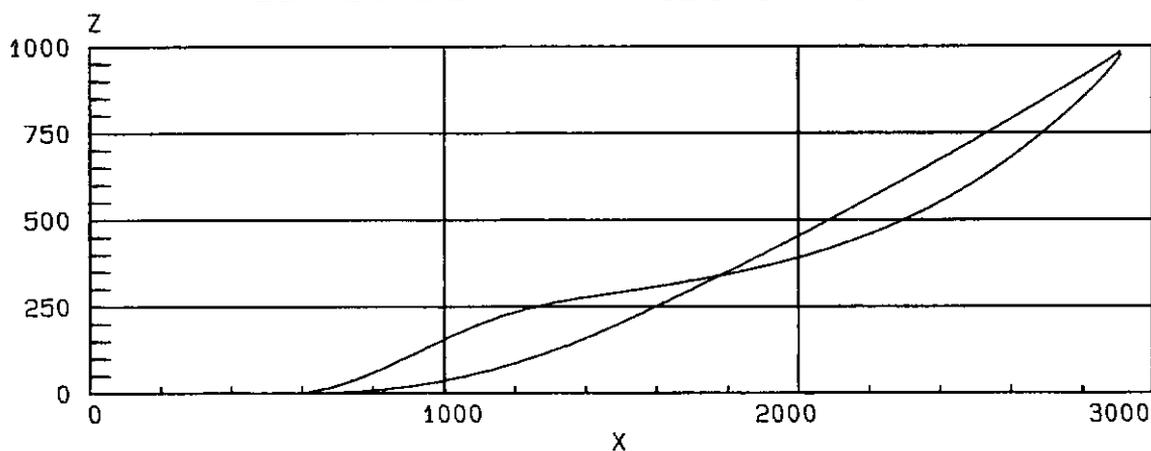


Figura V.41 - Modos de Vibração

ESTADO DE MAR 7 MODO 1 -13.37 s



ESTADO DE MAR 7 MODO 2 -12.38 s



ESTADO DE MAR 7 MODO 3- 8.84 s

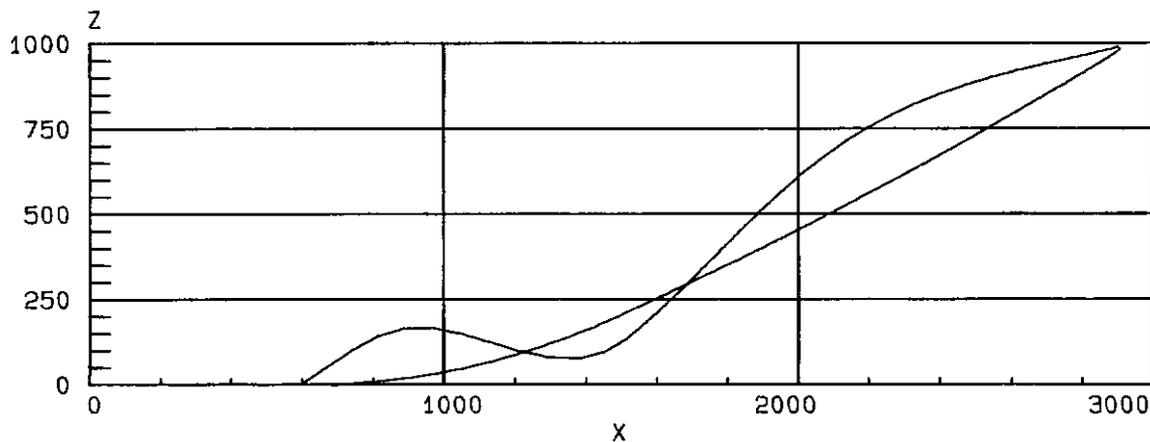


Figura V.42 - Modos de Vibração

Caso	N	1	4	7
Estado de Mar	H_s (m)	1.25	3.75	7.60
	T_z (s)	5.27	7.89	9.20
PONTO 3 (KN)	F_{med}	1338.	1755.	3334.
	σ_F	12.2	76.8	242.0
	F_{max}	1391.	2021.	4004.
PONTO 2 (KN)	F_{med}	1596.	2007.	3563.
	σ_F	13.1	79.1	238.2
	F_{max}	1650.	2277.	4232.
PONTO 3 (KN)	F_{med}	1738.	2140.	3674.
	σ_F	13.7	81.4	238.4
	F_{max}	1781.	2439.	4376.

