

São Paulo  
1992



Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia

# ESTUDO DA OPERACIONALIDADE DE EMBARCAÇÕES GUNDASTE

JOÃO CARLOS CANTISANI MAZZUCCO

FD-1355

BC

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Kazuo Nishimoto pela orientação, apoio e principalmente, pelo grande incentivo à realização deste trabalho.

À Sra. Josefa N. Uratsuka, bibliotecária da Biblioteca de Engenharia Naval, por seu sempre bom atendimento e auxílio na consulta à biblioteca, e pela revisão bibliográfica deste trabalho.

À FAPESP cujo auxílio financeiro possibilitou a realização do trabalho.

## REVISÃO E COMENTÁRIOS FINAIS À DISSERTAÇÃO

### ANEXO

O presente anexo objetiva tecer alguns comentários finais no sentido de melhor esclarecer certos aspectos do texto e do trabalho, bem como efetuar uma revisão de alguns conceitos apresentados.

Este anexo é posterior à apresentação da dissertação aos examinadores, tendo sido efetuado por solicitação dos mesmos, a partir do exame do trabalho e das discussões efetuadas durante a apresentação.

A fim de melhor situar o leitor, os comentários são indexados pelas páginas do texto, às quais os mesmos se referem.

Pag.24 - É importante notar que a equação que representa a dinâmica do movimento da embarcação, representado pelos seis graus de liberdade, correspondente à equação (3.1), é uma equação linearizada válida quando se considera pequenos deslocamentos da embarcação. A definição dos movimentos de roll, pitch e yaw para um sistema não linear deveria partir da consideração dos ângulos de Euler do movimento.

Pag.28 - Com referência aos métodos de obtenção do movimento de embarcações, para melhor entender a perturbação que a presença de um corpo causa no escoamento do fluido, representado pelas ondas incidentes no corpo, tal perturbação ocorre de duas maneiras: A primeira através das ondas

Pag.56 - Quando se trata da determinação da força dinâmica ou força de tração no cabo, devido ao movimento do sistema, a

Pag.51 - A representação do movimento do módulo por rotações em torno do ponto A, que representa a extremidade do guindaste, é feita a partir da equação do pêndulo simples para movimentos de pequenas amplitudes. Isto significa que a inércia própria do módulo não foi considerada. Esta, comparada com a inércia de rotação em torno de A, deve ser de pequena magnitude se o comprimento do cabo de içamento for bastante grande, porém pode ser considerável no caso de se ter comprimentos de cabo pequenos e módulos de grandes dimensões. Neste caso, a inércia própria do módulo deveria ser considerada na dinâmica do sistema acoplado.

Pag.41 - Para melhor clarificar a definição dos movimentos de rotação em torno do eixo longitudinal do sistema de coordenadas, ao passo que o segundo se trata da rotação em torno do eixo transversal, conforme a Fig.3.4.

Pag.31 - Uma correção deve ser feita quanto às considerações de um escoamento potencial não necessariamente admite o fluido como incompressível e nem o escoamento como oscilatório.

difratadas pela simples presença do corpo. A segunda pelas ondas irradiadas pelo corpo, estas ocorrendo apenas no caso em que o corpo se movimenta.

ano.

Pag.157 - Na primeira linha, entenda-se ao longo de todo o

consequente o espectro de energia médio. estabelecer os valores médios destes parâmetros e por intervalos de ocorrência de  $H^s$  e  $T^m$ , com o intuito de se referir a apenas um determinado estado de mar dado por variáveis podem ser tratadas como independentes, se faz período característico de ondas. Quando foi mencionado que as tabelas de distribuição conjunta de altura significativa e distribuição de probabilidade conjunta, mas a partir das presente dissertação, não ao nível de uma função de variáveis apresentam uma dependência que é mostrada na independência de  $H^s$  e  $T^m$  é necessário. É sabido que essas

Pag.146 - Um melhor esclarecimento a respeito da

ligamento pela popa da embarcação.

Pag.115 - As Figuras 5.13 a 5.24 representam as respostas significativas para diferentes períodos médios, normalizadas pela altura significativa de ondas. Os gráficos se referem a

teoria linear.

Pag.103 - A consideração da elevação da superfície do mar como um fenômeno tipicamente Gaussiano, é válida dentro da hipótese de ondas de pequenas amplitudes, correspondente à

pequenos deslocamentos do movimento angular do módulo. mesma pode ser aproximada pelo produto entre a massa e a aceleração vertical do módulo, de acordo com a hipótese de

O desenvolvimento de um modelo mais complexo que hidrodinâmico.

entre o módulo e a embarcação do ponto de vista características hidrodinâmicas do módulo e a interferência os mesmos se encontram submersos, considerando as poderia ser estudada a dinâmica de módulos quando caracterizar o acoplamento entre módulo e embarcação. Também desenvolvimento de outros modelos mais complexos, que possam diversas fases da operação de EG, assim como o valia. Relacionado a este aspecto estaria o estudo das estudo dos critérios de operação para EG seria de grande Como recomendação a trabalhos futuros, um melhor onde a embarcação deverá operar.

operacionalidade para uma missão específica e para o local otimizar o projeto do ponto de vista da melhor pode ser aplicada ao projeto de embarcações no sentido de se Pode-se notar também que a metodologia desenvolvida a missão das embarcações.

os critérios de operação que estão diretamente relacionados aspectos que diferenciariam as embarcações seriam justamente representada através das hipóteses de sistemas lineares. Os para qualquer sistema oceânico cuja dinâmica possa ser simplesmente a embarcações-guinaste podendo ser efetuado estudo da operacionalidade de uma embarcação não se aplica Um dos aspectos importantes a serem notados é que o como recomendações, para continuidade do trabalho.

Algumas observações finais poderiam ser introduzidas

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

considerasse um número maior de graus de liberdade poderia ser feito mais facilmente com base nas equações de Lagrange da mecânica analítica.

Mazzuco, João Carlos Cantisani

Estudo da operacionalidade de embarcações-guindaste. São Paulo, 1992.

179p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval.

1. Embarcações-guindaste I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval. II. Título

FD-1355

70



SUMARIO

1	1	INTRODUÇÃO	1
8	2	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE E DE SUAS OPERAÇÕES	8
8	2.1	PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE	8
12	2.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE	12
15	2.3	PRINCIPAIS ASPECTOS DE OPERAÇÕES DE IGAMENTO	15
23	3	REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO DAS EMBARCAÇÕES EM ONDAS REGULARES - OBTENÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA	23
23	3.1	EQUAÇÃO DO MOVIMENTO	23
28	3.2	MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO MOVIMENTO DE EMBARCAÇÕES	28
36	3.3	CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO MOVIMENTO	36
49	4	ANÁLISE DO MOVIMENTO DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE	49
49	4.1	INTRODUÇÃO	49
50	4.2	MOVIMENTO ACOPLADO DA EMBARCAÇÃO E DO MÓDULO SUSPENSO	50
56	4.3	RESULTADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO	56
69	4.4	MOVIMENTO ACOPLADO DAS EMBARCAÇÕES ANALISADAS	69
70	4.4.1	RESULTADOS DO MOVIMENTO DA BARCAÇA	70
76	4.4.2	RESULTADOS DO MOVIMENTO DA SEMISUBMERSÍVEL	76

5	DETERMINAÇÃO DO MOVIMENTO DAS EMBARCAÇÕES EM MAR IRREGULAR	96
5.1	REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR.....	96
5.1.1	ESPECTRO DE ONDAS.....	96
5.1.2	MODELOS MATEMÁTICOS DE ESPECTRO DE ONDAS.....	99
5.2	ESTATÍSTICA DE ONDAS.....	103
5.3	RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO NO CURTO PRAZO.....	109
5.3.1	CRUZAMENTO ESPECTRAL.....	111
5.3.2	ESPECTRO DE ONDA DIRECIONAL - FUNÇÃO DE ESPALHAMENTO.....	112
5.4	RESULTADOS.....	114
6	DETERMINAÇÃO DA OPERACIONALIDADE	128
6.1	INTRODUÇÃO.....	128
6.2	DESCRIÇÃO DE LONGO PRAZO DE ESTADOS DE MAR.....	130
6.3	CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO.....	135
6.4	MODELO DE OPERACIONALIDADE.....	143
6.4.1	CONSIDERAÇÃO SOBRE A VARIAÇÃO NA FORMA DO ESPECTRO.....	151
6.5	RESULTADOS.....	154
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	169
APÊNDICE A REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS DE MASSA ADICIONAL, AMORTECIMENTO, RESTAURAÇÃO HIDROSTÁTICA E FORÇAS DE EXCITAÇÃO DE UMA EMBARCAÇÃO		

- APENDICE B CARACTERIZAÇÃO DE UM PROCESSO ALAATORIO
- APENDICE C PROPRIEDADES ESTADÍSTICAS DOS ESPECTROS DE ONDA
- APENDICE D ANÁLISE DE UM PROCESSO ALAATORIO NO DOMÍNIO DA  
FREQUÊNCIA
- APENDICE E REPRESENTAÇÃO DAS INCERTEZAS NA FORMA DO  
ESPECTRO DE RESPOSTA
- APENDICE F MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ESTADOS DE MAR PARA O  
MAR DO NORTE
- APENDICE G TABELAS DE RESPOSTA SIGNIFICATIVA E DISTRIBUIÇÃO  
DE RAYLEIGH PARA OS ESTADOS DE MAR CONSIDERADOS

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução da capacidade de Içamento das Eg.....	3
2.1	Comparação do Peso de Conves Integrado e Módulo de Jaquetas.....	9
2.2	Ilustração do Içamento de um Módulo.....	10
3.1	Sistema de Coordenadas para Representação do Movimento das Embarcações.....	24
3.2	Geometria e Dimensões Principais da Barcaça.....	38
3.3	Geometria e Dimensões Principais da Semisubmersivel.....	39
3.4	Discretização da Barcaça.....	40
3.5	Discretização da Semisubmersivel.....	41
3.6	Função de Transferência do Surge da Barcaça.....	43
3.7	Função de Transferência do Sway da Barcaça.....	43
3.8	Função de Transferência do Heave da Barcaça.....	44
3.9	Função de Transferência do Roll da Barcaça.....	44
3.10	Função de Transferência do Pitch da Barcaça.....	45
3.11	Função de Transferência do Yaw da Barcaça.....	45
3.12	Função de Transferência do Surge da SS.....	46
3.13	Função de Transferência do Sway da SS.....	46
3.14	Função de Transferência do Heave da SS.....	47
3.15	Função de Transferência do Roll da SS.....	47
3.16	Função de Transferência do Pitch da SS.....	48
4.1	Representação do Movimento do Módulo.....	51
4.2a	Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Roll.....	59
4.2b	Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Roll.....	59
4.3a	Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Pitch.....	60
4.3b	Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Pitch.....	60

4.4a Barcaça Nojiri - Função de Transferência da Força .....61

Dinâmica no Cabo.....61

4.4b Barcaça Nojiri - Função de Transferência da Força

Dinâmica no Cabo.....61

4.5 BGL 1 - Função de Transferência do Pitch.....64

4.6 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....64

4.7 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança.....65

4.8 BGL 1 - Função de Transferência do Pitch.....65

4.9 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....66

4.10 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança.....66

4.11 BGL 1 - Função de Transferência do Roll.....67

4.12 BGL 1 - Função de Transferência do Pitch.....67

4.13 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....68

4.14 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança.....68

4.15 Barcaça - Função de Transferência do Roll Acoplado...80

4.16 Barcaça - Função de Transferência do Roll Acoplado...80

4.17 Barcaça - Função de Transferência do Roll Acoplado...81

4.18 Barcaça - Função de Transferência do Pitch Acoplado...81

4.19 Barcaça - Função de Transferência do Pitch Acoplado...82

4.20 Barcaça - Rotação do Módulo na Direção X ( $\phi^1$ ).....82

4.21 Barcaça - Rotação do Módulo na Direção Y ( $\phi^2$ ).....83

4.22 Barcaça - Função de Transferência do Surge Acoplado...83

4.23 Barcaça - Função de Transferência do Sway Acoplado...84

4.24 Barcaça - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....84

4.25 Barcaça - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....85

4.26 Barcaça - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....85

4.27 Barcaça - Força Dinâmica no Cabo de Içamento.....86

4.28 Barcaça - Força Dinâmica no Cabo de Içamento.....86

4.29 Barcaça - Içamento Lateral; Função de Transferência

do Roll Acoplado.....87

4.30	Barcaça - Içamento Lateral! Função de Transferência	87
4.31	Barcaça - Içamento Lateral! Movimento Vertical da	88
	Ponta de Lança.....	88
4.32	SS - Função de Transferência do Roll Acoplado.....	88
4.33	SS - Função de Transferência do Roll Acoplado.....	89
4.34	SS - Função de Transferência do Roll Acoplado.....	89
4.35	SS - Função de Transferência do Pitch Acoplado.....	90
4.36	SS - Função de Transferência do Pitch Acoplado.....	90
4.37	SS - Rotação do Módulo na Direção X ( $\phi_1$ ).....	91
4.38	SS - Rotação do Módulo na Direção Y ( $\phi_2$ ).....	91
4.39	SS - Função de Transferência do Surge Acoplado.....	92
4.40	SS - Função de Transferência do Sway Acoplado.....	92
4.41	SS - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....	93
4.42	SS - Movimento Vertical da Ponta de Lança.....	93
4.43	SS - Força Dinâmica no Cabo de Içamento.....	94
4.44	SS - Içamento Lateral! Função de Transferência	94
	do Roll Acoplado.....	94
4.45	SS - Içamento Lateral! Função de Transferência	95
	do Pitch Acoplado.....	95
4.46	SS - Içamento Lateral! Movimento Vertical da	95
	Ponta de Lança.....	95
5.1	Obtidas Irregulares Obtidas pela Superposição de	98
	Ondas.....	98
5.2	Representação do Espectro de Ondas Superpostas.....	98
5.3	Registro da Superfície do Mar.....	104
5.4	Exemplo de um Histograma de Altura de Ondas.....	107
5.5	Histograma de Altura de Ondas e Comparação com a	108
	Distribuição de Rayleigh.....	108
5.6	Representação do Espectro ISSC.....	118

5.7	Barcaça - Espectro da Resposta de Roll.....	118
5.8	Barcaça - Espectro da Resposta de Pitch.....	119
5.9	Barcaça - Espectro do Movimento Vertical da Ponta de Lança.....	119
5.10	SS - Espectro da Resposta de Roll.....	120
5.11	SS - Espectro da Resposta de Pitch.....	120
5.12	SS - Espectro do Movimento Vertical da Ponta de Lança.....	121
5.13	Barcaça - Resposta Significativa do Roll.....	121
5.14	Barcaça - Resposta Significativa do Roll.....	122
5.15	Barcaça - Resposta Significativa do Pitch.....	122
5.16	Barcaça - Resposta Significativa do Pitch.....	123
5.17	Barcaça - Resposta Significativa - Movimento Vertical Ponta de Lança.....	123
5.18	Barcaça - Resposta Significativa - Movimento Vertical Ponta de Lança.....	124
5.19	SS - Resposta Significativa do Roll.....	124
5.20	SS - Resposta Significativa do Roll.....	125
5.21	SS - Resposta Significativa do Pitch.....	125
5.22	SS - Resposta Significativa do Pitch.....	126
5.23	SS - Resposta Significativa - Movimento Vertical Ponta de Lança.....	126
5.24	SS - Resposta Significativa - Movimento Vertical Ponta de Lança.....	127
6.1	Histogramas da Dupla Amplitude do Movimento Vertical da Ponta de Lança para Operações no Mar do Norte.....	139
6.2	Representação Esquemática do Modelo Genérico para Determinação da Operacionalidade de uma Embarcação.....	145
6.3	Barcaça - Estados de Mar Limites para Operação.....	162
6.4	Barcaça - Estados de Mar Limites para Operação.....	162

6.5	SS - Estados de Mar Limites para Operação.....	163
6.6	SS - Estados de Mar Limites para Operação.....	163
6.7	Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal; Critério de Operação 2 - $\alpha = 5\%$ .....	164
6.8	Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	164
6.9	Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal; Critério de Operação 1.....	165
6.10	SS - Operacionalidade em Base Mensal; Critério de Operação 2 - $\alpha = 5\%$ .....	165
6.11	SS - Operacionalidade em Base Mensal; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	166
6.12	SS - Operacionalidade em Base Mensal; L = 75m; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	166
6.13	Barcaça - Operacionalidade para o Mar do Norte; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	167
6.14	SS - Operacionalidade para o Mar do Norte; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	167
6.15	SS - Operacionalidade para o Mar do Norte; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	167
	L = 75m; Critério de Operação 2 - $\alpha = 10\%$ .....	168



LISTA DE TABELAS

3.1	Características da Barcaça.....	37
3.2	Características da Semisubmersível.....	38
4.1	Características da Barcaça "Nojiri".....	57
4.2	Características da Barcaça BGL-1.....	63
4.3	Características da Barcaça Durante o Içamento.....	71
4.4	Características da SS Durante o Içamento.....	77
5.2	Resposta Significativa do Movimento das Embarcações para os Espectros ISSC Considerados.....	115
6.1	Porcentagem Média Anual de Ocorrência Conjunta de Altura Significativa e Período de Zero Ascendente para a Bacía de Campos.....	153
6.2	Porcentagem de Ocorrência de Altura Significativa de Ondas para a Bacía de Campos em Base Mensal.....	153
6.3	Valores Limites para Operação.....	155

LISTA DE SIMBOLOS

$A_{ij}$	coeficiente de massa adicional na direção i devido ao movimento da direção j
$B_{ij}$	coeficiente de amortecimento potencial na direção i devido ao movimento na direção j
$B_{v_{ij}}$	coeficiente de amortecimento viscoso na direção i
$C_{ij}$	coeficientes de restauração hidrostática
$F_i$	força ou momento na direção i
$F_{ia}$	amplitude da força ou momento na direção i
$g$	aceleração da gravidade
$GM^t$	altura metacêntrica transversal
$GM^l$	altura metacêntrica longitudinal
$G(\phi)$	função de espalhamento de energia de onda
$H^s$	altura significativa de ondas
$H_{1/3}$	altura significativa de ondas
$H_i$	alturas de ondas individuais
$\bar{H}$	altura média de ondas
$H^{rms}$	raiz quadrada da média do quadrado das alturas
$H(\omega)$	função de transferência
$K$	número de onda = $\omega^2/g$
$L$	comprimento do cabo de içamento
$M_{ij}$	massa ou inércia da embarcação
$M_p$	massa do módulo içado
$m_n$	momento de ordem n do espectro de energia
$R_{xx}, R_{yy}, R_{zz}$	raios de giração da embarcação em relação aos eixos x, y, z
$R_{xy}, R_{xz}, R_{yz}$	raios de giração cruzados da embarcação
$s_j$	movimento na direção j

$s_j$	amplitude do movimento na direção j
$S(\omega)$	espectro de energia de onda
$S^R(\omega)$	espectro de energia da resposta
$T_x, T_y, T_z$	componentes da força de tração no cabo de
$T^k, T^m, T^n$	momentos resultantes da força de tração no cabo
	de ligamento em relação aos eixos X, Y, Z
$T$	período de ondas
$T^m$	representação genérica dos períodos característicos de
	ondas
$T^p$	período de pico de ondas
$T^{o1}$	período médio de ondas
$T^{o2}$	período de zero ascendente de ondas
$(x^v, y^v, z^v)$	coordenadas da extremidade do guindaste em
	relação aos eixos X, Y, Z
$(x^v, y^v, z^v)$	coordenadas da extremidade do guindaste em
	relação aos eixos $X^0, Y^0, Z^0$
$(x^p, y^p, z^p)$	coordenadas do módulo ligado em relação aos
	eixos $X^0, Y^0, Z^0$
$e_j$	fase do movimento na direção j
$\sigma_i$	fase da força ou momento na direção i
$\omega$	frequência de onda
$\phi$	direção de propagação da onda
$\lambda$	comprimento de onda
$\phi, \theta, \psi$	movimentos de roll, pitch e yaw respectivamente
$\phi_1, \phi_2$	rotação do módulo ligado na direção dos eixos $X^0$ e $Y^0$
$\sigma_2, \sigma$	variância e desvio padrão da elevação de onda
$\sigma_R, \sigma$	variância e desvio padrão da resposta

## RESUMO

O avanço ocorrido na última década nas características e capacidade de içamento de Embarcações-Guinaste com o advento das embarcações tipo semisubmersível, aliada à sua crescente importância no desenvolvimento de campos petrolíferos offshore, tornava necessário uma investigação mais profunda do comportamento dinâmico destas embarcações em resposta às condições ambientais.

O presente trabalho apresenta um modelo de determinação da operacionalidade de embarcações-guinaste para realização de operações de içamento, a partir das características da resposta da embarcação às condições ambientais. O modelo se baseia na resposta de curto prazo do movimento das embarcações e na distribuição de longo prazo de ocorrência de estados de mar na região de operação, sendo feita uma comparação entre a performance de dois tipos de embarcação: barcaça e semisubmersível.

Os resultados mostraram a importância de se considerar o efeito que o módulo içado exerce no movimento das embarcações, e como variações de certos parâmetros da operação, tais como peso do módulo içado, comprimento do cabo de içamento e posição relativa do guindaste em relação à embarcação, podem influenciar o comportamento da mesma e a sua operacionalidade.

## RESUMO

O avanço ocorrido na última década nas características e capacidade de içamento de Embarcações-Guindeste com o advento das embarcações tipo semisubmersível, aliada à sua crescente importância no desenvolvimento de campos petrolíferos offshore, tornava necessário uma investigação mais profunda do comportamento dinâmico destas embarcações em resposta às condições ambientais.

O presente trabalho apresenta um modelo de determinação da operacionalidade de embarcações-guindeste para realização de operações de içamento, a partir das características da resposta da embarcação às condições ambientais. O modelo se baseia na resposta de curto prazo do movimento das embarcações e na distribuição de longo prazo de ocorrência de estados de mar na região de operação, sendo feita uma comparação entre a performance de dois tipos de embarcação: barcaça e semisubmersível.

A análise dinâmica do comportamento das embarcações é feita no domínio da frequência considerando-se os efeitos do acoplamento do movimento da embarcação com o movimento do módulo suspenso durante o içamento. A representação hidrodinâmica da embarcação foi feita através da técnica de distribuição de fontes tri-dimensional.

Os resultados mostraram a importância de se considerar o efeito que o módulo içado exerce no movimento das embarcações, e como variações de certos parâmetros da operação, tais como peso do módulo içado, comprimento do cabo de içamento e posição relativa do guindaste em relação à embarcação, podem influenciar o comportamento da mesma e a sua operacionalidade.

## ABSTRACT

A method is presented for the operability evaluation of crane vessels and related weather downtime. Barge and semisubmersible vessels are investigated in a comparative basis through a linear frequency-domain analysis. The dynamics of lift operations is analysed and emphasis is given to the coupled motions of the load and the vessels during the stationary pendulum condition of the load after lifting off the transportation barge. Hydrodynamic characteristics of the vessels are obtained through a 3-D sink-source distribution method. The environmental data is derived from a spectra ocean wave model to obtain the wave height exceedance probability which establishes the limiting sea states for performing the operation. A joint probability distribution of wave height and period is used to obtain the workability of the vessels in a monthly basis. A comparison of the performance of two different types of vessels, a barge and a semisubmersible is obtained. The results show the different behaviour of the vessels under variation of some parameters of the operation, such as the weight of the module, length of the hoisting wire and the relative position of the crane and the vessel, and the influence of those parameters in the operability.

## 1. INTRODUÇÃO

O fim dos anos 70 e a década de 80 experimentaram um extraordinário avanço no desenvolvimento e aplicação de embarcações equipadas com guindaste para instalações offshore, conhecidas como embarcações-guindaste (EG). Por instalações offshore entende-se aquelas que se realizam em locais distantes da costa, se constituindo normalmente em instalações para exploração ou produção de petróleo e gás natural.

Ao contrário de navios convencionais equipados com guindaste para manuseio de cargas em portos com capacidade raramente atingindo 200 ton, as EG são estruturas flutuantes que se aplicam especificamente à transferência de cargas pesadas no mar, sujeitas às mais diversas condições ambientais.

Inicialmente, as EG foram desenvolvidas para aplicações em águas costeiras, normalmente águas abrigadas de pequena profundidade e condições de mar calmas, constituindo-se de cascos em forma de barcas convencionais de fundo chato, com guindastes cuja capacidade raramente excedia 500 ton. Os aspectos mais relevantes no projeto de tais embarcações, além da estabilidade, eram a resistência estrutural e o sistema de lastreamento. Já as limitações operacionais eram ditadas basicamente pelo alcance e capacidade dos guindastes, de modo que características como comportamento no mar e resposta às condições ambientais não se constituíam em fatores significativos para o projeto.

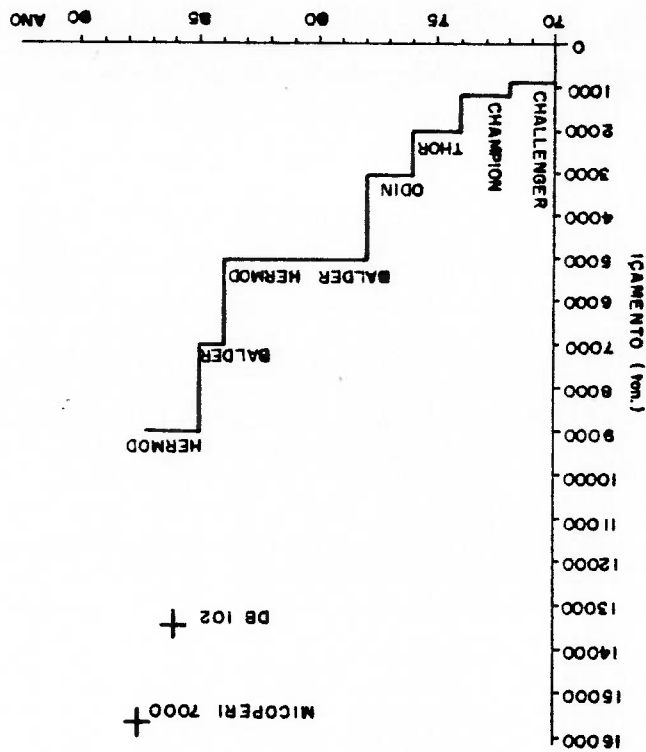
À medida que as operações offshore tendiam a águas mais profundas, novas concepções de desenvolvimento de campos petrolíferos foram surgindo impondo novas aplicações para as Eg e uma evolução nas dimensões, tipo e capacidade de içamento das mesmas para que se adequassem às condições de operação exigidas. Hoffman e Fitzgerald (1978) descrevem a evolução dos tipos e características de Eg.

Não só as condições ambientais, que se apresentavam mais severas, mas também o aumento do tamanho dos módulos a serem instalados, fez surgir na década de setenta uma segunda geração de Eg com capacidade de içamento variando de 800 até 2000 ton. Ao lado das embarcações tipo barcaça, surgiram os navios de forma convencional aplicados a este tipo de instalação, navios estes especialmente projetados para servirem como navios-guinaste, ou reequipados, ou na maioria dos casos, navios tanques convertidos para essa função. Essas embarcações foram especificamente projetadas para serem utilizadas em instalações offshore. No entanto suas operações eram extremamente limitadas pelas condições de mar, principalmente devido ao grande movimento de balanço a que embarcações de tais tipos estão sujeitas.

Uma terceira geração de Eg surge no final dos anos setenta com o aumento das operações offshore no Mar do Norte. Trata-se do advento das Eg tipo semisubmersível (SS), com alta capacidade de içamento, para serem utilizadas em condições ambientais mais severas. Embarcações SS normalmente se caracterizam por dois ou mais cascos submersos que se ligam ao convés através de colunas, e têm como principal característica um excelente comportamento no mar,



Fig.1.1 Evolução da Capacidade de Içamento das EG



principalmente no que se refere aos movimentos angulares. Tais embarcações inicialmente equipadas com apenas um guindaste de capacidade até 3000 ton, evoluíram para embarcações com dois guindastes cujas pioneiras foram as semisubmersíveis HERMOD e BALDER surgidas em 1978. Tal desenvolvimento é ilustrado em Offshore Engineer (1987, 1). Ambas embarcações, inicialmente com capacidade de içamento de 5000 ton, foram aperfeiçoadas para 7000 (BALDER) e 9000 ton (HERMOD) em 1985. Entretanto, foi com o surgimento das "gigantes" DB102 e MICOPERI 7000, em 1986 e 1987, com capacidade de 12000 e 14000 ton respectivamente, que a evolução das EG atingiu o seu ponto máximo até então. A Fig 1.1, reproduzida de Michelsen et al. (1987), ilustra a evolução da capacidade de içamento das EG.

operacionalidade de uma embarcação para determinada operação de tais condições para diversos períodos do ano. A análise de operação, expresso em termos de probabilidade de ocorrência do o conjunto de condições ambientais favoráveis para traz no seu bojo o conceito de operacionalidade, representam condições de mar favoráveis para as diversas operações. Isto surge também a necessidade de se determinar as mais complexos.

requerer o desenvolvimento de modelos teóricos para análise, experiências anteriores de instalação, e sim passaram a considerações não poderiam ser tratadas simplesmente à luz de instalada, durante as diversas fases da operação. Tais interação dinâmica entre a embarcação e a carga a ser das mesmas. Além disso, maior atenção passou a ser dada à um dos aspectos mais relevantes a ser considerado no projeto severas. O comportamento no mar das embarcações passou a ser profundas e consequentemente sujeitas a condições de mar mais da costa com tendência a ocorrerem em águas cada vez mais do-se que tais operações são realizadas em locais distantes resposta às condições ambientais, principalmente consideram profunda do comportamento dinâmico das embarcações em a serem instaladas, tornava necessário uma investigação mais ao alto custo operacional, além do alto custo das estruturas O crescimento da capacidade de içamento das EG aliado importância.

desenvolvimento de novos campos petrolíferos adquiriria maior para tais tipos de embarcações, de modo que sua utilização no nível (SSCV) foram se estabelecendo, surgiam novas aplicações À medida que as EG de alta capacidade tipo semisubmer-

Com o aumento da capacidade das EG e da complexidade de suas operações, estudos mais complexos, com modelo de análise da dinâmica de operações de EG no domínio do tempo, foram realizados por van den Boom et al. (1987) e posteriormente por Schelling et al. (1989) e Jiang et al. (1990). Clauss e Rieker (1990) apresentam um estudo das principais características de operações de EG baseado em ensaios realizados em tanque de provas. Baar (1991) apresenta os

comprovando o modelo experimentalmente através de ensaios. interação dinâmica entre a carga suspensa e a embarcação, mar de EG no domínio da frequência, que considerava a apresentaram um modelo teórico de estudo do comportamento no Foram Nojiri e Sasaki (1983) que pela primeira vez não descrevem como tal efeito foi determinado.

determinação de operacionalidade de EG, consideram o efeito do pêndulo representado pela carga suspensa no guindaste mas Hoffman e Fitzgerald (1978), em um modelo de ambientais.

das características da resposta das embarcações às condições apenas um modelo de operacionalidade a partir simplesmente poderia ter no comportamento da embarcação, estabelecendo consideravam o efeito que uma carga suspensa no guindaste (1976), Burke (1977) e Rawstron e Blight (1978), não de EG e comportamento no mar, realizados por Sekita et al. Os primeiros estudos referentes à análise de operação

consequente acréscimo nos custos projetados. cronograma de instalação de um campo petrolífero e realização da operação, a fim de se evitar atrasos no a ser realizada procura prever a melhor época e condições de

principais avanços na análise de operações de EG, ocorridos ao longo dos últimos anos.

O estudo da operacionalidade de qualquer embarcação envolve a determinação de seu comportamento em mar irregular, além de modelos que descrevam a probabilidade de ocorrência de estados de mar em termos de altura significativa de ondas e período característico, para diversas regiões e épocas do ano.

Chen e Rawstron (1983), ao descreverem um modelo de planejamento de operações offshore, apresentam uma comparação das metodologias de análise de operacionalidade em função dos dados disponíveis referentes a estados de mar.

A proposta do presente trabalho é efetuar um estudo do comportamento dinâmico de EG durante a operação. O trabalho se detém na etapa em que a carga se encontra suspensa pelo guindaste e considera os efeitos acoplados do movimento da embarcação com o movimento da carga suspensa, este se caracterizando como um movimento pendular. Os objetivos principais são:

a. efetuar um estudo paramétrico do comportamento do sistema em função do peso do módulo içado, comprimento do cabo e posição relativa do guindaste!

b. elaborar um modelo de operacionalidade de EG, a partir da identificação de condições críticas de operação, estabelecendo a probabilidade de ocorrência de estados de mar em que a operação possa ser realizada!

c. comparar a performance de dois tipos de EG: barcaça convencional e semisubmersível.

Para que seja desenvolvido um modelo de operacionali-

dade, o comportamento do sistema é analisado no domínio da frequência de modo que se admite linearidade dos fenômenos envolvidos na operação.

O Capítulo 2 irá apresentar uma descrição das principais características de uma Eg e de suas principais aplicações, além de uma descrição das principais etapas envolvidas em uma operação completa de içamento.

No Capítulo 3 será feita uma análise do comportamento no mar de plataformas semisubmersíveis e barcaças para que posteriormente tal análise seja estendida para o caso específico de Eg com efeito acoplado da carga suspensa no guindaste, a ser efetuada no Capítulo 4.

No Capítulo 5 será apresentado um estudo do comportamento de Eg em mar irregular e em seguida, no Capítulo 6, será apresentada uma análise de condições de operação de Eg e distribuição de longo termo de estados de mar com a apresentação do modelo de operacionalidade desenvolvido e cálculo da operacionalidade das embarcações em base mensal. Deve-se ressaltar que em nenhum momento deixou-se de lado a abordagem comparativa entre os dois tipos de embarcação estudados.

O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE E DE SUAS OPERAÇÕES.

Conforme apresentado na Introdução deste trabalho, as duas últimas décadas presenciaram uma evolução muito grande das EG, sendo natural que tal evolução traga inovações e vão se incorporando aos novos projetos de embarcações e refletidas em suas características básicas e aplicações.

Este capítulo apresenta as principais aplicações das EG e suas características peculiares que as diferenciam de embarcações convencionais. São discutidos também os principais aspectos das operações de EG juntamente com considerações sobre as diferentes abordagens de análise de tais operações.

### 2.1 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE

Com a evolução da capacidade de içamento de EG e com um aperfeiçoamento em suas características de comportamento no mar, novas soluções para instalações offshore, que pudessem fazer uso da plena capacidade das EG, foram surgindo. Instalação de jaquetas e seus módulos, instalação de equipamentos submersos como "templates", e até mesmo remoção de plataformas fixas de locais de operação não mais produtivos, passaram a ser efetuadas através de EG. Michelsen et al. (1987) e Micoperti (1989) apresentam uma descrição das diversas funções a que as EG se aplicam.

A primeira delas se refere à instalação dos conveses

integrados de jaquetas', como substituição aos módulos. Os conveses integrados surgem da necessidade de uma minimização do número de operações requeridas para a instalação de jaquetas, função dos altos custos que a alocação dos serviços de EG representava para as companhias de petróleo. Enquanto os módulos eram fabricados separadamente e acoplados na jaqueta durante a instalação, os conveses integrados são construídos como uma única estrutura a ser instalada em apenas uma operação de içamento. A redução de peso, através da minimização de utilização de aço estrutural, passa a ser um fator relevante no projeto de estruturas offshore devido ao limite de capacidade de içamento das EG, representando uma consequente redução nos custos de construção e instalação, como descrito em Offshore engineer (1987, 3). A Fig.2.1 reproduzida desta referência, mostra como se pode conseguir uma redução no peso de elementos estruturais de conveses integrados em comparação com os módulos de jaquetas.

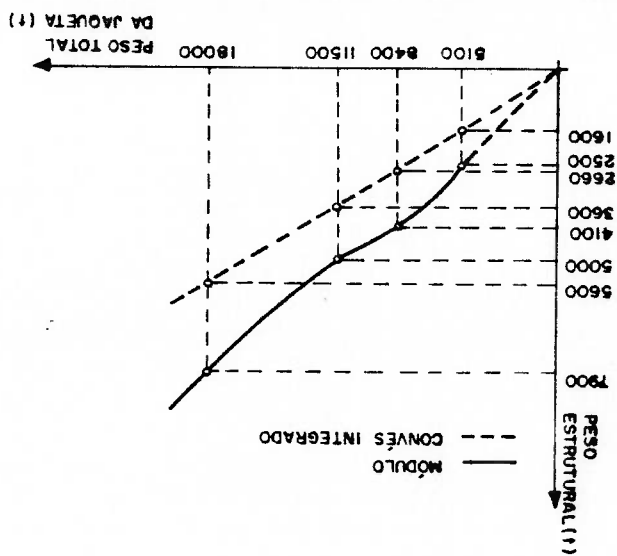


Fig.2.1 Comparação do peso de conves integrado e módulo de

jaquetas em função do peso total da jaqueta.

<sup>1</sup> em ingles "integrated deck" ou "topside"

A Fig.2.2, obtida da mesma referência, ilustra a instalação de um convés integrado em uma jaqueta. Offshore engineer (1987, 3) apresenta alguns aspectos envolvidos no projeto de convés integrado para instalação via içamento.

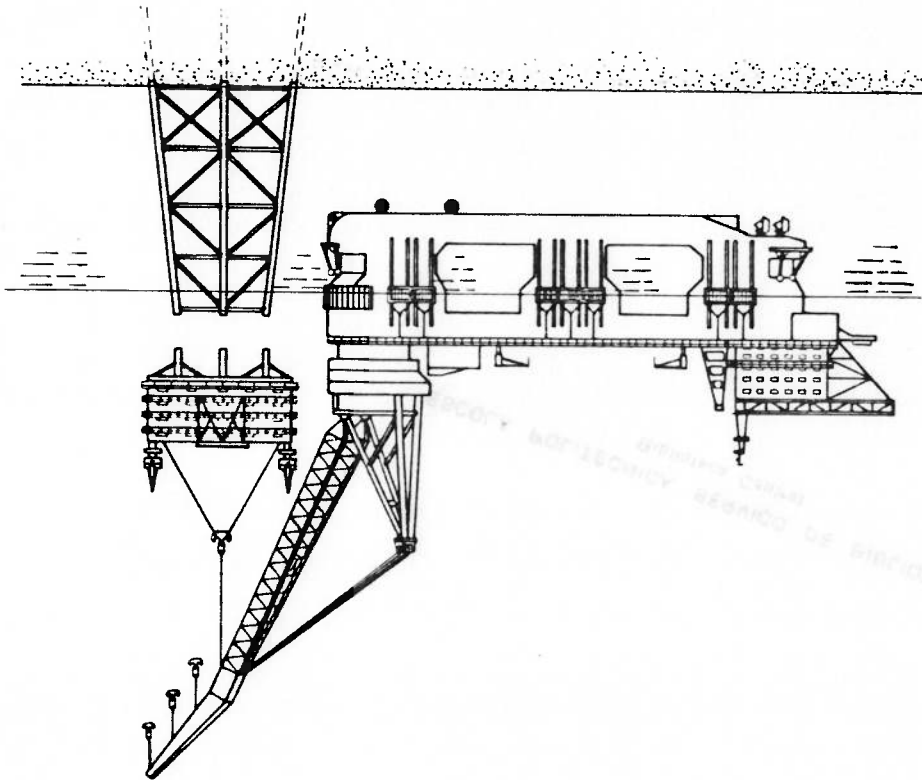


Fig.2.2 Ilustração do içamento de um Módulo

A redução do peso encontrada nos convés integrados implicou em melhor dimensionamento da estrutura de jaquetas, traduzindo-se em redução de seus reforços estruturais e consequentemente, menor utilização de aço e menor peso. Surge uma segunda função para as EG: a instalação da estrutura de jaquetas em substituição ao procedimento de lançamento. Isto veio gerar as jaquetas leves<sup>2</sup> criando uma nova concepção no projeto, construção e instalação de tais estruturas.

<sup>2</sup> em inglês: lightweight-jacket



Outras aplicações a que se prestam as EG, mencionadas anteriormente, se referem à instalação de equipamentos submersíveis como "templates", e à remoção de plataformas fixas, de campos petrolíferos não mais produtivos.

Fig. 2.3 Evolução de custos de jaquetas no Mar do Norte em função do tipo de instalação, ao longo dos anos. Os custos são comparativos tendo como referência jaquetas instaladas via lançamento convencional no início da década de 80.

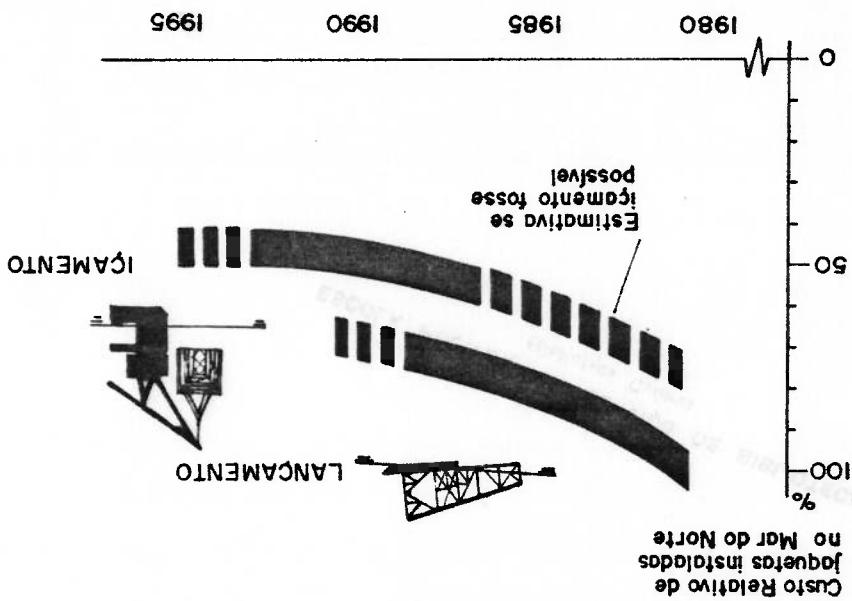


Fig. 2.3 Evolução de custos de jaquetas no Mar do Norte em função do tipo de instalação, ao longo dos anos. Os custos são comparativos tendo como referência jaquetas instaladas via lançamento convencional no início da década de 80.

## 2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE

A primeira característica de Eg a ser considerada, pelo tipo de operação que essas embarcações realizam, diz respeito à capacidade de içamento, número e posicionamento dos guindastes na embarcação.

Conforme a capacidade de içamento instalada em Eg, estas podem ser equipadas com um ou dois guindastes. No caso de haver um único guindaste, o mesmo pode ser posicionado próximo à seção mestra ou nas extremidades da embarcação. No caso de haverem dois guindastes, a configuração encontrada é o posicionamento nas laterais da embarcação, tanto na popa como na proa, como é o caso da SS MICOPERI 7000. Conforme Micoperi (1989), a vantagem dessa configuração é o maior alcance dos guindastes para o içamento de cargas posicionadas tanto na lateral da embarcação como na sua extremidade.

Segundo Michelsen (1987), o fato de se ter dois guindastes operando simultaneamente parece ser um atrativo quando se considera módulos de tamanho excessivo em uma determinada direção posicionados longitudinalmente ao longo de uma barcaça de transporte, e que apresentam grandes dificuldades para serem içados por apenas um guindaste. O arranjo de dois guindastes em uma embarcação é conseguido apenas em SS, pois somente estas apresentam a largura necessária para se garantir espaço de trabalho para ambos os guindastes, difícil de se conseguir em barcasas ou navios convencionais.

Outro aspecto importante a ser considerado referente às Eg é o espaço no convés para transporte dos módulos. Os

benefícios em se ter grande espaço disponível no convés são diversos. No caso de embarcações SS, dado o seu excelente comportamento no mar, em situações adversas para outras embarcações, seria possível que içamentos a partir de convés de barcas de transporte fossem feitos em locais abrigados e transportados no convés da SS até o local da instalação para que a operação pudesse ser continuada. Em instalações modulares um grande espaço de convés permite o transporte de maior quantidade de módulos, com consequente redução do número de viagens necessárias para se completar a instalação. No caso de módulos de menor dimensão os mesmos podem ser acoplados na costa e transportados pela própria Eg para serem instalados em uma única operação.

Uma das particularidades de Eg quando comparadas com outros tipos de embarcação é o sistema de lastro, responsável pela manutenção do equilíbrio e da estabilidade da embarcação nas diversas situações de içamento. Função de seu peso e da posição relativa do guindaste, o momento gerado pela carga içada deve causar grandes ângulos de inclinação da embarcação, a menos que esta seja devidamente lastreada para compensar tal efeito. De maneira análoga, quando a carga é colocada em sua posição final, o alívio de peso pode gerar um ângulo de inclinação excessivo na direção oposta, para além dos limites de segurança estabelecidos. Para evitar tais efeitos, é necessário uma rápida transferência de lastro que compense a variação de momento gerado pela carga içada, de modo que as Eg dispõem de um sistema de lastro dinâmico com capacidade para responder prontamente às necessidades de correção do ângulo de inclinação. Segundo Michelsen (1987),

tal sistema é capaz de contrabalançar em tempo real os momentos de trim e de banda causados pelo içamento de grandes módulos, assegurando que a embarcação praticamente permaneça em equilíbrio durante todo o ciclo de uma operação.

Outra função importante do sistema de lastro das modernas EG é o auxílio ao içamento dos módulos e à colocação dos mesmos em sua posição final. Considerando-se uma embarcação de transporte do módulo, normalmente uma barcaça de onde o mesmo é içado, para que seja assegurado que não surjam forças de impacto entre o módulo e o convés da barcaça de transporte durante o içamento, deve-se garantir uma mínima velocidade de separação entre ambos os corpos. Isto pode ser conseguido pela alta capacidade de transferência de lastro encontrada nas EG. Ao mesmo tempo em que se retira o módulo de sua posição durante o içamento, o calado da EG pode até diminuir, ao contrário do que se deveria esperar, resultado de uma descarga de lastro com peso maior que o peso da carga içada. Em grande parte das operações, conforme Michelsen et al. (1987), o módulo é retirado da barcaça de transporte apenas através do sistema de lastro, sem rotação da lança do guindaste, reduzindo-se de tal forma o tempo necessário para tal retirada, para apenas 40 a 60 segundos em se tratando de embarcações SS. Para ilustrar alguns dados, pode-se realizar um deslocamento vertical da EG de até 4,5 metros em apenas 90 segundos, segundo Clauss (1990), apenas com auxílio de lastreamento. Michelsen et al. (1987) mencionam que a taxa de descarga de lastro das semisubmersíveis BALDER e HERMOD ultrapassa 200 ton/seg. Já no caso da MICOPERI 7000, segundo Micoperi (1989), a capacidade total de bombeamento de lastro

é de 24000 ton/hora. A embarcação é dotada de 54 tanques de lastro totalizando uma capacidade de 109.000m<sup>3</sup>. Uma descrição mais completa das principais características de uma Eg é apresentada por Micoperi (1989) descrevendo em particular as características da semisubmersível MICOPERI 7000. Michelsen e Copens (1988) discutem algumas características de Eg ao apresentar aspectos sobre o aumento da capacidade da semisubmersível "HERMOD". Michelsen et al. (1987), ao discutirem métodos de instalação de plataformas, dispõem considerável atenção para operação de Eg, discutindo suas principais características e tendências futuras.

### 2.3 PRINCIPAIS ASPECTOS DE OPERAÇÕES DE IÇAMENTO

Uma operação de içamento através de Eg se caracteriza por diversas etapas distintas, cada qual com suas particularidades no tocante a aspectos dinâmicos. Baar (1991) e Tong e Duncan (1991), consideram como típicos de uma operação de içamento os seguintes estágios:

a. Condição Inicial: Considerando o transporte do módulo através de uma barcaça da qual o mesmo será içado, a fase inicial envolve o posicionamento relativo da Eg e da barcaça e a conexão dos cabos ao módulo, nas devidas posições para içamento.

b. Pré-tensionamento: Após serem conectados os cabos, os guindastes são erguidos até que seja atingido um nível desejado de pré-tensionamento dos cabos, normalmente em torno de 70 % do peso final do módulo. Em tal situação os cabos

ficam sujeitos a uma tensão oscilatória, consequência da defasagem dos movimentos da barça e da EG.

c. Condição de Pré-tensão: O sistema é mantido em situação estacionária após ser atingido o estado de pré-tensionamento. Nesta situação efetua-se um pequeno lastreamento da embarcação para se poder iniciar o içamento do módulo. Como parte do peso do módulo é suportado pelo convés da barça e parte pelo guindaste, a barça, o módulo e a EG formam um sistema de corpos acoplados através do guindaste.

d. Içamento: Nesta fase o módulo é totalmente retirado da barça através da ação simultânea dos guindastes e do sistema de lastro dinâmico.

e. Condição de Pêndulo: Uma vez retirado da barça, o módulo está suspenso pelo guindaste, totalmente livre para se movimentar caracterizando uma situação semelhante a um pêndulo. Nesta situação o módulo é levado para a posição final sobre o local onde será instalado.

f. Abaixamento e Acoplamento: Nesta etapa o módulo é abaixado para sua posição final. Se a estrutura ligada for uma jaqueta, esta é abaixada horizontalmente até estar parcialmente submersa e posteriormente verticalizada para ser abaixada para sua posição final. Se o corpo for um módulo de jaqueta ele é posicionado sobre o convés da mesma.

Para se garantir a viabilidade da operação a níveis adequados de segurança, alguns aspectos referentes à mesma requerem especial atenção.

Durante o estágio inicial, quando se acoplam os cabos e o módulo, os movimentos relativos entre a barça de transporte e a embarcação devem ser de tal amplitude que não

Por fim, durante a condição de pêndulo, o nível de tensão máxima a que o cabo estará sujeito deve ser assegurado a estar abaixo das tensões máximas que o mesmo pode suportar. Além disso, atenção especial deve ser dada para que uma distância mínima seja mantida entre o módulo suspenso e a lança do guindaste evitando-se assim impacto entre ambos. Jaqueta.

Se que toda a energia cinética do movimento é absorvida pela componentes horizontal e vertical respectivamente, admitindo-são da ordem de 5 a 10 % do peso do módulo para as situações (1991) sustenta que as cargas dinâmicas aceitáveis em tal quando da colocação do módulo na sua posição final. Baar ocorrer por exemplo entre o módulo e o convés de uma jaqueta, situação de impacto semelhante à descrita acima pode altos ocorreram.

análise teórica do problema para evitar que valores muito tensão esperados devem ser estabelecidos através de uma traduzir em sérios danos para as estruturas. Os níveis de impacto entre este e o convés da barcaça, o que pode se inclusive um levantamento prematuro do módulo, causando das embarcações forem elevadas. Em tal caso pode ocorrer embarcações e pode ser crítica se as acelerações verticais mesmos. Tal situação se deve à defasagem dos movimentos dos um contínuo afrouxamento e posterior tensionamento dos tensões no cabo podem chegar a níveis indesejáveis se ocorrer pré-tensionamento do cabo na iminência do içamento, as Além disso, durante tal fase e até se atingir o são impostas principalmente ao movimento de roll da barcaça. Restrições nessa etapa comprometam a integridade do módulo.

Isso é particularmente crítico quando se trata do ligamento de jaquetas devido a suas dimensões excessivas.

Dessas considerações, que visavam apresentar um panorama geral do processo de instalação offshore via Eg, vê-se claramente a necessidade de se proceder a uma análise prévia bastante detalhada de toda a operação, por meio de julgamentos que considerem experiências anteriores com operações semelhantes, e principalmente por meio de métodos teóricos que possam simular as diversas fases da operação, prevendo o comportamento de todo o sistema em função das prováveis condições ambientais a serem encontradas. Por meio de tais análises, deve-se determinar valores esperados para os movimentos das embarcações, movimento do módulo, tensões nos cabos de ligamento e nas estruturas e para todos os demais fatores discutidos anteriormente que possam comprometer a segurança da operação ou a integridade dos equipamentos.

Para estudo do comportamento dinâmico de um sistema flutuante sujeito a ações de ondas, basicamente duas abordagens podem ser consideradas.

A primeira se refere a um tratamento no domínio da frequência, admitindo-se que os fenômenos considerados são todos lineares. Neste caso poderão ser obtidas as funções de transferência do sistema sujeito a ações de ondas regulares de amplitude e frequência conhecidas. Fazendo-se uso da análise espectral, pode-se determinar o comportamento do sistema sujeito a excitação aleatória. A análise do comportamento do sistema no domínio da frequência parte da hipótese que os movimentos e as forças envolvidas são de pequena magnitude de modo que se possa admitir linearidade



dos fenômenos tratados.

A segunda abordagem é necessária quando as respostas do sistema, sejam elas movimentos, forças ou tensões resultantes, forem consideradas de magnitude tal que não possam ser admitidas como lineares. Deve-se proceder em tal caso, a uma análise do fenômeno no domínio do tempo através de técnicas de simulação do comportamento do sistema quando sujeito a excitação aleatória.

No caso de análise de operações com Eg, os métodos de análise podem variar com os diversos estágios da operação. Tong e Duncan (1991) fazem algumas considerações sobre os métodos adequados para cada fase da operação, discutidos a seguir.

Inicialmente a carga de transporte e o módulo quando posicionado no convés daquela, devem ser considerados como um único corpo e o comportamento do sistema engloba dois corpos acoplados sendo o primeiro o conjunto carga-módulo e o segundo a Eg. O comportamento do sistema pode ser descrito por um modelo linear e analisado simplesmente no domínio da frequência.

Uma vez que os cabos de ligação são conectados ao módulo, as tensões geradas pelos possíveis afrouxamento e arrebatamento dos mesmos são de tal ordem que tal fenômeno não mais pode ser considerado como linear requerendo então uma simulação no domínio do tempo para sua análise. Já na fase de pré-tensionamento o afrouxamento do cabo deixa de ocorrer e o sistema pode ser tratado como linear. A validade de se assumir linearidade pode ser verificada pelo cálculo das tensões dinâmicas e comparação com o valor da tensão

No caso da análise do comportamento de estruturas flutuantes, a simulação no domínio do tempo, assim como a análise no domínio da frequência, dependem de uma correta modelagem hidrodinâmica da embarcação, normalmente obtida da análise dos problemas de difração e radiação de ondas. Neste caso, a análise no domínio da frequência tem a vantagem de incluir a dependência das matrizes de massa e amortecimento potencial em relação à frequência e modelos de análise

determinado nível de severidade das condições ambientais. Fenômenos envolvidos e por conseguinte só é válida até como mencionado, tal análise deve admitir linearidade dos e E<sub>g</sub> para obtenção das funções de transferência da resposta. considerando-se os efeitos devido ao acoplamento entre módulo pêndulo, pode-se fazer uma análise no domínio da frequência Por fim, com o módulo suspenso na chamada condição de guindastes e de seus cabos.

três corpos (barcaça, módulo e E<sub>g</sub>) acoplados através dos sistema em tal caso deve ser considerado como constituído por modelo linear não mais pode ser considerado como válido. O Forças de impacto podem ocorrer entre ambos os corpos e o do módulo e a distância entre módulo e convés é igual a zero. iminência do ígamento a força estática no cabo iguala o peso da colocação do módulo em sua posição final, quando na caso da fase de retirada do módulo do convés ("lift-off") ou no domínio do tempo se faz necessária. Este é exatamente o prematura do módulo e convés da barcaça, então uma simulação tensão estática de tal modo que seja esperada uma separação dinâmica devido aos movimentos da barcaça e E<sub>g</sub> ultrapassar a estática suportada pelo guindaste. Se o valor da tensão

espectral podem ser utilizados para se estudar o comportamento do sistema em diversas condições de maneira bastante eficiente. Por outro lado simulações no domínio do tempo envolvem custos computacionais bem maiores, além de requererem numerosas quantidades de processamento sujeitas a diversas condições iniciais para uma análise estatística confiável do fenômeno. Deve-se considerar também que o comportamento do sistema visto através do domínio da frequência propicia uma compreensão dos fenômenos físicos não alcançada pela simulação no tempo.

Um dos objetivos do presente trabalho, já mencionado na Introdução, é apresentar um modelo de análise de operacionalidade de Eg que considere diferentes períodos do ano, diferentes locais de operação e também diferentes condições de operação, como será discutido no capítulo correspondente. A análise de operacionalidade de uma embarcação offshore é geralmente baseada em técnicas de análise espectral no domínio da frequência. Desse modo, quando se procura determinar a operacionalidade de qualquer embarcação offshore deve-se ter em mente que apenas os estágios que envolvem fenômenos lineares, quase-estacionários podem ser analisados sob tal enfoque. Os demais estágios que envolvam fenômenos não lineares requerem técnicas mais sofisticadas para serem tratados como fenômenos probabilísticos, como técnicas de simulação de Monte-Carlo por exemplo.

Sob tal aspecto o presente trabalho se detém na análise da interação entre módulo e Eg durante a condição de pendulo quando o módulo está suspenso pelos cabos dos

guindastes. Além de procurar uma compreensão dos fenômenos envolvidos em tal situação, a análise de operacionalidade poderá ser estendida para qualquer um dos demais estágios que possam ser tratados no domínio da frequência.

### 3. REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO DAS EMBARCAÇÕES EM ONDAS REGULARES - OBTENÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

#### 3.1 EQUAÇÃO DO MOVIMENTO

O problema da determinação dos movimentos de uma embarcação no mar se constitui na formulação do equilíbrio de forças e momentos de um corpo rígido, com seis graus de liberdade de movimento representando suas translações e rotações em relação a um sistema cartesiano.

A fim de se descrever o movimento da embarcação é necessário que se defina os eixos de referência que formam o sistema de coordenadas.

De uma maneira geral dois são os sistemas de coordenadas adotados para descrição dos movimentos de um navio. Um sistema de coordenadas  $O^0X^0Y^0Z^0$  fixo em relação à terra com eixos  $X^0$  e  $Y^0$  na superfície média da água e eixo  $Z^0$  positivo para cima. Um sistema  $OXYZ$  fixo na embarcação com centro na seção mestra, eixos  $X$  e  $Y$  na superfície média da água e eixo  $Z$  apontando para cima. Ambos os sistemas estão representados na Fig. 3.1 .

A translação da embarcação é dada pelos deslocamentos  $s_1, s_2, s_3$  do ponto  $O$ , origem do sistema de coordenadas, em relação aos eixos  $X^0, Y^0, Z^0$ . Estes movimentos são chamados respectivamente de movimentos de surge, sway e heave. A rotação da embarcação é expressa pelos movimentos angulares  $s_4, s_5, s_6$  em torno dos eixos  $X^0, Y^0, Z^0$  e tais movimentos são chamados respectivamente de roll, pitch e yaw.

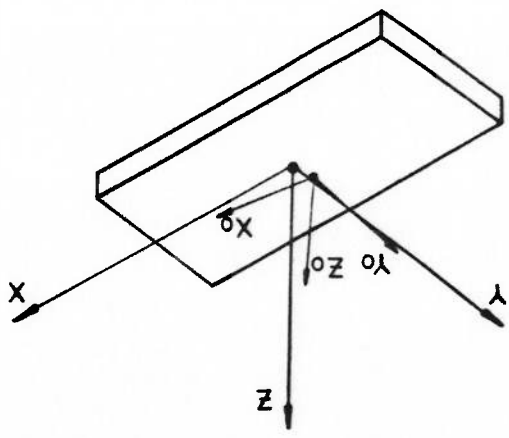
onde  $M$  é a massa da embarcação e  $I_G$  a matriz de momentos de inércia em torno dos eixos passando por  $G$  e paralelo aos eixos  $X', Y', Z'$ .  $F_i$  representa as forças externas nas direções  $Ox_0, Oy_0$  e  $Oz_0$  para  $i=1,2,3$  e os respectivos momentos em torno de  $O$  para  $i=4,5,6$ . Tais forças devem representar

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} 0 \\ -Z^g \\ -Y^g \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} 0 & -Y^g & X^g \\ X^g & 0 & -Z^g \\ -Y^g & X^g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^g \\ Y^g \\ Z^g \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} S_{11}^g & S_{12}^g & S_{13}^g \\ S_{21}^g & S_{22}^g & S_{23}^g \\ S_{31}^g & S_{32}^g & S_{33}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^g \\ Y^g \\ Z^g \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} -X^g Z^g + Y^g Z^g \\ -X^g Y^g + X^g Z^g \\ -X^g Y^g + X^g Z^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{41}^g & S_{42}^g & S_{43}^g \\ S_{51}^g & S_{52}^g & S_{53}^g \\ S_{61}^g & S_{62}^g & S_{63}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} 0 \\ -Z^g \\ -Y^g \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} 0 & -Y^g & X^g \\ X^g & 0 & -Z^g \\ -Y^g & X^g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^g \\ Y^g \\ Z^g \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} S_{11}^g & S_{12}^g & S_{13}^g \\ S_{21}^g & S_{22}^g & S_{23}^g \\ S_{31}^g & S_{32}^g & S_{33}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^g \\ Y^g \\ Z^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{41}^g & S_{42}^g & S_{43}^g \\ S_{51}^g & S_{52}^g & S_{53}^g \\ S_{61}^g & S_{62}^g & S_{63}^g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(3.1)

sendo  $G$  o centro de gravidade da embarcação e  $x^g, y^g$  e  $z^g$  suas coordenadas no sistema  $OXYZ$ , aplicando-se a Lei de Newton para o equilíbrio da mesma, a dinâmica do movimento pode ser expressa pelas equações matriciais:

Fig. 3.1 Sistema de Coordenadas para Descrição do Movimento



efeitos gravitacionais, hidrostáticos, incidência de ondas, reação hidrodinâmica, efeitos viscosos, além de sistema de amarração, ventos e correntezas.

Os efeitos gravitacionais são equilibrados pelas forças hidrostáticas de modo que ambos não são considerados no equilíbrio dinâmico da embarcação. Por sua vez, na presente análise consideraremos a embarcação flutuando livremente de modo que efeitos de amarração, normalmente expressos na forma de forças de restauração agentes no plano Oxy, não serão considerados. Quanto aos efeitos de vento e correnteza, por não se constituírem em efeitos oscilatórios também não serão considerados na equação do movimento.

Fixando-se nos efeitos causados na embarcação pela ação de ondas, as forças consideradas que irão induzir movimentos na embarcação, são apenas de natureza hidrodinâmica. Tais forças podem ser tratadas distintamente como forças de excitação de onda, reação hidrodinâmica e restauração hidrostática. Se a onda incidente é harmônica, assim o serão as forças associadas à ação de ondas, como também o movimento resultante da embarcação. Admitindo-se que as ondas incidentes são de pequenas amplitudes, assim como os movimentos da embarcação, pode-se admitir linearidade da resposta significando que as forças devido à onda incidente são proporcionais à amplitude da onda, e as forças de reação hidrodinâmica e hidrostática são proporcionais às amplitudes dos movimentos.

As forças de reação hidrostática e os momentos resultantes são associadas ao efeito da variação da pressão hidrostática agente na embarcação e da mudança de posição do

centro de flutuação, quando a embarcação é retirada de sua posição de equilíbrio. Elas são função da geometria do casco e são representadas pelos coeficientes de restauração hidrostática  $C_{ij}$ , sendo expressas por:

$$F_i = - \sum_{j=1}^6 C_{ij} s_j$$

para  $i = 1, \dots, 6$ .

As forças de reação hidrodinâmica são associadas às ondas irradiadas na superfície do mar devido ao movimento oscilatório da embarcação em águas calmas. Elas são consideradas como tendo uma componente em fase com a velocidade da embarcação, e outra em fase com a aceleração da embarcação, e são representadas pelos coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial, podendo ser expressas como:

$$F_i = - \sum_{j=1}^6 (A_{ij} \ddot{s}_j + B_{ij} \dot{s}_j)$$

$i = 1, \dots, 6$ , onde  $A_{ij}$  e  $B_{ij}$  são os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial representando efeitos na direção genérica  $i$  devido ao movimento da embarcação na direção  $j$ .  $A_{ij}$  e  $B_{ij}$  são funções da forma da embarcação e da frequência do movimento oscilatório.

As forças de onda agentes na embarcação são consideradas harmônicas e apresentam uma diferença de fase em relação à elevação da onda. Elas são descritas pela expressão

$$F_i(t) = F_{ia} \cos(\omega t + \sigma_i)$$

ou em notação complexa,

$$F_i(t) = \text{Re} \{ F_{ia} e^{-i(\omega t + \sigma_i)} \}$$

onde  $F_{ia}$  representa a amplitude da força na direção genérica  $i$  e  $\sigma_i$  representa a diferença de fase em relação à onda.

Com as expressões das forças hidrostáticas e



hidrodinâmicas agentes na embarcação, as equações do movimento representadas pela expressão (3.1) podem ser reescritas de forma mais genérica como:

$$F_{1a} \cos(\omega t + \sigma_1) \quad i=1, \dots, 6 \quad (3.2)$$

$$= \sum_{j=1}^6 (M_{1j} + A_{1j}) \ddot{s}_j(t) + B_{1j} \dot{s}_j(t) + C_{1j} s_j(t) =$$

onde  $M_{1j}$  representa a massa da embarcação para  $i$  e  $j$  iguais a 1, 2, 3 e os momentos e produtos de inércia para  $i$  e  $j$  iguais a 4, 5, 6.

sendo  $s_j$  os movimentos harmônicos da embarcação na direção  $j$  eles podem ser indicados por:

$$s_j(t) = s_{ja} \cos(\omega t + \epsilon_j)$$

Analogamente à força, em notação complexa tem-se

$$s_j(t) = \text{Re} \{ s_{ja} e^{-i(\omega t + \epsilon_j)} \}$$

As velocidades e acelerações  $\dot{s}_j$  e  $\ddot{s}_j$  são dadas pela primeira e segunda derivadas de  $s_j$  e podem ser expressas por:

$$\dot{s}_j(t) = -\omega s_{ja} \text{sen}(\omega t + \epsilon_j) =$$

$$\text{Re} \{ -i\omega s_{ja} e^{-i(\omega t + \epsilon_j)} \}$$

$$\ddot{s}_j(t) = -\omega^2 s_{ja} \cos(\omega t + \epsilon_j) =$$

$$\text{Re} \{ -\omega^2 s_{ja} e^{-i(\omega t + \epsilon_j)} \}$$

A equação do movimento reescrita com as expressões acima fica expressa como:

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (M_{1j} + A_{1j}) - i\omega B_{1j} + C_{1j}] s_j(t) = F_1(t) \quad (3.3)$$

Uma vez determinadas as forças de reação hidrodinâmica agentes na embarcação a partir dos termos  $A_{1j}$ ,  $B_{1j}$  e  $C_{1j}$ , além das forças de onda  $F_1(t)$ , o sistema de equações (3.3) pode ser resolvido para a obtenção dos movimentos da embarcação nos seis graus de liberdade dados pelos termos  $s_j(t)$ , além de

hidrodinâmicos  
tratamentos teóricos para determinação dos efeitos  
efeitos viscosos no escoamento, e que irão diferenciar os  
relacionada às dimensões do corpo, além da importância dos  
A magnitude de tal perturbação, diretamente  
corpo, como irradiadas pelo seu movimento.  
incidente, gerando ondas tanto difratadas pela presença do  
perturbação no escoamento do fluido, representado pela onda  
fixo na superfície, além do seu movimento, causam uma  
ação de ondas, a sua simples presença, se o mesmo estiver  
Considerando-se um corpo qualquer flutuando e sujeito  
(1987).

encontrado em Sarpkaya (1981), Hoot (1982) e Chakrabarti  
hidrodinâmicas. Um tratamento mais completo pode ser  
escoamento ao redor de um corpo para determinação das forças  
se-á dar uma visão simplificada sobre as condições do  
hidrodinâmicos de uma embarcação. No presente item procurar-  
para obtenção das forças de excitação de onda e coeficientes  
estrutura oceânica, tem-se diferentes tratamentos teóricos  
Conforme o regime de escoamento ao redor de uma

### 3.2 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO MOVIMENTO DE EMBARCAÇÕES

uma embarcação.  
obtenção das forças de onda e coeficientes hidrodinâmicos de  
O item seguinte tratará dos métodos existentes para  
embarcação.  
suas derivadas representando as velocidades e acelerações da

Se a estrutura for considerada como de pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda, isto equivale a dimensões.

o regime de escoamento e forças agentes em corpos de pequenas viscosos. Sarpkay (1981) apresenta um estudo extensivo sobre amortecimento, no caso amortecimento devido a efeitos basicamente aos coeficientes de massa adicional e coeficientes correspondem na equação do movimento arrasto, que são determinados experimentalmente. Esses tratadas a partir de coeficientes de massa e coeficientes de outra viscosa. Ambas as componentes, inércia e viscosa, são uma estrutura como compostas por uma parcela de inércia e A equação de Morison considera as forças agentes em

Krillov e Difrração é apresentada por Chakrabarti (1987). detalhada sobre a Equação de Morison e as teorias de Froude-cálculo das forças agentes na estrutura. Uma descrição da hipótese de Froude-Krillov ou da Teoria de Difrração para o dos a aceleração do corpo ou a aceleração da onda, faz-se uso efeitos viscosos, efeitos de inércia sendo aqueles relaciona-Quando há predomínio de efeitos de inércia sobre Morison.

são calculadas basicamente através da conhecida Equação de viscosos devem ser considerados. Nesse caso as forças de onda e D uma dimensão característica do corpo, os efeitos pode-se dizer que, quando  $\lambda/D < 5$ , sendo  $\lambda$  o comprimento de causada no meio fluido pelo corpo. De maneira simplificada em tal caso esses efeitos são comparáveis à perturbação pequenas em relação ao comprimento de onda, significando que vos apenas para os corpos cujas dimensões são consideradas

$$F^s = k \rho V \dot{u}$$

$$F^k = \rho V \ddot{u}$$

$$C^m = 1+k \text{ e}$$

entre a massa adicional e o deslocamento do corpo tem-se que potencial da onda incidente. Definindo-se  $k$  como a relação partícula fluida na região do corpo, obtida a partir do devido à perturbação do escoamento.  $\dot{u}$  é a aceleração da onde  $F^k$  representa a força de Froude-Krilov e  $F^s$  a força

$$F = F^k + F^s = C^m \rho V \ddot{u}$$

como

Para um corpo de volume  $V$  a força de inércia pode ser escrita

$$C^m = 1 + \text{massa adicional/deslocamento.}$$

coeficiente é função da forma do corpo e é definido como inércia para que se leve em conta a perturbação da onda. Esse Considera-se um coeficiente  $C^m$  conhecido como coeficiente de termos de um coeficiente de massa adicional do corpo. força devido ao potencial da onda perturbada é definida em perturbação causada pelo corpo for considerada pequena, a da a partir da teoria linear de ondas. Na prática, quando a do corpo pela aceleração da partícula fluida, esta determina um corpo de pequenas dimensões é dada pelo produto da massa força de Froude-Krilov, como apresentada por Hooft (1970), em rando o potencial da onda difratada pela presença do corpo. A à força que o fluido exerceria sobre o corpo não se conside- força é conhecida como força de Froude-Krilov e diz respeito do potencial de velocidades apenas da onda incidente. Tal a força de onda pode ser calculada considerando-se os efeitos próxima ao corpo, causada pela presença do mesmo, é pequena e dizer que a perturbação no campo de pressões na região

Quando o tamanho da estrutura for comparável ao comprimento de onda, de modo que a estrutura altere consideravelmente o campo de velocidades da onda incidente, a difração das ondas na região próxima ao corpo deve ser considerada na determinação das forças agentes. A teoria envolvida no cálculo de tais forças é conhecida como Teoria de Difração. O princípio básico da Teoria de Difração para a solução do problema de escoamento ao redor de um corpo é assumir o escoamento como irrotacional, incompressível e oscilatório de modo que o campo de velocidades pode ser descrito por uma função potencial  $\phi$ . A partir da teoria potencial, o potencial de velocidades  $\phi$  é obtido pela soma de um potencial de onda incidente e um potencial de onda difratada. Chakrabarti (1987) apresenta o desenvolvimento da teoria potencial para escoamentos bi e tri-dimensionais, apresentando algumas soluções para corpos de formas

sem a presença do corpo.

