


TRANSPORTE DE ESTRUTURAS OFFSHORE SOBRE Balsa

GERSON SALLES VERLANGIERI

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

Aprovada por:



Prof. Agustin Juan Ferrante, Ph.d.  
(Presidente)



Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken, D.Sc.



Prof. Edison Castro Prates de Lima, D.Sc.



Eng. Adilson Carvalho Benjamin, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 1992

VERLANGIERI, GERSON SALLES

Transporte de Estruturas Offshore Sobre Balsa  
[Rio de Janeiro] 1992

IX, 126 p. 29.7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia  
Civil, 1992)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Transporte Oceânico      2. Estrutura Offshore

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Ao Guilherme

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Agustin Juan Ferrante pela orientação, compreensão, apoio e confiança.

Ao Eng. Vitor Giordani Maciel e à Petrobrás pela oportunidade de elaborar este trabalho.

À minha esposa Laura pela paciência , compreensão , carinho e incentivo.

Aos meus pais pelo estímulo e interesse.

Aos meus sogros Dr. Duilio e D. Lourdinha pelo apoio, interesse e incentivo, fundamentais para a realização deste trabalho.

À Eliete, pelo auxílio na datilografia.

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

## **TRANSPORTE DE ESTRUTURAS OFFSHORE SOBRE Balsa**

**GERSON SALLES VERLANGIERI**

Maio de 1992

Orientador: Prof. Dr. Agustin Juan Ferrante, Ph.D.

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho analisa o comportamento de estruturas do tipo jaqueta e convés quando transportadas em balsas oceânicas. Inicialmente foram apresentados os fundamentos teóricos relacionados com este tipo de problema. As análises, realizadas com base na teoria probabilística, foram feitas para cinco conjuntos balsa/estrutura, com dois aproamentos e em 15 estados de mar. Foram feitas comparações entre os resultados obtidos considerando-se balsa rígida e flexível e determinados os períodos mais críticos dos espectros de mar. Ao final foram feitas considerações sobre a necessidade de uma análise estrutural dinâmica.

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

## TRANSPORTATION OF OFFSHORE STRUCTURES ON DECK BARGES

GERSON SALLES VERLANGIERI

May, 1992

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Agustin Juan Ferrante, Ph.D.

Department: Civil Engineering

This work deals with the structural behaviour of offshore structures like jacket and deck during transportation on deck barges. Initially, a theoretical basis related to this kind of problem is presented. The analyses, founded in a probabilistic theory, were performed considering 5 sets of barge/structure in 2 headings and 15 sea states. The results from a flexible barge analysis and from a rigid barge analysis were compared. Also the critic sea state mean period was determined. At the end, some considerations related to the dynamic structural analysis necessity are presented.

# ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
I.1 - Geral .....	1
I.2 - Organização da Tese .....	6
CAPÍTULO II - O MODELO DO MAR .....	7
II.1 - Origem e Propagação das Ondas Oceânicas .....	7
II.2 - Modelo de Mar para Comportamento de Curta Duração .....	13
II.3 - Espectro Pontual .....	20
II.4 - Espectro Direcional .....	25
II.5 - Modelos Matemáticos de Espectros .....	26
CAPÍTULO III - FORÇAS E MOVIMENTOS .....	29
III.1 - Introdução .....	29
III.2 - Equações do Movimento .....	31
III.3 - Forças Devidas ao Fluido .....	36
III.3.1 - Forças Hidrostáticas .....	38
III.3.2 - Forças Hidrodinâmicas .....	39
III.3.3 - Cálculo das Forças .....	45

CAPÍTULO IV - ANÁLISE ESTRUTURAL .....	48
IV.1 - Introdução .....	48
IV.2 - Espectro de Resposta de Esforço Interno	
Solicitante .....	49
IV.3 - Verificação da Resistência .....	54
CAPÍTULO V - ANÁLISES REALIZADAS .....	56
V.1 - Introdução .....	56
V.2 - Descrição das Análises .....	57
V.3 - Modelos Utilizados .....	59
V.4 - Resultados .....	70
V.4.1 - Razões de Tensões Máximas .....	70
V.4.2 - Distribuição de Carregamentos .....	79
V.5 - Comentários .....	89
V.5.1 - Jaqueta PCP3 / Balsa BS3 .....	89
V.5.2 - Jaqueta PAB1 / Balsa BGL2 .....	91
V.5.3 - Jaqueta PAB2 / Balsa I650 .....	93
V.5.4 - Jaqueta IMPALA / Balsa BS3 .....	94
V.5.5 - Convés PEO / Balsa BGL2 .....	96
V.5.6 - Carregamentos Dimensionantes .....	97
CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DINÂMICA	
ESTRUTURAL .....	98
VI.1 - Introdução .....	98
VI.2 - Formulação do Problema .....	98