Tabela V.27 - Trações Dinâmicas considerando Perfil de Corrente

V.5 - Comparação de Resultados

Analisando os resultados obtidos do estudo paramétrico e que se encontram resumidos nas tabelas e figuras apresentadas a priori, pode-se enfatizar e comentar alguns pontos.

A tabela (V.19) e as figuras (V.12) a (V.18) mostram a boa convergência entre os espectros de movimentos e as séries temporais de movimentos. Analisando as figuras, observa-se que os espectros gerados a partir das séries apresentam um ou mais picos. Alguns fatores podem ter influenciado nesta característica, tais como:

- . a dificuldade de filtragem do espectro gerado a partir da série temporal;

- . a não consideração de áreas com energias iguais do espectro, durante a geração das séries;

- . a não consideração de várias simulações de séries temporais e posterior adoção de um resultado médio.

Entretanto, o método adotado mostrou-se eficiente, podendo apenas ser aprimorado nos pontos acima mencionados.

Na geração das séries temporais de movimentos, adotou-se um tempo de simulação total de 1074 segundos, com um incremento de tempo de 1 segundo. A adoção deste incremento de tempo tentou assegurar que a energia do movimento fosse adequadamente descrita. E durante a integração no tempo, os incrementos de tempo foram subdivididos, na ordem de $1/200$, com o objetivo que não ocorressem erros decorrentes da falta de convergência.

Os 50 primeiros segundos dos históricos de esforços de tração foram desprezados, no tratamento estatístico da resposta. Com este cuidado, evita-se a interferência de perturbações que possam ocorrer no cálculo da resposta transiente, para os primeiros passos de integração após o instante zero, quando a linha está em repouso.

As comparações realizadas na tabela (V.25) dos desvios padrões, períodos de "zero up-crossing" e larguras de banda dos esforços de tração obtidos por ambos os métodos, mostram a compatibilidade dos resultados, os quais podem ser confirmados pelas figuras (V.19) a (V.39).

As análises dinâmicas no domínio da frequência apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os fornecidos pela integração no tempo. Deve ser ressaltado que estes resultados divergem mais ao utilizar estados de mar com grande energia (casos 5, 6 e 7), onde as não linearidades inerentes ao problema tendem a tornar-se importantes.

Outro fato interessante de salientar é que os movimentos tangenciais à linha de ancoragem produzem flutuações de esforços de tração maiores que os correspondentes aos movimentos normais, podendo notar que os períodos de "zero up-crossing" dos históricos de tração estão mais próximos aos períodos de "zero up-crossing" dos movimentos de excitação na direção z.

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DE FADIGA

VI.1 - Introdução

Fadiga é um modo comum de falha em estruturas de engenharia, sujeitas a carregamentos variáveis, dentre elas estão as estruturas "offshore" submetidas às cargas de ondas.

Em unidades flutuantes ancoradas permanentes, a avaliação da vida à fadiga do sistema de ancoragem torna-se essencial, pois há uma grande dificuldade de inspeção, manuseio e troca de linhas em mar aberto e, principalmente, em lâminas d'água profundas.

A utilização destas unidades em sistemas permanentes é recente, contribuindo para que as ferramentas necessárias para a avaliação do dano por fadiga estejam em estudo, como é o caso da realização de testes para a determinação das curvas S-N referentes a cabos de grandes diâmetros, usuais em sistemas de ancoragem.

Há duas maneiras distintas de analisar a fadiga de estruturas. A primeira refere-se a utilização de resultados de testes na forma de curvas S-N, para o material de interesse e a segunda maneira é através da mecânica da fratura.

Este trabalho baseia-se na utilização das curvas S-N para a avaliação da vida útil à fadiga de linhas de ancoragem.

Os testes de fadiga são usualmente realizados

com uma carga flutuante, que é caracterizada pela variação da carga (S), pelo valor médio da mesma (P) e pelo número de ciclos de carga (N) até a falha. Os resultados destes testes são plotados gerando as denominadas curvas S-N, as quais relacionam o número de ciclos de carga (N) que o material resiste antes de falhar, em função da variação da carga (S).

A curva S-N pode ser expressa na forma:

$$N(S) = K S^{-m} \quad (\text{VI.1})$$

onde,

- N(S) = número de ciclos admissível para a variação de tensão S;
- S = variação de tensão;
- K = parâmetro da curva S-N;
- m = inclinação da curva S-N.