Krilov considera o campo de pressões devido à onda incidente, representada pelo coeficiente  $k$ , pois a força de Froude-só é considerada em relação à perturbação da onda, que é facilmente compreendida, já que a aceleração do corpo

$$F = C_m \rho V (\ddot{u} - \dot{u}_0) + \rho V \dot{u}_0$$

velocidade  $\dot{u}_0$  a força de onda total seria expressa por Hogben e Standing (1974), para um corpo acelerando com aceleração relativa entre o corpo e a onda. Como descrito por simplesmente a aceleração da partícula fluida  $\ddot{u}$ , mas sim a plataformas flutuantes, as forças de onda envolvem não mais No caso do corpo estar se movimentando, como navios e O exposto acima se aplica ao caso de estruturas fixas.

simplificadas como cilindros e semi-esferas.

Para um corpo oscilando em águas calmas, ou seja, sem presença de ondas, os efeitos viscosos agentes, associados ao movimento do mesmo, são expressos através de uma força de amortecimento viscoso, proporcional ao quadrado da velocidade do corpo na direção considerada. As forças viscosas e os correspondentes momentos nos seis graus de liberdade de movimento são expressos como

$$F_{di} = 1/2 \rho C_d A_i |s_i| s_i$$

$i = 1, \dots, 6,$

onde  $C_d$  representa o coeficiente de arrasto, função da geometria do corpo e  $A_i$  a área projetada ou momento de área na direção  $i$ . Se a força acima for escrita em termos de um coeficiente de amortecimento viscoso  $B_{vii}$  vezes o termo de velocidade quadrática da estrutura, ela fica expressa como

$$F_{di} = B_{vii} |s_i| s_i$$

Introduzindo-se a expressão da força viscosa na equação do movimento, dada pela expressão (3.2), a equação pode ser

expressa como

$$\sum_{j=1}^6 (M_{ij} + A_{ij}) \ddot{s}_j + B_{ij} \dot{s}_j + B_{vii} |s_i| s_i + C_{ij} s_j = F_{ia} \cos(\omega t + \sigma_i)$$

Devido à natureza quadrática da força viscosa, o

conjunto das equações do movimento em sua forma descrita acima não mais poderia ser resolvido de acordo com a expressão (3.3) pois a condição de linearidade não mais seria satisfeita e a solução representada no domínio da frequência não teria validade. Uma solução numérica das equações no domínio do tempo deveria ser obtida em tal caso. O que se procura fazer no entanto é uma linearização do amortecimento quadrático. Tal linearização é feita considerando-se um

A determinação dos coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional, amortecimento e restauração hidrostática, além da força de excitação de ondas, é necessária para a solução da equação do movimento. No caso de se considerar a Teoria de Difrração, tais termos são determinados a partir da formulação hidrodinâmica de um corpo flutuante e sujeito à

alcançada uma convergência numérica. expressão (3.4), novas soluções são obtidas até que seja do amortecimento viscoso e, com os valores substituídos na  $s_j$  é obtida a partir da expressão (3.3) sem a consideração ser resolvida de maneira iterativa. Uma solução inicial para amplitude dos movimentos  $s_j$  de modo que a equação só pode equação acima com o termo viscoso requer o conhecimento da onde  $\delta_{ij}$  representa o delta de Kronecker. A solução da

$$F_1(t) = \sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (M_{1j} + A_{1j}) - i\omega (B_{1j} + \frac{3\pi}{8} \omega s_j B'_{v1j} \delta_{1j}) + C_{1j}] s_j = \quad (3.4)$$

incorporando a expressão acima, seriam reescritas como e as equações do movimento na forma da expressão (3.3),

$$B'_{v1j} = \frac{3\pi}{8} (\omega s_{aj}) B_{v1j}$$

o termo de amortecimento viscoso fica então aproximada por vibração como Tse et al. (1978). A expressão linearizada para amortecimento pode ser encontrada em diversos livros de movimento no domínio da frequência. A linearização do embarcação, pode-se obter uma solução das equações do com o amortecimento linear, proporcional à velocidade da que o amortecimento da embarcação, em um ciclo do movimento. amortecimento equivalente linear que dissipe a mesma energia

ação de ondas, cuja descrição se apresenta no Apêndice A. A formulação completa do problema pode ser encontrada em Vugts (1970) e Salvensen et. al. (1970).

Diversos são os métodos existentes para determinação das forças hidrodinâmicas em uma embarcação sujeita à ação de ondas regulares de frequência conhecida. St. Denis (1974) apresenta uma descrição dos fenômenos envolvidos no movimento de embarcações e da evolução nos métodos de solução do problema hidrodinâmico para o cálculo dos movimentos. Uma solução analítica para os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial e para as forças de excitação de ondas, a partir da determinação dos potenciais de velocidade do fluido devido aos movimentos da embarcação, descritos no Apêndice A, só foi obtida para corpos de formas simples como por exemplo cilindros e elipsóides (St. Denis, 1974). No caso de formas mais complexas como o casco de navios e plataformas, a solução envolve técnicas numéricas para resolver a Equação de Laplace associada às condições de contorno do escoamento. Um dos métodos para a representação hidrodinâmica da superfície do corpo é a distribuição de singularidades como fontes e sorvedouros pulsantes com frequência igual à frequência da onda incidente.

Para a representação do casco da embarcação distingue-se os tratamentos do escoamento como bi ou tridimensionais. O primeiro caso deu origem ao chamado método de faixas, aplicado a embarcações de formas delgadas, como é o caso da maioria dos navios convencionais. Aplicações do método de faixas para o cálculo do movimento de navios foram desenvolvidas por Salvensen et al. (1970) e por Vugts (1970).



Ambos os métodos se utilizam da técnica de distribuição de fontes para discretização da superfície da embarcação e solução do escoamento ao redor da mesma.

No caso em que o escoamento ao redor de uma estrutura não mais puder ser considerado como bi-dimensional, outros métodos devem ser considerados para a descrição da superfície do casco, a fim de se poder calcular a resposta de grande variedade e complexidade de configurações de estruturas offshore. Como exemplo tem-se o caso de barcas de casco em forma retangular, que não possuem a característica de esbeltez, ou o caso de plataformas semisubmersíveis, cujos cascos submersos tenham grandes dimensões laterais. Faltsinsen (1975) apresenta um método de distribuição de fontes tri-dimensionais para descrição do casco de embarcações, onde a superfície do casco é aproximada por um grande número de elementos quadriláteros planos, sendo posicionado em cada elemento uma fonte pulsante de intensidade constante. Tanto o potencial de velocidade da onda ditratada como os potenciais de irradiação devido ao movimento de embarcação (vide Apêndice A) são obtidos através de uma integral de superfície das fontes pulsantes, descritas por uma função de Green, para toda a superfície do casco. A mesma teoria para o cálculo da força de ditração de ondas em corpos tri-dimensionais é apresentada por Hogben e Standing (1975).

Quando se procura determinar o movimento de uma embarcação em ondas regulares através da Teoria de Ditração, mesmo considerando-se que tal teoria se baseia na teoria potencial de ondas que trata o fluido como ideal, efeitos viscosos estarão sempre presentes. Conforme o tipo de

embarcação tais efeitos terão uma influência bastante grande em determinados movimentos e deverão ser levados em consideração. É o caso por exemplo do movimento de roll de navios convencionais e barcas e dos movimentos de translação de plataformas semisubmersíveis. Métodos baseados em experimentos existem em tais casos para estimativa dos coeficientes viscosos, dentre os quais o método proposto por Watanabe (1957) para amortecimento do roll de barcas. No caso de plataformas semisubmersíveis, os efeitos de amortecimento viscoso são normalmente calculados através de coeficientes de arrasto cujos valores são conhecidos para formas seccionais convencionais, por exemplo seções retangulares ou circulares, encontrados em regras de Sociedades Classificadoras como DNV (1977). Os efeitos de amortecimento devem ser considerados na equação do movimento da embarcação na forma de coeficientes viscosos, como já exposto no presente capítulo.

No item seguinte serão apresentadas as características das embarcações analisadas no presente trabalho, além de serem apresentadas e discutidos o cálculo e característica de seus movimentos.

### 3.3 CALCULO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO MOVIMENTO

Para a obtenção das funções de transferência do movimento das embarcações analisadas, o método utilizado foi o método de distribuição de fontes tridimensional.

As embarcações analisadas se constituem em uma barca e uma plataforma semisubmersível (SS), cujas principais

características encontram-se especificadas nas Tabs.3.1 e 3.2. A geometria das embarcações é representada nas Figs.3.2 e 3.3. Dados da barcaça foram obtidos de Rawstron (1978) enquanto que os dados da SS são dados de projeto obtidos junto ao Dept. de Engenharia Naval da Universidade de São Paulo.

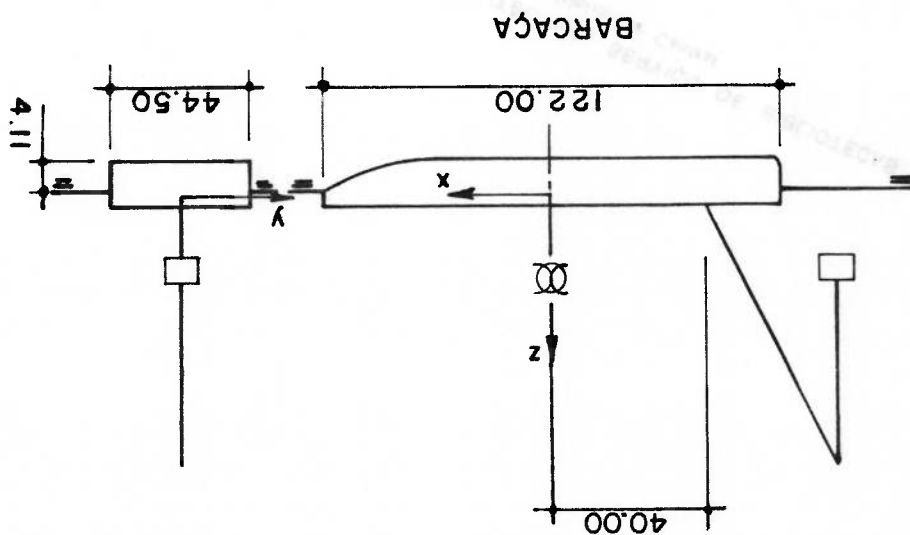
Tab.3.1 Características da Barcaça

Dimensões Principais	Comprimento	Boca	44.50 m
		Calado	4.11 m
Deslocamento	21200.00 ton		
	Raios de Giração	Roll	11.70 m
Alt. Metacêntricas	Transversal	Pitch	24.40 m
		Yaw	24.40 m
		Longitudinal	320.00 m
Centro de Gravidade	KG	7.32 m	

Centro de Gravidade		KG	21.15 m
Alt. Metacêntricas	Longitudinal		7.31 m
	Transversal		7.31 m
Raios de Giração	Yaw		30.00 m
	Pitch		30.00 m
	Roll		30.00 m
Deslocamento		40183.00 ton	
Dimensões Principais	Comprimento		115.00 m
	Largura Max.		78.50 m
	Calado		23.15 m
	Altura do Convés		35.90 m

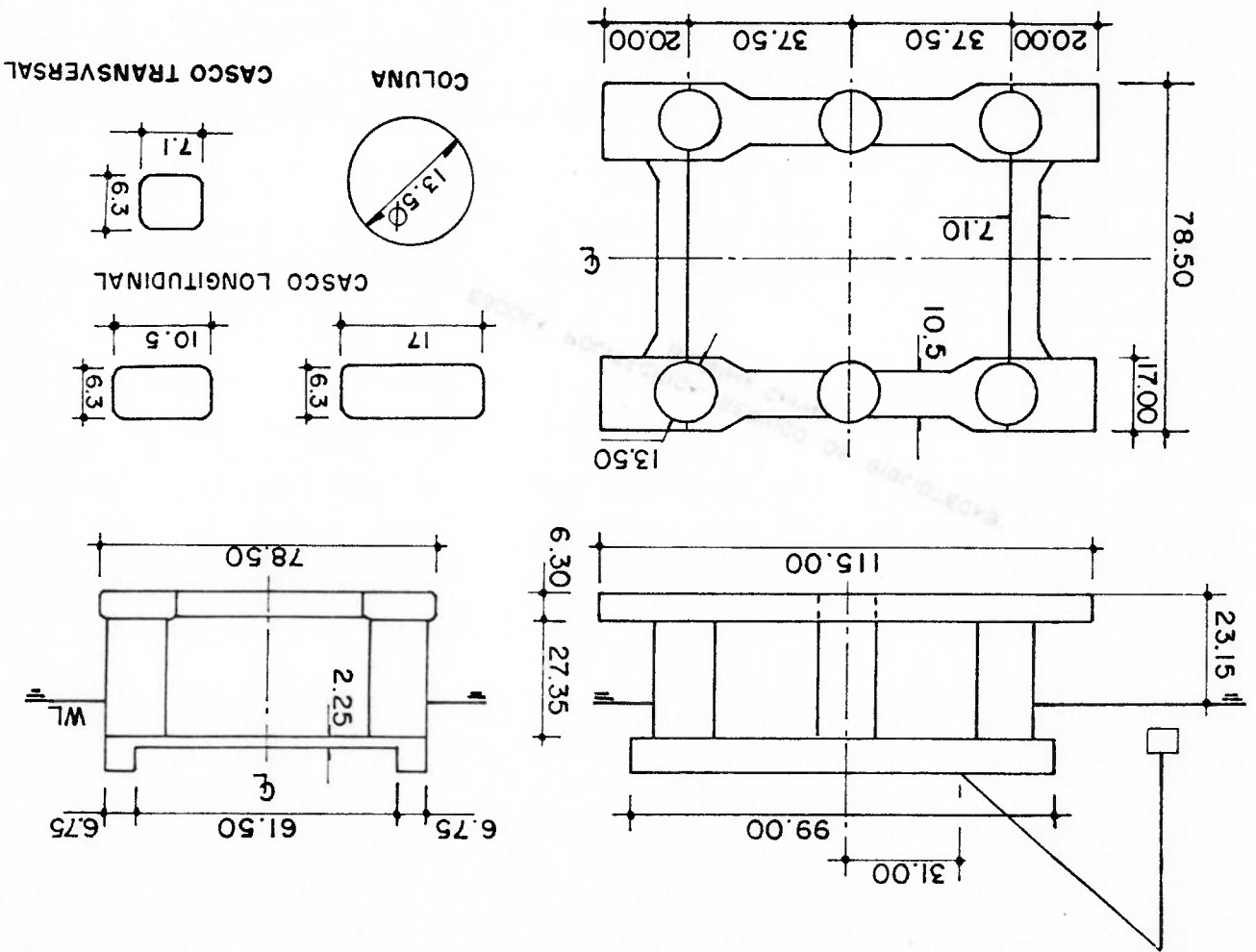
Tab.3.2 - Características da Semisubmersível

Fig.3.2 Geometria e Dimensões Principais da Barcaça



Para se utilizar o método de distribuição de fontes, as embarcações foram representadas através da discretização de suas superfícies por uma malha de elementos quadriláteros de planos, nos quais são consideradas fontes pulsantes para representação hidrodinâmica das embarcações e obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos e forças de excitação de onda. A modelagem das embarcações é apresentada nas Figs. 3.4 e 3.5. Efeitos de amortecimento viscoso foram considerados para o movimento de roll da barcaça e para os movimentos de

Fig. 3.3 Geometria e Dimensões Principais da Semisubmersível



translação da SS. No primeiro caso, os coeficientes de amortecimento viscoso de roll foram obtidos através do método proposto por Watanabe (1957). Para a SS os coeficientes de amortecimento viscoso para surge, sway e heave foram obtidos separadamente para as colunas e os cascos submersos, através de formulação das regras de DNV (1977), conforme as características geométricas da seção transversal desses elementos, constituintes da plataforma.

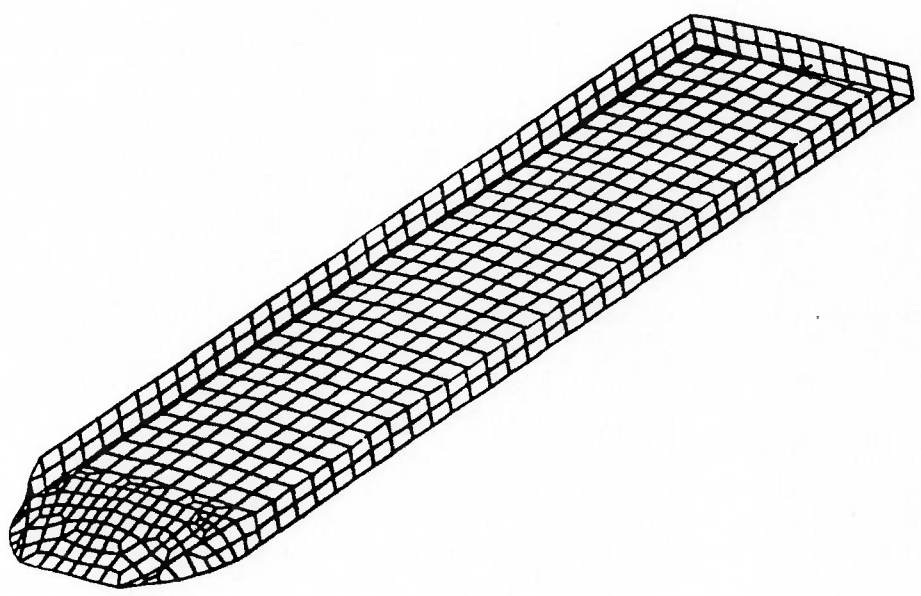
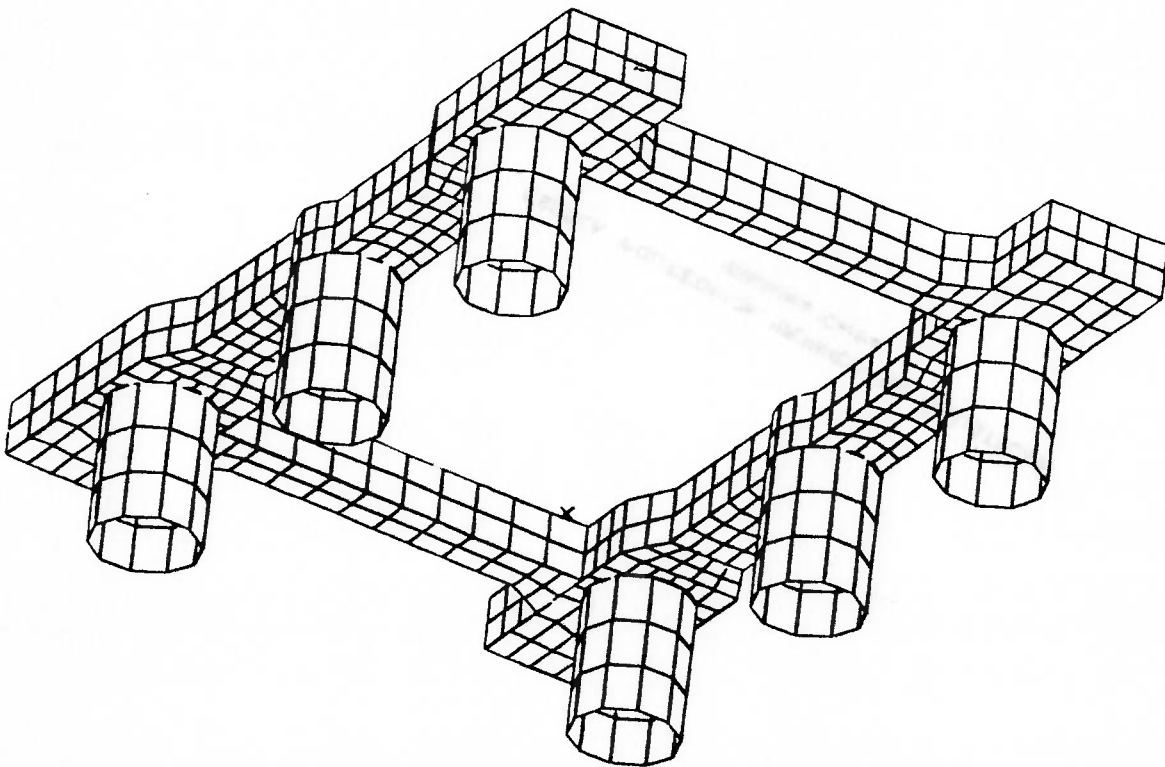


Fig. 3.4 Discretização da Barcaça

As Figs. 3.6 a 3.11 representam as funções de transferência do movimento da barcaça, para ângulos de incidência de onda de 45, 90 e 180 graus. A mesma representação do movimento da SS é feita nas Figs. 3.12 a 3.16. Nota-se nas figuras uma grande diferença na característica dos movimentos desses dois tipos de embarcação. No caso de barcaças o movimento considerado mais crítico é o roll. Como se nota na Fig. 3.9, o período natural de roll para a embarcação analisada encontra-se próximo a 7

Fig. 3.5 Discretização da Semisubmersível



segundos, o que corresponde a um período médio de ondas frequentemente encontrado nas condições de mar. Por sua vez, o movimento de pitch tem amplitudes bem menores, devido aos altos valores de seu momento restaurador, função da alta altura metacêntrica longitudinal de barcasas.

Plataformas SS se caracterizam pelo excelente comportamento no mar, especialmente no que concerne aos movimentos de rotação, como verificado nas Figs. 3.15 e 3.16. O movimento considerado como crítico é o heave, que apresenta um alto valor próximo à sua frequência de ressonância. No entanto, um dos critérios de projeto de plataformas SS estabelece que o período natural do heave seja mantido distante dos períodos médios de onda mais frequentemente ocorrentes nos locais de operação, o que faz com que as embarcações SS apresentem um excelente comportamento em condições de mar mais frequentemente encontradas, como pode ser inferido da Fig. 3.12. O período natural de heave para a plataforma analisada está em torno de 20 segundos. Devido à simetria transversal e longitudinal da SS, a mesma não apresenta movimento de yaw.

No Capítulo seguinte será analisado o comportamento das embarcações considerando o efeito acoplado do movimento do módulo suspenso pelo guindaste, quando em operação de içamento.



Fig.3.7 Função de Transferência do Sway da Barcaca

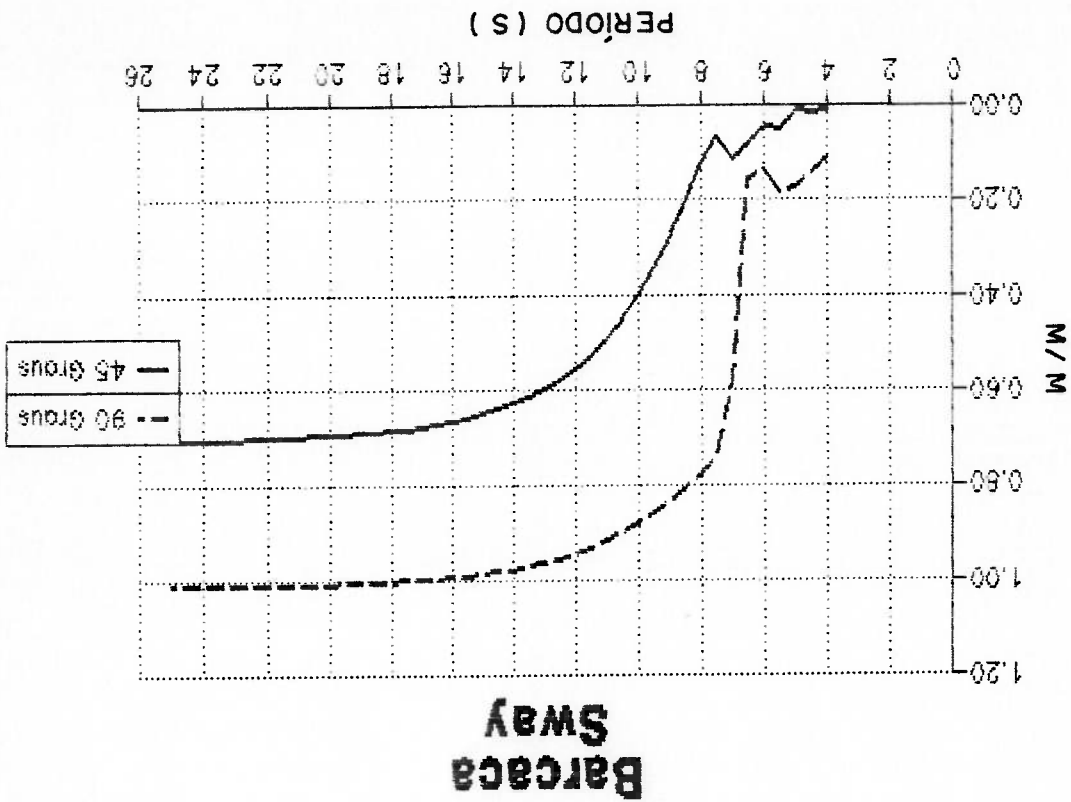


Fig.3.6 Função de Transferência do Surge da Barcaca

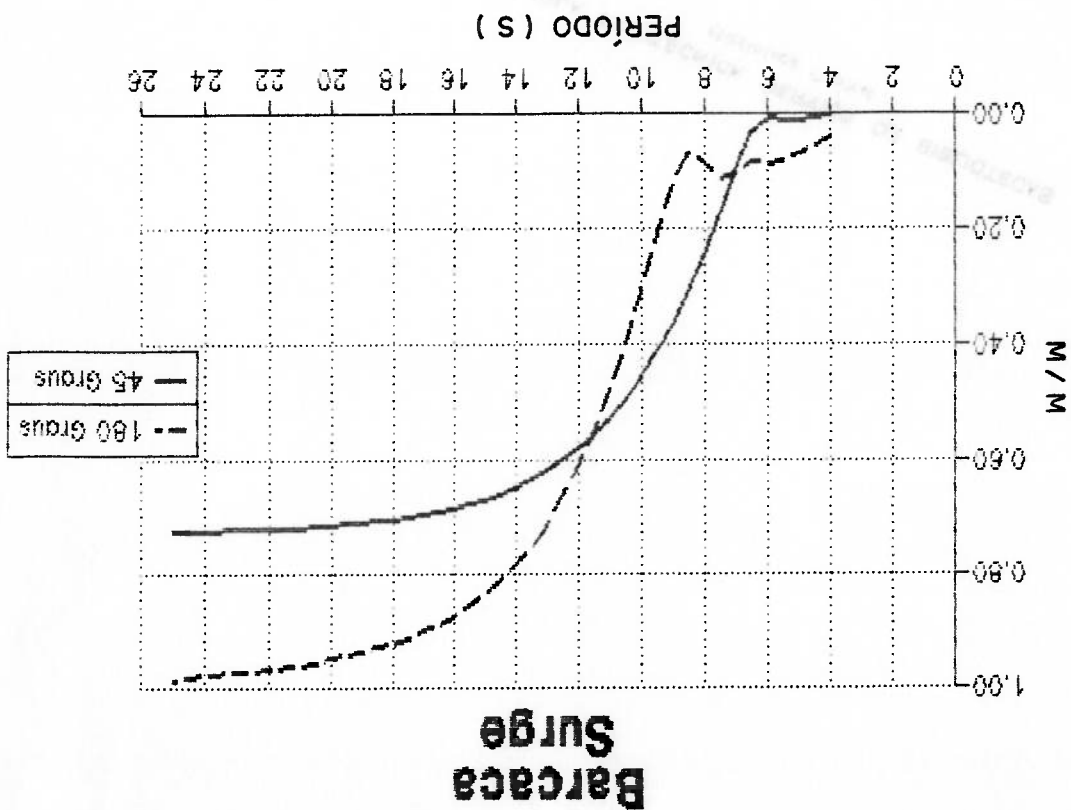


Fig.3.9 Função de Transferência do Roll da Barcaça

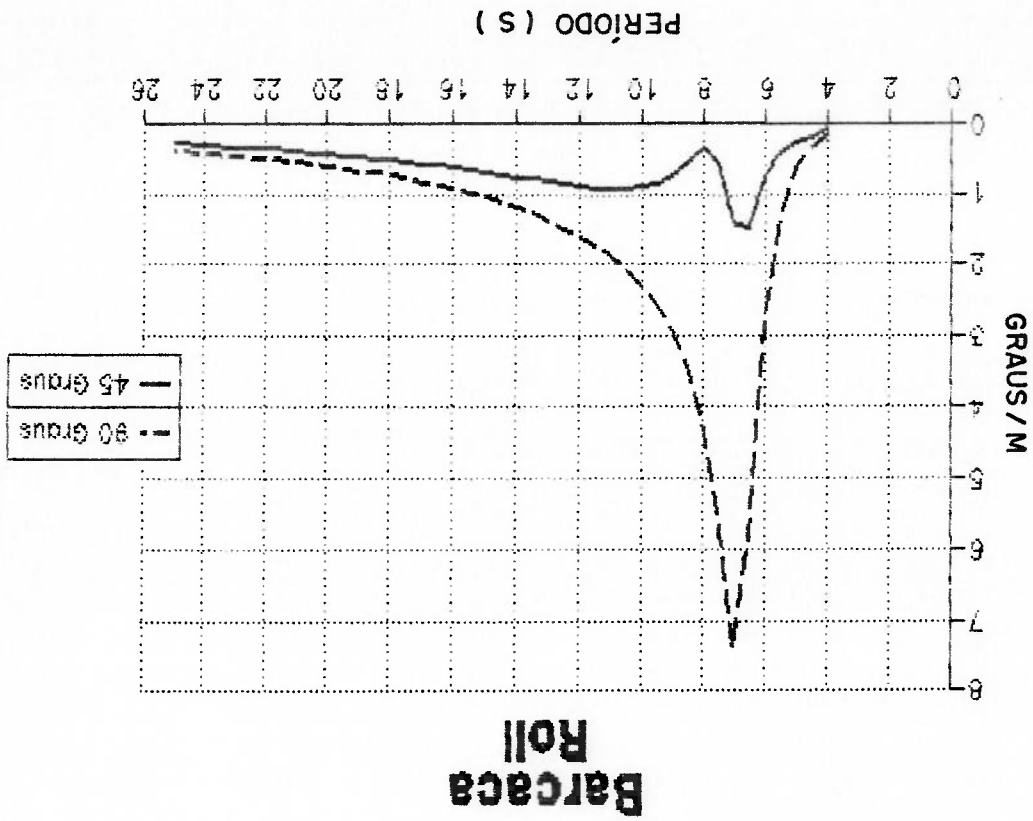


Fig.3.8 Função de Transferência do Heave da Barcaça

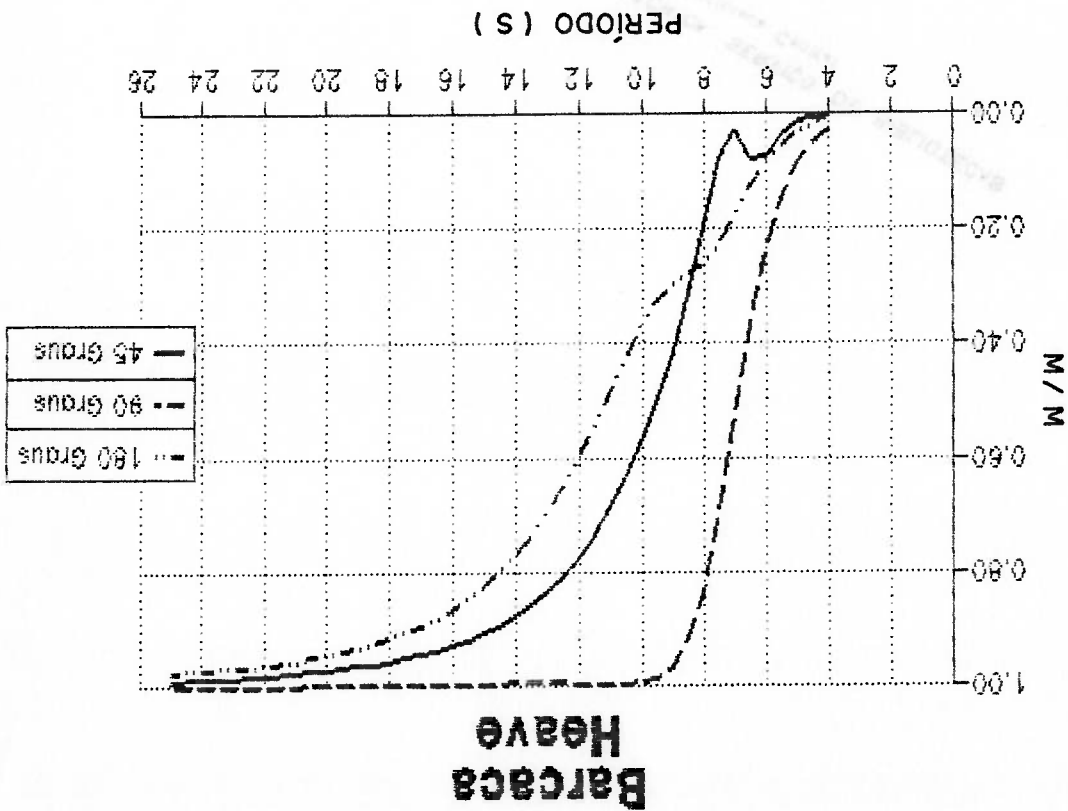


Fig.3.11 Função de Transferência do Yaw da Barcaça

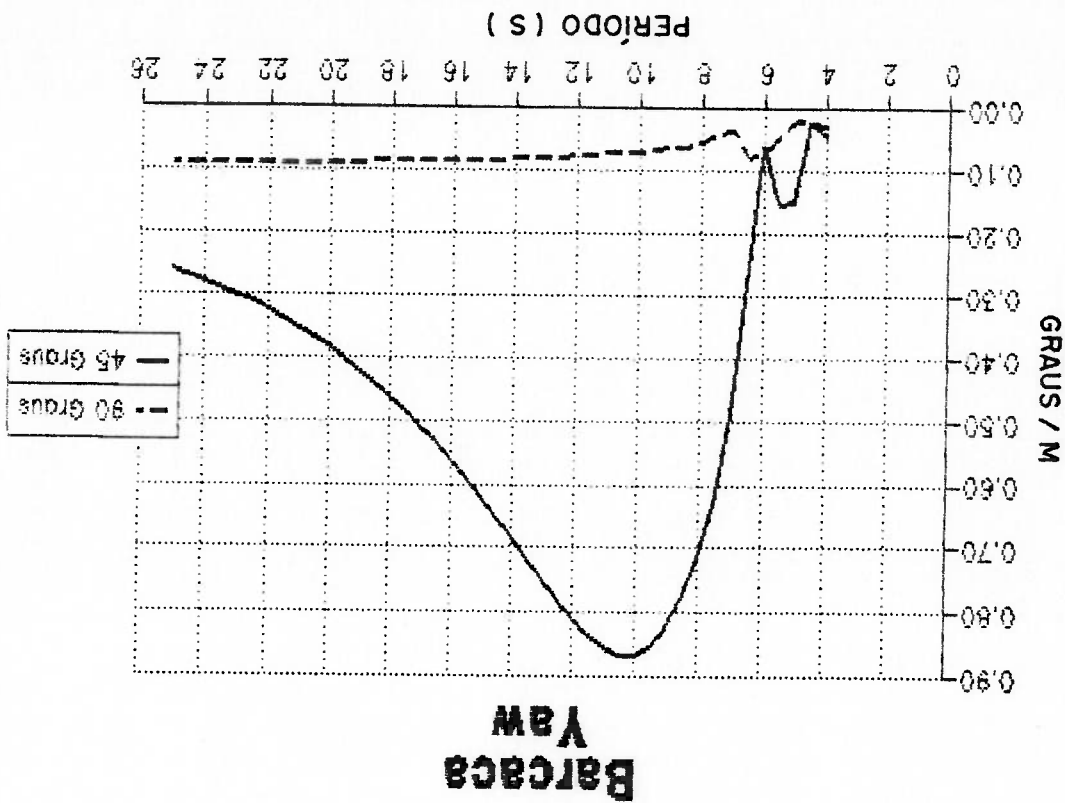


Fig.3.10 Função de Transferência do Pitch da Barcaça

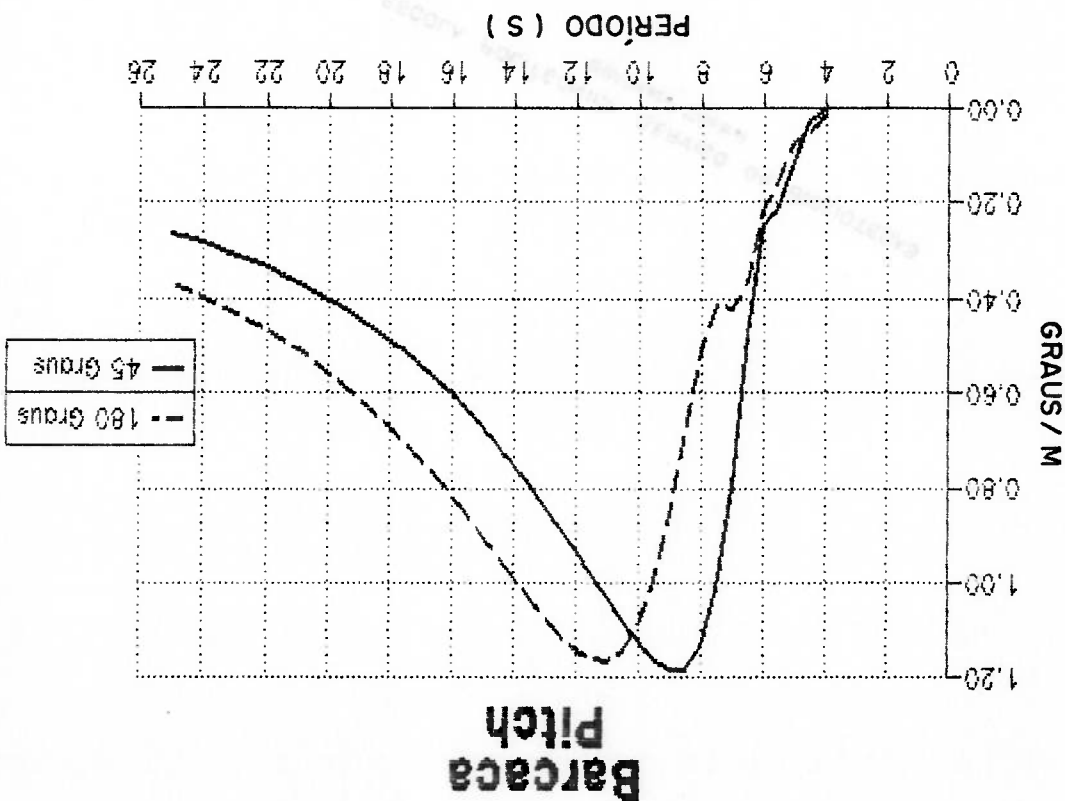


Fig.3.13 Função de Transferência do Sway da SS

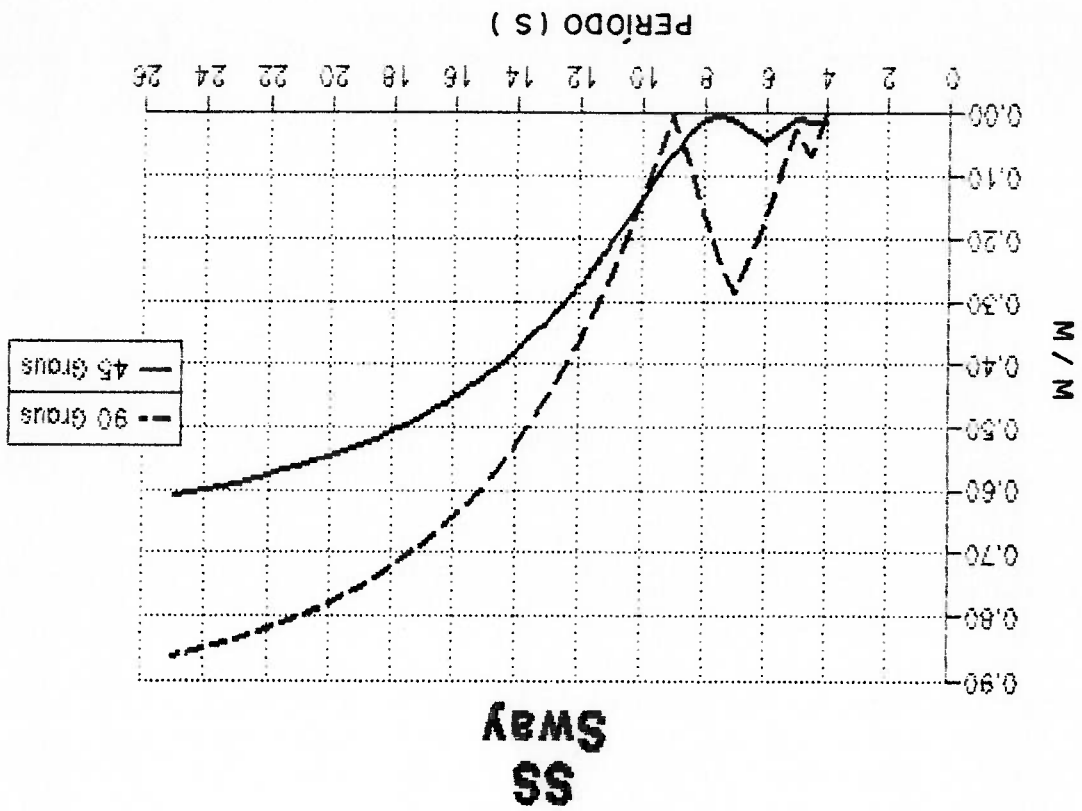


Fig.3.12 Função de Transferência do Surge da SS

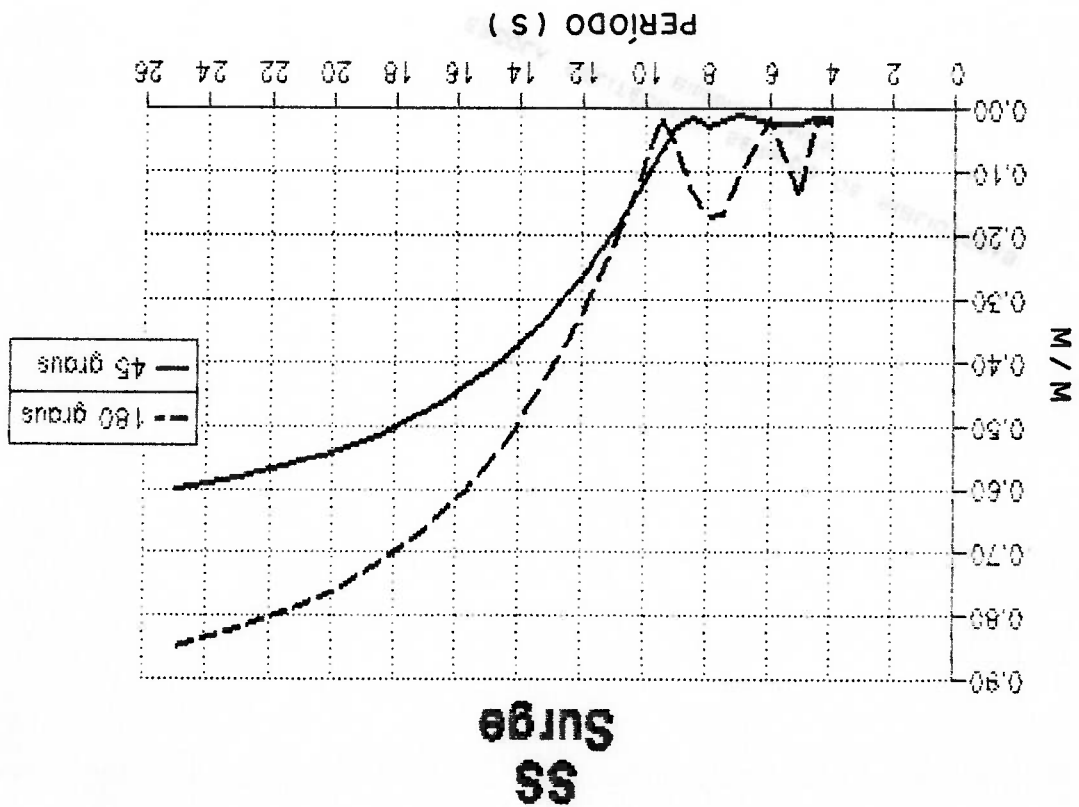


Fig. 3.15 Função de Transferência do Roll da SS

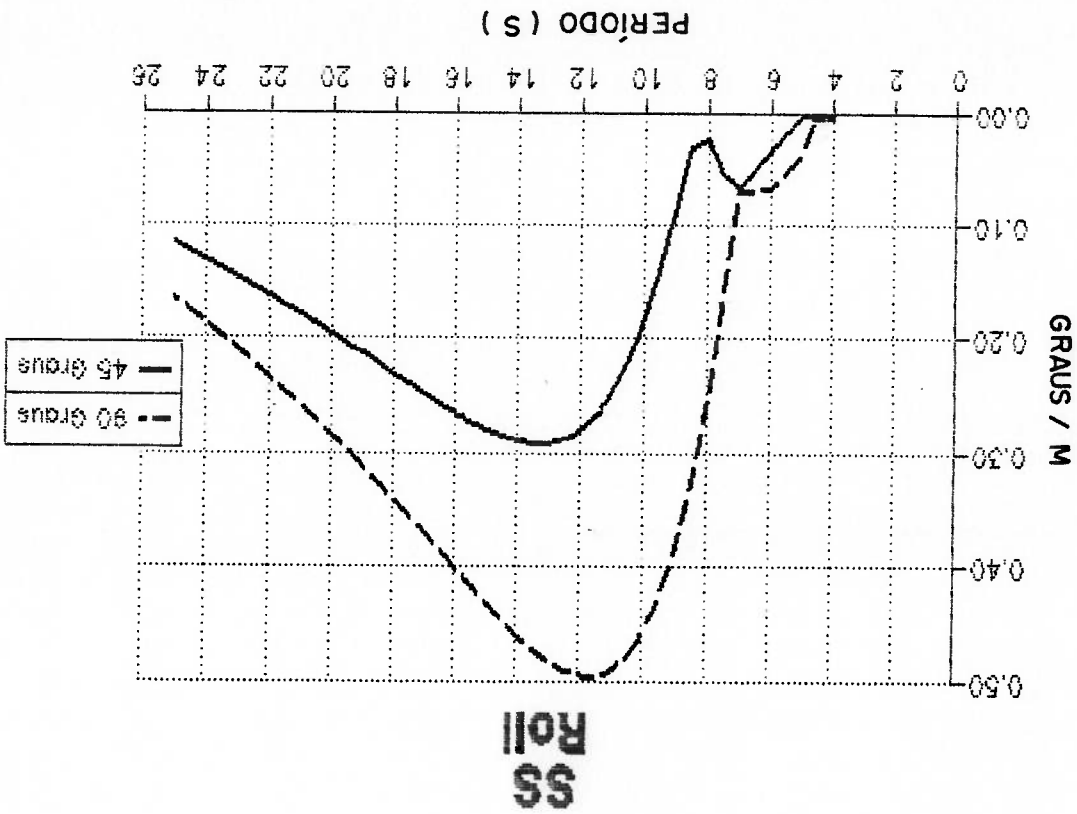


Fig. 3.14 Função de Transferência do Heave da SS

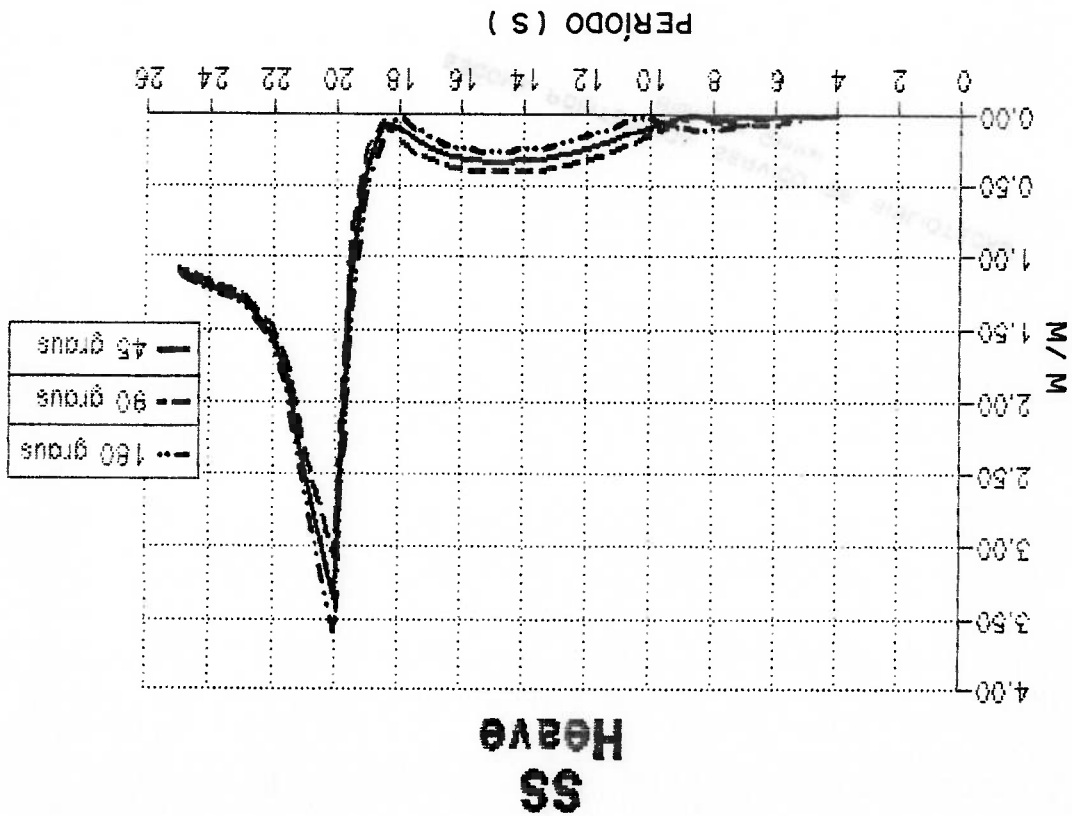
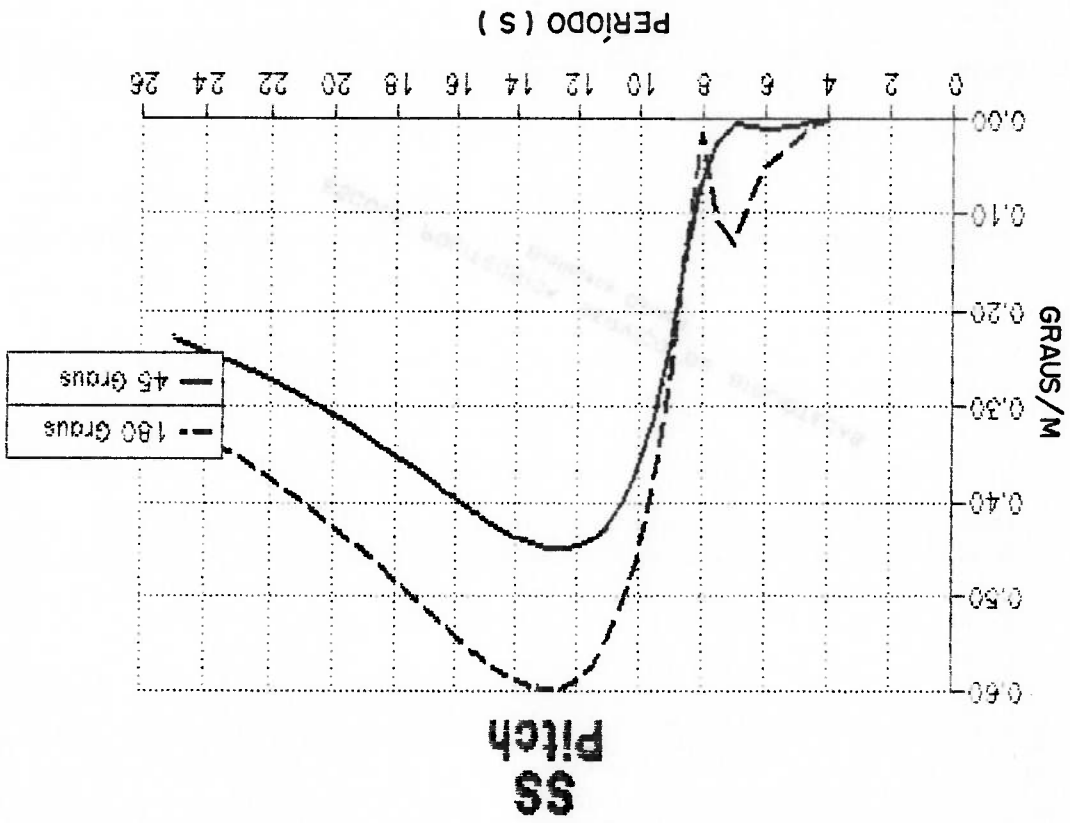


Fig.3.16 Função de Transferência do Pitch da SS



## 4. ANÁLISE DO MOVIMENTO DE EMBARCAÇÕES-GUINDASTE

### 4.1 INTRODUÇÃO

No Cap. 2, Item 2.3, foram feitas considerações gerais sobre os aspectos relevantes a serem considerados na análise da operação de EG, discutindo-se as particularidades das diversas fases da operação.

O presente capítulo apresenta o modelo adotado para a análise do movimento de EG, considerando os efeitos acoplados com o módulo ligado, durante a fase em que este se encontra suspenso pelo guindaste. A influência de alguns parâmetros será investigada, tais como, o peso do módulo, comprimento do cabo e posição do guindaste.

Dentre os diversos trabalhos voltados à análise da dinâmica de operações com EG, o primeiro a verificar teoricamente o efeito que o módulo suspenso teria sobre o movimento da embarcação foi Nojiri (1983). Posteriormente outros autores abordaram o problema como Sekita et al. (1986), e Zheng e Mcgregor (1988). Schellin, Sharma e Jiang (1989, 1990) analisaram o movimento de EG no domínio da frequência e no domínio do tempo, além de efetuarem uma análise experimental através de ensaios em tanques de prova. Clauss e Riekert (1990) analisaram o comportamento de EG tipo SS no domínio da frequência através de ensaios com ondas transitentes.

No item seguinte será descrito o modelo adotado para a análise de EG, considerando o efeito acoplado com o módulo

O movimento do módulo suspenso é definido a partir de duas rotações em torno dos eixos  $X^0$  e  $Y^0$  dadas pelos ângulos análise efetuada no domínio da frequência.

movimentos de pequenas amplitudes, como é o caso da presente respectivamente. Tal relação é válida quando se considera embarcação representando os movimentos de roll, pitch e yaw sistema inercial e  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  são os ângulos de rotação da  $X^0$ ,  $Y^0$  e  $Z^0$  são as coordenadas do ponto O em relação ao

onde,

$$(4.2) \quad T^0 = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \phi & 1 & -\phi \\ -\theta & \psi & 1 \end{bmatrix}$$

$$(4.1) \quad \begin{bmatrix} X^V \\ Y^V \\ Z^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{bmatrix} + T^0 \begin{bmatrix} X^V \\ Y^V \\ Z^V \end{bmatrix}$$

$X^V, Y^V, Z^V$ , pode ser expresso pela seguinte notação matricial :  
 ao sistema inercial  $O^0X^0Y^0Z^0$ , descrita pelas coordenadas  $X^0, Y^0, Z^0$ ,  
 guindaste em relação ao sistema  $OXYZ$ , sua posição em relação  
 Sendo  $(X^V, Y^V, Z^V)$  as coordenadas da extremidade do  
 embarcações, descrito no cap. 2.

utilizado na obtenção das funções de transferência das  
 O sistema de coordenadas adotado na análise é o mesmo  
 os corpos.

Os efeitos de interação entre o módulo e a embarcação  
 no comportamento desta são considerados a partir da força  
 agente no cabo de ligação, elemento de ligação entre ambos

#### 4.2 MOVIMENTO ACOPLADO DA EMBARCAÇÃO E DO MÓDULO SUSPENSO

suspenso, baseado no modelo desenvolvido por Nojiri (1983).



$$\text{sen } \phi_2 \approx \phi_2$$

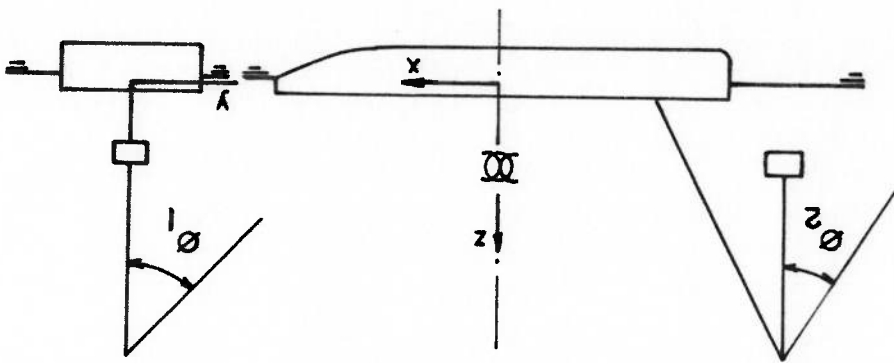
$$\text{sen } \phi_1 \approx \phi_1$$

considerar as seguintes relações:

da carga são de pequenas amplitudes de modo que se pode

Desde o início da análise, admite-se que os movimentos

Fig. 4.1 Representação do Movimento do Módulo



distância entre os pontos A e P.

onde L é o comprimento do cabo de içamento representando a

$$\begin{aligned} x_P^0 &= x_A^0 - L \text{sen } \phi_2 \\ y_P^0 &= y_A^0 + L \text{sen } \phi_1 \\ z_P^0 &= z_A^0 - L \end{aligned} \quad (4.3)$$

A, anteriormente definido, são dadas por :

módulo, as coordenadas do ponto P expressas em termo do ponto

sendo P o ponto de localização do centro de massa do

$\phi_1$  e  $\phi_2$  como ilustrado na Fig. 4.1.

Assim sendo, a parcela do peso do módulo na direção do cabo tem magnitude próxima ao peso que corresponderia ao esforço de tração estática no cabo. Pode-se admitir desse modo, que o cabo estaria sempre distendido. Admitindo-se que sua rigidez seja muito grande de modo que suas deformações sejam pequenas, o comprimento do cabo pode ser admitido como constante e as forças agentes no cabo devido à aceleração do módulo são integralmente transmitidas ao guindaste e embarcação, o mesmo acontecendo com as forças no módulo devido ao movimento da embarcação.

As velocidades do módulo nas direções  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  são dadas pelas derivadas temporais de  $x_p^0$ ,  $y_p^0$  e  $z_p^0$  e expressas como

$$(4.4) \quad \begin{aligned} \dot{x}_p^0 &= \dot{x}_v^0 - L\dot{\phi}_2 \\ \dot{y}_p^0 &= \dot{x}_v^0 + L\dot{\phi}_1 \\ \dot{z}_p^0 &= \dot{z}_v^0 \end{aligned}$$

A aceleração do módulo por sua vez, é dada pela derivada temporal da velocidade, e suas componentes podem ser expressas por

$$(4.5) \quad \begin{aligned} x_p^0 &= x_v^0 - L\phi_2 \\ y_p^0 &= x_v^0 + L\phi_1 \\ z_p^0 &= z_v^0 \end{aligned}$$

Como os movimentos da embarcação também são admitidos como de pequenas amplitudes, as expressões para as componentes da velocidade e aceleração do guindaste podem ser expressas a partir das relações 4.1 e 4.2, de modo que para a aceleração do módulo as expressões 4.5 são reescritas como

$$(4.6) \quad \begin{aligned} x_p^0 &= x_v^0 - L\dot{\phi}_2 + z_v^0\dot{\theta} + z_v^0\dot{\phi}_2 \\ y_p^0 &= y_v^0 + x_v^0\dot{\psi} - z_v^0\dot{\phi}_1 + L\dot{\phi}_1 \\ z_p^0 &= z_v^0 - x_v^0\dot{\theta} + y_v^0\dot{\phi}_1 \end{aligned}$$

As equações 4.6 e 4.8 representam forças externas e momentos agentes na embarcação e devem ser consideradas na formulação do equilíbrio dinâmico da mesma, dada pela expressão 3.1. Considerando-se a equação do movimento da embarcação, na forma apresentada pela expressão 3.2,

$$(4.9) \quad \begin{aligned} -M^p g \phi_1 L = M^p L^2 \ddot{Y}_p^0 / L \\ M^p g \phi_2 L = M^p L^2 \ddot{X}_p^0 / L \end{aligned}$$

Tem-se então:

A descrição do movimento do módulo em termo dos ângulos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  é obtida a partir dos momentos das forças agentes no módulo em relação ao ponto A nas direções  $X^0$  e  $Y^0$ .

$$(4.8) \quad \begin{aligned} T^k &= T^k Y^v - T^k Z^v \\ T^m &= T^m Z^v - T^m X^v \\ T^n &= T^n Z^v - T^n Y^v \end{aligned}$$

Chamando-se os momentos das forças em relação ao ponto O de  $T^k$ ,  $T^m$  e  $T^n$  respectivamente nas direções dos eixos X, Y e Z, eles são obtidos a partir das seguintes relações:

$$(4.7) \quad \begin{aligned} T^x &= -M^p X_p^0 = -M^p (X_p^0 - Y_p^v \psi + Z_p^v \theta - L \phi^2) \\ T^y &= -M^p Y_p^0 = -M^p (Y_p^0 + X_p^v \psi - Z_p^v \theta + L \phi^1) \\ T^z &= -M^p Z_p^0 = -M^p (Z_p^0 - X_p^v \theta + Y_p^v \phi) \end{aligned}$$

$X^0$ ,  $Y^0$  e  $Z^0$  podem ser expressas como módulo, de modo que suas componentes  $T^x$ ,  $T^y$  e  $T^z$  nas direções embarcação no ponto A, com sentido contrário à força no módulo  $M^p$  e suas acelerações  $X_p^0$ ,  $Y_p^0$ ,  $Z_p^0$ . A força  $T$  atua na massa módulo, suas componentes são dadas pelo produto entre a massa Chamando-se tal força de  $T$ , pela Lei de Newton aplicada ao dado pela força atuante ao longo do cabo de ligamento. O efeito da interação entre o módulo e a embarcação é

Juntamente com as expressões 4.9, tem-se a representação das equações do sistema EG e módulo, com seis graus de liberdade de movimento da embarcação, e dois graus de liberdade do movimento do módulo, dados pelos ângulos de rotação  $\phi_1$  e  $\phi_2$ . Sendo  $s_j$ ,  $j=1, \dots, 8$ , os movimentos  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  e  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , as equações do movimento da embarcação juntamente com as equações 4.7, 4.8 e 4.9, representando os oito graus de liberdade do movimento, podem ser expressas da seguinte maneira:

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{1j}) s_j + A_{1j} s_j + B_{1j} \dot{s}_j + C_{1j} s_j = F_1$$

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{2j}) s_j + A_{2j} s_j + B_{2j} \dot{s}_j + C_{2j} s_j + M^p L s_7 = F_2$$

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{3j}) s_j + A_{3j} s_j + B_{3j} \dot{s}_j + C_{3j} s_j = F_3$$

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{4j}) s_j + A_{4j} s_j + B_{4j} \dot{s}_j + C_{4j} s_j - M^p L z^v s_7 = F_4$$

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{5j}) s_j + A_{5j} s_j + B_{5j} \dot{s}_j + C_{5j} s_j - M^p L z^v s_8 = F_5$$

$$\sum_{j=1}^6 (\underline{M}_{6j}) s_j + A_{6j} s_j + B_{6j} \dot{s}_j + C_{6j} s_j + M^p L x^v s_7$$

$$+ M^p L y^v s_8 = F_6$$

$$M^p L s_7 + M^p L g s_7 + M^p L s_2 - M^p L z^v s_4 + M^p L x^v s_6 = 0$$

$$M^p L s_8 + M^p L g s_8 - M^p L s_1 - M^p L z^v s_5 + M^p L y^v s_6 = 0$$

Nas equações acima  $\underline{M}_{ij}$  representa a inércia da

embarcação quando o módulo se encontra suspenso pelo guindaste, isto é,  $M_1$  representa a massa e as inércias da embarcação adicionadas da massa e das inércias do módulo no sistema.

### Movimento Vertical da Extremidade do Guindaste

A importância de se determinar o movimento vertical da extremidade do guindaste, também referido como movimento da ponta de lança, é que o mesmo é adotado como importante critério para se estabelecer a viabilidade de realização de uma operação de içamento. Como exemplo, Rawstron (1978) apresenta histogramas na forma de porcentagem de ocorrência do movimento vertical do guindaste, obtidos de medições durante realização de operações de Eg no Mar do Norte.

O movimento vertical de qualquer ponto da embarcação é calculado a partir da contribuição dos movimentos de heave, roll e pitch em relação ao centro de rotação adotado, ponto O, origem do sistema de coordenadas. A função de transferência do movimento vertical do ponto A para ondas regulares pode ser calculada a partir da relação

$$z^0(t) = z(t) - x^v \theta(t) + y^v \psi(t) \quad (4.10)$$

onde

$$z(t) = z^e \cos(\omega t + \epsilon_z)$$

$$\theta(t) = \theta^e \cos(\omega t + \epsilon_\theta)$$

$$\psi(t) = \psi^e \cos(\omega t + \epsilon_\psi)$$

$z, \theta, \psi$  representam respectivamente o heave, roll e pitch da embarcação e  $z^e, \theta^e, \psi^e$  suas amplitudes.

A aceleração vertical da extremidade do guindaste deve ser igual à aceleração vertical do módulo, de acordo com as

Para que se ficasse comprovada a validade do modelo desenvolvido, foram calculados os movimentos de duas Ecg tipo barcaça. Para a primeira delas, as funções de transferência foram obtidas por Nojiri (1983), através do modelo teórico e comprovadas experimentalmente. Os dados correspondentes à embarcação considerada se encontram na Tab.4.1. Foi analisado o caso de um içamento pela popa com a correspondente posição do guindaste especificada na mesma tabela. Os dados relacionados à distribuição de massa da embarcação consideraram a carga içada com massa admitida na extremidade da lança do guindaste.

#### 4.3 RESULTADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO

Por sua vez, a força dinâmica agente no cabo pode ser calculada como o produto entre a massa e a aceleração vertical do módulo.

considerações de linearidade feitas anteriormente, e é representada pela derivada segunda da expressão 4.10.

Peso do Módulo		2439.00 ton	
Posição do Guindaste	Z <sup>v</sup>	61.63 m	
	Y <sup>v</sup>	0.00 m	
	X <sup>v</sup>	-75.00 m	
Centro de Gravidade	KG	19.07 m	
Alt. Metacêntricas	Longitudinal	170.80 m	
	Transversal	10.40 m	
Raios de Giração <sup>1</sup>	Roll - yaw	-27.00 m	
	Yaw	44.10 m	
	Pitch	48.85 m	
	Roll	24.05 m	
Deslocamento		17310.00 ton	
Dimensões Principais	Comprimento	100.00 m	
	Boca	38.00 m	
	Calado	4.87 m	

Tab.4.1 Características da Barcaça "Nojiri"

Os resultados obtidos para comparação se referem às funções de transferência dos movimentos de roll e pitch e da tensão dinâmica no cabo de içamento. As Fig. 4.2a, 4.3a e 4.4a são reproduzidas de Nojiri (1983) e as Fig. 4.2b, 4.3b e 4.4b representam os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido e descrito na presente dissertação. As forças de excitação de ondas e os coeficientes hidrodinâmicos da barcaça foram obtidas pelo método de distribuição de fontes tridimensional. Uma análise detalhada sobre os resultados e características do movimento da barcaça durante o içamento, é encontrada na referência citada.