VI.3 - Períodos Naturais de Vibração .....	103
VI.4 - Conclusão .....	108
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES .....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
ANEXO .....	116

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### I.1 - GERAL

Com o advento da exploração de campos petrolíferos em águas profundas, o volume de recursos necessários aumentou consideravelmente, implicando em estudos de viabilidade técnica e econômica com várias alternativas de desenvolvimento do campo. Em lâminas d'água até 300 metros, as plataformas fixas tipo jaquetas são as mais empregadas. A partir dessa profundidade, as estruturas fixas complacentes e os sistemas flutuantes mostram-se bastante indicados.

Muitos projetos de exploração de óleo só se tornam viáveis se os custos de fabricação das estruturas forem bastante reduzidos, implicando algumas vezes em que o local da fabricação fique muito distante do local da instalação. Geralmente, as estruturas fixas são transportadas até o local da instalação através de balsas, como mostrado na figura I.1, podendo chegar a alguns meses o tempo necessário para tal. Durante a viagem, o conjunto balsa/estrutura é submetido às forças ambientais de onda, vento e corrente, respondendo a essas solicitações oscilando em inúmeras direções e dando

origem às forças inerciais e tensões/deformações nos elementos estruturais do sistema.

A importância que o transporte pode ter no dimensionamento de uma estrutura e sua amarração na balsa pode ser avaliada pelos seguintes exemplos:

- em 1982, a fixação da jaqueta da plataforma de Namorado 1 (PNA-1) colapsou durante uma tempestade, acarretando a perda da estrutura.
- a jaqueta da plataforma de Albacora 1 (PAB-1) apresenta 22,3% de seus elementos estruturais dimensionados pela condição de transporte.

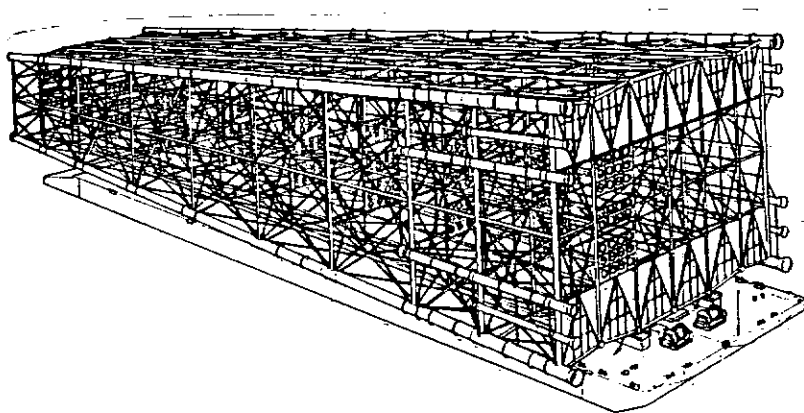


Fig. I.1 - JAQUETA SOBRE Balsa

A condição de transporte é satisfeita quando são atendidos os critérios navais e estruturais. Os critérios navais são assegurados através de estudos de estabilidade, enquanto os critérios estruturais, através de estudos de tensão máxima e vida à fadiga dos elementos.

O início da análise do transporte se dá com a escolha da rota a ser seguida, o que determina os estados de mar a serem enfrentados, os quais gerarão as forças inerciais. Alguns aspectos importantes na orientação dessa escolha são:

- correntes favoráveis para abreviar o tempo da viagem;
- condições ambientais extremas como tempestades tropicais, ventos monções, furacões, etc.;
- possibilidade de abrigo em caso de condição ambiental extrema.

Os dados ambientais podem ser obtidos através de bibliografia [1] ou em estudos meteo-oceanográficos realizados por empresas especializadas. A seguir, são feitas as análises navais e, posteriormente, as estruturais.

Nas análises navais, a determinação das oscilações da embarcação é feita através da dinâmica de corpos rígidos por intermédio de uma análise estocástica, visto que o mar é de natureza aleatória, onde são obtidos os deslocamentos,

velocidades e acelerações do centro de gravidade da embarcação carregada.