O dano por fadiga em um ponto da estrutura é função do histórico de tensão neste ponto e das curvas S-N do material, podendo ser expresso como:

$$d_i = d_i(S_i, P_i, n_i) \quad (\text{VI.2})$$

O dano total por fadiga é calculado pela regra de acúmulo linear de dano de PALMGREN-MINER. De acordo com esta regra o dano por fadiga d_i , causado por n_i ciclos da variação de carga S_i é linearmente proporcional ao número máximo de ciclos N_i da mesma variação de carga que o material resiste antes de falhar:

$$d_i = n_i / N_i \quad (\text{VI.3})$$

O dano total causado por vários carregamentos é determinado pelo somatório de todos os danos parciais.

$$D = \sum_{i=1}^N d_i \quad (\text{VI.4})$$

A vida útil à fadiga é determinada pelo inverso do dano total acumulado.

$$\text{Vida} = 1 / D \quad (\text{VI.5})$$

Conhecidas as curvas S-N dos materiais e aplicando a regra de dano linear, o problema limita-se na obtenção do número de ciclos atuantes das diferentes cargas na estrutura.

Neste capítulo, são apresentados dois procedimentos para a avaliação da vida à fadiga, em função dos métodos utilizados para a determinação da resposta dinâmica da linha, os quais encontram-se descritos por vários autores [17,20,21,22,23,24].

VI.2 - Cálculo do Dano por Fadiga utilizando o Método de Contagem de Ciclos ("Rainflow")

Os históricos de tensões, para cada estado de mar, são obtidos a partir da análise dinâmica no tempo da linha de ancoragem.

A contagem dos ciclos de tensões ao longo do

histórico é feita através do algoritmo "Rainflow" apresentado por DOWNING e SOCIE [23]. O algoritmo baseia-se na contagem de picos e vales, como se fosse o fluxo d'água escoando por um telhado, cuja a grande vantagem é a capacidade de considerar todas as variações de tensões ocorridas ao longo do tempo. O método, portanto, tem grande aplicabilidade em processos de banda larga.

Uma descrição sucinta do método "Rainflow" é apresentada no apêndice I.

Para cada ciclo de tensões, o dano d_i é gerado por:

$$d_i = (S_i)^m / K \quad (\text{VI.6})$$

Então, para todos os ciclos de tensões avaliados, tem-se:

$$D = \sum_{i=1}^N [S_i^m / K] \quad (\text{VI.7})$$

Para calcular o dano por fadiga acumulado em certo período de recorrência, por exemplo 20 anos, o dano deve ser somado para todas as cargas ambientais, levando em consideração a probabilidade de ocorrência de cada uma.

VI.3 - Cálculo do Dano por Fadiga utilizando o Processo de Banda Estreita ("Narrow Band Approximation")

O cálculo do dano por fadiga pelo processo de banda estreita é descrito, a seguir:

Quando a análise dinâmica da linha é realizada no domínio da frequência, obtem-se um espectro de resposta de tensões. Na hipótese de considerá-lo de banda estreita, a distribuição estatística pode ser aproximada por uma função de densidade de probabilidade de Rayleigh, como mostra a equação, abaixo:

$$D = n (2 \sigma \sqrt{2})^{-m} \Gamma (m / 2 + 1)$$

(VI.8)

onde,

n = número total de ciclos;

σ = desvio padrão do espectro de resposta;

Γ = função Gamma.

O número total de ciclos n , é definido por:

$$n = T_{sim} / T_z \quad (VI.9)$$

onde,

T_{sim} = tempo de simulação do processo;

T_z = período de "zero up-crossing" do espectro de resposta.

A vida útil à fadiga é determinada pelo o inverso do dano total.

No caso do espectro de tensões ser Gaussiano, porém de banda larga, WIRSCHING [22] propôs a simulação do espectro em uma série temporal de tensões e a aplicação do algoritmo "Rainflow" ou a utilização de um fator de

correção λ sobre o dano calculado pelo processo de banda estreita, cujo valor é função da largura de banda do processo e da inclinação da curva S-N.

Portanto, assume-se que o dano por fadiga de um processo Gaussiano de banda larga, pode ser escrito como:

$$D_{wb} = \lambda D_{nb} \quad (\text{VI.10})$$

VI.4 - Comparação dos Resultados obtidos pelos Dois Métodos

Com a finalidade de se avaliar os resultados de dano por fadiga obtidos pelos dois métodos descritos a priori, foram analisados os pontos 1 e 2 do modelo, referentes ao segmento de cabo na linha de ancoragem.