Fig. 4.2b Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Roll

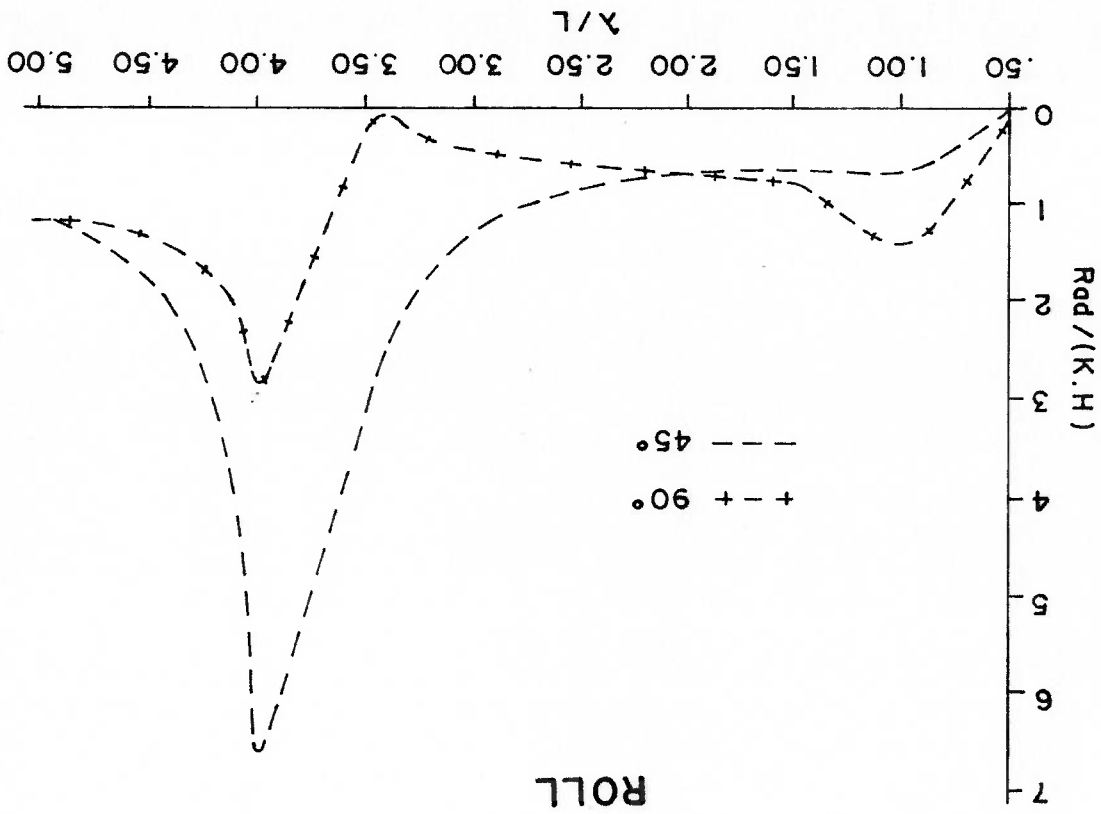


Fig. 4.2a Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Roll

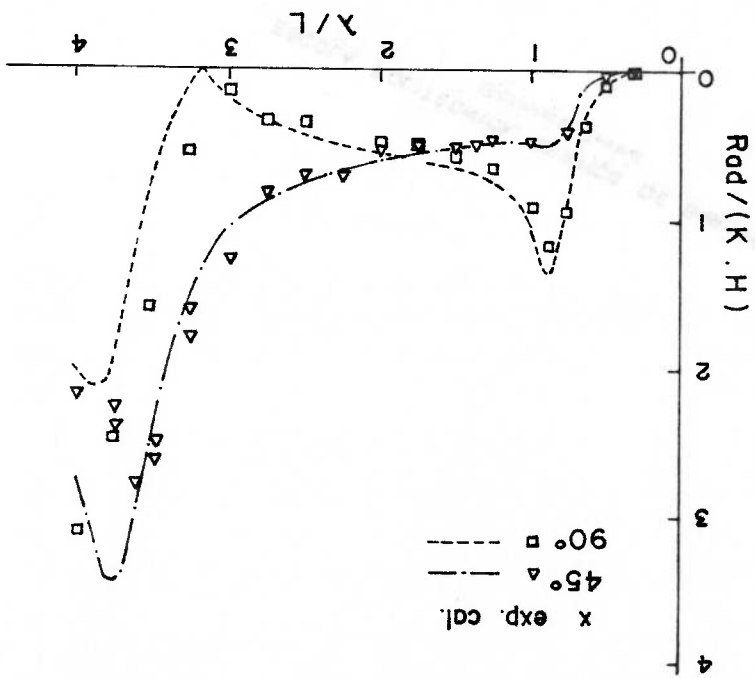


Fig.4.3b Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Pitch

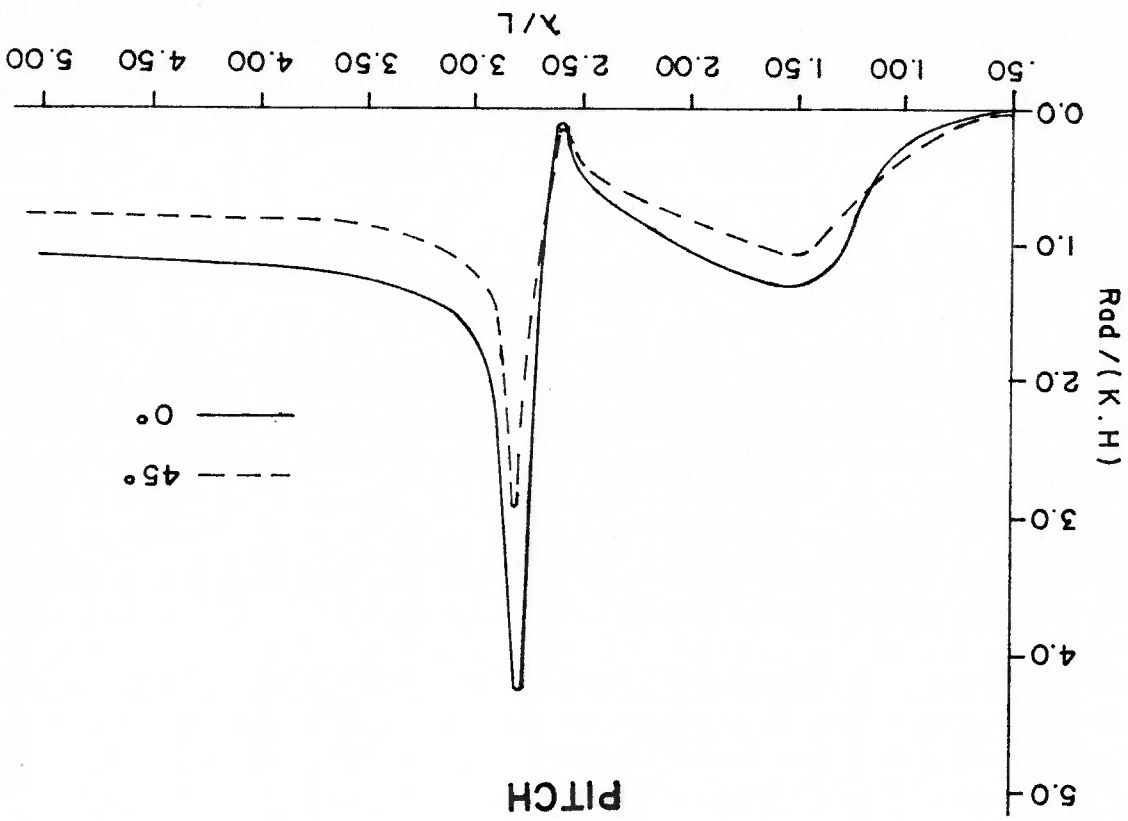


Fig.4.3a Barcaça Nojiri - Função de Transferência do Pitch

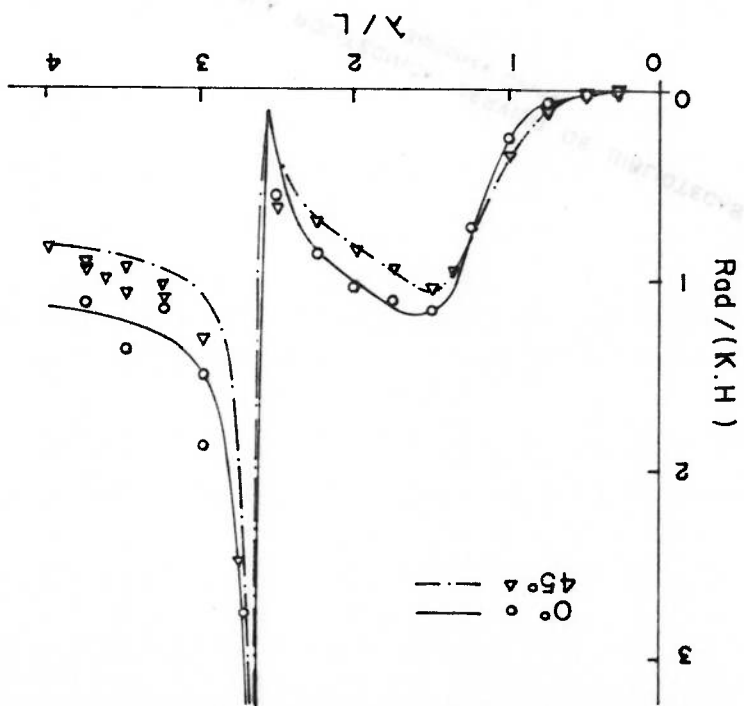


Fig. 4.4b Função de Transferência da Força Dinâmica no Cabo

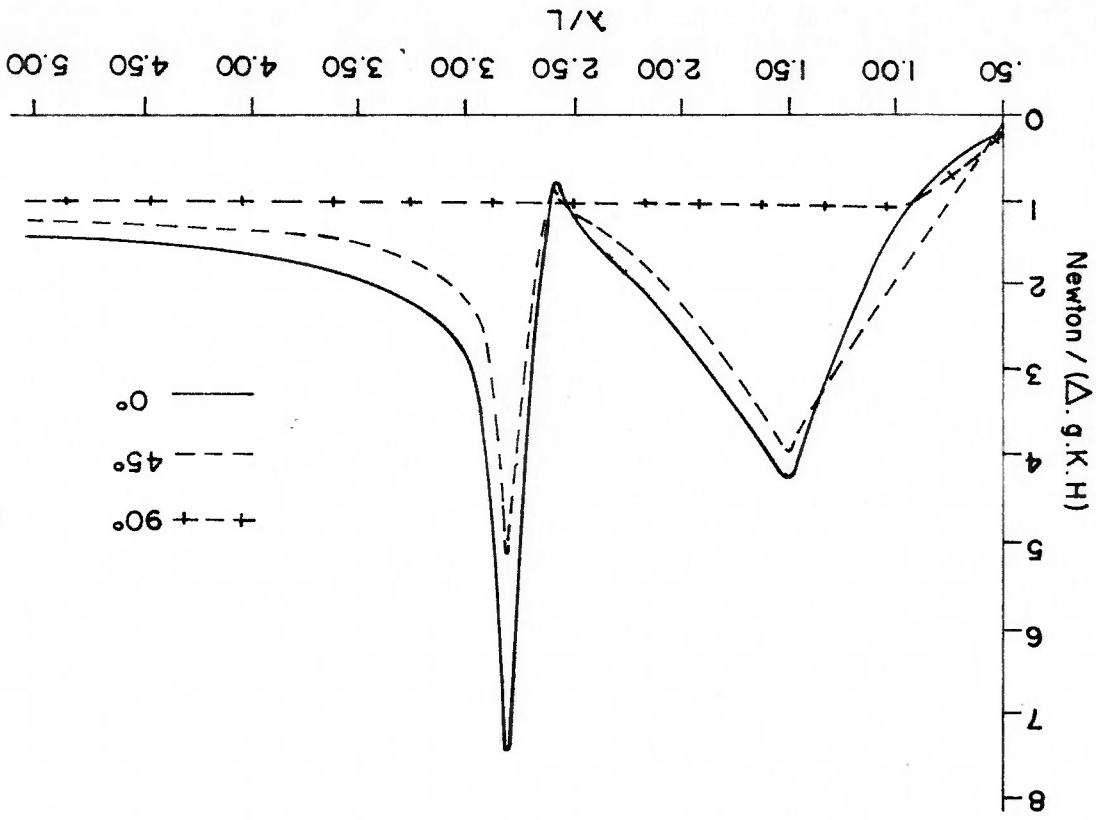
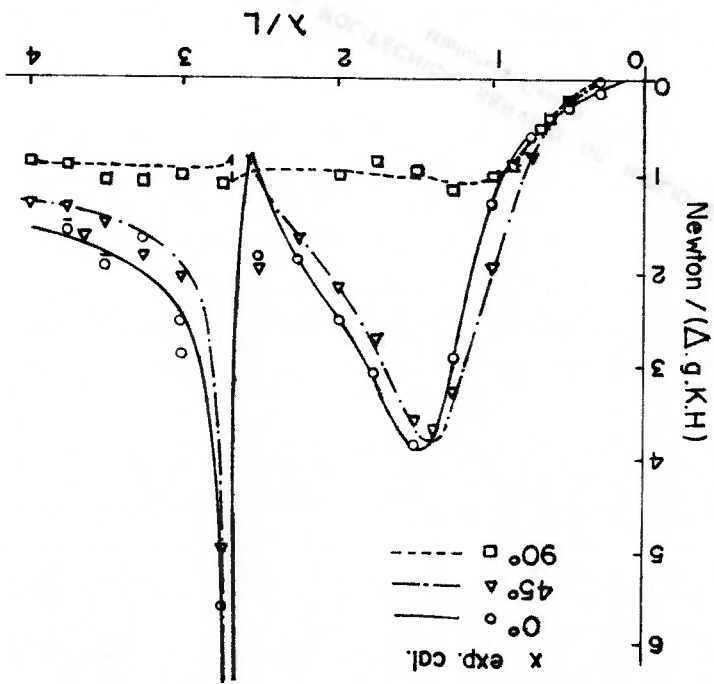


Fig. 4.4a Função de Transferência da Força Dinâmica no Cabo



A segunda embarcação se trata da barcaça "BGL-1", utilizada pela PETROBRAS para instalação de cargas com pesos reduzidos, devido à sua capacidade máxima de içamento ser de apenas 800 ton. As funções de transferência dos movimentos da embarcação obtidas teoricamente foram comparadas com resultados de ensaios realizados no IPT e apresentados em IPT (1984). As principais características da embarcação se encontram na Tab.4.2. A carga utilizada para simulação do içamento é de 400 ton e três condições de instalação referentes a diferentes posições da carga e aprornamento da embarcação foram consideradas conforme indicado nas curvas correspondentes às funções de transferência do movimento. Os resultados dos movimentos calculados e a comparação com os resultados experimentais são apresentados nas Figs. 4.5 a 4.14. Uma pequena diferença ocorre em relação às frequências de ressonância do roll e da aceleração vertical do módulo para direção de onda de 45 graus, provavelmente devido a pequenas discrepâncias entre o valor de inércia teórico adotado para o cálculo e a inércia do modelo ensaiado.

Peso do Módulo		400.00 ton	
Centro de Gravidade		KG	
Alt. Metacêntricas		Longitudinal	301.70 m
		Transversal	14.03 m
Raios de curvatura <sup>2</sup>		Roll - Yaw	-13.10 m
		Yaw	40.10 m
		Pitch	40.10 m
		Roll	16.84 m
Deslocamento		13580.00 ton	
Dimensões Principais		Comprimento	120.00 m
		Boca	30.48 m
		Calado	4.33 m

Tab.4.2 Características da Barcaça BGL-1

Fig. 4.6 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Langa

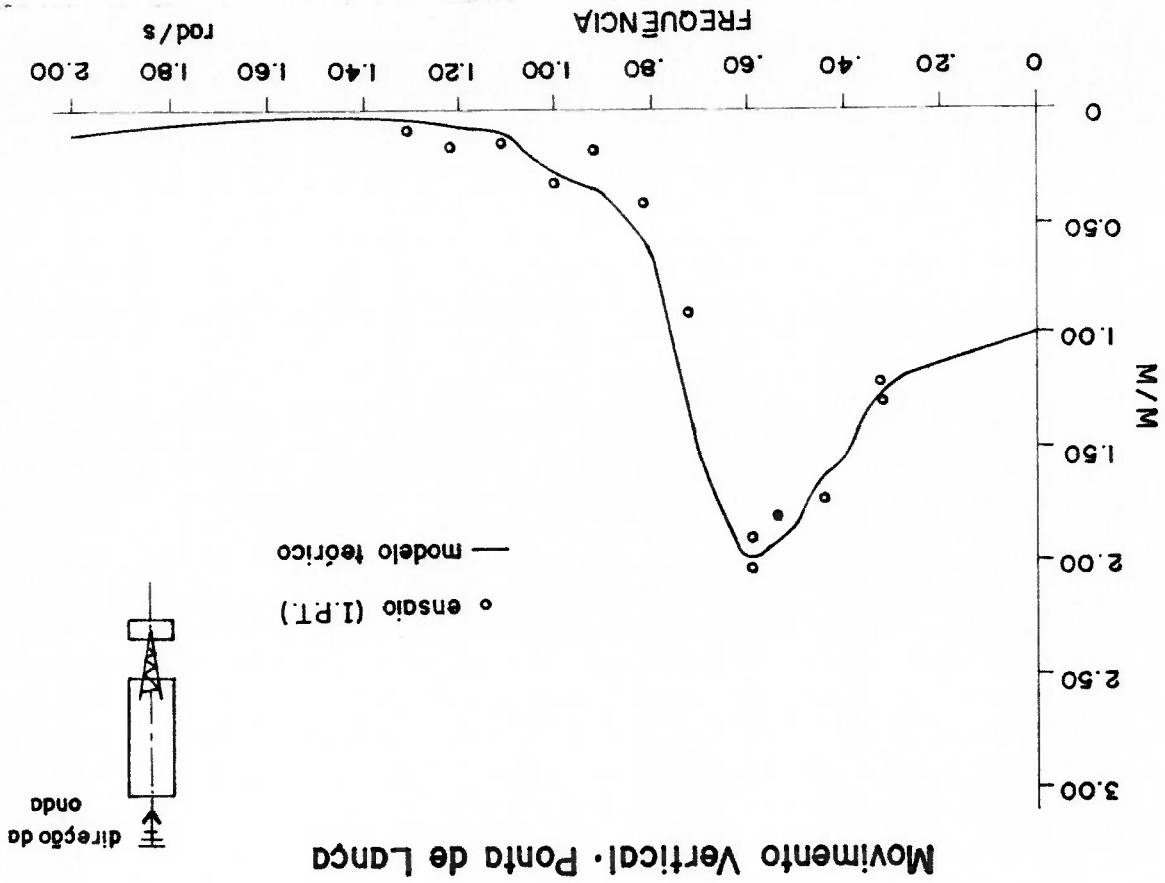


Fig. 4.5 BGL 1 - Função de Transferência do Pitch

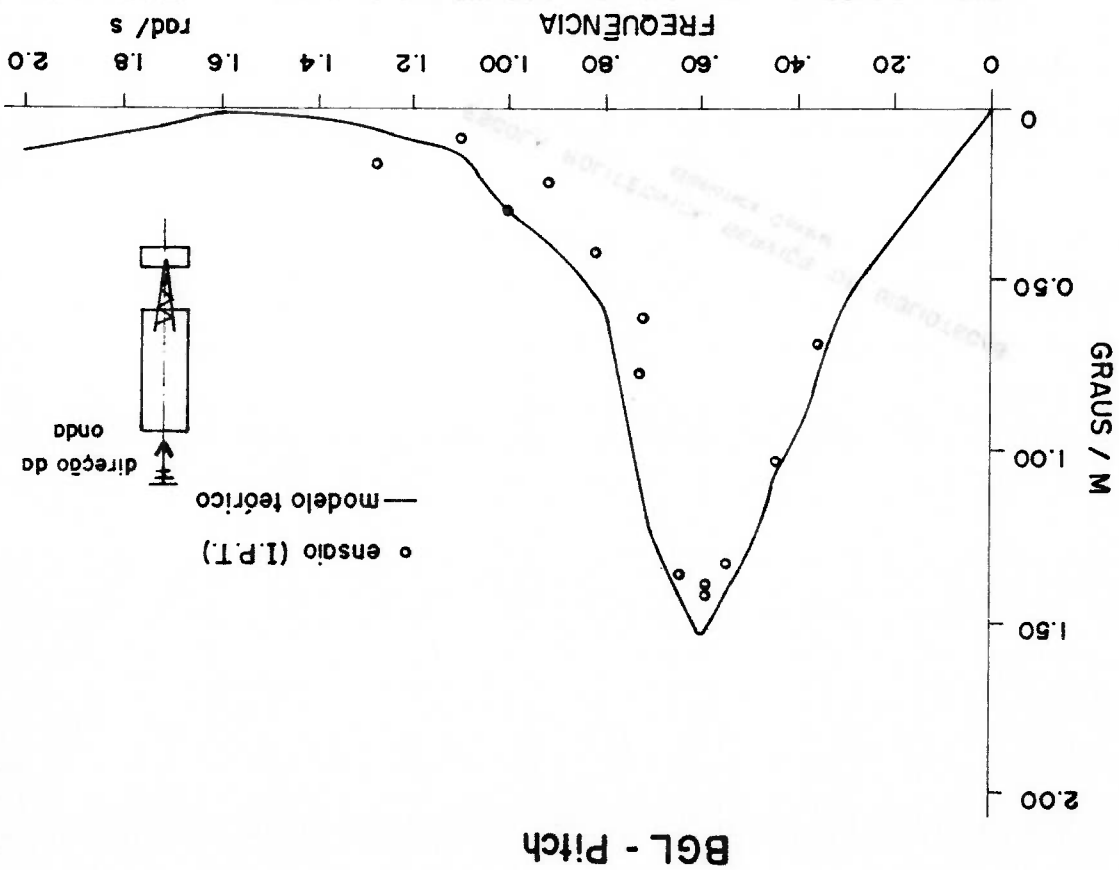
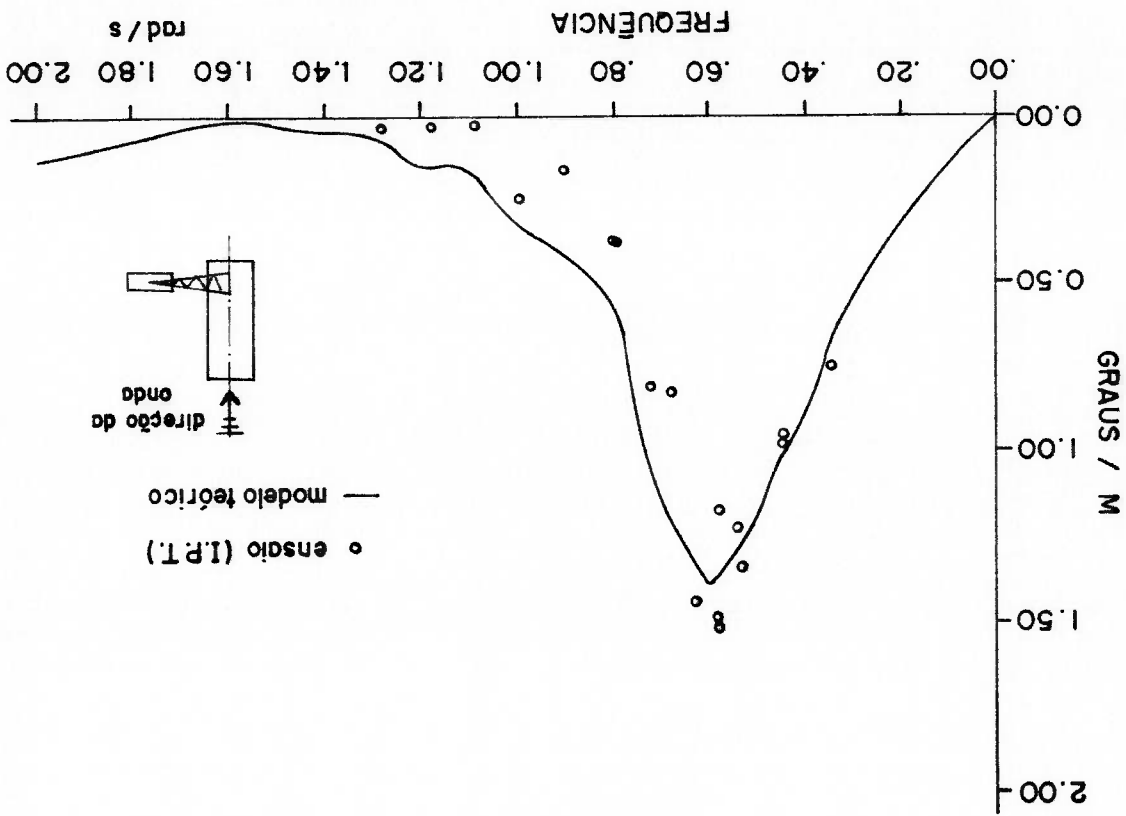
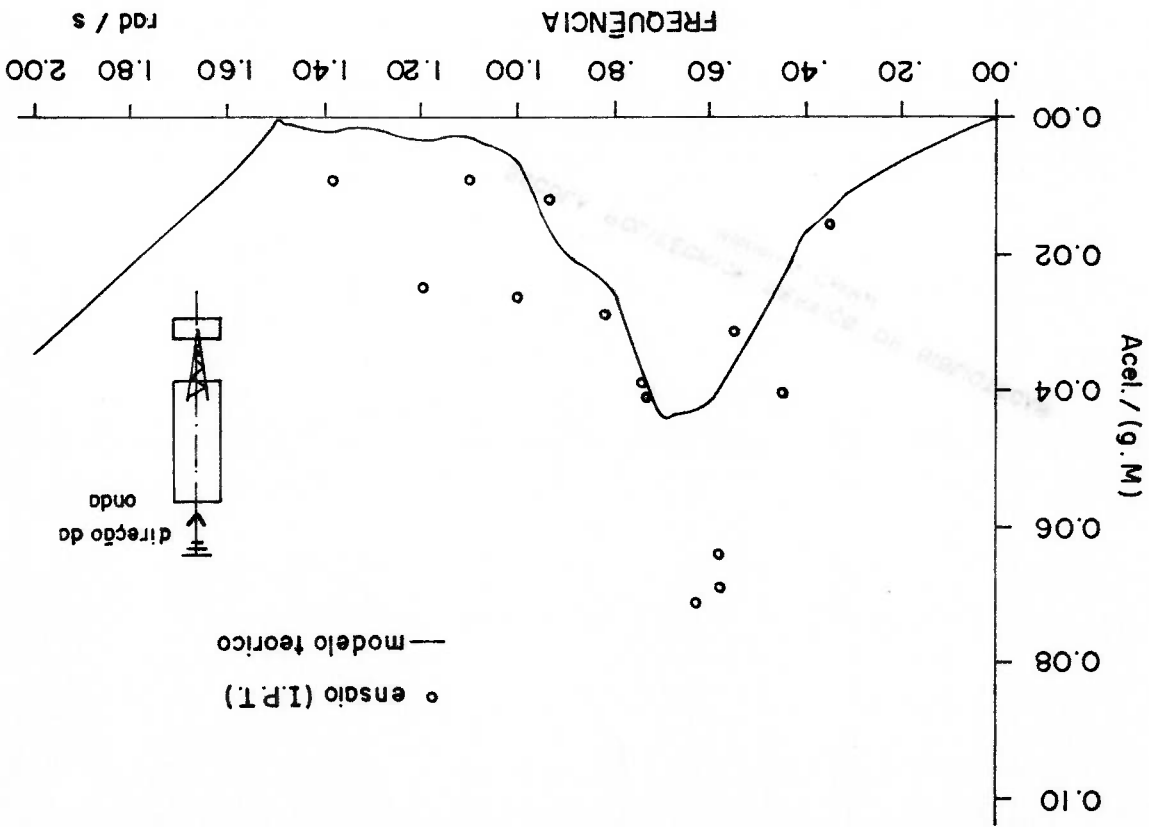


Fig. 4.8 BGL 1 - Função de Transferência do Pitch



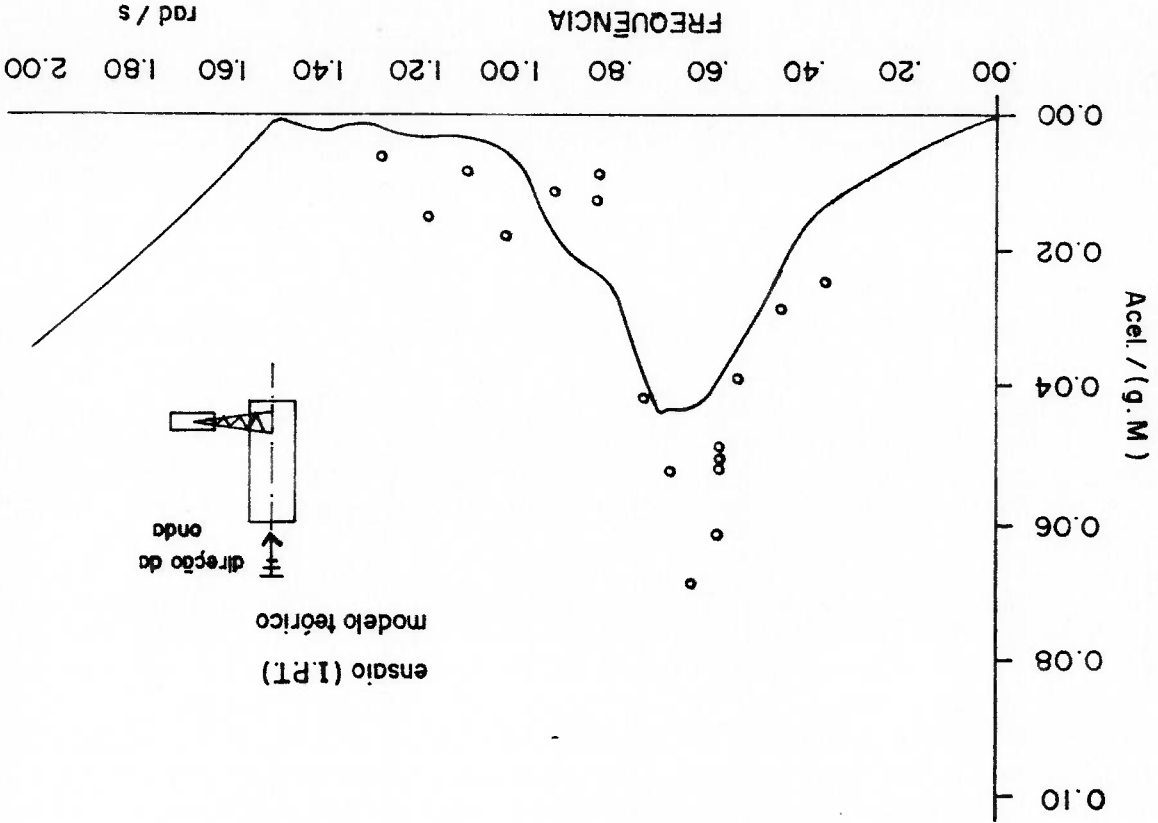
BGL - Pitch

Fig. 4.7 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança



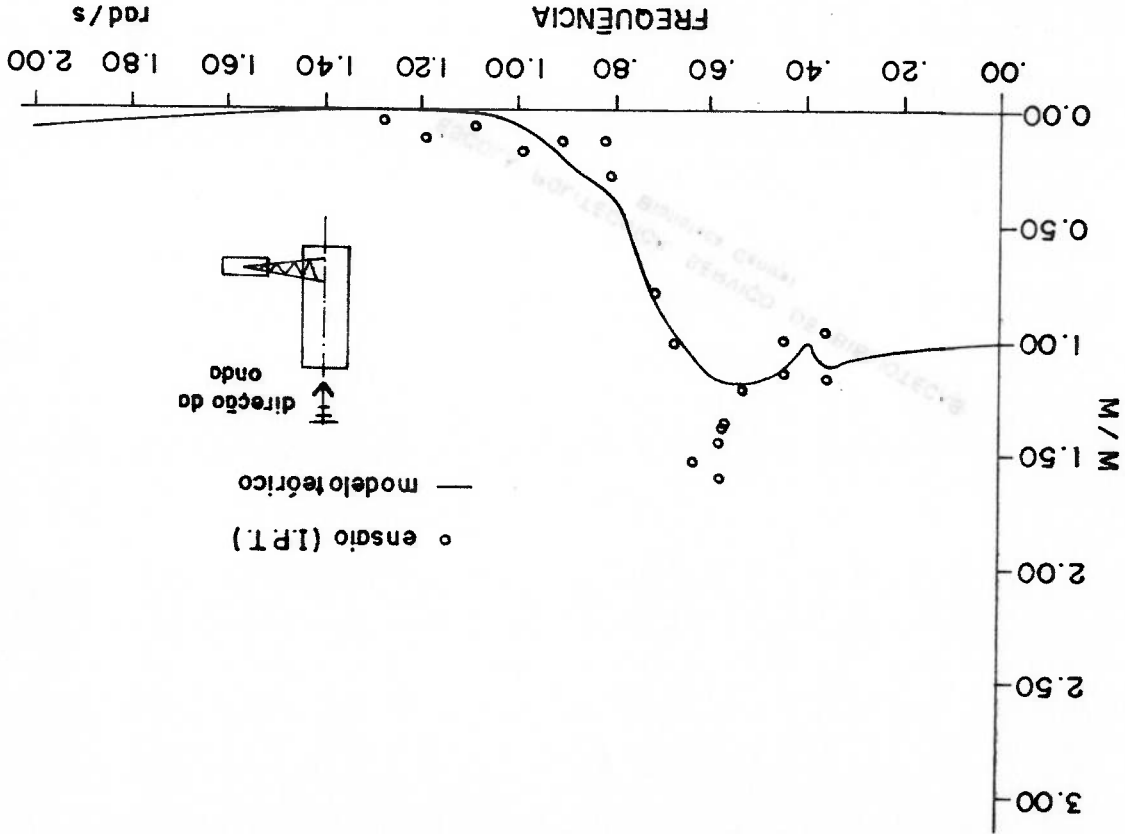
Aceleração Vertical - Ponta de Lança

Fig. 4.10 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança



Aceleração Vertical - Ponta de Lança

Fig. 4.9 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Lança



Movimento Vertical - Ponta de Lança



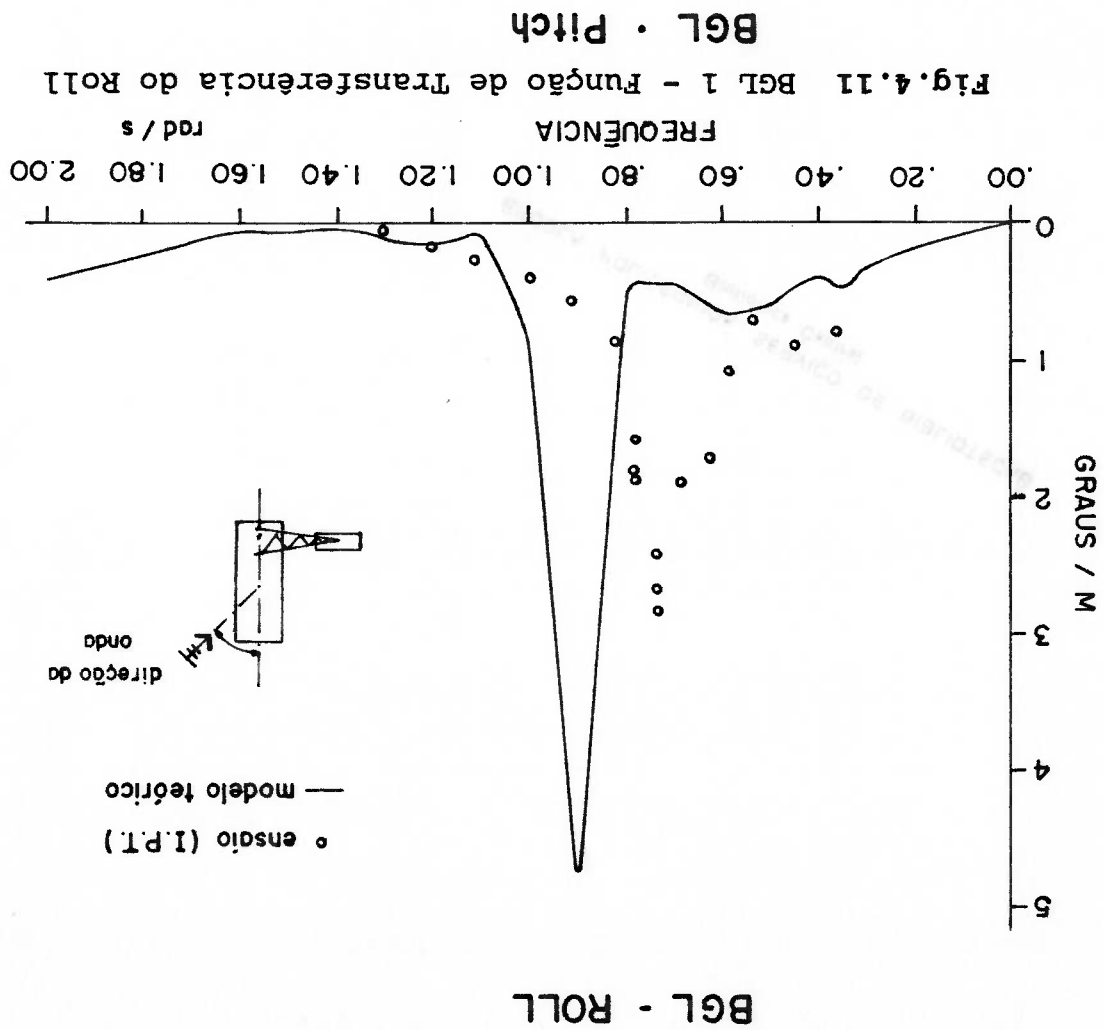
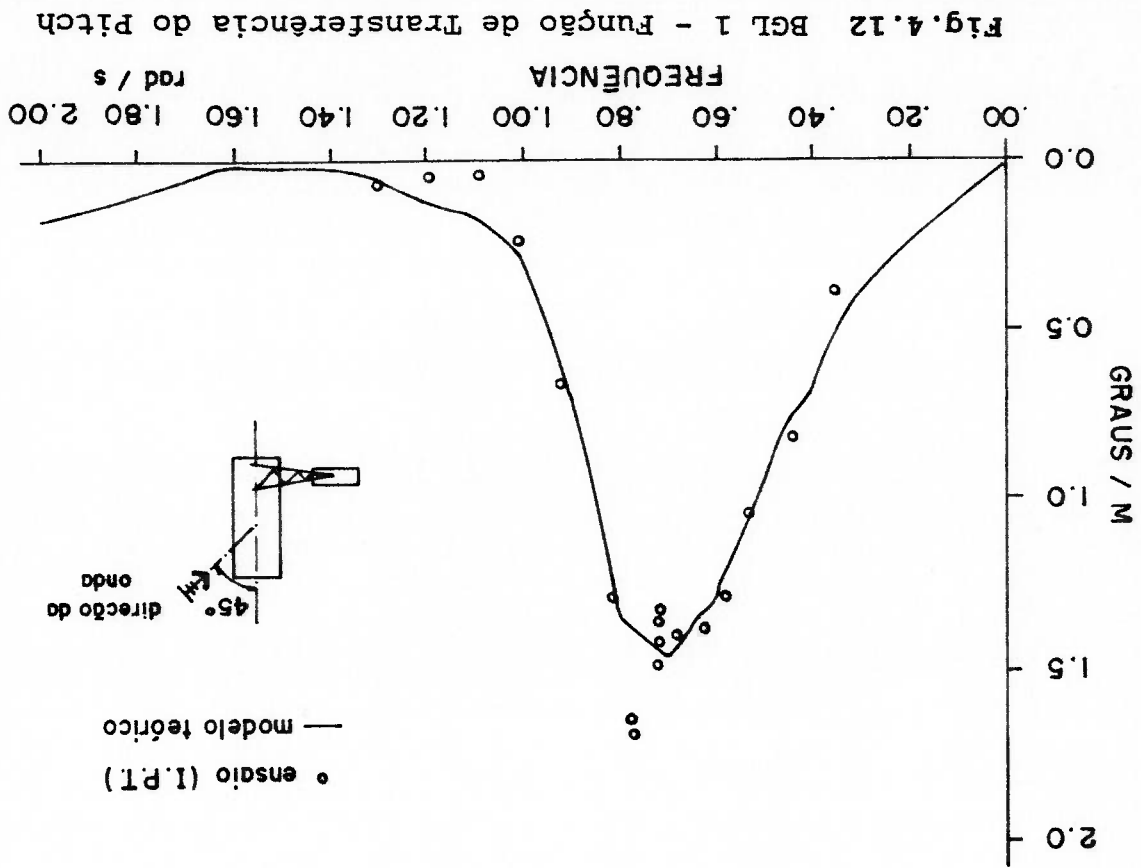


Fig.4.14 BGL 1 - Aceleração Vertical da Ponta de Lança

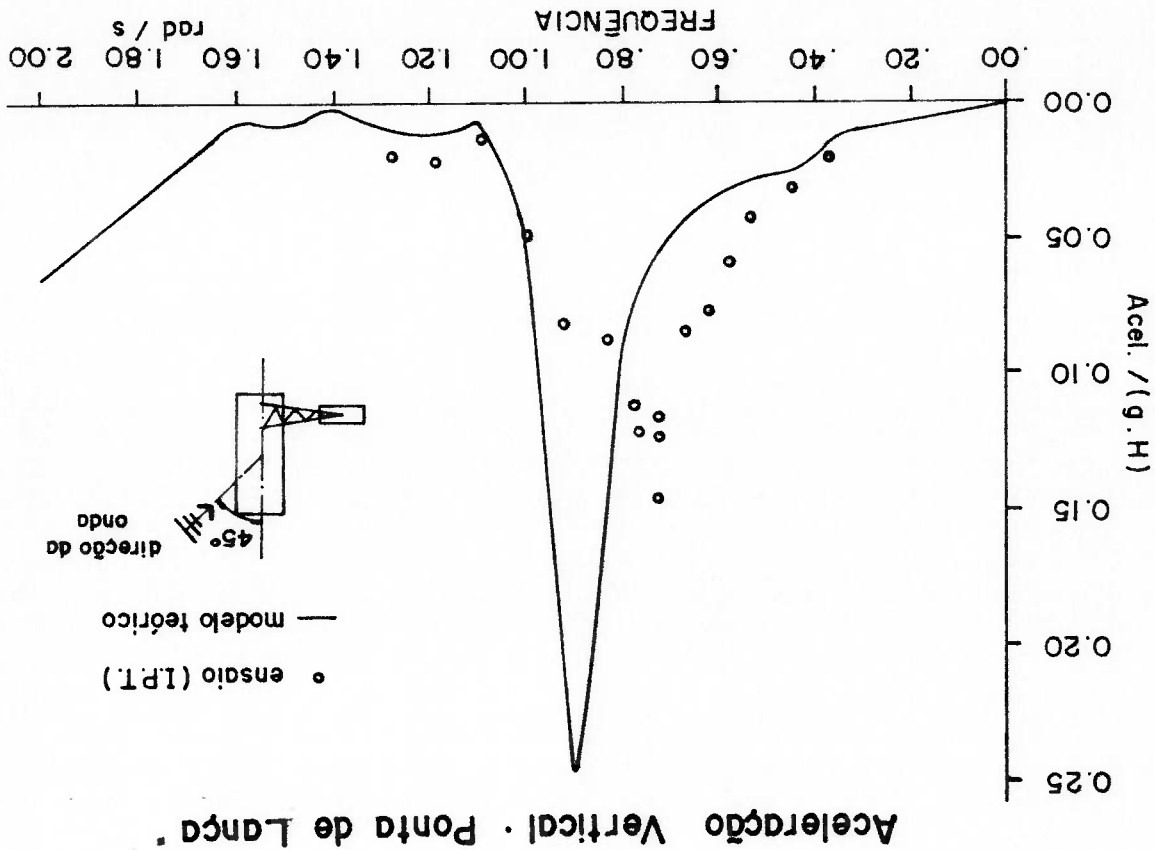
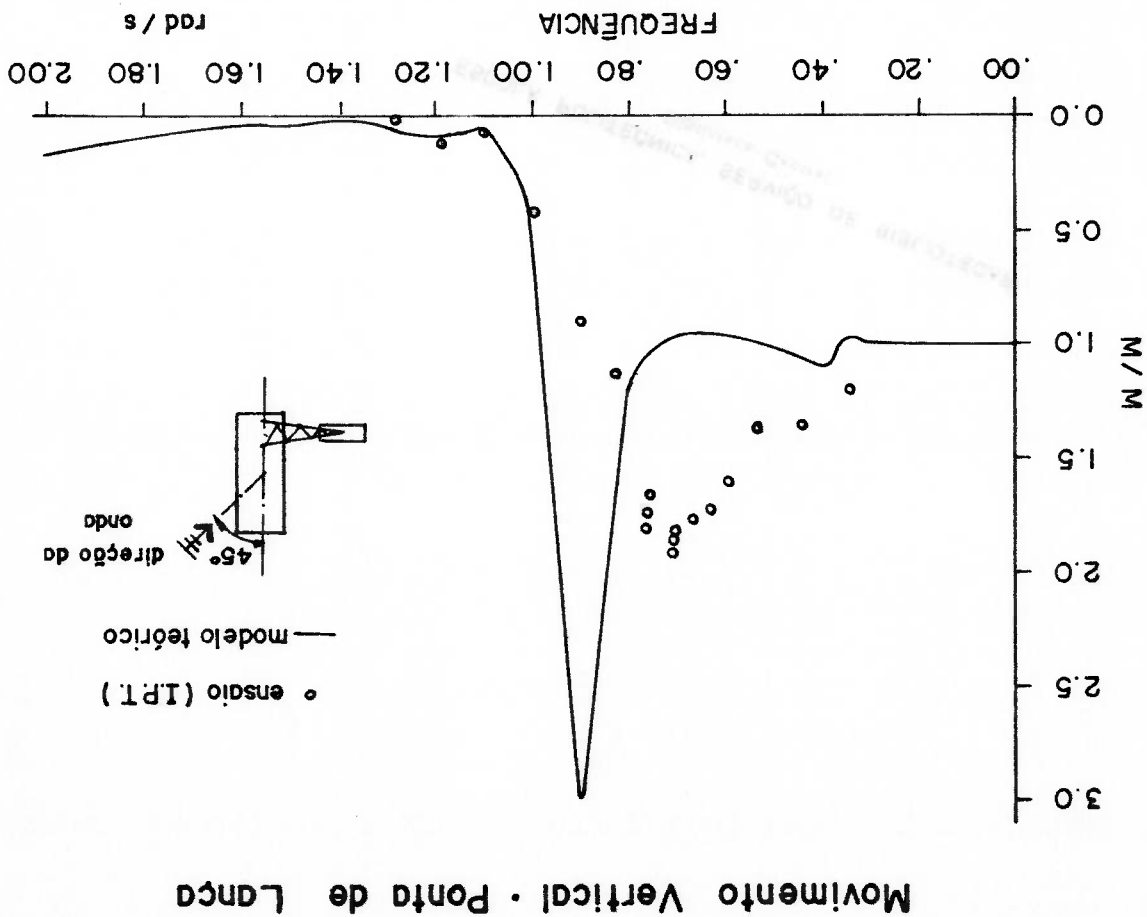


Fig.4.13 BGL 1 - Movimento Vertical da Ponta de Lança



#### 4.4 MOVIMENTO ACOPLADO DAS EMBARCAÇÕES ANALISADAS

Os resultados apresentados no presente item ilustram as características do movimento de E<sub>g</sub> quando considerado o efeito do movimento do módulo suspenso durante o içamento, conforme o modelo descrito nos itens anteriores. A característica das embarcações é apresentada no Cap.3, assim como a característica de suas respostas em ondas regulares.

Para se analisar o movimento da barcaça, comprimentos de cabo de 30, 45 e 60 metros foram considerados. Para a SS os mesmos foram de 45, 75 e 105 metros devido à altura excessiva do convés desse tipo de embarcação. Módulos de 800, 1500 e 2000 ton foram considerados. No entanto, uma análise mais extensiva foi feita para ambas embarcações considerando-se um módulo de 2000 ton, que seria teoricamente o limite de capacidade das mesmas, já que se percebeu que alterações no peso do módulo não são muito significativas no movimento da embarcação, como será mostrado a seguir.

Para a análise do movimento acoplado das embarcações foi considerado sempre um mesmo valor para o deslocamento das mesmas, que seria o deslocamento operacional, admitindo-se que diferenças que poderiam existir no deslocamento quando se considerava módulos de diferentes pesos, seriam compensadas por lastro. As alterações na posição do centro de gravidade e nos raios de giração de roll e pitch devido ao içamento do módulo foram consideradas a partir dos valores de inércia e da posição do CG adotadas para as embarcações sem operar, conforme descrito no Cap.3.

Quando se compara os movimentos das embarcações em condições de operação com os resultados apresentados no Cap.3, nota-se uma característica de movimento bastante diversa, que ilustra a influência que o módulo suspenso exerce nos movimentos. Procurou-se verificar a influência que alguns parâmetros do sistema podem ter na resposta das embarcações, discutida nos sub-ítemns que se seguem.

#### 4.4.1 RESULTADOS DO MOVIMENTO DA BARCAÇA

As principais características da barcaça durante a operação são apresentadas na Tab.4.3 e se referem aos casos a serem discutidos a seguir.

$R_{ij}^3$  = ratios de giração em relação ao sistema de coordenadas

	$X^A$ (m)	$Y^A$ (m)	$Z^A$ (m)
Içamento na Popa	2000 ton	0.0	74.30
Içamento na Popa	2000 ton	-40.00	74.30
Içamento Lateral	1500 ton	-73.50	74.30
Içamento na Popa	800 ton	-73.50	74.30
	KG (m)	GM <sup>I</sup> (m)	GM <sup>L</sup> (m)
2000 ton	14.00	29.90	313.30
Içamento na Popa	2000 ton	29.90	313.30
Içamento Lateral	2000 ton	14.00	313.30
Içamento na Popa	1500 ton	12.35	315.00
Içamento na Popa	800 ton	10.00	317.30
	$R^{xx}$ (m)	$R^{yy}$ (m)	$R^{zz}$ (m)
2000 ton	25.80	40.90	33.90
Içamento na Popa	2000 ton	40.90	33.90
2000 ton	27.80	36.20	29.90
Içamento Lateral	2000 ton	36.20	29.90
Içamento na Popa	1500 ton	23.20	32.00
Içamento na Popa	800 ton	18.80	29.00
	$R^{xy}$ (m)	$R^{xz}$ (m)	$R^{yz}$ (m)
2000 ton	0.00	-22.70	0.00
Içamento na Popa	2000 ton	-22.70	0.00
2000 ton	-11.20	-16.70	15.30
Içamento Lateral	2000 ton	-16.70	15.30
Içamento na Popa	1500 ton	0.00	0.00
Içamento na Popa	800 ton	0.00	0.00

Tab. 4.3 Características da Barcaça Durante o Içamento<sup>3</sup>

As Figs. 4.15 a 4.31 ilustram o movimento da barcaça

acoplado com o módulo suspenso. O heave é o único movimento que praticamente não sofre influência do módulo, como pode ser comprovado pelo conjunto de equações 4.9. Apesar de haver um acoplamento entre o heave e o pitch, tal acoplamento é pequeno, de modo que alterações no movimento de pitch correspondem a alterações muito pequenas no heave da embarcação.

Com referência aos movimentos angulares de roll e pitch, uma notável alteração existe em suas características. Dois picos tendem a aparecer para ambos os movimentos, em períodos de onda correspondente aos períodos naturais dos movimentos do sistema acoplado. Os períodos naturais para os movimentos de roll e pitch desacoplados, são determinados a partir da relação

$$T^n = 2\pi \sqrt{\frac{C_{11}}{(M_{11} + A_{11})}}$$

e para os movimentos angulares do módulo, a partir do período natural de um pêndulo simples dado pela relação

$$T^n = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

sendo L o comprimento do cabo de içamento.

No caso dos movimentos estarem acoplados, os períodos naturais devem diferir dos valores obtidos pela análise modal do acima e podem ser determinados pela análise modal do comportamento do sistema com oito graus de liberdade, ou podem ser aproximadamente determinados a partir da função de transferência dos movimentos.

As Figs. 4.15 a 4.17 ilustram os movimentos de roll da

quanto menor for o comprimento do cabo. Isto deve-se ao fato devido ao efeito de ressonância do pêndulo, tende a ser maior pelas equações do Item 4.2. Já a magnitude dos movimentos, aumento no comprimento do cabo, conforme se pode verificar momentos das forças do cabo no navio, que aumentam com o comprimento do cabo, o que pode ser explicado a partir dos movimentos da embarcação são diretamente proporcionais aos movimentos. Percebe-se que, para períodos de onda menores, os sistemas acoplado, e a segunda na própria magnitude dos maneiras: a primeira na alteração das frequências naturais do menores. O efeito do comprimento do cabo é sentido de duas tendem a deslocar a região de ressonância para períodos Como se poderia esperar, menores comprimentos do cabo

centro de gravidade e alturas metacêntricas das embarcações. apenas o acréscimo de inércia e correspondentes alterações no acoplado entre o módulo e a embarcação e considerando-se embarcações durante o ligamento sem se considerar o efeito metros. Tal curva corresponde à análise do comportamento das apresentam ainda uma curva referida como comprimento de 00 comprimentos de cabo: 30, 45 e 60 metros. As figuras efeito de ressonância do pêndulo. Foram considerados três movimento da embarcação (roll ou pitch), e o segundo ao primeiro pico corresponde à região de ressonância do Para ambos os movimentos, pode-se perceber que o

dos nas Figs. 4.18 e 4.19.

ondas de 45 graus e 180 graus (mar de proa), são representadas incidentes de 45 e 90 graus. Os movimentos de pitch para do peso do módulo na resposta do sistema, para ondas barcaça e a influência dos comprimentos do cabo de ligamento e

de que, quanto maior for o comprimento do cabo, maior é a inércia do módulo em relação ao centro de rotação, extremidade do guindaste, portanto menor serão as rotações do módulo e menor o efeito causado no movimento da embarcação. Quando se compara os movimentos com o caso de mudança nas características do comportamento da embarcação e deslocamento das regiões de ressonância.

A influência que as alterações do peso do módulo exercem na embarcação pode ser considerada pequena, e deve-se principalmente a pequenas alterações nas alturas metacêntrica e inércias da embarcação. O efeito de diferentes pesos é apresentado na Fig.4.17 referente ao roll, por ser esse o movimento mais sensível a alterações na restauração e inércia da embarcação.

Um aspecto bastante relevante a ser considerado, é o fato do pitch poder apresentar amplitudes bem maiores em função do comprimento do cabo, quando se considera o acoplamento com o módulo, em comparação aos movimentos da embarcação sem considerar o efeito do movimento do módulo. Isto pode ser percebido nas Figs.4.18 e 4.19.

As Figs.4.20 e 4.21 ilustram os movimentos de rotação do módulo nas direções X e Y para ondas de 45, 90 e 180 graus. Percebe-se o acoplamento com as rotações da embarcação (roll e pitch) pela coincidência dos períodos de pico dos movimentos. É importante notar que não foi considerado nenhuma forma de amortecimento no movimento do módulo e daí as altas rotações em períodos próximos ao período de ressonância do pendulo.



Os movimentos acoplados de surge e sway da barcaça são

ilustrados nas Figs. 4.22 e 4.23.

O movimento vertical da ponta de lança é apresentado na Figs. 4.24 a 4.26 para incidência de onda de 45, 90 e 180 graus. Nota-se claramente nas figuras que o movimento é uma composição do pitch e do heave quando o guindaste é posicionado na linha de centro da embarcação. Para onda de 90 graus o movimento praticamente coincide com o heave, já que o pitch em tal caso tem amplitudes bem próximas de zero. Para 45 e 180 graus o movimento se comporta como o pitch no que se refere à região de ressonância e à magnitude do movimento nessa região.

A tensão dinâmica no cabo de içamento é apresentada nas Figs. 4.27 e 4.28 para comprimentos do cabo de 30 e 45 metros. A tensão é apresentada na forma adimensional em relação ao peso da embarcação e número de onda,  $K (\omega^2/g)$ . Nota-se da comparação de ambas as figuras que os valores de tensão máxima para diferentes comprimentos de cabo (L), podem alterar consideravelmente. No entanto o valor máximo da tensão dinâmica, que corresponde a um valor numérico em torno de 0,300 para L igual a 30 m, é da ordem de apenas 10% da tensão estática equivalente ao peso do módulo, ou seja em torno de 200000 Kgf.

Outro aspecto importante analisado é a variação na resposta do sistema quando se considera diferentes posições do guindaste em relação à embarcação. Considerando-se o módulo ligado pela lateral da embarcação, os termos cruzados de inércia fazem com que todos os movimentos sejam acoplados. Nota-se em tal caso que devido ao efeito de ressonância, alta

amplitude de roll pode ocorrer até mesmo para ondas de 180 graus, o mesmo em relação ao pitch para ondas de 90 graus. Tais fatos estão ilustrados nas Figs. 4.29 e 4.30. O movimento vertical do guindaste também apresenta alterações em sua característica para içamento na lateral. O roll tende a contribuir para o movimento ao passo que a contribuição do pitch diminui devido à maior proximidade da carga em relação à seção mestra da embarcação. O movimento vertical passa a apresentar características bem diferentes dos casos anteriores como é ilustrado na Fig. 4.31.

#### 4.4.2 RESULTADOS DO MOVIMENTO DA SEMISUBMERSIVEL

A Tab. 4.4 apresenta as características da SS durante o içamento referente às posições do guindaste analisadas, características de inércia e posição do centro de gravidade da embarcação.

As análises do movimento acoplado da barcaça feitas no item anterior podem de uma maneira geral ser estendidas à plataforma semisubmersível. Comprimentos de cabo de 45, 75 e 105 m foram considerados para essa embarcação, maiores que os comprimentos de cabo para a barcaça, devido à excessiva altura de convés apresentada por embarcações SS.

Tab.4.4 Características da SS Durante o Içamento<sup>4</sup>

$X^A$ (m)	$Y^A$ (m)	$Z^A$ (m)
2000 ton	0.0	90.50
Içamento na Popa		
2000 ton	45.00	90.50
Içamento Lateral		
1500 ton	0.0	90.50
Içamento na Popa		
2000 ton	25.75	2.55
Içamento na Popa		
2000 ton	25.75	2.55
Içamento Lateral		
1500 ton	3.70	3.70
Içamento na Popa		
2000 ton	$R^{xy}$ (m)	$R^{yz}$ (m)
Içamento na Popa		
2000 ton	36.20	33.20
Içamento na Popa		
2000 ton	37.50	32.40
Içamento Lateral		
1500 ton	34.70	32.40
Içamento na Popa		
2000 ton	$R^{xz}$ (m)	$R^{yz}$ (m)
Içamento na Popa		
2000 ton	0.00	0.0
Içamento na Popa		
2000 ton	-8.30	14.20
Içamento Lateral		
1500 ton	0.0	0.0
Içamento na Popa		

<sup>4</sup> $R_{ij}$  = raios de giração em relação ao sistema de coordenadas

Movimentos angulares de plataformas SS como já comentado, apresentam amplitudes bastante pequenas, quando comparados com barcas ou navios de formas convencionais. Quando se considera o efeito acoplado, nota-se um valor de pico bastante acentuado, tanto para o roll como para o pitch, devido ao efeito de ressonância do pêndulo. Esses movimentos estão ilustrados nas Figs. 4.32 a 4.36. O efeito de variações no comprimento do cabo de içamento pode ser explicado de maneira análoga à barca, isto é, comprimentos maiores implicam em períodos de ressonância maiores e amplitudes de movimento menores na região de ressonância. O efeito de variações do peso do módulo no movimento da EG é pequeno e ilustrado apenas para o roll na Fig. 4.34. Deve-se notar das curvas de resposta da SS como a magnitude da resposta para os movimentos angulares pode ser da ordem de até 10 vezes maior que os movimentos esperados para esse tipo de embarcação. Esse fator de amplificação excessivo ocorre na verdade em uma frequência bem definida, próxima à frequência de oscilação do pêndulo, de modo que o pico dos movimentos se apresenta de forma bastante aguda.

As rotações do módulo em torno dos eixos X e Y são ilustradas nas Figs. 4.37 e 4.38. Surge e sway acoplados são apresentados na Fig. 4.39 e 4.40 e tendem a apresentar valores bastante altos na região de ressonância. Através dessas figuras pode-se notar perfeitamente o efeito que a rotação do módulo tem nos movimentos da embarcação pela alta magnitude da resposta na região de ressonância do pêndulo. Nota-se para o surge e o sway o aparecimento de picos que não são característicos do movimento de plataformas SS em

operação normal.

O movimento vertical da extremidade do guindaste para o movimento da popa, é uma composição do heave e do pitch. Para onda de 90 graus o movimento coincide com o heave da embarcação, este por sua vez não sofre a influência do acoplamento com o movimento do módulo. Para ondas de 45 e 180 graus, dois picos ocorrem, correspondentes ao efeito de ressonância do pêndulo no pitch e ao período natural do heave. As características desse movimento estão ilustradas nas Figs. 4.41 e 4.42.

A tensão dinâmica no cabo, ilustrada na Fig. 4.43, apresenta a mesma tendência do movimento vertical da ponta de lança, com valores máximos ocorrendo nas regiões de ressonância deste movimento. Ela pode ser da ordem de 33% do peso do módulo, que corresponde à tensão estática no cabo, referente ao valor numérico de 0,60 da Fig. 4.43.

Por fim as características da resposta quando o içamento é feito pela lateral são apresentadas nas Figs. 4.44 a 4.46.

Fig. 4.16 Função de Transferência do Roll Acoplado

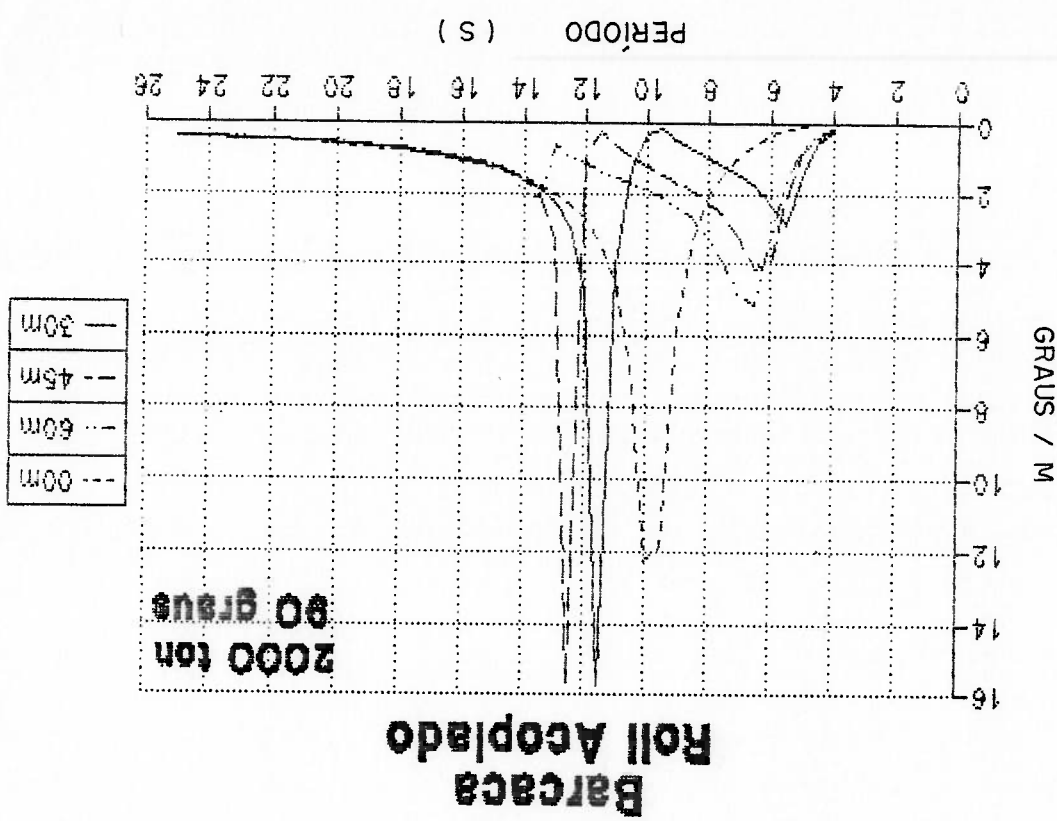


Fig. 4.15 Função de Transferência do Roll Acoplado

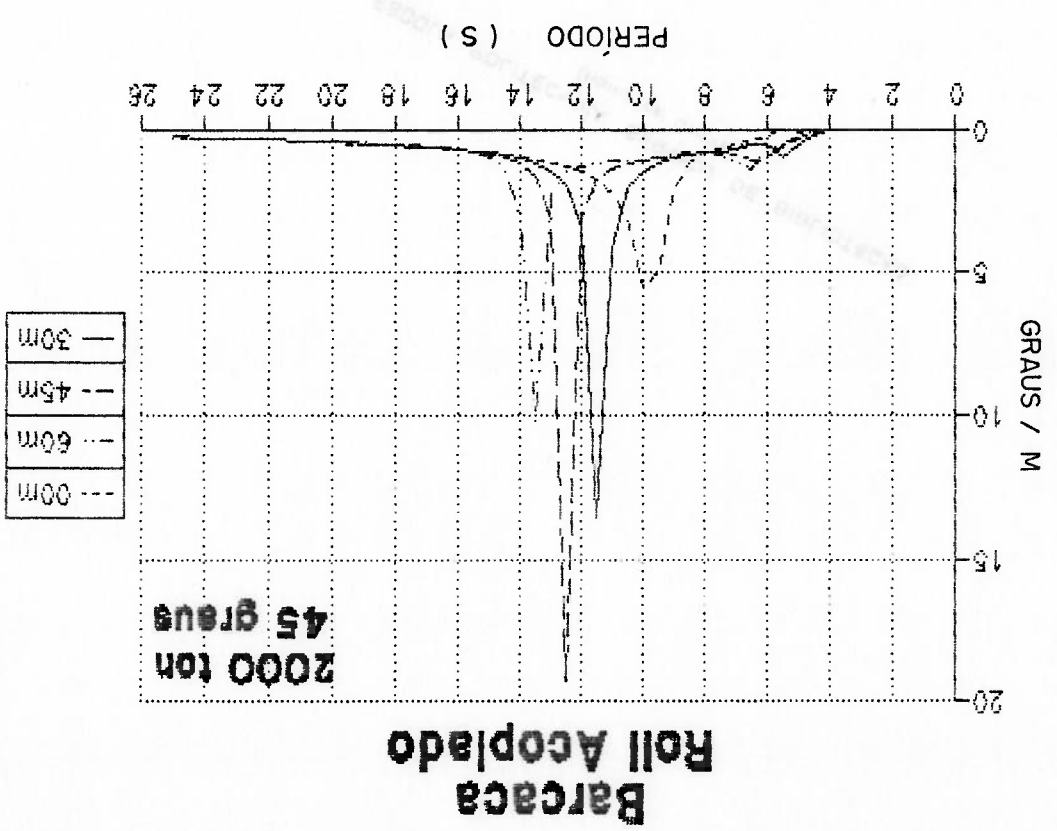


Fig. 4.18 Função de Transferência do Pitch Acoplado

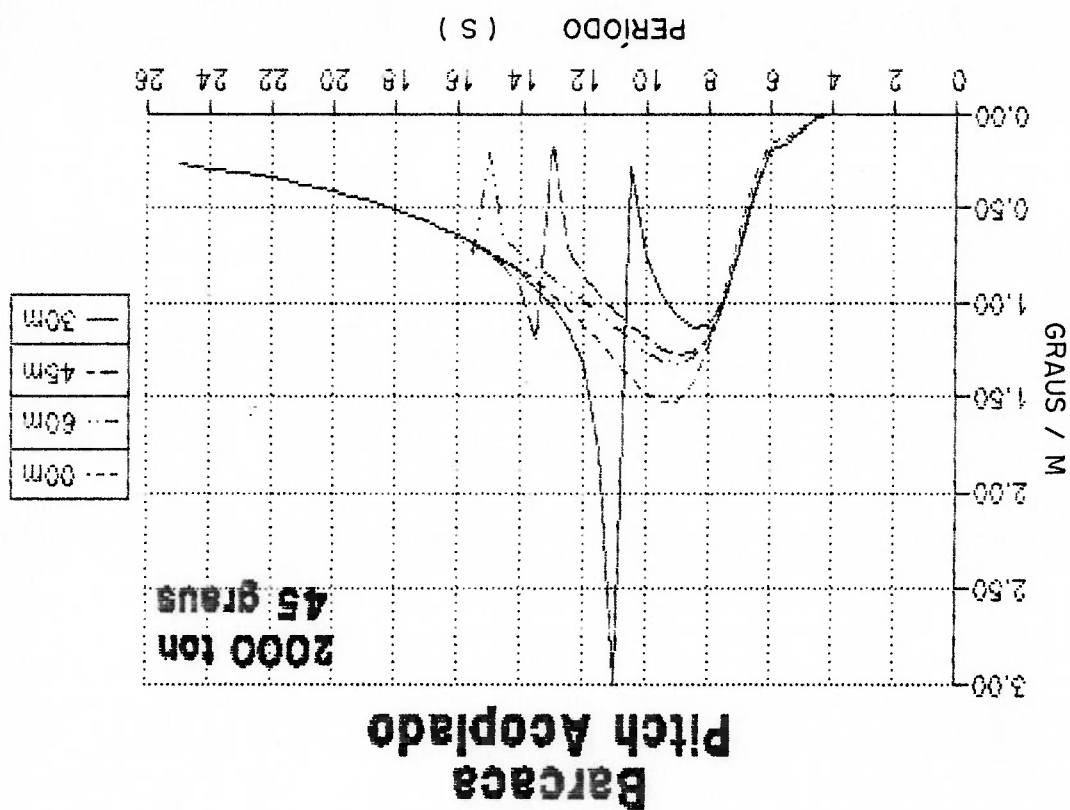


Fig. 4.17 Função de Transferência do Roll Acoplado

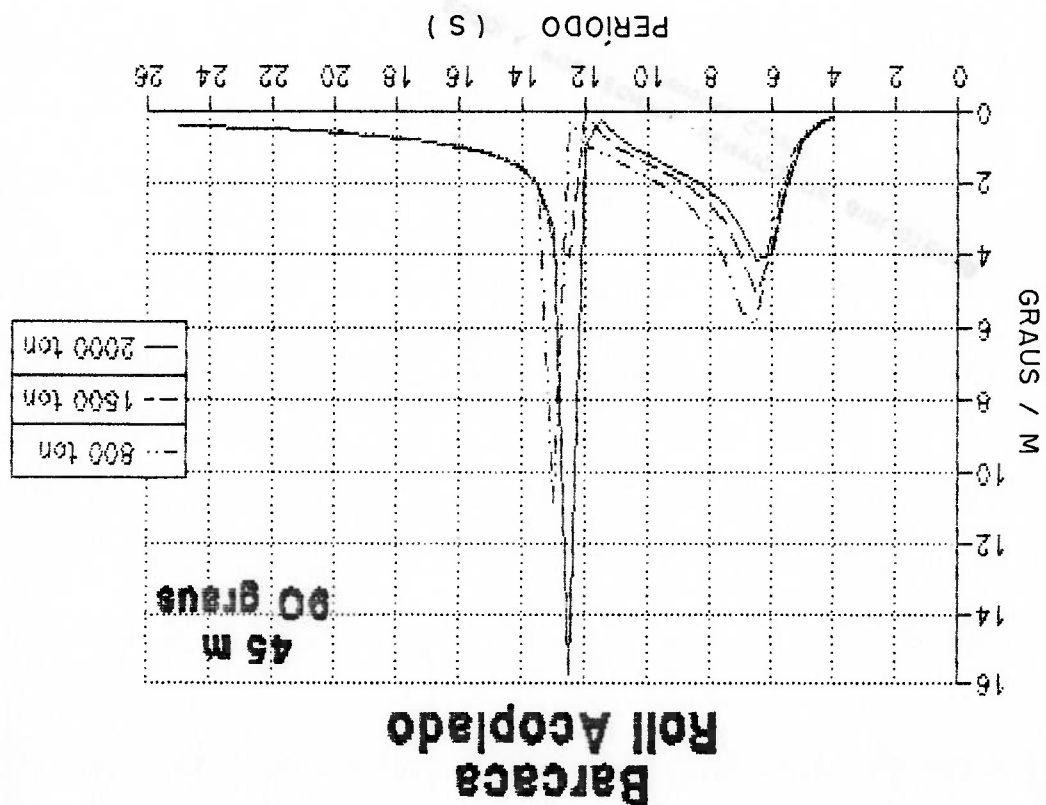


Fig. 4.20 Rotação do Módulo na Direção X ( $\phi_1$ )