Nas análises estruturais existe dúvida quanto à necessidade da consideração da flexibilidade (deformação) da embarcação. Em vista disso, podem ser criadas duas abordagens para o problema da determinação das tensões/deformações nos elementos estruturais:

- a) Embarcação rígida - considera a estrutura transportada flexível e a embarcação rígida (indeformável);
- b) Embarcação flexível - considera tanto a embarcação quanto a estrutura transportada flexíveis.

O custo de computação dispendido na análise depende da abordagem escolhida.

Sob o aspecto estatístico, essas abordagens podem ser semi-determinísticas ou estocásticas. Quando semi-determinísticas, após a determinação dos movimentos são calculadas as forças inerciais baseadas nas respostas máximas dos movimentos nos seis graus de liberdade e calculadas as tensões/deformações nos elementos estruturais. A natureza semi-determinística vem do fato que as

tensões/deformações são determinadas sem a aplicação da teoria das probabilidades. Quando estocásticas, as tensões/deformações são determinadas para diversas ondas unitárias regulares e através da teoria da probabilidade, determinados os seus valores máximos.

Outra dúvida que surge durante uma análise estrutural com embarcação flexível é relativa à consideração do efeito dinâmico da deformação da estrutura, ou seja, as acelerações de deformação. Sob este aspecto, a determinação das tensões/deformações pode ser estática ou dinâmica.

Este trabalho pretende avaliar a importância da consideração da flexibilidade da balsa no dimensionamento das estruturas fixas. Para tanto, serão analisados 4 tipos de jaquetas e 1 convés, transportados sobre a balsa mais indicada para a estrutura em questão. Serão feitas verificações de resistência dos elementos estruturais para balsas rígida e flexível e seus resultados serão comparados. A determinação das tensões/deformações atuantes será feita através de uma análise estática estocástica. Entretanto, serão feitas considerações relativas à necessidade de uma análise dinâmica de corpo flexível.

## I.2 - ORGANIZAÇÃO DA TESE

A organização deste trabalho é tal que o tema da formação das ondas oceânicas e dos estados do mar é tratado no capítulo II.

O capítulo III traz a formulação das forças hidrodinâmicas atuantes no casco da embarcação bem como da determinação dos movimentos de corpo rígido.

Os procedimentos adotados na análise estrutural são apresentados no capítulo IV.

O capítulo V apresenta os resultados comparados e comentados, bem como uma descrição das análises efetuadas e das estruturas consideradas.

As considerações relativas à dinâmica de corpos flexíveis em meio fluido podem ser encontradas no capítulo VI.

O capítulo VII inclui as conclusões e sugestões para estudos futuros.

## CAPÍTULO II

### O MODELO DO MAR

#### II.1 - ORIGEM E PROPAGAÇÃO DAS ONDAS OCEÂNICAS

A mais importante característica do mar aberto é que embora seu comportamento seja irregular no tempo e no espaço, observa-se que dentro de uma área bastante ampla e freqüentemente para um período de meia hora ou mais, ele apresenta certa aparência característica, ou seja, apresenta grande constância estatística (estacionaridade). Então, para a maioria dos problemas relativos ao comportamento das embarcações e sistemas flutuantes, as ondas podem ser descritas matematicamente como sendo um processo aleatório ou estocástico, em condições de curta duração estatisticamente estacionária ("short-term"). Verifica-se que sob essas condições, as elevações das ondas seguem uma distribuição de densidade de probabilidade Gaussiana ou Normal, dentro de qualquer intervalo de tempo.

A análise do movimento de embarcações durante a navegação utiliza tais modelos matemáticos das ondas oceânicas, o qual considera a variabilidade das ondas no espaço e tempo, desde que as condições permaneçam constantes, permitindo estimar



dentro de uma área relativamente pequena, o comportamento de curta duração ("short-term") das embarcações.

Durante uma tempestade as ondas são geradas através da interação do vento e da superfície da água, envolvendo ao menos os processos físicos da fricção do ar com a água e dos campos locais de pressão. Considera-se que o sistema de ondas gerado é o resultado de muitas interações locais independentes, distribuídas no tempo e espaço. Cada ocorrência contribuirá para o sistema de onda existente com uma pequena perturbação local.