Para o cálculo da contagem de ciclos, utilizou-se o programa "RAINFLOW" [10].

Como já mencionado anteriormente, as curvas S-N existentes para cabos não englobam todos os casos necessários. A Petrobrás participa, atualmente, de testes de fadiga com cabos de aço tipo "six strand" de diâmetros de 40 mm a 127 mm, com vistas a obtenção de maiores subsídios para a confecção das curvas S-N.

Para o estudo, a curva S-N adotada para o elemento de cabo é indicada pela MTD (1988) e deriva de testes realizados com cabos do tipo "six strand".

Os cabos de aço trabalham estruturalmente ao esforço de tração, portanto as curvas S-N podem relacionar diretamente a tensão com o esforço de tração, ou

precisamente, com a carga última de ruptura do cabo, como mostra a equação (VI.11). A figura (VI.1) apresenta a curva S-N adotada.

$$N S^m = K \quad (VI.11)$$

$$m = 3.75 \quad e \quad K = 841 \text{ UBL}^m$$

onde,

UBL = carga de ruptura última do cabo.

Primeiramente os valores de dano por fadiga foram calculados para um período de 1 ano, sem considerar a probabilidade de ocorrência de cada estado de mar, através dos históricos de tensões e dos espectros de tensões, respectivamente. Na análise dos históricos de tensões, utilizou-se o algoritmo "Rainflow", enquanto que na análise dos espectros de tensões, o dano foi avaliado utilizando-se o processo de banda estreita e adicionalmente, simulando uma série temporal de tensão, na qual o algoritmo "Rainflow" pôde ser aplicado.

As tabelas (VI.1) e (VI.2) apresentam os valores de danos por número de ocorrência de cada estado de mar, para os pontos 1 e 2, respectivamente.

RAZÃO ENTRE A VARIAÇÃO DE TENSÃO E A TENSÃO ÚLTIMA DE RUPTURA.