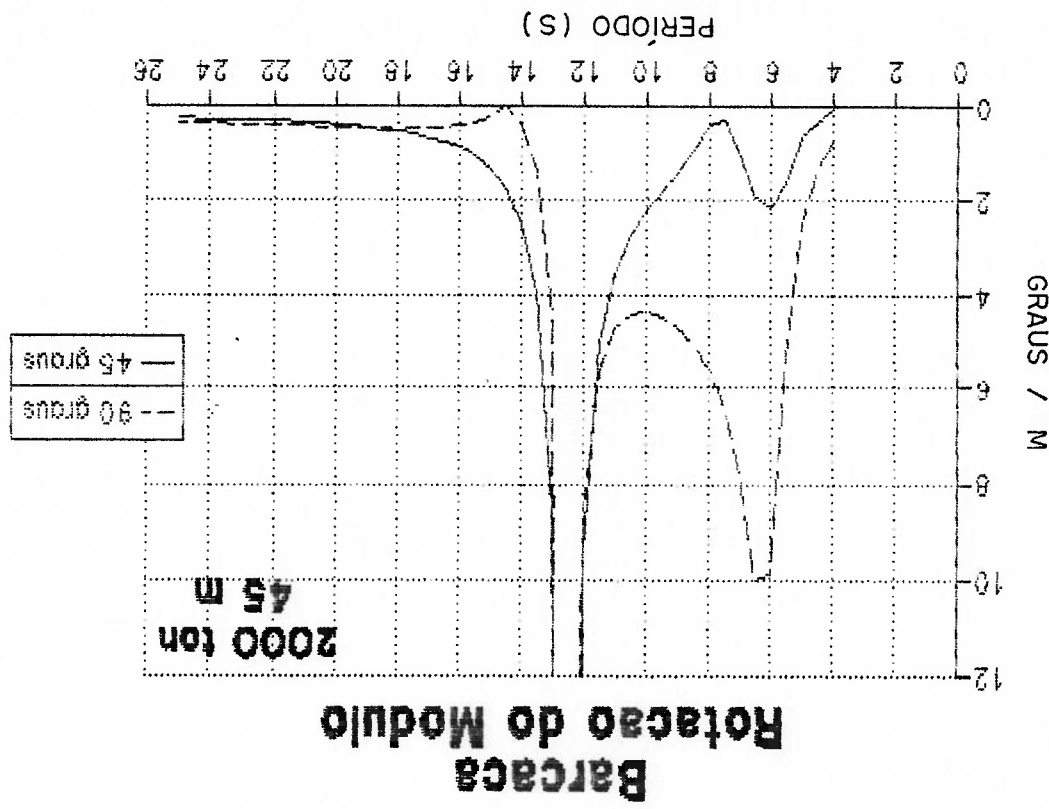


Fig. 4.19 Função de Transferência do Pitch Acoplado

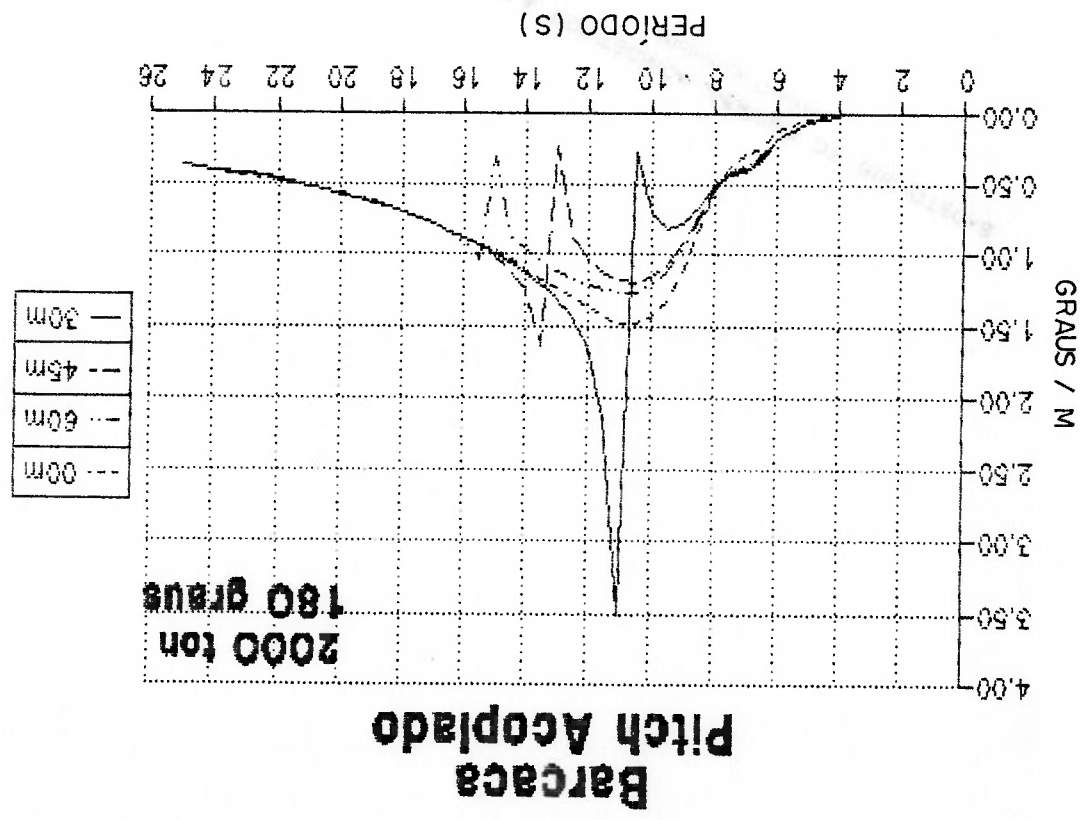




Fig. 4.22 Função de Transferência do Surge Acoplado

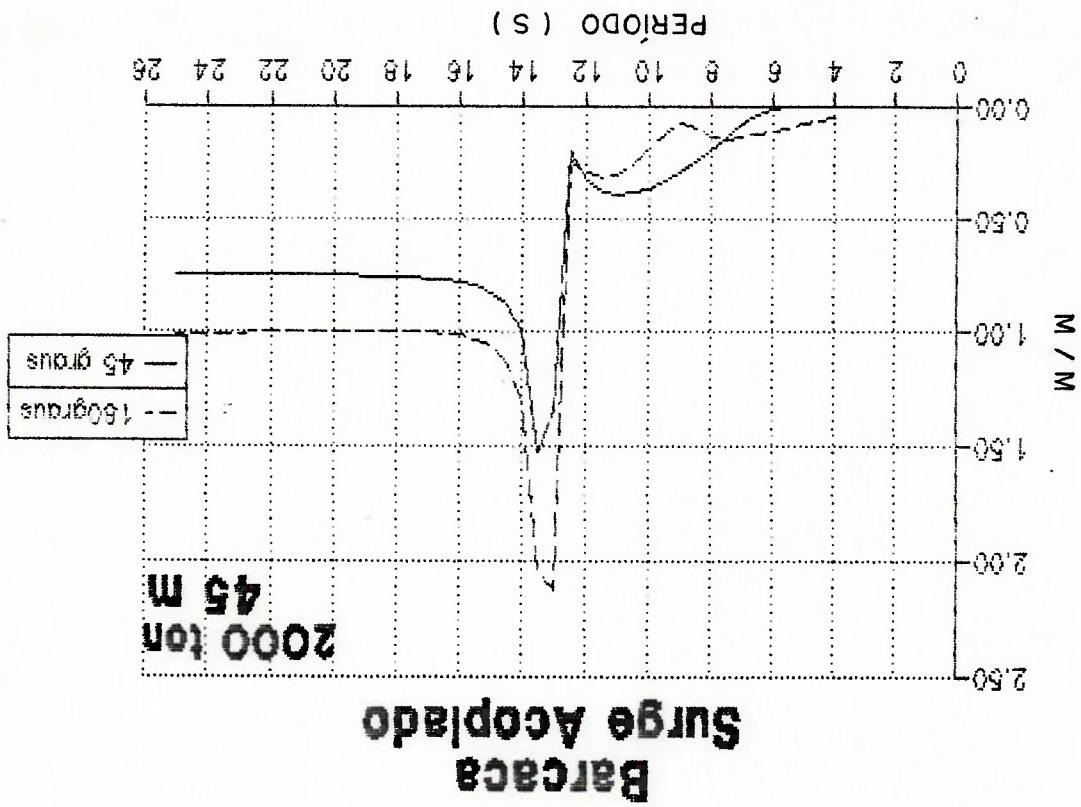


Fig. 4.21 Rotação do Módulo na Direção Y ( $\phi^2$ )

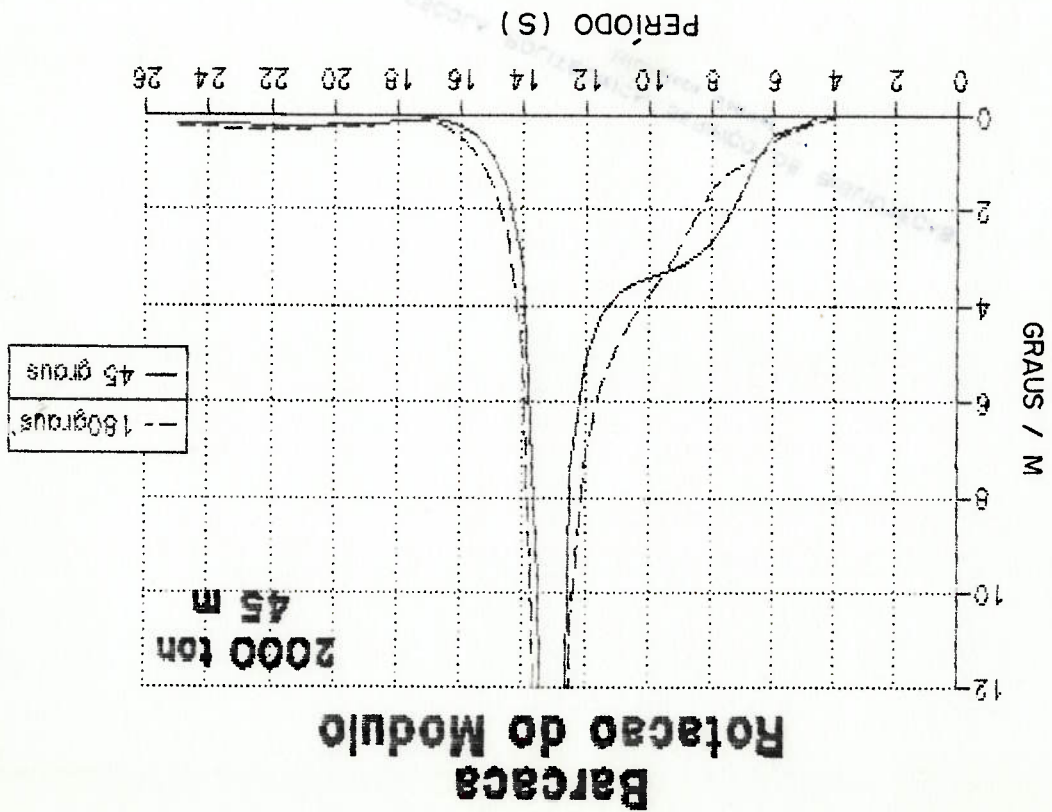


Fig. 4.24 Movimento Vertical da Ponta de Lança

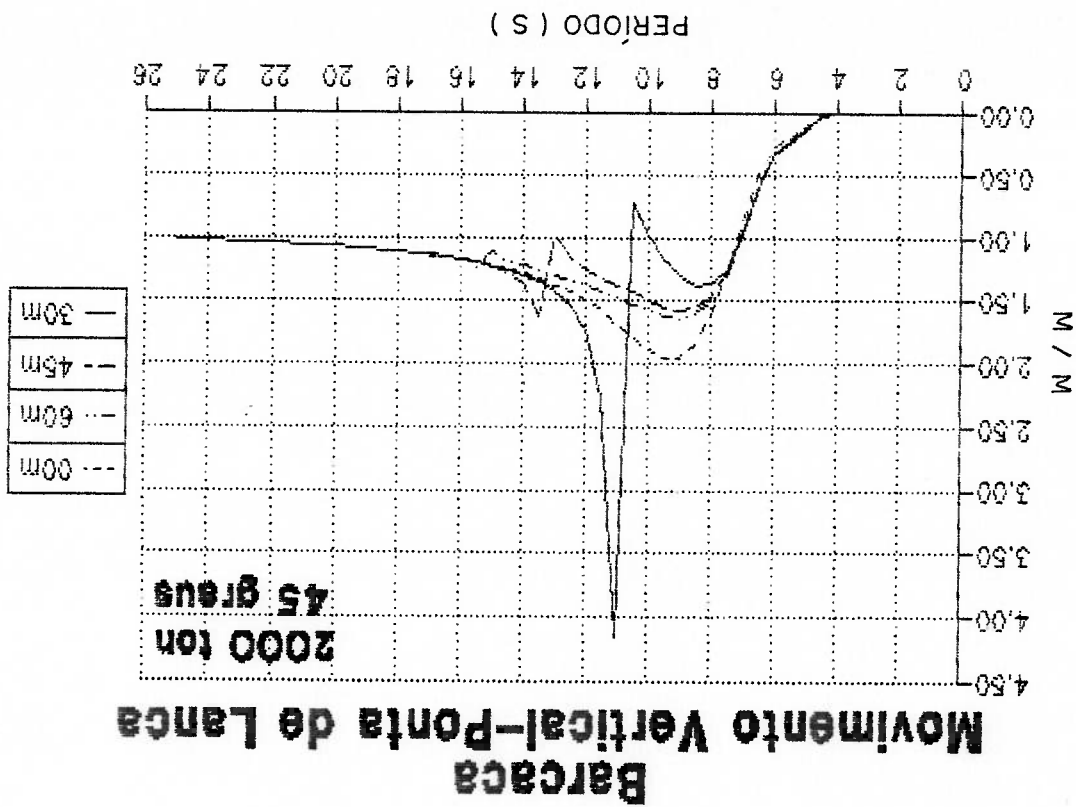
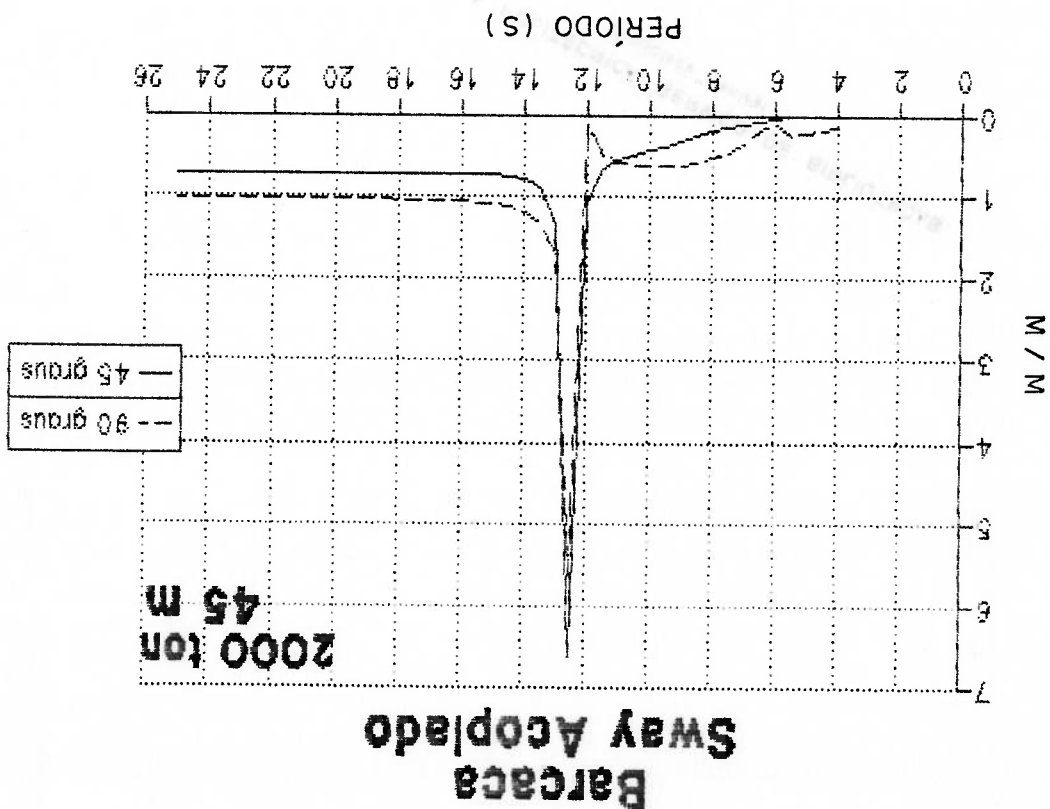


Fig. 4.23 Função de Transferência do Sway Acoplado



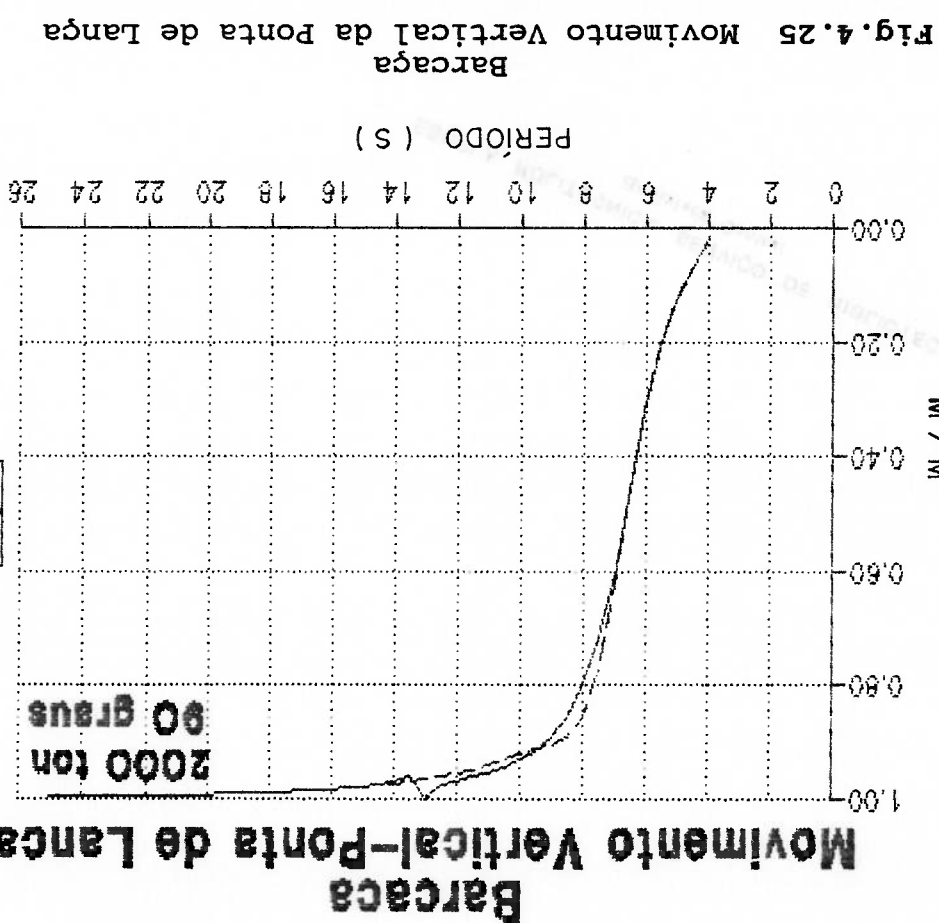


Fig.4.25 Movimento Vertical da Ponta de Lanca Barcaca

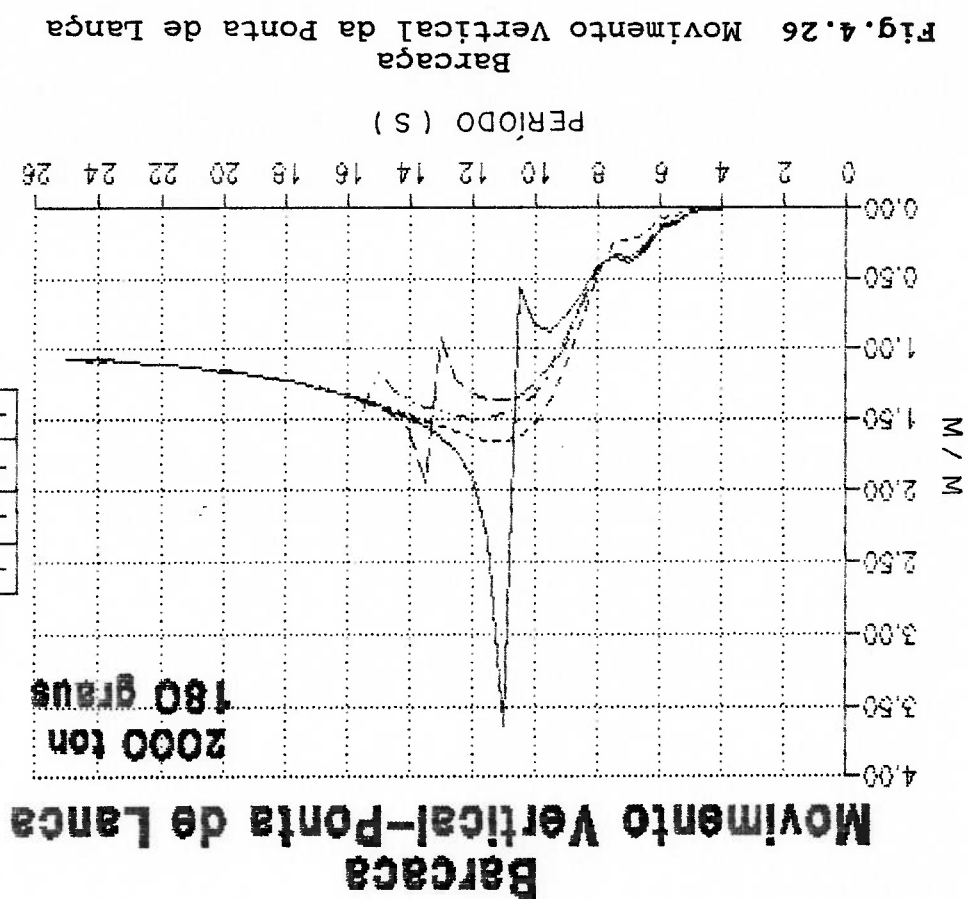


Fig.4.26 Movimento Vertical da Ponta de Lanca Barcaca

Fig. 4.28 Força Dinâmica no Cabo de Içamento  
Barcaça

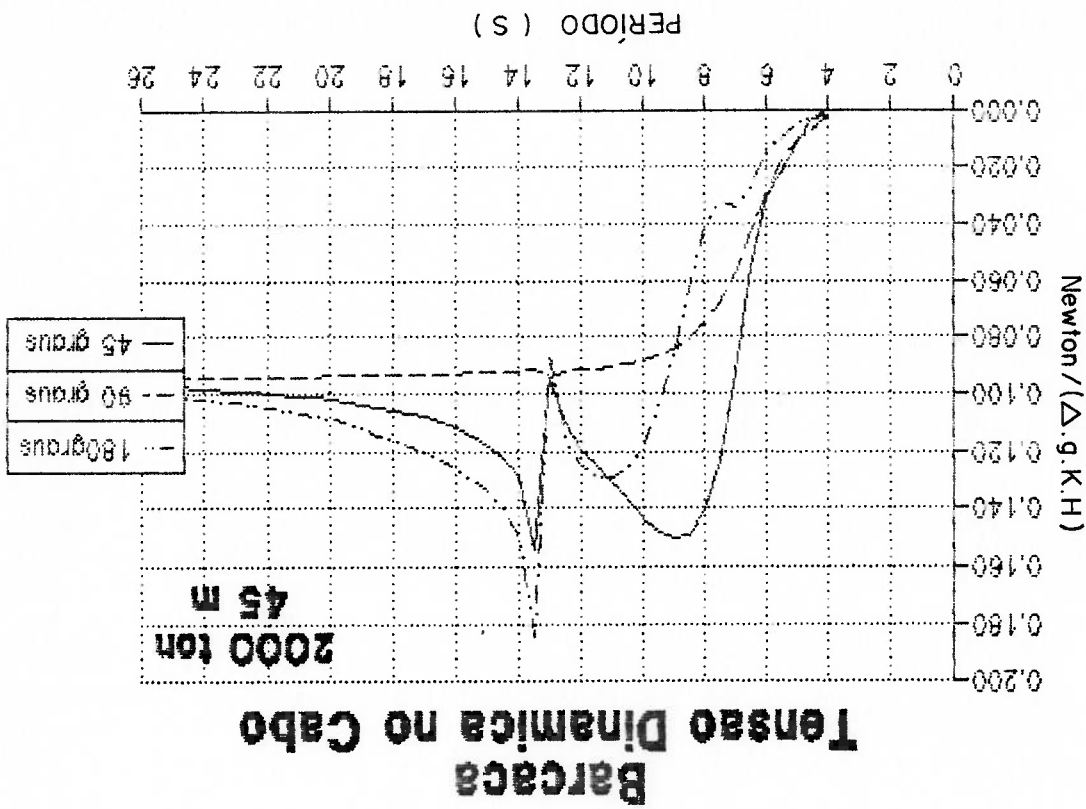


Fig. 4.27 Força Dinâmica no Cabo de Içamento  
Barcaça

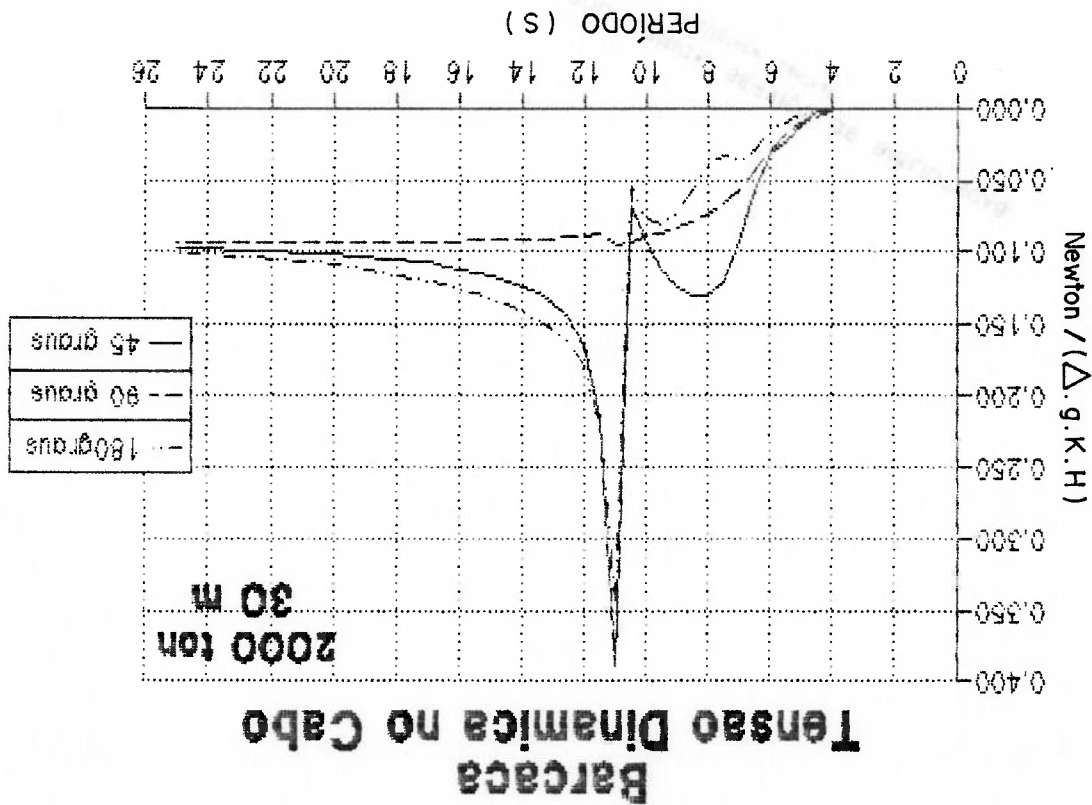


Fig.4.30 Função de Transferência do Pitch Acoplado  
Barcaça - Içamento Lateral

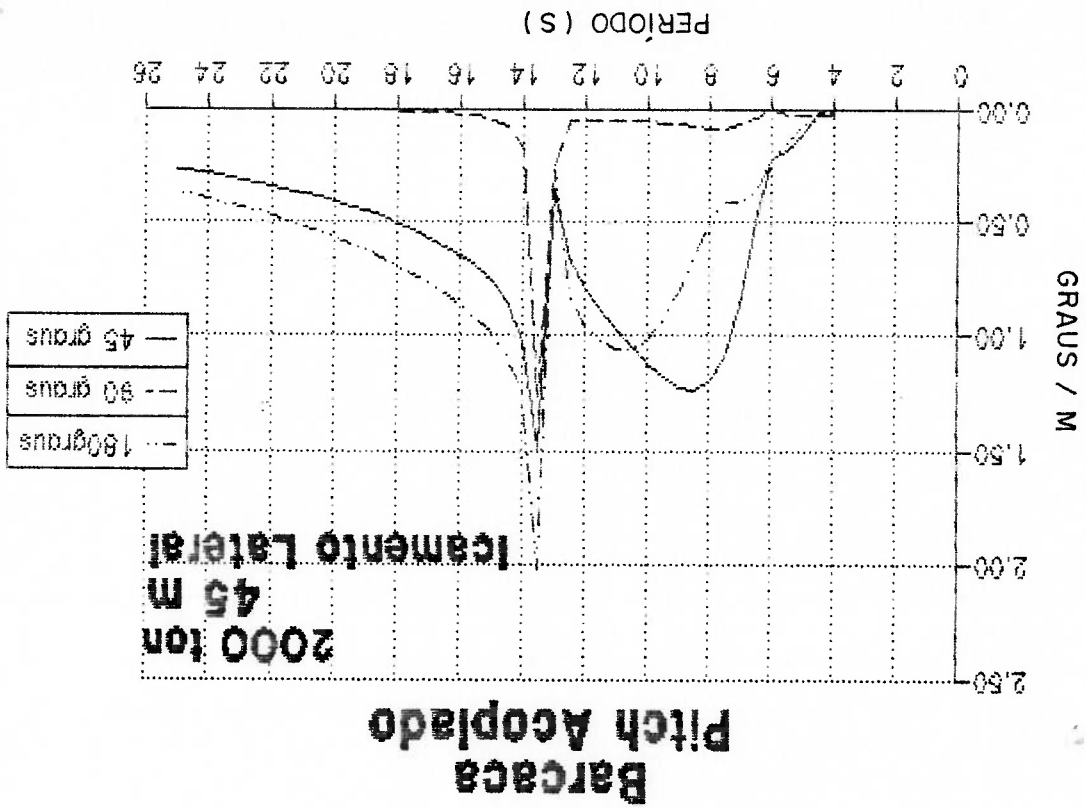


Fig.4.29 Função de Transferência do Roll Acoplado  
Barcaça - Içamento Lateral

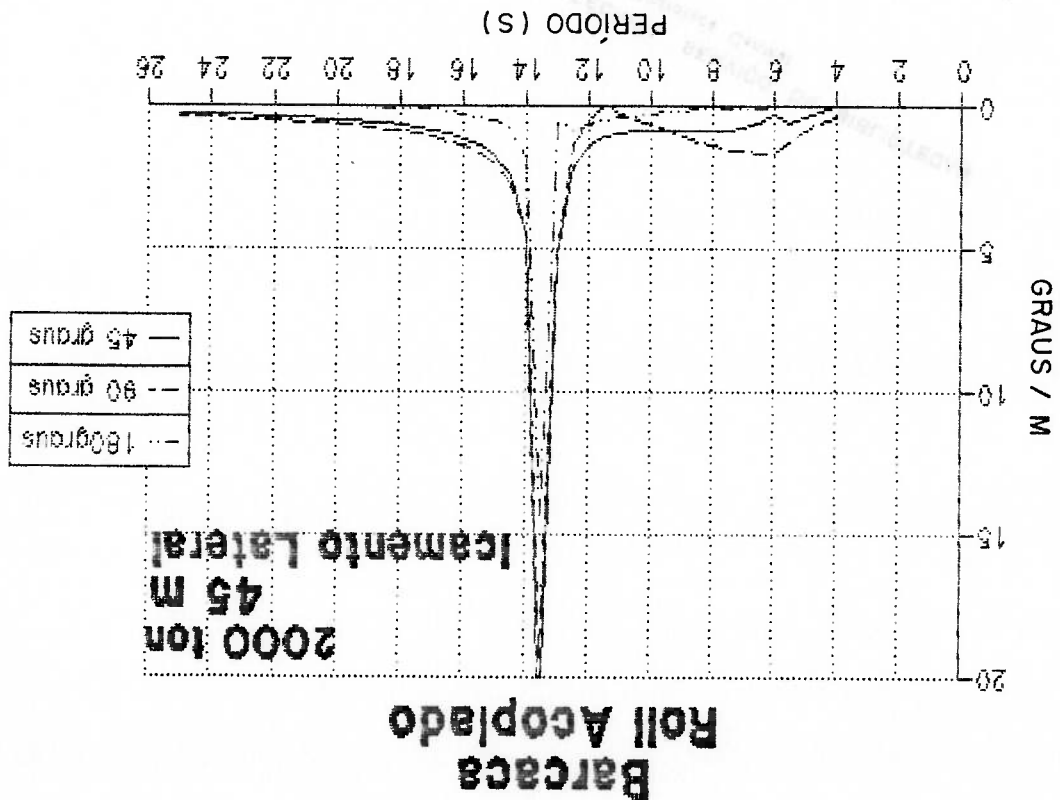


Fig.4.32 SS - Função de Transferência do Roll Acoplado

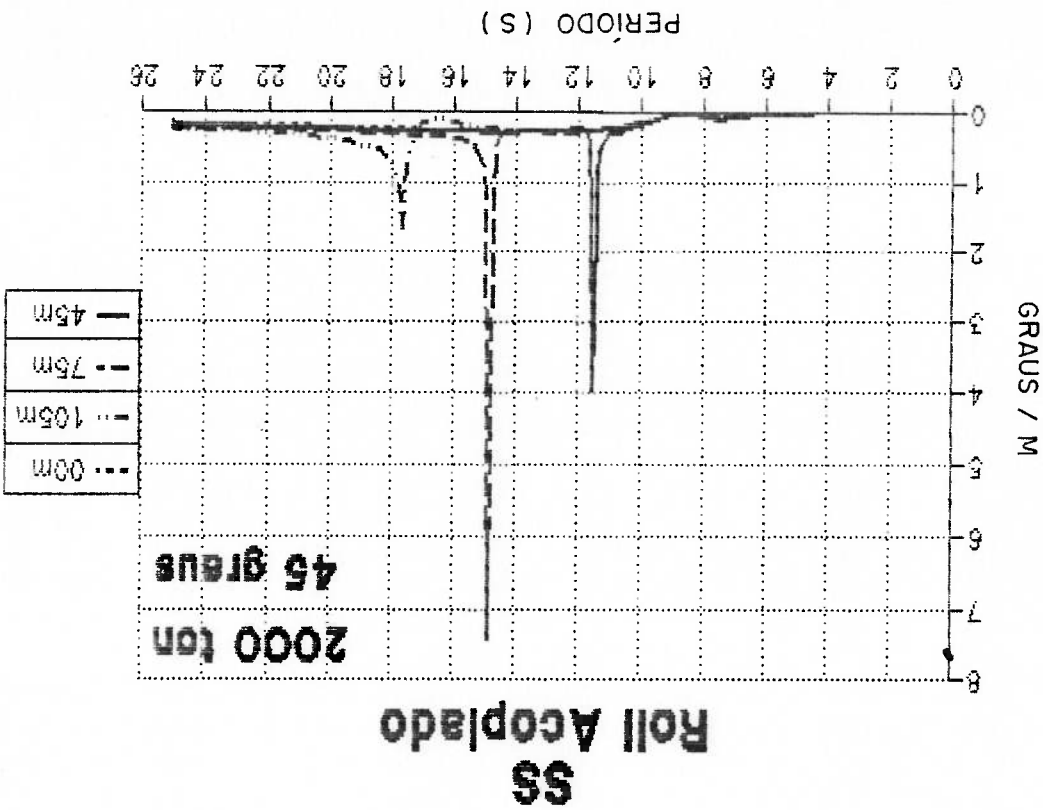


Fig.4.31 Barcaça - Içamento Lateral - Movimento Vertical da Ponta de Lança

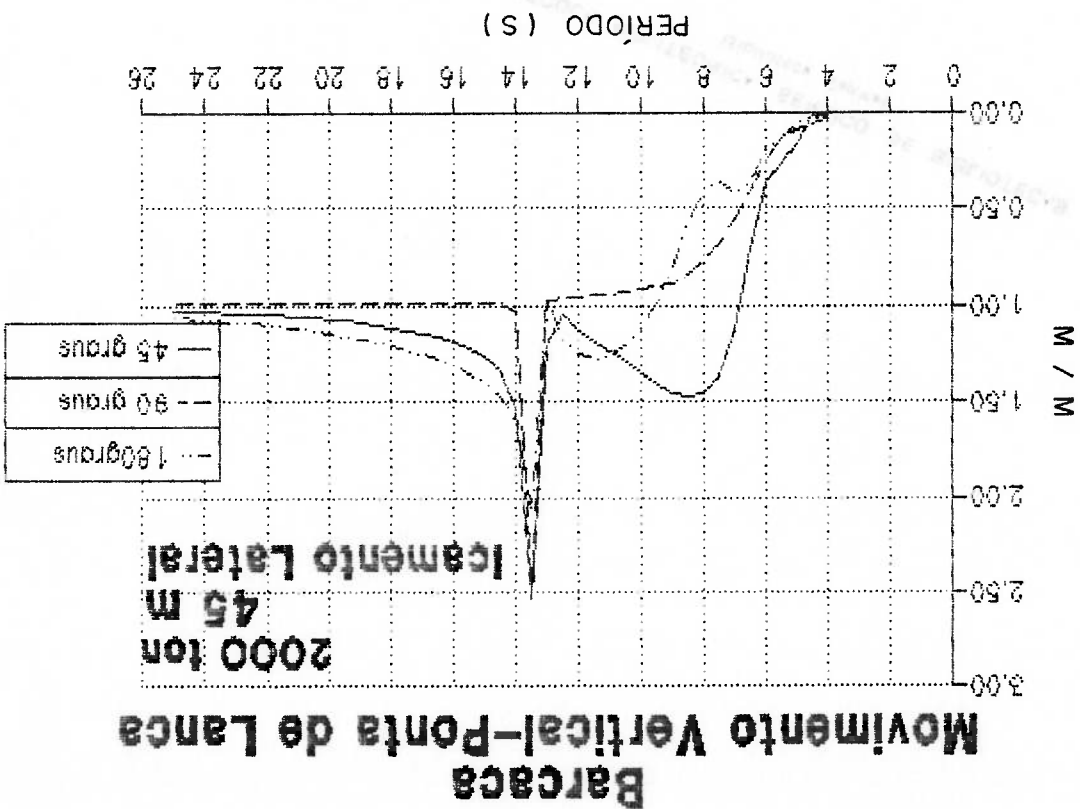


Fig. 4.34 SS - Função de Transferência do Roll Acoplado

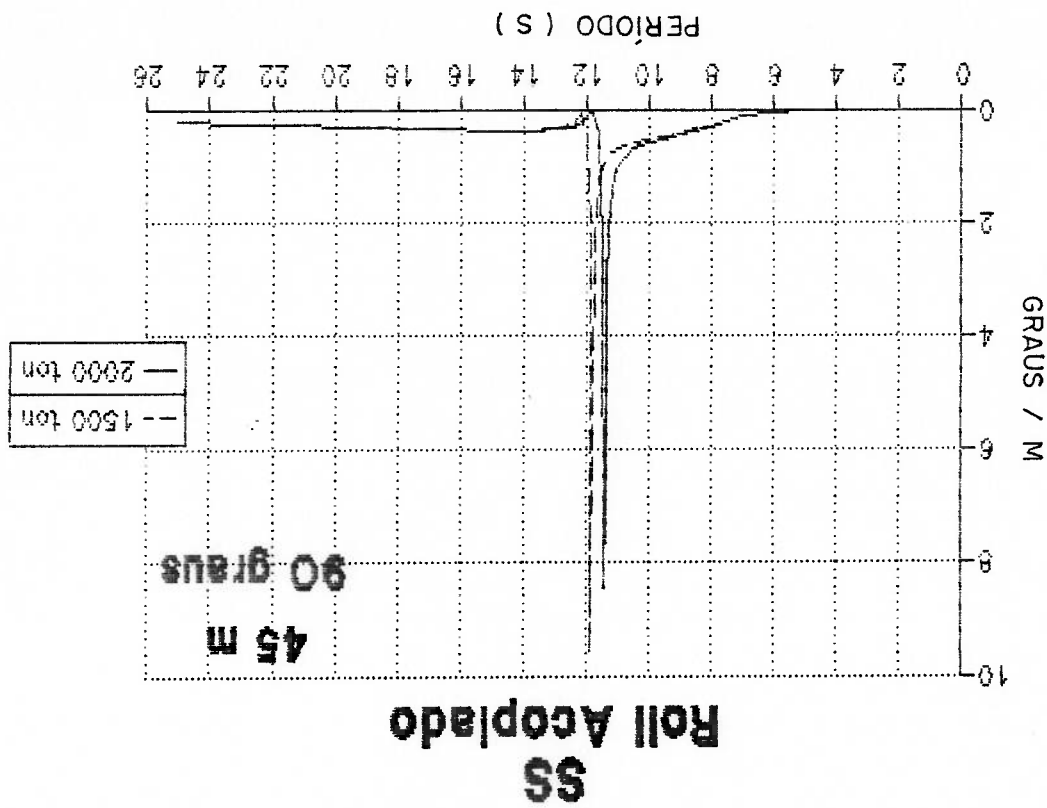


Fig. 4.33 SS - Função de Transferência do Roll Acoplado

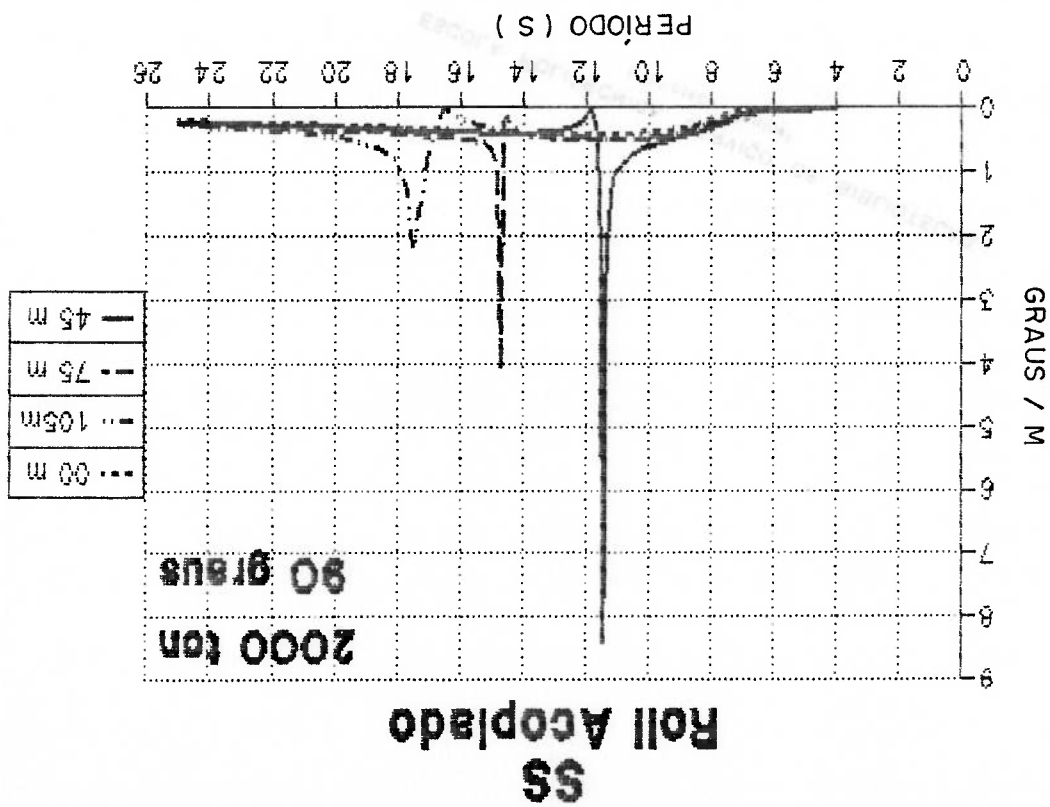


Fig.4.36 SS - Função de Transferência do Pitch Acoplado

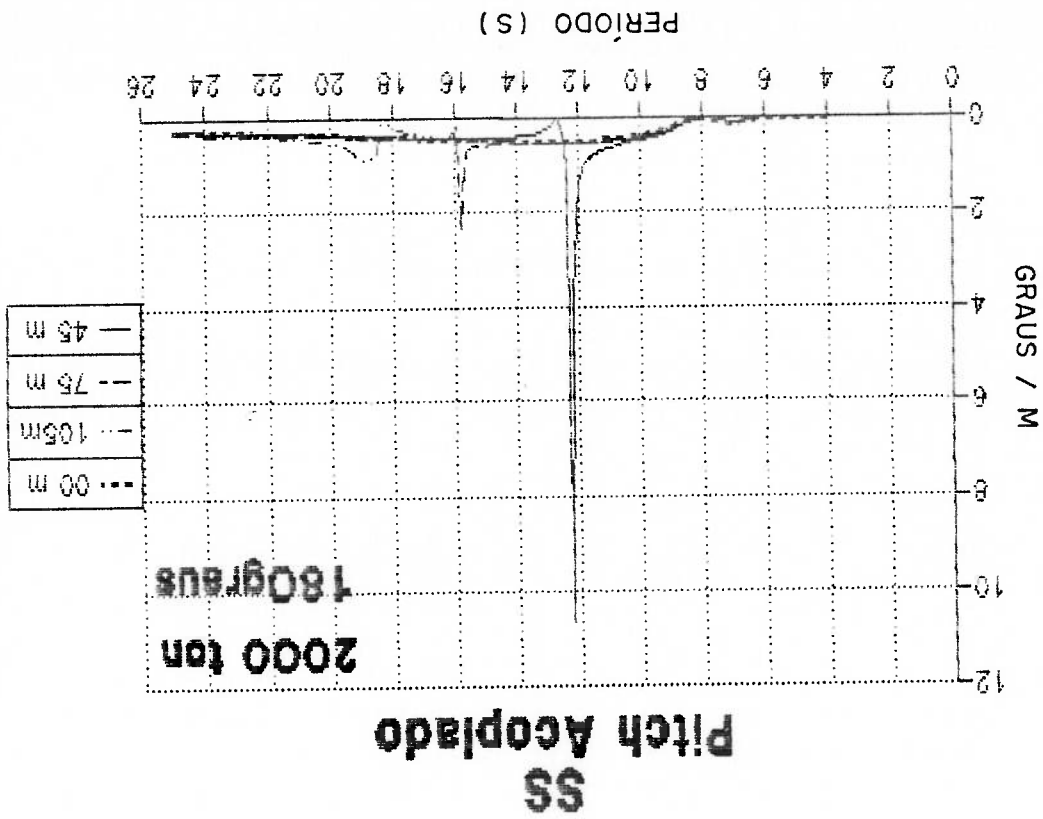


Fig.4.35 SS - Função de Transferência do Pitch Acoplado

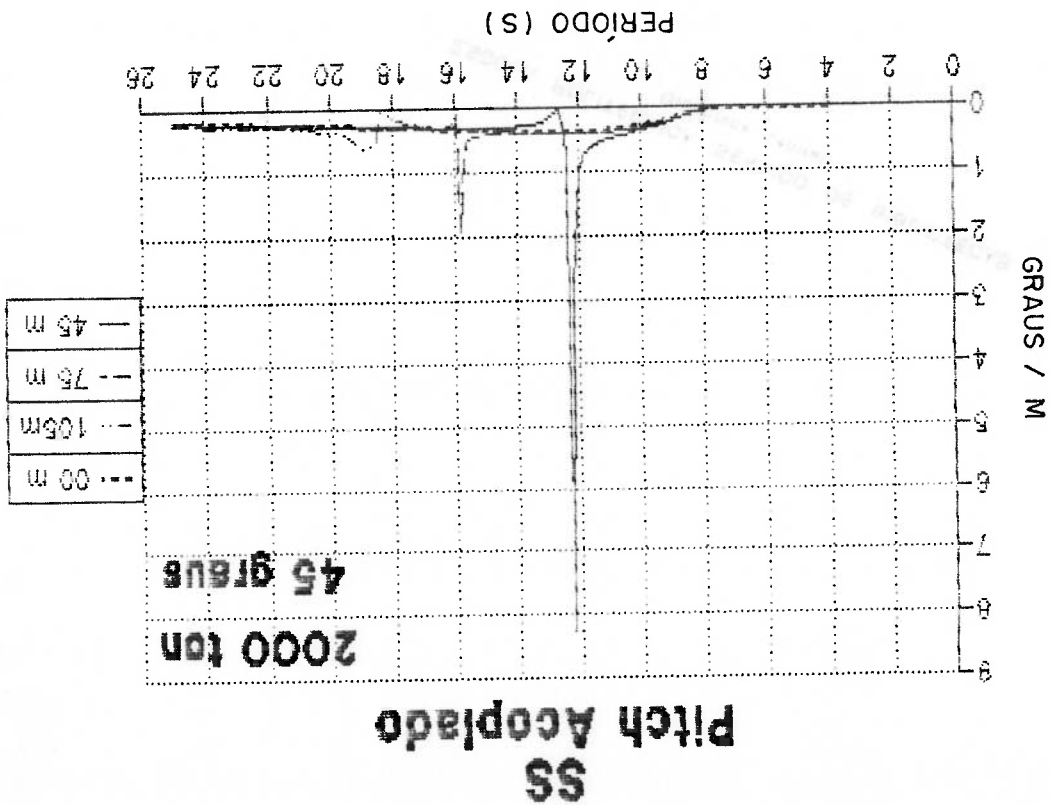




Fig.4.38 SS - Rotação do Módulo na Direção Y ( $\phi^2$ )

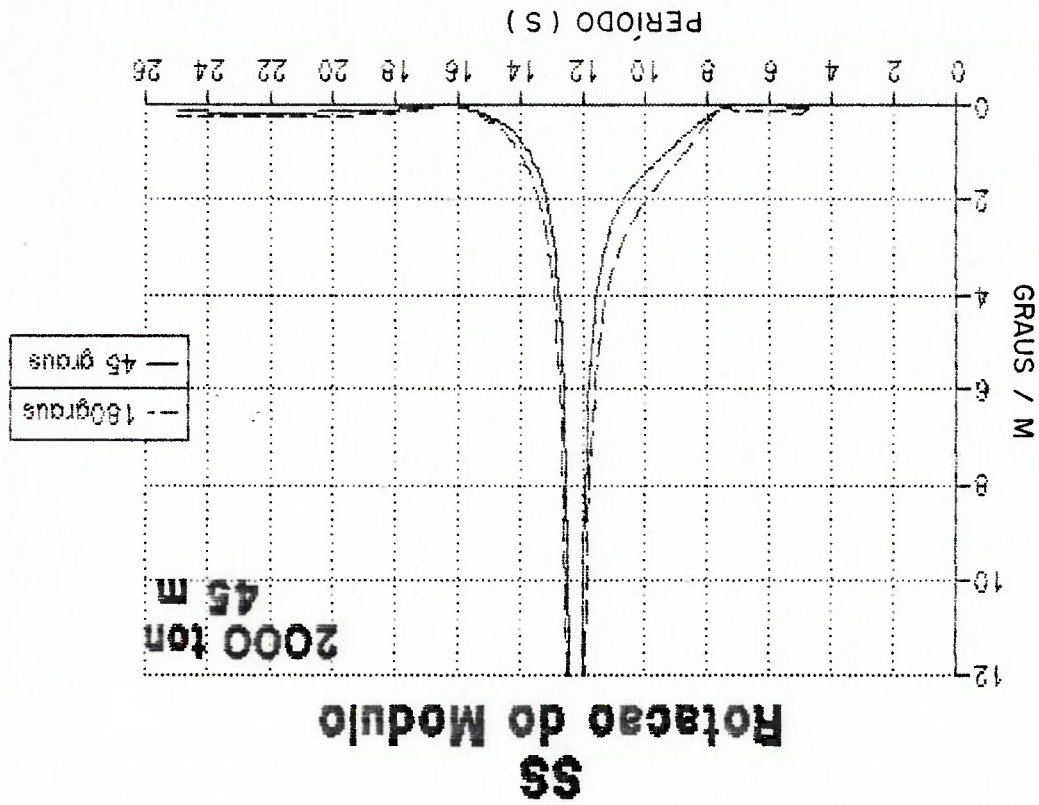


Fig.4.37 SS - Rotação do Módulo na Direção X ( $\phi^1$ )

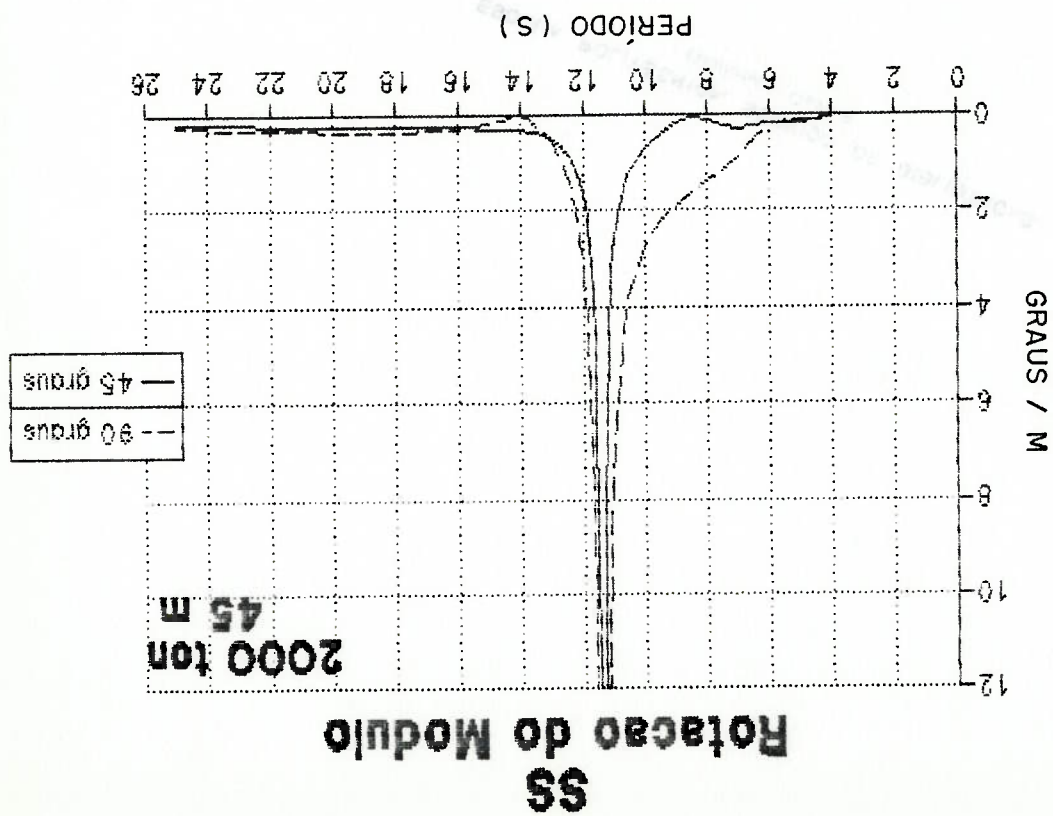


Fig.4.40 SS - Função de Transferência do Sway Acoplado

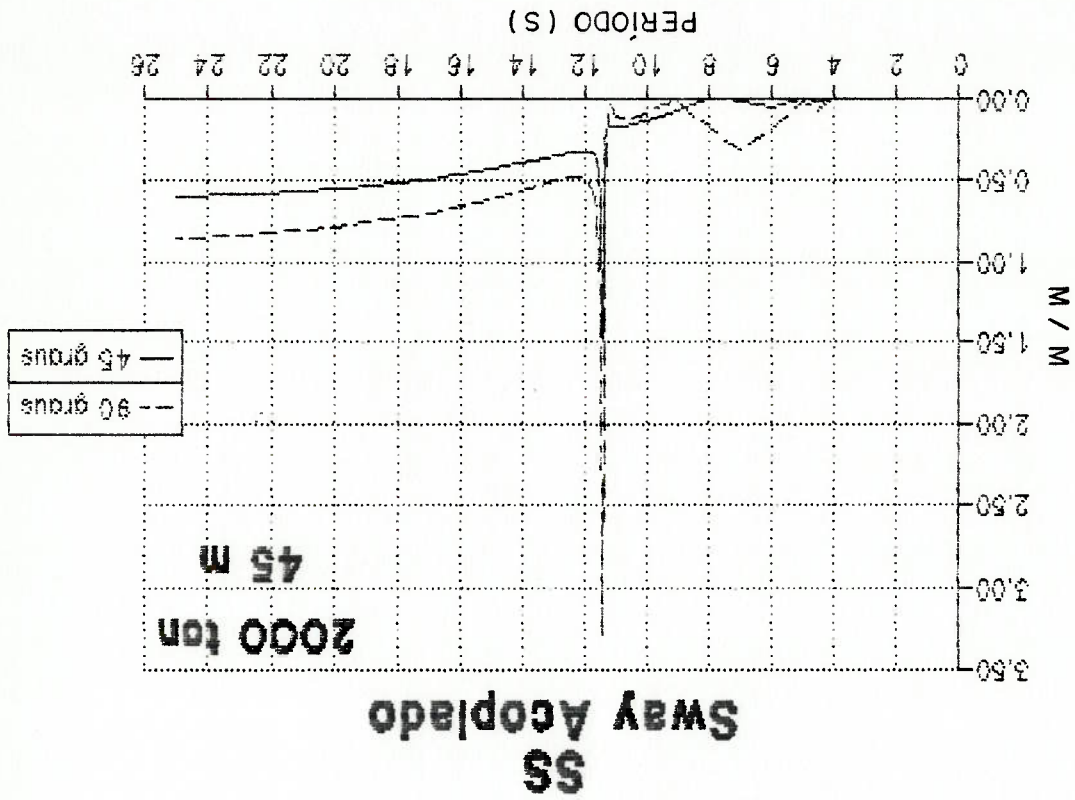


Fig.4.39 SS - Função de Transferência do Surge Acoplado

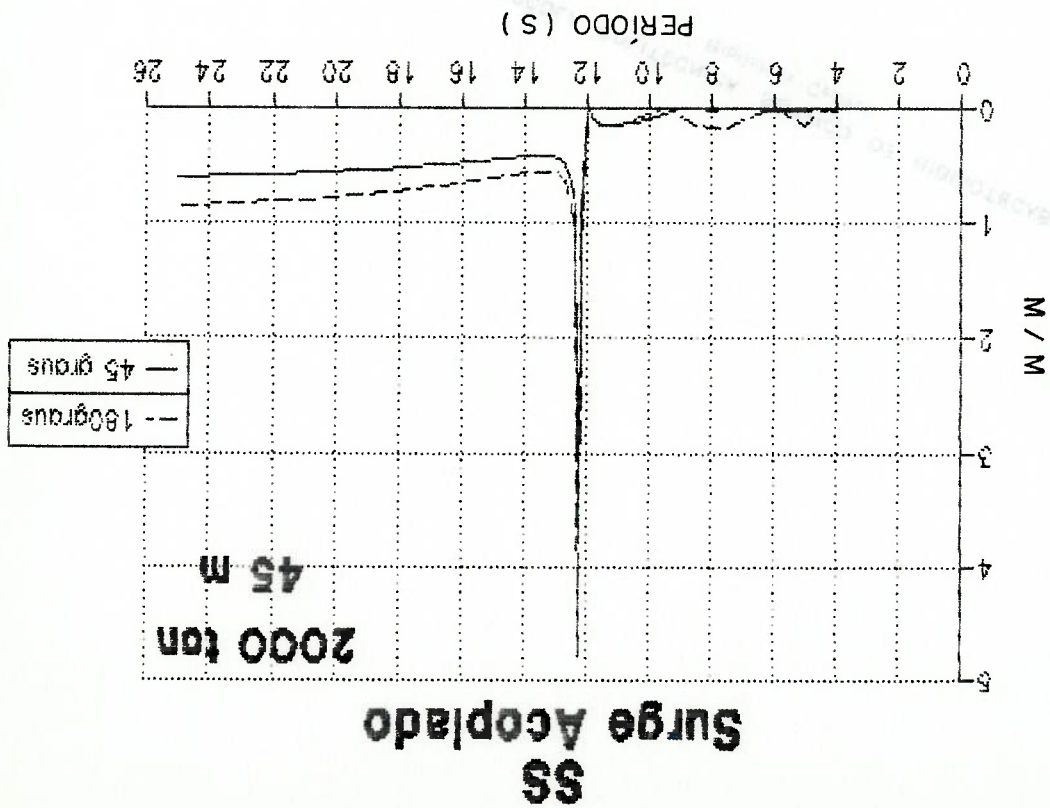


Fig.4.42 SS - Movimento Vertical da Ponta de Lança

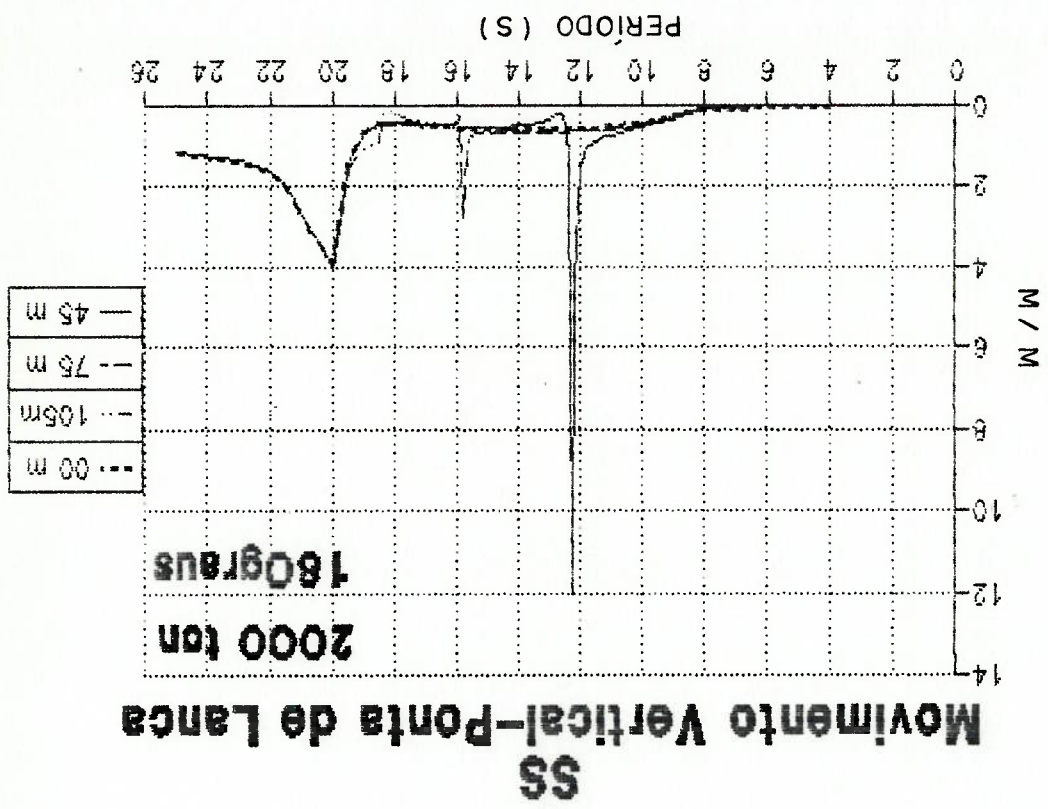


Fig.4.41 SS - Movimento Vertical da Ponta de Lança

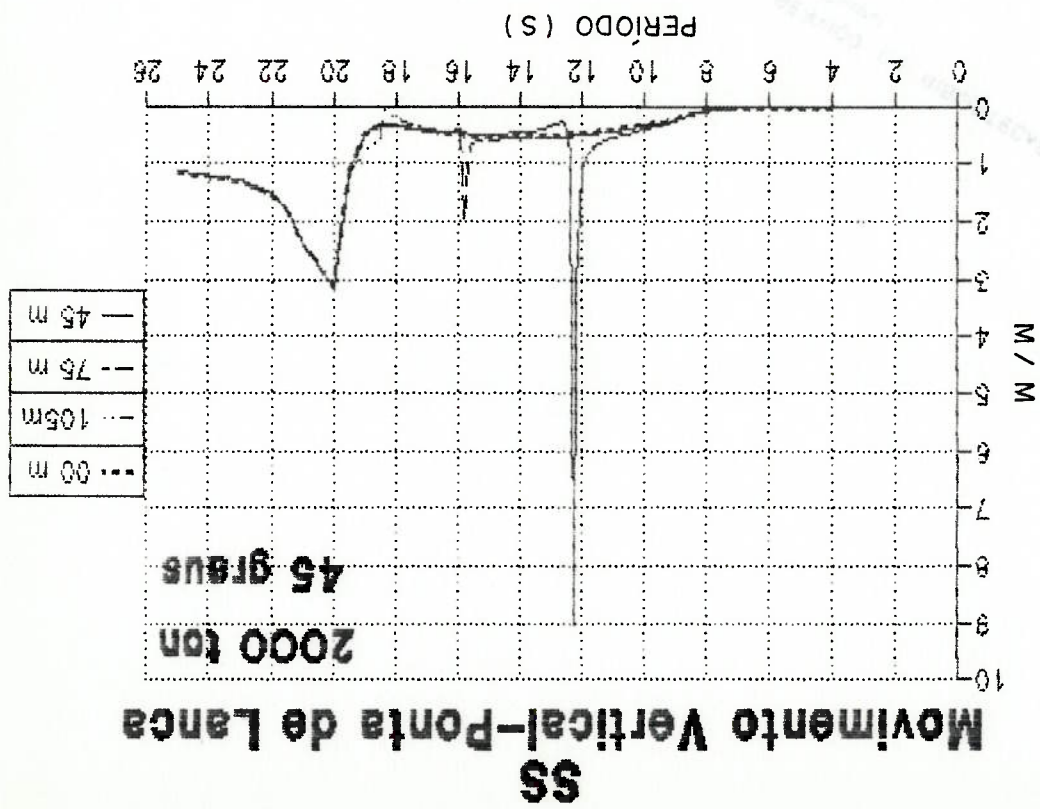


Fig. 4.44 Função de Transferência do Roll Acoplado SS - Içamento Lateral

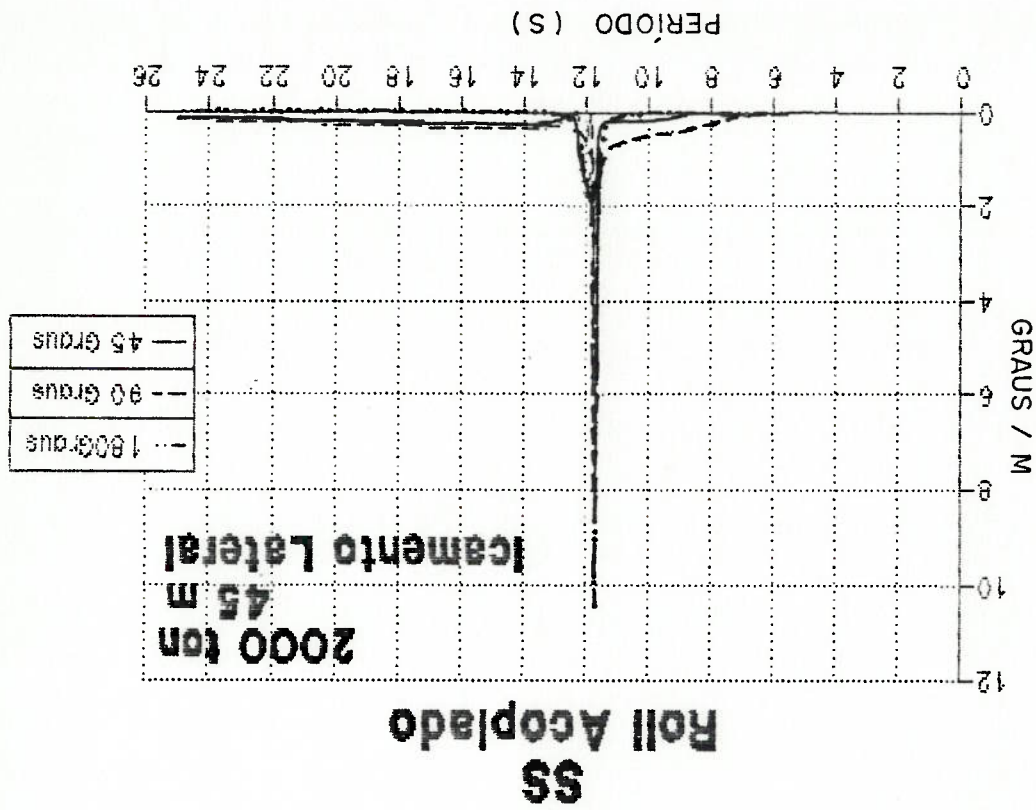


Fig. 4.43 SS - Força Dinâmica no Cabo de Içamento

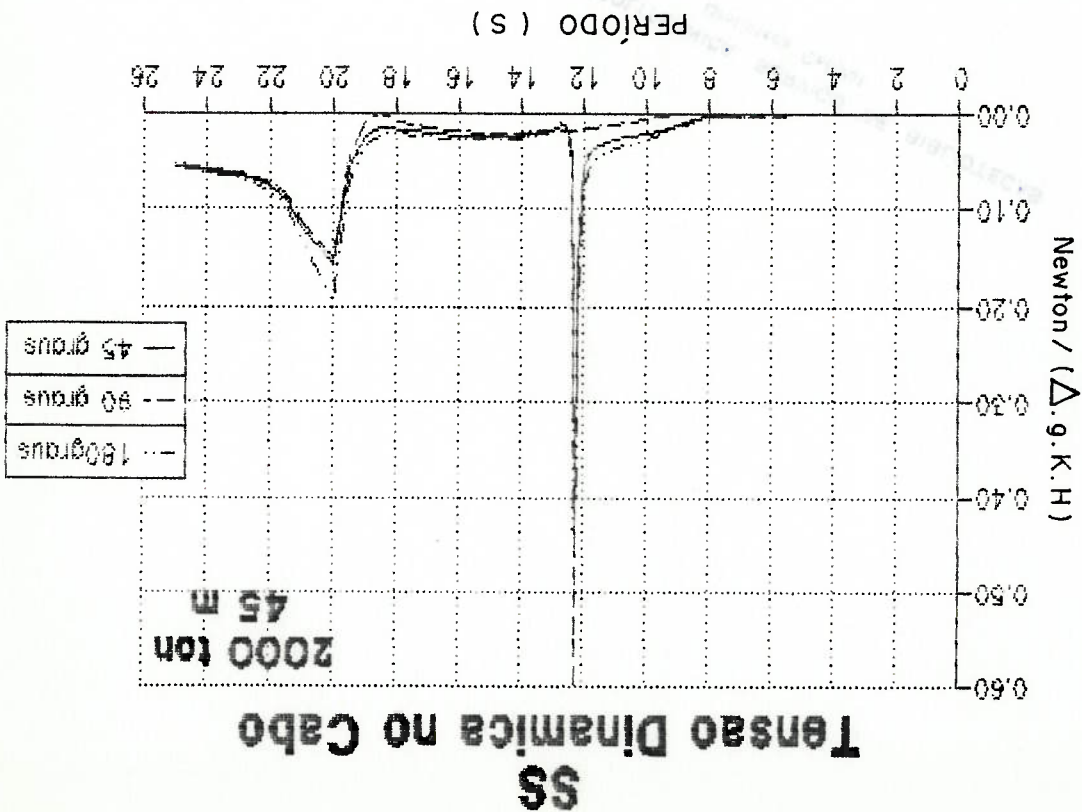


Fig. 4.46 Movimento Vertical-Ponta de Lança SS - Içamento Lateral

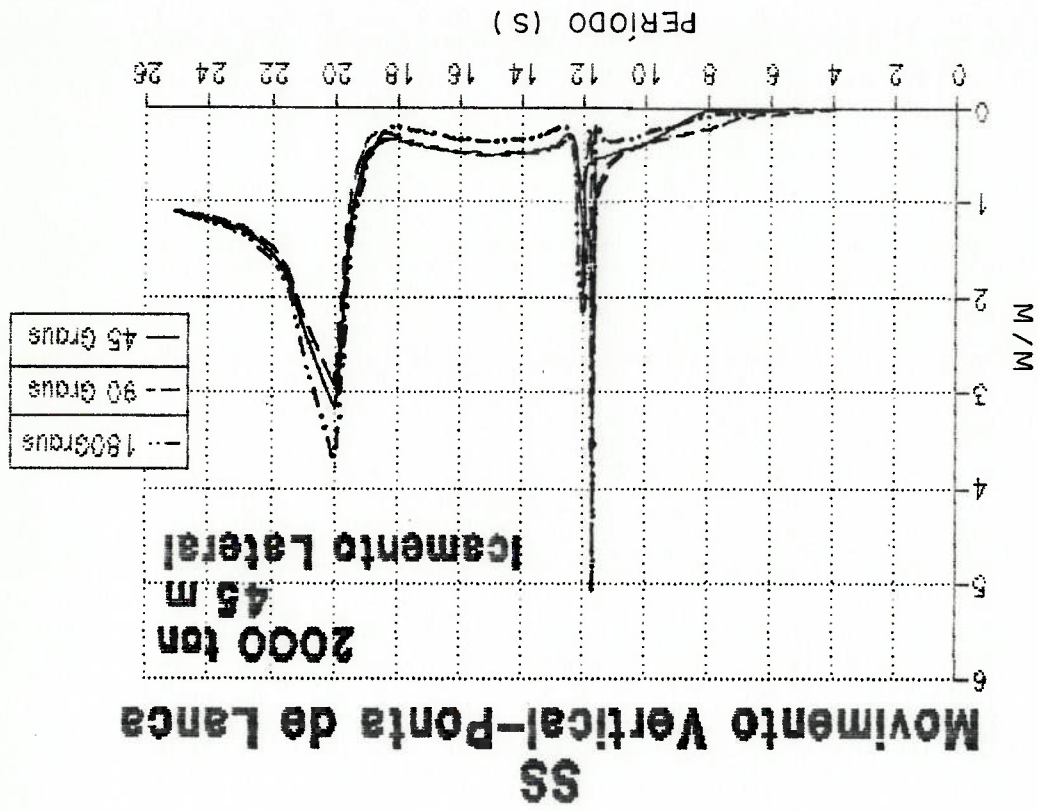
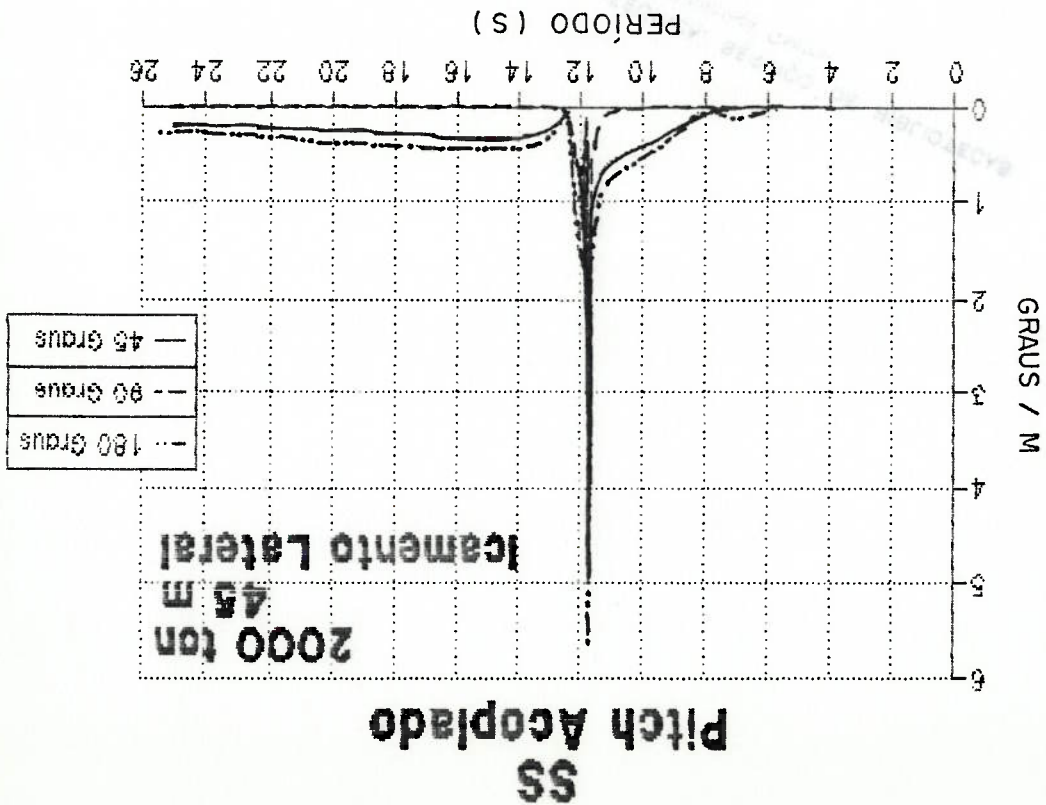


Fig. 4.45 Função de Transferência do Pitch Acoplado SS - Içamento Lateral



Tipicamente o mar é formado por uma superfície irregular que se constitui em uma infinidade de ondas de diferentes comprimentos e direções. Admitindo-se que a elevação da superfície do mar se constitui em um fenômeno aleatório, ela pode no entanto ser analisada como uma composição de infinitas ondas regulares superpostas, de diferentes alturas, frequências e direções de propagação, que se combinam de acordo com uma fase aleatória. Tal processo é considerado um processo aleatório gaussiano, ou seja, a elevação da superfície segue uma distribuição de probabilidade-

A dinâmica do movimento de uma embarcação é determinada de uma maneira geral, pela sua resposta ao ambiente em que opera. Os principais fatores ambientais no mar são ventos, ondas e correnteza que irão contribuir, individual ou interativamente, para as forças de excitação e para os movimentos impostos ao sistema. Dentre esses, as ondas representam o fator de maior influência no comportamento de estruturas oceânicas de modo que muito já foi estudado e desenvolvido para a compreensão dos mecanismos de geração de ondas, sua representação matemática, e descrição do mar em termos de seus sistemas de ondas.