Dentro da área da tempestade, o crescimento e a propagação das ondas a partir dos muitos pontos de perturbação, são limitados e afetados pela interação entre as ondas e pelos processos de quebra das ondas. Entretanto, estudos mostram que se as amplitudes das ondas forem pequenas o princípio da superposição linear pode ser empregado para a propagação e dispersão do sistema de ondas. Uma análise dos registros das ondas oceânicas mostra que qualquer sistema local pode ser representado por uma soma de ondas regulares de vários comprimentos e direções.

Se o sistema de ondas que se propaga em um curto período de tempo é a soma de um grande número de contribuições aleatórias, todas essencialmente independentes, a elevação da

superfície pode ser representada por :

$$\zeta(x,y,t) = \sum_i \zeta_i(x,y,t) \quad (\text{II.1})$$

onde  $\zeta_i$  é a elevação da superfície de cada onda regular componente do sistema. Segundo as leis da estatística, sendo a água incompressível, o deslocamento vertical médio da superfície de cada uma dessas componentes em qualquer instante  $t$ , é zero e portanto, o valor médio para o sistema de onda,  $\langle \zeta(x,y,t) \rangle$ , também é zero. Entretanto, a variância de  $\zeta_i$  ou valor médio quadrático, que é a média de  $\zeta_i^2$ , denotado  $\langle \zeta_i^2 \rangle$ , é uma quantidade positiva que mede a severidade do mar. Um teorema fundamental da estatística afirma que a variância da soma de um conjunto de variáveis aleatórias independentes tende assintoticamente para a soma das variâncias das variáveis componentes consideradas como independentes,

$$\langle \zeta^2 \rangle = \sum \langle \zeta_i^2 \rangle \quad (\text{II.2})$$

Uma última conclusão estatística é consequência do teorema do limite central. Neste caso, o teorema implica que  $\zeta(x,y,t)$  terá uma função de densidade normal ou Gaussiana, mesmo que as componentes  $\zeta_i(x,y,t)$  não sigam uma distribuição normal. A importância deste resultado é que a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória normal é determinada, se sua média e variância forem conhecidas.

Portanto, se a variância da elevação da superfície de um sistema de onda com diversas componentes puder ser estimada, sua densidade de probabilidade como uma variável aleatória é conhecida.

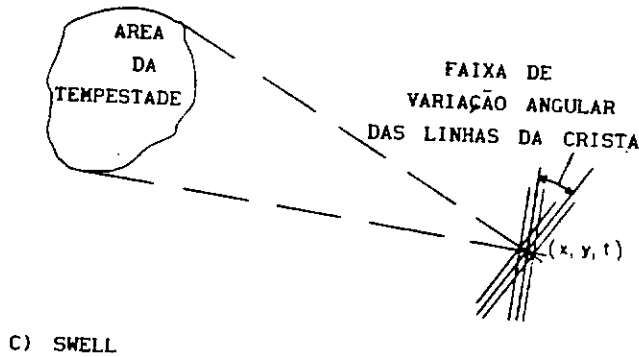
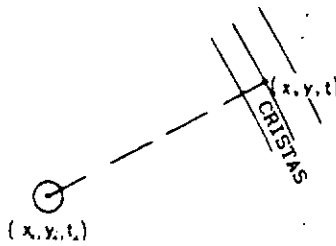
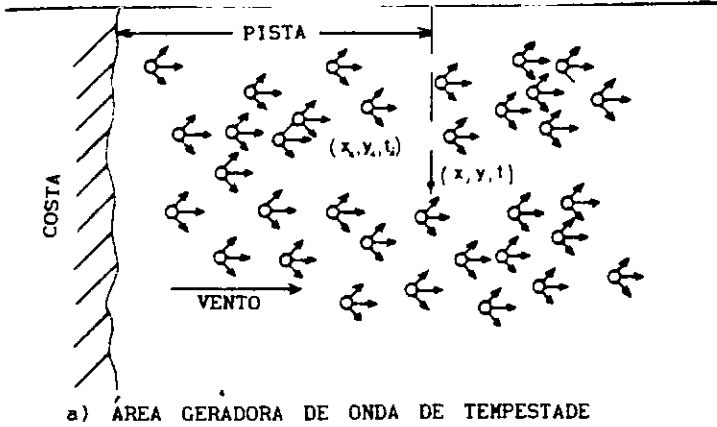


Fig. II.1 - GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS ONDAS OCEÂNICAS