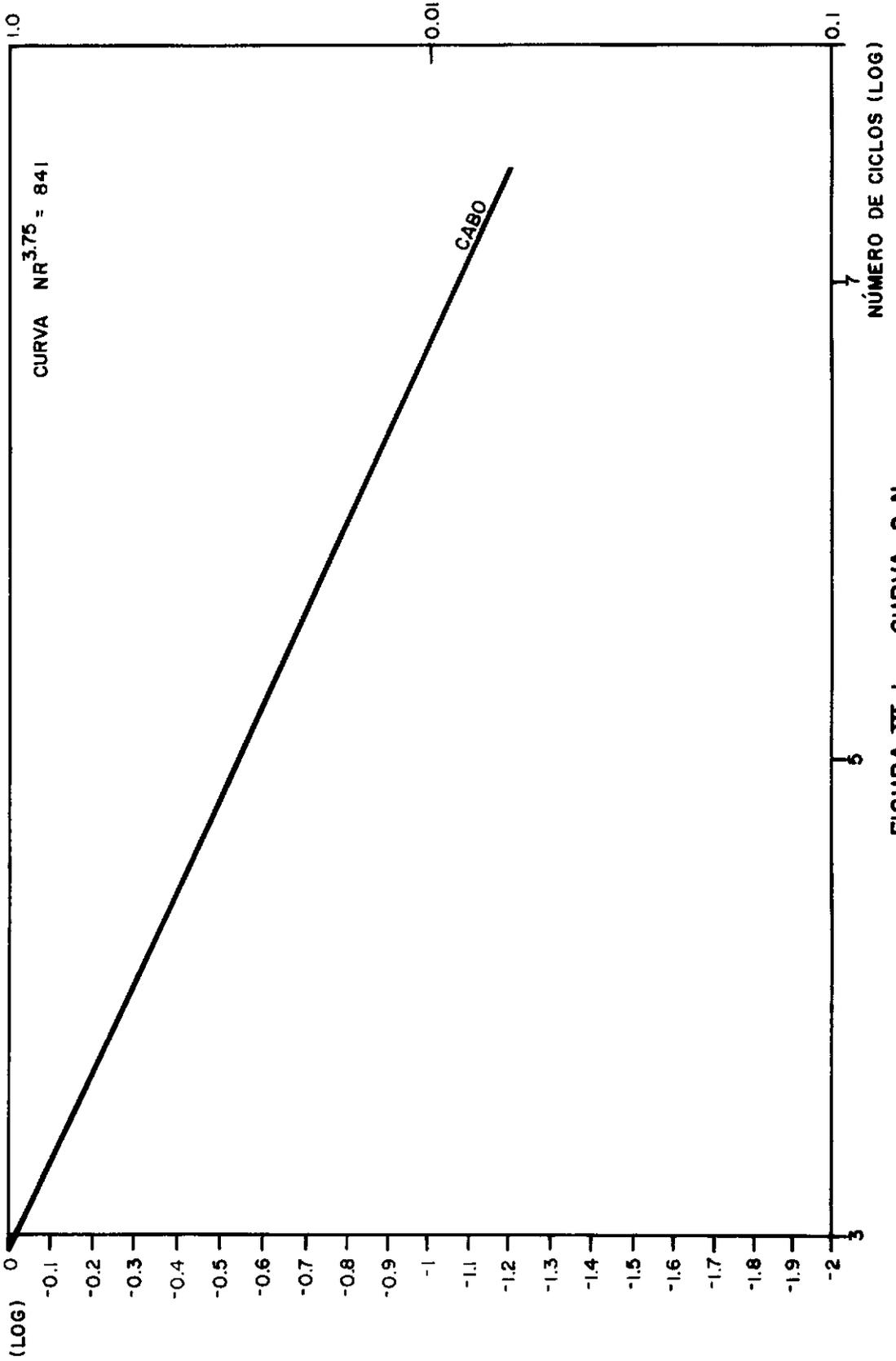


FIGURA VI.1 - CURVA S.N

Estado de Mar	Dano por número de ocorrência $\bar{d}(10^{-4}/\text{ano})$		
	Histórico de Tensões "Rainflow"	Espectro de Tensões	
		Banda Estreita	"Rainflow"
1	0.0139	0.0143	0.0110
2	0.4008	0.5600	0.4490
3	1.8999	3.2190	2.4240
4	10.150	14.240	11.580
5	34.830	46.500	38.410
7	90.170	88.110	82.370

Tabela VI.1 - Dano por número de ocorrência - ponto 1

Estado de Mar	Dano por número de ocorrência $\bar{d}(10^{-4}/\text{ano})$		
	Histórico de Tensões "Rainflow"	Espectro de Tensões	
		Banda Estreita	"Rainflow"
1	0.0134	0.0188	0.0148
2	0.5674	0.7930	0.6900
3	1.6750	2.0690	2.3280
4	9.811	14.235	11.578
5	28.670	44.190	36.510
7	79.443	79.540	74.530

Tabela VI.2 - Dano por número de ocorrência - ponto 2

O dano parcial, para cada estado de mar i , é determinado considerando a probabilidade de ocorrência de cada um.

$$d_i = p_i \bar{d}_i \quad (\text{VI.12})$$

onde,

\bar{d}_i = dano parcial;

p_i = probabilidade de ocorrência do estado de mar i no período de 1 ano.

As tabelas (VI.3) e (VI.4) mostram os resultados dos danos parciais e o os danos totais, para as análises efetuadas.

Estado de Mar		Dano por fadiga $d(10^{-4}/\text{ano})$		
N	Duração (s)	Histórico de Tensões "Rainflow"	Espectro de Tensões	
			Banda Estreita	"Rainflow"
1	8779600	0.0387	0.0398	0.0306
2	12279600	1.5610	2.1801	1.7481
3	8942400	5.3870	9.1280	6.8740
4	1274400	4.1020	5.7550	4.6800
5	259200	2.3863	3.8220	3.1570
Total do dano		13.9500	20.9249	16.4897
Vida útil (anos)		717	478	606

Tabela VI.3 - Dano por fadiga - Ponto 1

Estado de Mar		Dano por fadiga $d(10^{-7}/\text{ano})$		
N	Duração (s)	Histórico de Tensões "Rainflow"	Espectro de Tensões	
			Banda Estreita	"Rainflow"
1	8779600	0.0373	0.0523	0.0412
2	12279600	2.2094	3.0880	2.6867
3	8942400	4.7497	9.7010	6.6010
4	1274400	3.9650	5.7520	4.6790
5	259200	2.3560	3.6320	3.0010
Total do dano		13.3200	22.2253	17.0089
Vida útil (anos)		751	431	588

Tabela VI.4 - Dano por fadiga - Ponto 2

Houve uma compatibilidade dos resultados, dos valores do dano devido a fadiga, obtidos pelos dois métodos. Os danos calculados pelo processo de banda estreita obtiveram valores maiores que os calculados pela contagem de ciclos, na ordem de 45%. No entanto, no cálculo do dano a partir da simulação do espectro de tensões e posterior aplicação da contagem de ciclos, os valores superaram no máximo 28%, no estado de mar 5, cuja a probabilidade de ocorrência é muito pequena.