#### 5.1.1 ESPECTRO DE ONDAS

### 5.1 REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO MAR

#### IRREGULAR

### 5. DETERMINAÇÃO DO MOVIMENTO DAS EMBARCAÇÕES EM MAR

de Normal ou Gaussiana.

A energia de uma onda individual pode se expressa em

termos do quadrado de sua elevação, de tal modo que sua

energia por unidade de área é dada como:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2$$

sendo  $\zeta_a$  a amplitude da onda. A intensidade do mar é

caracterizada por sua energia total. Admitindo-se que a

energia total da superfície do mar seja dada pela soma da

energia de cada componente de onda individual, tem-se que a

energia por unidade de área pode ser expressa como:

$$E^T = \frac{1}{2} \rho g \sum \zeta_{a_i}^2$$

sendo  $\zeta_{a_i}$  a amplitude das ondas individuais que compõe a

superfície do mar. Pode-se desse modo obter a contribuição

individual das componentes de onda em termos de suas

energias, na energia total do mar.

O conceito de espectro de onda é justamente a

distribuição de energia do mar em termos de frequências, que

seriam as frequências das ondas individuais que formam a

elevação da superfície do mar. Segundo Goda (1985), mais

precisamente a distribuição de energia de ondas em relação à

frequência, independente da direção de propagação, é chamada

de espectro de frequência, ao passo que a distribuição da

energia em termos tanto da frequência, como da direção, é

chamada de espectro de onda direcional. A Fig.5.1,

reproduzida de Goda (1985), ilustra uma onda irregular obtida

pela superposição de cinco ondas regulares e a Fig.5.2

ilustra o espectro de energia dessa onda, onde a energia de

cada componente é dada pelo quadrado de sua amplitude

dividido por dois. O Apêndice D descreve a teoria de obtenção

do espectro de frequência de um processo aleatório, teoria de Fourier. A caracterização de um processo aleatório em termos de seus parâmetros estatísticos é apresentada no Apêndice B.

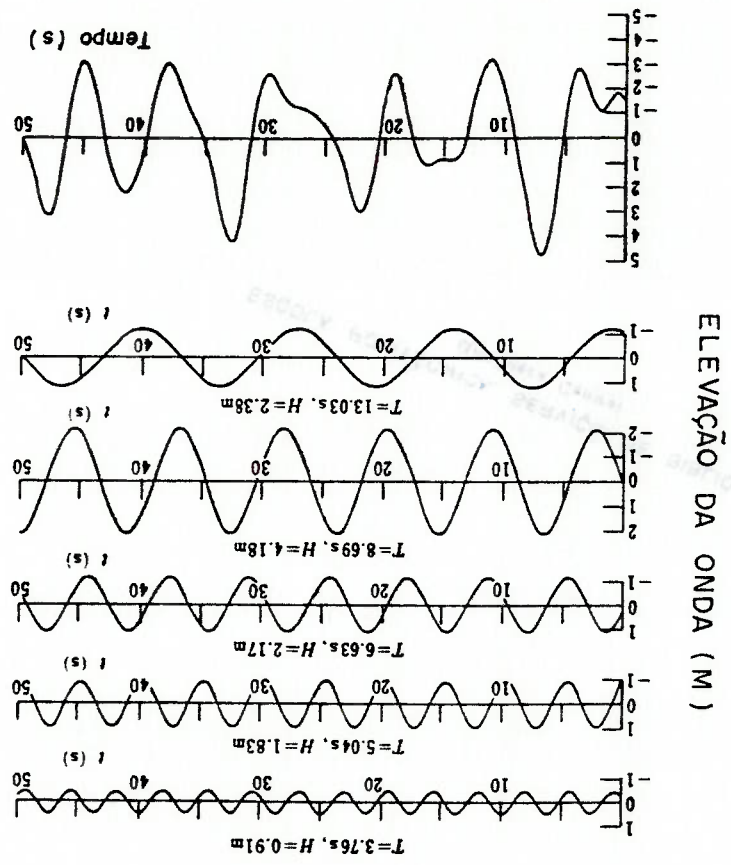


Fig. 5.1 Ondas Irregulares Obtidas pela Superposição de Ondas

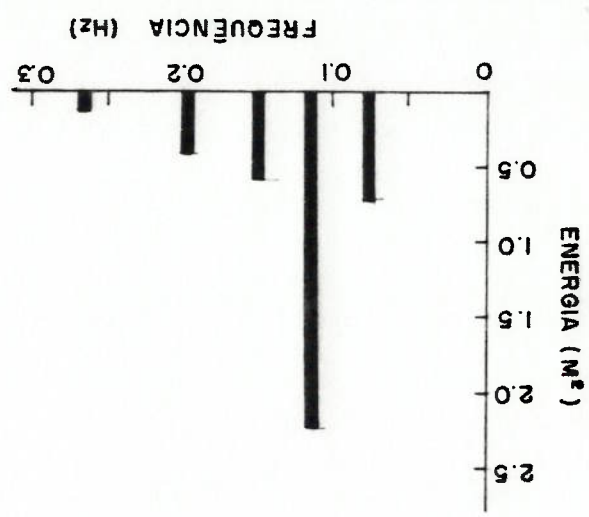


Fig. 5.2 Representação do Espectro de Ondas Superpostas



Características do espectro de frequência do mar foram

## 5.1.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE ESPECTRO DE ONDAS

estatísticas. Espectros de ondas e de algumas de suas propriedades itens subsequentes será feita uma caracterização dos probabilísticas de grande aplicação prática. Assim sendo, em para a descrição de um fenômeno aleatório, fornece respostas domínio da frequência, que se utiliza da análise espectral no domínio do tempo é feita de uma maneira determinística, o frequência. Enquanto a descrição do movimento de embarcações descrição de um fenômeno contínuo no tempo em um domínio de Estes métodos, juntamente com a análise espectral, permitem a teorias de probabilidade através de métodos estatísticos. uma forma de análise mais simplificada, é feito uso de Para se reduzir um histórico da superfície do mar a

regem a elevação do mar sejam analisados. uma embarcação, deve ser necessário que os fenômenos que no mar considerado. Então, para se representar a resposta de deve ser possível obter um espectro da resposta da embarcação se é possível obter um espectro da elevação do mar, também ondas que são causadoras desses movimentos, de tal modo que, mar devem se constituir em fenômenos da mesma natureza das Portanto, para o caso de uma embarcação, seus movimentos no constitui por sua vez também em um processo Gaussiano. lineares, se for derivado de um processo Gaussiano se Um fenômeno aleatório que seja regido por relações

Os modelos de espectro de onda representam os dados básicos para se determinar a resposta de uma embarcação em condições de mar irregular. Tais modelos representam o que se chama de descrição de curto prazo do mar, e consequentemente geram as chamadas respostas de uma embarcação no curto prazo. A definição de curto prazo é um período de tempo suficientemente curto para que se possa descrever as condições do mar como um fenômeno aleatório estacionário. O fato de se considerar a superfície do mar como estacionária significa que as propriedades estatísticas do mar podem ser admitidas como constantes durante um determinado período de tempo. Como a altura significativa de ondas e o período médio se constituem em dados estatísticos, a descrição do mar pelos

mais representativos do que outros.

Os modelos matemáticos são normalmente baseados em um ou mais parâmetros estatísticos para descrição dos estados de mar, os principais sendo a altura significativa e um período característico das ondas. Alguns modelos tem como parâmetro a velocidade do vento, baseados na hipótese de que as ondas são geradas pelos ventos ocorridos em suas regiões de formação. Tais parâmetros serão definidos no próximo item. Por serem funções matemáticas os modelos de espectro de ondas são apenas uma representação da realidade, de modo que em função dos estados de mar a serem descritos, alguns modelos serão mais representativos do que outros.

representação de espectros do mar.

estabelecidas através da análise de uma grande quantidade de registros de ondas obtidos em várias regiões do oceano. Tais análises geraram diversas formulações para representação de espectros de ondas, conhecidas como modelos matemáticos de

modelos espectrais baseados nesses parâmetros, é válida apenas para um curto período em que as mesmas se mantêm estacionárias.

Chakrabarti (1987) apresenta uma descrição de diversos modelos de espectro. Para ilustrar os modelos mais utilizados para representação das condições de mar, apresenta-se a seguir a formulação dos espectros de Pierson-Moskowitz, ISSC e ITTC.

#### a. Pierson-Moskowitz

O espectro de Pierson-Moskowitz (PM) foi obtido empiricamente, baseado na análise extensiva de condições de mar totalmente desenvolvidos na região do Atlântico Norte. Sua formulação é baseada na velocidade do vento e pode se expressa por:

$$S(\omega) = \frac{8,1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-0,74 (g/V(\omega))^4}$$

onde  $v$  é a velocidade do vento a uma altura de 19,5 metros.

#### b. ISSC

Um dos modelos de espectro mais utilizados atualmente foi proposto pelo "International Ship Structure Committee" e é derivado do espectro de Pierson-Moskowitz. Seus parâmetros são a altura significativa de ondas e um período característico das ondas. Sua forma geral é dada por:

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

A e B estão associados aos parâmetros altura significativa e período característico de ondas. Em função da representação do período característico tem-se:

A questão que se apresenta é guão realisticamente pode-se prever a resposta de uma embarcação através das formulações matemáticas de espectros, pois a forma dos espectros varia de acordo com diversos fatores tais como, localização geográfica, estágios de desenvolvimento e decaimento de condições severas como tempestades, presença de "swell", severidade do mar, dentre outros. Em muitas regiões, em especial no Mar do Norte, procurou-se desenvolver formas de espectros de mar baseados em medições de condições de mar durante período bastante extenso. Ochi (1978) apresenta um

$$A = 8,1 \times 10^{-3} g^2$$

$$B = 3,11 H^2 s$$

O modelo proposto pela "International Towing Tank Conference" é conhecido como espectro ITTC e segue a mesma formulação que o espectro ISSC. A diferença é que ele tem como único parâmetro a altura significativa de ondas e os coeficientes A e B da formulação do espectro são dados por:

c. ITTC

$$A = 486,26 H^2 T^4 s^d$$

$$B = 1948,18 T^4 d$$

c)  $T^d$  - Período de Pico

$$A = 123,12 H^2 T^4 s^{02}$$

$$B = 498,73 T^4 02$$

b)  $T^{02}$  - Período de Zero Ascendente

$$A = 171,41 H^2 T^4 s^{01}$$

$$B = 685,76 T^4 01$$

a)  $T^{01}$  - Período Médio

modelo de espectro de seis parâmetros baseados em registros obtidos em diversas regiões do Mar do Norte. Hofman (1974) apresenta uma comparação entre espectros medidos a partir de registros de onda e de formulações matemáticas, e ilustra a influência de ambos na resposta de embarcações. Haver e Moan (1983), ilustram as principais incertezas relacionadas ao modelo de curto prazo de descrição de estados de mar.

## 5.2 ESTATÍSTICA DE ONDAS

A elevação da superfície do mar, representada pelas ondas se propagando em determinada região, é um fenômeno tipicamente aleatório, regido por uma distribuição de Gauss. Uma maneira de se representar a superfície do mar é através da análise espectral, que consiste em se obter uma distribuição da energia total do mar na energia de suas componentes de onda, em função das frequências dessas componentes.

Fenômenos aleatórios são descritos através de parâmetros estatísticos. Pode-se concluir então que, se a elevação da superfície do mar, que é um fenômeno tipicamente aleatório, é descrita através de espectros de onda, deve haver uma relação entre os diversos parâmetros estatísticos do mar e a forma do espectro que descreve tal mar. Pode-se mostrar por exemplo, que a variância do registro do mar ou da elevação da onda obtida durante certo intervalo de tempo, está diretamente relacionada ao espectro que descreve esse registro.

Para a definição dos principais parâmetros que

descrevem as ondas, considere-se a Fig.5.3 representando a elevação da superfície do mar em um ponto qualquer ao longo do tempo, denotada por  $\eta(t)$ . Diferentes grandezas são utilizadas para descrever a altura e o período das ondas. Para a altura tem-se a altura média, o desvio padrão da altura, a altura significativa e a altura máxima mais provável. O período característico das ondas pode ser o período médio, o período de cruzamento ascendente e o período de pico.

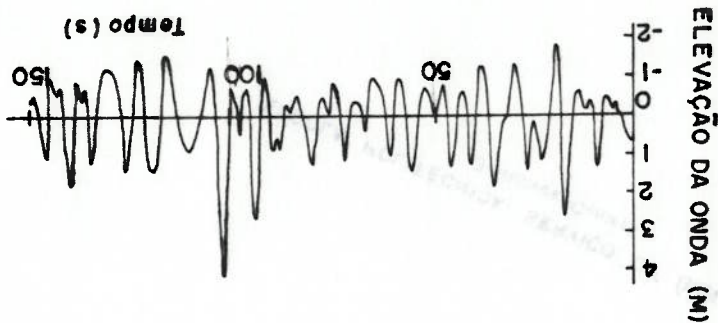


Fig.5.3 Registro da Superfície do Mar

Os parâmetros estatísticos podem ser obtidos diretamente dos registros de onda no domínio do tempo, ou do espectro de onda correspondente.

A altura média de ondas é definida como a média das

alturas de todas as ondas do registro e pode ser dada por

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

A média ou valor esperado dos quadrados, obtida a

partir do registro de ondas é dada por

$$E[H^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2$$

Sua raiz quadrada é conhecida como  $H_{rms}$  e dada por

$$H_{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2}$$

A altura significativa de ondas é definida como a

obtidos a partir da distribuição de alturas de onda. A além da média dos quadrados das alturas,  $H_{rms}$ , são facilmente o valor médio da altura de ondas ou altura média  $\bar{H}$ , encontra-se desenvolvida no Apêndice C.

ondas, descritos a seguir, a partir do espectro do mar, A obtenção de alguns parâmetros estatísticos das onda é então dado por  $\sigma = \sqrt{m_0}$ .

variância da elevação de onda. O desvio padrão da elevação de área sob a curva do espectro de energia e equívale à O momento de ordem zero denotado por  $m_0$  representa a

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

$S(\omega)$ , em termos da frequência circular  $\omega$ , é dada por momento de ordem  $n$  de um espectro representado por uma função partir dos momentos do espectro. Uma definição genérica do mar, em termos de seu espectro de energia, é possível a A obtenção dos parâmetros estatísticos de um estado de sucessivos.

considerando-se a média do intervalo de ocorrência de picos medidos. O período de pico por exemplo, é obtido para ondas sucessivas e obtendo-se a média dos valores do registro de ondas, simplesmente medindo-se os períodos Os períodos característicos podem ser obtidos a partir ondas.

onde os valores de  $H_i$  são obtidos das maiores às menores

$$H_{1/3} = \frac{N}{3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$$

como

$H_{1/3}$  ou  $H_s$ , que a partir de um registro pode ser expressa particular. Costuma-se referenciar a altura significativa por média das alturas do terço maior de ondas em um estado de mar

Um histograma das alturas de onda pode ser apresentado em termos da frequência de ocorrência das alturas,

representação de um histograma é encontrada na Fig. 5.4. se o número dessas ondas contra o valor da altura. Uma altura esteja dentro de um determinado intervalo e plotando de um registro é obtido contando-se todas as ondas cuja conhecido como histograma da altura de ondas. Um histograma obtida é a distribuição das alturas individuais de onda, tempo, uma importante característica de tal registro a ser considerado um registro de onda obtido no domínio do termos da frequência circular  $\omega$ .

As relações acima são válidas, se o espectro for expresso em

$$T_{02} = 2\pi \sqrt{m_0/m_2}$$

e expresso como

por sua vez,  $T_{02}$  define o período de cruzamento ascendente e

$$T_{01} = 2\pi \frac{m_0}{m_1}$$

$m_1$ , pela seguinte relação:

referenciado por  $T_{01}$  e obtido da razão entre os momentos  $m_0$  e períodos característicos do estado de mar. O período médio é Diversos períodos de onda podem ser considerados como

$$H^{1/3} = 4 \sqrt{m_0}$$

energia total contida no espectro. Ela pode ser expressa como

A altura significativa de ondas está relacionada com a

$$H_{rms} = 2 \sqrt{2m_0}$$

pela expressão

e o valor de  $H_{rms}$ , no domínio da frequência pode ser obtido

$$\underline{H} = \sqrt{2\pi m_0}$$

expressão de  $\underline{H}$  em termos do momento  $m_0$  do espectro é dada por



normalizadas em termos de alguma altura característica, por exemplo  $H_{rms}$  ou  $\bar{H}$ . A Fig. 5.5 reproduzida de Goda (1985), ilustra tal forma de representação. A abscissa é dada por  $H/\bar{H}$  e a ordenada pela frequência relativa  $n/(N_0 \Delta(H/\bar{H}))$  onde  $N_0$  representa o número total de ondas e  $n$  o número de ocorrência para cada intervalo  $\Delta(H/\bar{H})$ . Um histograma representado dessa maneira tem a área sob sua curva igual à unidade e pode ser interpretado como uma função densidade de probabilidade de ocorrência de alturas de ondas.

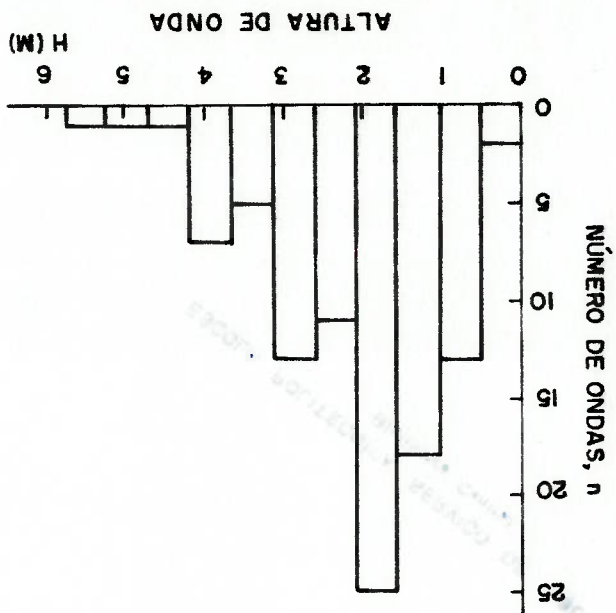


Fig. 5.4 Exemplo de um Histograma de Altura de Onda

Verificou-se que uma função de distribuição que se adequa à distribuição de alturas de onda para uma condição de mar, é dada pela Distribuição de Rayleigh. Uma das formas de representação da distribuição de Rayleigh, normalizada em termos de  $H_{rms}$  é dada por

$$P(H) = 1 - \exp\left[-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right]$$

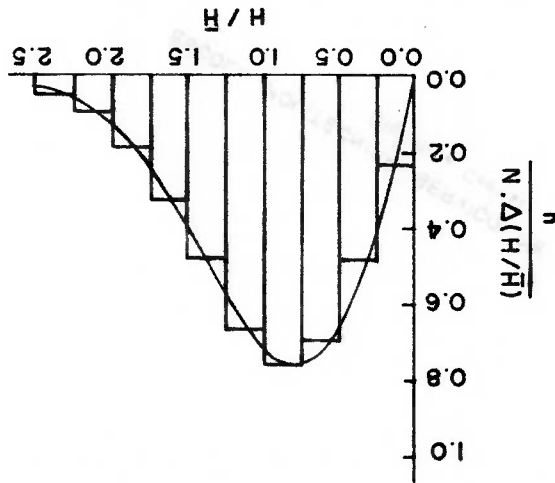
A função densidade de probabilidade associada é dada por

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left[-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right]$$

A distribuição de Rayleigh tem uma importância muito grande quando se quer prever valores máximos da resposta de uma embarcação ou até mesmo o máximo valor esperado para a resposta em função do período de duração do estado de mar. Tais previsões são importantes para se considerar as condições de mar em que uma embarcação pode operar. As propriedades matemáticas da distribuição de Rayleigh e sua aplicação na previsão dos movimentos de navios foram consideradas por Hoffman e Karst (1975). Sua formulação genérica bem como a derivação de certas propriedades estatísticas expostas no presente capítulo, se encontram descritas no Apêndice C da presente dissertação.

Diversos outros parâmetros podem ser obtidos da

Fig.5.5 Histograma de Altura de Ondas e Comparação com Distribuição de Rayleigh



$$P(H) = 1 - \exp\left[-\frac{H^2}{8m_0^2}\right]$$

expressão:

Como  $H_{rms}$  pode ser expresso em termos do momento  $m_0$  do espectro que descreve a condição de mar, pode-se expressar a distribuição de Rayleigh também em termos de  $m_0$  pela

O estudo do comportamento de uma embarcação em mar irregular pode ser feito tanto no domínio do tempo, como no

### 5.3 RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO NO CURTO PRAZO

da largura de um espectro e são discutidos por Goda (1985). For menor do que 0,60. Outros parâmetros existem para medida o espectro pode ser considerado razoavelmente estreito se e próximos a 1 indicam o contrário. Segundo Chakrabarti (1987) indicam um espectro de banda estreita, enquanto valores os valores e variam entre 0 e 1, sendo que valores pequenos

$$\epsilon = \frac{m^0 m^4}{m^0 m^4 - m^2}$$

dada pelo coeficiente e definido por

A medida da largura de banda de um espectro pode ser

intervalo grande de frequências.

de banda larga tem sua densidade de energia distribuída em um numa faixa estreita de frequência, ao passo que um espectro estreita apresenta a maior parte de sua energia concentrada densidade de energia do espectro. Um espectro de banda espectro, que em outros termos mede o desvio padrão da ser considerado é a medida da largura de banda de um Na análise espectral, um dos parâmetros importantes a

(1987).

Discussão semelhante pode ser encontrada em Chakrabarti probabilidade conjunta de altura e período das ondas. alguns modelos de distribuição de período de ondas e de principais parâmetros estatísticos do mar, além de discutir (1985), apresenta de maneira extensiva a obtenção dos análise espectral, que caracterizem o estado de mar. Goda

A análise no domínio do tempo permite a consideração dos fenômenos não lineares envolvidos na resposta da embarcação, possibilitando de tal modo a simulação de quaisquer condições de mar. As desvantagens em relação ao domínio da frequência são principalmente relacionadas ao

temporais dos diversos movimentos. A linearidade das condições do mar é admitida quando se considera a superfície do mar como resultado da superposição de infinitas ondas com diferentes frequências e amplitudes, para obtenção do espectro de energia. Por sua vez, a linearidade da resposta da embarcação é admitida ao se obter as funções de transferência de sua resposta, no domínio da frequência.

A análise do movimento no domínio da frequência obtém o espectro de energia da resposta da embarcação. A linearidade para obtenção da resposta da embarcação pressupõe linearidade tanto das condições do mar, como dos fenômenos envolvidos para obtenção da resposta da embarcação. A análise do movimento no domínio da frequência obtém o espectro de energia da resposta da embarcação.

O segundo caso de representação dos movimentos de uma embarcação se refere à análise no domínio da frequência. Neste caso, as condições do mar são representadas por seus espectros de energia que juntamente com as funções de transferência dos movimentos da embarcação, permitem a obtenção do espectro de energia da resposta da embarcação. A resposta da embarcação em tal caso obtida em regiões do mar, ou representação do mar através de técnicas de simulação. As ondas incidentes podem ser tanto registros de ondas obtidos em regiões do mar, ou representação do mar através de séries temporais da elevação da superfície do mar. A resposta da embarcação, simulando-se a incidência de ondas através de séries temporais da elevação da superfície do mar. As ondas incidentes podem ser tanto registros de ondas obtidos em regiões do mar, ou representação do mar através de técnicas de simulação. A resposta da embarcação em tal caso obtida em regiões do mar, ou representação do mar através de séries temporais dos diversos movimentos.

O espectro de resposta é definido como a distribuição de energia da resposta da embarcação em relação à frequência de ondas e é obtido a partir do cruzamento espectral, que nada mais é do que o cruzamento do espectro de energia das ondas com a função de transferência da resposta. Para um sistema linear, a função espectro de resposta para uma frequência específica, é dada pelo quadrado da função de

onda correspondente ao período considerado. Tais condições podem ser representadas por um espectro de as condições do mar podem ser admitidas como estacionárias. prazo se referindo a um curto período de tempo, para o qual descrição do curto prazo da resposta da embarcação, curto resposta dos seus movimentos. Elas se constituem na chamada no domínio da frequência são dadas pelos espectros de As respostas de uma embarcação às condições ambientais

### 5.3.1 CRUZAMENTO ESPECTRAL

conseguinte, da resposta da embarcação. parâmetros estatísticos das condições de mar e por contrário da análise espectral que já fornece diretamente através de técnicas de simulação de fenômenos aleatórios, ao inúmeras condições de mar devem ser consideradas, normalmente para se ter uma representação estatística da resposta, resposta da embarcação em cada instante simulado. Além disso simulação das condições de mar, para que se obtenha a solucionadas para cada intervalo de tempo considerado na embarcação, já que as equações do movimento devem ser tempo computacional necessário para obtenção da resposta da

transferência na frequência considerada, multiplicado pelo espectro de onda. Denotando-se a função de transferência por  $H(\omega)$  e o espectro de onda por  $S(\omega)$  tem-se o espectro de resposta dado por

$$S^H(\omega) = [H(\omega)]^2 S(\omega)$$

O espectro de onda tem unidade de altura quadrática vezes tempo. Por sua vez, a função de transferência tem unidade igual à dimensão da resposta (deslocamento, ângulo, força, etc.) por altura unitária de onda. Consequentemente, o espectro de resposta terá unidade de resposta quadrática vezes tempo ( $m^2 \cdot s$ ,  $grau^2 \cdot s$ ,  $Newton^2 \cdot s$ , etc.).

Uma vez obtido o espectro de resposta de uma embarcação, todos os parâmetros estatísticos considerados no espectro do mar são aplicados também ao espectro de resposta. Desse modo, por exemplo, a área sob a curva do espectro representa a variância da resposta. A resposta significativa e o desvio padrão podem ser obtidos da mesma maneira a partir dos momentos do espectro de resposta, e a distribuição de Rayleigh aplicada à amplitude ou altura de ondas, se aplica também à amplitude ou dupla amplitude da resposta. Tal fato é de grande valia pois a partir de uma formulação bastante simples, que é a distribuição de Rayleigh, tem-se a distribuição da resposta de uma embarcação podendo-se obter por exemplo a probabilidade da resposta exceder um determinado valor tido como crítico para operação.

### 5.3.2 ESPECTRO DE ONDA DIRECIONAL - FUNÇÃO DE ESPALHAMENTO

As funções de transferência do movimento de uma

embarcação são obtidas em função da direção da onda em espectro de resposta da embarcação, para a direção de onda considerada.

Ao se considerar um mar irregular, verifica-se a existência de componentes de onda propagando-se em diversas direções, normalmente em torno de uma direção principal. Para se descrever o estado das diversas componentes direcionais superpostas, introduz-se o conceito de espectro direcional.

O espectro direcional representa a distribuição de energia tanto no domínio da frequência, como em relação à direção. Sua forma geral é expressa por

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)G(\omega, \theta)$$

onde  $S(\omega, \theta)$  é o espectro de onda direcional e  $G(\omega, \theta)$  é chamada de função de espalhamento e representa a distribuição de energia direcional.

A função de espalhamento é adimensional e por representar uma distribuição de energia deve satisfazer a relação

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega, \theta) d\omega = 1$$

Goda (1985) apresenta diversas formulações para a função de espalhamento, além de discutir o espalhamento direcional de energia a partir de observações do mar.

Uma das formulações mais adotadas por descrever o espalhamento de energia de uma forma bastante simples é dada pela seguinte expressão:

$$G(\omega, \theta) = G(\theta) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \cos^2 \theta & : |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & : |\theta| > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

é representada o ângulo entre uma direção qualquer e a direção principal de propagação da onda.

#### 5.4 RESULTADOS

Para a análise de curto prazo dos movimentos das embarcações, o modelo espectral adotado foi o ISSC descrito no item 5.1.2. Um estado de mar é descrito pelo espectro ISSC através dos parâmetros altura significativa de ondas ( $H_s$ ) e um período característico, por exemplo o período médio ( $T_{01}$ ). Devido à linearidade da resposta, para um período médio estabelecido, a resposta significativa é proporcional à  $H_s$ . De tal modo uma maneira adequada para se descrever a resposta da embarcação para diversos estados de mar é em termos da relação entre a resposta significativa e a altura significativa de ondas, para diversos valores de período médio.

A Fig. 5.6 apresenta os espectros de energia para dois estados de mar, caracterizados pelos parâmetros  $H_s = 2.0m$  -  $T_{01} = 7s$  e  $H_s = 2,5m$  -  $T_{01} = 9s$ . A área sob as curvas, representa a energia total das ondas dada pelo momento  $m_0$  do espectro, sendo a altura significativa de ondas correspondente a quatro vezes a raiz quadrada de  $m_0$ .

As Figs. 5.7 a 5.12 ilustram o espectro de resposta das embarcações, para os movimentos de roll, pitch e movimento vertical da ponta de lança. As respostas significativas correspondentes são apresentadas na Tab. 5.1.



praticamente igual ao heave e não influenciado pelo movimento de resposta da embarcação em ondas de 90°, quando o movimento é em direções de onda. Nota-se uma grande diferença entre as Figs. 5.17 e 5.18 para dois comprimentos de cabo e três O movimento vertical da ponta de lança é ilustrado nas Fig. 5.17 e 5.18 para dois comprimentos de cabo e três menores.

praticamente pouca influência no pitch, em ondas com períodos acima de 7 segundos, de modo que o comprimento do cabo tem entretanto deve ser sentido apenas para ondas com períodos de pitch, devido ao efeito de ressonância do pêndulo. Tal efeito de comprimentos menores tendem a induzir movimentos maiores de pitch, analisando-se as Figs. 5.15 e 5.16, pode-se notar como transferências nas Figs. 4.15 e 4.16.

facilmente compreendido, comparando-se com as funções de comprimentos do cabo. O comportamento dos gráficos é do roll da barcaça para onda de 45° e 90° e diferentes As Fig. 5.13 e 5.14 ilustram a resposta significativa

	Roll (gr)	Pitch (gr)	Ponta de Lança (m)
Barcaça	$\phi = 90gr$	$\phi = 180gr$	$\phi = 180gr$
$H^s = 2.0 - T^{0.1} = 7$	5.40	1.42	1.51
$H^s = 2.5 - T^{0.1} = 9$	10.10	2.31	2.74
SS	$\phi = 90gr$	$\phi = 180gr$	$\phi = 180gr$
$H^s = 2.0 - T^{0.1} = 7$	1.41	1.08	1.23
$H^s = 2.5 - T^{0.1} = 9$	2.70	2.73	3.10

Tab. 5.1 Resposta Significativa do Movimento das Embarcações para os Espectros ISSC Considerados

do módulo, e em ondas de 45° e 180° quando o movimento passa a ser uma composição do heave e do pitch da embarcação. A amplificação do movimento tende a seguir as mesmas características do pitch.

As Figs. 5.19 e 5.20 ilustram o movimento de roll da SS para ondas de 45° e 90°. Como já discutido, movimentos de roll tendem a apresentar magnitudes pequenas para esse tipo de embarcação. As máximas respostas ilustradas nas figuras, são devidas ao efeito de ressonância do movimento do módulo. Nota-se claramente, especialmente para ondas de 90 graus, que os comprimentos maiores tendem a apresentar um rendimento melhor, por deslocarem o período de ressonância para ondas mais longas. De qualquer maneira as máximas respostas encontradas, em torno de 1° por altura significativa de ondas, não se caracterizam como valores críticos.

Conforme ilustrado nas Figs. 5.21 e 5.22, o movimento de pitch tende a apresentar as mesmas características que o roll. Quando se compara com a barcaça, um fator de certa importância a ser notado é o período a partir do qual as respostas tendem a se tornar mais críticas, ou próximas a 1° por metro de onda. Tal período gira em torno de 6 segundos para a barcaça e 8 segundos para a SS, o que pode representar uma grande diferença no comportamento das mesmas em condições de mar mais calmas. Esse aspecto tem importância especial quando se considera regiões como o Brasil, cujas características são bem pouco severas e cujo mar típico apresenta períodos médios justamente na faixa de 4 a 7 segundos.

O movimento vertical da ponta de lança, ilustrado nas

Figs. 5.23 e 5.24, apresenta valores bem maiores para mares de período médio maiores, especialmente para incidência de onda de  $90^\circ$  quando o efeito da ressonância do movimento do módulo não é sentido. Isto se deve ao efeito do heave que como já visto, tem seu período natural em torno de 20 segundos. Para comprimento do cabo de 45 m, o movimento tende a apresentar valores relativamente altos quando comparados com comprimento de 75 m, para mares de período médio na faixa de até 10 segundos, devido ao período de ressonância estar diretamente relacionado ao comprimento do cabo.

