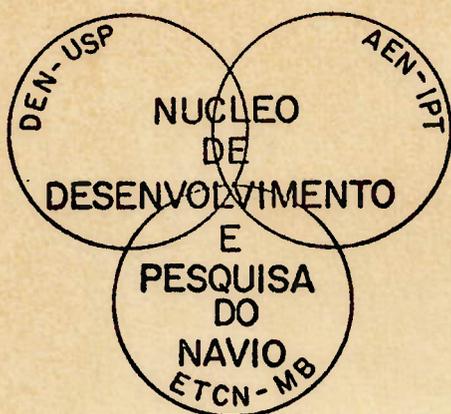


**ESTUDO DO MOMENTO FLETOR
DOS SUPER-PETROLEIROS
SOBRE ONDAS IRREGULARES**



SERGIO SIMÕES NEVES

**ORIENTADOR: PROF. CAPITÃO DE FRAGATA
ÉLCIO DE SÁ FREITAS M.Sc., Nav. Eng.**

**DISSERTAÇÃO DE Mestrado
APRESENTADA À ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

SÃO PAULO

1974

R E S U M O

Este trabalho se propõe a atingir três objetivos:

1º - Cobrir a lacuna existente entre a hidrodinâmica e a arquitetura naval, pois conforme ressalta MICHEL (8):

"Infelizmente, pouco tem sido feito para aclarar essa teoria e sua técnica de aplicação para o arquiteto naval, que normalmente, não estando engajado nessas atividades de pesquisas, não pode, por outro lado, dedicar um tempo suficiente para "escavar" essa teoria".

2º - Sair do terreno teórico, apresentando equações para a estima dos momentos fletores, partindo das dimensões principais, fatores de forma, distribuição de pesos e velocidade do navio, para um estágio preliminar de projeto e comparar os resultados com os obtidos pelo METODO DE MURRAY.

3º - Servir de ponto de partida para outras pesquisas.

A B S T R A C T

This work proposes to reach three purposes:

1º - To bridge de gap existing between the hydrodynamics and the naval architecture as according to MICHEL (8):

"Unfortunately, little has been done to bring this theory and the techniques for applying it, to clear focus, for the practicing naval architect, who is normally not engaged in such research activity and cannot, otherwise, devote sufficient time to dig the theory".

29 - To leave the theoretical field, presenting equations for estimating bending moments from, principal dimensions, form factors, weight distribution and speed for a ship in a preliminary design stage and comparing the results from this method with MURRAY'S METHOD.

39 - To be a starting point to other researches.

À Inês e ao nosso Luciano.

Aos esforços de meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Comandante ÉLCIO DE SÁ FREITAS, profes_
sor a quem devo minha carreira profissional.

Ao D.G. JENKIS from the Secretary of
Lloyd's Register of Shipping, London, sem cuja a-
juda seria impossível a realização desta disser-
tação.

Ao Engenheirando LUIZ VICTOR SEIZE, pelos
excelentes trabalhos de computação e idéias apre_
sentadas.

A elaboração desta dissertação foi realizada graças ao apoio financeiro da FAPESP.

DEFINIÇÕES

Para os efeitos do presente trabalho, adotaremos as seguintes definições:

Processo é uma operação ou evolução natural, contínua e progressiva, caracterizada por uma série gradual de mudanças, sucedendo-se uma a outra de maneira relativamente fixa e conduzindo para um particular resultado ou fim; ou uma operação contínua e progressiva que consiste de uma série de ações controladas ou movimentos dirigidos para um particular resultado ou fim.

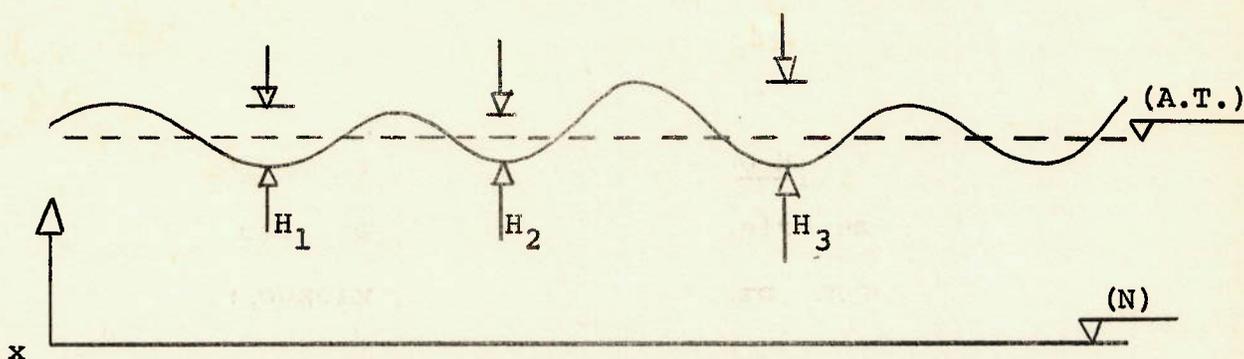
Processo aleatório é aquele que pode ser caracterizado por leis probabilísticas.

Estado de mar é definido por um determinado grupo de parâmetros estatísticos, entre os quais se destaca o valor médio quadrático $E[x]$ das elevações das ondas.

Elevação da onda (x) é a cota desta, medida em relação a um certo nível (N) paralelo à linha de águas tranquilas (A.T.) conforme nos mostra a figura abaixo.

Amplitude da onda (a) é a medida da cota da onda em relação à linha de águas tranquilas.

Altura aparente da onda (H) é a medida da crista em relação ao cavado adjacente, conforme figura abaixo.

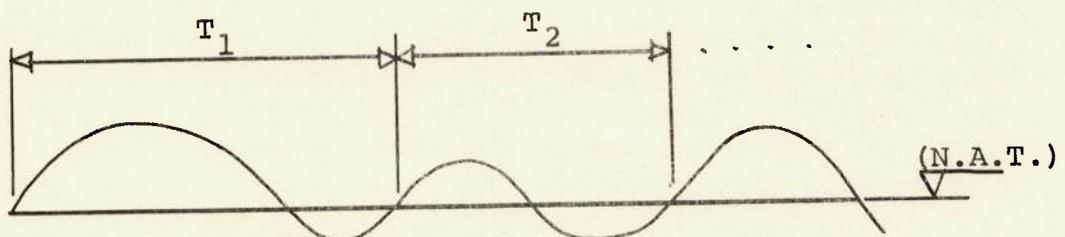


Altura significativa (H_s ou $H_{1/3}$) é definida como o valor médio do terço das maiores alturas aparentes. É interessante observar que esse parâmetro, mundialmente difundido entre os oceanógrafos, provém do fato de que psicologicamente um observador tende a negligenciar às pequenas ondas e, somente observar as maiores, quando dá avaliação das condições de onda para uma experiência.

NÚMERO DE BEAUFORT (B_n). A classificação da força do vento devido a Beaufort é inteiramente arbitrária, porém, conveniente. Ela é representada por números de 0 a 12, cada qual denota um vento, de uma particular velocidade aproximada. A escala é fornecida da tabela abaixo.

Número de Beaufort (B_n)	Velocidade do Vento (m.p.h.)
0	1
1	2
2	5
3	10
4	15
5	21
6	27
7	35
8	42
9	50
10	59
11	68
12	>75

PERÍODO MÉDIO (T_z) é definido como a média dos pseudos períodos (T_i) medidos em relação ao nível das águas tranqüilas, conforme nos mostra a figura abaixo.



SIMBOLOGIA

A relação abaixo não pretende cobrir toda a nomenclatura usada na presente dissertação. Somente nos preocuparemos com aquelas que não tivemos a oportunidade de nos referir durante a mesma.

L_p = comprimento entre perpendiculares;

L_t = comprimento total;

B = boca;

T = calado;

T_v = calado de verão;

LCB = posição longitudinal do centro de flutuação em relação ao eixo transversal passando a meio navio, em porcentagem do comprimento entre perpendiculares;

LCG = posição longitudinal do centro de gravidade do navio em relação ao eixo transversal passando a meio navio, em porcentagem do comprimento entre perpendiculares;

CB = coeficiente de bloco;

C_w = coeficiente da área de flutuação;

Δ = deslocamento;

IA = segundo momento do peso do corpo posterior do navio em relação ao eixo transversal,

passando a meio-navio;

I_F = segundo momento do peso do corpo anterior do navio em relação ao eixo transversal, passando a meio-navio;

V = velocidade do navio;

W = velocidade do vento;

F_n = número de FROUDE;

I = momento de inércia em relação aos eixos coordenados;

\vec{F} = vetor força;

\vec{M} = vetor momento;

\vec{v} = vetor velocidade;

$\vec{\omega}$ = vetor velocidade angular

m_0 = área sob o espectro quando tomamos $\frac{1}{2}$ (amplitude)²;

m_1 = primeiro momento de m_0 em relação à sua origem.

g = gravidade

ρ = densidade da água

M, M_x = momento fletor vertical da viga navio.

M_{xa} = momento fletor vertical de aquebramento da viga navio;

M_{xt} = momento fletor vertical de tosamento da viga navio;

$P(M_x)$ = probabilidade de ocorrência de um dado momento
momento fletor M_x ;

$p_x(t_1)$, $p[x]$ = função densidade de probabilidade da
variável x ;

$S(\omega)$ = função densidade de espectro da resposta;

$R(\omega)$ = função densidade de espectro da excitação;

$T(\omega)$ = função transferência do sistema;

ω = frequência angular

δ^2 = variância;

δ = desvio padrão;

W_i = probabilidade de se encontrar um mar definido pe
lo i -ésimo grupo de BEAUFORT;

$E[u]$ = variância das variáveis μ das funções excitação
ou resposta, B_n max;

$$Q[M_{xa}] = \sum_{B_n \text{ min}}^{B_n \text{ max}} W_i \exp \frac{-M_{xa}^2}{8E[M_{xa}]}$$

$$Q[M_{xt}] = \sum_{B_n \text{ min}}^{B_n \text{ max}} W_i \exp \frac{-M_{xt}^2}{8E[M_{xt}]}$$

λ = comprimento de onda.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO I - EVOLUÇÃO ESTRUTURAL DO NAVIO PETROLEIRO	
1.1 - Histórico -----	I.1
1.2 - Panorama atual para a estima do momento fletor causado pelas ondas --	I.8
 CAPÍTULO II - O MÉTODO DO ESPECTRO NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO NAVIO NO MAR	
2.1 - Introdução -----	II.1
 CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DO MAR	
3.1 - O mar como fenômeno aleatório -----	III.1
3.2 - Formulações do espectro do mar ----	III.5
3.2.1 - Formulações de NEWMAN -----	III.6
3.2.2 - Formulações de PIERSON & MOSKOWITZ -----	III.7
3.3 - Descrição através do número de BEUFORT -----	III.10
 CAPÍTULO IV - FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DO NAVIO -----	IV.1
 CAPÍTULO V - CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRO RESPOSTA ----	V.1
 CAPÍTULO VI - FORMULAÇÃO PARA O CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DA VIGA NAVIO EM ONDAS IRREGULARES EM MARES DE PROA	
6.1 - Introdução -----	VI.1
6.2 - Resumo do Trabalho de MURDEY -----	VI.3

		xiii.
		Pág.
	6.3 - Equações -----	VI.3
	6.4 - Observações -----	VI.5
CAPÍTULO VII	- CÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORES DOS SUPER PETROLEIROS PELO MÉTODO DO ESPECTRO	
	7.1 - Introdução -----	VII.1
	7.2 - Cálculo dos estados do mar -----	VII.3
	7.3 - Observações a respeito do estudo do mar descrito através do Número de BEAUFORT -----	VII.3
	7.4 - Resultados -----	VII.7
CAPÍTULO VIII	- COMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS DO MOMENTO FLE- TOR ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE MURRAY E DO ESPECTRO	
	8.1 - Cálculo pelo MÉTODO DE MURRAY ---	VIII.1
	8.2 - Nível de probabilidade para o MÉ- TODO DO ESPÉCTRO -----	VIII.2
	8.3 - Conclusões -----	VIII.6
CAPÍTULO IX	- OBSERVAÇÕES FINAIS -----	IX.1
BIBLIOGRAFIA.		
APÊNDICES I	- PROCESSOS ALEATÓRIOS	
	AI.1 - Processo aleatório estacionário-	AI.1
	AI.2 - Processo aleatório ergódico ----	AI.5
APÊNDICE II	- FUNÇÃO DENSIDADE DE ESPECTRO -----	AII.1
APÊNDICE III	- RELAÇÃO ENTRE $S(\omega)$ e $R(\omega)$ -----	AIII.1
APÊNDICE IV	- PROGRAMA ESPECTRO -----	AIV.1

CAPÍTULO IEVOLUÇÃO ESTRUTURAL DO NAVIO PETROLEIRO1.1. HISTÓRICO

De uma forma simplista, a evolução do navio petroleiro pode ser esquematizada através da figura 1-I, de tal maneira que poderemos considerar 1886 o ano um da história deste tipo de embarcação, com a construção do GLUCKAUF ②* na Inglaterra, figura 2-I.

Este protótipo foi construído de ferro e aço, de tal modo que o próprio casco já era um recipiente para a carga. Algumas de suas características principais, e que muito se aproximam dos atuais navios petroleiros, são:

19. Estrutura longitudinal;
29. Máquina a ré;
39. Uma antepara longitudinal.

Dois pontos, porém, são interessantes de serem analisados, para que possamos situar, do ponto de vista estrutural, a construção naval daquele tempo.

O primeiro refere-se ao projeto do navio de ferro

② - Os números dentro dos círculos referem-se ao índice bibliográfico.

GREAT EASTERN, lançado ao mar em Janeiro de 1858, na Inglaterra.

A importância do GREAT EASTERN, muito embora sem ter sido um sucesso comercial (3), foi sem dúvida, o bom êxito alcançado pela pesquisa científica. Seu projetista I.K. BRUNEL e seu construtor SCOTT RUSSEL foram os primeiros a aplicar a teoria de viga para o projeto do navio (4).

É interessante citar, a esta altura, que o artifício de comparar a resistência dos navios por meio de cálculo, no qual o navio é colocado estaticamente em uma onda trocoidal padrão, é frequentemente atribuído ao clássico trabalho de JOHN W. (5), publicado em 1874, onde ele atribuiu a essa onda uma altura de $L/28$.

O segundo ponto está ligado às regras para construção naval. As primeiras regras para navios de madeira foram publicadas em 1835 pelo LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING, sendo superadas pelas regras para navios de ferro em 1855, emitidas pela mesma Sociedade Classificadora. Assim, se considerarmos que somente em 1886, as regras para construção de navios de aço foram pela primeira vez completadas, e que caminharam em paralelo com as regras para navios de ferro até 1894, quando estas últimas foram "aposentadas", deveremos, então, situar o GLUCKAUF, como já dissemos acima, como um verdadeiro protótipo. Porém, as inovações trazidas por esse navio, não foram prontamente absorvidas, pois já naquela época, a construção na

val envolvia altos custos. Assim, o uso de tanques internos aos porões, para o transporte de óleo, continuava a ser adotado. A construção longitudinal era uma novidade que carecia de dados práticos, pois até então, os navios eram "inspirados" na estrutura do peixe, de tal maneira que o esquema longitudinal poderia ser considerado como uma aventura.

Um dos sistemas transversais adotado na época, pode ser visto na figura 3-I. Nesse tipo de construção as cavernas gigantes eram contínuas, com pesadas vigas horizontais colocadas entre elas. Estas vigas não tinham o propósito de colaborar com a estrutura primária, mas sim, agiam como suportes das cavernas simples, para serem descarregadas nas cavernas gigantes, mais espaçadas. A resistência primária era somente função do chapeamento.

Todavia, um notável impulso para a utilização do sistema de construção longitudinal, foi dado por JOSEPH ISHERWOOD, que também comparou o navio com uma viga e, por isso, a creditava que o melhor meio de se reforçar a viga-navio era com o uso de elementos longitudinais contínuos.

O primeiro navio petroleiro construído no SISTEMA DE ISHERWOOD foi o PAUL PAIX, lançado ao mar em 1908, com 108 m de comprimento e 6.400 tpb, cuja seção mestra pode ser observada na figura 4-I.

Conforme se pode notar, o SISTEMA DE ISHERWOOD a

bandonava as vigas transversais pouco espaçadas, compondo a estrutura transversal de pesadas vigas largamente espaçadas, por entre as quais passava longitudinalmente leves e contínuas.

Mais tarde, em 1925, o SISTEMA DE ISHERWOOD foi modificado de tal modo que a ligação longitudinal-antepara era feita sem o uso de borboletas, substituindo-as por um reforço no chapeamento, conforme figura 5-I. Com referência a esse ponto, o SEGUNDO SISTEMA DE ISHERWOOD, facilitava a construção, porém, não provia uma adequada continuidade das longitudinais.

De uma maneira geral, o SISTEMA DE ISHERWOOD, ou mais propriamente, o sistema de construção longitudinal, teve sucesso nas estruturas dos navios petroleiros, pois reforçava o casco mais eficientemente que o sistema transversal, no tocante às tensões longitudinais, principalmente, no caso de resistência a instabilidade do convés, pois, nos grandes petroleiros a compressão no convés é a situação mais comum.

Os defensores do novo sistema tiveram diversos problemas, dificultando seu desenvolvimento. A escassez de dados a respeito deste novo tipo de construção era um fato que ainda hoje seria considerado um sério obstáculo. Um outro fator levado em consideração era a dificuldade apresentada pela estiva nos navios de carga geral, devido às cavernas gigantes encontradas principalmente no SISTEMA DE ISHERWOOD, fato esse sem importância em navios de carga líquida, como no caso dos petroli

leiros.

A figura 6-I nos mostra a eliminação gradativa das pesadas cavernas e transversais.

O período que antecede a Segunda Guerra Mundial não mostrou um aumento substancial nos deslocamentos dos navios petroleiros, conforme podemos observar na figura 1-I. Isto não significa que deixou de haver um progresso na técnica da construção naval, cuja constatação, o leitor interessado poderá verificar nas referências ⑤ e ⑥.

O progresso da "tecnologia necessária de guerra" associada com estudos econômicos ditaram a necessidade de maiores navios petroleiros, que começaram com o aumento dos navios T-2

Um dos progressos mais relevantes da tecnologia naval durante a última guerra mundial foi, sem dúvida, a introdução em larga escala da soldagem, principalmente nos estaleiros norte-americanos, devido mais ao fato da variável tempo de construção do que propriamente do domínio da "nova técnica". Porém, mais uma vez, a posição conservadora foi tomada contra a idéia de se usar a solda nos grandes navios. Mas, num ponto devemos concordar com tal receio, pois, os primeiros resultados não foram muito felizes. Muito pouco se sabia a respeito dos fenômenos metalúrgicos e mecânicos que ocorrem numa estrutura soldada, que associados a uma utilização de equipamentos inadequados para a soldagem e, também, com a cooperação de uma pobreza de detalhes, pois estes eram, a princípio, mera cópia dos detalhes

rebitados resultaram em fissuras de muitos navios. Nesse particular, os famosos petroleiros T-2 e os navios da classe LIBERTY atuaram como verdadeiras cobaias.

Em 1960, os navios petroleiros já alcançavam - - 100.000 tpb, e comprimentos superiores a 270 metros, de tal modo que muitos problemas estruturais apresentaram-se ao projetista.

A previsão da resistência longitudinal, baseada nos maiores petroleiros existentes (180 a 270 metros) resultava em estruturas muito pesadas (4). Assim, novos estudos tiveram que ser realizados para que se permitissem enfrentar esse problema.

1. Tornou-se crítico o estudo do momento fletor em águas tranquilas, a fim de minimizá-lo, com uma adequada disposição de carga e lastro nos diversos tanques;
2. Novos métodos de cálculos tornaram possível a estimativa de um momento mais real, causado pelas ondas;
3. Novos sistemas de controle de corrosão foram adotados, de tal modo que se permitiu uma redução das espessuras dos elementos estruturais;
4. O uso de material de alta resistência e novas técnicas de soldagem tornaram-se comuns, resultando em estruturas mais leves;
5. Aumentou-se o comprimento permissível dos tanques;

6. Dados colhidos pelas Sociedades Classificadoras e es-
taleiros permitiram o estudo e elaboração de melho-
res detalhes estruturais, grandes causadores de rui-
nas e/ ou colapso da estrutura.

Para finalizar este item, convém citar JANZÉN & NILSSON (7) nos seus estudos baseados em dados colhidos em pe-
troleiros cuja tonelagem bruta de arqueação excedem 50.000, cor-
respondendo a navios com mais de 100.000 tpb, classificados pe-
lo Lloyd's Register of Shipping:

"Até agora, não há indicação de uma inadequada re-
sistência longitudinal, e, isto é surpreendente, pois este é
um dos fatores mais importantes na segurança total da estrutu-
ra do casco. As exigências têm, entretanto, sido conservado-
ras. Ademais, os convêses dos grandes petroleiros estão nor-
malmente em compressão e o fundo, com poucas aberturas ou des-
continuidades minimizam as concentrações de tensão".

Análises estruturais auxiliadas pelo computador e
o estudo mais detalhado das forças do mar têm estreitado a la-
cuna existente entre a atual capacidade de projeto e o desempe-
nho exigido para as embarcações.

1.2. PANORAMA ATUAL PARA A ESTIMA DO MOMENTO FLETOR CAUSADO PELAS ONDAS

Por um longo tempo, o método clássico para a estimativa do módulo de seção da viga-navio, baseado no cálculo estático, mostrou ser razoável, contribuindo para isso, boas doses de bom senso e sorte.

Para uma primeira observação, podemos notar a deficiência do processo acima, visto que tal método não leva em consideração os efeitos do movimento. Porém, com o aumento do tamanho dos navios e, conseqüentemente, com a necessidade de se pesquisar os esforços impostos ao navio pelo mar, tornou-se claro que a segurança obtida nos projetos estava relacionada ao elevado fator de segurança, que escondia o alto grau de desconhecimento e empirismo das suposições feitas. Do ponto de vista estrutural, este fator envolvia, tanto o desconhecimento com respeito ao material usado, quanto com a contribuição de cada elemento para a resistência estrutural.

Na indústria naval, os progressos têm sido possíveis graças a um gradual desenvolvimento de um navio de sucesso para outro maior. Porém, no caso dos super-petroleiros, esses progressos foram se dando sem que se pudesse colher uma experiência necessária nesse tipo de embarcação. Felizmente, do ponto de vista de projeto, o navio petroleiro permite uma extrapolação, para maiores navios, melhor do que qualquer outro tipo de navio, pois seu esquema básico não mudou, de uma maneir

ra geral, com o tamanho, desde a introdução das duas anteparas longitudinais na década de 1920.

Assim, baseados em navios anteriores e bem sucedidos, foram adotados, para o cálculo do momento fletor devido às ondas, o cálculo estático sobre uma onda trocoidal, cuja altura era a princípio $L/28$ e depois $L/20$. Contudo, já se sabia do alto grau de artificialidade contido nesta representação do mar.

Felizmente, a situação tem sido mudada nesses últimos 20 anos, com estudos mais teóricos para a análise real do mar, caracterizado não por sua regularidade, mas sim por sua confusão, de tal modo que o conceito estático envolvido tanto no tratamento da solicitação do mar, quanto da análise da resposta do navio, têm tido boa aceitação.

Essa nova técnica dá a possibilidade ao arquiteto naval de analisar cada projeto como um caso à parte, sendo, dessa maneira, um ponto importante, pois cada navio responde de maneira particular às solicitações do mar. Como exemplo, podemos citar o caso de navios de carga seca, cujos comprimentos variam entre 120 m e 180 m, e que são afetados por elevadas forças de batimento de proa ("SLAMMING"), ao passo que tal fenômeno não afeta os super-petroleiros.

O MÉTODO DO ESPECTRO para o estudo do comportamento do navio no mar é hoje bem estabelecido em suas bases teóricas, fornecendo soluções que são as de melhor confirmação,

teoricamente. Provavelmente, será aplicado futuramente, em grande extensão. Muito embora, seja sua teoria complexa, sua aplicação não apresenta qualquer dificuldade, permitindo, assim, ao arquiteto naval, uma ferramenta de pronta aplicação a fim de investigar tais problemas.

Infelizmente, como ressalta MICHEL ⑧ pouco se tem feito para se aclarar essa teoria e sua técnica de aplicação, a fim de que o arquiteto naval possa aplicá-la. Assim, o autor desta dissertação desenvolverá, em linhas gerais, essa teoria, ficando, de qualquer maneira, pontos em aberto para discussão e, servindo ao leitor interessado, de ponto de partida para novas pesquisas.