A figura II.1a representa uma área geradora de ondas. Considera-se que as perturbações são geradas pela interação do vento e a superfície do mar ao longo da área da tempestade a partir do instante em que o vento começa a soprar sobre a região. O efeito que uma perturbação em  $(x_1, y_1, t_1)$  exerce em um ponto de observação  $(x, y, t)$  está representado na fig. II.1b. Desde que uma determinada perturbação no ponto  $(x_1, y_1)$  cria um sistema dispersivo de ondas de forma radial, em qualquer ponto de observação distante, tem-se a impressão de ser um sistema de ondas local, com crista longa ("long-crested waves"), vindo da direção do ponto de origem. Como ondas de comprimentos diferentes avançam com celeridades diferentes, as ondas mais longas chegarão primeiro ao ponto de observação e o comprimento médio observado da onda irá diminuir com o aumento do tempo. O deslocamento total da onda,  $\zeta$ , no ponto de observação será a soma dos efeitos de todos os distúrbios na área de geração que estão, a partir de uma linha perpendicular à direção do vento que passa pelo ponto de observação, na direção de onde o vento sopra. Devido à dispersão angular ("spreading"), os diversos sistemas de ondas virão de diferentes direções, e o sistema combinado geralmente apresentará ondas com crista curta ("short-crested waves").

Existindo na área geradora da tempestade um limite situado na direção de onde vem o vento, por exemplo a costa ou o próprio limite da tempestade, os sistemas de ondas

observados em diversos pontos apresentarão características diferentes, conforme estes pontos se aproximem desse limite, já que existirão menos perturbações incidindo sobre os diferentes pontos de observação. A distância que vai do ponto de observação ao limite da tempestade denomina-se pista ("fetch"). O intervalo de tempo compreendido entre o início da tempestade e o instante da observação é denominado duração ("duration"). Se as ondas forem observadas em um ponto fixo, a partir do início do vento, verifica-se um crescimento do sistema de onda com o aumento do tempo de observação. Se a velocidade do vento for constante, aumentando-se a duração e/ou a pista, a condição do mar por fim torna-se estatisticamente estável, sendo denominada totalmente desenvolvida ("fully developed"). Aumentos adicionais na duração e/ou pista não alteram de forma significativa as características estatísticas do padrão das ondas.

Se o ponto de observação estiver fora da área da tempestade, fig.II.lc, verifica-se que as ondas incidentes, denominadas "swell", apresentam uma pronunciada forma regular. As cristas das diversas séries de ondas tornam-se mais paralelas, à medida em que o ponto de observação se afasta da área de tempestade, resultando que os comprimentos indetectáveis das cristas das ondas tornam-se maiores, quando comparados aos comprimentos das ondas ("long-crested wave"). A faixa de frequências das ondas incidentes é limitada

pela distância à área geradora ou pela pista; assim, quanto maior a distância, menor a largura de banda das frequências. Essas características são responsáveis pela aparência regular característica do "swell".

O estado de mar de longa duração ("long-term") pode ser representado por vários estados de mar de curta duração ("short-term") em diferentes pontos, ao longo da área em consideração e a incrementos de tempo regulares.

## II.2 - MODELO DE MAR PARA COMPORTAMENTO DE CURTA DURAÇÃO

Conforme já dito, em um determinado instante, o fenômeno da onda em uma área particular é considerado como a soma de inúmeras ondas regulares, cada uma deslocando-se em sua própria direção e com sua própria celeridade.

Considere inicialmente o caso de um padrão de onda observado de um ponto fixo ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ), desconsiderando-se a direcionalidade. Isto é equivalente a supor que todas as ondas se deslocam na mesma direção, resultando em uma onda irregular de crista longa observada em um ponto fixo. Segundo St. Denis e Pierson [2], cada uma das inúmeras ondas componentes tem uma frequência definida, um ângulo de fase

aleatório e pode ser representada pela seguinte expressão :

$$\zeta_i(t) = \bar{\zeta}_i \cos(-\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (\text{II.3})$$

onde  $\bar{\zeta}_i$  é a amplitude correspondente de uma onda componente de frequência  $\omega_i$  e fase aleatória  $\varepsilon_i$ .