Fig.5.7 Barcaça - Espectro da Resposta de Roll

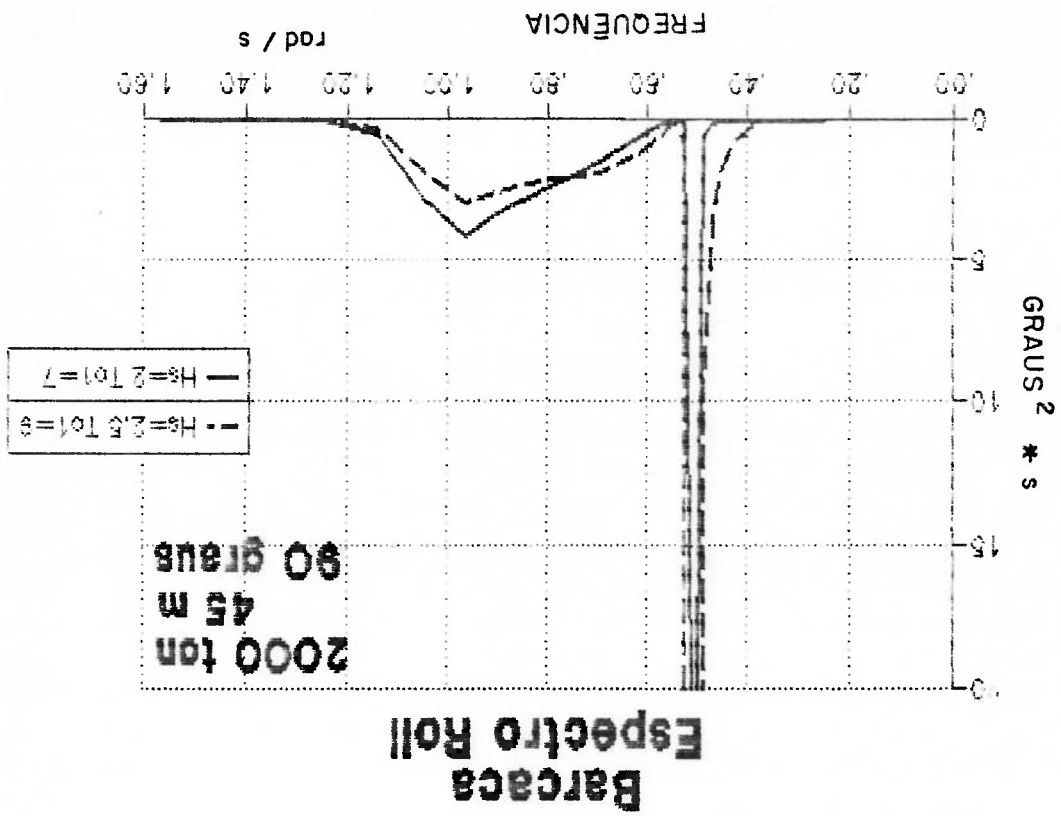


Fig.5.6 Representação do Espectro ISSC

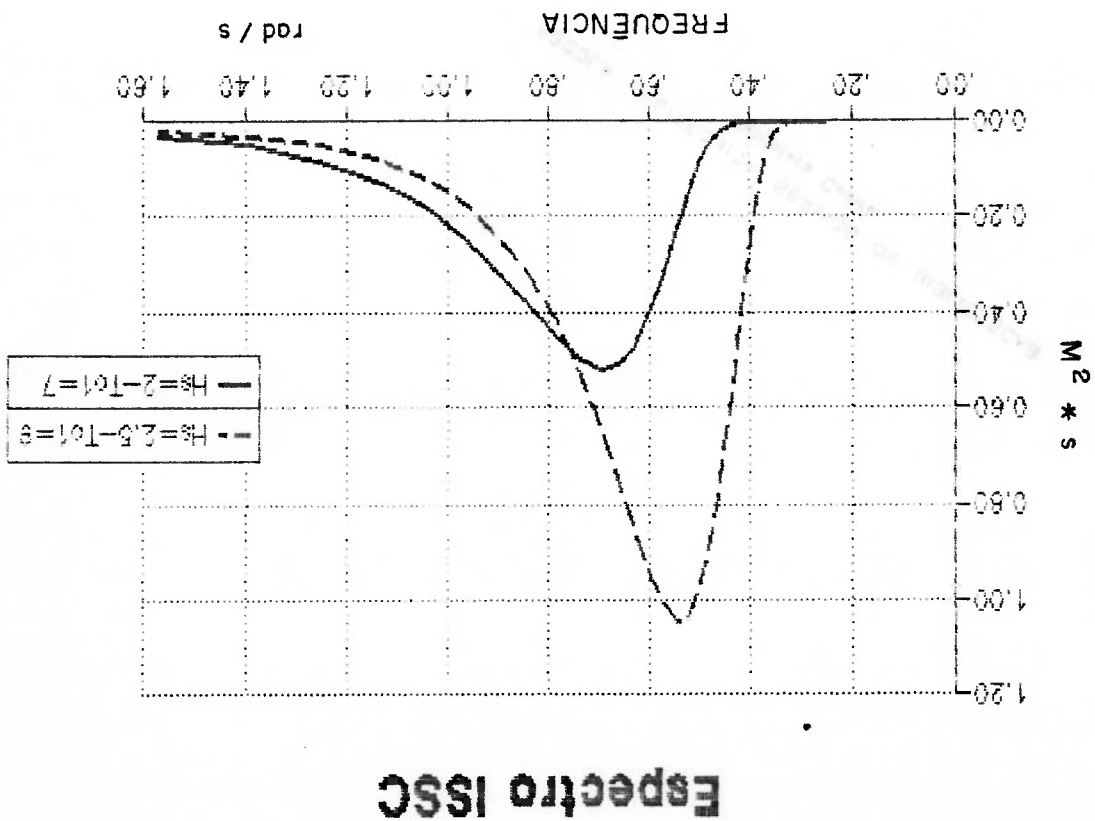


Fig.5.9 Espectro do Movimento Vertical da Ponta de Lança

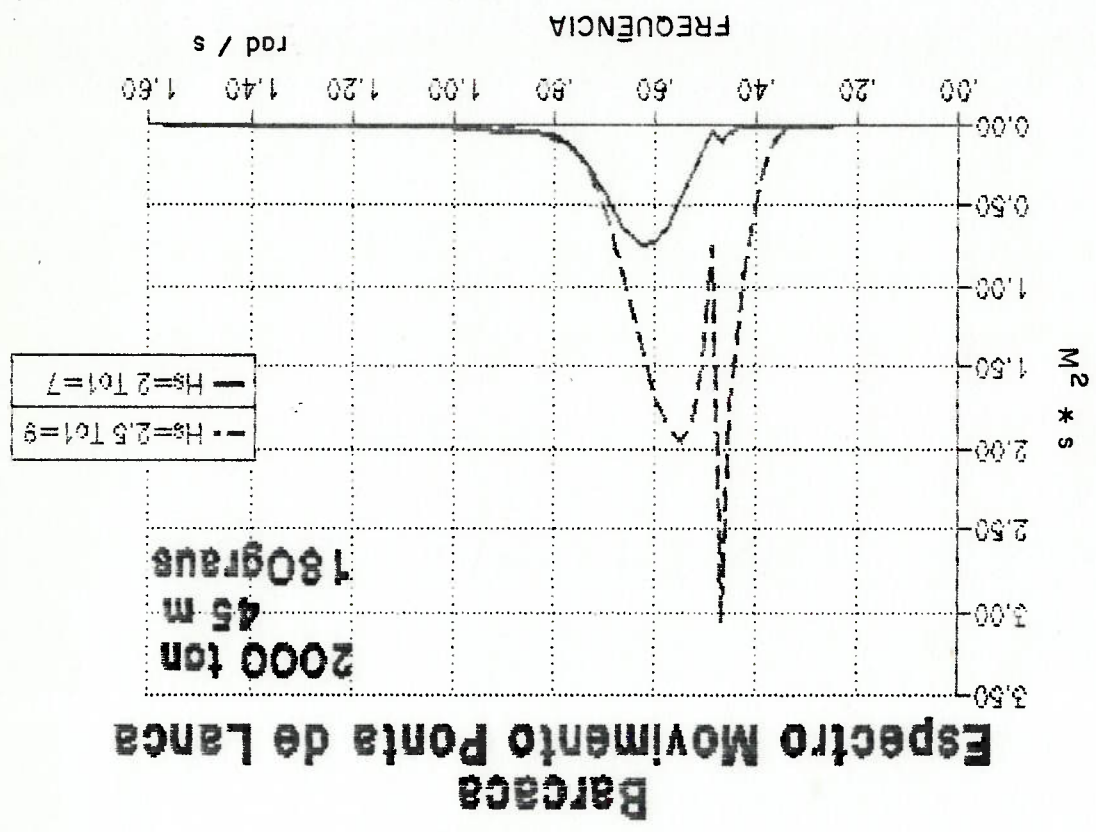


Fig.5.8 Barçaça - Espectro da Resposta de Pitch

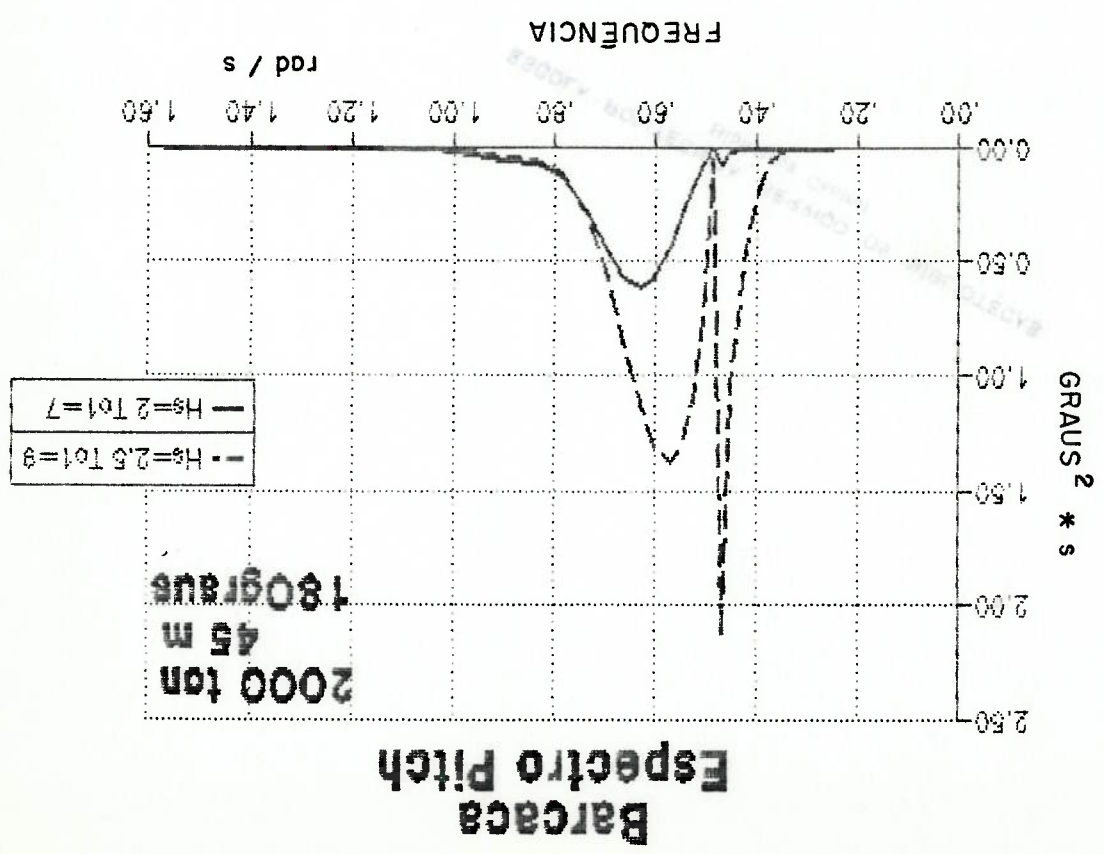


Fig.5.11 SS - Espectro da Resposta de Pitch

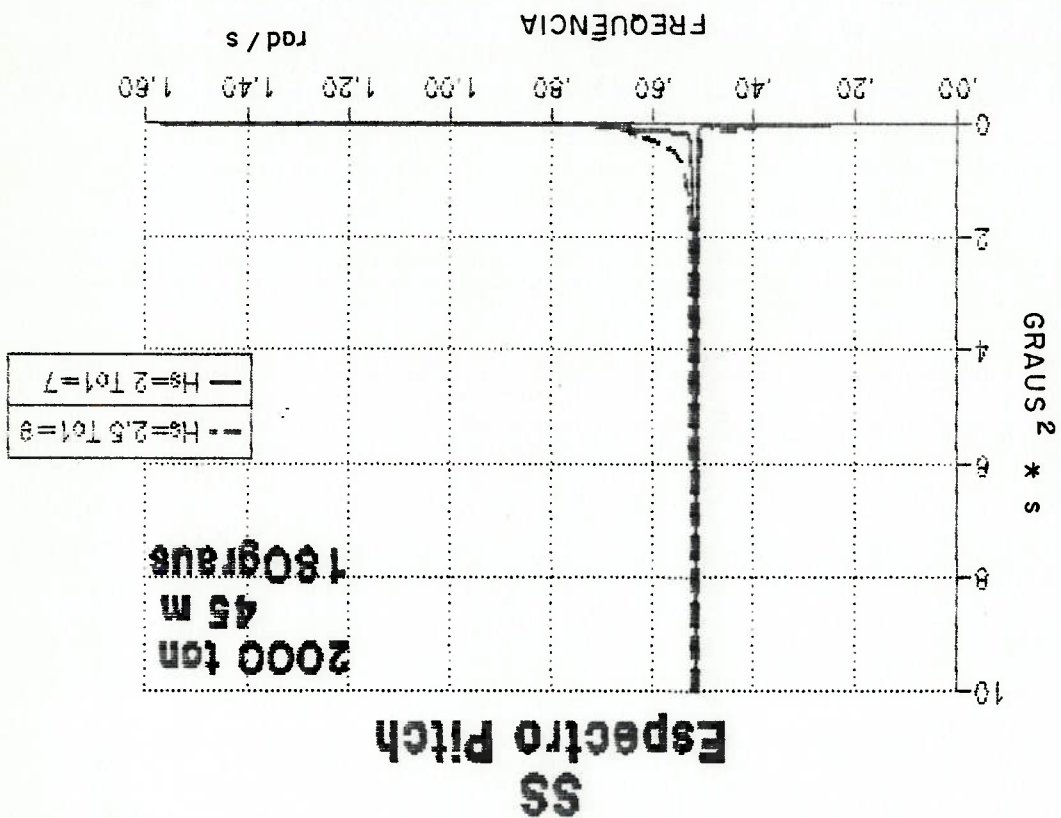


Fig.5.10 SS - Espectro da Resposta de Roll

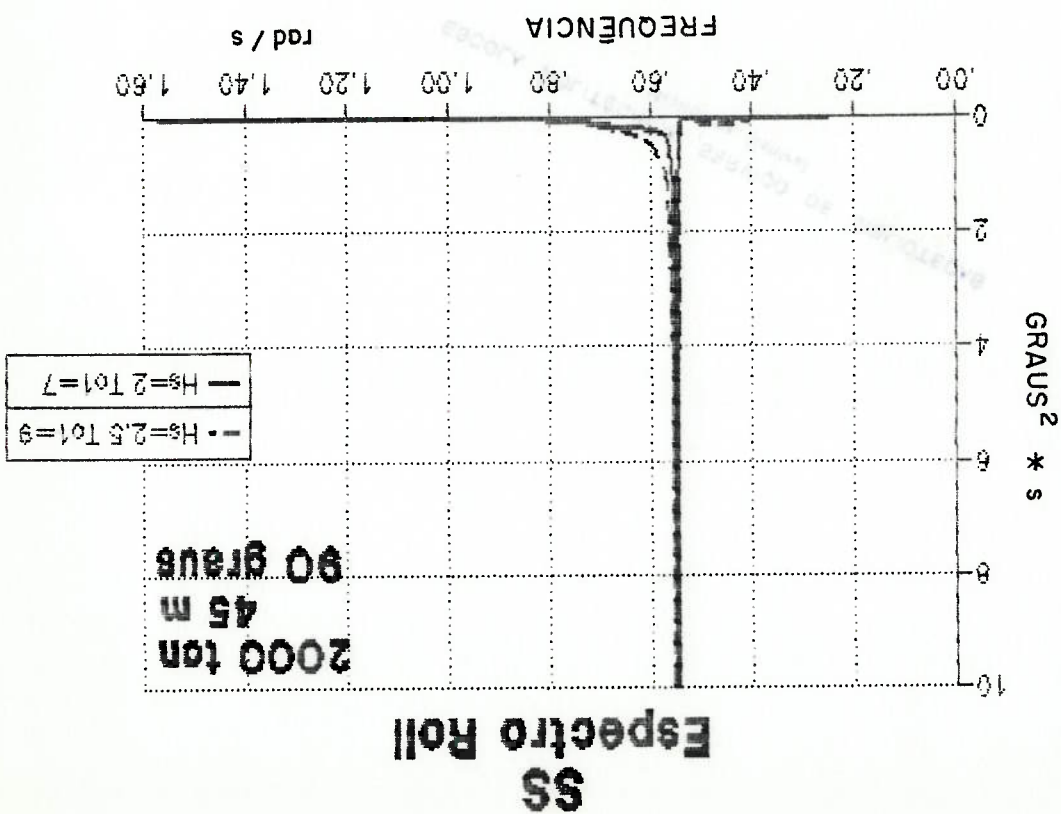


Fig.5.13 Barcaça - Resposta Significativa do Roll

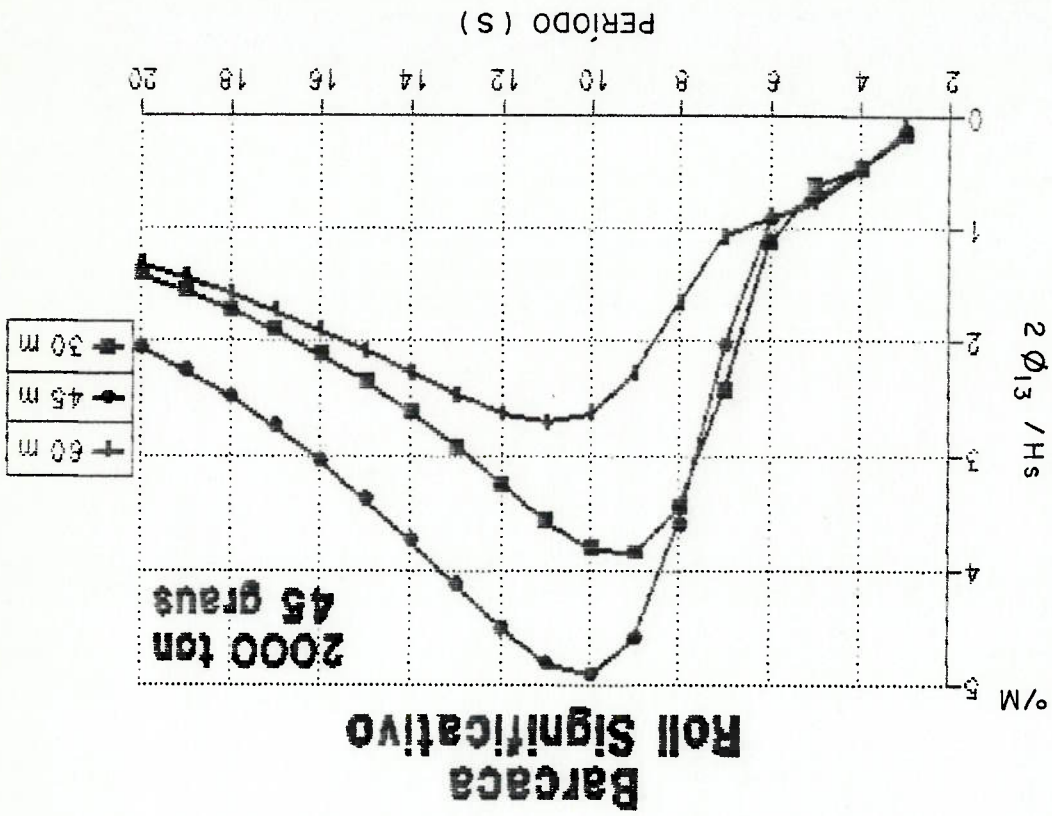


Fig.5.12 Espectro do Movimento Vertical da Ponta de Lança

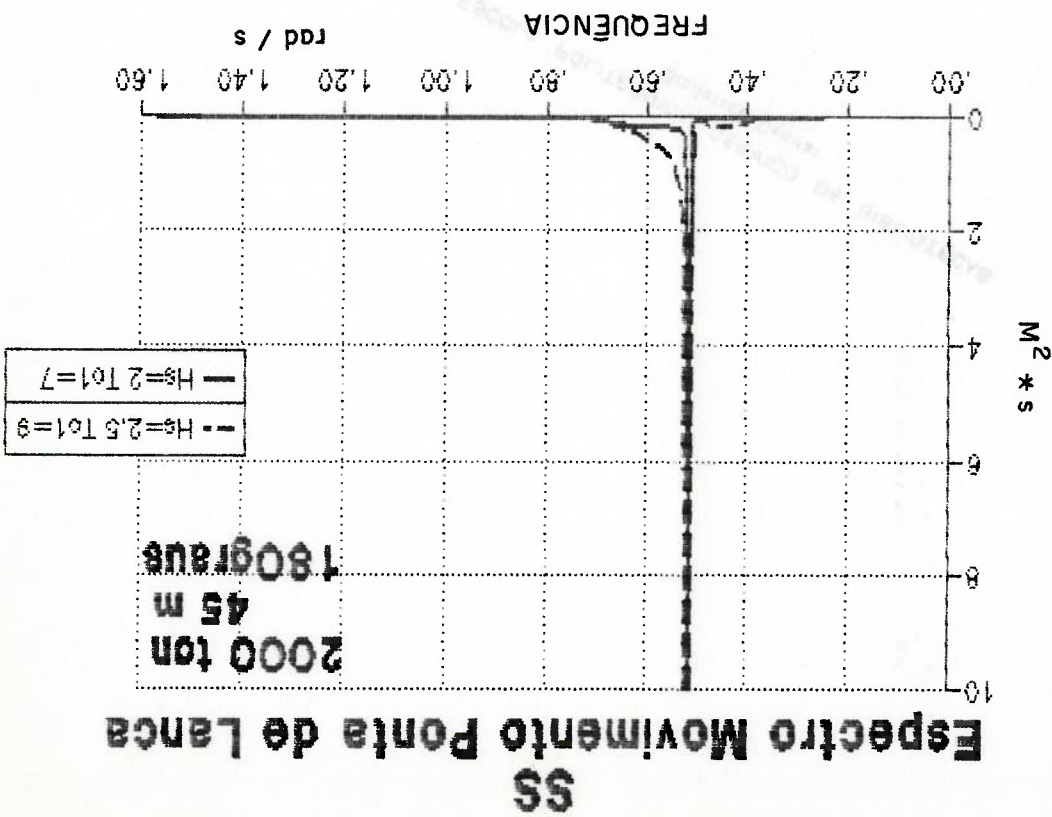


Fig.5.15 Barcaça - Resposta Significativa do Pitch

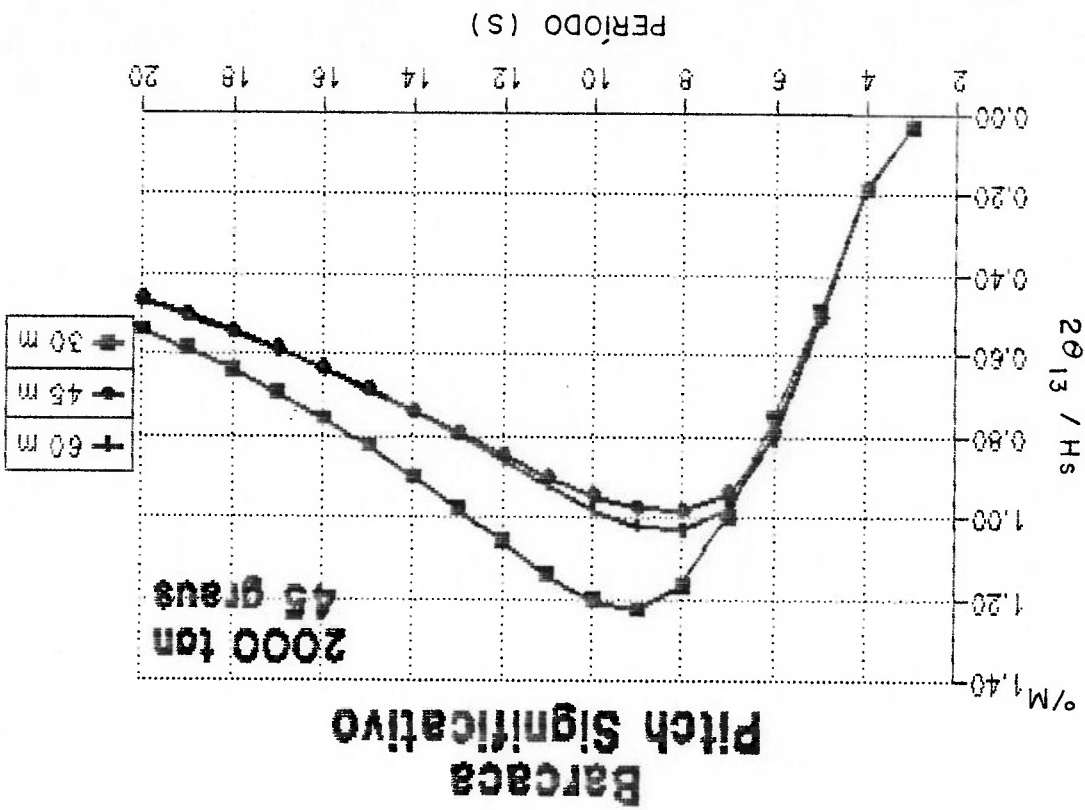


Fig.5.14 Barcaça - Resposta Significativa do Roll

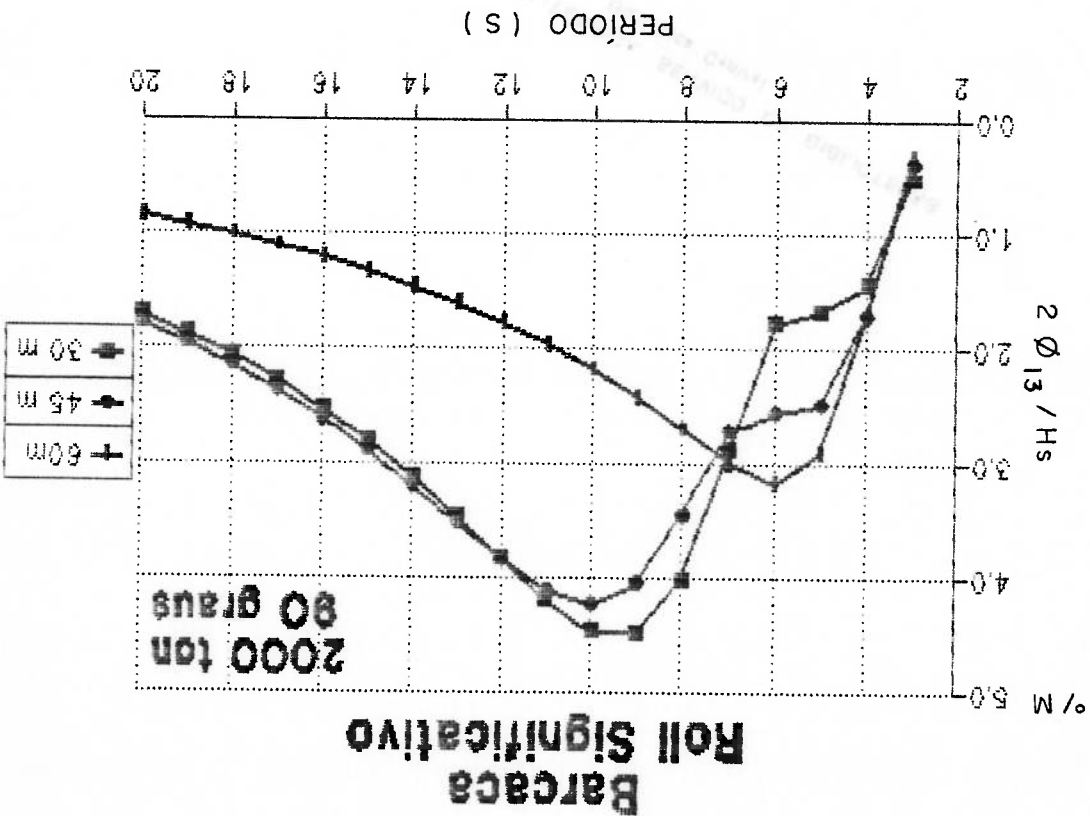




Fig.5.17 Resposta Significativa - Mov. Vert. Ponta de Lança

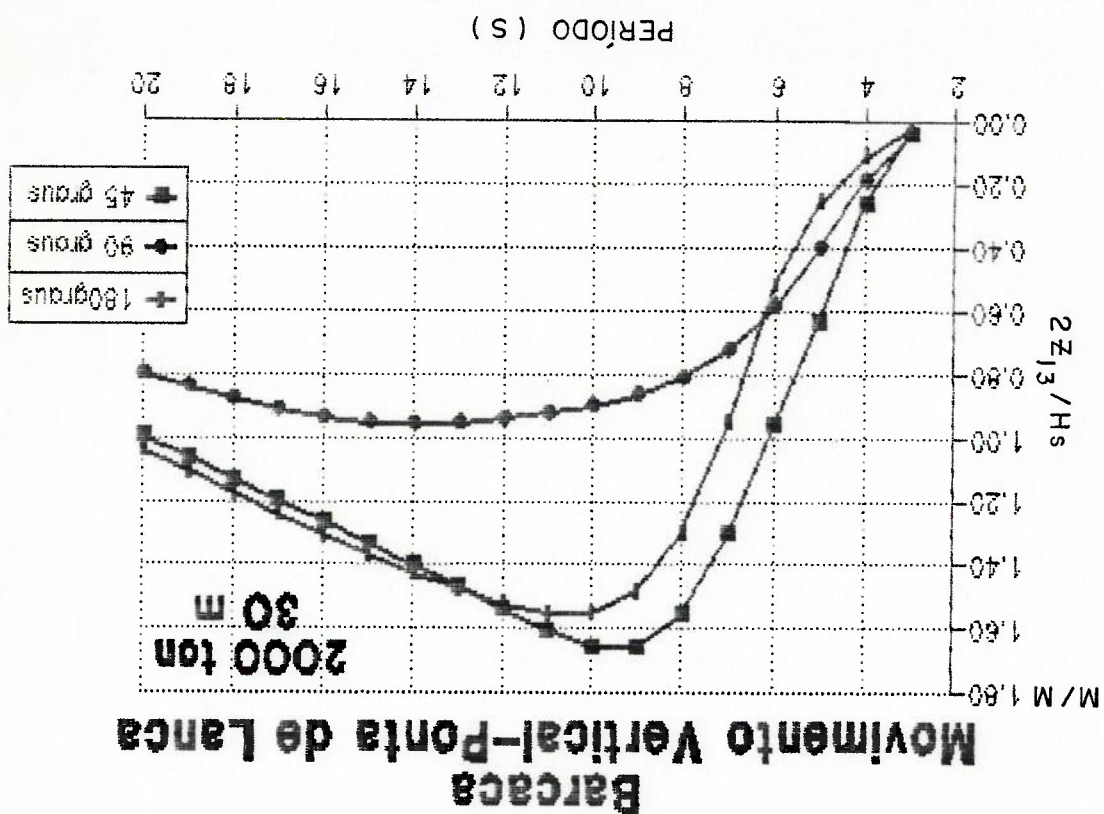


Fig.5.16 Barcaça - Resposta Significativa do Pitch

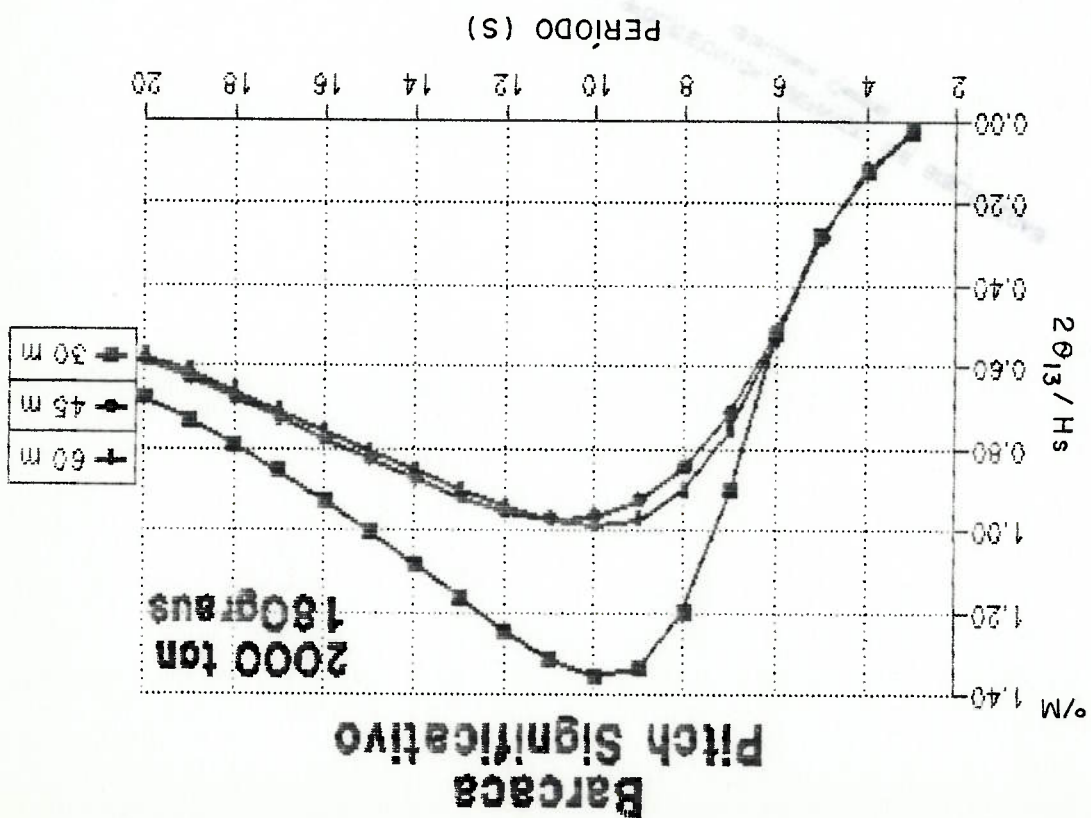


Fig.5.19 SS - Resposta Significativa do Roll

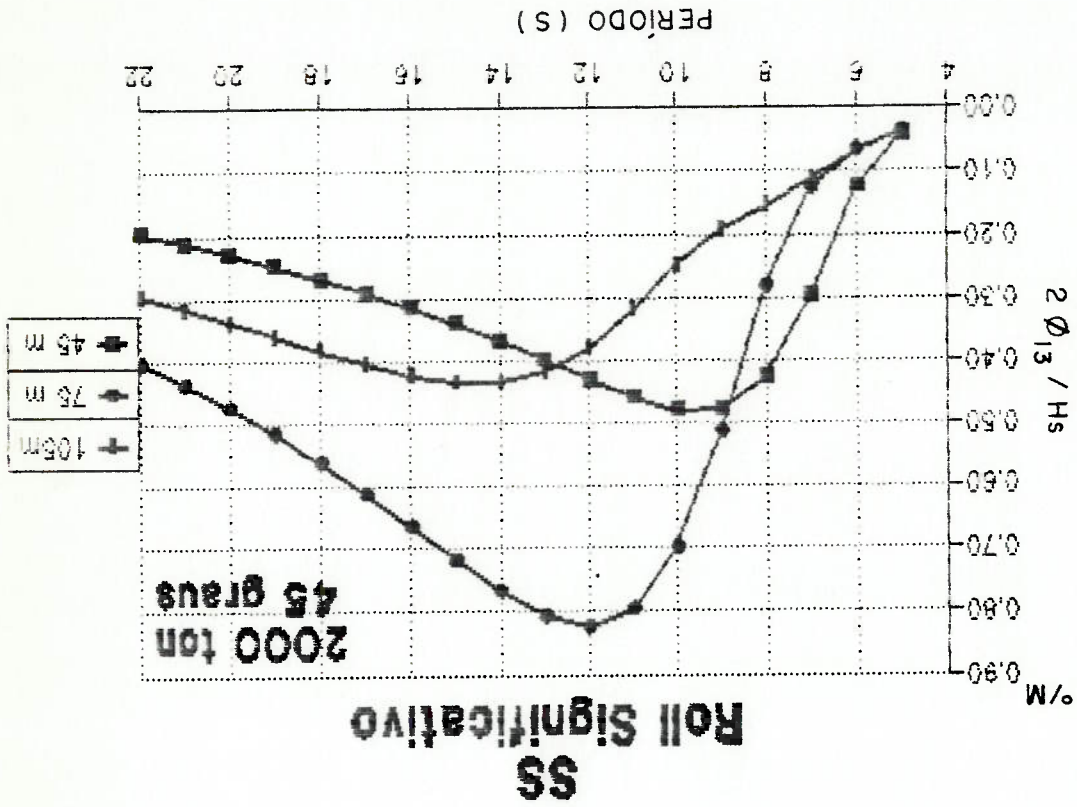


Fig.5.18 Resposta Significativa - Mov. Vert. Ponta de Lança

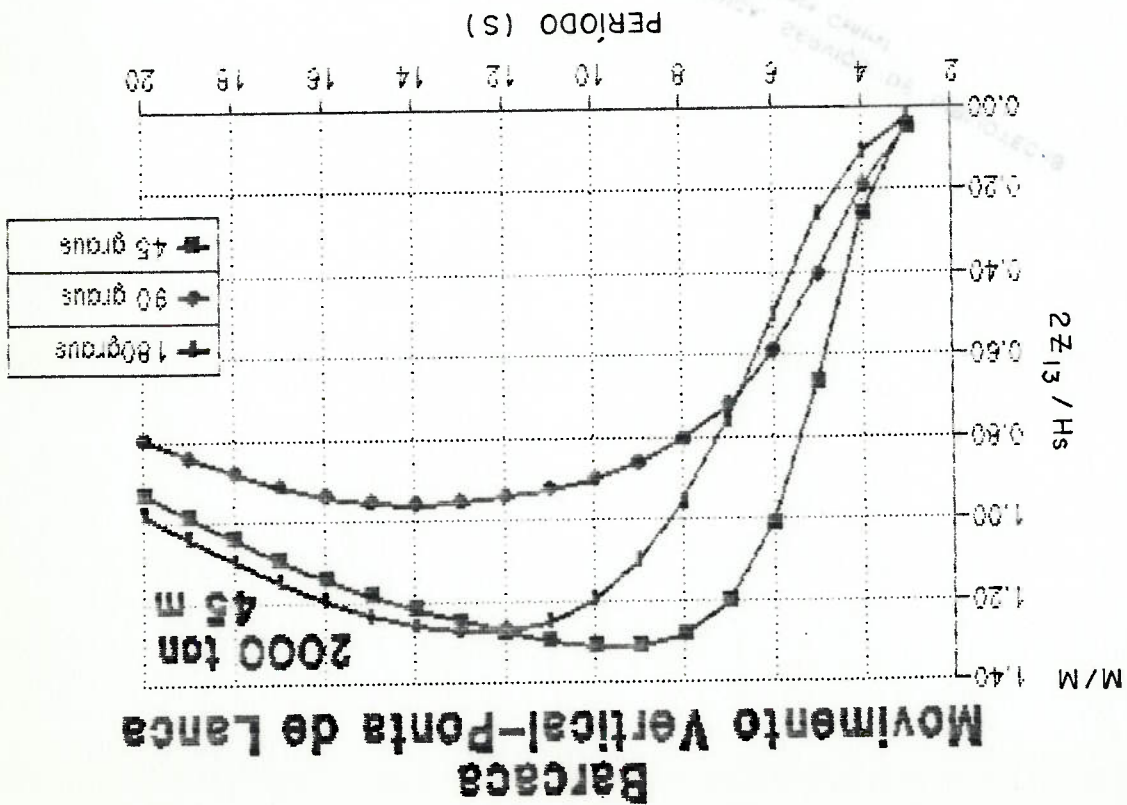


Fig.5.21 SS - Resposta Significativa do Pitch

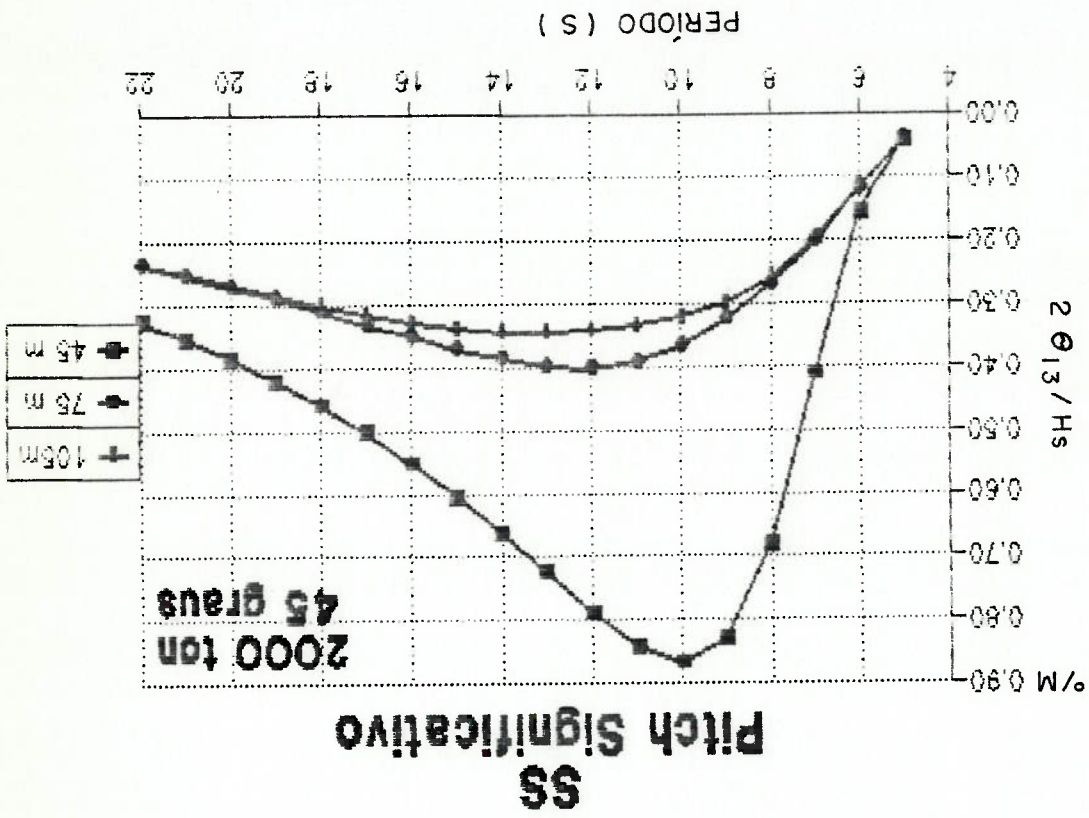


Fig.5.20 SS - Resposta Significativa do Roll

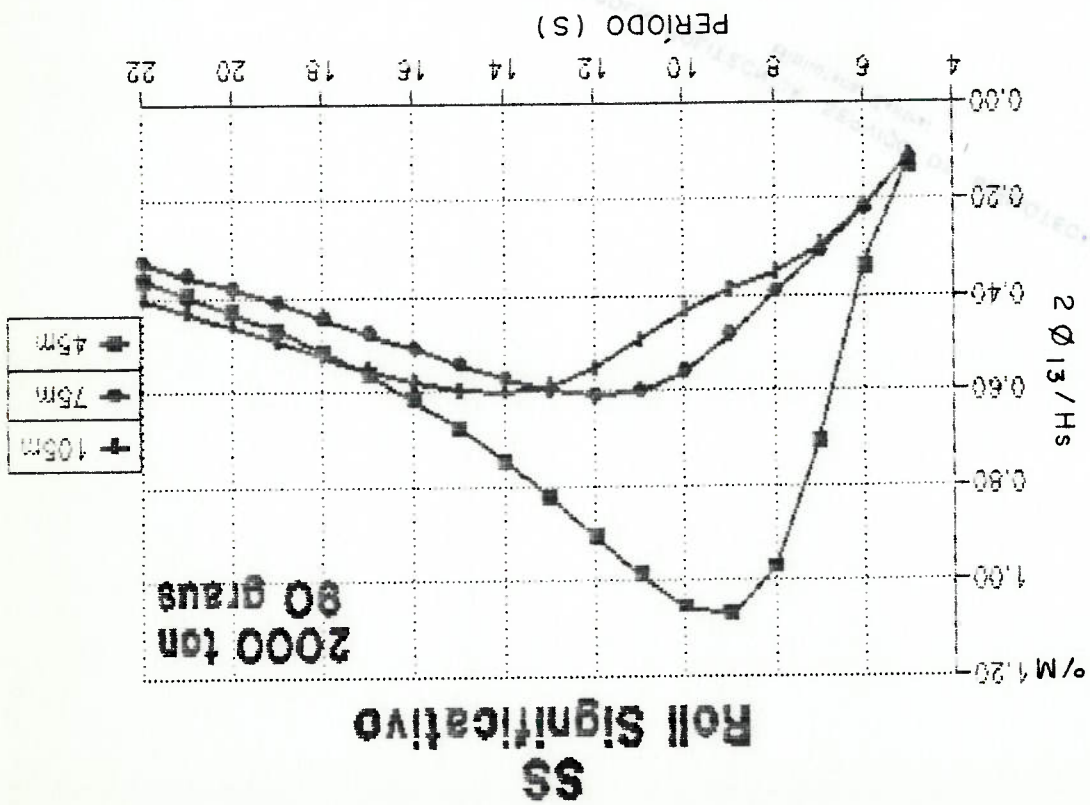


Fig.5.23 Resposta Significativa - Mov. Vert. Ponta de Lanca

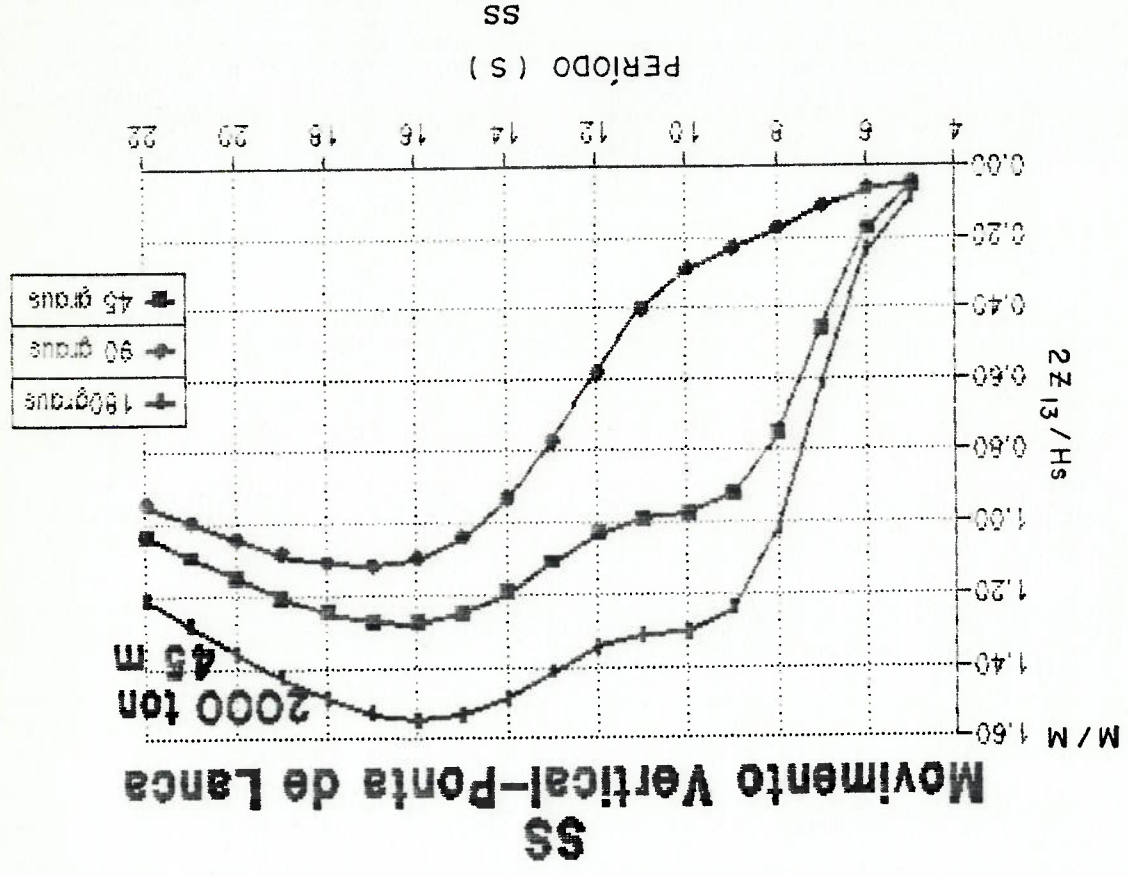
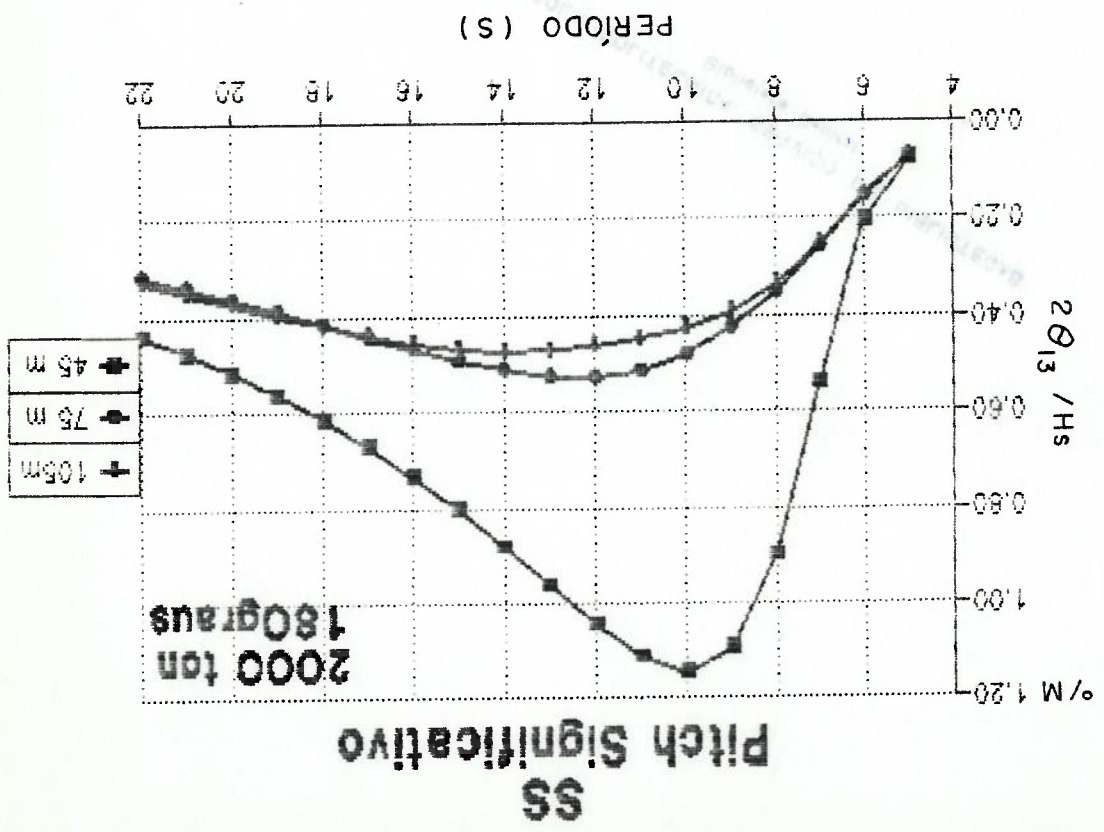
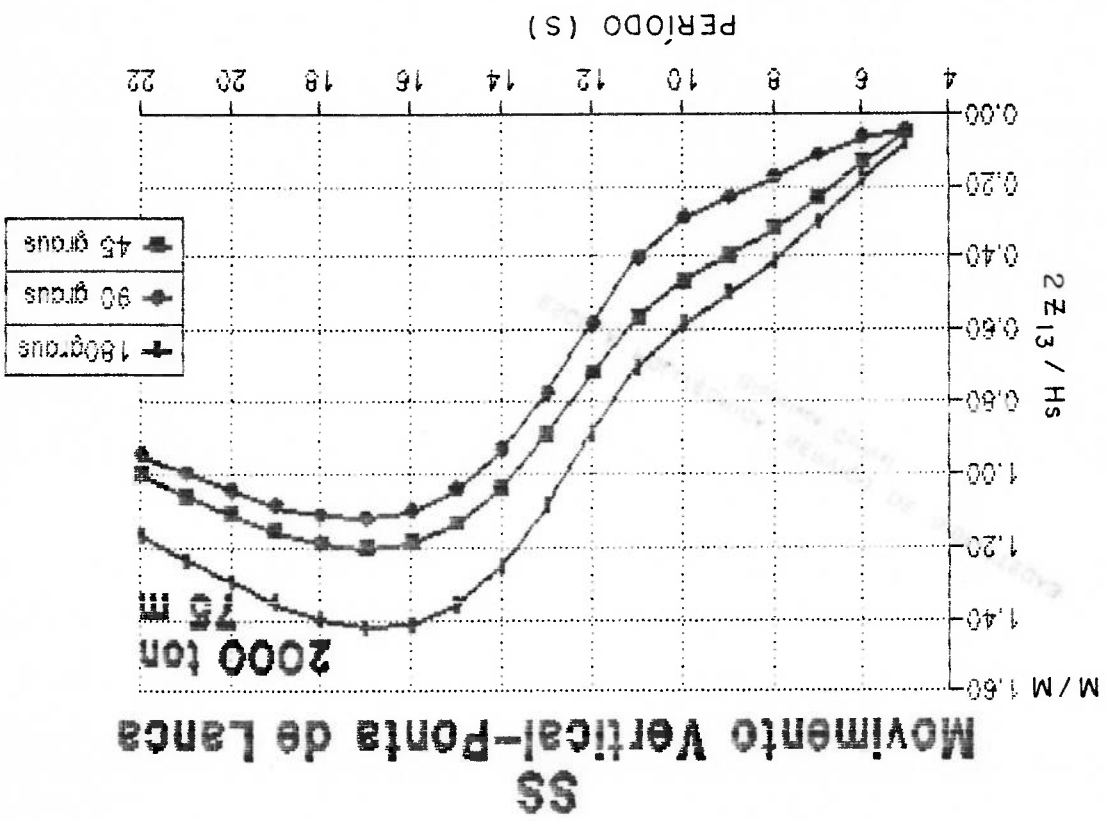


Fig.5.22 SS - Resposta Significativa do Pitch



SS  
 Fig. 5.24 Resposta Significativa - Mov. Vert. Ponta de Lança



As características da resposta da embarcação às condições ambientais são representadas pelas funções de tipo de operação a ser realizada.

conhecidos como critérios de operação e variam conforme o especificados em termos da resposta da embarcação, são integridade dos equipamentos. Esses limites, quando embarcação e a tripulação, e também sem comprometer a fim de que a operação possa ser realizada sem risco para as condições ambientais ou para a resposta da embarcação, se destina esta o estabelecimento dos limites aceitáveis para Diretamente relacionado à função à qual uma embarcação diversos períodos avaliados.

das condições ambientais a serem encontradas durante os embarcação poderá operar para diversas épocas do ano, função essa representada em termos de porcentagem de tempo que a uma embarcação para realizar determinada tarefa, limitação específica. Por operacionalidade entende-se a limitação de operacionalidade de uma embarcação para uma missão Esses três fatores em conjunto irão determinar a locais onde a estrutura deverá operar.

condições ambientais, e da própria característica destas nos destina, das características da resposta da estrutura às depende especificamente da função à qual a estrutura se seja ela um navio de carga ou uma plataforma de petróleo, A viabilidade operacional de uma estrutura marítima,

## 6.1 INTRODUÇÃO

# 6. DETERMINAÇÃO DA OPERACIONALIDADE

transferência da resposta em ondas regulares e pela resposta da embarcação em mar irregular, obtida através do cruzamento espectral. Ambos os casos já foram discutidos nos capítulos anteriores da presente dissertação.

As condições ambientais para estudo de operacionalidade são normalmente representadas em termos de severidade e persistência de estados de mar. A severidade normalmente é caracterizada pela altura significativa e período médio das ondas. Esses dois parâmetros normalmente são apresentados em termos de distribuição conjunta de probabilidade para determinado período e região do mar. Por outro lado, a persistência descreve a frequência de ocorrência e duração de períodos de calmaria e tempestade.

Para se analisar a operacionalidade de uma embarcação para diversos períodos do ano é necessário que se tenha um modelo de ocorrência de estados de mar, para que se possa verificar a frequência de ocorrência dos estados de mar em que a operação possa ser realizada, estes obtidos a partir da análise da resposta de curto prazo da embarcação e dos critérios de operação estabelecidos. A frequência de ocorrência de estados de mar para diversas épocas do ano é obtida a partir de observações ou registros do mar, que devem ter sido efetuados durante vários anos, para se ter uma representação realística das condições, já que não são pequenas as variações de ano para ano. Tal previsão de ocorrência de estados de mar se constitui na chamada análise de longo prazo.

No presente capítulo, será apresentado um modelo de operacionalidade para operações offshore. Nas seções que se

caso se relaciona às condições de mar em que a embarcação da estrutura pode ser comprometida, ao passo que o segundo determina as condições de mar para as quais a integridade da análise de operacionalidade. O primeiro caso se relaciona à ser adotadas quando se tratar do projeto da embarcação ou da da resposta de uma embarcação, abordagens diferentes devem A rigor, quando se considera a previsão de longo prazo resposta.

embarcação sejam levadas em conta para a previsão de sua possíveis de serem encontradas durante o período útil da mudanças sejam consideradas a fim de que todas as condições de uma embarcação ou qualquer estrutura oceânica, tais continuamente exige que, ao se estudar o comportamento no mar O fato das características do mar estejam mudando um período restrito a algumas horas.

processos aleatórios com propriedades estacionárias, durante onda, admitindo-se que o mar e a resposta da embarcação são prazo do estado de mar é representada por um espectro de Como já discutido anteriormente, a condição de curto

## 6.2 DESCRIÇÃO DE LONGO PRAZO DE ESTADOS DE MAR

avaliação do desempenho de diversas embarcações. de EG, e também sua aplicação como um método comparativo para determinação da operacionalidade e sua aplicação na análise para a partir daí ser apresentado o modelo desenvolvido para posteriormente os critérios de operação para operações de EG, das condições do mar e da resposta da embarcação, e seguem será inicialmente discutida a análise de longo prazo



A determinação da resposta de longo prazo de uma embarcação deve partir da análise de curto prazo para diversas condições de mar. A resposta de curto prazo pode ser

discutidos no item 6.3 do presente capítulo. Para o caso de operacionalidade esses critérios serão para o projeto e operacionalidade de estruturas offshore. determinar os critérios de avaliação das condições ambientais exemplo. Hofman (1991) discute diferentes abordagens para se na base de meses ou dias ou até mesmo horas no caso de Eg por operações específicas, os períodos de retorno são avaliados previsão de valores extremos da resposta. Ao se analisar mar favoráveis à operação não podem ser os mesmos que para os critérios para previsão da ocorrência de estados de

aqui apresentadas.

por não serem do interesse do presente trabalho não serão outras distribuições, são discutidas por Chakrabarti (1987) e distribuição de Gumbel e de Weibull. Estas, juntamente com modelos de distribuição de longo prazo destaca-se a do mar referentes a alguns anos de observação. Dentre alguns extrapoladas para a vida útil da embarcação a partir de dados partir de distribuições de longo prazo de alturas de onda te em anos, em que uma condição extrema é excedida, ou a retorno, definido como o intervalo de tempo médio, normalmente podem ser previstos a partir do conceito de período de encontrados durante a vida útil da embarcação. Esses valores extremos das condições de mar e da resposta a serem longo prazo se relaciona à determinação dos prováveis valores

No caso de projeto de uma embarcação, a previsão de poderá operar.

Uma vez tendo-se para a região de operação a distribuição de ocorrência dos estados de mar, computa-se a resposta de curto prazo para cada um dos estados definidos pelo par  $(H^s, T^m)$  correspondente. O espectro de resposta deve ser determinado para todas as funções de transferência de interesse, ou para a mais crítica delas, considerando-se

exemplo por Haver (1985).  
principalmente no Atlântico Norte como apresentado por registros de dados pode ser encontrada para algumas regiões observações. Distribuição de estados de mar baseados em observações do par considerado e o número total de mar, pode ser determinada pela razão entre o número de ocorrência de cada par  $H^s - T^m$ , caracterizando um estado de Bacia de Campos se encontra na Tab.6.1. A probabilidade de Um exemplo da distribuição conjunta de  $H^s$  e  $T^m$  para a Lumb (1987) a partir de observações de navios mercantes.

diversas regiões do mundo foram apresentadas por Hogben e durante diversos anos. Distribuição de estados de mar para observações das condições de mar ou de registros de onda, apresentadas na forma de tabelas obtidas a partir de a região considerada. Essas distribuições são normalmente altura significativa e período característico das ondas, para ocorrência de estados de mar, dada pela distribuição de resposta de uma embarcação deve-se conhecer a distribuição de Para se determinar a distribuição de longo prazo da região.

determinada a partir de um modelo matemático de espectro ou a partir de famílias de espectro definidas para diferentes intervalos de altura significativa e obtidas para determinada

Por exemplo, intervalos de 0,5 m para a altura significativa  
 períodos característicos são dados em termos de intervalos.  
 normalmente se apresenta as alturas significativas e os  
 forma em que a distribuição de ocorrência de estados de mar  
 exceda um determinado valor estabelecido como crítico. Na  
 longo prazo a probabilidade de que a resposta da embarcação  
 o procedimento discutido acima procura determinar no  
 longo prazo.

onde N é o número total de estados de mar considerados no

$$\bar{Q}(Z > Z_0 | \phi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \bar{Q}_i(\phi)$$

direção de onda é dada por

todos os possíveis estados de mar, para uma específica  
 resposta exceda o valor crítico estabelecido considerando-se  
 denotada por  $\bar{Q}_i(\phi)$ , de tal modo que a probabilidade de que a  
 $(H^s, T^m)$  por  $P_i$ , a probabilidade  $\bar{Q}(Z > Z_0 | \sigma^R, \phi)$  pode ser  
 Denotando-se a probabilidade de ocorrência de cada par

$$\bar{Q}(Z > Z_0 | \sigma^R, \phi) = \exp\left(-\frac{8\sigma_0^R}{Z_0^2}\right)$$

Rayleigh através da expressão

resposta e pode ser determinada a partir da distribuição de  
 de mar considerado, depende apenas do desvio padrão da  
 probabilidade de que esse valor seja excedido para o estado  
 Tendo-se estabelecido um valor crítico para a resposta, a

O desvio padrão da resposta é determinado por:

$$\sigma^R(\phi) = \left[ \int_{1/2}^0 S^R(\omega) d\omega \right]$$

$$S^R(\omega | \phi) = H(\omega, \phi) S(\omega)$$

resposta é dado por:

direção considerada mais crítica. Como já visto o espectro de  
 também diferentes direções de onda ou do mesmo modo, a

e de 1 ou 2 seg para o período médio. Portanto, dentro de cada intervalo considerado ocorrem variações na forma do espectro de onda, que resultariam em variações na resposta da embarcação. A rigor, devido à aleatoriedade do mar, mesmo para um único par  $H^s - T^m$  representando um estado de mar, existirão variações na forma do espectro representativo do estado. Essas variações, que se constituem em variações do curto prazo, devem ser levadas em consideração quando se determina a resposta da embarcação, de modo a se poder representar a maior ocorrência possível de estados de mar. Quando se considera um estado de mar através de famílias de espectros geradas a partir de registros de ondas na região de operação, as variações na forma do espectro são consideradas através de um espectro médio, obtido a partir de todos os espectros medidos, e de uma variância em torno desse espectro. É o caso dos espectros obtidos por exemplo por Ochi (1978). Haver e Moan (1983) estudaram as variações em espectros obtidos no Mar do Norte e compararam tais variações com os modelos matemáticos de espectro do ISSC e JONSWAP. Guedes Soares (1990) adaptou o estudo desses autores, para a obtenção da resposta de navios através de modelos teóricos de espectro.

Outra questão importante a ser considerada diz respeito à distribuição de ocorrência de direções de onda. Tal distribuição normalmente depende da distribuição de alturas de onda e deve ser considerada na determinação da resposta de longo prazo, especialmente no caso de embarcações que não possam ajustar o seu aprornamento às ondas durante a operação.

ondas, intensidade de correnteza e ventos por exemplo, ou em de condições ambientais dadas por alturas e períodos de Os limites operacionais podem ser expressos em termos

deverem gerar os chamados critérios operacionais. etapas ou operações previstas para a execução do projeto, e dos a partir dos níveis de segurança exigidos nas diversas execução devem ser conhecidos. Esses limites são estabelecidos limites operacionais envolvidos nas diversas etapas de realizado com sucesso dentro do período alocado para tal, os Para um projeto ou parte de um projeto offshore ser

### 6.3 CRITÉRIOS DE OPERAÇÃO

de operacionalidade. embarcação e devem ser considerados na formulação do modelo fundamental na determinação da operacionalidade de uma Os fatores expostos acima são de importância Tab.6.2 representando condições de mar na Baía de Campos. alturas significativas para os diversos meses do ano, como a considerado existem tabelas que apresentam a distribuição de períodos de inverno e verão. Para que tal fator seja de uma embarcação, que deve variar bastante entre os bastante importante quando se quer determinar a operacionalidade ocorre entre os meses de inverno e verão. Esse aspecto é regiões críticas como o Mar do Norte, onde grande diferença com maior frequência nos meses de inverno, particularmente em diversas épocas do ano. Estados mais severos tendem a ocorrer ocorrência de estados de mar não deve ser a mesma para as É importante notar também que a distribuição de

Uma das principais questões a ser considerada quando se procura desenvolver uma metodologia para a análise das condições de uma operação offshore, diz respeito ao fato de

de operacionalidade para qualquer caso de operação offshore. se definir os critérios de operação e se chegar a um modelo prazo se constituem desse modo em fatores fundamentais para operação. Os conceitos de predição de curto prazo e longo grandezas que podem gerar figuras de mérito para a análise da estatísticas para poder ser expressa em algumas simples das condições de operação requer algumas extrapolações disso, mesmo para um determinado estado de mar, a descrição elas são função dos estados de mar ocorrentes no local. Além uma operação só podem ser determinadas estatisticamente, pois As condições a serem encontradas para a realização de

relacionado com a operação. movimentos de algum ponto da embarcação mais diretamente liberdade de movimento da embarcação, mas sim em função dos ser melhor expressos não em termos dos seis graus de devem estar relacionados à operação a ser realizada e podem Em termos de resposta da embarcação, os critérios de onda a ser encontrado.

distribuição de energia de ondas, dada pela forma do espectro direção de propagação da onda, distribuição de peso, ou mesmo pode ter características de resposta diversas, conforme a embarcação e sujeitos a incorrências, pois a mesma embarcação critérios são normalmente aplicados apenas a um tipo de Quando expressos em termos de condições ambientais, os

termos de resposta da embarcação como deslocamentos, velocidades, acelerações ou mesmo esforços e tensões.

A primeira abordagem diz respeito à resposta significativa da embarcação, obtida diretamente da análise espectral dos estados de mar a serem encontrados. Para o caso de Eg, Rawstron e Blight (1978) estabeleceram um critério de operação empírico, baseado em histogramas obtidos de registros das condições de mar e dos movimentos da embarcação

As suas fases consideradas críticas. Conforme a natureza da operação e sua duração ou duração de Chen e Rawstron (1983) e Hofman (1991). Elas podem variar de abordagem, discutidas por Hofman e Fitzgerald (1978), de uma operação offshore pode-se citar três maneiras básicas Ao se procurar estabelecer os critérios operacionais espectros de onda.

ser consideradas estacionárias e analisadas através de períodos de 20 a 30 minutos, pois estes períodos representam caso ideal para se estabelecer critérios de operação seria curtos para se poder estabelecer as condições operacionais. O ser extrapoladas tanto para períodos mais longos quanto mais posição final), de modo que as condições de curto prazo devem de Eg ilustra-se o instante de colocação do módulo em sua determinado nível de resposta não pode ser excedido (no caso curtos, em torno de poucos minutos ou segundos, para os quais críticas das operações requerem a seleção de períodos muito caracterizando um estado de mar. Além disso certas fases estacionárias e descritas por um simples espectro condições ambientais não mais podem ser admitidas como completadas, ultrapassando diversas horas, para os quais as que muitas operações requerem períodos longos para serem

durante operações no Mar do Norte. Trata-se de um dos critérios até presentemente bastante considerado, conforme indicam Clauss e Rieker (1990), e que é expresso em termos da resposta significativa do movimento vertical da extremidade do guindaste ou ponta de lança. Os limites estabelecidos para a dupla amplitude da resposta significativa do movimento vertical da ponta de lança são dados por:

Cargas pesadas: 0,90 a 1.00 m

Cargas moderadas a leves: 1,20 m

Rawstron e Blight (1978) definem como cargas pesadas aquelas que requerem o uso do bloco principal do guindaste.

A validade de tais critérios pode ser facilmente compreendida a partir da Fig. 6.1 reproduzida dessa referência e que representa histogramas do movimento vertical da extremidade do guindaste durante as operações. Nota-se uma queda acentuada na frequência de ocorrência do movimento para valores acima de 3 ft para carga pesada e 4 ft para cargas moderadas, indicando que poucas medições foram realizadas acima de tais valores o que demonstra que as operações provavelmente não foram realizadas durante ocorrência de movimento em tais níveis. Os critérios baseados na resposta significativa tratam-se dos mais simples de serem considerados, conquanto sua aplicação seja adequada à operação a ser analisada.



Uma segunda abordagem para se estabelecer os critérios

$$\text{Pitch: } \theta_{1/3} \leq 2^\circ$$

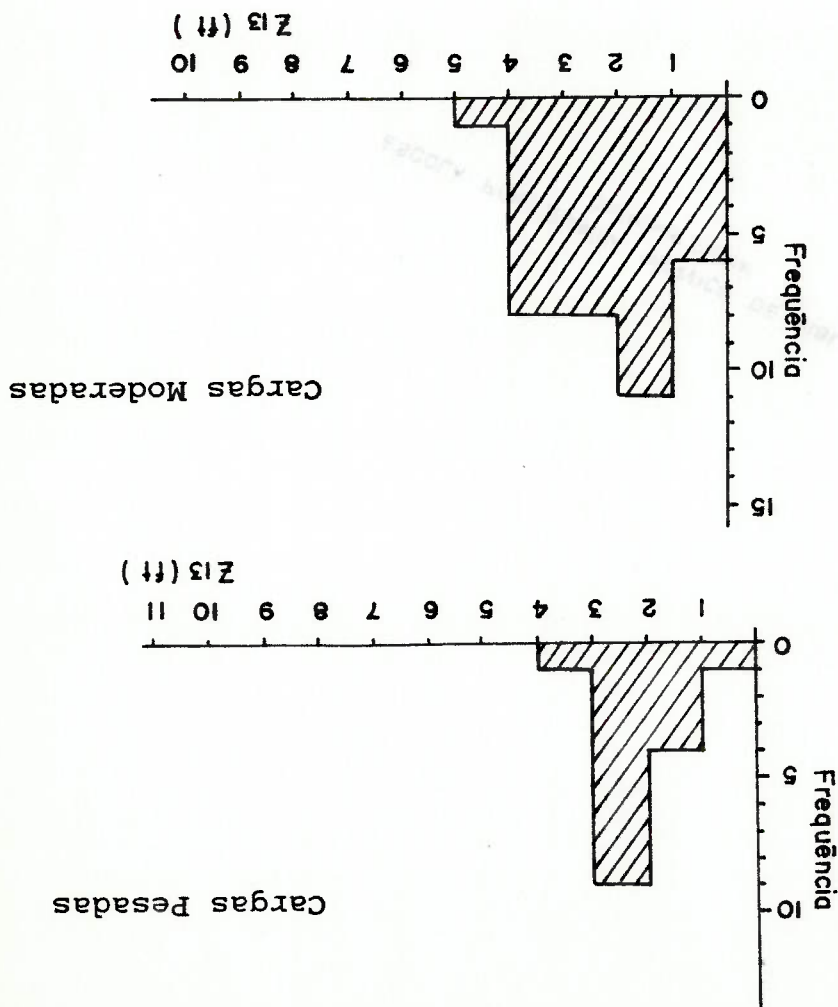
$$\text{Roll: } \phi_{1/3} \leq 6^\circ$$

significativos:

Um outro critério de operação comumente estabelecido para operações offshore e também baseado na resposta significativa, é em termos dos movimentos angulares da embarcação. Segundo Nojiri (1983) para EG a dupla amplitude do roll e pitch devem estar limitadas aos seguintes valores

da Ponta de Lança para Operações no Mar do Norte

Fig. 6.1 Histogramas da Dupla Amplitude do Movimento Vertical



$$\bar{N} = \sum_{z_0} \phi(z_0 | m_0) \times n$$

se

se  $\bar{N}$  o número de vezes esperado em que  $z_0$  será excedido tem-  
representando a resposta e  $z_0$  o valor estabelecido, chamando-  
número de ciclos total. Ou seja, sendo  $Z$  a variável  
ser excedido é dado pela distribuição da resposta vezes o  
d- o número de vezes que determinado valor da resposta devera

$$n = \frac{T_{02}}{N \times 3600}$$

por  $n$  é dado pela relação

de ciclos esperado para a resposta da embarcação, denotado  
extrapolando-se a condição de mar para tal período, o número  
c- Considerando-se uma duração de  $N$  horas para uma operação e

$$\phi(z_0 | m_0) = \exp\left(-\frac{z_0}{m_0}\right)$$

Rayleigh com parâmetro  $m_0$  conforme expressão:

b- A distribuição da resposta segue uma distribuição de

$$T_{02} = 2\pi \sqrt{m_0/m_z}$$

anteriormente é dada por:

a- A definição de período de cruzamento ascendente vista

procedimento:

descrita pelo seu espectro, considera-se o seguinte

valor da resposta é excedido para uma condição de mar

Para se determinar o número de vezes que determinado

alguma fase crítica.

o período de duração da operação como parte dela, referente a

ser identificado como período de retorno e representar tanto

durante um período de tempo especificado. Esse período pode

resposta da embarcação pode exceder um valor pré-determinado,

de operação é expressa em termos do número de vezes que a

Hoffman e Fitzgerald (1978) sugerem alguns critérios para EG baseados nesse princípio. Um deles limita o movimento angular do guindaste durante a operação a 2 graus, nível que não poderá ser excedido mais do que uma vez durante o içamento. Outros critérios adotados na mesma referência e analisados de maneira comparativa, se referem a limites estabelecidos para o movimento vertical da extremidade do guindaste. Tais limites estabelecem um máximo de uma ocorrência de valores de dupla amplitude do movimento acima de 0,80, 1,20 e 1,60 metros, a cada 20 minutos de operação. De maneira análoga, a velocidade vertical da ponta de lança ou do módulo é limitada a 0,75 m/s. A frequência de ocorrência permitida pode ser também de uma vez a cada 20 minutos, considerando-se este intervalo como o tempo necessário para se executar uma etapa crítica da operação, como retirar o módulo da barcaça de transporte ou colocá-lo em sua posição final. Segundo Chen e Rawstron (1983) esse critério se baseia na quantidade de energia cinética que pode ser absorvida pelas estruturas sem que elas sofram quaisquer danos. O valor limite para a velocidade pode ser outro, conforme a operação a ser realizada, e deve se basear na massa e na resistência das estruturas envolvidas.

Os critérios descritos anteriormente são facilmente determinados para uma embarcação se se considera um determinado estado de mar cujas condições se mantêm admitida como válida para períodos curtos de aproximadamente 20 a 30 minutos. De acordo com Hoffman (1991) a hipótese de estacionaridade pode ser extrapolada para algo em torno de 3

a 4 horas conforme as condições do mar, sendo os casos mais críticos os períodos de mudança de condições, isto é, o desenvolvimento ou decaimento de uma condição mais severa. Uma terceira abordagem para a determinação da operacionalidade de uma embarcação seria o estabelecimento dos critérios de operação em termos de persistência de estados de mar calmos, ou estados em que a embarcação possa operar. Como as operações offshore, e no caso mais específico do interesse dessa dissertação, as operações de EG normalmente ultrapassam o período de tempo para o qual as condições são admitidas estacionárias, alguns autores como Hofman (1978) e Chen e Rawstron (1983) sugerem que as condições operacionais sejam estabelecidas em termos de probabilidade de se exceder determinados valores da resposta para um determinado estado de mar, juntamente com a consideração do período de tempo em que as condições dos estados favoráveis à operação se mantêm. A dificuldade de tal abordagem é a falta de um modelo teórico que considere uma distribuição do período de persistência de estados de mar abaixo de uma determinada condição. Tal abordagem pode ser aplicada apenas em locais onde uma extensa quantidade de registros tenha sido obtida durante vários anos. Rothkopf et al. (1974) descrevem um modelo de persistência de estados de mar em termos de uma Cadeia de Markov com uma matriz de transição tridimensional, admitindo-se que a transição entre estados de mar calmos e severos ocorre sempre através de estados adjacentes. No entanto tal modelo não é de fácil adaptação pois também requer dados observados ou medidos no local a ser analisado.

Qualquer que seja o princípio adotado para o estabelecimento dos critérios de operação, a determinação da operacionalidade de uma embarcação irá depender diretamente do nível de representação e confiabilidade das condições ambientais para o local onde a embarcação deverá operar, tanto no que se refere aos modelos adotados para a análise de curto prazo, como à representação de longo prazo da ocorrência de estados de mar. A quantidade de dados observados ou medidos, sua forma de representação e o período coberto por tais dados, além da adequação de modelos teóricos de descrição dos estados de mar, é que irão determinar a maneira mais adequada para se considerar as condições de operação e para se determinar a operacionalidade. No parágrafo seguinte será apresentado o modelo adotado no presente trabalho para a determinação da operacionalidade de EG.

#### 6.4 MODELO DE OPERACIONALIDADE

Já foi mencionado que a operacionalidade de uma embarcação, entendida como as condições favoráveis para a embarcação poder operar, depende basicamente de três fatores: a - da operação a ser realizada; b - das características do mar no local da operação; c - da característica da resposta da embarcação às condições ambientais.

Esses três fatores já foram discutidos nos capítulos e itens anteriores, de modo que resta apresentar o modelo de operacionalidade desenvolvido no presente trabalho.

Os valores de  $H^s$  e  $T^m$  a serem utilizados no modelo ISSC,  $T^m$  se referindo a qualquer um dos períodos característicos utilizados, devem estar ligados aos estados de mar típicos da região a ser considerada.  $H^s$  e  $T^m$  são considerados em termos de intervalos nas tabelas de distribuição de ocorrência de estados de mar, como ilustrado na Tab. 6.1. Dentro de cada grupo, que caracteriza um determinado estado de mar e representado pelo cruzamento dos intervalos de  $H^s$  e  $T^m$ , deve-se considerar o espectro médio espalhamento.

onde  $S(\omega)$  representa o espectro ISSC e  $G(\theta)$  é a função de

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) G(\theta)$$

no Cap. 5 :

O modelo de espectro considerado na presente dissertação é o modelo de dois parâmetros do ISSC com uma função de espalhamento, de modo a se ter, conforme descrito deve ser utilizado.

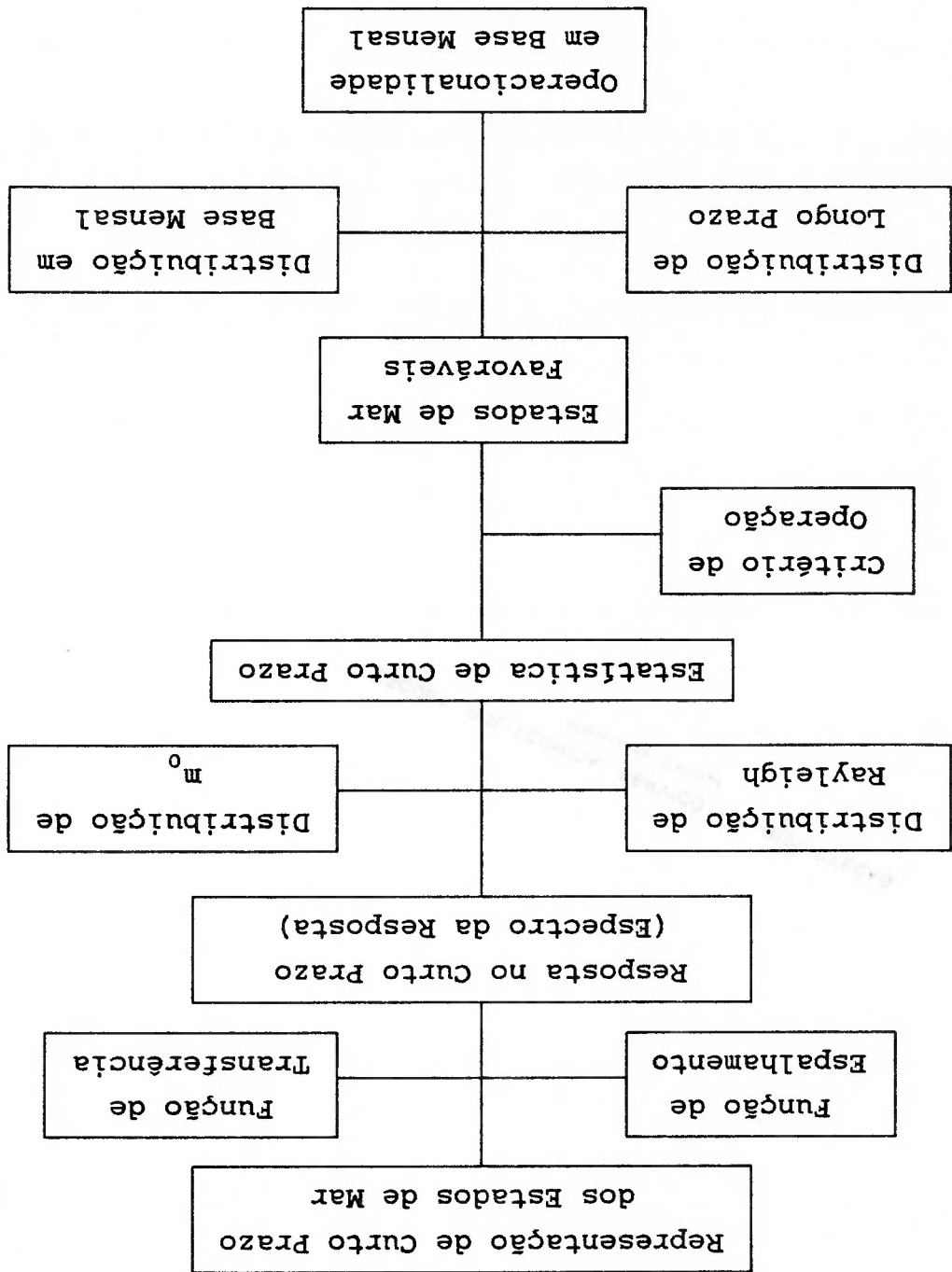
espectro que melhor represente o mar na região considerada podem ser adotados. Caso contrário o modelo matemático de considerados como representativos do mar da região, os mesmos partir de registros de onda no local que possam ser espectros de onda. Se forem disponíveis espectros gerados a estados de mar no local da operação, feita através de O primeiro passo a ser executado é a representação dos

### 1) representação dos estados de mar

Fig.6.2, e é descrita a seguir.

A metodologia utilizada para a determinação da operacionalidade é ilustrada no diagrama apresentado na

Fig.6.2 Representação Esquemática do Modelo Genérico para Determinação da Operacionalidade de uma Embarcação



representativo daquele estado. Segundo Haver e Moan (1982), é

razoável admitir-se que  $H^s$  e  $T^m$  são variáveis aleatórias

independentes e uniformemente distribuídas dentro de um

grupo. De tal modo  $S(\omega)$  é uma função de duas variáveis

aleatórias sendo sua média a representação do espectro médio

para o grupo considerado. Chamando-se de  $\bar{S}(\omega)$  a média de  $S(\omega)$

ela pode ser representada como

$$\bar{S}(\omega) = \int_{T_2^m}^{T_1^m} \int_{H_2^s}^{H_1^s} S(\omega) p(H^s, T^m) dH^s dT^m \quad (6.1)$$

onde  $T_1^m$  e  $T_2^m$  são os limites do intervalo de  $T^m$  considerado e

$H_1^s$  e  $H_2^s$  são os limites do intervalo de  $H^s$ .  $p(H^s, T^m)$

representa a função densidade de probabilidade (fdp) conjunta

de  $H^s$  e  $T^m$ . Como as variáveis são admitidas como independen-

tes dentro de um grupo, tem-se que

$$p(H^s, T^m) = p(H^s) q(T^m)$$

sendo  $p(H^s)$  e  $q(T^m)$  as fdp de  $H^s$  e  $T^m$  respectivamente. Além

disso  $H^s$  e  $T^m$  são uniformemente distribuídas dentro de cada

grupo, de modo que suas fdp são constantes que devem

satisfazer as relações:

$$\int_{H_2^s}^{H_1^s} C_1^s dH^s = 1$$

$$\int_{T_2^m}^{T_1^m} C_2^m dT^m = 1$$

de onde se tira facilmente que

$$C_1^s = \frac{H_2^s - H_1^s}{1}$$

e a fdp de  $H^s$  é

$$C_2^m = \frac{T_2^m - T_1^m}{1}$$



é a fdp de  $T^m$ .

A expressão (6.1) pode ser escrita como

$$S(\omega) = \lambda^{-s} \omega^{-s} \frac{T_4^m}{H_s^2}$$

onde

$$\lambda^s = c \exp(-B \omega^{-4})$$

C representando uma constante de acordo com o período característico considerado no espectro ISSC. Para que se possa obter uma expressão analítica ainda simples para  $\underline{S}(\omega)$ , pode-se admitir  $\lambda^s$  como constante para cada frequência de modo que a obtenção de  $\underline{S}(\omega)$  se reduza a

$$(6.2) \quad \underline{S}(\omega) = \int_{T_2^m}^{T_1^m} \int_{H_2^s}^{H_1^s} \lambda^{-s} \omega^{-s} \frac{T_4^m}{H_s^2} \frac{1}{1} \frac{H_1^s}{H_2^s} \frac{1}{1} \frac{T_2^m}{T_1^m} dH^s dT^m$$

de onde obtém-se a expressão para o espectro médio de cada grupo representativo dos estados de mar adotados, dada por

$$(6.3) \quad \underline{S}(\omega) = \frac{6}{\lambda^s \omega^{-s} (H_2^s - H_1^s) (T_1^m - T_2^m)} \frac{(H_2^s - H_1^s) (T_2^m - T_1^m)}{(H_2^s - H_1^s) (T_1^m - T_2^m)}$$

2) representação da resposta da embarcação

Uma vez considerado o estado de mar calcula-se a resposta da embarcação fazendo-se o cruzamento espectral para a direção de onda considerada. Para uma direção de onda  $\phi$  o espectro de resposta da embarcação é dado por:

$$S^H(\omega, \phi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} H(\omega, \phi + \theta)^2 \underline{S}(\omega) G(\theta) d\theta$$

sendo  $\theta$  o ângulo entre uma direção qualquer e a direção principal de propagação da onda. O espectro de resposta pode ser caracterizado pelos seus momentos de ordem  $i$ , obtidos a partir da seguinte expressão:

A segunda abordagem para determinação da operacionalidade procura estabelecer um nível de probabilidade aceitável, denotado por  $\alpha$ , de que a resposta exceda um valor previamente estabelecido. O valor estabelecido para  $\alpha$  irá depender do nível de risco aceitável para a operação. A condição de mar é considerada favorável se a probabilidade de se exceder o limite estabelecido para a resposta for menor do que  $\alpha$ . Sabe-se que a resposta da embarcação segue uma distribuição de

embarcação pode operar. Com tal critério pode-se também facilmente estabelecer os limites para altura significativa de onda para as quais a

$$Z_{1/3} = 4 \sqrt{m_0}$$

expressão:

partir do momento de ordem zero do espectro de resposta pela cruzamento espectral. A resposta significativa é obtida a partir do movimento vertical da ponta de lança. Trata-se do critério limite para a resposta significativa de roll, pitch e o primeiro deles diz respeito ao estabelecimento de um

foram os critérios analisados. A partir da resposta os critérios de operação são analisados determinando-se se a embarcação pode ou não operar no estado de mar considerado. Conforme descrito em itens anteriores, diversos são os critérios que podem ser aplicados para uma determinada operação. No presente trabalho dois

### 3) Verificação dos critérios de operação

$$m_1(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^1 S^R(\omega) d\omega$$

Rayleigh que depende somente da sua variância. Denotando-se

por  $Z_0$  o limite estabelecido, a probabilidade da resposta

exceder esse valor é dada por:

$$P(Z > Z_0 | \phi) = \exp(-Z_0^2 / (8 m_0^2)) \quad (6.4)$$

O valor calculado é simplesmente comparado com o nível de risco aceitável  $\alpha$ , para se determinar se o estado de mar

considerado é favorável à operação.

#### 4) estabelecimento dos estados de mar favoráveis

##### determinação da operacionalidade

Os itens 1, 2, e 3 acima determinam a avaliação da

resposta e das condições de operação para um único estado de

mar, representado por seu espectro, de modo que eles devem

ser computados para todos os estados de mar que possam

ocorrer no local da operação. Sendo um estado de mar

caracterizado pela altura significativa e pelo período

característico de ondas, introduz-se uma função  $\chi(H_s, T_m | \phi)$

que irá relacionar os estados de mar favoráveis à operação.

Considerando-se a aplicação dos critérios de operação de

maneira independente tem-se para cada um deles e para cada

estado de mar:

$$\chi(H_s, T_m | \phi) = \begin{cases} 1 & \text{se o estado de mar é favorável à operação} \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

Uma vez determinados os estados de mar favoráveis à

operação, a operacionalidade é obtida a partir da

distribuição de longo prazo de estados de mar, para que se

possa obter a probabilidade de ocorrência desses mesmos

estados favoráveis à operação.

A Tab.6.1 ilustra um exemplo de distribuição de

estados de mar para a Baía de Campos. Considerando-se a

das condições de mar, por exemplo se o aprornamento for aprornamento fixo previamente estabelecido antes da avaliação No entanto se a operação tiver que ser efetuada com um

caso responderá a direção mais favorável para operar. irá influenciar a operacionalidade da embarcação. Esta nesse direção de onda mais favorável, a distribuição de direção não Se a embarcação puder ajustar o aprornamento para a

5) consideração da distribuição de direção de onda

$$M(k, \phi) = \sum_j^i p_j \sum_k^i p_{ik} \chi(H^s, T^m | \phi)$$

embarcação para o mês  $k$  é obtida por: do grupo de  $H^s$  em um determinado mês  $k$ , a operacionalidade da cada mês considerado. Sendo  $p_{ik}$  a probabilidade de ocorrência obtida considerando-se a frequência de ocorrência de  $H^s$  para A operacionalidade da embarcação em base mensal é

$$M^i(\phi) = \sum_j^i p_j \chi(H^s, T^m | \phi)$$

medida pelo valor de  $H^s$ . Tem-se então: da embarcação poder operar, em função da severidade do mar grupo de  $T^m$  dado o grupo de  $H^s$ , pode-se obter a probabilidade Denotando-se por  $p_j(T^m | H^s)$  a probabilidade de ocorrência do pelo número total de ocorrências do grupo de  $H^s$  considerado. de  $H^s$  considerado (cruzamento de linha e coluna da tabela), de ocorrências do intervalo de  $T^m$  juntamente com o intervalo representado por cada coluna, é obtida dividindo-se o número tabela, a probabilidade de ocorrência de cada grupo de  $T^m$ , dos intervalos de  $H^s$  representados por cada uma das linhas da frequência de ocorrência de cada estado de mar, para cada um distribuição de probabilidade conjunta de  $H^s$  e  $T^m$  a partir da

exceder um valor estabelecido pode ser expressa como:

em conta as variações de  $m_0$ . A probabilidade da resposta então dada por uma distribuição Rayleigh-Normal que levaria variância  $\sigma_2^2$ . A distribuição da resposta da embarcação seria ser aproximadas por uma distribuição Normal de média  $\mu_0$  e Hofman (1979) e Chen (1980) que as variações de  $m_0$  podem embarcação em relação às variações de  $m_0$ , assume-se (Chen e Para se considerar as incertezas na resposta da

incertezas em torno do parâmetro  $m_0$ .

sobre a resposta podem ser diretamente relacionadas às probabilísticas sobre a resposta. Portanto as incertezas por sua vez implicam em se ter diferentes considerações no parâmetro  $m_0$  da resposta da embarcação. Variações em  $m_0$  razoáveis na forma do espectro, que implicarão em variações definido pelos parâmetros  $H_s$  e  $T_m$ , existem variações da variância  $m_0$  da resposta. Para um dado estado de mar prazo é dada pela distribuição de Rayleigh e depende apenas A distribuição da resposta de uma embarcação no curto

#### 6.4.1 CONSIDERAÇÃO SOBRE A VARIAÇÃO NA FORMA DO ESPECTRO

$$W(k) = \int_{-m}^m W(k, \phi) f^m(\phi)$$

fica sendo expressa por:

da ocorrência de alturas significativas, a operacionalidade direção de onda e admitindo-se que tal distribuição independe a operacionalidade. Chamando-se de  $f^m(\phi)$  a distribuição de distribuição de direções de onda para que se possa determinar no local da operação, é necessário que se avalie a estabelecido em termos de uma estrutura fixa como uma jaqueta

A expressão 6.4 deve ser substituída pela expressão 6.5 acima, para que as incertezas na forma do espectro, e por conseguinte na resposta da embarcação, sejam consideradas ao se computar a operacionalidade da mesma.

A estimativa dos valores de  $\mu_0$  e  $\sigma_0$  quando se considera espectros de onda a partir dos registros de onda, é apresentada por Chen (1980 e 1982) a partir de famílias de espectro representativas dos estados de mar da região, definidos em termos de altura significativa de ondas.

Na presente dissertação, a consideração da variação da resposta em torno da variância  $m_0$ , a partir do modelo matemático utilizado, foi feita baseada em estudos efetuados por Haver e Moan (1983) e Guedes Soares (1990) referentes a incertezas na forma do espectro para um determinado estado de mar. O modelo para consideração da incerteza na forma dos espectros é descrito no Apêndice E.

onde  $p(m_0)$  representa a função distribuição de  $m_0$  dada por:

$$p(m_0) = \frac{1}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{m_0}{\sigma_0}\right) \exp\left(-\frac{m_0^2}{\sigma_0^2}\right) \quad (6.5)$$



## 6.5 RESULTADOS

A operacionalidade das embarcações foi calculada considerando-se os critérios de operação descritos anteriormente referentes à resposta significativa e a um nível de risco aceitável, para um içamento de 2000 ton. Os casos representados consideram um comprimento de cabo de 45 metros.

Os estados de mar considerados se referem à Baía de Campos. Características dos estados de mar foram obtidas de Petrobras (1988). A descrição de longo prazo é feita na forma de frequência de ocorrência de alturas significativas e períodos de zero ascendente de ondas, apresentada na Tab.6.1, e que fornece uma distribuição conjunta dessas variáveis. A porcentagem de ocorrência de alturas significativas de ondas apresentada na Tab.6.2, permite estabelecer a distribuição de alturas significativas em base mensal para todos os meses do ano. As tabelas se referem a registros de mar obtidos durante um ano de obtenção de registro de ondas na Baía de Campos. Para descrição de curto prazo dos estados de mar foi adotado o modelo do ISSC descrito no Capítulo 5.

O Apêndice G apresenta os resultados da resposta significativa do roll, pitch e movimento vertical da ponta de lança das embarcações consideradas para os estados de mar analisados e ocorrentes no modelo adotado, além de apresentar as probabilidades de que os limites estabelecidos para esses movimentos sejam excedidos, obtidas a partir da distribuição de Rayleigh. Esses limites foram estabelecidos em termos da dupla amplitude do movimento (2s) e são especificados na





Nota-se que se  $\alpha$  for estabelecido como 5%, o que significa que em 95% do tempo da operação a resposta não deve exceder o limite estabelecido, a operação da barcaça se torna bastante crítica se ondas de popa ( $0^\circ$ ) se caracterizarem como direção principal de incidência. De 5% para 10% de risco a operacionalidade tende a apresentar melhores resultados para  $0^\circ$ , não se alterando entretanto para  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

Para a SS é indiscutível o seu melhor rendimento quando se compara com a barcaça, podendo-se em alguns períodos do ano se atingir um tempo operacional de mais de 80% do tempo total. Quando se considera a comparação entre os valores de 5% e 10% para  $\alpha$ , uma pequena melhora ocorre para ondas de  $90^\circ$  e  $180^\circ$  graus.

Comparando-se a operacionalidade das embarcações quando analisadas pelos dois critérios, nota-se não haver praticamente nenhuma diferença considerável. Na realidade ambos os critérios são equivalentes pois limitar a resposta significativa do movimento é análogo a se estabelecer um nível de risco admissível de 13,53% que é a probabilidade da resposta exceder o valor da resposta significativa, de acordo com a distribuição de Rayleigh. No caso da SS, a operacionalidade determinada através do critério 1 é coincidente com um valor de 10% para  $\alpha$ , se determinada através do critério 2. Para a barcaça, uma pequena diferença ocorre para incidência de ondas de  $180^\circ$  graus como ilustrado na Fig. 6.9.

Analisando-se a operacionalidade da SS operando com um comprimento de cabo de ligamento de 75 metros, nota-se uma melhora considerável no rendimento da embarcação, com a mesma

podendo operar praticamente ao longo de todo durante quase 100% do tempo. A diferença entre operar com comprimentos do cabo de 45 e 75 metros pode ser compreendida se as Figs. 5.23 e 5.24 forem analisadas. Verifica-se nestas que para períodos de onda menores a resposta significativa da SS é consideravelmente menor se com um comprimento de cabo de 75 metros, devido à região em que os efeitos de ressonância do pêndulo são sentidos. Como a maior incidência de ondas na Baía de Campos, conforme os dados representados na Tab. 6.1, ocorre para uma faixa de períodos de até 6 a 8 segundos, o rendimento da SS pode realmente ser bem melhor para tal caso devido ao seu melhor comportamento em ondas com períodos característicos menores.

No caso da barcaça praticamente nenhuma diferença foi encontrada em sua operacionalidade para diferentes comprimentos de cabo.

Para se verificar a dependência da operacionalidade em relação ao local de operação foram calculadas a operacionalidade da barcaça e da SS em estados de mar representativos do Mar do Norte, cuja descrição foi apresentada por Haver (1985). As características do mar são apresentadas no Apêndice F na forma de figuras e tabelas de ocorrência conjunta de altura significativa e período médio de ondas. Os dados foram apresentados não mais em base mensal mas sim quadrimestralmente, correspondendo a variações que ocorrem nas diversas estações do ano, representadas pelos meses de março, julho, setembro, e novembro. Por se tratar de Mar do Norte, espera-se que os meses mais críticos sejam março e novembro que correspondem ao período de inverno, e os

mais favoráveis à operação, os meses de julho e setembro. As Figs. 6.13 a 6.15 ilustram a operacionalidade das embarcações. Uma grande diferença ocorre entre os meses de verão e inverno demonstrando que operações com Eg na região devem ser programadas para serem realizadas nos períodos de verão. Comparando-se a operacionalidade com a obtida referente às condições na Baía de Campos, percebe-se como locais com características de mar mais severas afetam diretamente o rendimento das embarcações.

Da análise dos resultados discutidos acima verifica-se que a operacionalidade das embarcações para condições de operação diferentes ou considerando-se diferentes critérios de operação, pode apresentar diferenças bastante pequenas apesar das diferenças que ocorrem na resposta das embarcações analisadas nos capítulos anteriores. Isto se deve basicamente ao fato de que, ao se considerar a resposta da embarcação em mar irregular a partir do cruzamento espectral, ocorre uma atenuação das diferenças observadas na função de transferência da resposta, devido não só à distribuição de energia dos espectros, mas também ao espalhamento de energia nas diversas direções de onda. Outro fator é a atenuação dos efeitos quando se considera os critérios de operação e a distribuição de ocorrência dos estados de mar. Muitas vezes, apesar de haver diferenças consideráveis na resposta da embarcação para duas condições de operação diferentes, ambas podem ou não satisfazer os critérios de operação simultaneamente, de modo que tais diferenças acabam não tendo efeito na operacionalidade.

Por outro lado o fato de uma embarcação poder operar

em determinado estado de mar para uma determinada condição e não poder operar no mesmo mar para outra condição, terá um efeito maior ou menor na operacionalidade, conforme a frequência de ocorrência dessa condição de mar considerada. Esse aspecto é bastante relevante quando se considera o modelo de distribuição de estados de mar da Baía de Campos, com frequência de ocorrência bastante concentrada em mares com 1,5 a 2,5 metros de altura significativa -- quase 60% dos casos -- e com aproximadamente 50% de ocorrência de mares com período de zero ascendente entre 4 e 6 segundos. Inversamente, esse fato pode explicar as grandes diferenças encontradas quando se considera o mesmo critério de operação e diferentes direções de onda, ou quando se altera o valor de  $\alpha$  de 5% para 10% como na operacionalidade da barcaça por exemplo.

Uma observação final sobre os resultados discutidos acima se faz necessária, no que se refere à adequação dos modelos de descrição dos estados do mar na Baía de Campos.

Com referência à descrição de curto prazo feita através de espectros de onda, vale observar o seguinte. Modelos matemáticos de espectro são apenas um representação de estados de mar, que podem em certos casos bem representar as condições de mar, como em outros ser bastante discrepantes em relação à realidade. A adequação dos modelos matemáticos irá depender de uma série de fatores como por exemplo a severidade do mar, a direção principal de propagação das ondas, a presença de swell, dentre outros que já foram discutidos no Capítulo 5. Pode-se considerar portanto, que a obtenção de um modelo matemático, que seja representativo de grande parte dos mares ocorrentes em determinado local só é

mar, como apresentado no Apêndice E, é bastante adequada para forma do espectro para descrição de curto prazo de estados de A adoção de um modelo que considere a variação na necessária.

que a adoção de um simples modelo matemático se faz espectro de mar mais adequado para a Baía de Campos, de modo correlação entre alturas significativas de onda e tipo de do mar. É importante notar que a inexistência de um modelo de ambos os modelos mencionados não são adequados para descrição presença de swell em mares localmente gerados. Em tal caso, superposição de mares gerados em regiões distantes ou a de energia em faixas distintas de frequência devido à bimodalidade em certas condições, ou seja há uma concentração outro lado a característica do mar em Campos apresenta uma que em outras ocasiões o modelo JONSWAP melhor se adapta. Por por um modelo de Pierson-Moskowitz como o modelo do ISSC, e demonstraram que em algumas situações o mar pode ser descrito foram efetuados como em Severo de Souza (1988), que estudos sobre as condições ambientais na Baía de Campos já a obtenção de um modelo de curto prazo adequado. Alguns registros de ondas obtidos está longe de ser suficiente para No caso da Baía de Campos, a pequena quantidade de disponíveis.

necessidade de se fazer uso dos modelos matemáticos dos por um modelo matemático com poucos parâmetros. Daí a significativa que os espectros obtidos podem ser bem representa- ou seja, diversos anos de medição. Mesmo assim, isso não no local em questão durante período de tempo bastante longo, possível a partir de registros de mar obtidos continuamente

a obtenção das respostas da embarcação no curto prazo. A metodologia para o cálculo de operacionalidade desenvolvida no presente trabalho independe do tipo de espectro considerado na análise de curto prazo, devendo ser inclusive esperado que o mesmo varie entre diversas regiões em que uma embarcação deve operar. De tal modo, como representação de um modelo, os dados considerados para a Baía de Campos e mesmo para o Mar do Norte, descritos no Apêndice F, podem ser tidos como bastante satisfatórios. O mesmo pode se dizer sobre a descrição de longo prazo dos estados de mar na Baía de Campos. Sendo os dados correspondentes a apenas um ano de medição das condições de onda, os mesmos servem mais como um modelo de representação de distribuição de longo prazo de estados de mar e não devem ser tomados como representativo das condições ambientais em Campos para um período muito longo.