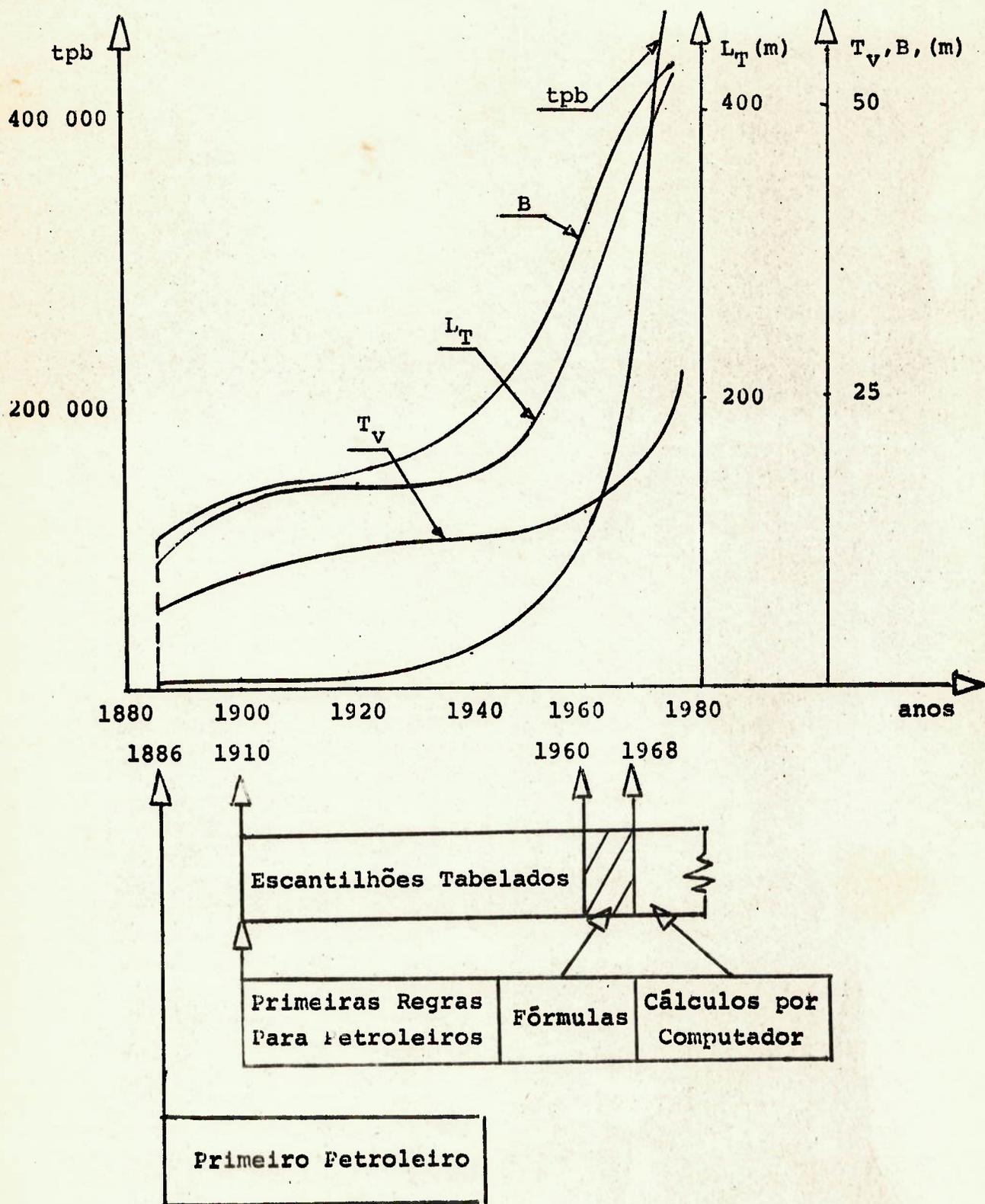


Figura 1.1 Evolução do navio petroleiro.

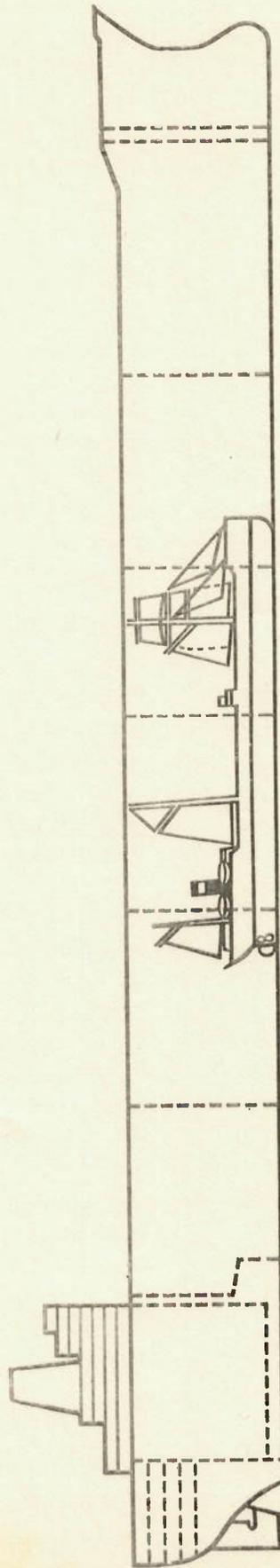
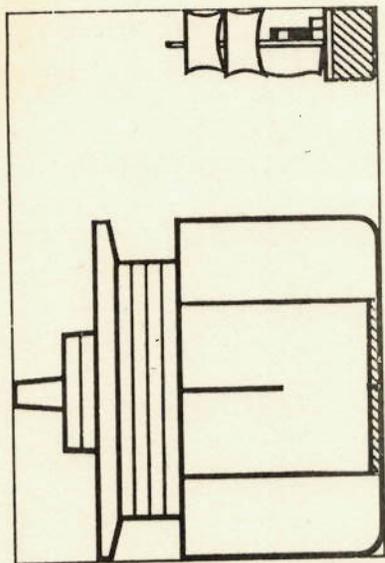


Figura 2-1. Comparação do GLUCKAUF com um super-petroleiro de 328.000 tpb.

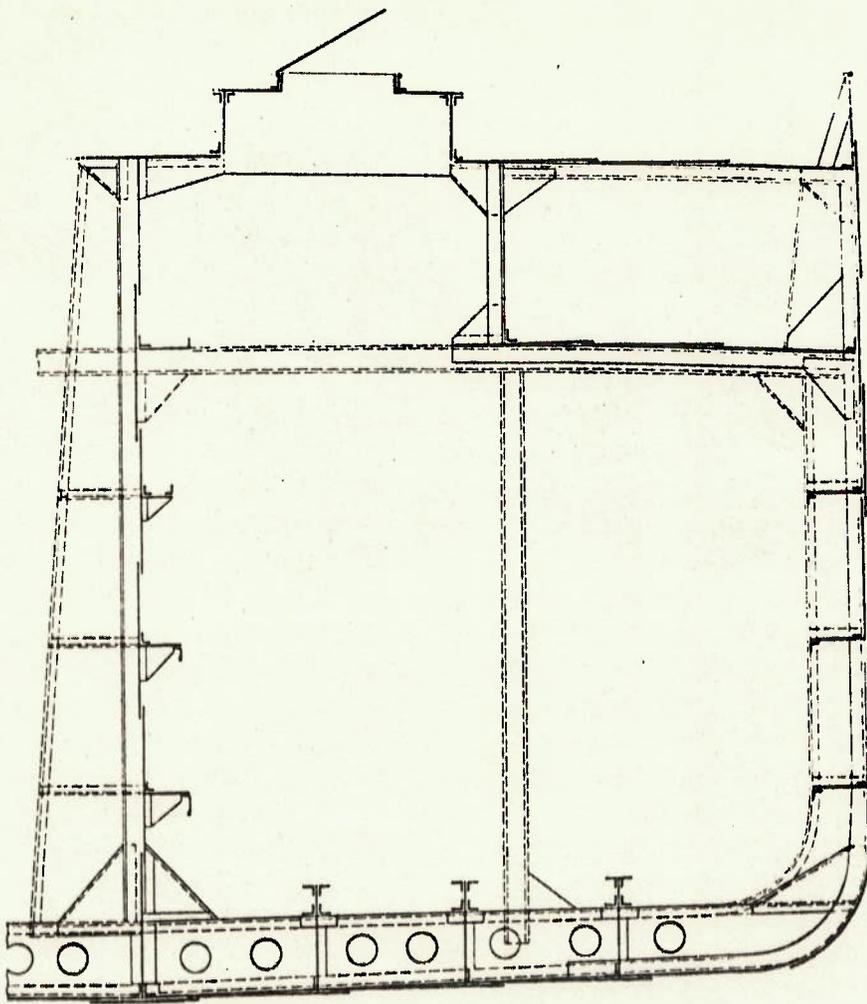


Figura 3-1. Sistema transversal adotado nos fins do século XIX

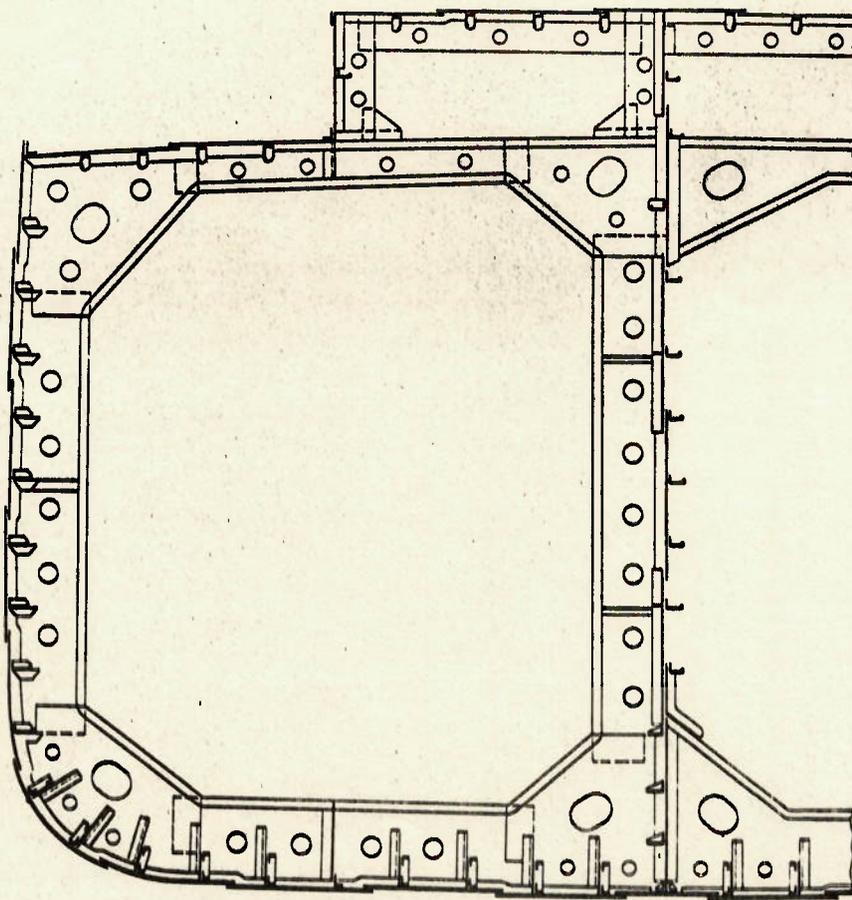


Figura 4-1. PRIMEIRO SISTEMA DE ISHERWOOD

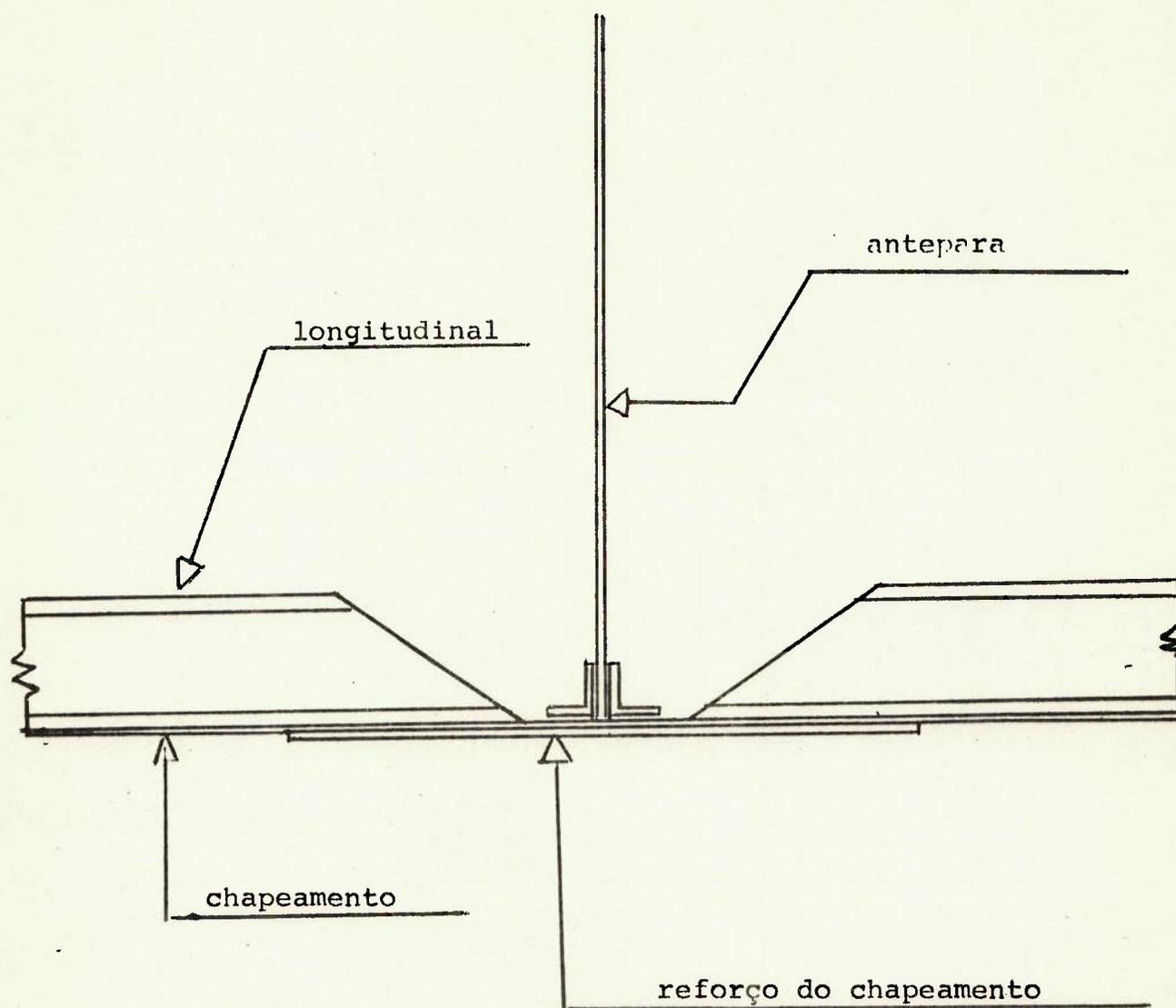


Figura 5-1. Detalhe do SEGUNDO SISTEMA DE ISHERWOOD

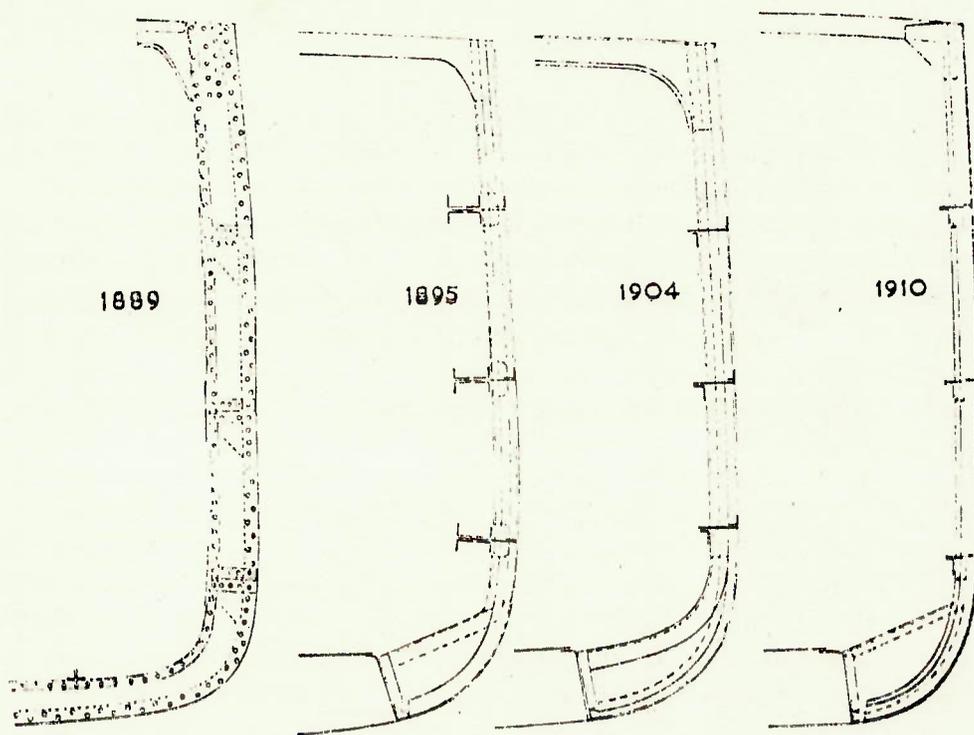


Figura 6-1. Eliminação gradativa das pesadas cavernas transversais

CAPÍTULO IIO MÉTODO DO ESPECTRONO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO NAVIO NO MAR2.1. INTRODUÇÃO

Se representarmos num gráfico, a probabilidade de ocorrência do momento fletor vertical na seção mestra de um navio, poderemos verificar que a probabilidade de ocorrência dos maiores momentos fletores (M) irá decrescendo, mas não chegará a zero.

Assim, uma boa prática seria escolher um momento fletor M_x com pequena probabilidade de ocorrência $P(M_x)$ e, então, projetar a estrutura do navio segundo esse momento fletor.

O MÉTODO DO ESPECTRO* visa este tipo de solução para o comportamento do navio no mar.

De uma maneira geral e breve, poderíamos dizer que o MÉTODO DO ESPECTRO está relacionado ao estudo de probabilidades, e nos permite olhar o mar como uma superposição aleatória linear de um número infinito de ondas senoidais, regulares e independentes, supondo-se o navio como respondendo a cada onda regular separadamente. O movimento resultante se

* - Espectro de Potência = termo eletrônico.
Espectro de Energia = termo recomendado por KROUKOVSKY
(17) para o campo naval.
Função Densidade de Espectro = termo mais conveniente.

rã a superposição das respostas, a cada onda considerada individualmente. Esta proposição foi, à princípio, apresentada por ST. DENIS & PIERSON, no seu trabalho de 1953, intitulado "ON THE MOTIONS OF SHIPS IN CONFUSED SEAS" e, desde então, estudos levados a efeito (9) têm mostrado a boa eficiência desta proposição. Contudo, é interessante observar que a linearização do problema só é admissível para mares pouco agitados e de grande profundidade. (8)

Antes de entrarmos na análise do método acima, teremos que fazer alguns estudos preliminares, constantes dos apêndices, familiarizando-nos, ao mesmo tempo, com os termos comuns encontrados em qualquer bibliografia que trata do assunto. Esses apêndices são o resumo de conceitos básicos para a aplicação do método em pauta.

Para que o MÉTODO DO ESPECTRO possa ser aplicado para o estudo do comportamento do navio no mar, deveremos desenvolver conceitos inclusos nos três itens subsequentes:

1. Descrição estatística do mar;
2. Função transferência do navio;
3. Característica do espectro resposta.

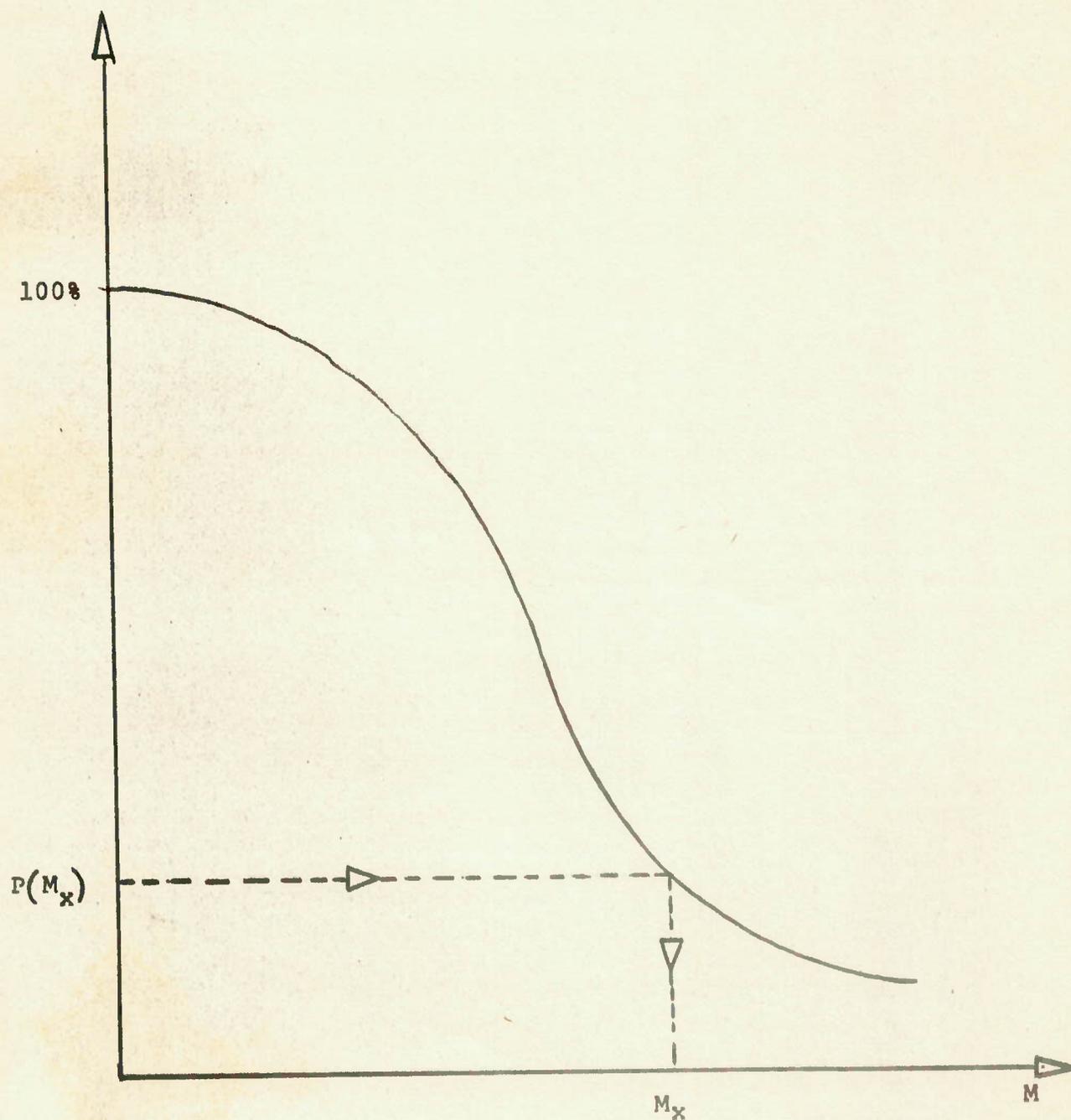


Figura 1-II. Probabilidade de ocorrência do momento fletor

CAPÍTULO IIIDESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DO MAR3.1. O MAR COMO FENÔMENO ALEATÓRIO

A superfície do mar é um exemplo de fenômeno aleatório, podendo ser tratada como um grande número de ondas regulares superpostas em fases aleatórias.

Dos dados colhidos pelos oceanógrafos, verificou-se que para um intervalo de tempo de aproximadamente 20 minutos, o processo de geração das ondas do mar pode ser considerado estacionário, de banda estreita.

Define-se processo de banda estreita como aquele cujo espectro $s(\omega)$ tem valores significativos somente numa banda de frequência $(\Delta\omega)$ de pequena largura comparada com a magnitude da frequência central da banda (ω_0) , conforme nos mostra a figura 1-III.

Convém notar que a função densidade de espectro de uma função $x(t)$ tem como unidade, o quadrado da grandeza representada por x , multiplicada por unidade de tempo. Assim, quanto menor o número de ondas regulares envolvidas, as energias estarão concentradas em poucas frequências e, desde que essas frequências estejam próximas, teremos um espectro de banda estreita.