É importante salientar que o tempo de processamento gasto para a determinação do histórico de tensões é muito superior ao necessário para a determinação do espectro de tensões e posterior simulação.

Um fato interessante que deve ser observado nas tabelas anteriores é que os valores dos danos ocorridos nos pontos 1 e 2 da linha são praticamente iguais, apesar do ponto 1 ter uma tensão média menor que o ponto 2, mas as flutuações de tensões são na mesma ordem de grandeza ou maiores.

A vida útil obtida para os dois pontos analisados é muito superior a vida de operação da plataforma, cujo valor é de 20 anos.

Cabe ressaltar que, o intuito deste capítulo foi a avaliação dos procedimentos existentes de cálculo do dano por fadiga, não sendo, portanto, de interesse a discretização dos carregamentos ambientais, para a determinação da vida útil com precisão.

CAPITULO VII

CONCLUSÕES

O estudo mostrou que os efeitos não lineares da linha na análise dinâmica, para as condições ambientais da Bacia de Campos em lâminas d'água de 1000 metros, não são relevantes.

As análises dinâmicas realizadas, tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo, apresentaram valores satisfatórios entre si, como mostram os resultados no capítulo V. Vários fatores influenciaram a compatibilidade entre os resultados obtidos, sendo que os principais foram o emprego de linhas leves e a utilização dos dados ambientais relativos a Bacia de Campos, que são menos severos que os pertinentes as áreas críticas como o Mar do Norte e o Golfo do México, onde foram realizadas as análises similares encontradas na literatura.

Analisando os históricos de tensões ao longo do tempo, para todos os estados de mar, observa-se que em algumas ocasiões a tensão dinâmica obtida pelo domínio do tempo supera a tensão máxima obtida pelo domínio da frequência, entretanto a diferença entre estes valores é muito pequena.

No caso de projeto da linha de ancoragem, pelo método do domínio da frequência, os fatores de segurança recomendados pelas Normalizações englobam este provável erro.

Para a avaliação da vida útil à fadiga das linhas de ancoragem, a situação é mais desfavorável pois a

influência da variação da tensão é primordial. Entretanto os resultados obtidos pelo método de contagem de ciclos e pelo processo de banda estreita forneceram valores compatíveis para a vida útil à fadiga. Obtêve-se pelo processo de banda estreita valores majorados de no máximo 20%, o que é razoável, considerando-se que o espectro de tensões não é um processo propriamente de banda estreita.

Comparando o tempo computacional necessário para a realização das análises, o domínio da frequência é mais vantajoso do que o domínio do tempo.

Em um projeto de linha de ancoragem o tempo computacional para a execução das análises é muito importante, devido ao seu alto custo e a obediência ao cronograma do projeto, principalmente nos casos de análise para a avaliação da vida à fadiga, em que necessita-se discretizá-la em muitos carregamentos ambientais. A partir dos resultados, obtidos neste trabalho, pode-se tentar otimizar estas análises, utilizando os métodos de integração ora na frequência e ora no tempo, de acordo com as não linearidades envolvidas.

Este trabalho concentrou-se no estudo da influência dos efeitos não lineares da linha. Entretanto, os efeitos não lineares da unidade flutuante ancorada, tais como os movimentos de baixa frequência, podem ser mais relevantes para a análise.

É sugerido um aprofundamento no estudo destes efeitos, com ênfase para os dados ambientais relativos à costa Brasileira.