Fig. 6.3 Estados de Mar Limites Baseados nas Condições Impostas para o Roll e Movimento da Ponta de Lança

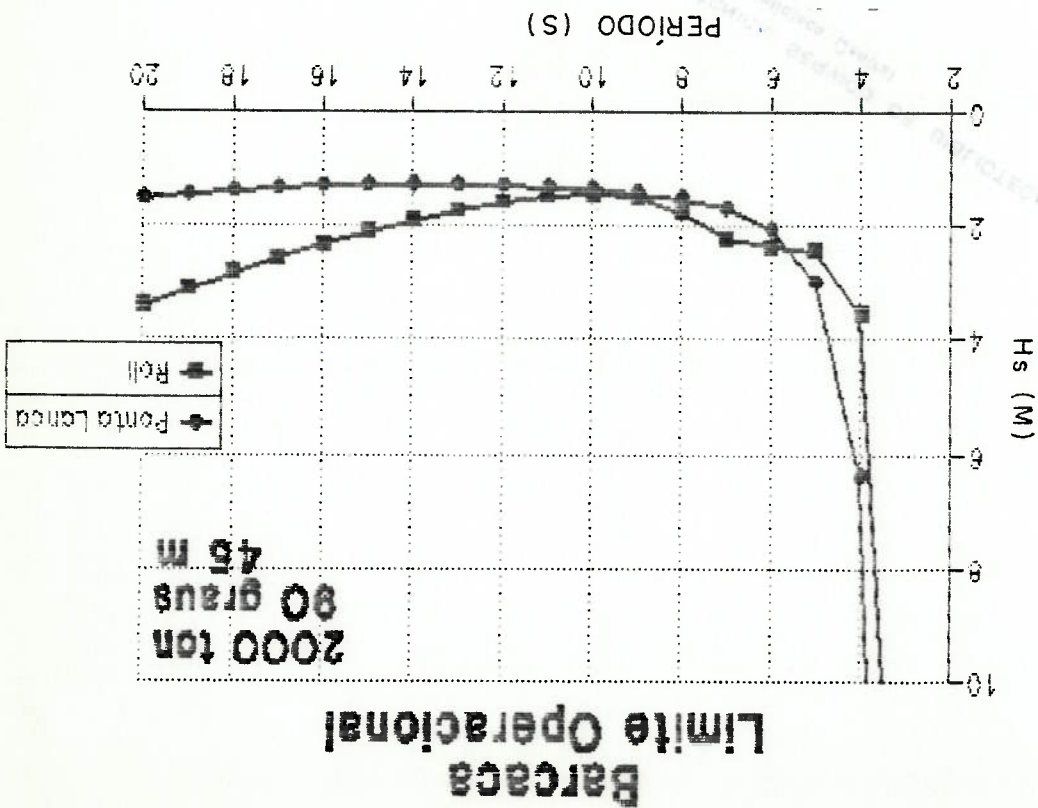


Fig. 6.4 Estados de Mar Limites Baseados nas Condições Impostas para o Pitch e Movimento da Ponta de Lança

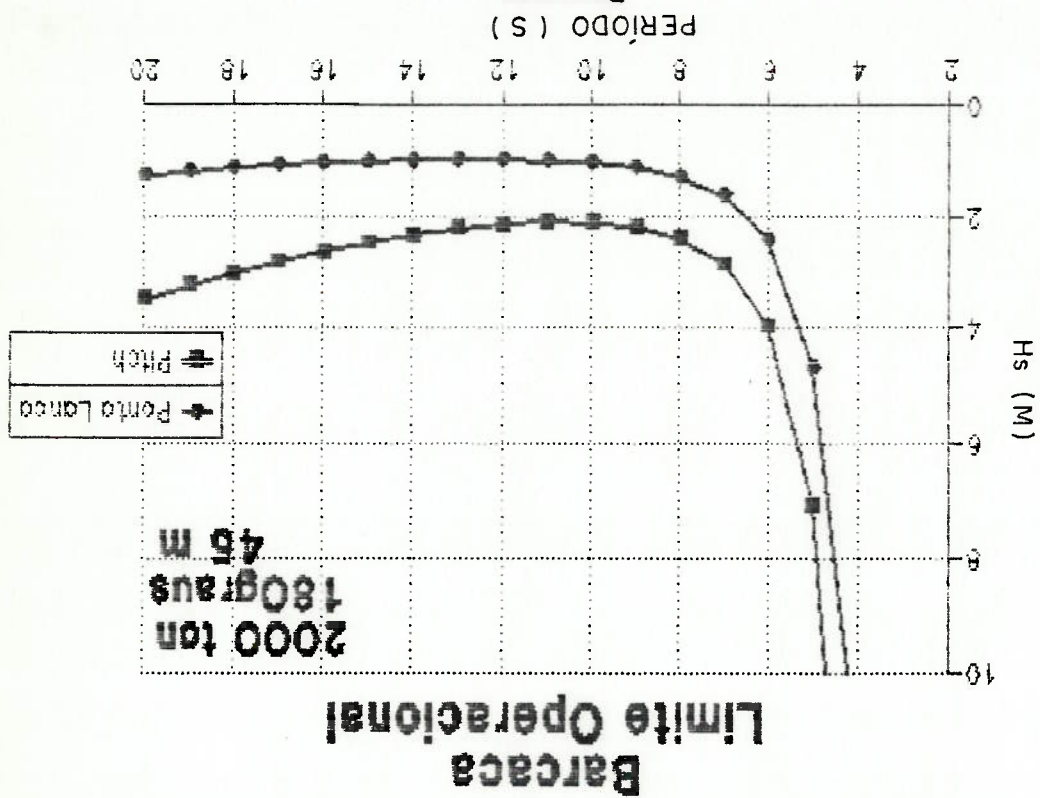




Fig. 6.6 Estados de Mar Limites Baseados nas Condições Impostas para o Pitch e Movimento da Ponta de Lança

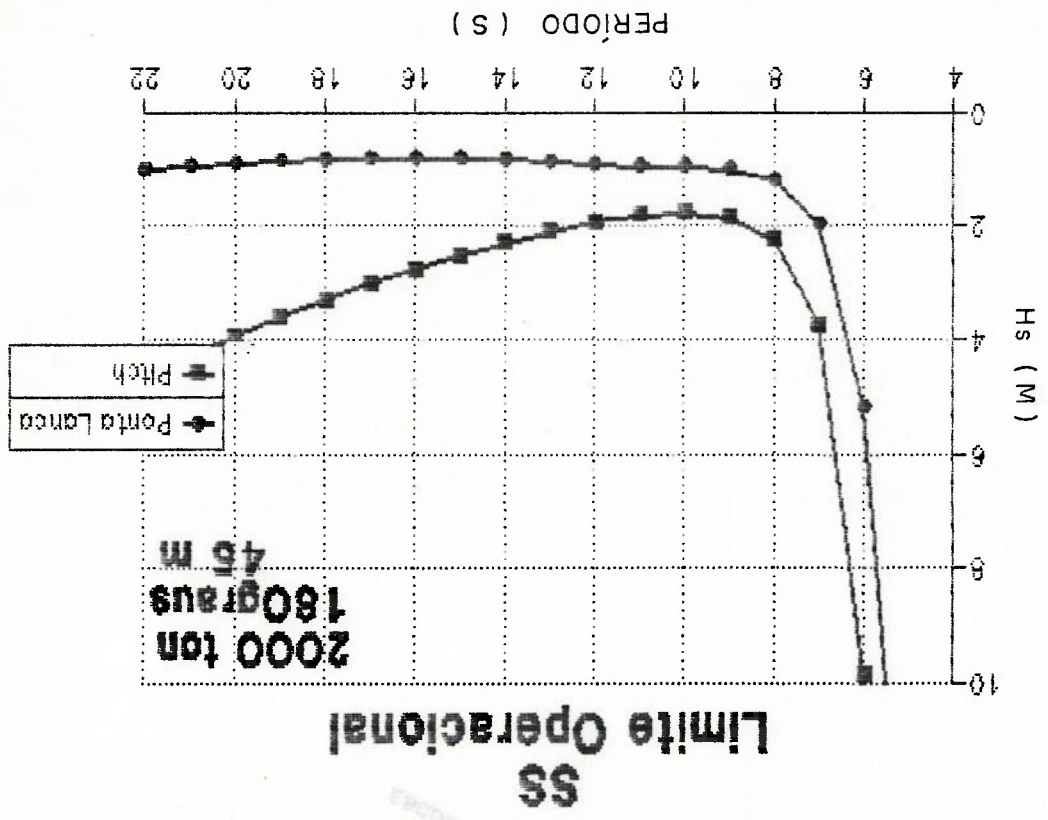


Fig. 6.5 Estados de Mar Limites Baseados nas Condições Impostas para o Roll e Movimento da Ponta de Lança

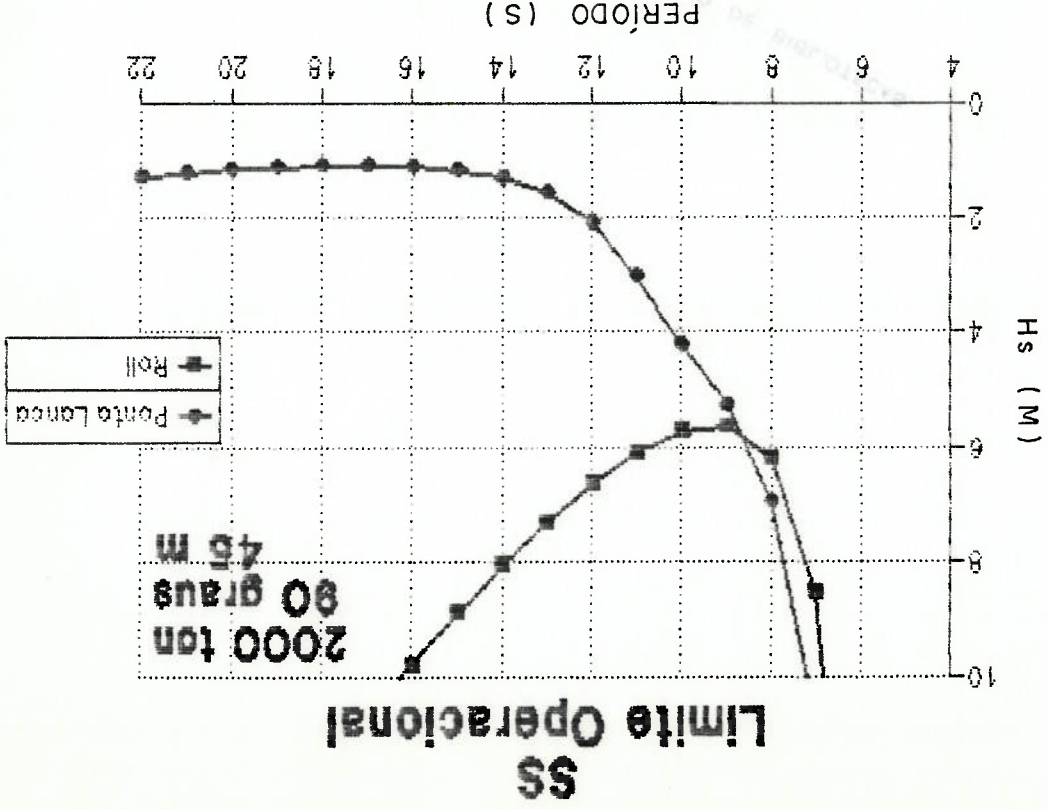


Fig. 6.8 Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal Critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$

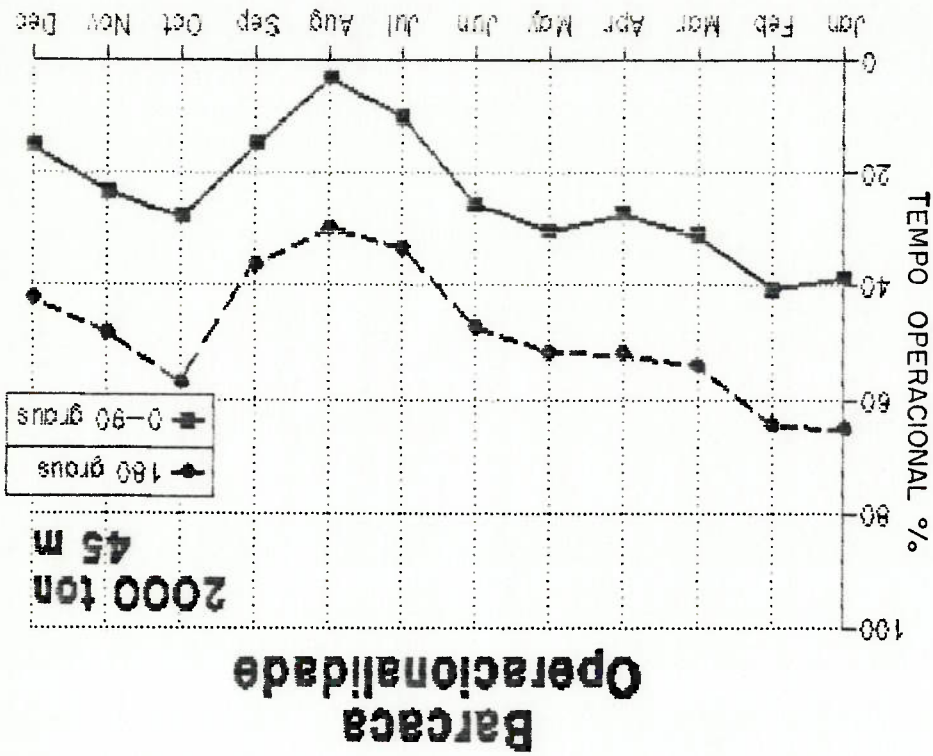


Fig. 6.7 Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal Critério de Operação 2 -  $\alpha = 5\%$

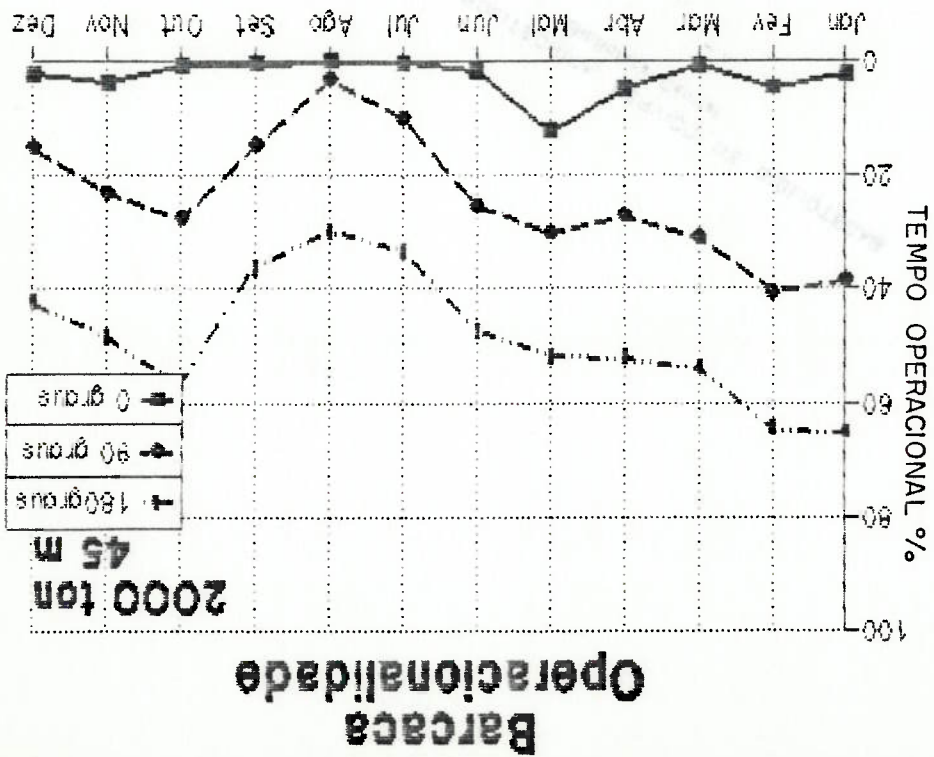


Fig. 6.10 SS - Operacionalidade em Base Mensal Critério de Operação 2 -  $\alpha = 5\%$

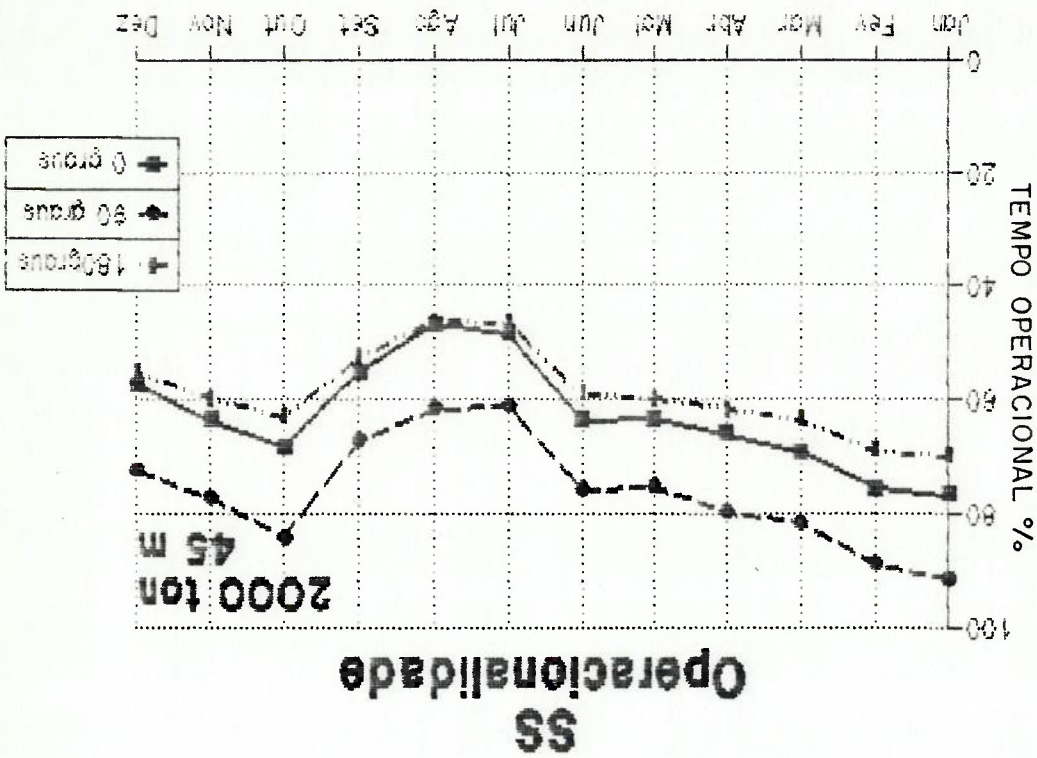


Fig. 6.9 Barcaça - Operacionalidade em Base Mensal Critério de Operação 1

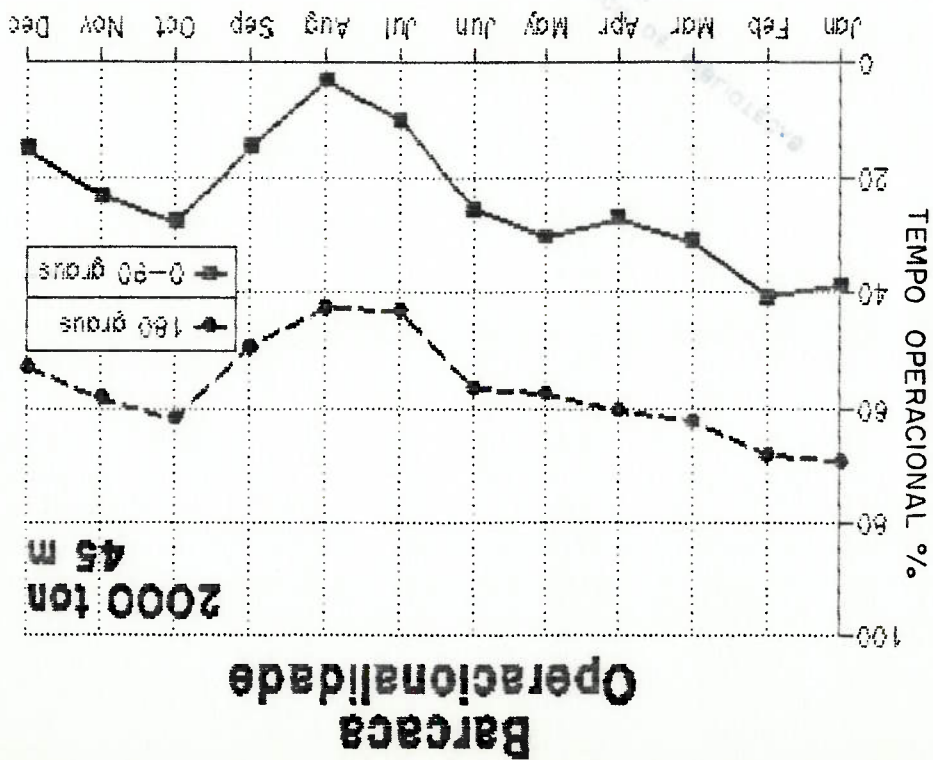


Fig.6.12 SS - Operacionalidade em Base Mensal L = 75m; Critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$

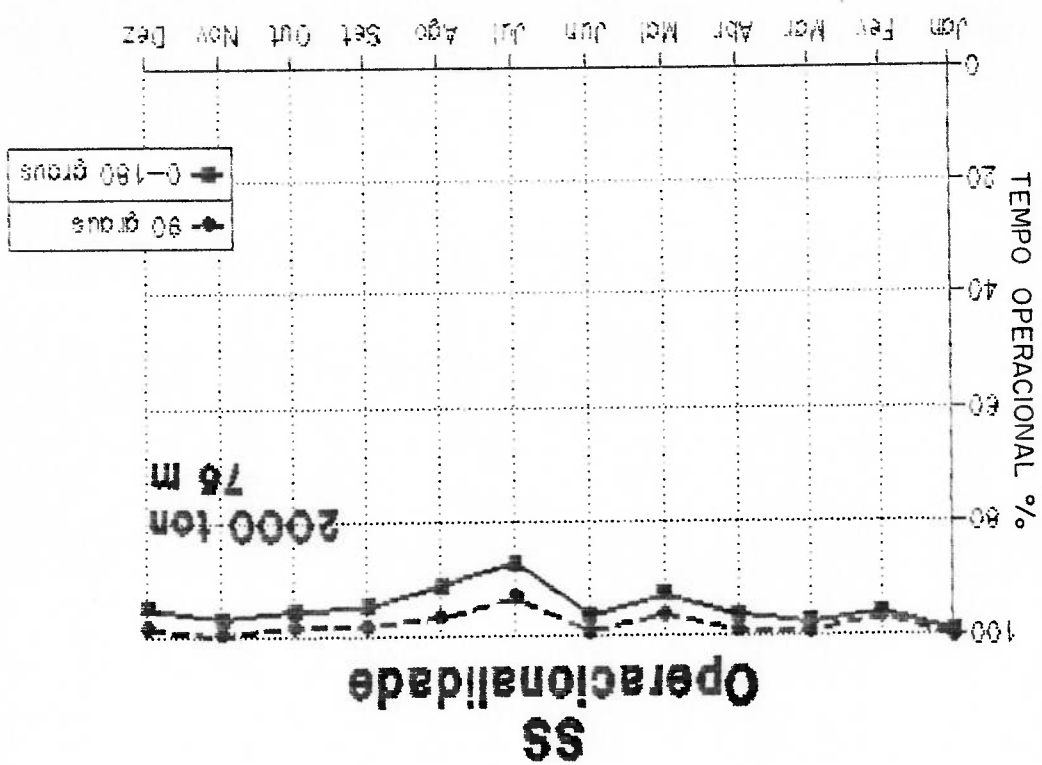


Fig.6.11 SS - Operacionalidade em Base Mensal Critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$

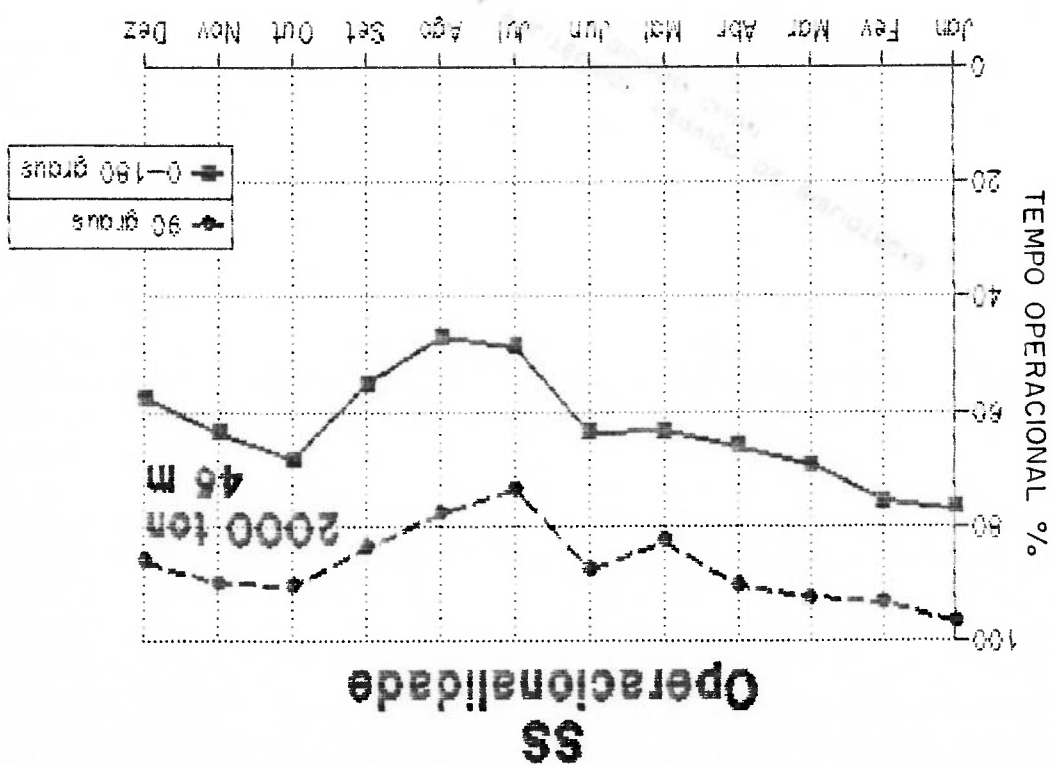


Fig. 6.14 SS - Operacionalidade para o Mar do Norte Critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$

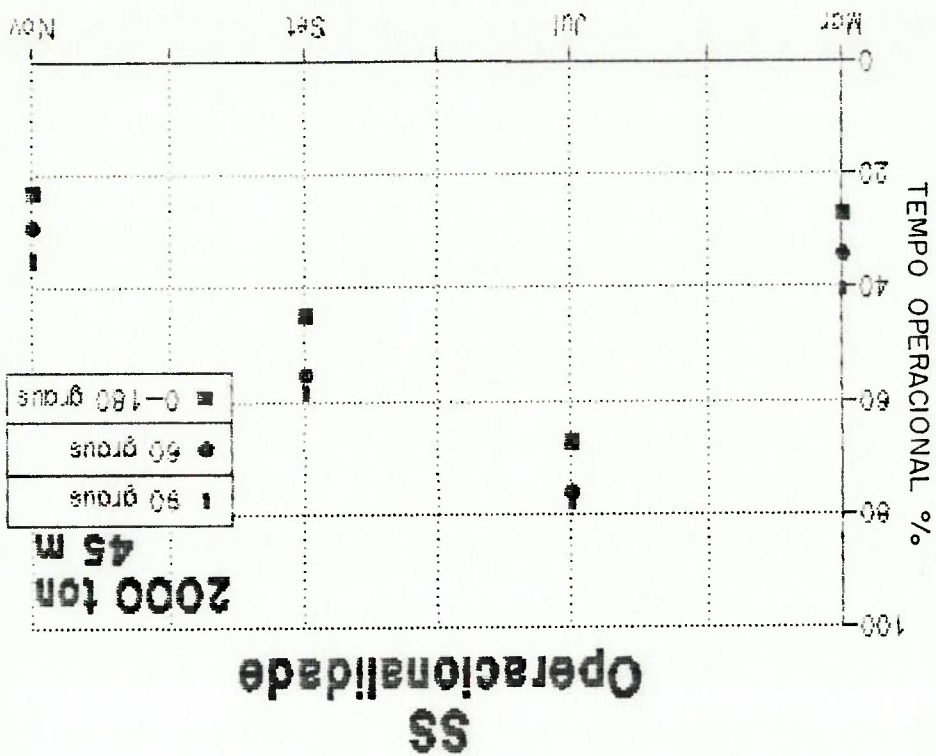
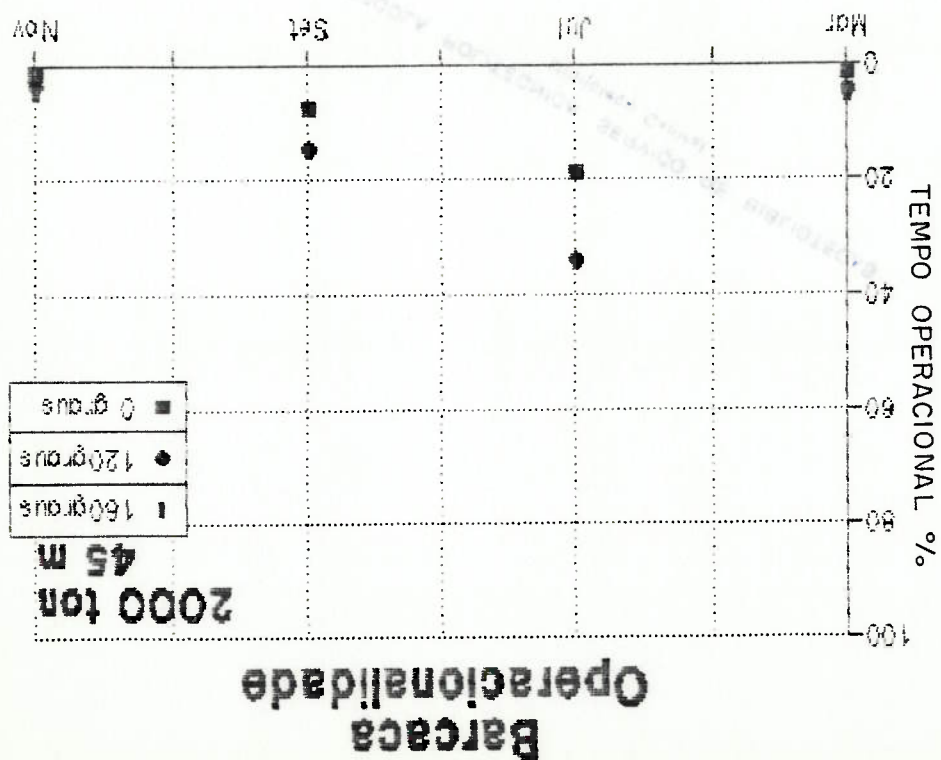
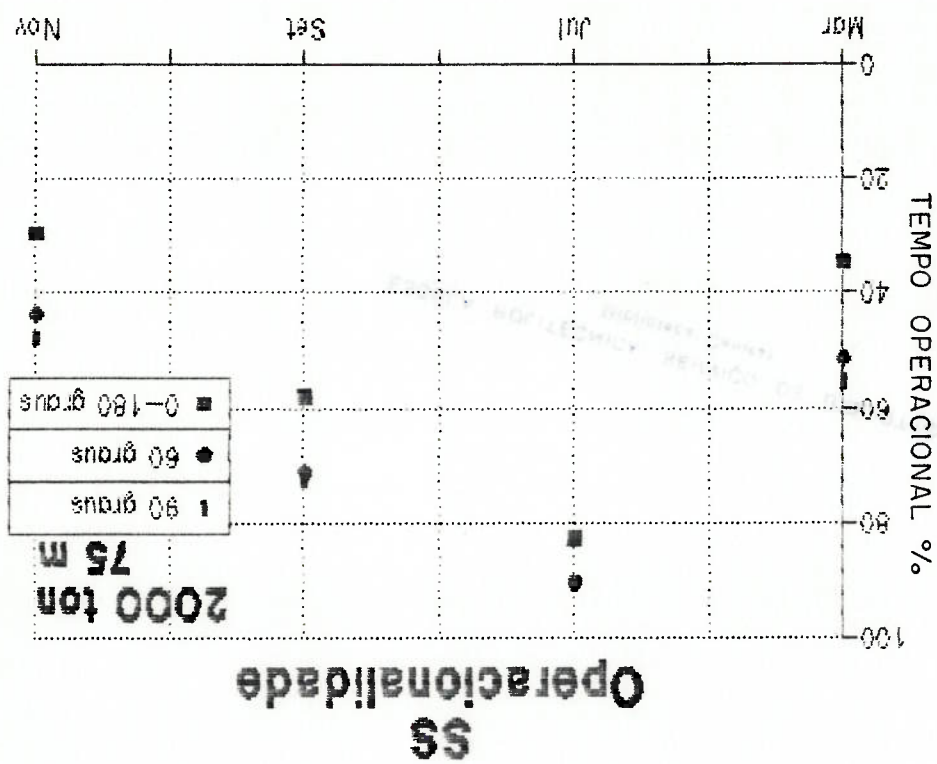


Fig. 6.13 Barcaça - Operacionalidade para o Mar do Norte Critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$



SS - Operacionalidade para o Mar do Norte  
 Fig.6.15 L = 75m; critério de Operação 2 -  $\alpha = 10\%$



## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho procurou apresentar um modelo teórico para a análise dinâmica de EG no domínio da frequência considerando o efeito do acoplamento existente entre o movimento da embarcação e do módulo suspensor. A partir das características da resposta da embarcação e das condições ambientais no local de operação, foi proposto um modelo para determinação da operacionalidade de embarcações a fim de se poder prever a porcentagem de tempo operacional para os diversos períodos do ano.

Inicialmente conclui-se do trabalho a importância de se considerar os efeitos acoplados entre o módulo e a embarcação para se prever a resposta do sistema durante a condição de içamento. Pode-se ver claramente a diferença na característica da resposta de uma EG quando se leva em conta o movimento do módulo, além de se notar a importância da determinação das frequências naturais do sistema, pois a ampliação dos movimentos em frequências próximas à ressonância é considerável.

Sobre o modelo de operacionalidade proposto, o mesmo pode ser admitido como uma ferramenta bastante flexível para a previsão do tempo operacional de uma embarcação para a execução de determinada operação, durante o estudo de planejamento desta. Além disso, o modelo se constitui em uma metodologia bastante eficiente para a escolha da embarcação mais adequada para determinada operação, do ponto de vista operacional. Um modelo mais completo deveria obviamente

Incorporar custos de alocação ou de operação das mesmas. A flexibilidade do modelo se deve à facilidade de se considerar diferentes parâmetros na análise da operacionalidade, tais como diferentes critérios de operação, diferentes níveis de probabilidade aceitáveis para se exceder determinada valor da resposta em função do risco envolvido na operação, ou mesmo diferentes valores estabelecidos como limites para a resposta. Comparação entre diversos valores para esses parâmetros pode ser feita de maneira bastante ágil gerando figuras de mérito de grande valia para o planejamento e análise de operações.

Como recomendações principais para a continuação do presente estudo deve-se mencionar inicialmente a análise de outras etapas de operações de içamento, para que se possa obter uma análise completa do comportamento de Eg durante toda a operação, identificando todos os aspectos que possam ser considerados críticos para a mesma. Além disso é sugestivo que o modelo de operacionalidade proposto seja aplicado a outras etapas da operação que envolvam fenômenos lineares e que possam ser analisadas no domínio da frequência.

Outro estudo de importância que pode ser tido como uma consideração de previsão de estados de mar, como um modelo que completasse uma distribuição do período de persistência de estados de mar. Nessa mesma linha pode ser recomendado um estudo intenso das condições ambientais na Baía de Campos, a fim de se gerar dados mais confiáveis para se poder prever com maior precisão a operacionalidade de embarcações naquele local.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BAAR, J. J. M. Developments in the analysis of offshore heavy lift operations. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 1., Edinburgh, 1991. Proceedings. Edinburgh, International Society of Offshore and Polar Engineers, 1991. v.1, p.15-34.

BOOM, H. J. J. van den et al; Motions and forces during heavy lift operations offshore. In: OORTMENSSEN, G. van, ed. Floating structures and offshore operations: proceedings of a workshop on floating structures and offshore operations, Wageningen, 1987. Amsterdam, Elsevier, 1987. p.51-61. (Developments in marine technology, 4)

BOOM, J. J. van den ; DEKKER, J. N.: DALLINGA, R. P. Computer analysis of heavy lift operations. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., Houston, 1988. Proceedings. Houston, OTC, 1988. v.4, p.127-36.

BURKE, B. G. Downtime evaluation for operations from floating vessels in waves. In: SHIP TECHNOLOGY AND RESEARCH (STAR) SYMPOSIUM, 2., San Francisco, 1977. Proceedings. New York, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1978. p.279-301.

CHAKRABARTI, S.K. Hydrodynamics of Offshore Structures. Boston, Computational Mechanics Publ., 1989

CHEN, H. Effect of wave spectral shape and directional variabilities on the design and analysis of marine structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOUR OF OFFSHORE STRUCTURES, 3., Cambridge, 1982. BOSS'82 : proceedings. Washington, Hemisphere, 1983. p.477-85.

CHEN, H. T. Long term prediction of offshore vessel responses for design and operability evaluation. In: OFFSHORE TECHNOLOGU CONFERENCE, 12., Houston, 1980. Proceedings. Houston, OTC, 1980. v.3, p.61-7.

CHEN, H. T.; CHEN, H. H.; HOFFMAN, D. The implementation of the 20-year hindcast wave data in the design and operation of marine structures. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 11., Houston, 1979. Proceedings. Houston, OTC, 1979. v.4, p.2495-504.

CHEN, H.; RAWSTRON, P. Systems approach to offshore construction project planning and scheduling. Marine Technology, v.20, n.4, p.332-47, )ct. 1983.

CLAUSS, G. F.; RIEKERT, T. Operational limitations of offshore crane vessels. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 22., Houston, 1990. Proceedings. Houston, OTC, 1990. v.1, p.161-70.

GHOSH, S.; CHOU, F. S.; HUANG, E. W. A rational approach to the design of a pipelay/derrick semisubmersible barge.

Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v.87, p.40-63, 1979.

DET NORSKE VERITAS. Rules for the design, construction and inspection of offshore structures: 1977; appendix B, loads. Høvik, 1978.

FALTINSEN, O. M.; MICHELSEN, F. C. Motions of large structures in waves at zero Froude number. In: BISHOP, R. E. D.; PRICE, W. G., ed. The dynamics of marine vehicles and structures in waves : papers presented at International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, 1974. London, Institution of Mechanical Engineers, 1975. p.91-106.

GODA, Y. Random seas and design of maritime structures. s,1,, University of Tokyo Press, 1985.

GUEDES SOARES, C. Effect of spectral shape uncertainty in the short term wave-induced ship responses. Applied Ocean Research, v. 12, n.2, p.54-69, 1990.

HAVER, S. Wave climate off northern Norway. Applied Ocean Research, v.7, n.2, p.85-92, 1985.

HAVER, S.; MOAN, T. On some uncertainties related to the short term stochastic modelling of ocean waves. Applied Ocean Research, v.5, n.2, p.93-108, 1983.

- HOFFMAN, D.; KARST, O. J. The theory of the Rayleigh distribution and some of its applications. Journal of Ship Research, v.19, n.3, p.172-91, 1975.
- HOFFMAN, D.; FITZGERALD, V. K. Systems approach to offshore crane ship operations. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v.86, p.375-412, 1978.
- HOFFMAN, D. Differences in technical approaches in determining offshore design environmental criteria. In: OFFSHORE SYMPOSIUM, 2., Houston, 1991. Design criteria and codes. Houston, Texas Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1991. p.X-1-X-18.
- HOGBEN, N.; LUMB, F. E. Ocean Wave Statistics. London, National Physical Laboratory, 1967.
- HOGBEN, N.; STANDING, R. G. Wave loads on large bodies. In: BISHOP, R. E. D.; PRICE, W. G., ed. The dynamics of marine vehicles and structures in waves : papers presented at International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, 1974. London, Institution of Mechanical Engineers, 1975. p.258-77.
- HOFFT, J. P. Oscillatory Wave Forces on Small Bodies. International Shipbuilding Progress, v.17, p.127-135, 1970.
- HOFFT, J. P. A mathematical method of determining hydrodynamically induced forces on a semisubmersible.

Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v.79, p.28-70, 1971.

HOFFT, J. P. Advanced dynamics of marine structures. New York, Wiley, 1982.

IPT. Ensaio com Modelo Reduzido para Determinação de Esforços e Momentos Durante o Içamento de Módulos pela BGL-1 Sob Diferentes Condições de Mar e Aproxamento. Relatório No. 20979, Setembro, 1984

JIANG, T.; SCHELLIN, T. E.; SHARMA, S. D. Crane ship response to wave groups. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 9., Houston, 1990. Proceedings. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1990. v.1-A, p.295-302.

MICHELSEN, F. C.; COPPENS, A. On the upgrading of SSCV Hermod to increase its lifting capacity and the dynamics of heavy-lift operations. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., Houston, 1988. Proceedings. Houston, OTC, 1988. v.4, p.137-47.

MICHELSEN, F. C.; ZANDWILK, K. V.; BEGUIN, J. L. On the installation of offshore platforms with emphasis placed on jacket launching, pile driving and lifting operations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PRACTICAL DESIGN OF SHIPS AND MOBILE UNITS. 3., Trondheim, 1987. PRADS'87 : proceedings. Trondheim, Norwegian Institute of Technology, 1987. v.1,

MICOPERI S. P. A. CORP. One year of experience operating for the S.S.C.V. "Micoperi 7000" : influence and advantages for future installations in deep waters. (Apresentado a 5th Deep Offshore Technology, Marbella, 1989.Session B1)

NOJIRI, N. ; SASAKI, T. Motion characteristics of crane vessels in lifting operation. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 15., Houston, 1983. Proceedings. Houston, OTC, 1983. v.3,p.197-208.

OCHI, M. K. Wave statistics for the design of ships and ocean structures. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v.86, p.47-76, 1978.

OFFSHORE ENGINEER. Dual crane lifts: power with a sensitive touch. p.46-7, Aug. 1987(1).

OFFSHORE ENGINEER. Raising consciousness on all design fronts. p.36-7, Aug. 1987(2).

OFFSHORE ENGINEER. Heavyweight thinking for slimline Kittiwake. p.33-4, Aug. 1987(3).

PRICE, W.C.; BISHOP, R.E. Probabilistic Theory of Ship Dynamics. London, Chapman, 1974.

- RAWSTRON, P. J. M.; BLIGHT, G. J. Prediction of weather downtime for derrick barges. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 10., Houston, 1978. Proceedings. Houston, OTC, 1978. v.2, p.861-72.
- ROTHKOPF, M. H., et al. A Weather Model for Simulating Offshore Construction Alternatives. Management Science, v.20, No.10, 1974
- SALVENSEN, N.; TUCK, E. O.; FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, v.78, p.250-87, 1970.
- SARPKAYA, T.; ISACSON, M. Mechanics of wave forces on offshore structures. New York, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- SCHILLIN, T. E.; SHARMA, S. D.; JIANG, T. Crane ship response to regular waves: linearized frequency domain analysis and nonlinear time domain simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 8., The Hague, 1989. Proceedings. New York American Society of Mechanical Engineers, 1989. v.2, p.627-35.
- SEKITA, K.; SHIMADA, H.; TANIYAMA, M. The operability of derrick barges in construction of large offshore structures. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 8., Houston, 1976. Proceedings. Houston, OTC, 1976. v.3, p.209-18.

SEKITA, K.; KIMURA, H.; TATSUTA, M. Dynamic lifting analysis of offshore structures. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 18., Houston, 1986. Proceedings. Houston, OTC, 1986. v.3, p.547-54.

SEVERO de SOUZA, M. H.: Clima de Ondas ao Norte do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1988. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE.

STANDING, R. G. Use of wave diffraction theory with Morison's equation to compute wave loads and motions of offshore structures. Feltham, National Maritime Institute, 1979. (NMI Report, R74)

ST. DENIS, M. On the motions of oceanic platforms. In: BISHOP, R. E. D.; PRICE, W. G., ed. The dynamics of marine vehicles and structures in waves: papers presented at International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, Institution of Mechanical Engineers, 1975. p.113-34.

TONG, K. C.; DUNCAN, P. E. Modelling the dynamics of offshore jacket lifts. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 1., Edinburgh, 1991. Proceedings. Edinburgh, International Society of Offshore and Polar engineers, 1991. v.1, p.35-60.



TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. Mechanical vibrations : theory and applications. 2. ed. Boston, Allyn and Bacon, 1978.

VUGTS, J. H. The hydrodynamic forces and ship motions in waves. Delft, Uitgeverij Waltman, 1970. Tese (Doutorado) - Technische Hogeschool Delft.

WATANABE, I. Journal of Kansai Society, v.14, 1957

WEHAUSE, J. V., LAITONE, E. V.; SURFACE WAVES. Encyclopedia of Physics, Vol. IX. Berlin, Springer, 1960.

ZHENG, X. : MCGREGOR, R. C. Prediction of motion wave load, and sling tension of crane vessels during heavy lifting operations. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., Houston, 1988. Proceedings. Houston, OTC, 1988. v.4, p.155-65.

## APÊNDICE A

REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS DE MASSA ADICIONAL, AMORTECIMENTO,  
 RESTAURAÇÃO HIDROSTÁTICA E FORÇAS DE EXCITAÇÃO DE UMA  
 EMBARCAÇÃO.

O problema de determinação da ação do fluido sobre uma embarcação para a obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos e forças de excitação de ondas, envolve a determinação do potencial de velocidades do escoamento ao redor da embarcação oscilando na superfície do mar.

Considerando-se a teoria potencial para o escoamento de um fluido, estabelecendo escoamento irrotacional e fluido não viscoso, e assumindo-se alturas de ondas e oscilações da embarcação de pequenas amplitudes, as condições de contorno na superfície da água e na superfície do corpo, podem ser linearizadas de modo que o potencial de velocidades pode ser representado pela superposição de três problemas distintos e pode ser descrito por

$$\phi = \phi^0 + \phi^s + \sum_{j=1}^6 \phi_j$$

onde,  $\phi^0$  representa o potencial da onda incidente não perturbada pela presença da embarcação  $\phi^s$  é o potencial devido à onda difratada pela presença da embarcação, esta considerada parada na superfície da água. Os potenciais  $\phi_j$ ,  $j=1, \dots, 6$ , representam os potenciais de onda irradiada devido à uma oscilação forçada da embarcação nos seis graus de liberdade, e livre da ação de ondas.

Da Equação de Bernoulli a pressão agente na superfície

da embarcação é dada por

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g z + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 \quad (a.1)$$

enquanto a força hidrodinâmica na direção  $j$  é expressa por

$$F_j = - \int \int_{S_0} p f_j ds \quad (a.2)$$

onde  $S_0$  representa a superfície do corpo e  $f_j$  os cossenos diretores na direção genérica  $j$  em  $S_0$ .

Na obtenção das forças hidrodinâmicas agentes numa

embarcação, os potenciais  $\phi_0$  e  $\phi_s$  fornecem as forças de excitação de onda, enquanto os potenciais  $\phi_j$  fornecem os termos de massa adicional  $a_{ij}$ , e amortecimento potencial  $b_{ij}$ , que representam as forças de reação hidrodinâmica com uma parcela em fase com a aceleração da embarcação e outra em fase com a velocidade.

Hidrodinamicamente o problema pode ser formulado de acordo com a descrição apresentada a seguir.

Sendo  $\phi$  o potencial de velocidades genérico e considerando as partículas fluidas oscilando harmonicamente,  $\phi$  pode ser descrito como

$$\phi = \phi e^{-i\omega t} \quad (a.3)$$

Para a obtenção do potencial  $\phi$  o mesmo deve satisfazer a equação de Laplace no domínio fluido e as condições de contorno na fronteira do fluido, ou seja, na superfície do corpo, na superfície livre e no fundo do mar. Da equação de Laplace tem-se

$$\Delta^2 \phi = 0$$

ou

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = 0$$

No fundo do mar, a condição de contorno requer que a velocidade do fluido seja nula na direção normal à superfície

e matematicamente tem-se

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$$

ou

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$

Para a condição de contorno na superfície livre,

assume-se que o movimento da superfície é pequeno, de modo que a condição de contorno seja satisfeita para a superfície média dada pela coordenada  $z=0$ . Tem-se então:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0$$

para  $z=0$ , onde  $\zeta$  representa a superfície da água.

Na superfície do corpo, as condições de contorno são

expressas de maneira diferente para os potenciais  $\phi^0$ ,  $\phi^s$  e  $\phi^j$ . Como os dois primeiros representam o potencial de ondas

considerando-se a embarcação parada, deve-se ter em  $S_0$

$$\frac{\partial \phi^0}{\partial n} = 0$$

Por outro lado,  $\phi^j$ ,  $j=1, \dots, 6$ , deve satisfazer a seguinte condição, na superfície do corpo:

$$\frac{\partial \phi^j}{\partial n} = \frac{\partial \phi^j}{\partial n} e^{-i\omega t} = f_j \cdot s_j$$

ou

$$\frac{\partial \phi^j}{\partial n} = -i\omega f_j s_j$$

Uma última condição deve ser imposta aos potenciais  $\phi^s$  e  $\phi^j$ . Como ambos os potenciais representam efeitos no meio fluido causados pela embarcação, tais efeitos devem tender a zero à medida que se distancia da embarcação na região

livre. Tal situação é imposta pela condição de radiação

expressa por

As forças hidrodinâmicas induzidas pelo movimento do fluido, descrito pelos potenciais  $\phi_j$ , são as chamadas forças

$\phi_j$ .

representando as partes real e imaginária da função complexa

$$\phi_j e^{-i\omega t} = (\phi_{jr} + i\phi_{ji})$$

radiação  $\phi_j$ , eles podem ser escritos como

Considerando-se inicialmente apenas os potenciais de

na embarcação.

mesmos, obter-se a pressão hidrodinâmica e as forças agentes

potenciais de velocidade  $\phi_0$ ,  $\phi_s$  e  $\phi_j$  para a partir dos

O problema consiste então, na determinação dos

$$p = -i\rho\omega (\phi_0 + \phi_s + \sum_{j=1}^n \phi_j) e^{-i\omega t}$$

ou

$$p = -i\rho\omega (\phi) e^{-i\omega t}$$

ao potencial de velocidades  $\phi$ , ela pode ser reescrita como

Considerando-se apenas a componente da pressão devido

restauração hidrostática  $C_{1j}$ .

restauração hidrostática, representadas pelos coeficientes de

correspondentes ao termo  $\rho g z$  representarão as forças de

embarcação de acordo com a expressão (a.2), as forças

Integrando-se a pressão para a superfície da

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g z$$

primeira ordem tem-se

superfície do corpo, considerando-se apenas os termos de

Da expressão (a.1) para a pressão do fluido na

$$k \text{ o número de onda, dado por } k = \frac{\omega^2}{g}.$$

onde  $r$  é a distância radial a partir do centro da estrutura e

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R^{1/2} \left( \frac{\partial \phi}{\partial R} + ik\phi \right) = 0$$

de reação hidrodinâmica. Tais forças têm uma componente em fase com a aceleração do corpo e outra com a velocidade e podem ser escritas como

$$F_{kj}(t) = -A_{kj} \ddot{s}_j(t) - B_{kj} \dot{s}_j(t)$$

ou

$$F_{kj}(t) = (s_{ja} \omega^2 A_{kj} + i s_{ja} \omega B_{kj}) e^{-i\omega t}$$

resultando nas expressões dos coeficientes hidrodinâmicos  $A_{kj}$

e  $B_{kj}$  dados por

$$A_{kj} = \frac{s_{ja} \omega}{\rho} \iint_{S_0} \phi_{,j} F_{,k} ds$$

$$B_{kj} = -\frac{s_{ja}}{\rho} \iint_{S_0} \phi_{,j} r_{,k} ds$$

Considerando os potenciais  $\phi_0$  e  $\phi_s$  das ondas

incidentes e difratada, a integral do campo de pressões devido aos mesmos fornece as expressões para a força de excitação de ondas, que numa direção genérica  $k$  são expressas

por

$$X_k = -i\rho\omega \iint_{S_0} e^{-i\omega t} (\phi_0 + \phi_s) F_{,k} ds$$

ou, sendo  $F_k = \frac{\omega s_{ka}}{i}$ , tem-se

$$X_k = \frac{s_{ka}}{\rho} \iint_{S_0} e^{-i\omega t} (\phi_0 + \phi_s) \frac{\partial \phi}{\partial n} ds$$

O potencial de velocidades  $\dot{\phi}_0$  da onda incidente é dado

pela teoria linear de ondas e pode ser descrito por

$$\dot{\phi}_0 = \dot{\phi}^0 e^{-i\omega t} = \frac{\omega}{g\zeta} \frac{\cosh kh}{\cosh k(z+h)} e^{i(kx \cos \beta + ky \sin \beta - \omega t)}$$

onde  $\beta$  é a direção de propagação da onda e  $h$  a profundidade do mar.

Uma expressão para os potenciais  $\phi_s$  e  $\phi_j$  é dada em

termos de uma distribuição de fontes ao longo da superfície submersa da embarcação. Sendo  $(\xi, \eta, \zeta)$  as coordenadas de um

Para uma estrutura flutuante os únicos movimentos que induzem forças de restauração hidrostática são os movimento

Forças de Restauração Hidrostática

$$v = k \tanh kd$$

$$r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$

$$R_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z + 2h + \zeta)^2}$$

$$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$J_0$  é a função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero;

onde  $PV$  indica o valor principal; e

$$G(x', y', z'; \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{2PV \int_0^\infty \frac{h \sinh uh}{\cosh \zeta + h} \cosh h(z+h) J_0(hr_1) dh}{2\pi(k^2 - v^2) \cosh k(\zeta + h) \cosh k(z+h) J_0(kr_1)} + \frac{k^2 h - v^2 h + v}{2\pi(k^2 - v^2) \cosh k(\zeta + h) \cosh k(z+h) J_0(kr_1)}$$

por Wehausen e Laitone (1960) e expressa como:  
 da embarcação. Uma expressão para a função de Green é dada  
 contribuição de cada uma das fontes localizadas na superfície  
 de coordenadas  $(x', y', z)$  do fluido, é dado pela soma da  
 intensidade unitária. Portanto o potencial em qualquer ponto  
 Green, e pode ser interpretada como uma fonte de onda de  
 A função  $G(x', y', z'; \xi, \eta, \zeta)$  representa uma função de

$$\Phi = \iint_{S_0} \sigma(\xi, \eta, \zeta) G(x', y', z'; \xi, \eta, \zeta) ds$$

Faltinsen e Michelsen (1974), podem ser expressos como:  
 potenciais de velocidade  $\Phi^s$  e  $\Phi^j$ , como mostrados por  
 ponto em  $S_0$ , localização de uma fonte de intensidade  $\sigma$ , os

No caso da embarcação não ser simétrica na direção longitudinal, as forças de restauração em heave devem induzir um momento em pitch devido à diferença na alteração da flutuação da embarcação nas partes a vante e a ré do centro de flutuação. Isso significa que um movimento de heave deve causar alteração longitudinal na posição do centro de

$$C_{55} = \Delta GM^L g$$

$$C_{44} = \Delta GM^T g$$

restauração são dados por pitch. de modo que os correspondentes coeficientes de Tal expressão é válida tanto para o roll como para o

$$M_\phi = \Delta GM g \sin \phi \approx \Delta GM g \phi$$

por modo que o momento causado pelo binário peso-flutuação é dado flutuação resultante passa pelo metacentro da embarcação, de embarcação. Sabe-se que para pequenas inclinações a força de embarcação se devem ao deslocamento do centro de flutuação da Os momentos de restauração devido à uma inclinação da

$$C_{33} = \rho g A^3$$

que restauração  $C_{33}$  vezes o deslocamento unitário  $s_3$  tem-se então Sendo a força de restauração dada por um coeficiente de

$$F_3 = \rho g A^3 s_3$$

de linha d'água, de modo que a força restauradora é dada por induz uma mudança de flutuação proporcional à área do plano vertical. Um movimento de amplitude  $s_3$  na direção vertical na flutuação da embarcação devido a um movimento na mudança A força de restauração em heave é causada pela mudança

de heave, roll e pitch.



BIBLIOTECA DE FÍSICA - INSTITUTO DE FÍSICA - UNICAMP

$$C_{53} = C_{35} = \rho g A_m B G_1$$

$C_{35}$  é dado por

restauração hidrostática  $C_{53}$  que deve ser igual ao coeficiente de centros de flutuação e gravidade. Portanto o coeficiente de onde  $B G_1$  representa a nova distância longitudinal entre os

$$M_{53} = \rho g A_m B G_1 S_3$$

de gravidade da embarcação pode ser expresso como

flutuação de modo que o momento induzido em relação ao centro

CARACTERIZAÇÃO DE UM PROCESSO ALEATORIO

Um processo aleatório está associado à ocorrência de uma grandeza que se caracteriza por uma variável aleatória dependente do tempo. Considere-se a ocorrência de um processo aleatório  $X(t)$  associado a um determinado fenômeno. Para um determinado instante  $t_1$ , tal processo deve ser caracterizado pelas probabilidades a ele associadas, de modo que ele pode ser descrito pela variável aleatória contínua  $X(t_1)$  com função distribuição de probabilidade dada por

$$F^X(x; t_1) = P[X(t_1) \leq x]$$

cuja função densidade de probabilidade (fdp) correspondente

$f^X(x; t_1)$  deve ser

$$f^X(x; t_1) = \frac{\partial F^X(x; t_1)}{\partial x}$$

e que deve satisfazer a relação

$$f^X(x; t_1) \delta x = P[x < X(t_1) \leq x + \delta x].$$

Qualquer que seja o instante  $t_1$  do processo, deve haver funções  $F^X(x; t_1)$  e  $f^X(x; t_1)$  como definidas acima, de tal modo que o conhecimento de tais funções deve fornecer algumas informações sobre o processo  $X(t)$  no instante considerado.

Uma função distribuição de probabilidade de segunda ordem relacionada a instantes  $t_1$  e  $t_2$  pode ser definida como

$$F^{XX}(x_1; t_1; x_2; t_2) = P\{X(t_1) \leq x_1 \cup X(t_2) \leq x_2\}$$

e que deve ter uma fdp associada dada por

$$f^{XX}(x_1; t_1; x_2; t_2) \delta x_1 \delta x_2 = \frac{\partial^2 F^{XX}(x_1; t_1; x_2; t_2)}{\partial x_1 \partial x_2}$$

A variância de um processo corresponde ao momento de segunda ordem em torno de sua média e é denotada por  $\sigma_x^2$ . O desvio padrão é a raiz quadrada da variância e é denotado por  $\sigma_x$ . Portanto, quando a média de um processo é igual a zero a

$$m_n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f_x(x; t_1) dx$$

de sua média como

Os momentos de um processo podem ser obtidos em torno

### Variância e Desvio Padrão

Pela definição acima tem-se que a média de um processo e a média dos quadrados correspondem ao seus momentos de primeira e segunda ordem respectivamente.

$$m_n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f_x(x; t_1) dx$$

de um processo aleatório como

De uma maneira geral define-se os momentos de ordem n

### Momentos de um processo estacionário

$$E[X^2(t_1)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f_x(x; t_1) dx$$

variável  $X(t_1)$  é definida como

Analogamente à média, a média dos quadrados da

$$\mu_x(t_1) = E[X(t_1)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x; t_1) dx$$

instante  $t_1$  é definida como

A média ou valor esperado de um processo  $X(t)$  no

### Média

Algunas medidas do processo  $X(t)$  são dadas em termos de seus parâmetros estatísticos, cujos principais serão definidos a seguir.

variância coincide com sua média dos quadrados.

Auto-correlação

A função auto-correlação define a média do produto das variáveis  $X(t_1)$  e  $X(t_2)$  em uma ocorrência do processo  $X(t)$  e é expressa por

$$R^{xx}(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)].$$

Em termos da fdp  $f^{xx}$  definida anteriormente, a auto-

correlação deve ser espessa como

$$R^{xx}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_2) dx_1 dx_2$$

A função auto-correlação permite estabelecer a

influência que o valor da variável aleatória no instante  $t_1$

tem sobre o processo no instante  $t_2$ .

Considerando-se as fdp  $f^x(x; t_1)$  e  $f^x(x; t_1 + T)$  nos

instantes  $t_1$  e  $t_1 + T$  do mesmo processo  $X(t)$ , se elas forem

tais que

$$f^x(x; t_1) = f^x(x; t_1 + T)$$

qualquer que sejam os valores de  $t_1$  e  $T$ , o processo  $X(t)$  é

dito como sendo um processo estacionário. Isto significa que

um processo estacionário apresenta distribuição de

probabilidade e densidade de probabilidade invariáveis com o

tempo, ou em outras palavras, ele apresenta as mesmas

estatísticas, qualquer que seja o instante a partir do início

do processo.

Para um processo estacionário as funções  $f^x(x; t_1)$  se

reduzem à função  $f^x(x)$ . Analogamente a fdp de segunda ordem

$f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_2)$  deve depender apenas do intervalo  $t_2 - t_1$ .

sendo  $t_2 - t_1 = \tau$  tem-se:

$$f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_2) = f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_1 + \tau) = f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_1 - \tau)$$

para um processo estacionário.

A média de um processo estacionário  $\mu^x(t_1)$  deve ser constante para todo o processo e dada por  $\mu^x$ . Por sua vez, a autocorrelação  $R^{xx}(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)]$  deve ser independente de  $t_1$  e dependente apenas de  $\tau = t_2 - t_1$  de modo que

$$R^{xx}(t_1, t_2) = R^{xx}(\tau) = R^{xx}(-\tau)$$

Um processo aleatório pode apresentar além de uma dependência em relação ao tempo, caso de um processo não estacionário, um dependência em relação à posição. Para um tal processo a sua média pode ser definida como

$$\mu^x(r_1, t_1) = E[X(r_1, t_1)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f^x(x; r_1, t_1) dx$$

e a função auto-correlação dada por

$$R^{xx}(r_1, t_1; r_2, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)] \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f^{xx}(x_1, t_1; x_2, t_2; r_1, r_2) dx_1 dx_2$$

Como um processo estacionário, que é um processo cujas probabilidades apresentam uma independência em relação ao tempo, um processo que apresenta uma independência em relação ao espaço é definido como um processo homogêneo.

No caso por exemplo da análise da superfície do mar, as propriedades estatísticas das ondas, obtidas a partir de um registro em um determinado ponto, não devem variar se forem tomadas a partir de outro registro em outro ponto no mesmo local considerado. Desse modo a elevação da superfície do mar é considerada como um processo homogêneo. De um modo geral a elevação da superfície do mar é considerada como um processo aleatório estacionário para um curto período de tempo, caso em que a análise de curto prazo se aplica, e é também considerada um processo homogêneo para uma região restrita.

Considerando-se um processo aleatório genérico  $X(t)$

com variável aleatória contínua  $x(t_1)$  no instante  $t_1$ , para se obter a média do processo, diversos registros  $x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_n(t_1)$  devem ser obtidos de modo que a média do processo

$$E[X(t_1)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t_1)$$

no instante  $t_1$  pode ser obtida como

Se o processo for assumido como estacionário, significa que sua média deve ser a mesma para todos os instantes  $t_1$  a partir do início do processo, ou seja, suas propriedades estatísticas não variam com o tempo.

Tendo-se um registro  $X_1(t)$  do processo estacionário

$X(t)$ , com duração de tempo  $T$ , seria bastante útil se fosse possível obter a média do processo a partir apenas de tal registro. Uma das maneiras seria obter sua média a partir da

média temporal do registro  $X_1(t)$  como

$$\langle X_1(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2+T} X_1(t) dt$$

Analogamente sua variância temporal pode ser dada como

$$\langle (X_1(t) - \mu_x)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2+T} (X_1(t) - \mu_x)^2 dt$$

Um processo para o qual os seus valores esperados coincidem com suas médias temporais é dito um processo

ergódico. Se um processo é homogêneo e estacionário então ele

é considerado um processo ergódico.

Assumir que um processo seja ergódico significa que a

medida de uma realização do processo é típica de todas as

outras realizações possíveis do processo.

PROPRIEDADES ESTADÍSTICAS DOS ESPECTROS DE ONDA

Considerando a superfície do mar como a superposição de infinitas ondas de diferentes amplitudes e frequências, e fases aleatórias, uma expressão genérica para a elevação do mar  $\eta(t)$  pode ser escrita como

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \epsilon_n)$$

Esta expressão pode ser reescrita em termos de senos e cossenos da seguinte maneira:

$$\eta(t) = Y^c(t) \cos 2\pi f t - Y^s(t) \sin 2\pi f t$$

onde

$$Y^c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t - 2\pi f t + \epsilon_n)$$

$$Y^s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi f_n t - 2\pi f t + \epsilon_n)$$

$f$  pode ser qualquer frequência representativa no intervalo de frequências do espectro onde a maior porção de energia é concentrada.

Para uma onda qualquer a amplitude  $R$  e o ângulo de fase  $\phi$  podem ser definidos em termos de  $Y^c$  e  $Y^s$  como

$$R = R(t) = \sqrt{Y_c^2(t) + Y_s^2(t)}$$

$$\phi = \phi(t) = \tan^{-1} [Y_s(t) / Y_c(t)]$$

Estas relações podem ser reescritas como

$$Y^c(t) = R \cos \phi$$

$$Y^s(t) = R \sin \phi$$

de modo que a elevação da superfície do mar ficaria escrita como

zero do espectro.

Tal expressão se constitui na Distribuição de Rayleigh e representa a distribuição das amplitudes de onda de um determinado estado de mar com parâmetro  $m_0$ , momento de ordem

$$p(R) dR = \frac{R}{m_0} \exp\left[-\frac{R^2}{2m_0}\right] dR$$

de R desse modo fica expressa como

Como R e  $\phi$  são variáveis aleatórias independentes a função densidade de probabilidade  $p(R, \phi)$  pode ser expressa como o produto de duas funções  $p(R)$  e  $p(\phi)$ . Como a expressão acima não contém uma função de  $\phi$ , esta pode ser assumida como uniformemente distribuída entre 0 e  $2\pi$  de modo que  $p(\phi)$  é uma constante e igual a  $1/2\pi$ . A função densidade de probabilidade

$$p(R, \phi) dR d\phi = \frac{R}{2\pi m_0} \exp\left[-\frac{R^2}{2m_0}\right] dR d\phi$$

tem-se

$$dY^c dY^s = R dR d\phi$$

Mudando-se as variáveis para R e  $\phi$  e notando-se que

$$p(Y^c, Y^s) dY^c dY^s = \frac{1}{2\pi m_0} \exp\left[-\frac{Y^c^2 + Y^s^2}{2m_0}\right] dY^c dY^s$$

produto de duas distribuições normais e expressa como:

A probabilidade de que  $Y^c$  e  $Y^s$  estejam respectivamente nos intervalos  $[Y^c, Y^c + dY^c]$  e  $[Y^s, Y^s + dY^s]$  é dada pelo

variáveis aleatórias independentes.

Além disso verifica-se que  $E[Y^c Y^s] = 0$  de modo que elas são

$$E[Y^c^2] = E[Y^s^2] = E[\eta^2] = m_0$$

variancia dada pelo momento de ordem zero do espectro:

$Y^c$  e  $Y^s$  representam ambas um processo Gaussiano com

variam com o tempo.

A expressão acima mostra que a amplitude R e a fase  $\phi$

$$\eta(t) = R(t) \cos[2\pi f t + \phi(t)]$$



As expressões genéricas para a função densidade de

probabilidade (fdp) e para a função distribuição de uma variável aleatória que segue uma distribuição de Rayleigh são

dadas respectivamente por:

$$f(x) = \frac{\sigma}{x} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

Sendo a altura de onda H correspondente a duas vezes a

amplitude da onda R, a fdp de H pode ser facilmente expressa

a partir da fdp de R e escrita como

$$p(H) dH = \frac{4m_0}{H^2} \exp\left[-\frac{4m_0}{H^2}\right] dH$$

A partir da distribuição de H diversos parâmetros

estatísticos da altura de ondas apresentados no Cap. 5 podem

ser obtidos. A altura média é calculada como

$$\bar{H} = \int_0^{\infty} H p(H) dH = \sqrt{2\pi m_0}$$

O desvio padrão da altura,  $H^{rms}$  é obtido diretamente a

partir da média do quadrado das alturas e calculado como

$$H^2_{rms} = \bar{H^2} = \int_0^{\infty} H^2 p(H) dH = 8m_0$$

Para se obter uma expressão para a altura significati-

va de ondas ( $H^{1/3}$ ) pode-se partir da expressão genérica para

a média das 1/n-ésimas maiores ondas. Chamando-se de  $H^n$  a

onda cuja probabilidade de ser excedida é 1/N, da função

distribuição de Rayleigh  $H^n$  pode ser obtida a partir da

expressão

$$\frac{1}{N} = \frac{H^n}{8m_0} \exp\left[-\frac{H^n}{8m_0}\right]$$

ou

$$H^n_2 = 8m_0 \ln(N)$$

A média das  $1/n$ -ésimas maiores ondas é calculada por

$$H_{1/n} = \frac{\int_0^H H p(H) dH}{\int_0^H p(H) dH} = N \left\{ \frac{H^2}{2} \exp\left[-\frac{H^n}{g m_0}\right] + \int_0^H \exp\left[-\frac{H^n}{g m_0}\right] dH \right\}$$

A partir da relação acima a altura significativa  $H_{1/3}$  pode ser expressa em termos de  $m_0$  pela seguinte relação:

$$H_{1/3} = 4 \sqrt{m_0}$$

A média das  $1/10$  maiores ondas, definida como  $H_{1/10}$  pode ser

$$H_{1/10} = 5,09 \sqrt{m_0}$$

expressa como

ANÁLISE DE UM PROCESSO ALEATORIO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

É sabido que uma função periódica pode ser representada por uma série de Fourier, que deve conter as componentes ou harmônicos da frequência fundamental da função,  $\omega_0$ . Considerando-se uma função periódica  $g(t)$ , tal

representação pode ser expressa como

$$g(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega_0 t + B_n \sin n\omega_0 t)$$

onde os coeficientes  $A_n$  e  $B_n$  são dados por

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cos n\omega_0 t \, dt$$

para  $n = 0, 1, 2, \dots$

$$B_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sin n\omega_0 t \, dt$$

para  $n = 1, 2, \dots$

$T = 2\pi/\omega_0$  é o período fundamental.

Uma outra maneira de se expressar a função  $g(t)$ , em

notação complexa pode ser

$$g(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} g_n e^{in\omega_0 t} + g_n^* e^{-in\omega_0 t}$$

onde

$$g_n = \frac{1}{2} (A_n - iB_n)$$

$$g_n^* = \frac{1}{2} (A_n + iB_n)$$

Tem-se então

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n e^{in\omega_0 t}$$

onde os coeficientes  $g_n$  podem ser expressos como

$$g_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-in\omega_0 t} \, dt$$

para  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

A função  $g(t)$  expressa da maneira acima é referida como a transformada de Fourier da função periódica.

Os coeficientes complexos  $g_n$  são funções dos harmônicos  $n$  e representam a função periódica  $g(t)$  no domínio da frequência.