Consideremos, então, uma amostra de um processo estacionário de banda estreita representando um estado de mar, conforme figura 2-III. Assim, verificou-se que as elevações da superfície da água seguem aproximadamente a DISTRIBUIÇÃO DE GAUSS (22). Quando essas elevações são medidas a partir de um certo nível, resultando a média igual a zero, a distribuição gaussiana é dada por

$$p[x] = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\delta^2} \right\} \quad (1-III)$$

onde

$$\delta^2 = \text{variância} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p[x] dx = E[x^2] \quad (2-III)$$

Pode ser demonstrado, teoricamente, (22) que se um processo é estacionário de banda estreita e suas elevações seguem uma distribuição gaussiana, então, as amplitudes (a_1) seguem a DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH, que é dada por

$$p[a] = \frac{a}{E} \exp \left\{ -\frac{a^2}{2E} \right\}, \quad a \geq 0 \quad (3-III)$$

onde

$$E = E[x^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p[x] dx \quad (4-III)$$

ou

$$E = \int_0^{+\infty} s^+(\omega) d\omega \quad (5-III)$$

onde

- a) $S^+(\omega)$ é medido em $\frac{1}{2}$ (amplitude)².
- b) O único parâmetro matemático que define completamente a DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH é a variável E .

Consideremos, brevemente, a validade da DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH com respeito à sua aplicação, tanto para as amplitudes, quanto para as alturas de onda. Primeiramente, as leis matemáticas são obedecidas, somente, para as amplitudes medidas em relação ao nível das águas calmas. Porém, o uso da distribuição para o caso de alturas das ondas não é, matematicamente, correta, pois, a probabilidade de uma crista estar a uma certa altura acima do nível das águas tranquilas, não está, necessariamente, associada a uma mesma probabilidade do cavado adjacente se encontrar à mesma altura em relação ao nível médio considerado. Entretanto, repetidas observações indicam que o uso incorreto da DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH, para o caso das alturas de onda, ainda nos dá bons resultados, comparados com outra qualquer distribuição (8). Assim, podemos escrever que

$$p[H] = \frac{2H}{R} \exp\left\{-\frac{H^2}{R}\right\} \quad (6-III)$$

onde

$$R = 8E \quad (7-III)$$

Um aspecto marcante nesta promissora teoria é a diversificação de formulações e simbologias usadas, Assim, é interessante vermos algumas das principais convenções usadas,

pois, em raros casos, o autor discrimina qual delas é que está em vigor, devendo o leitor, através das equações, descobrir a notação usada.

Como vimos no APÊNDICE II, o espectro do mar pode ser dado em elevações da onda ao quadrado vezes unidade de tempo versus frequência, de maneira que nas bibliografias que tratam do assunto, encontramos diversas formas de se plotar as suas ordenadas, como se segue:

$$1^{\text{a}} \quad (\text{amplitude})^2 \times \text{seg}$$

$$2^{\text{a}} \quad \frac{1}{2} (\text{amplitude})^2 \times \text{seg}$$

$$3^{\text{a}} \quad (\text{altura})^2 \times \text{seg}$$

$$4^{\text{a}} \quad 2 (\text{altura})^2 \times \text{seg}$$

Para as quatro formulações podemos escrever (8):

$$1^{\text{a}} \quad H_s = 2,83 \sqrt{A_1}$$

$$2^{\text{a}} \quad H_s = 4,00 \sqrt{A_2}$$

$$3^{\text{a}} \quad H_s = 1,414 \sqrt{A_3}$$

$$4^{\text{a}} \quad H_s = \sqrt{A_4}$$

(8-III)

onde

A_i = área sob a função densidade de espectro,
e

$$A_1 = 2A_2 = A_3/4 = A_4/8 \quad (9-III)$$

3.2. FORMULAÇÕES PARA O ESPECTRO DO MAR

Existe, atualmente, um grande número disponível de formulações para o espectro do mar. Assim, logo após o trabalho de SAINT DENIS (1953), esse assunto tem progredido de tal maneira, que um trabalho pouco recente poderá, eventualmente, ter apenas um valor histórico.

As primeiras formulações eram baseadas apenas na velocidade do vento, trazendo com isso sérias controvérsias, que ainda hoje são assunto de debates.

Para se ter uma idéia das inúmeras variáveis pertinentes à formulação de um estado de mar, poderemos citar:

- 1^a Velocidade e duração do vento;
- 2^a Área abrangida pelo vento ("FETCH");
- 3^a Marés e correntes;
- 4^a Encontro com outros trens de ondas;
- 5^a Profundidade;

Infelizmente, a maioria dos esforços para se obter formulações do espectro têm sido executados para o ATLÂNTICO NORTE, considerando o vento soprando com velocidade

constante, por um tempo ilimitado sobre uma ilimitada distância ("FULLY DEVELOPED SEA CONDITION").

Citaremos algumas formulações do espectro do mar, para que possamos ter uma idéia dos parâmetros usados.

3.2.1 - FORMULAÇÃO DE NEUMANN

A clássica formulação de NEUMANN (1953), em termos de $2(\text{altura})^2 \times \text{seg}$, considerava

$$S^+(\omega) = 400 \omega^{-6} e^{725 W^{-2}} \omega^{-2} \quad (10\text{-III})$$

com $A_4 = 1,9W^5/10^5 \quad (11\text{-III})$

onde $S(\omega)^+ = \text{dado em pés}^2 \times \text{seg}$

$W = \text{velocidade do vento em nós}$

$\omega = \text{frequência angular em radianos por segundo.}$

Essa primeira formulação de NEUMANN foi modificada, pois estudos e observações revelaram discrepâncias superestimando a energia do mar. Assim, com o aparecimento de novas formulações, ela foi abandonada.

3.2.2 - FORMULAÇÃO DE PIERSON & MOSKOWITZ

Essa nova formulação, apresentada em 1964, baseou-se em extensa coleta de dados, sendo ainda hoje aceita por boa parte de pesquisadores.

Suas equações em termos de z (altura) 2 x seg são:

$$S^+(\omega) = 135 \omega^{-5} e^{9,7 \times 10^{-4} W^4 \omega^4} \quad (14-III)$$

com

$$A_4 = 3,5 V^4 / 10^4 \quad (15-III)$$

onde

$$S^+(\omega) = \text{dado em pés}^2 \times \text{seg}$$

$$W = \text{velocidade do vento em nós}$$

$$\omega = \text{frequência angular em radianos por segundo.}$$

A formulação de PIERSON & MOSKOWITZ foi determinada considerando-se, entre outros fatores, a velocidade do vento a 64 pés (18,2m) acima do nível do mar, ao passo que as anteriores tomavam a velocidade do vento a uma altura que variava de 6 a 10 metros do nível do mar.

Um ponto marcante na apresentação de novas formulações para o espectro do mar são as INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE (I.T.T.C.) que ocorrem anualmente.

Podemos, por exemplo, citar a 13^a I.T.T.C. realizada em HAMBURGO (1972), onde, na parte da formulação do espectro do mar, diz-se:

"Quando informações sobre um típico espectro do mar não forem disponíveis, é recomendado o uso da seguinte formulação ^(*), como padrão:

$$S^+(\omega) = A\omega^5 e^{-B\omega^4} \quad (16-III)$$

onde

ω = frequência angular em radianos por segundo

A e B = constantes a serem determinadas pelas seguintes considerações:

a) Se somente a única informação disponível é a altura significativa ($H_{1/3}$), então:

$$A = 8,10 \times 10^{-3} g^2 \quad (17-III)$$

g = aceleração da gravidade em unidades apropriadas.

$$B = 3,11 \times 10^4 / H_{1/3}, \text{ para o sistema C.G.S.}$$

$$B = 33,56 / H_{1/3}, \text{ para o sistema ingles.}$$

^(*) em termos de $\frac{1}{2}$ (amplitude)² x seg.

b) Caso se disponha de informações estatísticas sobre as alturas e períodos significativos das ondas, então:

$$A = 173 (H_{1/3}^2) / T_1^4 \quad (18-III)$$

e

$$B = 691 / T_1^4 \quad (19-III)$$

onde

$$T_1 = 2 \text{ mo} / m_1 \quad (20-III)$$

e

$$H_{1/3} = 4,0 \sqrt{\text{mo}} \quad (21-III)$$

A Conferência ainda recomenda a seguinte relação entre velocidade do vento e altura significativa para um mar aberto, a ser usada somente quando a velocidade do vento é conhecida.

Tabela 1-III

W (nós)	H 1/3 (m)
20	3,0
30	5,2
40	8,2
50	11,5
60	19,6

Podemos notar, que o estado do mar pode ser definido por dois processos:

- 1º) Descrição através da velocidade do vento;
- 2º) Descrição baseada em alturas e períodos significativos.

É interessante observar que as formulações de NEUMANN e PIERSON & MOSKOWITZ estão dentro do primeiro caso, enquanto que a proposição da 13^a I.T.T.C. engloba ambos os casos.

3.3. DESCRIÇÃO ATRAVÉS DO NÚMERO DE BEAUFORT

Consideremos, agora, o caso particular em que o mar é descrito através da velocidade do vento, ou NÚMERO DE BEAUFORT.

Uma relação única entre velocidade do vento e o estado do mar, representado pelo parâmetro E da distribuição DE RAYLEIGH, é muito difícil de ser conseguida, pois o "desenvolvimento" de um estado de mar para uma velocidade constante de vento, depende, como vimos anteriormente, de muitas outras variáveis. Assim, se plotarmos num gráfico os valores de E para os estados de mar correspondentes a

uma dada velocidade de vento, verificamos que a distribuição do parâmetro E , que os define, é normal, isto é:

$$p [E_i] = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{E_i - \mu}{\delta} \right)^2 \right\} \quad (22-III)$$

com

$$\begin{aligned} \mu &= \text{média dos } E_i \\ \delta^2 &= \text{variância dos } E_i \end{aligned}$$

Tal fato esquematiza-se na figura 4-III.

Concluindo, o estudo probabilístico do mar é feito tendo como base a seguinte idealização:

- 1^a As amostras de elevação do mar, para intervalos de 20 minutos, aproximadamente, constitue um processo estacionário de banda relativamente estreita, em que as elevações seguem uma distribuição normal de média zero.
- 2^a As amplitudes máximas de uma qualquer das amostras segue a DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH:

$$p [a] = \frac{a}{E} \exp - \left\{ \frac{a^2}{2E} \right\} \quad (23-III)$$

onde

E = valor médio quadrático das elevações, no conjunto de amostras, num instante t qualquer.

3ª Para cada velocidade do vento, o valor do parâmetro E acima segue uma distribuição normal.

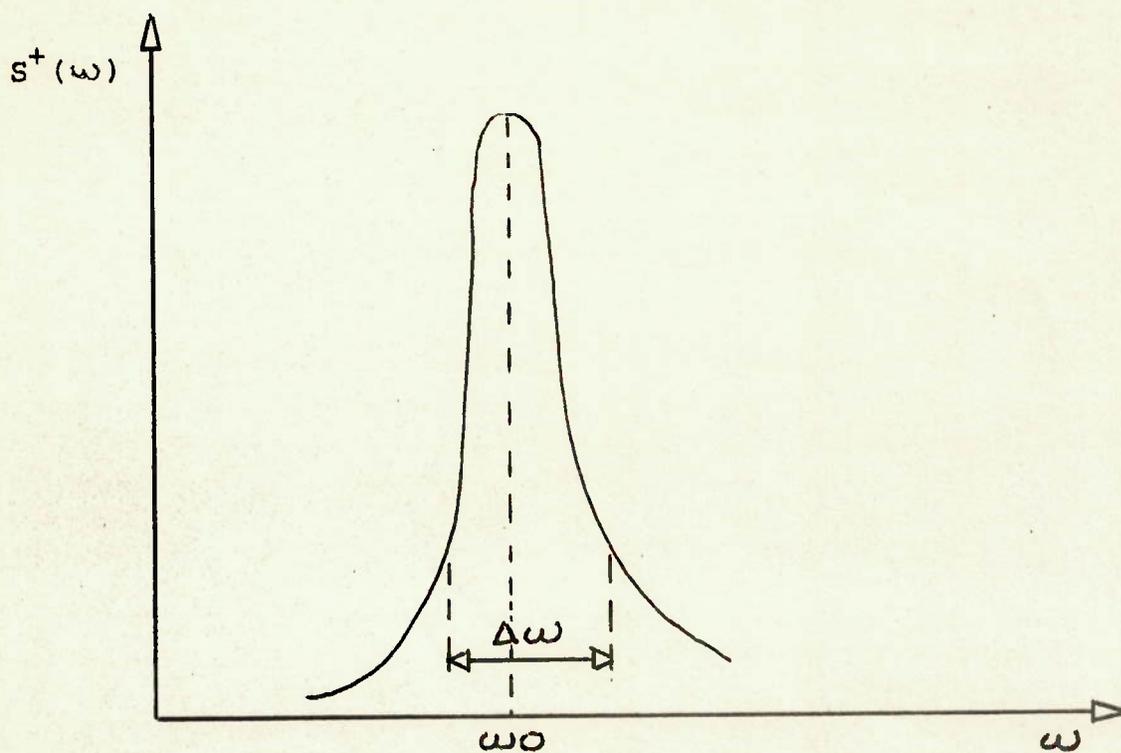


Figura 1-III. Exemplo de espectro de banda estreita.

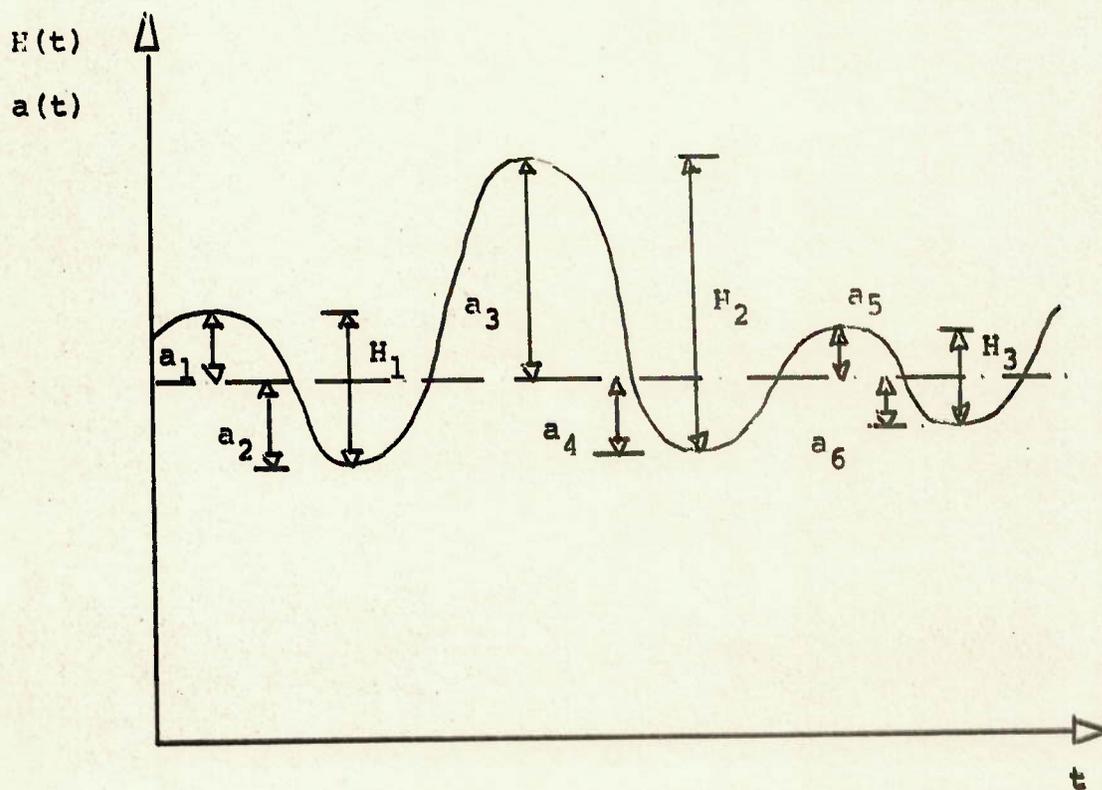


Figura 2.III. Amostra de um processo aleatório de banda estreita.

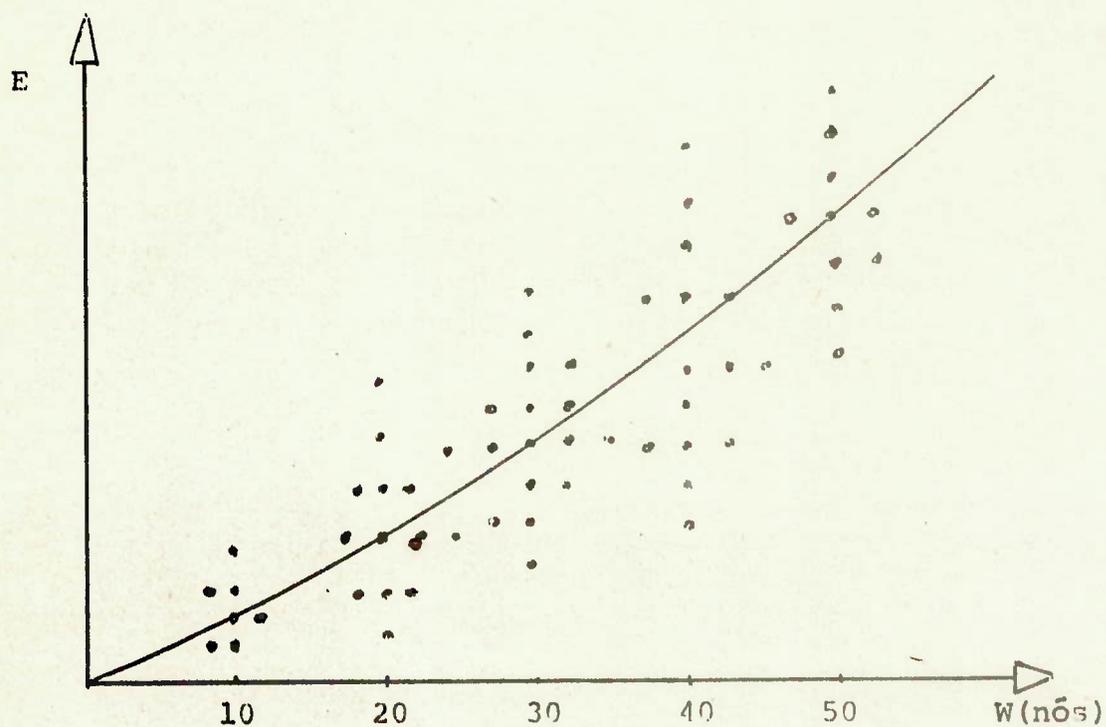


Figura 3.III. Valores de E encontrados para cada estado de mar definido pela velocidade do vento.

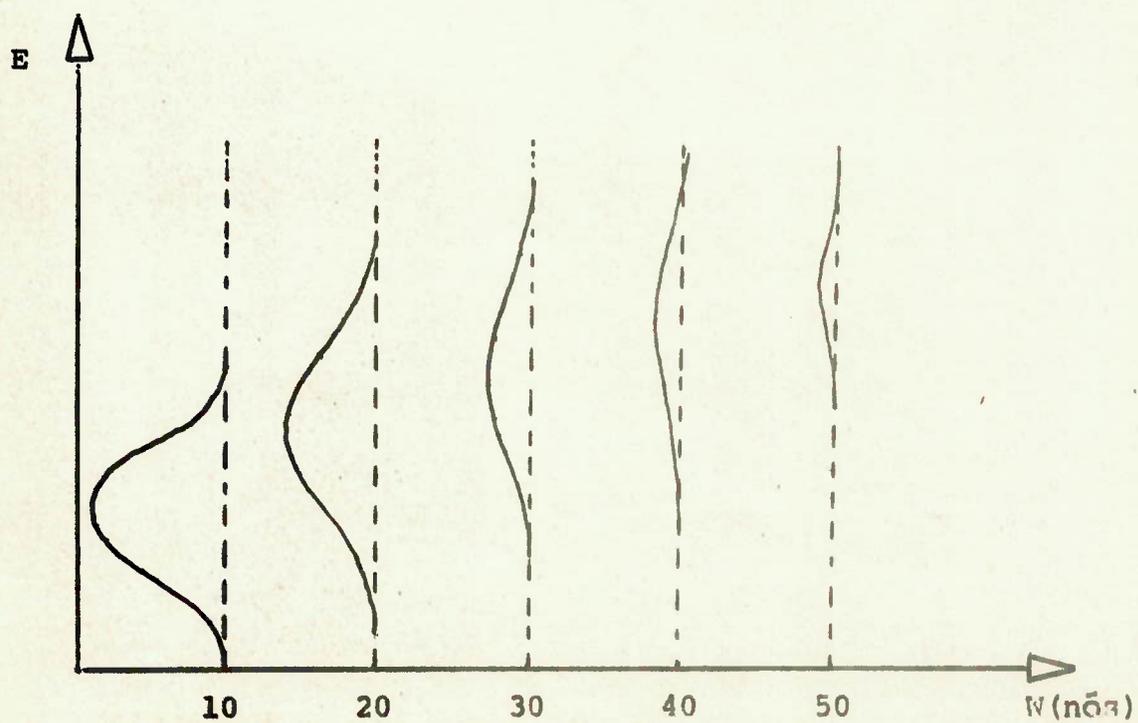


Figura 4.III. Distribuição dos E_1 para cada estado de mar definido pela velocidade do vento.

CAPÍTULO IVFUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DO NAVIO

Consideremos o sistema da figura 1-IV que será submetido a uma excitação representada pela função

$$\{x(t), -\infty < t < +\infty\} \quad (1-IV)$$

e, que dará, em consequência, uma resposta representada pela função

$$\{y(t), -\infty < t < +\infty\} \quad (2-IV)$$

O sistema será linear se a relação entre função excitação se traduz por um sistema de equações diferenciais lineares, com coeficientes constantes.

O sistema linear será invariante com o tempo - - (S.L.I.T.) se tiver a propriedade de ter como efeito único, o atraso da resposta por um tempo τ , quando a excitação é atrasada pelo mesmo tempo. Assim, para um S.L.I.T. teremos que

$$x(t) \longrightarrow y(t) \quad (3-IV)$$

$$x(t + \tau) \longrightarrow y(t + \tau) \quad (4-IV)$$

Uma importante propriedade do sistema linear é que ele segue o princípio da superposição. Por exemplo, a resposta de um sistema linear devido à aplicação simultânea de duas excitações é igual à combinação linear das respostas para cada excitação atuando separadamente.

Para um sistema linear invariante com o tempo, excitado por um sinal proveniente de um processo aleatório estacionário de banda estreita, as seguintes afirmações são verdadeiras (22) :

- a) A resposta será um processo aleatório estacionário de banda estreita;
- b) Se as elevações do sinal excitação são normalmente distribuídas, então, as elevações do sinal resposta, também, o serão.

No caso de S.L.I.T. sendo excitado por sinais aleatórios, a equação WIENER-KHINTCHINE (13) é de importância capital, pois nos fornece uma relação entre os espectros de excitação e resposta, como se segue:

$$R(\omega) = S(\omega) \cdot T(\omega)^2 \quad (5-IV)$$

onde

$R(\omega)$ = função densidade de espectro da resposta;

$S(\omega)$ = função densidade de espectro da excitação;

$T(\omega)$ = função transferência do sistema ("RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR").

A função transferência do sistema relaciona a resposta, no caso o momento fletor vertical da viga navio, por unidade de altura de onda para cada componente de frequência

ω_n . Um exemplo de um gráfico de uma função transferência po de ser observado na figura 1-IV.

No APÊNDICE II vimos que um registro de mar, com as mesmas propriedades estatísticas de n diferentes registros aleatórios estacionários, fornecia um espectro $S^+(\omega)$ em que

$$S^+(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left[\frac{a_n^2}{2} + \frac{b_n^2}{2} \right] \quad (6-IV)$$

onde a_n e b_n seriam as amplitudes dos componentes harmônicos do registro aleatório e gaussiano tomado. É necessário, então, determinar a função transferência do navio para cada u ma das componentes acima. Esta função depende de inúmeras va riáveis, tais como:

1. formas e dimensões do navio;
2. distribuição longitudinal da massa do navio;
3. razão entre os comprimentos do navio e da onda de frequência ω_n considerada;
4. velocidade do navio.

A determinação da função transferência pode ser e xecutada através de dois processos:

- 1º cálculos teóricos.
- 2º ensaios em tanque de prova.

O cálculo teórico, de maneira geral e breve, é fei

to utilizando-se as leis de NEWTON para um corpo rígido. Se a origem é tomada no centro de gravidade do corpo, então

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (m \cdot \vec{v}) \quad (7-IV)$$

e

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} (I \cdot \vec{\omega}) \quad (8-IV)$$

Essas duas equações nos dão, à princípio, três forças e três momentos nas direções ortogonais X, Y, Z, conforme nos indica a figura 2-IV. Elas são, realmente, não lineares e acopladas. Entretanto, admitindo-se algumas simplificações, pode-se linearizá-las e acoplar, apenas, as equações de afundamento ("HEAVING") e arfagem ("PITCHING"), considerando-se as demais desacopladas.