BIBLIOGRAFIA

- [1] NOBLE, DENTON & ASSOCIATES, INC., Deep Water Catenary Mooring Systems for Floating Production Platforms, Final Report, April, 1987.
- [2] TRIANTAFYLLOU, M.S., BLIEK A. e SHIN H., "Dynamic Analysis as a Tool for Open-Sea Mooring System Design", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, November, 1985.
- [3] FYLLING, I. J., Design Methods for Deep Water Anchor System, Norwegian Marine Technology Research Institute, Report n.511085.00.01, 1988.
- [4] API; RP - 2P, Recommended Practice for Design, Analysis and Maintenance of Catenary Mooring for Floating Production Systems, American Petroleum Institute.
- [5] LINDAHL, J., Sjöberg, A., Dynamic Analysis of Mooring Cables, Department of Hydraulics - Chalmers University of Technology, Report A:9, 1983.
- [6] WEBSTER, R.L., Seadyn Mathematical Models, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, September, 1981.
- [7] WEBSTER, R.L., "Nonlinear Static and Dynamic Response of Underwater Cable Structures Using Finite Element Method", Offshore Technology Conference, OTC 2322,

1975.

- [8] NOBLE, DENTON & ASSOCIATES INC., DMOOR - Deterministic Mooring Analysis - Program Suite, Final Report, December, 1986.
- [9] LINDAHL, J. and BERGDAHL, G., MODEX Manual, Department of Hydraulics Chalmers University of Technology, Report B:49, Göteborg, 1987.
- [10] NOBLE, DENTON & ASSOCIATES INC., RAINFLOW - Computer Program to Apply the Rainflow Method in the Computation of Fatigue Damage, Preliminary Report, April, 1986.
- [11] DNV, WADAM - Wave Loading on Marine Structures Program, 1989.
- [12] JOHANSSON, P.I., A Finite Element Model for Dynamic Analysis of Mooring Cables, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, January, 1976.
- [12] BENSIMON, L.F., Critérios de Projetos de Amarração, Petrobrás - CENPES/DIPREX/SEPRON, Janeiro, 1989.
- [13] WINGET, J.M. e HUSTON, R.L., "Cable Dynamics - A Finite Segment Approach", Computer & Structures, volume 6, 1976.
- [14] MOURELLE, M.M., Análise de Estruturas Marítimas e Sistemas Flexíveis Constituídos por Cabos, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1984.

- [15] BATHE, K.J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice Hall, 1982.
- [16] PALO, P.A., MEGGIST, D.J. e NORDELL W.J., "Dynamic Cable Analysis Models", 15th Annual Offshore Technology Conference, OTC 4500, Texas.
- [17] LOTVEIT S.A., WANGENSTEN, "Fatigue and Dynamic Analysis of Moored Offshore Structures, Comparison with Existing Regulations", International Workshop on Ship and Platform Motions, University of California, Berkeley, October, 1983.
- [18] GLENN, A.H. and Associates, 100 Years Storm Wind, Tide, Wave and Current Characteristics and Wave and Combined Wave for Fatigue Analysis, Rio de Janeiro, February, 1979.
- [19] PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., Numerical Recipes, Cambridge University Press, cap.12, 1988.
- [20] RANKKA, W., Estimating the Time to Fatigue Failure of Mooring Cables, Department of Hydraulics - Chalmers University of Technology, Report A:20, 1989.
- [21] WIRSCHING, P.H. e LIGHT, M.C., "Fatigue Under Wide Band Random Stress", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 106, n. st 7, 1980.

- [22] WIRSCHING, P.H. e SHEHATA, A.M., "Fatigue Under Wide Band Random Stresses Using the Rain-flow Method", Journal of Engineering Materials and Technology, pag. 205 a 211, 1977.
- [23] DOWNING, S.D. e SOCIE D.F., "Simple Rainflow Counting Algorithms", International Journal of Fatigue, Butterworth e Co. Ltd., January, 1982.
- [24] SANDERS, D.R. et alli, "Predicting Mooring System Fatigue Life by Probabilistic Methods", Offshore Technology Conference, OTC 4637, 1983.

APÊNDICE I
ALGORITMO "RAINFLOW"

Para a aplicação da regra linear de PALMGREN-MINER no cálculo da dano por fadiga de um processo $X(t)$, é necessário especificar a distribuição estatística deste processo, em relação a variação de tensões e o número de ciclos admissíveis.

No caso de processos de banda estreita a avaliação estatística torna-se simples, entretanto no caso de processo de banda larga, o histórico irregular no tempo da tensão tem que ser transformado em uma sequência de ciclos-tensão.

Alguns métodos de contagem de ciclos para a análise de fadiga vêm sendo propostos. Após o estudo de vários destes métodos DOWNING e SOCIE [23] concluíram que o método "Rainflow" ressalta-se pela sua precisão, particularmente, quando o histórico de tensões contém efeitos não lineares.