No Apêndice C foi visto que a função auto-correlação de um processo ergódico pode ser obtida a partir de uma média temporal como

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) g(t+\tau) dt$$

Expressa em termos dos coeficientes  $g_n$ , tem-se

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n e^{in\omega_0(t+\tau)} dt$$

ou

$$R(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |g_n|^2 e^{in\omega_0 \tau}$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n e^{in\omega_0 \tau}$$

$S_n$  é conhecida como função densidade espectral e é

proporcional à soma dos quadrados das amplitudes dos harmônicos. A função  $S_n$  em termos da função auto-correlação

pode ser expressa como

$$S_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R(\tau) e^{-in\omega_0 \tau} d\tau$$

Um função aperiódica  $g(t)$  também pode ser expressa em

termos de uma série de Fourier, assumindo-se que o período da função tenda a infinito. Nesse caso a frequência fundamental  $\omega_0$  se transforma em uma frequência infinitesimal

$$\delta\omega_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} 2\pi/T$$

de modo que  $g(t)$  pode ser expressa como

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g^n e^{in\omega_0 t}$$

Substituindo-se o valor de  $g^n$  tem-se

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\omega_0 t} \frac{2\pi}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-in\omega_0 t} dt$$

A medida que  $T$  tende ao infinito,  $\omega_0$  tende a  $d\omega$  e o harmônico  $n\omega_0$  se torna a frequência angular  $\omega$  de modo que

$g(t)$  fica expressa como

$$g(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

onde

$$G(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt$$

As expressões acima para  $g(t)$  e  $G(\omega)$  representam a

transformada de Fourier de uma função aperiódica  $g(t)$ . Na verdade algumas condições devem ser satisfeitas pela função  $g(t)$  para que sua transformada de Fourier exista, como

exposto por Price e Bishop (1974).

Considerando-se um processo aleatório  $X(t)$ , pode-se definir um processo  $X^I(t)$  derivado de  $X(t)$  ao longo de um

instante  $T$ , tal que

$$X^I(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } -T/2 < t < T/2 \\ \text{caso contrário} \end{cases}$$

de tal modo que sua transformada de Fourier  $G^X(\omega)$  exista e

seja expressa como

$$G^I(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} X^I(t) e^{-i\omega t} dt$$

A média dos quadrados do processo  $X^I(t)$ , ao longo de  $T$

pode ser expressa pela média temporal como

$$\langle X^I(t) \rangle^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X^I(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} X^I(t) dt$$

que pode ser escrita como

A função  $\Phi^{XX}(\omega)$  é a função densidade espectral que pode ser obtida experimentalmente.

$$\text{onde } \Phi^{XX}(\omega) = \begin{cases} 2S^{XX}(\omega) & \text{para } \omega \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$R^{XX}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} 2S^{XX}(\omega) \cos \omega \tau \, d\omega$$

Como tanto a função auto-correlação como a função densidade espectral são funções pares, pode-se escrever que

$$R^{XX}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S^{XX}(\omega) e^{i\omega\tau} \, d\omega$$

escrita como

que pelo mesmo processo para a média dos quadrados pode ser

$$R_1^1(\tau) = \langle X_1^1(t) X_1^1(t+\tau) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X_1^1(t) X_1^1(t+\tau) \, dt$$

representada por  $R_1^1(\tau)$ , pode ser expressa como

A função auto-correlação do processo  $X_1^1(t)$ ,

processo  $X_1^1(x)$  é igual à média dos quadrados do processo. portanto que a integral da função densidade espectral do e é definida como a densidade espectral de  $X_1^1(t)$ . Nota-se

$$S^{XX}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |G_1^1(\omega)|^2 \, d\omega$$

onde

$$\langle X(t) \rangle^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S^{XX}(\omega) \, d\omega$$

ou

$$\langle X(t) \rangle^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |G_1^1(\omega)|^2 \, d\omega$$

apresentado anteriormente tem-se

onde  $G_1^1(\omega)$  é o conjugado complexo de  $\omega$ . Pelo que foi

$$\langle X(t) \rangle^2 = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} G_1^1(\omega) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} X_1^1(t) e^{i\omega t} \, dt \right]^* \, d\omega$$

REPRESENTAÇÃO DAS INCERTEZAS NA FORMA DO ESPECTRO DE RESPOSTA

A incerteza na forma do espectro é representada pela variação de cada ordenada  $S(\omega)$  em torno de sua média. O espectro de onda pode ser representado por

$$S(\omega) = \bar{S}(\omega) [1 + \epsilon(\omega)]$$

onde  $\bar{S}(\omega)$  é o espectro dado pela formulação matemática adotada e representa o espectro médio considerado, e  $\epsilon(\omega)$  representa um erro em torno de  $\bar{S}(\omega)$ , normalmente distribuído e com média zero.

Pode-se assumir, de acordo com resultados obtidos por Haver e Moan (1983), que o coeficiente de variação de  $S(\omega)$  independe da frequência, de modo que  $\epsilon(\omega)$  pode ser simplesmente denotado por  $\epsilon$ . A distribuição de probabilidade de  $S(\omega)$ , denotada por  $f^{S(\omega)}$  será do tipo Normal com média  $\bar{S}(\omega)$  e desvio padrão  $\bar{S}(\omega)\sigma^3$ , representada por

$$f^{S(\omega)} = N(\bar{S}(\omega), \bar{S}(\omega)\sigma^3)$$

onde  $\sigma^3$  representa o desvio padrão do erro  $\epsilon$ .

A variância da resposta da embarcação é representada pelo momento de ordem zero do espectro de resposta e que pode ser calculado através da expressão

$$m_0 = \sum_n^{i=1} S(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i$$

que em termos do espectro médio  $\bar{S}(\omega)$  fica:

$$m_0 = \sum_n^{i=1} \bar{S}(\omega) (1+\epsilon) H(\omega) \Delta\omega_i$$

Denotando-se por  $E[m_0]$  a expectativa de  $m_0$  e por  $Var[m_0]$  a variância de  $m_0$  tem-se

Haver e Moan (1983) computaram valores de  $\sigma^3$  para o modelo ISSC e verificaram que os valores variavam entre 0,500 e 0,550 aproximadamente para diversos estados de mar representados por intervalos de ocorrência de  $H_s$  e  $T_p$ . Mais do que isso, os espectros médios e os coeficientes de variação foram comparados com espectros obtidos de registros de onda, de modo que os valores obtidos podem ser utilizados como um modelo teórico com uma boa aproximação.

$$\sigma_0 = \sigma^3 \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i \right]^2 \right]^{1/2}$$

e o desvio padrão de  $m_0$  é dado por

$$\text{Var}[m_0] = \sigma^3 \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i \right]^2 \right]$$

denotada por

A expressão para a variância de  $m_0$  pode ser finalmente

$$\text{Var}[m_0] = \sum_{i=1}^n \left[ \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i \right]^2 \sigma^3$$

$$\text{Var}[m_0] = \sum_{i=1}^n \text{Var} \left[ \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i \right]$$

expressa por

A variância do primeiro termo se anula pois é a variância de uma constante, de modo que a variância de  $m_0$  pode ser

$$\text{Var}[m_0] = \text{Var} \left[ \sum_{i=1}^n \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i + \sum_{i=1}^n \bar{S}(\omega) H(\omega) \Delta\omega_i \right]$$

$$E[m_0] = \bar{m}_0$$



## MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ESTADOS DO MAR PARA O MAR DO NORTE

Os dados apresentados no presente Apêndice se referem à ocorrência de estados de mar na costa da Noruega medidos entre 1977 e 1981 e apresentados por Haver (1985). Uma discussão sobre as características da distribuição de ocorrência de estados de mar no local medido é feita pelo autor mencionado.

A Tab. F.1 apresenta uma distribuição conjunta de altura significativa de ondas e período de pico.

Para os diversos períodos de onda a distribuição de alturas significativas é apresentada para os meses de março, julho, agosto e setembro. Segundo Haver (1985), os dados correspondentes a esses meses são bem representativos dos períodos de inverno, verão e primavera/outono. Eles são apresentados nas Figs. F.1 a F.4 na forma de distribuição acumulada de  $H_s$ .

Para que esses dados pudessem ser utilizados no modelo de operacionalidade desenvolvido no presente trabalho, as curvas de distribuição foram transformadas em uma tabela para os quatro meses considerados e que se constítue na Tab. F.2.

Tab.F.1 Distribuição Conjunta de  $H_s$  e  $T_p$

$T_p$	$H_s$	[M]													SUM					
		0.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0		19.5	21.0	22.5	24.0	25.5
0.0	1.5	1	6	13	2	1	8	5	3	1										42
.5	1.0	2	7	101	238	418	157	74	75	43	6	8	5	1	1					1136
1.0	1.5			54	441	780	450	175	119	79	38	16	10	2	3	0	1			2168
1.5	2.0			7	254	662	593	258	121	94	66	50	22	9	1					2137
2.0	2.5				72	512	613	324	130	78	42	37	16	9	1					1834
2.5	3.0				11	264	498	299	140	79	34	23	14	1						1364
3.0	3.5				3	85	349	253	121	63	30	12	8							924
3.5	4.0					24	188	218	119	59	18	9	5							640
4.0	4.5				4	85	135	94	54	17	12	2								403
4.5	5.0					28	102	87	57	18	2	0	0	1						295
5.0	5.5					11	51	82	38	10	4	2								198
5.5	6.0					1	15	48	31	10	1	0	1							107
6.0	6.5						8	32	22	5	1									68
6.5	7.0						4	15	19	10	5									53
7.0	7.5						2	4	16	7	1	1								31
7.5	8.0						1	2	7	5	2									18
8.0	8.5						2	0	7	5	0	1								15
8.5	9.0								2	2	3									7
9.0	9.5								1	8	1									10
9.5	10.0									1	1									2
10.0	10.5																			0
10.5	11.0																			1
11.0	11.5																			1
11.5	12.0																			0
12.0	12.5																			1
Sum		4	8	168	1032	2751	2974	1929	1194	752	333	189	88	23	8	0	1	1	1	11455

Tab.F.2 Distribuição Acumulada de H<sup>s</sup>

H <sup>s</sup> (m)	Março	Julho	Setembro	Novembro
0.50	0.000	0.000	0.000	0.0
1.00	0.000	0.350	0.080	0.0
1.50	0.060	0.680	0.300	0.050
2.00	0.320	0.920	0.650	0.265
2.50	0.500	0.970	0.740	0.440
3.00	0.700	0.999	0.870	0.590
3.50	0.800	-	0.910	0.700
4.00	0.890	-	0.935	0.790
4.50	0.920	-	0.960	0.850
5.00	0.950	-	0.991	0.895
5.50	0.970	-	0.999	0.915
6.00	0.992	-	-	0.930
6.50	0.995	-	-	0.950
7.00	0.999	-	-	0.960
7.50	-	-	-	0.970
8.00	-	-	-	0.980

Fig.F.2 Função de Distribuição de  $H_s$  - Julho

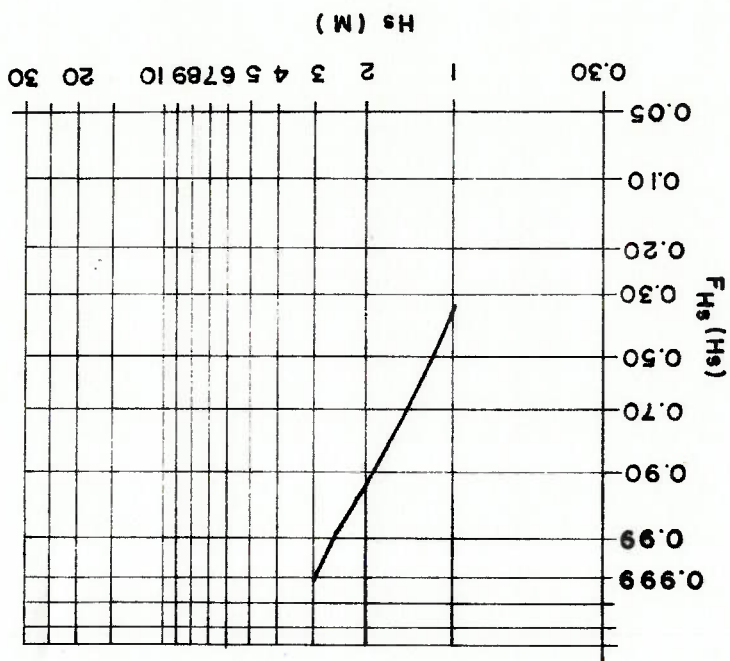


Fig.F.1 Função de Distribuição de  $H_s$  - Março

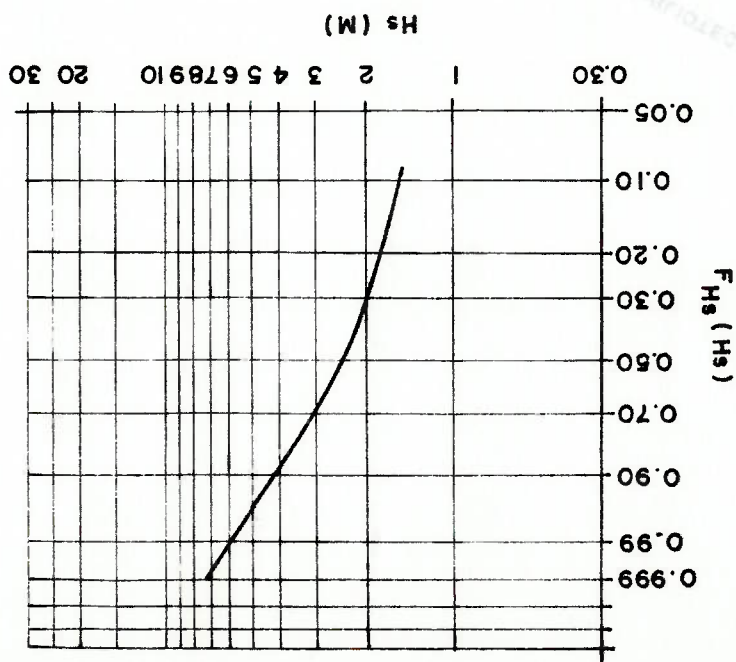


Fig.F.4 Função de Distribuição de  $H_s$  - Novembro

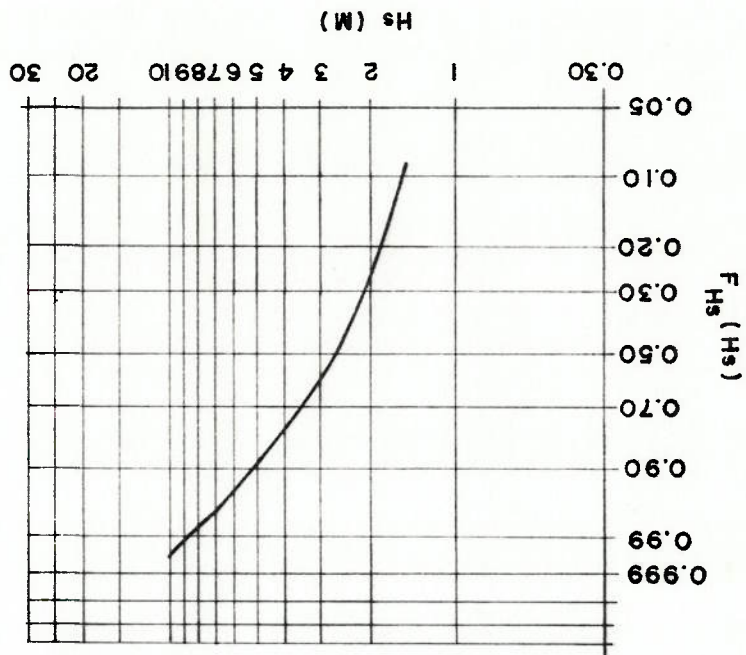
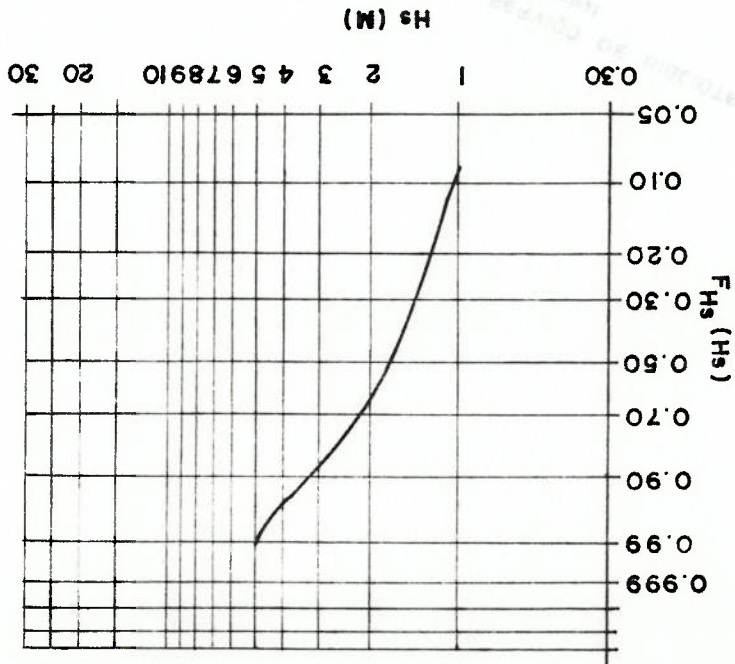


Fig.F.3 Função de Distribuição de  $H_s$  - Setembro





100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400

-----  
 CALCULO COM ESPALHAMENTO  
 DIRECA DE CNDA - 30 GRAUS  
 -----

HS	TM	ROLL	HZ1/3	MCV. VERT
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.229498	0.065938	0.058803
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.787351	0.443434	0.661805
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00	1.892591	0.677935	0.908610
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	0.378099	0.108634	0.162779
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	1.297167	0.730561	0.551485
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	3.118720	1.115307	1.456544
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	4.914430	1.154275	1.617605
1.50 - 2.00	2.00 - 4.00	0.527631	0.151597	0.227154
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	1.810173	1.015485	1.383599
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	4.352116	1.556390	2.068957
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	6.857996	1.610769	2.257337
2.00 - 2.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	2.324257	1.305015	1.776537
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	5.588104	1.598400	2.662215
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	8.905648	2.068222	2.898414
2.50 - 3.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00	2.838833	1.558824	2.169852
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00	6.925277	2.440834	3.276041
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00	10.755165	2.526114	3.540106
3.00 - 3.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00	3.353676	1.668782	2.563370
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00	8.063085	2.863456	3.870374
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00	12.705690	2.584243	4.182129
3.50 - 4.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	4.00 - 6.00	2.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	6.00 - 8.00	4.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	8.00 - 10.00	6.000000	0.000000	0.000000

100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400

-----  
CALCULO COM ESPALTIMIENTO  
-----  
DIRECCION DE ONDA - 60 GRAUS

HS	TM	ROLL	HZ1/3	MCV. VERT
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.339001	0.053200	0.081929
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	1.184480	0.437140	0.557435
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00	2.198911	0.813062	0.863554
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00	3.622726	1.010000	0.000000
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	0.558506	0.087661	0.134379
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	1.951442	0.720192	0.584287
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	3.622726	1.010000	1.422713
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	5.521842	0.587440	1.503396
1.50 - 2.00	2.00 - 4.00	0.779395	0.122329	0.188361
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	2.723201	1.005014	1.373554
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	5.055447	1.405472	1.985370
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	7.705629	1.377954	2.097961
2.00 - 2.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	3.496582	1.250435	1.763639
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	6.491175	1.809578	2.549210
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	9.894006	1.765289	2.653776
2.50 - 3.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00	4.270704	1.578130	2.154098
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00	7.928287	2.210427	3.113589
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00	12.084479	2.160999	3.250162
3.00 - 3.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00	5.045226	1.861572	2.544759
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00	9.366139	2.611304	3.678261
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00	14.276084	2.552912	3.886856
3.50 - 4.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00	2.611304	2.552912	3.886856
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00	4.270704	1.578130	2.154098
3.50 - 4.00	8.00 - 10.00	7.928287	2.210427	3.113589
4.00 - 4.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.00 - 10.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.00 - 10.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.00 - 10.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.00 - 10.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.50 - 11.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.50 - 11.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.50 - 11.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.50 - 11.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.00 - 11.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.00 - 11.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.00 - 11.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.00 - 11.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.50 - 12.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.50 - 12.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.50 - 12.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.50 - 12.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.00 - 12.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.00 - 12.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.00 - 12.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.00 - 12.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.50 - 13.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.50 - 13.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.50 - 13.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.50 - 13.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.00 - 13.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.00 - 13.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.00 - 13.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.00 - 13.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.50 - 14.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.50 - 14.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.50 - 14.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.50 - 14.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.00 - 14.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.00 - 14.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.00 - 14.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.00 - 14.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.50 - 15.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.50 - 15.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.50 - 15.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.50 - 15.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.00 - 15.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.00 - 15.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.00 - 15.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.00 - 15.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.50 - 16.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.50 - 16.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.50 - 16.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.50 - 16.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.00 - 16.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.00 - 16.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.00 - 16.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.00 - 16.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.50 - 17.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.50 - 17.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.50 - 17.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.50 - 17.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.00 - 17.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.00 - 17.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.00 - 17.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.00 - 17.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.50 - 18.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.50 - 18.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.50 - 18.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.50 - 18.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.00 - 18.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.00 - 18.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.00 - 18.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.00 - 18.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.50 - 19.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.50 - 19.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.50 - 19.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.50 - 19.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.00 - 19.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.00 - 19.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.00 - 19.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.00 - 19.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.50 - 20.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.50 - 20.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.50 - 20.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.50 - 20.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.00 - 20.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.00 - 20.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.00 - 20.50	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.00 - 20.50	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.50 - 21.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	



100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300

CALCULO COM ESPALHAMENTO DIRETA DE CADA - 90 GRAUS

HS	TM	ROLL	HZ1/3	MCV. VERT
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.374125	0.046695	0.063523
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	1.321065	0.412571	0.560315
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	2.343312	0.555058	0.811547
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	0.616390	0.067046	0.105314
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	2.176473	0.675714	0.523124
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	3.860628	0.921054	1.337031
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	5.830429	0.871983	1.415497
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	0.860147	0.053561	0.146564
1.50 - 2.00	3.00 - 6.00	3.037227	0.544528	1.288202
1.50 - 2.00	3.00 - 6.00	5.387434	1.225213	1.855802
1.50 - 2.00	3.00 - 6.00	8.136255	1.216836	1.975299
1.50 - 2.00	3.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 8.00	3.899791	1.217907	1.654048
2.00 - 2.50	4.00 - 8.00	6.917450	1.650329	2.355885
2.00 - 2.50	4.00 - 8.00	10.446928	1.562414	2.526279
2.00 - 2.50	4.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	5.00 - 10.00	9.448932	2.015714	2.926075
2.50 - 3.00	5.00 - 10.00	12.759815	1.508323	3.057796
2.50 - 3.00	5.00 - 10.00	2.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	6.00 - 12.00	5.627018	1.757321	2.386629
3.00 - 3.50	6.00 - 12.00	9.981205	2.361277	3.456739
3.00 - 3.50	6.00 - 12.00	15.073897	2.254411	3.659603
3.00 - 3.50	6.00 - 12.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	7.00 - 14.00	11.513953	2.746555	3.567568
3.50 - 4.00	7.00 - 14.00	17.388696	2.600000	4.221584
3.50 - 4.00	7.00 - 14.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	8.00 - 16.00	13.047010	3.112705	4.518503
4.00 - 4.50	8.00 - 16.00	19.703961	2.946871	4.733378
4.00 - 4.50	8.00 - 16.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	9.00 - 18.00	10.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	9.00 - 18.00	17.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	9.00 - 18.00	22.019544	3.252183	5.345649



100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300

CALCULO CON ESPALAMIENTO  
DIRECCAO DE ONDA - 150 GRAUS

TS	TM	ROLL	PITCH	MCV. VERT
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.188431	0.034584	0.039326
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.699462	0.367067	0.420052
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00	1.914497	0.617734	0.755584
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
0.50 - 1.00	10.00 - 12.00	0.310442	0.056577	0.063143
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	1.152370	0.604746	0.652035
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	3.154150	1.017723	1.251422
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	5.007737	1.056103	1.473596
1.50 - 2.00	2.00 - 4.00	0.433216	0.079510	0.088115
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	1.608111	0.843512	0.965728
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	4.401553	1.426213	1.716336
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	6.988204	1.525591	2.056376
2.00 - 2.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	2.064810	1.063561	1.239592
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	5.651593	1.823550	2.242291
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	8.972834	1.563590	2.640381
2.50 - 3.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00	2.521947	1.323479	1.514519
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00	6.902816	2.227272	2.738721
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00	10.959365	2.358806	3.224546
3.00 - 3.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00	2.979320	1.563501	1.769187
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00	8.154690	2.631204	3.2235407
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00	12.946523	2.833846	3.809133
3.50 - 4.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00	9.406952	3.025261	3.712247
3.50 - 4.00	8.00 - 10.00	14.935097	3.265021	4.354861
4.00 - 4.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00	10.659466	3.439399	4.229197
4.00 - 4.50	8.00 - 10.00	16.923671	3.704284	4.930026
4.50 - 5.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	8.00 - 10.00	18.912517	4.135606	5.565272

100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300

-----  
 CALCULO COM ESPALHAMENTO  
 DIRECÃO DE ONDA - 180 GRAUS  
 -----

HS	TM	ROLL	HZ1/3	MVA. VERT
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.064634	0.035215	0.033355
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.316065	0.365497	0.339392
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00	1.743307	0.646006	0.756678
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00	0.106484	0.056318	0.054952
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	0.520720	0.662160	0.642021
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	2.872115	1.064301	1.246963
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	4.680585	1.165983	1.504806
1.50 - 2.00	2.00 - 4.00	0.148597	0.060582	0.076685
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	0.726655	0.840303	0.855528
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	4.007983	1.485212	1.740114
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	6.532228	1.632690	2.059929
2.00 - 2.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	0.933024	1.078946	1.150365
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	5.146238	1.907008	2.234301
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	8.387362	2.056369	2.656303
2.50 - 3.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00	1.139589	1.317819	1.445053
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00	6.285585	2.325208	2.728962
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00	10.244272	2.560452	3.253248
3.00 - 3.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00	1.346262	1.556814	1.659670
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00	7.425519	2.751626	3.223679
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00	12.102144	3.024856	3.890501
3.50 - 4.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00	8.565808	3.174175	3.718949
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00	13.960591	3.485363	4.487540
4.00 - 4.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
4.50 - 5.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
5.00 - 5.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.00 - 5.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
5.00 - 5.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
5.50 - 6.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.50 - 6.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
5.50 - 6.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
6.00 - 6.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.00 - 6.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
6.00 - 6.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
6.50 - 7.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
6.50 - 7.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
6.50 - 7.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
7.00 - 7.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.00 - 7.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
7.00 - 7.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
7.50 - 8.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
7.50 - 8.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
7.50 - 8.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
8.00 - 8.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.00 - 8.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
8.00 - 8.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
8.50 - 9.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
8.50 - 9.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
8.50 - 9.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
9.00 - 9.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.00 - 9.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
9.00 - 9.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
9.50 - 10.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
9.50 - 10.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
9.50 - 10.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
10.00 - 10.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.00 - 10.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
10.00 - 10.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
10.50 - 11.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
10.50 - 11.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
10.50 - 11.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
11.00 - 11.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.00 - 11.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
11.00 - 11.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
11.50 - 12.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
11.50 - 12.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
11.50 - 12.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
12.00 - 12.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.00 - 12.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
12.00 - 12.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
12.50 - 13.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
12.50 - 13.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
12.50 - 13.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
13.00 - 13.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.00 - 13.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
13.00 - 13.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
13.50 - 14.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
13.50 - 14.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
13.50 - 14.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
14.00 - 14.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.00 - 14.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
14.00 - 14.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
14.50 - 15.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
14.50 - 15.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
14.50 - 15.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
15.00 - 15.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.00 - 15.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
15.00 - 15.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
15.50 - 16.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
15.50 - 16.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
15.50 - 16.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
16.00 - 16.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.00 - 16.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
16.00 - 16.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
16.50 - 17.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
16.50 - 17.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
16.50 - 17.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
17.00 - 17.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.00 - 17.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
17.00 - 17.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
17.50 - 18.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
17.50 - 18.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
17.50 - 18.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
18.00 - 18.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.00 - 18.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
18.00 - 18.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
18.50 - 19.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
18.50 - 19.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
18.50 - 19.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
19.00 - 19.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.00 - 19.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
19.00 - 19.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
19.50 - 20.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
19.50 - 20.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
19.50 - 20.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
20.00 - 20.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.00 - 20.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
20.00 - 20.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
20.50 - 21.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
20.50 - 21.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
20.50 - 21.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
21.00 - 21.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
21.00 - 21.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
21.00 - 21.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
21.50 - 22.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
21.50 - 22.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
21.50 - 22.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
22.00 - 22.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
22.00 - 22.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
22.00 - 22.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
22.50 - 23.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
22.50 - 23.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
22.50 - 23.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
23.00 - 23.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
23.00 - 23.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
23.00 - 23.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
23.50 - 24.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
23.50 - 24.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
23.50 - 24.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
24.00 - 24.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
24.00 - 24.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
24.00 - 24.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
24.50 - 25.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
24.50 - 25.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
24.50 - 25.00	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
25.00 - 25.50	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
25.00 - 25.50	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118
25.00 - 25.50	6.00 - 8.00	15.819411	3.953963	5.085499
25.50 - 26.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
25.50 - 26.00	4.00 - 6.00	9.706325	3.556809	4.214118</



600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400  
4500  
4600  
4700  
4800

DIFFERENTIAL 30 GRAUS

RAYLEIGH

TS	TW
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00
1.00 - 1.50	2.00 - 4.00
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00
1.50 - 2.00	2.00 - 4.00
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00
2.00 - 2.50	2.00 - 4.00
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00
2.50 - 3.00	2.00 - 4.00
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00
3.00 - 3.50	2.00 - 4.00
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00
3.50 - 4.00	2.00 - 4.00
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00
3.50 - 4.00	8.00 - 10.00
4.00 - 4.50	2.00 - 4.00
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00
4.00 - 4.50	8.00 - 10.00
4.50 - 5.00	2.00 - 4.00
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00
4.50 - 5.00	8.00 - 10.00
5.00 - 5.50	2.00 - 4.00
5.00 - 5.50	4.00 - 6.00
5.00 - 5.50	6.00 - 8.00
5.00 - 5.50	8.00 - 10.00
5.50 - 6.00	2.00 - 4.00
5.50 - 6.00	4.00 - 6.00
5.50 - 6.00	6.00 - 8.00
5.50 - 6.00	8.00 - 10.00
6.00 - 6.50	2.00 - 4.00
6.00 - 6.50	4.00 - 6.00
6.00 - 6.50	6.00 - 8.00
6.00 - 6.50	8.00 - 10.00
6.50 - 7.00	2.00 - 4.00
6.50 - 7.00	4.00 - 6.00
6.50 - 7.00	6.00 - 8.00
6.50 - 7.00	8.00 - 10.00
7.00 - 7.50	2.00 - 4.00
7.00 - 7.50	4.00 - 6.00
7.00 - 7.50	6.00 - 8.00
7.00 - 7.50	8.00 - 10.00
7.50 - 8.00	2.00 - 4.00
7.50 - 8.00	4.00 - 6.00
7.50 - 8.00	6.00 - 8.00
7.50 - 8.00	8.00 - 10.00
8.00 - 8.50	2.00 - 4.00
8.00 - 8.50	4.00 - 6.00
8.00 - 8.50	6.00 - 8.00
8.00 - 8.50	8.00 - 10.00
8.50 - 9.00	2.00 - 4.00
8.50 - 9.00	4.00 - 6.00
8.50 - 9.00	6.00 - 8.00
8.50 - 9.00	8.00 - 10.00
9.00 - 9.50	2.00 - 4.00
9.00 - 9.50	4.00 - 6.00
9.00 - 9.50	6.00 - 8.00
9.00 - 9.50	8.00 - 10.00
9.50 - 10.00	2.00 - 4.00
9.50 - 10.00	4.00 - 6.00
9.50 - 10.00	6.00 - 8.00
9.50 - 10.00	8.00 - 10.00



600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400  
4500  
4600  
4700  
4800  
4900  
5000

DIRECCION DE ONDA 90 GRAUS

RAYLEIGH

HS	TM
1.50 - 1.00	2.00 - 4.00
1.50 - 1.50	0.000000
1.50 - 2.00	0.000000
1.50 - 2.50	0.000000
1.50 - 3.00	0.000000
1.50 - 3.50	0.000000
1.50 - 4.00	0.000000
1.50 - 4.50	0.000000
1.50 - 5.00	0.000000
1.50 - 5.50	0.000000
1.50 - 6.00	0.000000
1.50 - 6.50	0.000000
1.50 - 7.00	0.000000
1.50 - 7.50	0.000000
1.50 - 8.00	0.000000
1.50 - 8.50	0.000000
1.50 - 9.00	0.000000
1.50 - 9.50	0.000000
1.50 - 10.00	0.000000
1.50 - 10.50	0.000000
1.50 - 11.00	0.000000
1.50 - 11.50	0.000000
1.50 - 12.00	0.000000
1.50 - 12.50	0.000000
1.50 - 13.00	0.000000
1.50 - 13.50	0.000000
1.50 - 14.00	0.000000
1.50 - 14.50	0.000000
1.50 - 15.00	0.000000
1.50 - 15.50	0.000000
1.50 - 16.00	0.000000
1.50 - 16.50	0.000000
1.50 - 17.00	0.000000
1.50 - 17.50	0.000000
1.50 - 18.00	0.000000
1.50 - 18.50	0.000000
1.50 - 19.00	0.000000
1.50 - 19.50	0.000000
1.50 - 20.00	0.000000
1.50 - 20.50	0.000000
1.50 - 21.00	0.000000
1.50 - 21.50	0.000000
1.50 - 22.00	0.000000
1.50 - 22.50	0.000000
1.50 - 23.00	0.000000
1.50 - 23.50	0.000000
1.50 - 24.00	0.000000
1.50 - 24.50	0.000000
1.50 - 25.00	0.000000
1.50 - 25.50	0.000000
1.50 - 26.00	0.000000
1.50 - 26.50	0.000000
1.50 - 27.00	0.000000
1.50 - 27.50	0.000000
1.50 - 28.00	0.000000
1.50 - 28.50	0.000000
1.50 - 29.00	0.000000
1.50 - 29.50	0.000000
1.50 - 30.00	0.000000
1.50 - 30.50	0.000000
1.50 - 31.00	0.000000
1.50 - 31.50	0.000000
1.50 - 32.00	0.000000
1.50 - 32.50	0.000000
1.50 - 33.00	0.000000
1.50 - 33.50	0.000000
1.50 - 34.00	0.000000
1.50 - 34.50	0.000000
1.50 - 35.00	0.000000
1.50 - 35.50	0.000000
1.50 - 36.00	0.000000
1.50 - 36.50	0.000000
1.50 - 37.00	0.000000
1.50 - 37.50	0.000000
1.50 - 38.00	0.000000
1.50 - 38.50	0.000000
1.50 - 39.00	0.000000
1.50 - 39.50	0.000000
1.50 - 40.00	0.000000
1.50 - 40.50	0.000000
1.50 - 41.00	0.000000
1.50 - 41.50	0.000000
1.50 - 42.00	0.000000
1.50 - 42.50	0.000000
1.50 - 43.00	0.000000
1.50 - 43.50	0.000000
1.50 - 44.00	0.000000
1.50 - 44.50	0.000000
1.50 - 45.00	0.000000
1.50 - 45.50	0.000000
1.50 - 46.00	0.000000
1.50 - 46.50	0.000000
1.50 - 47.00	0.000000
1.50 - 47.50	0.000000
1.50 - 48.00	0.000000
1.50 - 48.50	0.000000
1.50 - 49.00	0.000000
1.50 - 49.50	0.000000
1.50 - 50.00	0.000000













100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400  
4500

DIRECCION DE ONDA - 60 GRAS

CALCULO CON ESPALTIMIENTO

MS	TM	ROLL	H21/3	NOV. VERT.
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.008857	0.004523	0.007762
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00	0.057944	0.054753	0.000000
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00	0.468309	0.384856	0.433233
0.50 - 1.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	0.014592	0.008110	0.012785
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	0.161364	0.000000	0.112508
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	0.771543	0.634054	0.713755
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	0.927225	0.935006	1.005561
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	0.020363	0.011318	0.017846
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	0.225191	0.125972	0.157561
1.50 - 2.00	10.00 - 12.00	1.076674	0.864810	0.556031
1.50 - 2.00	12.00 - 14.00	1.253930	1.304783	1.492580
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	0.285131	0.161748	0.202208
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	1.392447	1.136094	1.278901
2.00 - 2.50	10.00 - 12.00	1.661402	1.475333	1.916469
2.00 - 2.50	12.00 - 14.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	14.00 - 16.00	0.353143	0.197558	0.247098
2.00 - 2.50	16.00 - 18.00	1.688512	1.387618	1.562042
2.00 - 2.50	18.00 - 20.00	2.029223	2.046247	2.340763
2.00 - 2.50	20.00 - 22.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	22.00 - 24.00	0.417188	0.233387	0.251511
2.00 - 2.50	24.00 - 26.00	1.994736	1.635273	1.845330
2.00 - 2.50	26.00 - 28.00	2.397242	2.417345	2.752277
2.00 - 2.50	28.00 - 30.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	30.00 - 32.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	32.00 - 34.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	34.00 - 36.00	2.765371	2.788565	3.189922
2.00 - 2.50	36.00 - 38.00	2.301054	1.891005	2.128705
2.00 - 2.50	38.00 - 40.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	40.00 - 42.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	42.00 - 44.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	44.00 - 46.00	3.133574	3.159856	3.614653
2.00 - 2.50	46.00 - 48.00	2.607434	2.142788	2.412137
2.00 - 2.50	48.00 - 50.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	50.00 - 52.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	52.00 - 54.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	54.00 - 56.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	56.00 - 58.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	58.00 - 60.00	3.501827	3.531158	4.035442

300  
320  
340  
360  
380  
400  
420  
440  
460  
480  
500  
520  
540  
560  
580  
600  
620  
640  
660  
680  
700  
720  
740  
760  
780  
800  
820  
840  
860  
880  
900  
920  
940  
960  
980  
1000

-----  
 CALCULO CON ESPALMAMENTO  
 DIRECCION DE ONDA = 90 GRAUS  
 -----

MS	TM	ROLL	HZ1/3 PITCH	MOV. VERT.
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00	0.009536	0.004438	0.007441
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	0.109841	0.045334	0.057743
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	0.179316	0.074688	0.055132
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	0.250232	0.104226	0.132755
2.50 - 3.00	10.00 - 12.00	0.321297	0.133825	0.170457
3.00 - 3.50	12.00 - 14.00	0.392431	0.163453	0.208195
3.50 - 4.00	14.00 - 16.00	0.463601	0.193097	0.245953
4.00 - 4.50	16.00 - 18.00	0.534735	0.222741	0.283711
4.50 - 5.00	18.00 - 20.00	0.605869	0.252385	0.321469
5.00 - 5.50	20.00 - 22.00	0.677003	0.282029	0.359227
5.50 - 6.00	22.00 - 24.00	0.748137	0.311673	0.396985
6.00 - 6.50	24.00 - 26.00	0.819271	0.341317	0.434743
6.50 - 7.00	26.00 - 28.00	0.890405	0.370961	0.472501
7.00 - 7.50	28.00 - 30.00	0.961539	0.400605	0.510259
7.50 - 8.00	30.00 - 32.00	1.032673	0.430249	0.548017
8.00 - 8.50	32.00 - 34.00	1.103807	0.459893	0.585775
8.50 - 9.00	34.00 - 36.00	1.174941	0.489537	0.623533
9.00 - 9.50	36.00 - 38.00	1.246075	0.519181	0.661291
9.50 - 10.00	38.00 - 40.00	1.317209	0.548825	0.699049
10.00 - 10.50	40.00 - 42.00	1.388343	0.578469	0.736807
10.50 - 11.00	42.00 - 44.00	1.459477	0.608113	0.774565
11.00 - 11.50	44.00 - 46.00	1.530611	0.637757	0.812323
11.50 - 12.00	46.00 - 48.00	1.601745	0.667401	0.850081
12.00 - 12.50	48.00 - 50.00	1.672879	0.697045	0.887839
12.50 - 13.00	50.00 - 52.00	1.744013	0.726689	0.925597
13.00 - 13.50	52.00 - 54.00	1.815147	0.756333	0.963355
13.50 - 14.00	54.00 - 56.00	1.886281	0.785977	1.001113
14.00 - 14.50	56.00 - 58.00	1.957415	0.815621	1.038871
14.50 - 15.00	58.00 - 60.00	2.028549	0.845265	1.076629
15.00 - 15.50	60.00 - 62.00	2.100000	0.874909	1.114387
15.50 - 16.00	62.00 - 64.00	2.171451	0.904553	1.152145
16.00 - 16.50	64.00 - 66.00	2.242902	0.934197	1.189903
16.50 - 17.00	66.00 - 68.00	2.314353	0.963841	1.227661
17.00 - 17.50	68.00 - 70.00	2.385804	0.993485	1.265419
17.50 - 18.00	70.00 - 72.00	2.457255	1.023129	1.303177
18.00 - 18.50	72.00 - 74.00	2.528706	1.052773	1.340935
18.50 - 19.00	74.00 - 76.00	2.600157	1.082417	1.378693
19.00 - 19.50	76.00 - 78.00	2.671608	1.112061	1.416451
19.50 - 20.00	78.00 - 80.00	2.743059	1.141705	1.454209
20.00 - 20.50	80.00 - 82.00	2.814510	1.171349	1.491967
20.50 - 21.00	82.00 - 84.00	2.885961	1.200993	1.529725
21.00 - 21.50	84.00 - 86.00	2.957412	1.230637	1.567483
21.50 - 22.00	86.00 - 88.00	3.028863	1.260281	1.605241
22.00 - 22.50	88.00 - 90.00	3.100314	1.289925	1.643000
22.50 - 23.00	90.00 - 92.00	3.171765	1.319569	1.680758
23.00 - 23.50	92.00 - 94.00	3.243216	1.349213	1.718516
23.50 - 24.00	94.00 - 96.00	3.314667	1.378857	1.756274
24.00 - 24.50	96.00 - 98.00	3.386118	1.408501	1.794032
24.50 - 25.00	98.00 - 100.00	3.457569	1.438145	1.831790
25.00 - 25.50	100.00 - 102.00	3.529020	1.467789	1.869548
25.50 - 26.00	102.00 - 104.00	3.600471	1.497433	1.907306
26.00 - 26.50	104.00 - 106.00	3.671922	1.527077	1.945064
26.50 - 27.00	106.00 - 108.00	3.743373	1.556721	1.982822
27.00 - 27.50	108.00 - 110.00	3.814824	1.586365	2.020580
27.50 - 28.00	110.00 - 112.00	3.886275	1.616009	2.058338
28.00 - 28.50	112.00 - 114.00	3.957726	1.645653	2.096096
28.50 - 29.00	114.00 - 116.00	4.029177	1.675297	2.133854
29.00 - 29.50	116.00 - 118.00	4.100628	1.704941	2.171612
29.50 - 30.00	118.00 - 120.00	4.172079	1.734585	2.209370
30.00 - 30.50	120.00 - 122.00	4.243530	1.764229	2.247128
30.50 - 31.00	122.00 - 124.00	4.314981	1.793873	2.284886
31.00 - 31.50	124.00 - 126.00	4.386432	1.823517	2.322644
31.50 - 32.00	126.00 - 128.00	4.457883	1.853161	2.360402
32.00 - 32.50	128.00 - 130.00	4.529334	1.882805	2.398160
32.50 - 33.00	130.00 - 132.00	4.600785	1.912449	2.435918
33.00 - 33.50	132.00 - 134.00	4.672236	1.942093	2.473676
33.50 - 34.00	134.00 - 136.00	4.743687	1.971737	2.511434
34.00 - 34.50	136.00 - 138.00	4.815138	2.001381	2.549192
34.50 - 35.00	138.00 - 140.00	4.886589	2.031025	2.586950
35.00 - 35.50	140.00 - 142.00	4.958040	2.060669	2.624708
35.50 - 36.00	142.00 - 144.00	5.029491	2.090313	2.662466
36.00 - 36.50	144.00 - 146.00	5.100942	2.119957	2.700224
36.50 - 37.00	146.00 - 148.00	5.172393	2.149601	2.737982
37.00 - 37.50	148.00 - 150.00	5.243844	2.179245	2.775740
37.50 - 38.00	150.00 - 152.00	5.315295	2.208889	2.813498
38.00 - 38.50	152.00 - 154.00	5.386746	2.238533	2.851256
38.50 - 39.00	154.00 - 156.00	5.458197	2.268177	2.889014
39.00 - 39.50	156.00 - 158.00	5.529648	2.297821	2.926772
39.50 - 40.00	158.00 - 160.00	5.601099	2.327465	2.964530
40.00 - 40.50	160.00 - 162.00	5.672550	2.357109	3.002288
40.50 - 41.00	162.00 - 164.00	5.744001	2.386753	3.040046
41.00 - 41.50	164.00 - 166.00	5.815452	2.416397	3.077804
41.50 - 42.00	166.00 - 168.00	5.886903	2.446041	3.115562
42.00 - 42.50	168.00 - 170.00	5.958354	2.475685	3.153320
42.50 - 43.00	170.00 - 172.00	6.029805	2.505329	3.191078
43.00 - 43.50	172.00 - 174.00	6.101256	2.534973	3.228836
43.50 - 44.00	174.00 - 176.00	6.172707	2.564617	3.266594
44.00 - 44.50	176.00 - 178.00	6.244158	2.594261	3.304352
44.50 - 45.00	178.00 - 180.00	6.315609	2.623905	3.342110
45.00 - 45.50	180.00 - 182.00	6.387060	2.653549	3.379868
45.50 - 46.00	182.00 - 184.00	6.458511	2.683193	3.417626
46.00 - 46.50	184.00 - 186.00	6.529962	2.712837	3.455384
46.50 - 47.00	186.00 - 188.00	6.601413	2.742481	3.493142
47.00 - 47.50	188.00 - 190.00	6.672864	2.772125	3.530900
47.50 - 48.00	190.00 - 192.00	6.744315	2.801769	3.568658
48.00 - 48.50	192.00 - 194.00	6.815766	2.831413	3.606416
48.50 - 49.00	194.00 - 196.00	6.887217	2.861057	3.644174
49.00 - 49.50	196.00 - 198.00	6.958668	2.890701	3.681932
49.50 - 50.00	198.00 - 200.00	7.030119	2.920345	3.719690
50.00 - 50.50	200.00 - 202.00	7.101570	2.949989	3.757448
50.50 - 51.00	202.00 - 204.00	7.173021	2.979633	3.795206
51.00 - 51.50	204.00 - 206.00	7.244472	3.009277	3.832964
51.50 - 52.00	206.00 - 208.00	7.315923	3.038921	3.870722
52.00 - 52.50	208.00 - 210.00	7.387374	3.068565	3.908480
52.50 - 53.00	210.00 - 212.00	7.458825	3.098209	3.946238
53.00 - 53.50	212.00 - 214.00	7.530276	3.127853	3.983996
53.50 - 54.00	214.00 - 216.00	7.601727	3.157497	4.021754
54.00 - 54.50	216.00 - 218.00	7.673178	3.187141	4.059512
54.50 - 55.00	218.00 - 220.00	7.744629	3.216785	4.097270
55.00 - 55.50	220.00 - 222.00	7.816080	3.246429	4.135028
55.50 - 56.00	222.00 - 224.00	7.887531	3.276073	4.172786
56.00 - 56.50	224.00 - 226.00	7.958982	3.305717	4.210544
56.50 - 57.00	226.00 - 228.00	8.030433	3.335361	4.248302
57.00 - 57.50	228.00 - 230.00	8.101884	3.365005	4.286060
57.50 - 58.00	230.00 - 232.00	8.173335	3.394649	4.323818
58.00 - 58.50	232.00 - 234.00	8.244786	3.424293	4.361576
58.50 - 59.00	234.00 - 236.00	8.316237	3.453937	4.399334
59.00 - 59.50	236.00 - 238.00	8.387688	3.483581	4.437092
59.50 - 60.00	238.00 - 240.00	8.459139	3.513225	4.474850
60.00 - 60.50	240.00 - 242.00	8.530590	3.542869	4.512608
60.50 - 61.00	242.00 - 244.00	8.602041	3.572513	4.550366
61.00 - 61.50	244.00 - 246.00	8.673492	3.602157	4.588124
61.50 - 62.00	246.00 - 248.00	8.744943	3.631801	4.625882
62.00 - 62.50	248.00 - 250.00	8.816394	3.661445	4.663640
62.50 - 63.00	250.00 - 252.00	8.887845	3.691089	4.701398
63.00 - 63.50	252.00 - 254.00	8.959296	3.720733	4.739156
63.50 - 64.00	254.00 - 256.00	9.030747	3.750377	4.776914
64.00 - 64.50	256.00 - 258.00	9.102198	3.780021	4.814672
64.50 - 65.00	258.00 - 260.00	9.173649	3.809665	4.852430
65.00 - 65.50	260.00 - 262.00	9.245100	3.839309	4.890188
65.50 - 66.00	262.00 - 264.00	9.316551	3.868953	4.927946
66.00 - 66.50	264.00 - 266.00	9.388002	3.898597	4.965704
66.50 - 67.00	266.00 - 268.00	9.459453	3.928241	5.003462
67.00 - 67.50	268.00 - 270.00	9.530904	3.957885	5.041220
67.50 - 68.00	270.00 - 272.00	9.602355	3.987529	5.078978
68.00 - 68.50	272.00 - 274.00	9.673806	4.017173	5.116736
68.50 - 69.00	274.00 - 276.00	9.745257	4.046817	5.154494
69.00 - 69.50	276.00 - 278.00	9.816708	4.076461	5.192252
69.50 - 70.00	278.00 - 280.00	9.888159	4.106105	5.229910
70.00 - 70.50	280.00 - 282.00	9.959610	4.135749	5.267668
70.50 - 71.00	282.00 - 284.00	10.031061	4.165393	5.305426
71.00 - 71.50	284.00 - 286.00	10.102512	4.195037	5.343184
71.50 - 72.00	286.00 - 288.00	10.173963	4.224681	5.380942
72.00 - 72.50	288.00 - 290.00	10.245414	4.254325	5.418700
72.50 - 73.00	290.00 - 292.00	10.316865	4.283969	5.456458
73.00 - 73.50	292.00 - 294.00	10.388316	4.313613	5.494216
73.50 - 74.00	294.00 - 296.00	10.459767	4.343257	5.531974
74.00 - 74.50	296.00 - 298.00	10.531218	4.372901	5.569732
74.50 - 75.00	298.00 - 300.00	10.602669	4.402545	5.607490
75.00 - 75.50	300.00 - 302.00	10.674120	4.432189	5.645248
75.50 - 76.00	302.00 - 304.00	10.745571	4.461833	5.683006
76.00 - 76.50	304.00 - 306.00	10.8170		

100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400  
4500

-----  
 CALCULO COM ESPALHAMENTO  
 DIRECCION DE ONDA - 120 GRAUS  
 -----

FS	TM	ROLL	P21/3 PITCH	MOV. VERT.
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.006474	0.004922	0.006665
1.00 - 1.00	4.00 - 6.00	0.097452	0.054753	0.0066371
1.00 - 1.00	6.00 - 8.00	0.471725	0.384856	0.446899
1.00 - 1.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00	0.013562	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	6.00 - 8.00	0.160620	0.000000	0.000000
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00	0.777171	0.334054	0.736253
1.00 - 2.00	4.00 - 6.00	0.934062	0.935006	1.101796
1.00 - 2.00	6.00 - 8.00	0.019483	0.011310	0.016023
1.00 - 2.00	8.00 - 10.00	0.224143	0.125972	0.152592
1.50 - 2.00	4.00 - 6.00	1.084528	0.884810	1.027428
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00	1.303467	1.304763	1.537539
1.50 - 2.00	8.00 - 10.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.00 - 2.50	4.00 - 6.00	0.287798	0.161748	0.155528
2.00 - 2.50	6.00 - 8.00	1.392531	1.136094	1.159214
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00	1.673647	1.675338	1.974196
2.50 - 3.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
2.50 - 3.00	6.00 - 8.00	0.351515	0.197558	0.239305
2.50 - 3.00	8.00 - 10.00	1.700829	1.387618	1.611280
2.50 - 3.00	10.00 - 12.00	2.044182	2.046247	2.411271
3.00 - 3.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.00 - 3.50	6.00 - 8.00	0.415265	0.233387	0.282705
3.00 - 3.50	8.00 - 10.00	2.009286	1.635273	1.903497
3.00 - 3.50	10.00 - 12.00	2.414510	2.417349	2.848572
3.50 - 4.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
3.50 - 4.00	6.00 - 8.00	2.317839	1.891005	2.155805
3.50 - 4.00	8.00 - 10.00	2.785752	2.788565	3.286009
3.50 - 4.00	10.00 - 12.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.00 - 4.50	6.00 - 8.00	2.626452	2.142788	2.488171
4.00 - 4.50	8.00 - 10.00	3.156668	3.155856	3.723533
4.00 - 4.50	10.00 - 12.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	4.00 - 6.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	6.00 - 8.00	0.000000	0.000000	0.000000
4.50 - 5.00	8.00 - 10.00	3.527635	3.521198	4.161118
4.50 - 5.00	10.00 - 12.00	0.000000	0.000000	0.000000





100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300  
4400  
4500

DIRECCION DE ONDA - 180 GRAUS

CALCULO CON ESPALFAMENTO

FS	TM	ROLL	FITCH	MOV. VERT.
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.004781	0.006151	0.006265
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.050781	0.076443	0.067365
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.274209	0.530814	0.605977
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.007876	0.010134	0.010321
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.083662	0.125941	0.143541
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.451761	0.674521	0.558352
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.541332	1.285079	1.482027
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.010591	0.014142	0.014403
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.116745	0.175748	0.200867
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.630425	1.220137	1.353182
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.773282	1.758386	2.068141
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.149905	0.225660	0.257912
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.809462	1.566361	1.738841
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.932891	2.305764	2.655488
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.183094	0.275619	0.315012
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.388674	1.913877	2.184880
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.212711	2.821132	3.243397
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.216295	0.325605	0.372142
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.167977	2.260972	2.581123
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.432645	3.332764	3.831605
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.347335	2.668175	2.977489
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.652547	3.844555	4.420005
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.526730	2.555447	3.373935
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	1.872693	4.356448	5.068518
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	0.000000	0.000000	0.000000
1.00 - 1.00	2.00 - 4.00	2.092770	4.868412	5.557112



100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300

LIFECAL CE ONLY 30 GRAUS  
RAYLEIGH

MS	TM
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00
0.50 - 1.00	4.00 - 6.00
0.50 - 1.00	6.00 - 8.00
1.00 - 1.50	8.00 - 10.00
1.00 - 1.50	10.00 - 12.00
1.00 - 1.50	12.00 - 14.00
1.50 - 2.00	14.00 - 16.00
1.50 - 2.00	16.00 - 18.00
1.50 - 2.00	18.00 - 20.00
2.00 - 2.50	20.00 - 22.00
2.00 - 2.50	22.00 - 24.00
2.00 - 2.50	24.00 - 26.00
2.50 - 3.00	26.00 - 28.00
2.50 - 3.00	28.00 - 30.00
2.50 - 3.00	30.00 - 32.00
3.00 - 3.50	32.00 - 34.00
3.00 - 3.50	34.00 - 36.00
3.00 - 3.50	36.00 - 38.00
3.50 - 4.00	38.00 - 40.00
3.50 - 4.00	40.00 - 42.00
3.50 - 4.00	42.00 - 44.00
4.00 - 4.50	44.00 - 46.00
4.00 - 4.50	46.00 - 48.00
4.00 - 4.50	48.00 - 50.00
4.50 - 5.00	50.00 - 52.00
4.50 - 5.00	52.00 - 54.00
4.50 - 5.00	54.00 - 56.00
5.00 - 5.50	56.00 - 58.00
5.00 - 5.50	58.00 - 60.00
5.00 - 5.50	60.00 - 62.00
5.50 - 6.00	62.00 - 64.00
5.50 - 6.00	64.00 - 66.00
5.50 - 6.00	66.00 - 68.00
6.00 - 6.50	68.00 - 70.00
6.00 - 6.50	70.00 - 72.00
6.00 - 6.50	72.00 - 74.00
6.50 - 7.00	74.00 - 76.00
6.50 - 7.00	76.00 - 78.00
6.50 - 7.00	78.00 - 80.00
7.00 - 7.50	80.00 - 82.00
7.00 - 7.50	82.00 - 84.00
7.00 - 7.50	84.00 - 86.00
7.50 - 8.00	86.00 - 88.00
7.50 - 8.00	88.00 - 90.00
7.50 - 8.00	90.00 - 92.00
8.00 - 8.50	92.00 - 94.00
8.00 - 8.50	94.00 - 96.00
8.00 - 8.50	96.00 - 98.00
8.50 - 9.00	98.00 - 100.00
8.50 - 9.00	100.00 - 102.00
8.50 - 9.00	102.00 - 104.00
9.00 - 9.50	104.00 - 106.00
9.00 - 9.50	106.00 - 108.00
9.00 - 9.50	108.00 - 110.00
9.50 - 10.00	110.00 - 112.00
9.50 - 10.00	112.00 - 114.00
9.50 - 10.00	114.00 - 116.00
10.00 - 10.50	116.00 - 118.00
10.00 - 10.50	118.00 - 120.00
10.00 - 10.50	120.00 - 122.00
10.50 - 11.00	122.00 - 124.00
10.50 - 11.00	124.00 - 126.00
10.50 - 11.00	126.00 - 128.00
11.00 - 11.50	128.00 - 130.00
11.00 - 11.50	130.00 - 132.00
11.00 - 11.50	132.00 - 134.00
11.50 - 12.00	134.00 - 136.00
11.50 - 12.00	136.00 - 138.00
11.50 - 12.00	138.00 - 140.00
12.00 - 12.50	140.00 - 142.00
12.00 - 12.50	142.00 - 144.00
12.00 - 12.50	144.00 - 146.00
12.50 - 13.00	146.00 - 148.00
12.50 - 13.00	148.00 - 150.00
12.50 - 13.00	150.00 - 152.00
13.00 - 13.50	152.00 - 154.00
13.00 - 13.50	154.00 - 156.00
13.00 - 13.50	156.00 - 158.00
13.50 - 14.00	158.00 - 160.00
13.50 - 14.00	160.00 - 162.00
13.50 - 14.00	162.00 - 164.00
14.00 - 14.50	164.00 - 166.00
14.00 - 14.50	166.00 - 168.00
14.00 - 14.50	168.00 - 170.00
14.50 - 15.00	170.00 - 172.00
14.50 - 15.00	172.00 - 174.00
14.50 - 15.00	174.00 - 176.00
15.00 - 15.50	176.00 - 178.00
15.00 - 15.50	178.00 - 180.00
15.00 - 15.50	180.00 - 182.00
15.50 - 16.00	182.00 - 184.00
15.50 - 16.00	184.00 - 186.00
15.50 - 16.00	186.00 - 188.00
16.00 - 16.50	188.00 - 190.00
16.00 - 16.50	190.00 - 192.00
16.00 - 16.50	192.00 - 194.00
16.50 - 17.00	194.00 - 196.00
16.50 - 17.00	196.00 - 198.00
16.50 - 17.00	198.00 - 200.00
17.00 - 17.50	200.00 - 202.00
17.00 - 17.50	202.00 - 204.00
17.00 - 17.50	204.00 - 206.00
17.50 - 18.00	206.00 - 208.00
17.50 - 18.00	208.00 - 210.00
17.50 - 18.00	210.00 - 212.00
18.00 - 18.50	212.00 - 214.00
18.00 - 18.50	214.00 - 216.00
18.00 - 18.50	216.00 - 218.00
18.50 - 19.00	218.00 - 220.00
18.50 - 19.00	220.00 - 222.00
18.50 - 19.00	222.00 - 224.00
19.00 - 19.50	224.00 - 226.00
19.00 - 19.50	226.00 - 228.00
19.00 - 19.50	228.00 - 230.00
19.50 - 20.00	230.00 - 232.00
19.50 - 20.00	232.00 - 234.00
19.50 - 20.00	234.00 - 236.00
20.00 - 20.50	236.00 - 238.00
20.00 - 20.50	238.00 - 240.00
20.00 - 20.50	240.00 - 242.00
20.50 - 21.00	242.00 - 244.00
20.50 - 21.00	244.00 - 246.00
20.50 - 21.00	246.00 - 248.00
21.00 - 21.50	248.00 - 250.00
21.00 - 21.50	250.00 - 252.00
21.00 - 21.50	252.00 - 254.00
21.50 - 22.00	254.00 - 256.00
21.50 - 22.00	256.00 - 258.00
21.50 - 22.00	258.00 - 260.00
22.00 - 22.50	260.00 - 262.00
22.00 - 22.50	262.00 - 264.00
22.00 - 22.50	264.00 - 266.00
22.50 - 23.00	266.00 - 268.00
22.50 - 23.00	268.00 - 270.00
22.50 - 23.00	270.00 - 272.00
23.00 - 23.50	272.00 - 274.00
23.00 - 23.50	274.00 - 276.00
23.00 - 23.50	276.00 - 278.00
23.50 - 24.00	278.00 - 280.00
23.50 - 24.00	280.00 - 282.00
23.50 - 24.00	282.00 - 284.00
24.00 - 24.50	284.00 - 286.00
24.00 - 24.50	286.00 - 288.00
24.00 - 24.50	288.00 - 290.00
24.50 - 25.00	290.00 - 292.00
24.50 - 25.00	292.00 - 294.00
24.50 - 25.00	294.00 - 296.00
25.00 - 25.50	296.00 - 298.00
25.00 - 25.50	298.00 - 300.00
25.00 - 25.50	300.00 - 302.00
25.50 - 26.00	302.00 - 304.00
25.50 - 26.00	304.00 - 306.00
25.50 - 26.00	306.00 - 308.00
26.00 - 26.50	308.00 - 310.00
26.00 - 26.50	310.00 - 312.00
26.00 - 26.50	312.00 - 314.00
26.50 - 27.00	314.00 - 316.00
26.50 - 27.00	316.00 - 318.00
26.50 - 27.00	318.00 - 320.00
27.00 - 27.50	320.00 - 322.00
27.00 - 27.50	322.00 - 324.00
27.00 - 27.50	324.00 - 326.00
27.50 - 28.00	326.00 - 328.00
27.50 - 28.00	328.00 - 330.00
27.50 - 28.00	330.00 - 332.00
28.00 - 28.50	332.00 - 334.00
28.00 - 28.50	334.00 - 336.00
28.00 - 28.50	336.00 - 338.00
28.50 - 29.00	338.00 - 340.00
28.50 - 29.00	340.00 - 342.00
28.50 - 29.00	342.00 - 344.00
29.00 - 29.50	344.00 - 346.00
29.00 - 29.50	346.00 - 348.00
29.00 - 29.50	348.00 - 350.00
29.50 - 30.00	350.00 - 352.00
29.50 - 30.00	352.00 - 354.00
29.50 - 30.00	354.00 - 356.00
30.00 - 30.50	356.00 - 358.00
30.00 - 30.50	358.00 - 360.00
30.00 - 30.50	360.00 - 362.00
30.50 - 31.00	362.00 - 364.00
30.50 - 31.00	364.00 - 366.00
30.50 - 31.00	366.00 - 368.00
31.00 - 31.50	368.00 - 370.00
31.00 - 31.50	370.00 - 372.00
31.00 - 31.50	372.00 - 374.00
31.50 - 32.00	374.00 - 376.00
31.50 - 32.00	376.00 - 378.00
31.50 - 32.00	378.00 - 380.00
32.00 - 32.50	380.00 - 382.00
32.00 - 32.50	382.00 - 384.00
32.00 - 32.50	384.00 - 386.00
32.50 - 33.00	386.00 - 388.00
32.50 - 33.00	388.00 - 390.00
32.50 - 33.00	390.00 - 392.00
33.00 - 33.50	392.00 - 394.00
33.00 - 33.50	394.00 - 396.00
33.00 - 33.50	396.00 - 398.00
33.50 - 34.00	398.00 - 400.00
33.50 - 34.00	400.00 - 402.00
33.50 - 34.00	402.00 - 404.00
34.00 - 34.50	404.00 - 406.00
34.00 - 34.50	406.00 - 408.00
34.00 - 34.50	408.00 - 410.00
34.50 - 35.00	410.00 - 412.00
34.50 - 35.00	412.00 - 414.00
34.50 - 35.00	414.00 - 416.00
35.00 - 35.50	416.00 - 418.00
35.00 - 35.50	418.00 - 420.00
35.00 - 35.50	420.00 - 422.00
35.50 - 36.00	422.00 - 424.00
35.50 - 36.00	424.00 - 426.00
35.50 - 36.00	426.00 - 428.00
36.00 - 36.50	428.00 - 430.00
36.00 - 36.50	430.00 - 432.00
36.00 - 36.50	432.00 - 434.00
36.50 - 37.00	434.00 - 436.00
36.50 - 37.00	436.00 - 438.00
36.50 - 37.00	438.00 - 440.00
37.00 - 37.50	440.00 - 442.00
37.00 - 37.50	442.00 - 444.00
37.00 - 37.50	444.00 - 446.00
37.50 - 38.00	446.00 - 448.00
37.50 - 38.00	448.00 - 450.00
37.50 - 38.00	450.00 - 452.00
38.00 - 38.50	452.00 - 454.00
38.00 - 38.50	454.00 - 456.00
38.00 - 38.50	456.00 - 458.00
38.50 - 39.00	458.00 - 460.00
38.50 - 39.00	460.00 - 462.00
38.50 - 39.00	462.00 - 464.00
39.00 - 39.50	464.00 - 466.00
39.00 - 39.50	466.00 - 468.00
39.00 - 39.50	468.00 - 470.00
39.50 - 40.00	470.00 - 472.00
39.50 - 40.00	472.00 - 474.00
39.50 - 40.00	474.00 - 476.00
40.00 - 40.50	476.00 - 478.00
40.00 - 40.50	478.00 - 480.00
40.00 - 40.50	480.00 - 482.00
40.50 - 41.00	482.00 - 484.00
40.50 - 41.00	484.00 - 486.00
40.50 - 41.00	486.00 - 488.00
41.00 - 41.50	488.00 - 490.00
41.00 - 41.50	490.00 - 492.00
41.00 - 41.50	492.00 - 494.00
41.50 - 42.00	494.00 - 496.00
41.50 - 42.00	496.00 - 498.00
41.50 - 42.00	498.00 - 500.00











100  
200  
300  
400  
500  
600  
700  
800  
900  
1000  
1100  
1200  
1300  
1400  
1500  
1600  
1700  
1800  
1900  
2000  
2100  
2200  
2300  
2400  
2500  
2600  
2700  
2800  
2900  
3000  
3100  
3200  
3300  
3400  
3500  
3600  
3700  
3800  
3900  
4000  
4100  
4200  
4300

DIPICAR DE ONDA 180 GRAUS

RAYLEIGH

MS	TM
0.50 - 1.00	2.00 - 4.00
1.00 - 1.50	4.00 - 6.00
1.50 - 2.00	6.00 - 8.00
2.00 - 2.50	8.00 - 10.00
2.50 - 3.00	10.00 - 12.00
3.00 - 3.50	12.00 - 14.00
3.50 - 4.00	14.00 - 16.00
4.00 - 4.50	16.00 - 18.00
4.50 - 5.00	18.00 - 20.00
5.00 - 5.50	20.00 - 22.00
5.50 - 6.00	22.00 - 24.00
6.00 - 6.50	24.00 - 26.00
6.50 - 7.00	26.00 - 28.00
7.00 - 7.50	28.00 - 30.00
7.50 - 8.00	30.00 - 32.00
8.00 - 8.50	32.00 - 34.00
8.50 - 9.00	34.00 - 36.00
9.00 - 9.50	36.00 - 38.00
9.50 - 10.00	38.00 - 40.00
10.00 - 10.50	40.00 - 42.00
10.50 - 11.00	42.00 - 44.00
11.00 - 11.50	44.00 - 46.00
11.50 - 12.00	46.00 - 48.00
12.00 - 12.50	48.00 - 50.00
12.50 - 13.00	50.00 - 52.00
13.00 - 13.50	52.00 - 54.00
13.50 - 14.00	54.00 - 56.00
14.00 - 14.50	56.00 - 58.00
14.50 - 15.00	58.00 - 60.00
15.00 - 15.50	60.00 - 62.00
15.50 - 16.00	62.00 - 64.00
16.00 - 16.50	64.00 - 66.00
16.50 - 17.00	66.00 - 68.00
17.00 - 17.50	68.00 - 70.00
17.50 - 18.00	70.00 - 72.00
18.00 - 18.50	72.00 - 74.00
18.50 - 19.00	74.00 - 76.00
19.00 - 19.50	76.00 - 78.00
19.50 - 20.00	78.00 - 80.00
20.00 - 20.50	80.00 - 82.00
20.50 - 21.00	82.00 - 84.00
21.00 - 21.50	84.00 - 86.00
21.50 - 22.00	86.00 - 88.00
22.00 - 22.50	88.00 - 90.00
22.50 - 23.00	90.00 - 92.00
23.00 - 23.50	92.00 - 94.00
23.50 - 24.00	94.00 - 96.00
24.00 - 24.50	96.00 - 98.00
24.50 - 25.00	98.00 - 100.00
25.00 - 25.50	100.00 - 102.00
25.50 - 26.00	102.00 - 104.00
26.00 - 26.50	104.00 - 106.00
26.50 - 27.00	106.00 - 108.00
27.00 - 27.50	108.00 - 110.00
27.50 - 28.00	110.00 - 112.00
28.00 - 28.50	112.00 - 114.00
28.50 - 29.00	114.00 - 116.00
29.00 - 29.50	116.00 - 118.00
29.50 - 30.00	118.00 - 120.00
30.00 - 30.50	120.00 - 122.00
30.50 - 31.00	122.00 - 124.00
31.00 - 31.50	124.00 - 126.00
31.50 - 32.00	126.00 - 128.00
32.00 - 32.50	128.00 - 130.00
32.50 - 33.00	130.00 - 132.00
33.00 - 33.50	132.00 - 134.00
33.50 - 34.00	134.00 - 136.00
34.00 - 34.50	136.00 - 138.00
34.50 - 35.00	138.00 - 140.00
35.00 - 35.50	140.00 - 142.00
35.50 - 36.00	142.00 - 144.00
36.00 - 36.50	144.00 - 146.00
36.50 - 37.00	146.00 - 148.00
37.00 - 37.50	148.00 - 150.00
37.50 - 38.00	150.00 - 152.00
38.00 - 38.50	152.00 - 154.00
38.50 - 39.00	154.00 - 156.00
39.00 - 39.50	156.00 - 158.00
39.50 - 40.00	158.00 - 160.00
40.00 - 40.50	160.00 - 162.00
40.50 - 41.00	162.00 - 164.00
41.00 - 41.50	164.00 - 166.00
41.50 - 42.00	166.00 - 168.00
42.00 - 42.50	168.00 - 170.00
42.50 - 43.00	170.00 - 172.00
43.00 - 43.50	172.00 - 174.00
43.50 - 44.00	174.00 - 176.00
44.00 - 44.50	176.00 - 178.00
44.50 - 45.00	178.00 - 180.00
45.00 - 45.50	180.00 - 182.00
45.50 - 46.00	182.00 - 184.00
46.00 - 46.50	184.00 - 186.00
46.50 - 47.00	186.00 - 188.00
47.00 - 47.50	188.00 - 190.00
47.50 - 48.00	190.00 - 192.00
48.00 - 48.50	192.00 - 194.00
48.50 - 49.00	194.00 - 196.00
49.00 - 49.50	196.00 - 198.00
49.50 - 50.00	198.00 - 200.00