Esse tipo de solução muito embora sendo trabalhosa, nos dá resultado bem próximos aos obtidos em tanques de prova, cuja constatação o leitor interessado poderá verificar na bibliografia (15).

A determinação da função transferência por meio de ensaios em tanques de prova é mais visível ao arquiteto naval, pois no primeiro caso, certamente, ele apenas usará instruções de um vasto programa de computador, possivelmente, sem conhecer sua lógica e conteúdo.

A determinação de $T(\omega)$ em tanques de prova iniciou

se há vinte anos atrás, quando no STEVENS INSTITUTE OF TECHNOLOGY simulou-se um mar irregular artificial e, desde então, vários tanques de prova em todo o mundo equiparam-se com batedores de onda, permitindo, assim, notáveis progressos nessa técnica. Porém, muitos problemas também são encontrados nesse segundo processo:

1. O comprimento do tanque nem sempre é suficientemente grande para que possamos ter um número suficiente de encontros. Nesse particular, é interessante ler YAMANOUCHI (16), onde ele ressalta que a composição de várias corridas num tanque de prova não podem ser somadas para que possamos analisar um estado de mar;

2. As variáveis encontradas no mar, conforme introduzidas no CAPÍTULO III, não podem ser simuladas no tanque de provas;

3. O mar é analisado como bidimensional ("LONG CRESTED") em vez de tridimensional ("SHORT CRESTED"). Possivelmente, este fator está a favor da segurança desde que o estudo tridimensional é executado através da aplicação de um fator de dispersão (25) aplicado ao mar bidimensional, diminuindo sua energia.

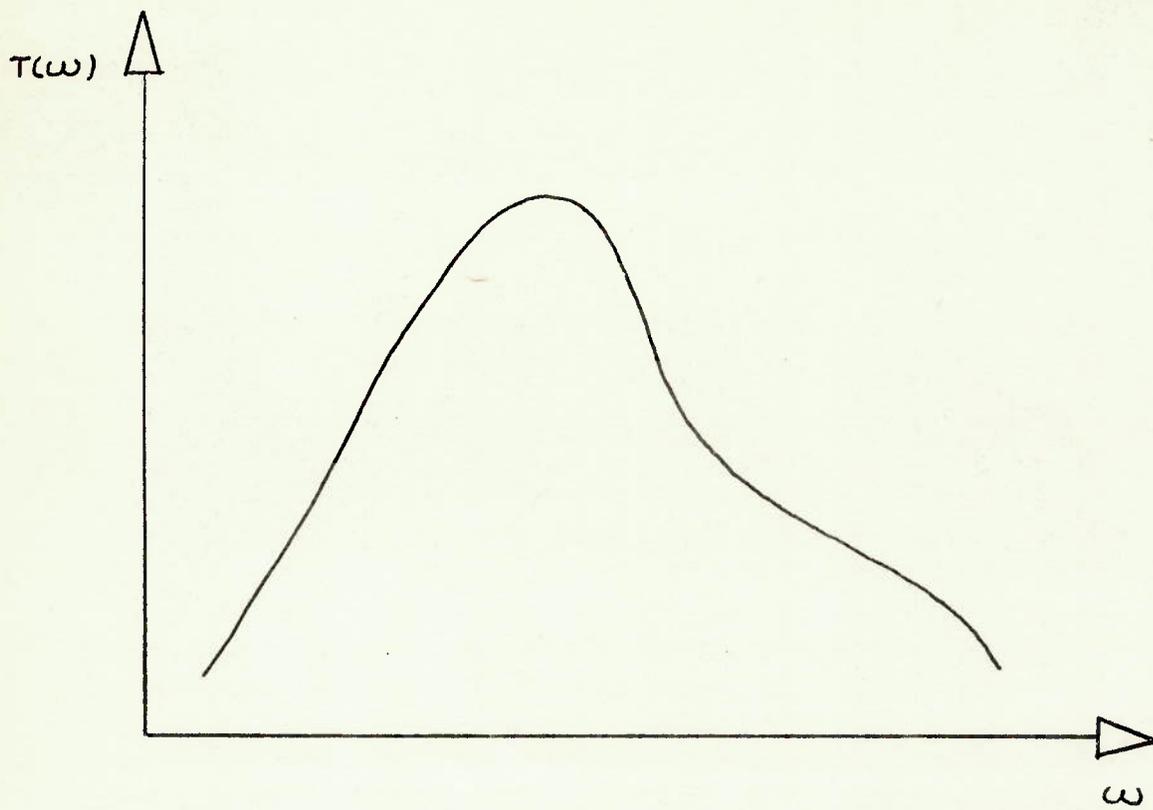


Figura 1.IV. Exemplo de função transferência.

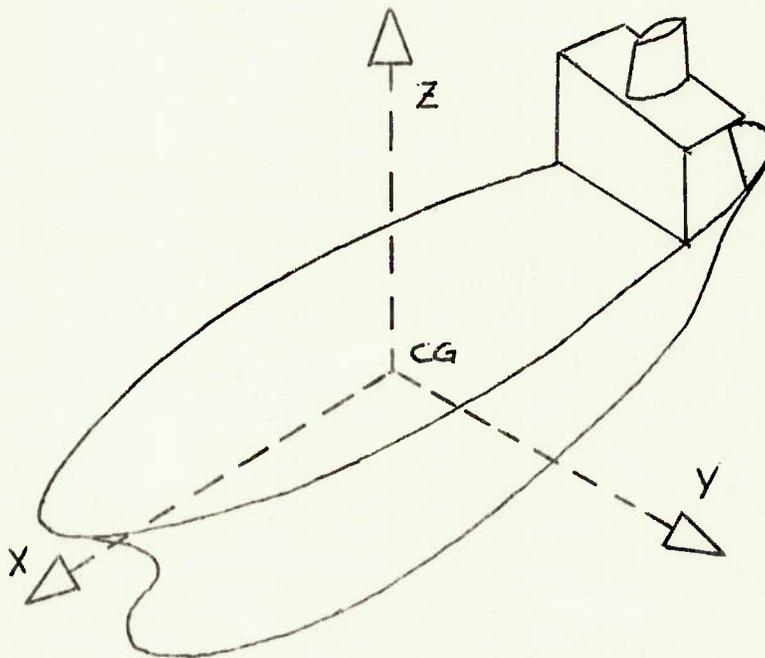


Figura 2.IV. Esquema dos eixos ortogonais X , Y , Z .

CAPÍTULO VCARACTERÍSTICA DO ESPECTRO RESPOSTA

Como vimos no CAPÍTULO II, o estudo do espectro para o comportamento do navio no mar está baseado na hipótese de SAINT DENIS, que tem sido comprovada satisfatoriamente, sofrendo desvios para mares rasos ou severos.

Consideremos, inicialmente, um navio em um mar cujo estado é definido pela distribuição de RAYLEIGH, a seguir:

$$p [a] = \frac{a}{E} \exp - \left\{ a^2/2E \right\} \quad (1-V)$$

De posse do espectro desse estado de mar e da função transferência do navio, calculamos, através da equação (5-IV), a função densidade de espectro da resposta $R(\omega)$, conforme nos indica a figura 1-V. Assim,

$$E [M_x] = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\omega) d\omega \quad (2-V)$$

Lembrando as propriedades dos sistemas lineares, podemos escrever que

$$p [M_x] = \frac{M_x}{E [M_x]} \exp - \left\{ (M_x)^2/2E [M_x] \right\} \quad (3-V)$$

Podemos, dessa maneira, calcular diversas probabi-

lidades para amostras, tais como:

- a) Probabilidade de um valor M_x cair entre os limites M_{x1} e M_{x2} .

$$P [M_{x1} \leq M_x \leq M_{x2}] = \int_{M_{x1}}^{M_{x2}} \frac{M_x}{E[M_x]} e^{-\frac{(M_x)^2}{2E[M_x]}} dx \quad (4-V)$$

- b) Probabilidade de um valor M_x ser menor ou igual a um certo valor M_{x1} :

$$P [M_x \leq M_{x1}] = 1 - e^{-\frac{(M_{x1})^2}{2E[M_x]}} \quad (5-V)$$

- c) Probabilidade de um certo valor M_x igualar ou exceder um certo valor M_{x1} :

$$P [M_x \geq M_{x1}] = e^{-\frac{(M_{x1})^2}{2E[M_x]}} \quad (6-V)$$

Neste particular, a probabilidade de se exceder um valor M_{x1} dada por N^{-1} traz que

$$P [M_x > M_{x1}] = \frac{1}{N} \quad (7-V)$$

onde

$$\frac{1}{N} = \exp - \frac{M_{x1}^2}{2E[M_x]} \quad (8-V)$$

$$M_{x1} = \sqrt{E \log_e N} \quad (9-V)$$

N = número de oscilações

Seja um grupo i da escala de BEAUFORT. Como vimos no CAPÍTULO III, nesse grupo os valores médios quadráticos $E_i[M_x]$ distribuem-se normalmente. A cada valor $E_i[M_x]$ corresponde uma densidade de probabilidade $p_i[M_x]$, que segue a distribuição de RAYLEIGH. Consequentemente, a probabilidade de se exceder uma resposta M_{x1} para o grupo i vale

$$Q_i [M_x > M_{x1}] = \int_0^{+\infty} \int_{M_{x1}}^{+\infty} p_i[M_x] p[E_i[M_x]] dx dE_i[M_x] \quad (10-V)$$

Lembrando a relação (6-V) podemos escrever (7-V) como se segue:

$$Q_i [M_x > M_{x1}] = e^{-\frac{(M_{x1})^2}{2E_i M_x}} \int_0^{+\infty} p[E_i[M_x]] dE[M_x] \quad (11-V)$$

Finalmente, levando em consideração a frequência de ocorrência de todas as condições de mar e também o caso em que um valor $E[M_x]$ ^(*) possa representar cada grupo, então, a probabilidade do momento fletor exceder M_{x1} para todos os grupos vale:

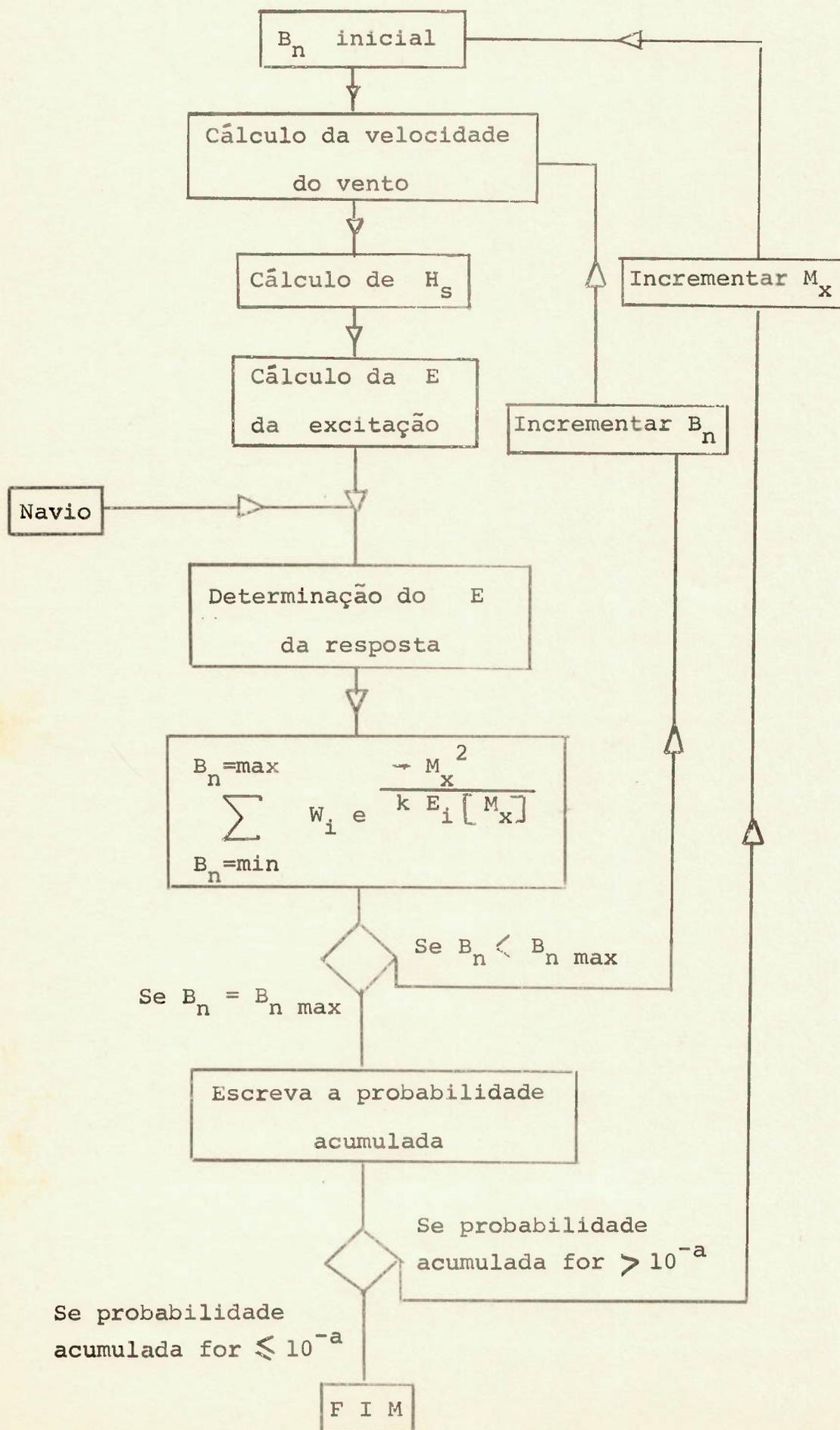
$$Q_i [M_x > M_{x1}] = \sum_{i=1}^n w_i e^{-\frac{M_{x1}^2}{2E_i[M_x]}} \quad (12-V)$$

(*) Esse valor poderia ser, por exemplo, o valor médio \bar{E}_i dentro do grupo BEAUFORT i .

onde

W_i = probabilidade de se encontrar um mar definido pelo i -ésimo grupo de BEAUFORT.

O diagrama de bloco abaixo esquematiza, de maneira geral, como se determina a probabilidade de cada resposta M_x do navio ser excedida, até um valor máximo arbitrado 10^{-a} .



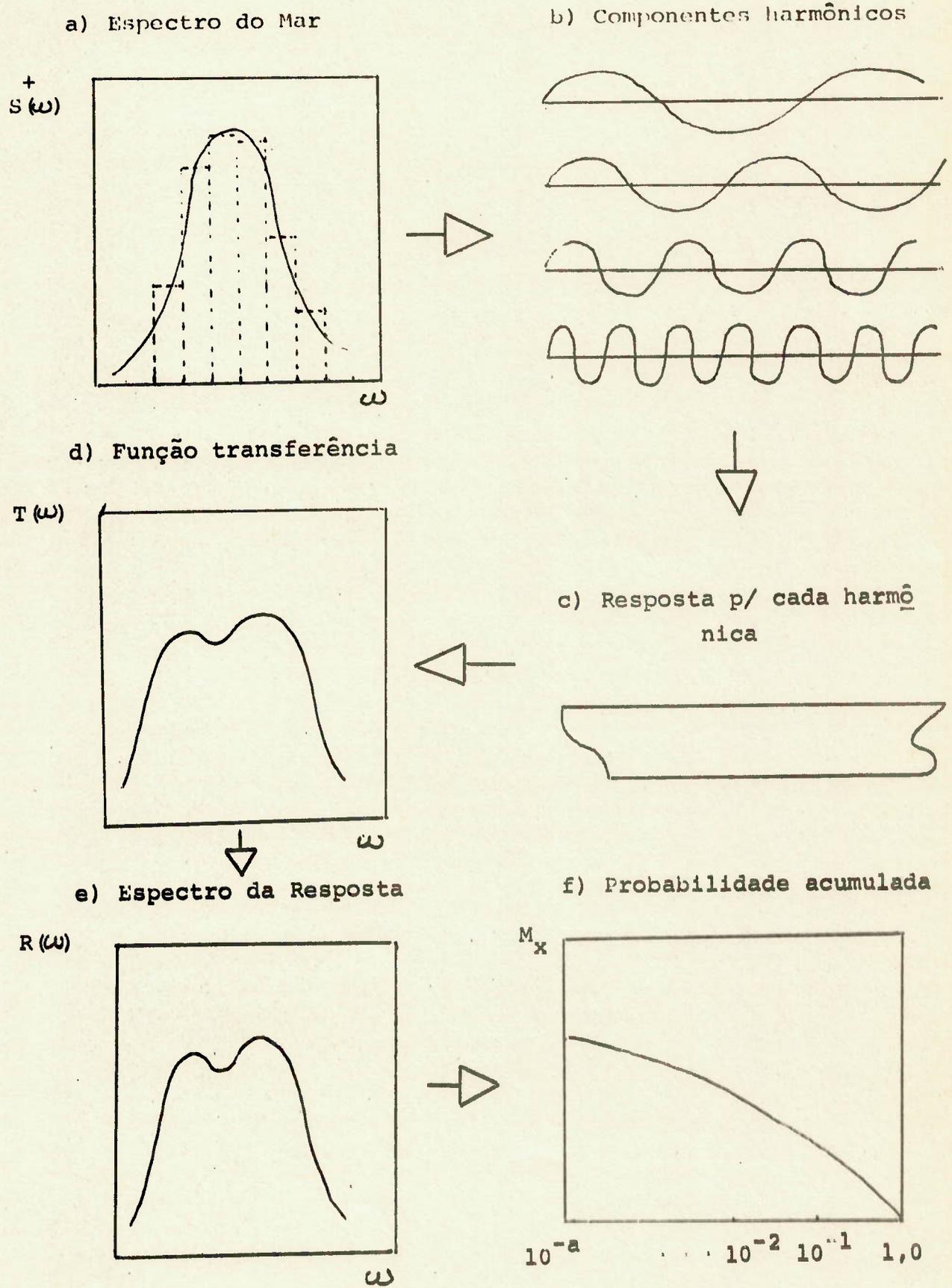


Figura 1-V. Esquematização para o cálculo da resposta.

CAPÍTULO VIFORMULAÇÃO PARA O CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DA VIGA-NAVIO EM ONDAS IRREGULARES, EM MARES DE PROA6.1. INTRODUÇÃO

Conforme tivemos a oportunidade de observar nos capítulos anteriores, a determinação do espectro da resposta de um determinado navio, sendo excitado por um certo estado de mar, necessita de duas informações:

1^a Características dos componentes de onda de diferentes frequências que "compõem" aquele estado de mar, isto é, o espectro da excitação.

2^a Resposta unitária do navio para cada componente de onda de diferente frequência, isto é, resposta por unidade de altura de onda para cada frequência, ângulo de aproamento e velocidade.

As principais fontes de informações a respeito das condições do mar são dadas através de observações efetuadas por navios oceanográficos, ou mesmo mercantes, em determinadas rotas. Veja-se "OCEAN WAVES STATISTICS (27)". As formulações dos espectros de excitação, feitas a partir dessas observações, foram abordadas no CAPÍTULO III.

A resposta do navio, por outro lado, é calculada através de teorias matemáticas ou ensaios de modelos em tanque de prova. A aproximação teórica, desenvolvida inicialmente por KORVIN-KROUKOVSKY e JACOBS (17), é conhecida como "STRIP THEORY" e fornece resultados satisfatórios apenas para os casos de arfagem ("PITCH") e afundamento ("HEAVE"). As mais importantes suposições e, conseqüentemente restrições, aplicadas a estas teorias são:

- a) a água é considerada não viscosa;
- b) a teoria é linearizada, considerando que o navio tem "pequenas perturbações" em relação à sua posição de equilíbrio.
- c) o comprimento do navio é considerado bem maior que a boca e calado, de modo que cada seção é tratada como bidimensional e que não há interação entre elas.

O cálculo da função transferência através de ensaios em tanque de prova é mais visível ao arquiteto naval que está mais interessado em aplicar diretamente a teoria do espectro, afim de determinar o comportamento de uma determinada estrutura de navio. Entretanto, convém salientar que este segundo método é demorado e caro, devido não só ao equipamento empregado, como também, à quantidade de ondas regulares a serem produzidas pelo batedor de onda.

O intuito deste capítulo é o de colocar em prática o estudo do espectro efetuado nos parágrafos anteriores,

utilizando-se resultados de séries sistemáticas de ensaios em tanques, destinadas à predição do espectro de resposta, por um procedimento semelhante aquele que o arquiteto naval usa para predizer a resistência de propulsão de seu navio. Para tanto, utilizar-se-á o trabalho de MURDEY (19).

6.2 RESUMO DO TRABALHO DE MURDEY

O estudo consta da apreciação de ensaios em tanques de prova realizados com 33 modelos, de maneira a estabelecer equações para a estima do momento fletor vertical significativo, em mares de proa, para um estágio preliminar de projeto.

Os estados de mar foram calculados baseando-se na formulação do espectro proposta na 12^a I.T.T.C., ROMA, 1969, como se segue:

$$\frac{S^+(\omega)}{H_s^2} = \frac{4\pi}{T_z^4 \omega^5} \exp \left\{ \frac{-16\pi^3}{T_z^4 \omega^4} \right\} \quad (1-VI)$$

onde

ω = frequência angular da onda (rad/seg)

T_z = período médio (seg)

H_s = altura significativa (pê)

L_p = comprimento entre perpendiculares (pê)

com os seguintes adimensionais:

$$\omega = \omega \sqrt{L_P/g} \quad (2-VI)$$

$$T_Z = T_Z \sqrt{g/L_P} \quad (3-VI)$$

Cada modelo foi testado para cada estado de mar definido pela equação (1-VI), isto é, correu-se o modelo sobre cada componente, considerando-se:

- a) onda bidimensional ("LONG CRESTED");
- b) ângulo de aproamento de 90°;
- c) velocidade constante.

Assim, para cada conjunto de estado de mar-modelo-velocidade, construiu-se uma função transferência da qual, através da equação de WIENER-KHINTCHINE, obteve-se o espectro da resposta e, com isso, o momento significativo, conforme esquematiza a figura 1-VI.

Dos resultados de ensaios de todos os modelos as equações foram estabelecidas através de regressão múltipla, ponderando-se as variáveis consideradas importantes.

6.3 EQUAÇÕES

Para facilidade de explicação, consideremos apenas uma componente regular de onda, de altura unitária, dando-nos momentos fletores conforme figura 2-VI.

O momento fletor devido à distribuição de pesos e flutuabilidade, para o modelo estacionário em águas tranquilas, será tomado como zero. O primeiro componente do momento fletor a ser considerado é aquele devido ao trem de ondas gerado quando o modelo navega em águas calmas (M_m) e, que se supõe existir quando o mesmo corre sobre as ondas. Os momentos induzidos pelas ondas são considerados em duas partes:

- a) uma componente oscilatória (M_{osc});
- b) uma componente de variação (M_v) entre o nível do momento que ocorre para o modelo correndo em águas tranquilas e o nível médio das oscilações.

Das componentes em pauta podem ser formados os seguintes adimensionais:

$$m = \frac{M_m}{\rho g L_p^3 B} \quad (4-VI)$$

$$\mu = \frac{M_o}{\rho g L_p^2 B H} \quad (5-VI)$$

$$\bar{\mu} = \frac{M_v}{\rho g L_p^2 B H} \quad (6-VI)$$

onde

m = positivo para momentos de alquebramento e negativo para momentos de tosamento;

μ = é sempre tomado positivamente,

$\bar{\mu}$ = positivo para momentos de alquebramento e negativo para momentos de tosamento

Os momentos fletores de tosamento (M_t) e alquebramento (M_a), medidos para essa onda regular em relação ao momento fletor para o modelo estacionário em águas tranqüilas, são dados em suas formas adimensionais C_t e C_a , respectivamente.

$$C_t = \frac{M_t}{\rho g L_p^2 B H} \quad (7-VI)$$

$$C_a = \frac{M_a}{\rho g L_p^2 B H} \quad (8-VI)$$

Para o cálculo dos coeficientes de (7-VI) e (8-VI), tomaremos sempre os módulos de M_t e M_a . Assim, C_t e C_a serão sempre positivos.