O método "Rainflow" consiste, basicamente, na conversão de um histórico no tempo de tensões em um processo de pontos, contendo valores máximos e mínimos (picos e vales), como é mostrado na figura (AI.1). A contagem de ciclos é efetuada a partir desta sequência, como se o fluxo d'água escoando por um telhado.

O algoritmo pode ser descrito de acordo com as seguintes regras e tendo como exemplo a figura (AI.2):

1. o histórico no tempo de tenões é reduzido em

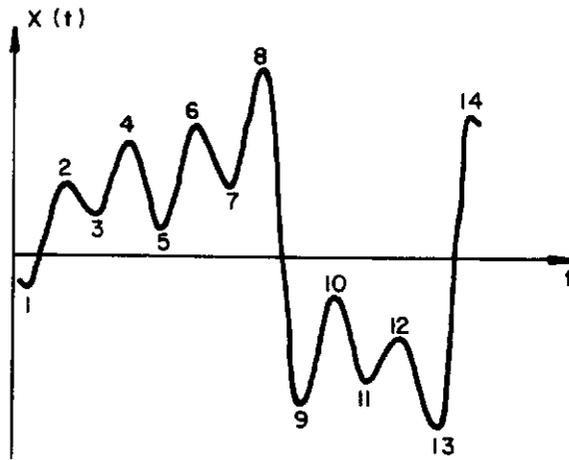


FIGURA A1.1 - SÉRIE TEMPORAL DE TENSÃO

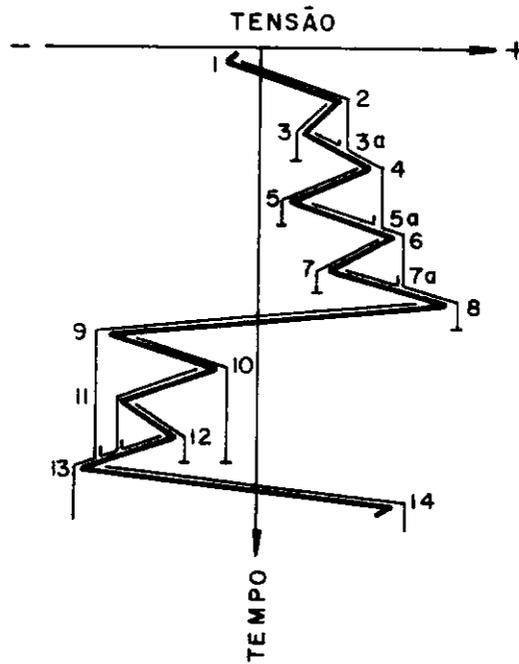


FIGURA A1.2 - CONTAGEM DE CICLOS

uma série de picos e vales.

2. o eixo do tempo é orientado verticalmente, com a direção positiva para baixo.

3. um caminho inicia em cada pico e vale.

4. um caminho iniciado em um vale, termina quando:

- o próximo vale for menor que o inicial, por exemplo caminhos [1-8] e [9-10];

- na interseção de um caminho prévio, caminhos [3-3a] e [5-5a].

5. um caminho iniciado em um pico, termina quando:

- o próximo pico for maior que o inicial, isto é, caminhos [2-3], [4-5] e [6-7];

- na interseção com um caminho prévio, caminhos [2-3] e [4-5].

6. um novo caminho não pode começar até que o caminho atual termine.

7. definir meio-ciclos de cada caminho e permitir que dois meio-ciclos formem um ciclo completo, desde que o valor da amplitude de tensão no ponto inicial de um meio-ciclo seja o mesmo do ponto final do outro meio-ciclo, e vice-versa. Ou seja, o método calcula as variações de tensões e os respectivos ciclos.

Analisando a técnica de contagem de ciclos de tensões, pode-se observar que:

. o método "Rainflow" não faz qualquer

consideração em relação a natureza do histórico de tensões (processo Gaussiano, estacionário e etc.), não reconhecendo-a e nem mesmo sendo afetado.

. o método é capaz de identificar todos os ciclos de tensões, associados a ambos efeitos, de alta e baixa frequências, quando estes ocorrem no histórico no tempo de tensões.

O algoritmo "Rainflow", para implementação computacional, é apresentado por DOWNING e SOCIE [23].