O sistema de onda total é considerado como sendo o somatório de um número infinito de componentes independentes,

$$\zeta(t) = \sum_i \bar{\zeta}_i \cos(-\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (\text{II.4})$$

Mostra-se bastante conveniente representar estas componentes em termos de uma função denominada espectro de variância,  $S(\omega)$ . Esta função também é denominada espectro pontual, já que a onda é observada em um ponto fixo, sem consideração da direcionalidade da mesma. A variância de todas as ondas componentes dentro de uma faixa infinitesimal de frequência  $\delta\omega$ , centrada em  $\omega_i$ , é dada por :

$$\langle \zeta_i(t)^2 \rangle = S(\omega_i) \delta\omega \quad (\text{II.5})$$

Por fim, no limite para  $\delta\omega$  tendendo a zero, a variância se reduz à variância de uma única componente harmônica infinitesimal.

Em geral, a variância de uma função contínua com média igual a zero é dada por

$$\langle \zeta(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta^2(t) dt \quad (\text{II.6})$$

onde  $\langle \rangle$  indica valor médio.

Demonstra-se para o caso de uma única onda harmônica que :

$$\langle \zeta(t)^2 \rangle = 1/2 \bar{\zeta}^2 \quad (\text{II.7})$$

ou seja, a variância da elevação de uma onda senoidal é igual à metade do quadrado de sua amplitude. Portanto, desejando-se obter as amplitudes das ondas componentes, pode-se substituir (II.5) na (II.7), obtendo-se :

$$1/2 \bar{\zeta}_1^2 = S(\omega_1) \delta\omega \quad (\text{II.8})$$

e a amplitude da onda componente é :

$$\bar{\zeta}_1 = \sqrt{2 S(\omega_1) \delta\omega} \quad (\text{II.9})$$

no limite para  $\delta\omega$  tendendo a zero. Obviamente, a amplitude não pode ser avaliada diretamente, mas pode ser aproximada quando  $\delta\omega$  for bastante pequeno (ver fig.II.2)



Como a energia total de uma onda de comprimento  $L_w$  é dada por :

$$1/2 \bar{\zeta}^2 \rho g L_w , \quad (\text{II.10})$$

o espectro  $S(\omega)$  que descreve a distribuição da variância de um sistema de onda entre as componentes, também pode ser considerado como uma distribuição de Energia/ $\rho g$ . Por essa razão, as vezes ele é denominado espectro de energia.

Porém, mais importante do que a amplitude da onda componente é a variância total do sistema de onda, normalmente designada  $E$ , que representa uma boa avaliação da severidade do mar.

$$E \equiv \langle \zeta(t)^2 \rangle \quad (\text{II.11})$$

Visto que a variância da soma de um grande número de variáveis aleatórias independentes se aproxima da soma das variâncias dessas variáveis, pode-se escrever :

$$E \equiv \langle \zeta(t)^2 \rangle = \sum_i \langle \zeta_i(t)^2 \rangle \quad (\text{II.12})$$

ou integrando (II.5) e substituindo,

$$E = \int_0^{\infty} S(\omega) \delta\omega \quad (\text{II.13})$$

Isto é, a área sob a curva do espectro é igual à variância  $E$  do sistema de onda.