Da figura 2-VI podemos escrever que

$$M_o = M_{a_{MAX}} + M_{t_{MAX}} \quad (9-VI)$$

Por facilidade passamos a escrever

$$M_o = M_a + M_t \quad (10-VI)$$

e

$$M_v = \frac{M_a}{2} - \frac{M_t}{2} - M_m \quad (11-VI)$$

ou

$$\mu = C_a + C_t \quad (12-VI)$$

e

$$\bar{\mu} = \frac{C_a}{2} - \frac{C_t}{2} - \frac{mL_p}{H} \quad (13-VI)$$

Assim,

$$\frac{M_a}{\rho_g L_p^3 B} = \frac{1}{2} \mu \frac{H}{L_p} + \bar{\mu} \frac{H}{L_p} + m \quad (14-VI)$$

e

$$\frac{M_t}{\rho_g L_p^3 B} = \frac{1}{2} \mu \frac{H}{L_p} - \bar{\mu} \frac{H}{L_p} - m \quad (15-VI)$$

Lembrando que

$$a) R(\omega) = S(\omega) \{T(\omega)\}^2 ;$$

b) $T(\omega) = R.A.O. =$ função transferência do navio, que relaciona a resposta (momento fletor vertical da viga-navio) por unidade de altura de onda, para cada componente de frequência ω_n . Podemos, portanto, escrever que o momento significativo de tosamento + alquebramento, para ondas irregulares, pode ser escrito como:

$$(M_{ai} + M_{ti})s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} (M_a + M_t)^2 S(\omega) d\omega} \quad (16-VI)$$

ou

$$(M_{ai} + M_{ti})s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} (M_a + M_t)^2 S(\bar{\omega}) d\bar{\omega}} \quad (17-VI)$$

ou

$$\frac{(M_{ai} + M_{ti})s}{\rho g L^2 P B H_s} = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} \frac{(M_a + M_t)^2 S(\bar{\omega}) d\bar{\omega}}{(\rho g L^2 P B)^2 H_s^2}} \quad (18-VI)$$

Tendo em vista que M_a e M_t são respectivamente momentos de alquebramento e tosamento para onda de altura unitária, teremos, finalmente, que

$$\mu_s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} \mu^2 \frac{S(\bar{\omega}) d\bar{\omega}}{H_s^2}} \quad (19-VI)$$

Considerando que os resultados do estudo de MURDEY revelaram que o coeficiente μ é pequeno em relação ao μ (menos que 4%), então, consideraremos μ desprezível. Assim,

para mares irregulares os momentos de alquebramento (M_{ai}) e tosamento (M_{ti}) serão calculados usando-se equações similares à (14-VI) e (15-VI), como se segue:

$$\frac{(M_{ai})_s}{\rho g L_p^3 B} = \frac{1}{2} \mu_s \frac{H_s}{L_p} + m \quad (20-VI)$$

e

$$\frac{(M_{ti})_s}{\rho g L_p^3 B} = \frac{1}{2} \mu_s \frac{H_s}{L_p} - m \quad (21-VI)$$

As equações de m e μ_s determinadas das experiências são:

$$\begin{aligned} m = & 10^{-4} F_n^2 (116,3 CB^2 - 3,46 CBL_p/T + \\ & + 3,04 L_p/T - 20,6 C_w - 2,01 L_p/B + 0,6 LCB - \\ & - 39,5) \end{aligned} \quad (22-VI)$$

e

$$\begin{aligned} \mu_s = & 10^{-2} (A_0 + A_1 C_w + A_2 L_p/T + A_3 LCG + \\ & + A_4 IA/L_p^2 + A_5 IF/L_p^2 + A_6 F_n) \end{aligned} \quad (23-VI)$$

As constantes da equação (23-VI) são dadas pela tabela 2-VI.

6.4. OBSERVAÇÕES

- 19) No caso do mar ser agrupado segundo o NÚMERO DE BEAUFORT, o Lloyd's Register of Shipping ^(*) aconselha usar a seguinte formulação:

$$W = 2,68 B_n^{7/6} \quad (\text{nós})$$

$$H_s = 0,08 W^{1,5} + 5,0 \quad (\text{pés})$$

onde

$$T_z = 1,96 H_s^{0,5} \quad (\text{seg}) \quad , \quad (H_s \text{ em pés})$$

$$T_z = 3,55 H_s^{0,5} \quad (\text{seg}) \quad , \quad (H_s \text{ em metros})$$

- 20) A 11^a I.T.T.C. fornece uma relação entre altura significativa de onda e velocidade do vento, segundo a tabela 1-VI.

(*) = Essa formulação foi sugerida através de correspondência com o Escritório Central do Lloyd's Register, sem que houvesse referências bibliográficas.

TABELA I.VI.

Velocidade do vento (nós)	Altura significativa	
	pés	cm
20	14,5	440
30	18,5	560
40	26,5	810
50	36,0	1 100
60	48,0	1 460

- 39) No caso de se ter somente o valor de H_s , o valor de T_z pode ser estimado através da relação de SCOTT (19).

$$T_z = 3,23 \sqrt[3]{H_s} \quad (H_s \text{ em pés}) \quad (24\text{-VI})$$

$$T_z = 4,96 \sqrt[3]{H_s} \quad (H_s \text{ em metros}) \quad (25\text{-VI})$$

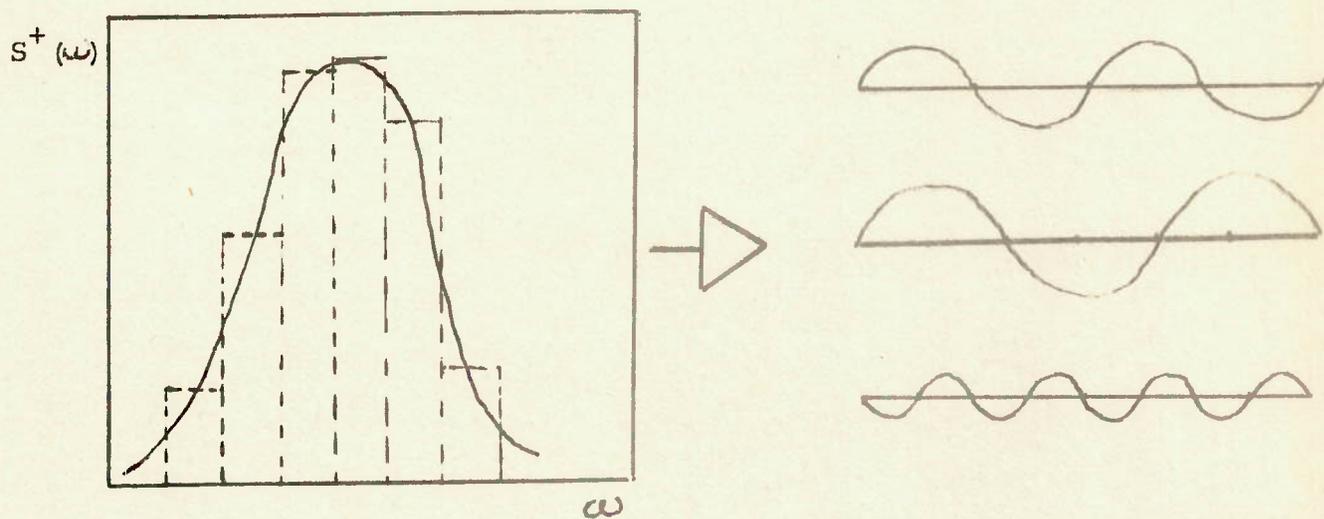
onde

T_z em segundos.

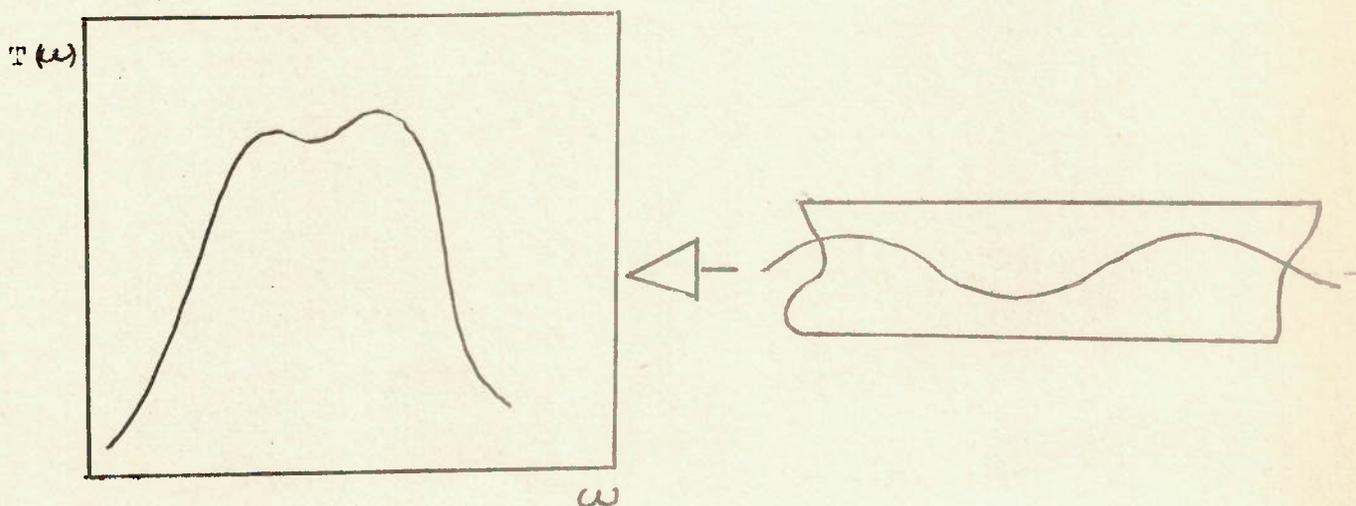
- 49) Os valores de H_s e T_z podem ser extraídos da tabela de BENNET, para o caso do Atlântico Norte (18), e que será utilizada para os cálculos do presente trabalho.

TABELA 2-VI

T_z	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0,6	0,133	-0,083	0,0005	0,0033	0,51	-2,31	-0,006
0,8	0,436	-0,269	0,0017	0,0117	1,93	-7,81	-0,022
1,0	0,815	-0,383	0,0038	0,0347	6,90	-19,31	0,058
1,2	0,684	0,189	0,0079	0,0619	14,93	-32,58	0,421
1,4	0,268	1,159	0,0125	0,0853	22,68	-46,34	0,803
1,6	-0,044	2,109	0,0130	0,1033	27,10	-59,42	1,129
1,8	-0,223	2,841	0,0099	0,1128	28,06	-68,75	1,389
2,0	-0,335	3,329	0,0060	0,1108	25,92	-72,49	1,510
2,2	-0,401	3,602	0,0028	0,0995	21,66	-71,43	1,486
2,4	-0,434	3,714	0,0004	0,0829	16,27	-67,18	1,362
2,6	-0,442	3,719	-0,0013	0,0651	10,84	-61,54	1,190
2,8	-0,430	3,655	-0,0026	0,0473	5,55	-55,25	0,823
3,0	-0,414	3,557	-0,0035	0,0313	0,92	-49,15	0,657
3,2	-0,388	3,435	-0,0041	0,0175	-3,04	-43,53	0,512
3,4	-0,362	3,306	-0,0046	0,0055	-6,43	-38,39	0,387
3,6	-0,338	3,178	-0,0049	-0,0045	-9,20	-33,86	0,281
3,8	-0,315	3,052	-0,0051	-0,0130	-11,55	-29,83	0,190
4,0	-0,295	2,933	-0,0053	-0,0197	-13,34	-26,41	

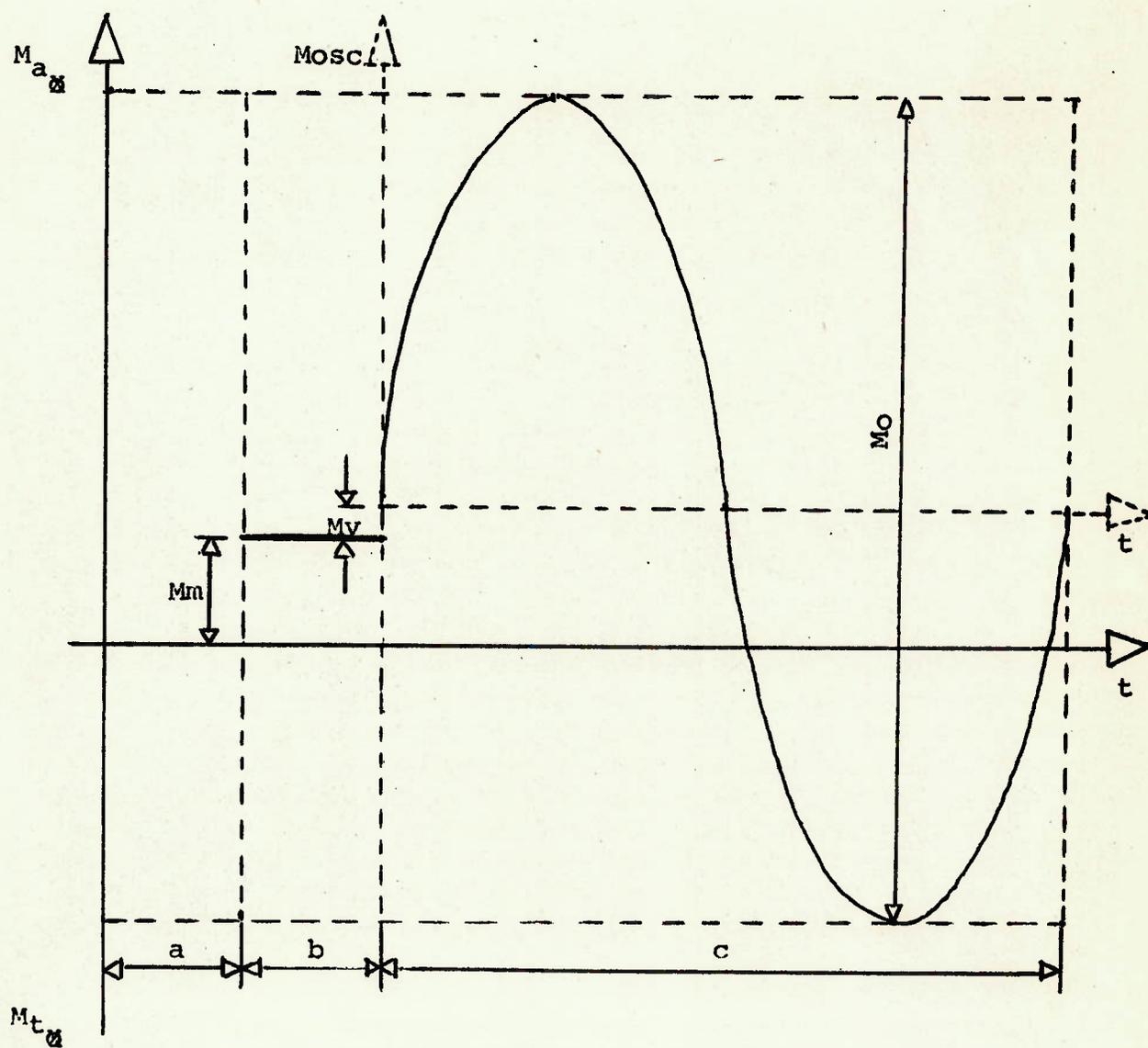


$v = \dot{V}_1$
 ângulo de aprofamento
 $\phi = 90^\circ$



$$\frac{(M_{ai} + M_{ti})s}{\rho g L^2 P B H_s} = 4,0 \sqrt{\int_0^\infty \frac{\mu^2 S(\bar{\omega}) d\bar{\omega}}{H_s^2}}$$

Figura 1-VI. Determinação de μ_s



- a = modelo parado em águas tranquilas
- b = modelo correndo em águas calmas
- c = modelo correndo sobre onda regular

Figura 2-VI. Momentos fletores para uma onda regular de altura unitária.

CAPÍTULO VIICÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORESDE SUPER-PETROLEIROSPELO MÉTODO DO ESPECTRO7.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo dos parágrafos subsequentes é o de calcular o momento fletor através do método do espectro, utilizando-se o programa de computador ESPECTRO, apresentado no VOLUME II desta dissertação, e compará-lo com o momento obtido através do MÉTODO DE MURRAY. Tendo em vista esta finalidade, através dos dados fornecidos pela Statistical Tables, 1972, do Lloyd's Register of Shipping, os superpetroleiros foram divididos em dez grupos comandados pela tonelagem bruta de arqueação (*), calculando-se, assim, as dimensões médias, conforme tabela 1-VII. Outros dados adicionais necessários para os cálculos foram determinados conforme bibliografia abaixo. Esses dados correspondem a valores médios para petroleiros de mais de 100.000 t.p.b.

$$CB = 0,80 \quad (20)$$

$$CW = 0,88 \quad (20)$$

$$LCB = 2,0\% \text{ avante de } \cancel{\times} \quad (20)$$

(*) - Uma tonelada de arqueação vale $2,83\text{m}^3$ ou 100 pés^3 .

$$IA/L^2 P_2 = 0,027 \quad (19)$$

$$IF/L^2 P = 0,032 \quad (19)$$

$$V = 16 \text{ nós} \quad (20)$$

A sequência a ser obedecida será a seguinte (para maiores detalhes referir-se ao APÊNDICE IV).

- 1) Cálculo dos estados de mar para uma determinada região de operação do navio;
- 2) Cálculo dos momentos significativos para cada estado de mar;
- 3) A partir dos momentos significativos (alquebramento + tosamento),
- 4) Através da equação

$$Q \left[M_x \geq M_{xm} \right] = \sum_{i=1}^n W_i \exp \left\{ \frac{-M_x^2 m}{8E_i} \right\} \quad (1-VII)$$

faremos um gráfico de momento fletor vertical versus probabilidade de ocorrência;

- 5) Com o parâmetro m das relações (4VI) e (22-VI) calcularemos os momentos de alquebramento e tosamento para as diversas probabilidades de ocorrência.

7.2 - CÁLCULO DOS ESTADOS DE MAR

Para o cálculo dos estados de mar usaremos a descrição segundo o NÚMERO DE BEAUFORT, ou mais propriamente, a TABELA DE BENNET, que nos fornece as probabilidades de ocorrência dos diversos estados de mar no ATLÂNTICO NORTE, conforme nos mostra a figura 1-VII. Para tanto, usaremos as relações do parágrafo 6.4, quais sejam:

$$W = 2,68 B_n^{7/6}, \text{ (velocidade do vento em nós)}$$

$$H_s = 0,08 W^{1,5} + 5,0 \text{ (pés)}$$

$$T_z = 1,96 H_s^{0,5} \text{ (seg)}, \text{ (} H_s \text{ em pés)}$$

$$T_z = 3,55 H_s^{0,5} \text{ (seg)}, \text{ (} H_s \text{ em metros)}$$

Os resultados para os seis estados de mar são fornecidos pela tabela 2-VII.

7.3 - OBSERVAÇÕES A RESPEITO, DO ESTUDO DO MAR DESCRITO ATRAVÉS DO NÚMERO DE BEAUFORT

Estudos têm sido feitos no sentido de se analisar os estados de mar em todo o globo (27). Infelizmente, porém, apenas o ATLÂNTICO NORTE e a "ROTA DOS PETROLEIROS" nas costas da ÁFRICA é que foram totalmente cobertas, conforme nos mostra a figura 1-VII. No caso do ATLÂNTICO NORTE, a distribuição dos estados de mar segundo o NÚMERO DE BEAUFORT pode ser descrito por uma NORMAL, conforme estu -

dos realizados por BENNET (24), figura 2-VII.

Consideremos, agora, para efeito de comparação, a distribuição dos períodos médios obtidos nas áreas 1, 2, 6 e 7 da figura 2-VII, com aqueles dados pela TABELA DE BENNET, usando-se as equações do parágrafo 6.4. A tabela 3-VII nos fornece os períodos médios com as respectivas probabilidades acumuladas em confronto com o estudo de BENNET dado pela tabela 3-VII. Tal comparação esquematiza-se na figura 3-VII.

TABELA 1-VII

G	TONELAGEM BRUTA DE ARQUEAÇÃO	L _t (m)	L _p (m)	B (m)	T _v	$\frac{L_p}{T_v}$	$\frac{L_p}{B}$
1	50 000 a 59 999	264	251	38,5	14,5	17,5	6,5
2	60 000 a 69 999	271	257	41,5	15,0	16,5	6,2
3	70 000 a 79 999	280	267	43,0	16,5	16,3	6,2
4	80 000 a 89 999	299	284	45,0	18,0	15,6	6,3
5	90 000 a 99 999	317	301	47,5	18,5	16,2	6,3
6	100 000 a 109 999	323	307	47,5	19,5	15,9	6,5
7	110 000 a 119 999	329	313	48,0	19,5	16,2	6,5
8	120 000 a 129 999	344	328	53,0	20,0	16,5	6,2
9	130 000 a 139 999	346	330	53,0	20,0	16,5	6,2
10	acima de 140 000	346	330	53,0	24,0	13,7	6,2

TABELA 2-VII

Número de Beaufort	B_n Médio	Probab. AC.	W (nós)	H_s (pés)	H_s (m)	T_z (seg)
0 - 2	1	28 %	2,7	5,3	1,62	4,5
2 - 4	3	32 %	9,6	7,3	2,23	5,3
4 - 6	5	25 %	17,5	10,8	3,28	6,4
6 - 8	7	12 %	25,8	15,5	4,72	7,7
8 - 10	9	2,8%	34,8	20,2	6,15	8,8
10 - 12	11	0,2%	46,0	29,6	9,02	10,7

TABELA 3-VIIOBSERVAÇÕES DAS ÁREAS 1, 2, 6 e 7

Período (seg)	Número de observações	Probabilidade acumulada
Calmo ou indeterminado	8294	0,0506
4,5	39794	0,2933
6,5	47547	0,5832
8,5	35994	0,8027
10,5	19112	0,9192
12,5	8063	0,9684
14,5	2931	0,9863
16,5	1022	0,9925
20,5	1238	1,0000

7.4 - RESULTADOS

Os cálculos serão efetuados para os dez grupos a apresentados na tabela 1-VII, cujos navios característicos receberão as seguintes denominações: N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , N_5 , N_6 , N_7 , N_8 , N_9 e N_{10} .

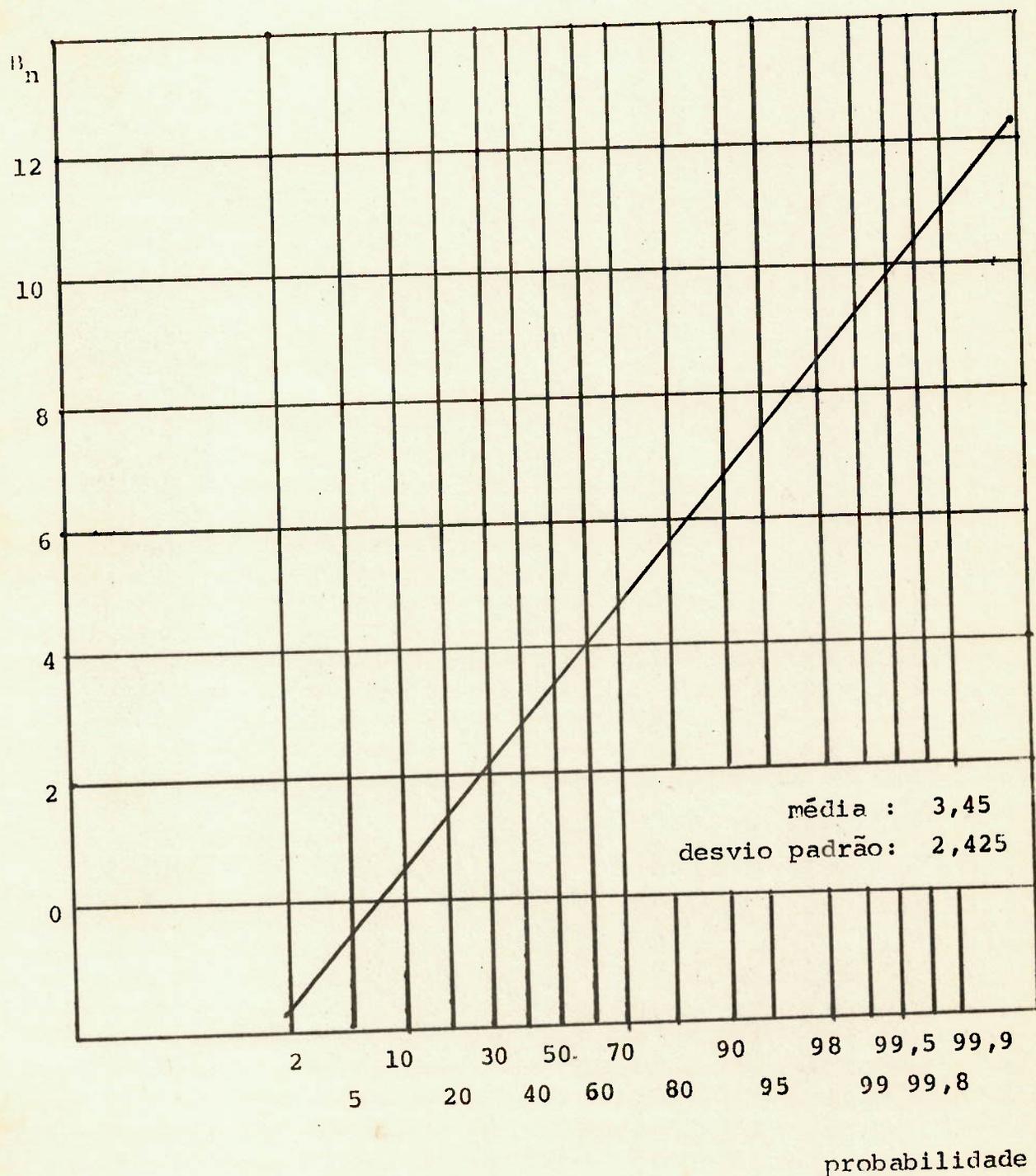


Figura 1-VII - Distribuição normal do NÚMERO DE BEAUFORT para o ATLÂNTICO NORTE.

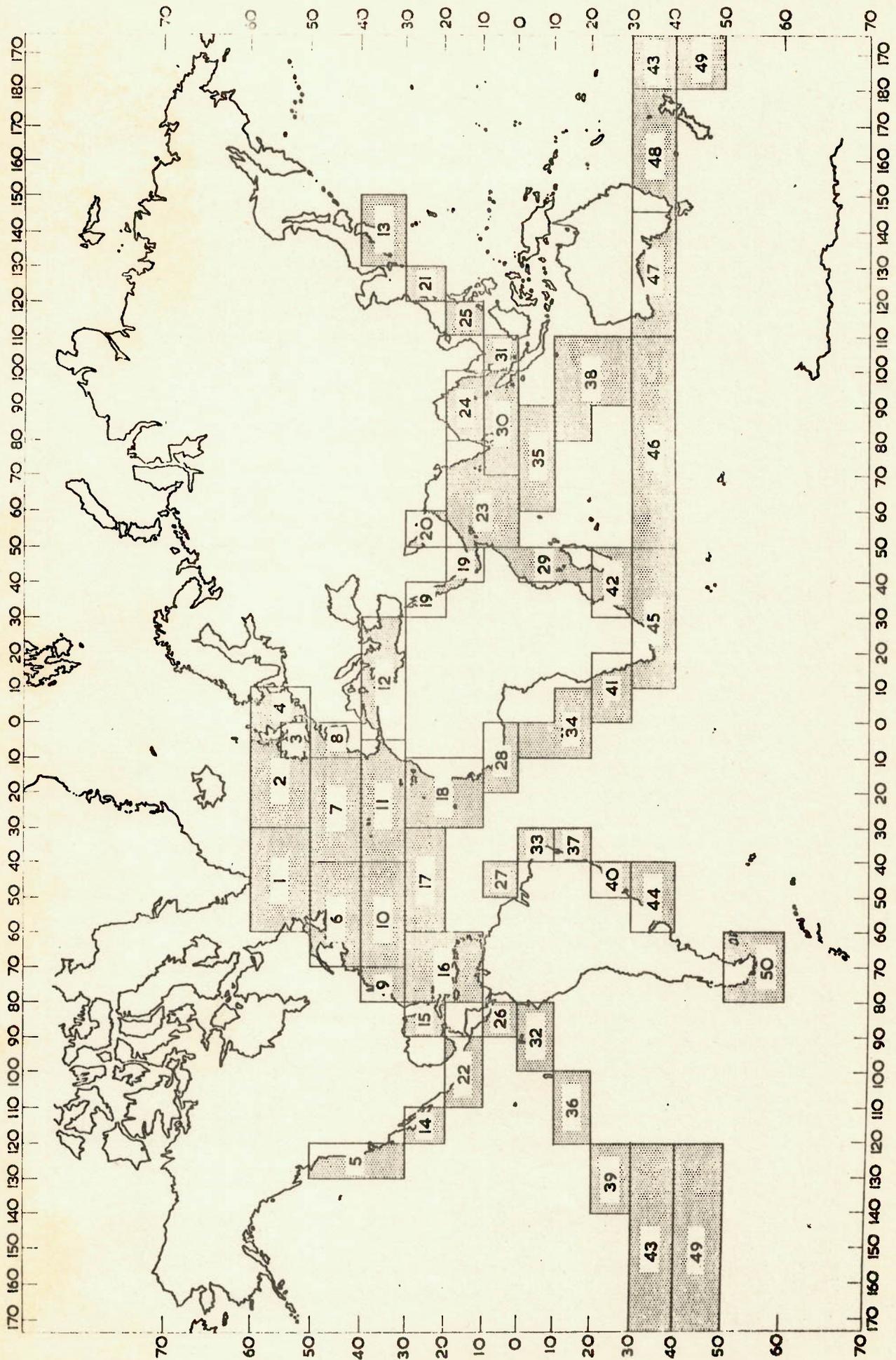


Figura 2-VII - Áreas estudadas pela Referência 27 .

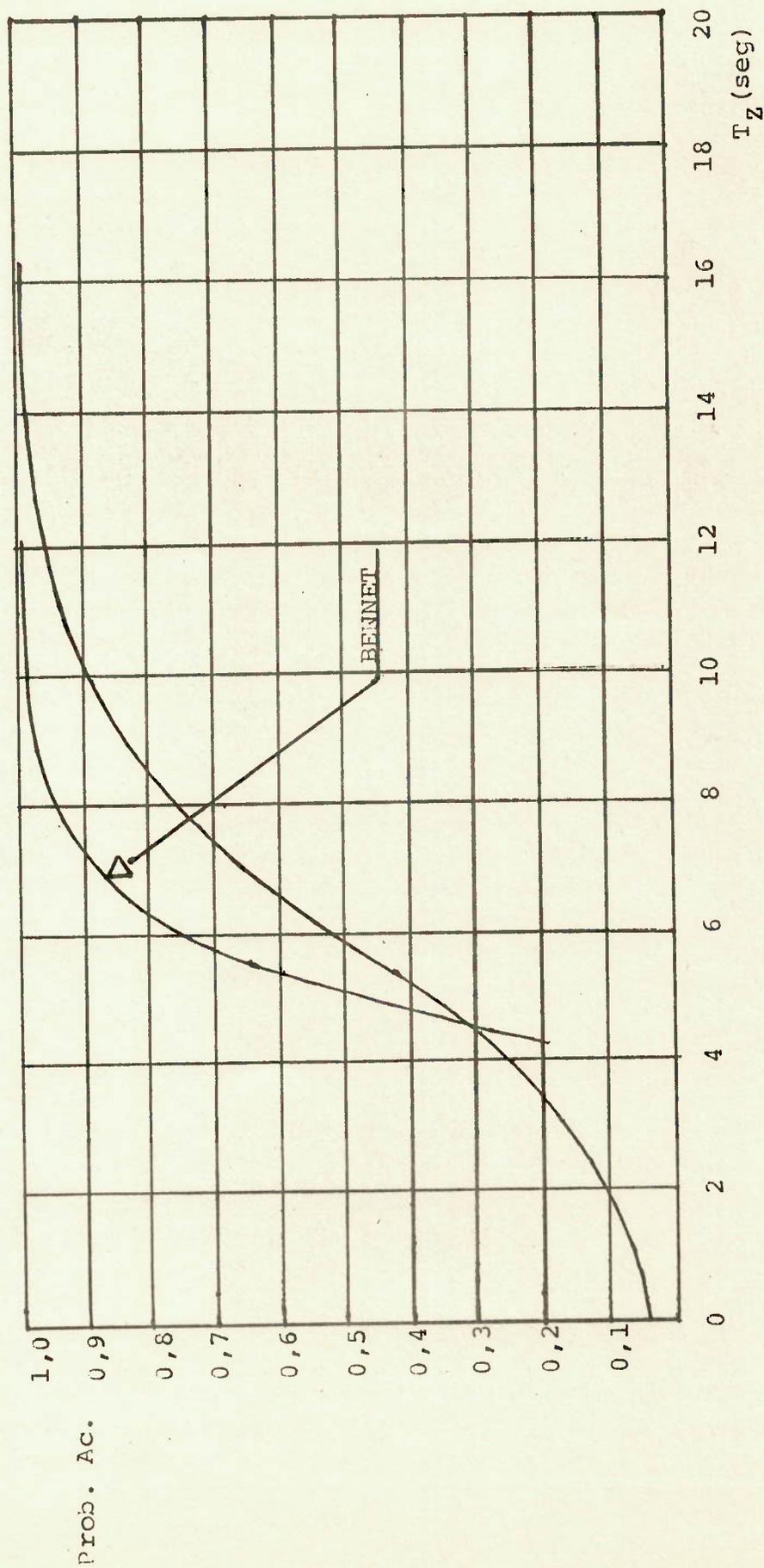


Figura 3-VII - Comparação entre os períodos médios daço pelo estudo de BENNETT e co estudo das áreas 1, 2, 6 e 7 do ATLANTICO NORTE.

CAPÍTULO VIIICOMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS DO MOMENTO FLETOR
ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE MURRAY E DO ESPECTRO8.1. CÁLCULO PELO MÉTODO DE MURRAY

O cálculo do momento fletor devido às ondas através do MÉTODO DE MURRAY é feito colocando-se, estaticamente, o navio em uma onda trocoidal de comprimento igual ao do navio e altura dada por:

$$1,1 \sqrt{L_p} \text{ (pés)}, \quad L_p \text{ em pés} \quad (1\text{-VIII})$$

ou

$$1,8 \sqrt{L_p} \text{ (m)}, \quad L_p \text{ em metros} \quad (2\text{-VIII})$$

Considerando-se navios de coeficiente de bloco igual a 0,80, os momentos fletores de tosamento e alquebramento dados pelo MÉTODO DE MURRAY 23 valem respectivamente

$$M_{xt_M} = 616 \cdot L_p^{2,5} \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ (ton.pé)} \quad (3\text{-VIII})$$

e

$$M_{xa_M} = 550 \cdot L_p^{2,5} \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ (ton.pé)} \quad (4\text{-VIII})$$

ou

$$M_{xt_M} = 388 \cdot L_p^{2,5} \cdot B \cdot 10^{-9} \text{ (t.m)} \quad (5\text{-VIII})$$

e

$$M_{xa_M} = 346 \cdot L_p^{2,5} \cdot B \cdot 10^{-9} \text{ (t.m)} \quad (6\text{-VIII})$$

Os valores de Mxt_M e Mxa_M para os navios N_i são encontrados na tabela 1-VIII.

TABELA 1-VIII

N_i	Mxt_M (tm)	Mxa_M (t.m)
N_1	458 000	429 999
N_2	534 000	477 000
N_3	612 000	543 000
N_4	773 000	627 000
N_5	914 000	813 000
N_6	963 000	886 000
N_7	1 015 000	906 000
N_8	1 253 000	1 123 000
N_9	1 280 000	1 160 000
N_{10}	1 280 000	1 160 000

8.2. NÍVEL DE PROBABILIDADE PARA O MÉTODO DO ESPECTRO

Um critério de projeto deveria ter como meta a estima do risco de fracasso da estrutura em pauta, e para tanto, o momento fletor e a resistência do navio deverão ser considerados simultaneamente.

Para facilidade de explicação estamos considerando apenas o momento fletor devido às ondas como carga à estrutura do navio.

A distribuição do momento fletor deveria refletir todos os possíveis valores extremos que ocorrerão durante a vida da embarcação. Infelizmente, até o presente momento, os dados disponíveis para o estudo dos estados de mar não cobrem um tal período, que se supõe ser de 20 anos, em média. Nesse particular, MANSOUR (28) propõe o uso das hipóteses básicas da TEORIA DE GUMBEL, de que as variáveis aleatórias que representam a amplitude do momento fletor devido às ondas são identicamente distribuídas e estatisticamente independentes. Essas hipóteses são aproximadamente obedecidas quando os dados forem tomados por um período de mais de um ano, evitando-se, com isso, o problema das estações.

O cálculo tradicional da estrutura do navio tem sido baseado em valores fixos e determinísticos de momentos fletores aplicados ao navio. Na realidade, esses valores não são únicos e sim, têm uma certa distribuição de probabilidade de ocorrência, que refletem incertezas associadas ao material usado na construção às tensões residuais e térmicas, às descontinuidades da estrutura, às hipóteses feitas para o modelo matemático, etc. Essas incertezas indicam que navios aparentemente idênticos, não têm, em geral, idênticas resistências e mais ainda, que no presente momento a probabilidade de fracasso usado para o estudo do comportamento da estrutura, tem que ser considerada, ainda, num sentido mais comparativo do

que absoluto. A figura 1-VIII esquematiza a possibilidade de fracasso de um navio quando se compara a resistência do mesmo (M_r) e o momento fletor (M_v) imposto pelo mar.

Para que possamos estabelecer uma comparação entre os dois métodos citados, é necessário estabelecer um nível de probabilidade de ocorrência de fracasso. Infelizmente, apenas recentemente, é que progressos têm sido feitos a fim de se incorporar o conceito probabilístico para o projeto dos navios, de tal maneira que a apreciação de qualquer nível estabelecido seria assunto de uma nova dissertação. Assim, para o presente estudo o nível de probabilidade para a estimação do momento fletor vertical devido às ondas será aquele usado pelo Lloyd's Register of Shipping, ou seja 10^{-8} , onde 10^8 é o número de oscilações que se espera ocorrer em um navio, em 20 anos. Convém salientar, conforme ressalta ROBINSON (24), que este nível de probabilidade pode ser muito alto, sugerindo o estudo, portanto, entre os níveis de 10^{-6} a 10^{-8} .

Os resultados obtidos para os dez navios N_1 , em estudo, são mostrados na tabela 2-VIII.

TABELA 2-VIII

N_i	M_{xt} (txm)	M_{xa} (txm)
N_1	418 600	496 200
N_2	466 000	560 500
N_3	516 600	620 000
N_4	616 700	732 500
N_5	724 800	865 000
N_6	747 000	891 100
N_7	791 600	924 500
N_8	931 800	1 130 000
N_9	912 800	1 126 000
N_{10}	957 600	1 102 000

8.3. CONCLUSÕES

1. Podemos observar que, ao contrário do MÉTODO DE MURRAY, o método do espectro estudado, fornece, para os super-petroleiros em pauta, momentos de alquebramento maiores que os de tosamento.

2. O nível de probabilidade de 10^{-8} fornece momentos fletores que variam até 20% daqueles dados pelo MÉTODO DE MURRAY (*).

A figura 2-VIII nos fornece uma comparação entre os valores obtidos através dos métodos em pauta.

3. Dentro da variação dos navios considerados na tabela 1-VII, podemos estimar de uma maneira grosseira, os momentos fletores devido as ondas utilizando-se as seguintes formulações:

$$M_{xa} = 0.6859 \times 10^{-2} L_p^3 + 75.31 \times L_p^2 - 0,3852 \times 10^5 \times L_p + 0,5413 \times 10^7$$

$$M_{xt} = - 0,4087 \times L_p^3 + 288.1 \times L_p^2 - 0,5635 \times 10^5 \times L_p + 0,2829 \times 10^7$$

(*) É interessante observar que o MÉTODO DE MURRAY estudado foi estabelecido em 1953.

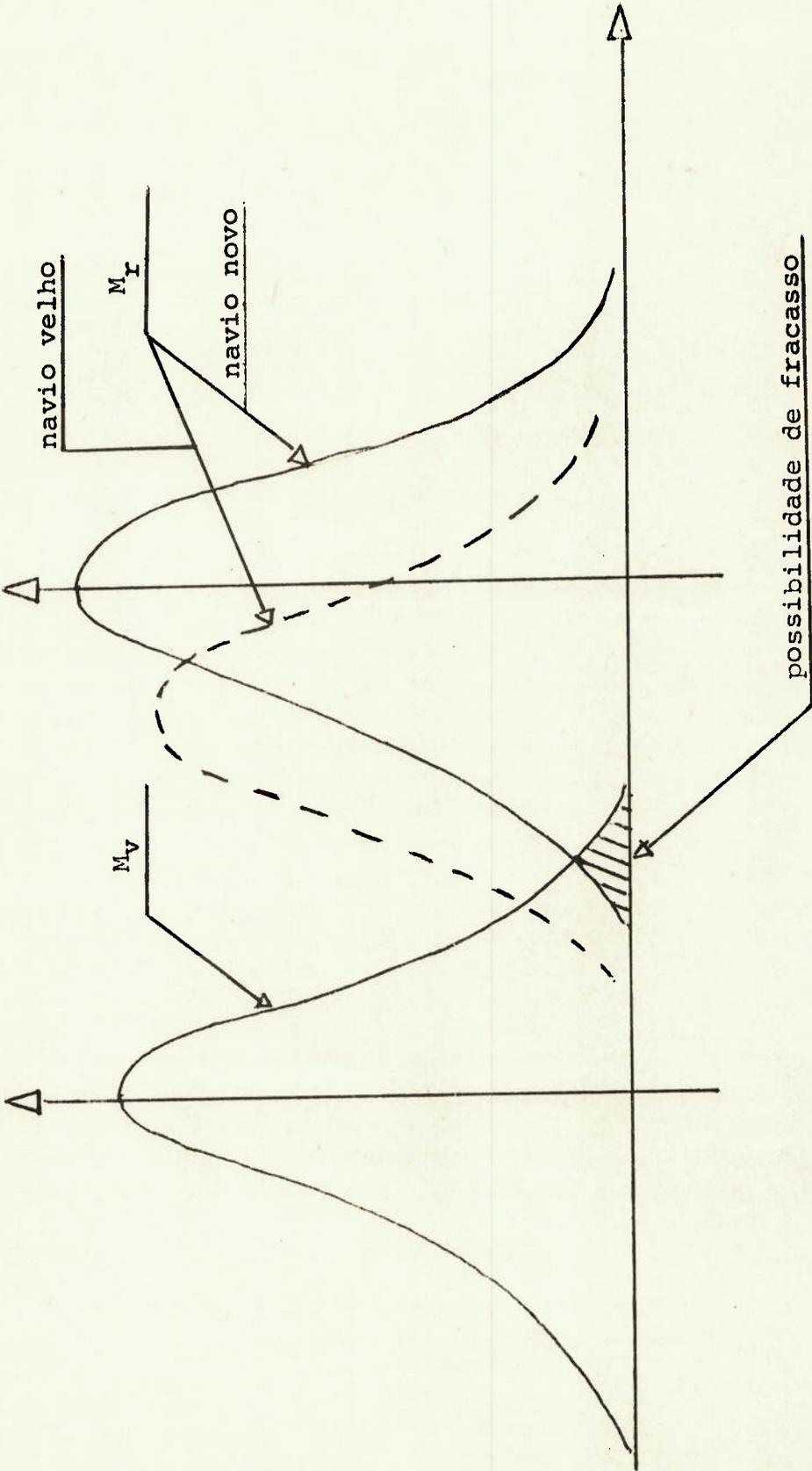


Figura 1-VIII - Esquemática da possibilidade de falha.

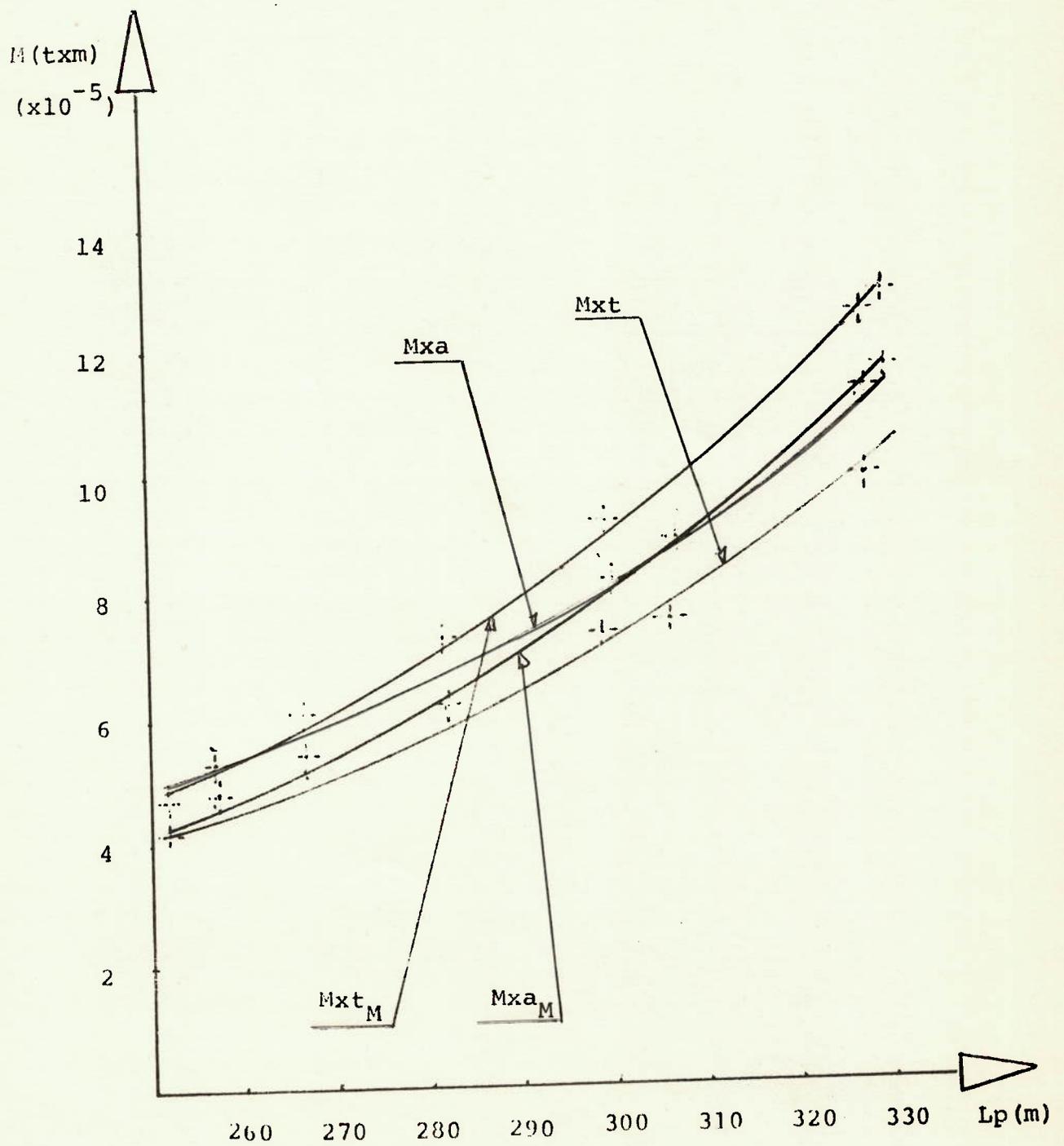


Figura 2-VIII- Comparação entre os valores obtidos das tabelas 1-VIII e 2-VIII.

CAPÍTULO IX9.1 - OBSERVAÇÕES FINAIS

Como tivemos a oportunidade de observar no CAPÍTULO III, o mar pode ser descrito através de dois processos principais:

- a) Número de BEAUFORT;
- b) Períodos e alturas significativas.

O primeiro caso, o qual foi tratado nesta dissertação, apresenta a grande vantagem da simplificação e, por isso, de grande valor didático para a compreensão do método em destaque. Atualmente, entretanto, a maioria dos dados sobre estados de mar são apresentados na forma de períodos e alturas significativas, ⁽²⁴⁾ e ⁽²⁷⁾, de tal maneira que posteriores estudos deveriam ser elaborados dentro do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL, a fim de que, num sentido mais amplo e refinado, tivéssemos elementos para analisar qualquer área marítima, em especial interesse, as costas brasileiras, isto é, áreas 27, 33, 37, 40 e 44, figura 1-VIII.

Referências principais: (24) e (27)

9.2 - Às vezes é de particular importância conhecermos a resposta do navio para um determinado estado de mar ("SHORT TERM RESPONSE"). Por exemplo:

- Qual seria o risco de fracasso para um rebocador

projetado para Santos, operar durante certo tempo ao largo de São Sebastião.

- Qual seria o risco de fracasso para navio-oficina, projetado para o Rio Amazonas, operar durante a pior estação numa possível plataforma de perfuração de petróleo na área 27, figura 1-VIII.

De uma maneira geral e simples, o problema pode ser resolvido calculando-se o valor de $E[M_x]$ para aquele dado estado de mar e lembrando que

$$P [M_x \geq M_{x1}] = \exp \left\{ \frac{-(M_{x1})^2}{8E [M_x]} \right\} \quad (1-IX)$$

Considerando-se N^{-1} o nível de probabilidade, teremos que

$$P [M_x \geq M_{x1}] = N^{-1} \quad (2-IX)$$

ou

$$M_{x1} = \sqrt{E [M_x] \log_e N} \quad (3-IX)$$

Referência principal - (18)

9.3 - Tradicionalmente, o arquiteto naval está acostumado a calcular o momento fletor devido às ondas, colocando-se, estaticamente, o navio sobre uma onda trocoidal de comprimento igual ao do navio e de altura padronizada. Porém, qualquer espectro de mar pode ser substituído por uma onda trocoidal equivalente, de modo

que, como ressalta MANSOUR (28), possamos continuar com regras que facilitam os cálculos para a estima das cargas impostas à estrutura em estudo.