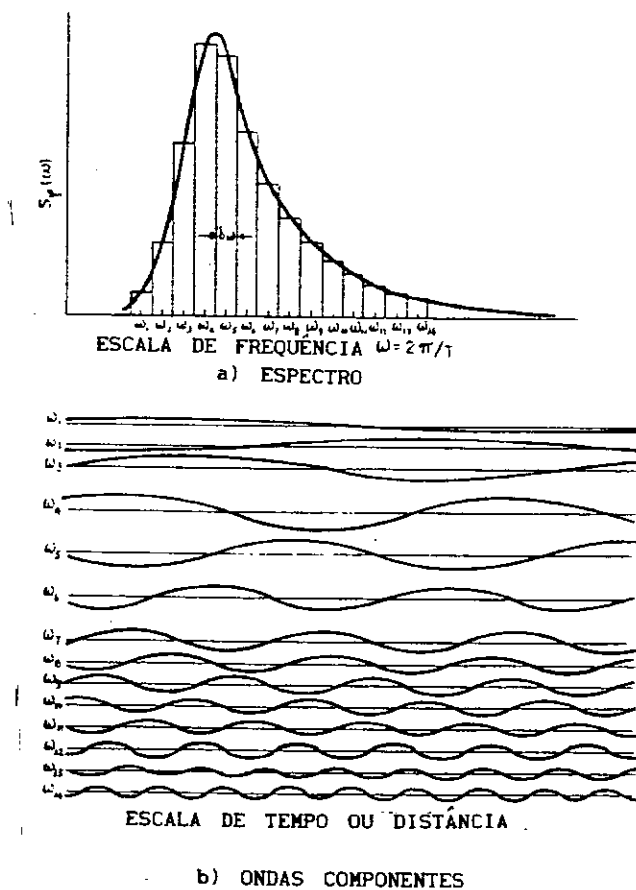


Fig. II.2 - ESPECTRO DE VARIÂNCIA E ONDAS COMPONENTES

A figura II.2 representa um espectro de variância típico. As áreas dos retângulos elementares,  $S(\omega_i)\delta\omega$ , representam a variância das componentes da onda.

Tais áreas, no limite, também representam a amplitude das componentes. Contudo, quando se considera um grande número de componentes, digamos 15 a 20, obtém-se um modelo razoável de mar unidirecional ("long-crested"). Já que um retângulo em particular representa a variância naquela faixa de

frequências, uma onda com a frequência indicada possuirá a mesma variância do infinito número de componentes dentro daquela faixa. Portanto, a soma algébrica dessas 15 ou 20 ondas componentes, representada na figura 8, fornecerá um modelo que, além de ser semelhante ao registro que deu origem ao espectro, também apresenta a mesma variância total. Ele também possuirá muitas das mesmas propriedades estatísticas, as quais são de grande importância no estudo do movimento de embarcações.

Embora a variância  $E$ , obtida a partir de um espectro pontual, forneça uma boa avaliação da severidade de qualquer mar, um estado de mar pode ser melhor caracterizado se considerada a direcionalidade das ondas componentes através do espectro direcional.

A elevação da superfície de uma onda que se propaga segundo um ângulo  $\mu$  em relação ao eixo  $x$ , pode ser descrita pela seguinte equação geral :

$$\zeta(x,y,t) = \bar{\zeta} \cos [k(x \cos\mu + y \operatorname{sen}\mu) - \omega t + \varepsilon] \quad (\text{II.14})$$

onde  $k = 2\pi/L_w$  ;  $\omega$  é a frequência da onda e  $\varepsilon$  é o ângulo de fase.

A equação geral para um sistema de onda cujas componentes se propagam em diferentes direções  $\mu$  é :

$$\zeta(x, y, t) = \sum_i \sum_j \bar{\zeta}_{ij} \cos [k_i (x \cos \mu_j + y \operatorname{sen} \mu_j) - \omega_i t + \varepsilon_{ij}] \quad (\text{II.15})$$

que avaliada no ponto ( $x = 0, y = 0$ ) fornece :

$$\zeta(t) = \sum_i \sum_j \bar{\zeta}_{ij} \cos (-\omega_i t + \varepsilon_{ij}) \quad (\text{II.16})$$

Então,

$$\langle \zeta(t)^2 \rangle \equiv E = 1/2 \sum_i \sum_j \bar{\zeta}_{ij}^2 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(\omega, \mu) d\mu d\omega \quad (\text{II.17})$$

O espectro direcional,  $S(\omega, \mu)$ , determina a distribuição das variâncias das componentes do sistema de onda por frequência e direção. Assume-se que cada uma das inúmeras ondas componentes apresenta frequência e direção definidas e ângulo de fase aleatório. As amplitudes das ondas componentes podem ser escritas, no limite para  $\delta\omega$  e  $\delta\mu$  tendendo a zero, como :

$$\bar{\zeta}_{ij} = \sqrt{2 S(\omega_i, \mu_j) \delta\omega \delta\mu} \quad (\text{II.18})$$

## II.3 - ESPECTRO PONTUAL

Um registro típico de ondas observadas em um ponto fixo é uma função do tempo, irregular e contínua, que jamais se repete. A fig.II.3 representa um trecho de comprimento  $T$  de tal registro, que assumindo-se como um processo com média zero, apresenta variância dada por :

$$\langle \zeta(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta^2(t) dt \quad (\text{II.6})$$

Como a área sob o espectro do ponto,  $E$ , é igual a variância do sistema, então, se um espectro é conhecido, a variância pode ser facilmente obtida integrando-se o espectro. Por outro lado, se a variância for computada diretamente do registro de onda, obtém-se a área sob o espectro, mas não sua forma.