9.4 - Muitos pontos importantes e, que não foram focalizados nesta dissertação, merecem especial atenção. Entre eles podemos destacar:

- a) o efeito da velocidade do navio e ângulo de aproximação;
- b) o estudo de movimentos vibrações e forças impostas ao navio;
- c) o estudo do mar tridimensional ("SHORT CRESTED").
- d) o efeito de águas rasas;
- e) o efeito de escala sobre a função transferência de navios geometricamente semelhantes.

BIBLIOGRAFIA

- ① - FONSECA, M.M. - Arte Naval. Rio de Janeiro, Imprensa Naval, 1960.
- ② - DUNN, L. - The World's Tankers. New York, Adlard Coles Limited, 1956.
- ③ - GUTHERIE, J. - The Machinery of The Great Eartern. London, Lloyd's Register of Shipping, Sessions 1961-62, Paper nº 2.
- ④ - D'ARCANGELO. - Ship Design and Construction. New York, S.N.A.M.E. 1969.
- ⑤ - MURRAY, J.M. - A Hundred Years of Lloyd's Register Ship Rules. London, R.I.N.A., 1955.
- ⑥ - HUNTER, N.M. - Changes in Ship Construction Methods - 1850 to 1950. London, R.I.N.A., 1952.
- ⑦ - JANZÉN, S. & NILSSON, O. - Hull Damage in Large Ships. London, Lloyd's Register of Shipping, Session 1972 -73, Paper nº 1.
- ⑧ - MICHEL, W.H. - Sea Spectra Simplified. New York, Marine Technology, Volume 5, Nº 1, 1968.
- ⑨ - MARIOTTO, M. - Sub and Super-critical Zones of Operation of Ships in Irregular Seas. Tese de Mestrado. MIT-1962.
- ⑩ - REGO, P.M. - Análise Espectral Aplicada ao Estudo do Comportamento do Navio no Mar. São Paulo, D.E.N., - 1968.

- ⑪ - TOLSTOV. - Fourier-Series. New Jersey, Prentice - Hall Inc., 1962.
- ⑫ - WHITE, P.H. - Metal Fatigue. Los Angeles, Angel F. Madayag, 1969.
- ⑬ - PARZEN, E. - Stochastic Process. San Francisco, Holden-Day, 1964.
- ⑭ - GOODMAN, R.A. - Estimation of Ship Motions and Longitudinal Bending Moments. London, Lloyd's Register Staff Association, Session 1966-67, Paper n° 2.
- ⑮ - LOUKAKIS, T.A. - Computer Aided Prediction of Seakeeping Performance in Ship Design. MIT, Report - N° 70.3, August, 1970.
- ⑯ - YAMANOUCI, Y. Analysis of Irregular Wave Testes from Multiples Runs. 13th I.T.T.C., Hamburg, 1972.
- ⑰ - KROUKOVSKY, K. - Theory of Seakeeping. New york, S.N.A.M.E., 1961.
- ⑱ - BENNET, R. - A Meghod to Determine the Response of Ships in Irregular Waves. Gothemburg, Chalmers University of Technology, 1966.
- ⑲ - MURDEY, D.C. - An Analysis of Longitudinal Bending Moments Measured on Models in Head Waves. London, R.I.N.A., 1971.
- ⑳ - CHRYSOSTOMIDIS, C. - Principles of Ship Design. São Paulo, D.E.N., 1971.

- ②1 - MURRAY, J.M. - The New Approach to Longitudinal Strength. London, Lloyd's Register Staff Association, Session 1961-62, Paper nº 4.
- ②2 - MANSOUR, A. - Statistical Approach to Wave Bending Moment. M.I.T., 1971.
- ②3 - MUCKLE, W. - Strength of Ship's Structures. London, Edward Arnold, 1967.
- ②4 - ROBINSON, D.W. - Sea State Distribution for Use in the Calculation of the Long-Term Wave Induced Ship Responses. London, Lloyd's Register of Shipping, Report nº 4, 1972.
- ②5 - MATHEWSON, J.I. & GOODMAN, R.A. - An Approach to Ship Structural Design by Computer in Lloyd's Register. London, Lloyd's Register of Shipping, 1973.
- ②6 - ROBERTS, W.J. - Strength of Large Tankers. N.E.C.I.E.S., Transactions, Vol. 86, nº 4, 1969/70.
- ②7 - HOGBEN, N. and LUMB, F.E. - Ocean Waves Statistics. Ministry of Technology, National Physical Laboratory, 1967.
- ②8 - MANSOUR, A. - Assesment of the Probabilistic Aproach to Ship Longitudinal Strength. M.I.T., 1973.
- ②9 - LEWIS, E.V. - Predicting Long - Term Distributions of Wave - Induced Bending Moment on Ship Hulls. SNAME. Trabalho apresentado em Montreal, Canadá, 1967.

APÊNDICE IPROCESSOS ALEATÓRIOSA1.1. PROCESSO ALEATÓRIO ESTACIONÁRIO

Analisemos o conjunto de sinais

$$x_n(t), \quad -\infty < t < \infty, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-AI)$$

gerados pelo mesmo processo, conforme nos indica a figura 1-AI, e para o qual consideremos as seguintes definições:

- a) Média do conjunto de funções amostras tomadas no tempo $t = t_1$

$$\{x(t_1)\}_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_1^n x_n(t_1)}{n} \quad (2-AI)$$

- b) Valor médio quadrático do conjunto de funções amostras tomadas no tempo $t = t_1$

$$\{x^2(t_1)\}_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_1^n x_n^2(t_1)}{n} \quad (3-AI)$$

- c) Função densidade de probabilidade $\textcircled{*}$ para o conjunto de funções amostras tomadas no tempo $t = t_1$

$\textcircled{*}$ Distribuição de probabilidade de primeira ordem.

$p [x(t_1)]$ ou simplesmente $p[x_1]$

- d) Função densidade de probabilidade para as funções amostras tomadas nos tempos $t = t_1$ e $t = t_2$ *

$p [x_1, x_2]$

Considerando x_1 o valor da variável X tomado no instante $t = t_1$, teremos

$$d.1) \quad P[x_1 < X_1 \leq x_1 + dx; x_2 < X_2 \leq x_2 + dx] = p[x_1, x_2] \cdot dx_1 dx_2 \quad (4-AI)$$

$$d.2) \quad P[a_1 < X_1 \leq b_1, a_2 < X_2 \leq b_2] = \int_{a_2}^{b_2} \int_{a_1}^{b_1} p[x_1, x_2] dx_1 dx_2 \quad (5-AI)$$

$$d.3) \quad P[-\infty < X_1 \leq +\infty; -\infty < X_2 \leq +\infty] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p[x_1, x_2] dx_1 dx_2 = 1 \quad (6-AI)$$

- e) Para uma dada função $g(x)$, define-se valor esperado desta função como

$$E [g(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) p [x] dx \quad (7-AI)$$

No caso de

* Distribuição de probabilidade de segunda ordem.

$$e.1) \quad g(x) = x \quad (8-AI)$$

temos que

$$E[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp[x]dx \quad (9-AI)$$

onde

$E[x]$ = média do conjunto (análogo à abcissa do centro de gravidade da área sob a curva $p[x]$, conforme nos mostra a figura 2-AI).

$$e.2) \quad g(x) = x^2 \quad (10-AI)$$

temos que

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p[x]dx \quad (11-AI)$$

onde

$E[x^2]$ = média quadrática da variável aleatória x , análogo ao momento de inércia.

$$e.3) \quad g(x) = (x - E[x])^2 \quad (12-AI)$$

temos que

$$\sigma^2 = E(x - E[x])^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E[x])^2 p[x]dx \quad (13-AI)$$

ou

$$\sigma^2 = E[x^2] - (E[x])^2 \quad (14-AI)$$

onde

σ^2 = variância da variável aleatória x

σ = $\sqrt{\sigma^2}$ = desvio padrão da variável aleatória x

f) Função autocorrelação

$$E[x_1, x_2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 p[x_1, x_2] dx_1 dx_2 \quad (15-AI)$$

Um processo aleatório é dito estacionário se suas distribuições são invariantes sob uma mudança na escala do tempo, isto é, independente de sua origem.

Da definição acima segue-se que $p[x]$, $p[x_1, x_2]$, $E[x]$ e σ^2 são constantes independentes do tempo para um processo estacionário.

Fazendo-se

$$t_2 - t_1 = \zeta \quad (16-AI)$$

temos que a relação de autocorrelação (15-AI) fica

$$E[x_1, x_2] = E[x(t_1), x(t_1 + \zeta)] = R(\zeta) \quad (17-AI)$$

onde

$R(\zeta)$ = função autocorrelação de um processo aleatório estacionário.

É interessante notar que

$$R(0) = E[x^2(t)] \quad (18-AI)$$

pois, da relação (15-AI) para $\tau = 0$, temos que

$$x_1 = x_2 = x \quad (19-AI)$$

ou

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot x \cdot p[x, x] dx dx = R(0) \quad (20-AI)$$

finalmente

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p[x] dx = R(0) \quad (21-AI)$$

A.1.2. PROCESSO ALEATÓRIO ERGÓDICO

Um processo é dito ergódico se a média do conjunto de funções amostras tomadas no tempo $t = t_1$, qualquer que seja t_1 , é igual à média no tempo de qualquer função amostra separadamente.

Assim, para uma amostra, podemos definir:

a) A média no tempo

$$\{x_n\}_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_n(t) dt \quad (22-AI)$$

b) O valor médio quadrático

$$\{x_n^2\}_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_n^2(t) dt \quad (23-AI)$$

c) A função autocorrelação $\varphi(\tau)$

$$\begin{aligned} \varphi(\tau) &= \{x_n(t) \cdot x_n(t+\tau)\}_t = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_n(t) x_n(t+\tau) d\tau \quad (24-AI) \end{aligned}$$

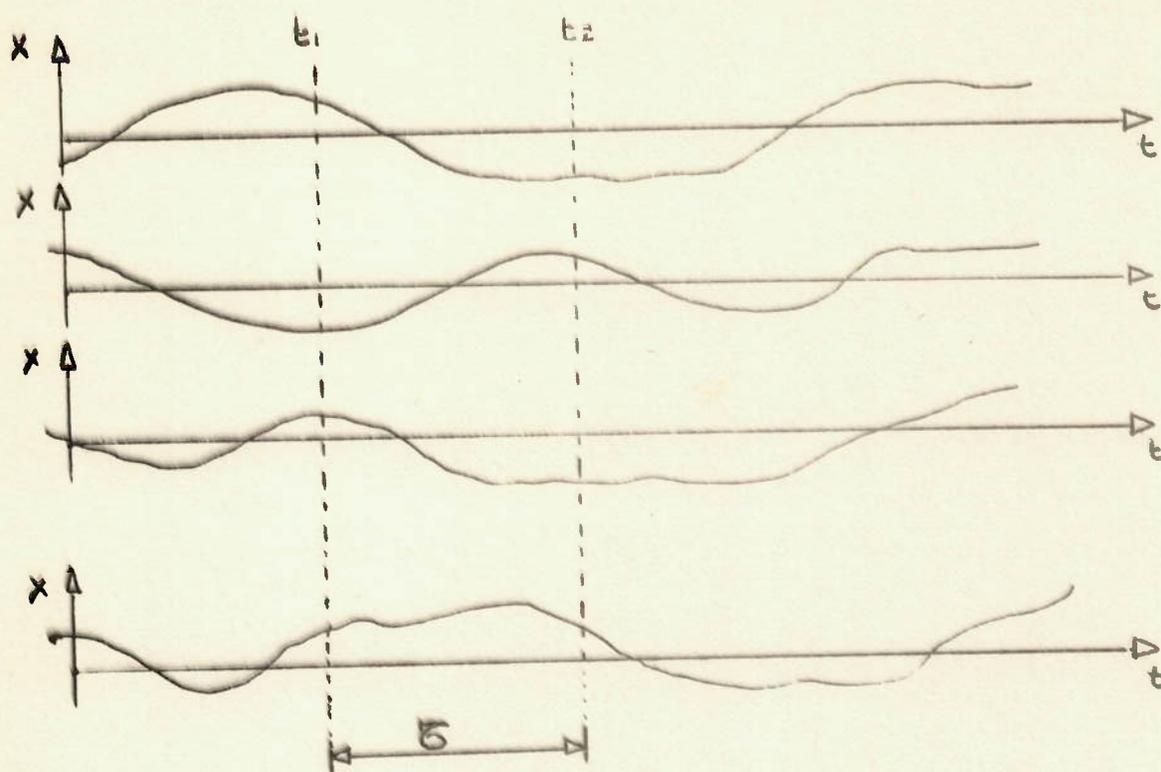


Figura 1-AI. Amostras de um processo aleatório.

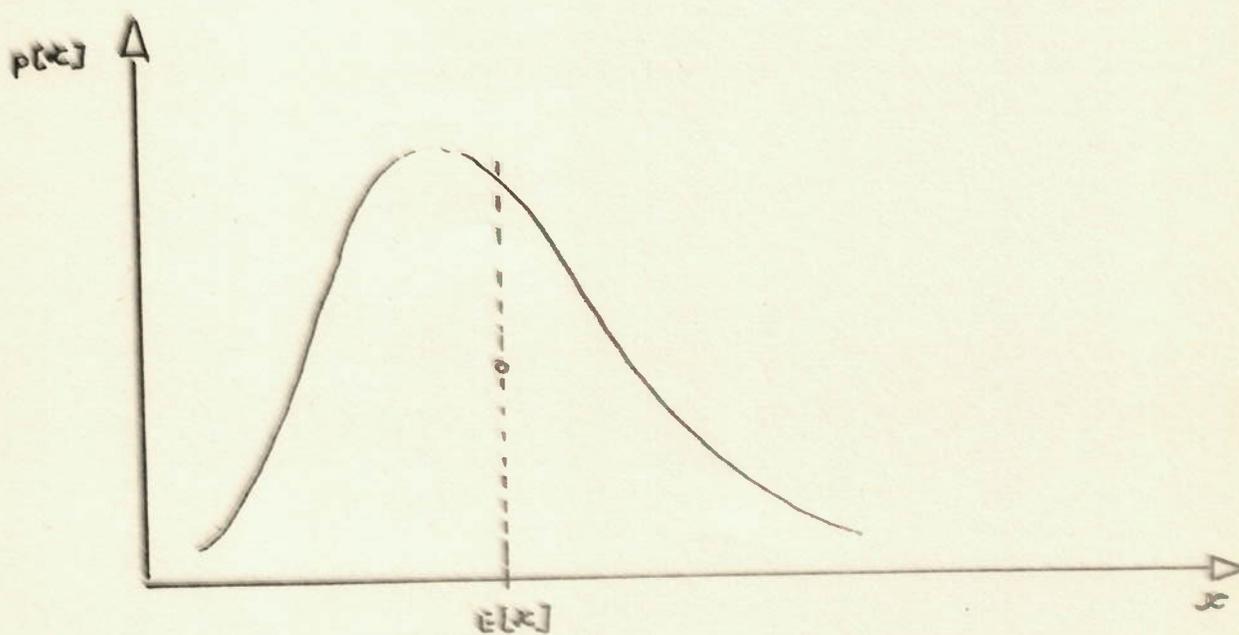


Figura 2-AI. Função densidade de probabilidade.

APÊNDICE IIFUNÇÃO DENSIDADE DE ESPECTRO

Consideremos um sinal proveniente de um processo aleatório estacionário qualquer estendendo-se num intervalo de $-T$ a $+T$, conforme nos mostra a figura 1-AII. Este sinal pode ser assim representado:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos \omega_n t + b_n \text{sen} \omega_n t] = \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n e^{i\omega_n t} \quad (1-AII)$$

onde

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cos \frac{n\pi}{T} t dt = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cos \omega_n t dt \quad (2-AII)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} x(t) \text{sen} \frac{n\pi}{T} t dt = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} x(t) \text{sen} \omega_n t dt \quad (3-AII)$$

$$c_n = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (4-AII)$$

Sendo

$$c_{-n} = \frac{a_n}{2} + \frac{ib_n}{2} \quad (5-AII)$$

$$c_n = \frac{a_n}{2} - \frac{ib_n}{2} \quad (6-AII)$$

$$c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (7-AII)$$

$$c_n^2 = \frac{a_n^2}{4} + \frac{b_n^2}{4} \quad (8-AII)$$

Os coeficientes a_n e b_n medem a amplitude dos harmônicos de frequência ω_n .

A função autocorrelação, calculada no tempo, para esse sinal, foi definida no APÊNDICE I como:

$$\varrho(\tau) = \left\{ x_n(t) \cdot x_n(t+\tau) \right\}_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x_n(t) x_n(t+\tau) dt \quad (9-AII)$$

Conseqüentemente:

$$\varrho(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2(t) dt \quad (10-AII)$$

Pelo TEOREMA DE PARSEVAL (11), temos que

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2 dt = \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n^2 = \frac{a_n^2}{4} + \frac{b_n^2}{4} \quad (11-AII)$$

Da última relação podemos escrever que:

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x^2 dt &= \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} |c_n|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{-\infty}^{+\infty} |c_n|^2 \Delta\omega}{\Delta\omega} = \\ &= \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{|c_n|^2 \Delta\omega}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega = \varrho(0) \end{aligned} \quad (12-AII)$$

onde

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|c_n|^2}{\Delta\omega} = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left[\frac{a_n^2}{4} + \frac{b_n^2}{4} \right] \quad (13-AII)$$

$S(\omega)$ DEFINE A FUNÇÃO DENSIDADE DE ESPECTRO.

Se definirmos $S^+(\omega) = 2 S(\omega)$, a última relação nos mostrará que $S^+(\omega)$ é medido em $\frac{1}{2}$ (amplitude)² das componentes harmônicas do sinal aleatório estacionário, inicialmente considerado.

Se considerarmos que o processo, além de estacionário, é também gaussiano, isto é, se supusermos que as elevações se distribuem gaussianamente, poderemos lançar mão do teorema ergódico, segundo o qual as propriedades estatísticas do processo, medidas ao longo do tempo, em uma amostra, seriam as mesmas que se obteriam, num determinado instante, com n amostras tiradas do mesmo processo. Neste caso, teremos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega = \int_0^{+\infty} S^+(\omega) d\omega = \phi(0) = R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p[x] dx \quad (14-AII)$$

Verifica-se, portanto, que as amplitudes que, elevadas ao quadrado e divididas por dois nos fornecem $S^+(\omega)$, são aquelas dos harmônicos de um registro do processo que nos forneceria os mesmos parâmetros estatísticos de um mar do qual tenhamos n diferentes registros aleatórios estacionários. Isto sugere que, ao tentarmos determinar a resposta de um navio a um certo estado de mar, superponhamos as respostas individuais do navio a cada componente harmônico que tenha as amplitudes obtidas da função espectro $S^+(\omega)$ para esse estado de mar.

Mostraremos, agora, que

$$S^+(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left[\frac{a_n^2}{2} + \frac{b_n^2}{2} \right] \quad (15-AII)$$

é proporcional à energia, por unidade de área do mar, correspondente a $S^+(\omega)$. Por esta razão $S^+(\omega)$ é também chamado ESPECTRO DE ENERGIA.

A energia de uma onda senoidal por unidade de área é dada por 22 :

$$U_1 = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (16-AII)$$

Como, a energia por unidade de área associada à uma banda de frequência $d\omega$ de frequência central ω_0 é dada por

$$U_2 = \rho g S(\omega) d\omega \quad (17-AII)$$

Teremos, conseqüentemente que

$$\rho g S(\omega) d\omega = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (18-AII)$$

ou

$$a^2 = 2 S(\omega) d\omega \quad (19-AII)$$

ou

$$\frac{\text{Energia total}}{\text{área}} = \rho_g \int_0^{+\infty} S^+(\omega) d\omega \quad (20-AII)$$

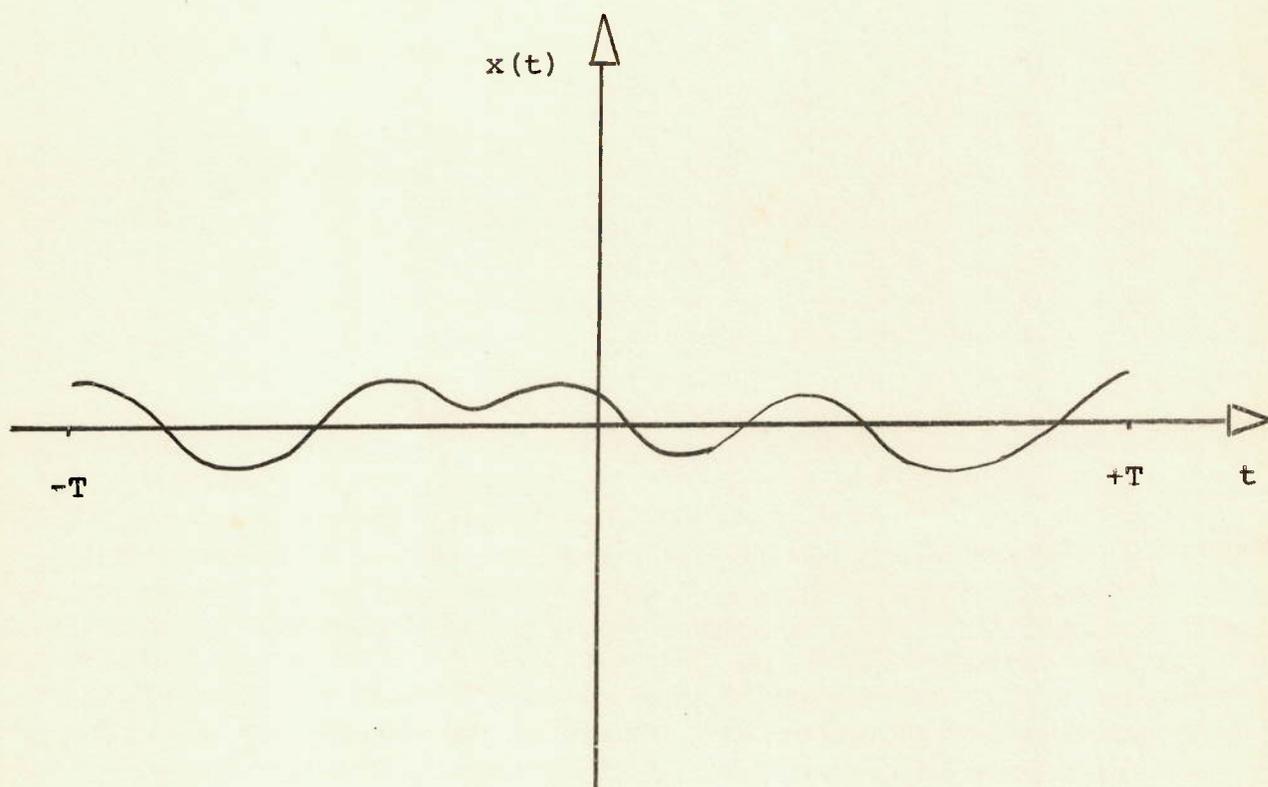


Figura 1-AII. Sinal proveniente de um processo aleatório estacionário.

APÊNDICE IIIRELACÃO ENTRE S(ω) E R(ω)

Consideremos uma função $f(x)$. O estudo das séries de FOURIER permite-nos escrever:

$$f(x) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-A}^{+A} e^{-iu\alpha} g(u) du \quad (1-AIII)$$

onde

$$g(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iu\alpha} f(x) dx \quad (2-AIII)$$

onde

$$g(u) = \text{TRANSFORMADA DE FOURIER da função } f(x)$$

Consideremos, agora, a função auto-correlação $R(\xi)$

Podemos, assim, escrever

$$R(\xi) = \lim_{A \rightarrow \infty} \int_{-A}^{+A} p(\omega) e^{-i\omega\xi} d\omega \quad (3-AIII)$$

onde

$$p(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\xi) e^{-i\omega\xi} d\xi \quad (4-AIII)$$

Então

$$R(0) = \lim_{A \rightarrow \infty} \int_{-A}^{+A} p(\omega) d\omega \quad (5-AIII)$$

Mas, no APÊNDICE II, mostramos que

$$R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega \quad (6-AIII)$$

Portanto, das duas últimas relações temos que

$$S(\omega) = p(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\xi) e^{-i\omega\xi} d\xi \quad (7-AIII)$$

APÊNDICE IVPROGRAMA ESPECTROA.4.1 - Finalidade

Determinar para cada valor de momento fletor vertical a probabilidade de que venha a ser excedido, durante um período considerável da vida do navio ("LONG-TERM RESPONSE"), ou no alquebramento ou no tosamento.

A.4.2 - Método de resolução

A metodologia aplicada é a desenvolvida na Tese de Mestrado do Engenheiro Sérgio Simões NEVES.

Faremos aqui um breve resumo da sequência seguida.

Caracteriza-se o estado do mar pelo seu número de BEAUFORT. Através de relações obtidas na análise estatística do fenômeno estima-se a velocidade do vento (W), a altura de onda significativa (H_s), o período de onda médio (T_z) e um adimensional (\bar{T}_z) que nos permitirá, utilizando tabelas levantadas por MURDEY (19) em ensaios com modelos, determinar m , μ_s e $\bar{\mu}_s$.

O adimensional m está ligado ao acréscimo no momento fletor vertical devido ao trem de ondas gerado pelo próprio navio.

O adimensional μ_s está ligado ao acréscimo no momento fletor vertical devido às ondas geradas pelo vento, marés, etc.. O adimensional $\bar{\mu}_s$ está ligado à necessidade de se introduzir um "desnível" (ver MURDEY pag. 4) quando se combina os valores m com os de μ_s .

Mediante o uso dos adimensionais acima obtém-se valores médios significativos tanto do momento de alquebramento como do de tosamento. Através de uma distribuição exponencial sugerida pela teoria e somando as probabilidades achadas para todos os números de BEAUFORT, obtemos a probabilidade que um dado valor de momento fletor vertical venha a ser excedido ou no tosamento ou no alquebramento, durante um período de tempo suficientemente longo (aproximadamente 20 anos).

A.4.3 - Restrições

Conforme apontado por NEVES, o método utilizado se restringe a navios de formas convencionais, pois foram modelos com estas características que MURDEY utilizou em seus ensaios.

A.4.4 - Testes de Confiabilidade

Foram corridos dez navios de características diferentes e os resultados obtidos se encontram em boa concordância com os resultados achados através de verificações manuais feitas por NEVES, as quais corroboram os resultados obtidos pelo programa.

A.4.5 - Equivalência de variáveis.

- NN - número de navios a serem corridos
- L - comprimento entre perpendiculares do navio (m)
- B - boca do navio (m)
- T - calado do navio (m)
- LCG - posição longitudinal do centro de gravidade do navio como percentagem do comprimento. Se o LCG se situa AV da meia-nau deverá ser considerado positivo, se se situa AR da meia-nau deverá ser considerado negativo
- LCB - posição longitudinal do centro de flutuação do navio como percentagem do comprimento. Se o LCB se situa meia-nau deverá ser considerado positivo, se se situa AR da meia-nau deverá ser considerado negativo.
- CB - coeficiente de bloco do navio
- CW - coeficiente do plano de linha d'agua
- V - velocidade do navio (nós)
- IA - momento de inércia do corpo de ré do navio em relação a um eixo transversal a meia-nau ($t.m^2$)
- IF - momento de inércia do corpo de vante do navio em relação a um eixo transversal a meia-nau ($t.m^2$)
- DEL - deslocamento do navio (t)
- BPROB - limite inferior para a probabilidade calculada

A.4.6 - Entradas e saídas

As entradas são feitas em cartões perfurados de 80

colunas. A saída é feita pela impressora.

Cartões de entrada

Cartão 1 FORMAT (I2)

Colunas 1 - 2 - NN

Cartão 2 FORMAT (8 F10.4)

Colunas 1 - 10 - L

" 11 - 20 - B

" 21 - 30 - T

" 31 - 40 - LCG

" 41 - 50 - LCB

" 51 - 60 - CB

" 61 - 70 - CW

" 71 - 80 - V

Cartão 3 FORMAT (4E15.7)

Colunas 1 - 15 - IA

" 16 - 30 - IF

" 31 - 45 - DEL

" 46 - 60 - BPROB

Repetir o esquema (menos o cartão 1) para cada na-
vio.

Os dados de entrada acima são impressos junto com os resultados calculados no programa. A saída do programa é sob forma vertical de uma tabela que associa a cada valor de momento fletor vertical a probabilidade de ele vir a ser excedido no aquebramento ou no tosamento.

A.4.7 - Problema amostra

Ver Tese de Mestrado de NEVES.

PROGRAMA SPECTRE

TESTE DE ESTRADO DE SERGIO SIMOES NEVES

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL

ESCOLA POLITECNICA

UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

PROGRAMA DEB(12),A(4),C(7),TMAX(12),FHTX(12)

REAL LCG,LCB,IA,IF,H,MIS,MIBS,MXX,MAS,MIS,MAMIS,PA(18,4),PB(18,7)

DATA PA/0.2,0.15,0.15,0.15,0.15,0.1,0.08,0.05,0.014,0.004,0.001,
10.001/

DATA PB/0.07,0.21,0.35,-0.40,-2.36,-4.39,-5.63,-5.94,-5.75,-5.29,
1-4.71,-4.09,-3.49,-2.90,-2.41,-2.01,-1.67,-1.40,0.00,0.04,0.37,

21.90,4.23,6.18,7.21,7.37,7.08,6.58,5.98,5.26,4.79,4.21,3.74,3.36,
23.01,2.73,0.001,0.005,0.018,0.057,0.112,0.159,0.178,0.183,0.176,

40.162,0.148,0.133,0.119,0.105,0.094,0.085,0.076,0.069,-0.014,

5-0.050,-0.135,-0.284,-0.403,-0.454,-0.464,-0.464,-0.448,-0.428;

6-0.401,-0.390,-0.373,-0.357,-0.345,-0.333,-0.320,-0.307/

DATA PB/0.133,0.436,0.815,0.684,0.268,-0.044,-0.223,-0.325,-0.401,

1-0.414,-0.442,-0.430,-0.414,-0.388,-0.352,-0.338,-0.315,-0.295,

2-0.083,-0.269,-0.383,0.189,1.159,2.109,2.841,3.329,3.602,3.714,

33.719,3.655,3.557,3.435,3.306,3.178,3.052,2.933,0.0005,0.0017,

40.0039,0.0079,0.0125,0.0120,0.0099,0.0060,0.0028,0.0004,-0.0013,

5-0.0026,-0.0035,-0.0041,-0.0046,-0.0049,-0.0051,-0.0053,0.0033,

60.0117,0.0347,0.0619,0.0853,0.1033,0.1128,0.1108,0.0995,0.0829,

70.0651,0.0473,0.0313,0.0175,0.0055,-0.0045,-0.0130,-0.0197,0.51,

81.93,6.90,14.93,22.68,27.10,28.06,25.92,21.66,16.27,10.84,5.55,

90.92,-5.01,-6.43,-9.20,-11.55,-13.34,-14.31,-17.81,-19.31,-32.58,

1-46.24,-59.42,-68.75,-72.49,-71.43,-67.18,-61.54,-55.25,-49.15,

2-43.53,-38.39,-33.86,-29.83,-26.41,-0.006,-0.022,0.058,0.421,

30.803,1.129,1.389,1.510,1.486,1.362,1.190,1.002,0.823,0.657,0.512,

40.387,0.301,0.190/

DATA RG,G/1.025,9.81/

READ S,NN

FORMAT(12)

DE 120 IH=1,NN

REAL LCG,LCB,CH,CW,V,IA,IF,DEL,BPROB

FORMAT(2F10.4/4E15.7)

VR=VR0.51444

FN=V/SQR(G*L)

PRINT 20,L,B,T,LCG,LCB,CH,CW,V,IA,IF,DEL,BPROB,FN

FORMAT('1'///'0',10X,'DADOS DO NAVIO'/'0',10X,'COMPRIMENTO EM M',
120X,F15.3/'0',10X,'BOCA EM M',27X,F15.3/'0',10X,'CALADO EM M',25X,
2F15.7/'0',10X,'LCG EM PERCENTAGEM DE L',13X,F15.4/'0',10X,'LCB EM
3PERCENTAGEM DE L',13X,F15.4/'0',10X,'CB',34X,F15.4/'0',10X,'CW',
434X,F15.4/'0',10X,'VELOCIDADE EM NOS',19X,F15.4/'0',10X,'IA EM TON
5***',22X,F15.7/'0',10X,'IF EM TON***',22X,F15.7/'0',10X,'DESLO
6CAMENTO EM TON',17X,F15.7/'0',10X,'LIMITE DE PROBABILIDADE',13X,
7F15.7/'0',10X,'NUMERO DE FROUDE',20X,F15.7)

```

DMXM=0.1*E1/700.
MXM=0.
DO 80 I=1,12
W=2.68*FLUAT(1)**(7./6.)
FS=0.08*W*1.5+5.0
TZ=1.06*5081(05)
TZI=174500*(0.71)
IF(TZI*.11.0.6.DR.TZB.61.4.0) GO TO 100
Y=5.08TZB-2.0
R=Y
LY=Y-
DO 40 J=1,4
A(J)=A(N+1,J)-ZA(N,J)
A(J)=A(J)*DY+MA(N,J)
DO 40 J=1,7
C(J)=B(N+1,J)-BB(N,J)
C(J)=C(J)*DY+MB(N,J)
E=1.1-4*E*FN*(116.3*CB*CH-3.46*CB*L/T+0.04*L/T-20.6*CW-2.01*
1L/R+0.6*LCP-29.5)
MIS=1.1-E*FN*FN*(A(1)+A(2)*CB+A(3)*L/T+A(4)*L/B)
MIS=1.1-2*(C(1)+C(2)*CW+C(3)*L/T+C(4)*LCP+C(5)*1A/(L*L*DEL)+C(6)
1*IF/(L*L*DEL)+C(7)*FN)
HS=FS*0.3
CF1=RC*B*L*L*L
CF2=0.5*MIS*HS/L
CF3=MIS*HS/L+M
MTS=(CF2-CF3)*CF1
MAS=(CF2+CF3)*CF1
EMAX(1)=MAS*MAS/16.
ENTX(1)=MIS*MTS/16.
CONTINUE
PRINT 60
FORMAT('0'///11X,'MOMENTO',10X,'PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAME
INTO',10X,'PROB DE SER EXCEDIDO NO TOSAMENTO')
PRA=0.
PRT=0.
MXM=MXM+DMXM
DO 80 I=1,12
ARGA=-((MXM*MXM)/(8.*EMAX(I)))
ARGT=-((MXM*MXM)/(8.*ENTX(I)))
IF(ABS(ARGA).GT.174.6) GO TO 80
IF(ABS(ARGT).GT.174.6) GO TO 80
PRA=PRA+PEN(I)*EXP(ARGA)
PRT=PRT+PEN(I)*EXP(ARGT)
CONTINUE
PRINT 90, MXM, PRA, PRT
FORMAT('0',E14.7,2X,'T*M',30X,E15.7,28X,E15.7)
IF(1.5*PRA-BPROB) 120,120,70
PRINT 110
FORMAT(///'0','VALOR DE TZ BARRA FORA DO INTERVALO PERMITIDO')
CONTINUE
STOP
END

```

COMPRIMENTO EM M 251.000
 BOCA EM M 38.500
 CALADOC EM M 14.500
 LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CM 0.8800
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 IA EM TON***2 0.1696800E 09
 IF EM TON**2 0.2008000E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.9977000E 05
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERO DE FROUDE 0.1658759E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.3577465E 05 T*M	0.1764783E 00	0.5980938E-00
0.7154925E 05 T*M	0.4739233E-01	0.1364259E-01
0.1073239E 06 T*M	0.1335479E-01	0.3435840E-02
0.1430985E 06 T*M	0.3949765E-02	0.8977461E-03
0.1788731E 06 T*M	0.1190651E-02	0.2450551E-03
0.2146478E 06 T*M	0.3624407E-03	0.6769644E-04
0.2504224E 06 T*M	0.1110547E-03	0.1790657E-04
0.2861970E 06 T*M	0.3378573E-04	0.4500477E-05
0.3219716E 06 T*M	0.9948720E-05	0.9073610E-06
0.3577463E 06 T*M	0.2758732E-05	0.1650752E-06
0.3935209E 06 T*M	0.7050252E-06	0.2562524E-07
0.4292955E 06 T*M	0.1636864E-06	0.3373012E-08
0.4650701E 06 T*M	0.3421316E-07	0.3749479E-09
0.5008448E 06 T*M	0.6401166E-08	0.3510555E-10
0.5366194E 06 T*M	0.1068083E-08	0.2763756E-11
0.5723940E 06 T*M	0.1585407E-09	0.1827886E-12

COMPROMISO EN M 257.000
 BAJA EN P 41.500
 CALADO EN P 15.000
 LOG EN PERCENTAJEN DE L 2.0000
 LCH EN PERCENTAJEN DE L 2.0000
 C3 0.8000
 C4 0.6800
 VELOCIDADE EN NOS 16.0000
 YA EN TOR**2 0.250000 09
 IF EN TOR**2 0.2492000 09
 DESLOCAMIENTO EN TOR 0.1179100E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 SUPRAL DE FIBRA 0.103702E 00

PLANEAO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALGUBRABRMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAN VIO
0.4320980E 05 I#N	0.1599042E 00	0.470775E-06
0.8657956E 05 I#Y	0.3865003E-01	0.974342E-02
0.129092E 06 I#H	0.1006363E-01	0.210138E-02
0.173191E 06 I#P	0.2754775E-02	0.50051E-03
0.216448E 06 I#K	0.7626571E-03	0.131069E-03
0.259738E 06 I#W	0.2185251E-03	0.328062E-04
0.500020E 06 I#M	0.6244030E-04	0.705217E-05
0.340318E 06 I#R	0.1745179E-04	0.102250E-05
0.219007E 06 I#H	0.4604904E-05	0.2517790E-06
0.431097E 06 I#E	0.1114051E-05	0.312868E-07
0.476187E 06 I#H	0.2423584E-06	0.347281E-08
0.519477E 06 I#H	0.4684725E-07	0.315550E-09
0.562766E 06 I#H	0.7987548E-08	0.253490E-10
0.606056E 06 I#H	0.1195767E-08	0.100679E-11
0.649360E 06 I#H	0.1567062E-09	0.689021E-12

DAOS DO NAVIO

COMPRIMENTO EM M 267.000
 BOCA EM M 43.000
 CALADRE EM M 16.500
 LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CM 0.8800
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 JA EM TON***2 0.2116600E 09
 IF EM TON***2 0.3199999E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.1160500E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERO DE FROUE 0.1105290E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALCUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TOSAMENTO
0.5189335E 05 T*M	0.1312957E 00	0.5863907E-01
0.1037867E 06 T*M	0.2731745E-01	0.7150402E-01
0.1550800E 06 T*M	0.6448694E-02	0.1197658E-01
0.2075735E 06 T*M	0.1599674E-02	0.3423401E-05
0.2594666E 06 T*M	0.4101666E-03	0.8012095E-04
0.3113599E 06 T*M	0.1011065E-03	0.1755091E-04
0.3632533E 06 T*M	0.2823146E-04	0.1126610E-01
0.4151466E 06 T*M	0.6946858E-05	0.5415571E-06
0.4670399E 06 T*M	0.1547264E-05	0.6927508E-07
0.5109332E 06 T*M	0.5041256E-06	0.7150402E-05
0.5708265E 06 T*M	0.5197477E-07	0.5847061E-09
0.6227196E 06 T*M	0.7656062E-08	0.3019581E-10
0.6746131E 06 T*M	0.9669285E-09	0.1197658E-11
0.7265064E 06 T*M	0.1043560E-09	0.1126610E-13

DADES DO NAVIO

COMPRIMENTO EM M 284.000
 BOCA EM M 45.000
 CALADRE EM M 18.000
 LCR EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCR EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CW 0.8800
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 IA EM TCM**2 0.3256900E 09
 IF EM TCM**2 0.3976000E 09
 DESLOCAMENTO EM TCM 0.1541900E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMEXC DE FROUCE 0.1559412E 00

MOMENTO	PROB DE SEP EXCEDIDO NO ALGUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.6255707E 05 T*M	0.1002589E 00	0.3244652E-03
0.1251141E 06 T*M	0.2107159E-01	0.5770609E-02
0.1876712E 06 T*M	0.4730634E-02	0.1192541E-02
0.2502263E 06 T*M	0.1143344E-02	0.2759030E-03
0.3127853E 06 T*M	0.2916746E-03	0.6494844E-04
0.3753424E 06 T*M	0.7627626E-04	0.1392750E-04
0.4378994E 06 T*M	0.1935397E-04	0.2557244E-05
0.5004565E 06 T*M	0.4520973E-05	0.3772704E-06
0.5630136E 06 T*M	0.9277732E-06	0.4425844E-07
0.6255707E 06 T*M	0.1689119E-06	0.4210400E-08
0.6881277E 06 T*M	0.2606726E-07	0.3116649E-09
0.7506848E 06 T*M	0.3419554E-08	0.1602909E-10
0.8132418E 06 T*M	0.3794649E-09	0.8150705E-12

COMPRIMENTO EM M 301.000
 BOCA EM M 47.500
 CALADC EM M 18.500
 LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CW 0.8800
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 IA EM TON**2 0.4213998E 09
 IF EM TON**2 0.5000000E 09
 DESLOCAMENTO - P TON 0.1723300E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERC DE FROUDE 0.1514735E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALOQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.7410188E 05 T*M	0.9189582E-01	0.2750175E-01
0.1462038E 06 T*M	0.1830362E-01	0.4751552E-02
0.2223056E 06 T*M	0.4056897E-01	0.9897179E-03
0.2964075E 06 T*M	0.9869428E-03	0.2332457E-02
0.3705094E 06 T*M	0.2562972E-03	0.5569006E-04
0.4446113E 06 T*M	0.6848981E-04	0.1190936E-04
0.5187131E 06 T*M	0.1170814E-04	0.2125601E-05
0.5928150E 06 T*M	0.4186189E-05	0.3054914E-06
0.6669169E 06 T*M	0.8725294E-06	0.3474054E-07
0.7410188E 06 T*M	0.1570159E-06	0.3095672E-08
0.8151206E 06 T*M	0.2410821E-07	0.2149688E-09
0.8892225E 06 T*M	0.3136497E-06	0.1160185E-10
0.9633244E 06 T*M	0.3442864E-09	0.4860910E-12

DADOS DO NAVIO
COMPRIMENTO EM M 307.000
BOCA EM M 47.500
CALADRE EM M 19.500
LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
CB 0.8000
CW 0.8800
VELOCIDADE EM NCS 16.0000
IA EM TON2** 0.4846999E 09
IF EM TON2** 0.5744499E 09
DESLOCAMENTO EM TON 0.1504700E 06
LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
NUMERO DE FROUDE 0.1499861E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.0553469E 05 T*M	0.7462484E-01	0.2244633E-01
0.1670594E 06 T*M	0.1258660E-01	0.3209655E-01
0.2506041E 06 T*M	0.2494693E-01	0.6612336E-01
0.3041388E 06 T*M	0.5491129E-01	0.1442472E-01
0.4176734E 06 T*M	0.1293472E-01	0.2992436E-04
0.5012081E 06 T*M	0.3042245E-04	0.5221387E-05
0.5147428E 06 T*M	0.6560665E-01	0.7177812E-01
0.6652775E 06 T*M	0.1224734E-01	0.7550176E-07
0.7918122E 06 T*M	0.1918777E-01	0.5987354E-01
0.8553469E 06 T*M	0.2452412E-07	0.5549173E-09
0.920616E 06 T*M	0.2226552E-01	0.1267510E-01
0.9849416E 07 T*M	0.2275713E-09	0.21163E-01

DADOS DO NAVIC
 COMPRIMENTO EM M 313.000
 BOCA EM M 48.000
 CALADOC EM M 19.500
 LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CW 0.8200
 VELOCIDADE EM NDS 16.0000
 IA EM TON**2 0.5517998E 09
 IF EM TON**2 0.6 39999E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.2086100E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERO DE FROULE 0.1485415E 00

MOMENTO	PCS DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.9327844E 05 T*M	0.6407154E-01	0.158168E-01
0.1865569E 06 T*M	0.9687483E-01	0.2580960E-01
0.2798353E 06 T*M	0.1774953E-02	0.4715337 -03
0.3731138E 06 T*M	0.3627304E-01	0.9274445E-04
0.4663922E 06 T*M	0.7870817E-04	0.1647055E-04
0.5596706E 06 T*M	0.1644014E-01	0.2511635E-05
0.6529491E 06 T*M	0.3009416E-01	0.2422655E-01
0.7462275E 06 T*M	0.4571971E-01	0.1849679E-01
0.8395059E 06 T*M	0.5618288E-01	0.1025279E-01
0.9327844E 06 T*M	0.9511076E-01	0.3979816E-01
0.1026063E 07 T*M	0.4282557E-01	0.11104E-01

DADOS DO NAVIO

COMPRIMENTO EM M 328.000
 BOCA EM M 53.000
 CALADOC EM M 20.000
 LCM EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCN EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.8000
 CW 0.8500
 VELOCIDADE EM NCS 16.0000
 IA EM TON**2 0.6586560E 09
 IF EM TON**2 0.7800000E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.2267500E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERO DE PROUSE 0.1451052E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TOSAMENTO
0.1062486E 06 T*M	0.6913424E-01	0.1733204E-01
0.2124971E 06 T*M	0.1124621E-01	0.2635055E-02
0.3187457E 06 T*M	0.2235148E-02	0.5085471E-03
0.4249343E 06 T*M	0.5016155E-03	0.1101516E-03
0.5312428E 06 T*M	0.1215732E-03	0.2154947E-04
0.6374914E 06 T*M	0.2312927E-04	0.3375524E-05
0.7437399E 06 T*M	0.6308458E-05	0.4025086E-06
0.8499385E 06 T*M	0.1171078E-06	0.3573643E-07
0.9562571E 06 T*M	0.1914514E-06	0.2551544E-08
0.1062465E 07 T*M	0.2315307E-07	0.1109707E-09
0.1168733E 07 T*M	0.2414115E-08	0.3840466E-11
0.1274921E 07 T*M	0.2046500E-09	0.9552674E-13

DADOS DO NAVIO

COMPRIMENTO EM M 330.000
 BOCA EM M 53.000
 CALADOC EM M 24.000
 LCG EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 LCR EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CR 0.8000
 CM 0.8800
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 IA EM TON**M**2 0.7733668E 09
 IF EM TON**M**2 0.9365998E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.2630300E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERO DE FROCC 0.1446649E 00

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMINIO
0.123998E 06 T*M	0.4453123E-01	0.1251967E-01
0.247796E 06 T*M	0.5401090E-02	0.1528788E-02
0.271994E 06 T*M	0.8547115E-03	0.2554620E-03
0.495993E 06 T*M	0.1578561E-03	0.4265702E-04
0.619991E 06 T*M	0.2940663E-04	0.5620956E-05
0.743998E 06 T*M	0.4718415E-05	0.5230004E-06
0.867998E 06 T*M	0.6000155E-06	0.3306693E-07
0.991998E 06 T*M	0.5833381E-07	0.1392333E-08
0.1115198E 07 T*M	0.4263246E-08	0.3665727E-10
0.123997E 07 T*M	0.2319625E-09	0.7051252E-12

DAOS DO NAVIO

COMPRIMENTO EM M 330.000
 BOCA EM M 53.000
 CALADC EM M 20.000
 LCG EM PERCENTAGM DE L 2.0000
 LCB EM PERCENTAGEM DE L 2.0000
 CB 0.2000
 CW 0.8500
 VELOCIDADE EM NOS 16.0000
 IA EM TON**#2 0.7000001 09
 IF EM TON**#2 0.2533998E 09
 DESLOCAMENTO EM TON 0.2443900E 06
 LIMITE DE PROBABILIDADE 0.9999999E-09
 NUMERC DE FROUDE 0.1446649E 00

PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO

MOMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO ALQUEBRAMENTO	PROB DE SER EXCEDIDO NO TUSAMENTO
0.1154481E 06 T*M	0.5911548E-01	0.1471730E-01
0.2306903E 06 T*M	0.8556429E-02	0.1998844E-02
0.3463444E 06 T*M	0.1549982E-02	0.3556083E-03
0.4617925E 06 T*M	0.3203400E-03	0.6794507E-04
0.5772406E 06 T*M	0.7045201E-04	0.1091567E-04
0.6926888E 06 T*M	0.146114E-04	0.1316674E-05
0.8081369E 06 T*M	0.2605029E-05	0.1141883E-06
0.9235850E 06 T*M	0.3609619E-06	0.6972031E-06
0.1039033E 07 T*M	0.4469512E-07	0.2961302E-07
0.1154481E 07 T*M	0.4158771E-08	0.8701361E-11
0.1269929E 07 T*M	0.3047436E-09	0.1765177E-12