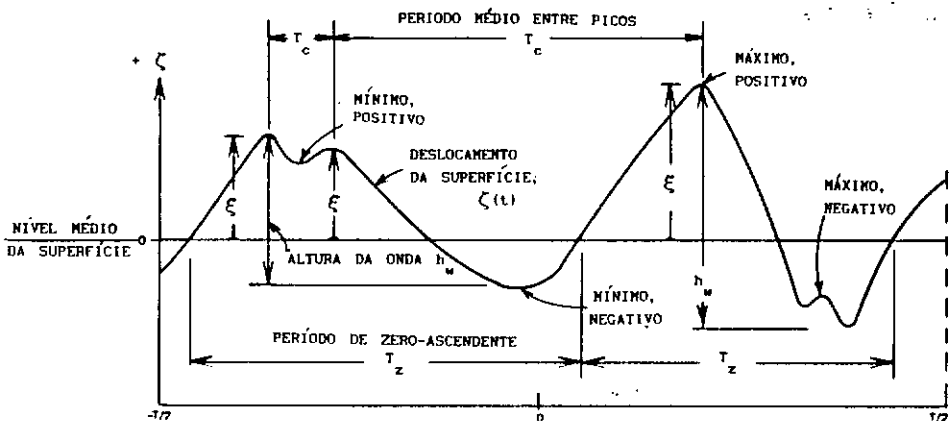


Fig. II.3 - DEFINIÇÃO DE TERMOS

Uma distribuição normal é completamente definida quando sua média e variância são conhecidas. Neste caso a média é zero , a variância é dada por E e a função de densidade de probabilidade é dada por :

$$p(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi E}} \exp (-\zeta^2/2E) \quad (\text{II.19})$$

Convém ressaltar que não é o espectro de energia que segue uma distribuição de Gauss e sim o registro (histograma) da elevação da superfície da onda. O histograma das alturas das ondas de um mar irregular segue, de forma aproximada, a distribuição de Rayleigh.

Como funções matemáticas os espectros são sempre positivos mas com área finita E. Uma área infinita significaria um deslocamento médio quadrático da superfície infinito. Espectros pontuais crescem para um ou dois picos e depois desaparecem nas altas frequências. A frequência modal correspondente ao maior pico do espectro é denominada  $\omega_m$ , e o período associado  $2\pi/\omega_m$ ,  $T_m$ .

Há uma série de parâmetros valiosos para caracterizar a aparência visual do registro do mar que podem ser calculados a

partir dos momentos espectrais

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (\text{II.20})$$

sendo  $n$  um número inteiro. Em particular, a área  $m_0$  é a variância, ou  $E$ . Estes parâmetros incluem o período médio de zero-ascendente, período médio de pico a pico, comprimento de onda médio e altura de onda média. Essas grandezas estão indicadas na fig. II.3.

Período médio das ondas componentes,

$$T_{-1} = \frac{\int_0^{\infty} T S(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (\text{II.21})$$

Período correspondente à frequência média das ondas componentes,

$$T_1 = 2\pi \left( \int_0^{\infty} \omega S(\omega) d\omega / m_0 \right)^{-1} = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (\text{II.22})$$

Período médio de zero-ascendente de  $\zeta(t)$ ,

$$T_z = 2\pi \sqrt{m_0/m_2} \quad (\text{II.23})$$

Período médio entre picos,

$$T_C = 2\pi\sqrt{m_2/m_4} \quad (\text{II.24})$$

Comprimento de onda médio entre zero-ascendentes,

$$\langle L_\omega \rangle = \frac{g}{2\pi} T_z T_C \quad (\text{II.25})$$

O máximo do sistema, representado pela variável randômica  $\xi$ , apresenta densidade de probabilidade dada por [3]:

$$p(\Xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \varepsilon \exp[-(\Xi/\varepsilon)^2/2] + \Xi \sqrt{1 - \varepsilon^2} \exp[-\Xi^2/2] I \right\} \quad (\text{II.26})$$

onde o parâmetro adimensional  $\Xi$  é dado por :

$$\Xi = \frac{\xi}{\sqrt{m_0}} ;$$

o parâmetro de largura espectral  $\varepsilon$  por :

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} ; \quad (\text{II.27})$$

e a função  $I$  por

$$I = \int_{-\infty}^{\Xi\sqrt{1-\varepsilon^2}/\varepsilon} \exp[-v^2/2] dv$$

sendo  $v$  uma variável auxiliar.



O parâmetro de largura espectral,  $\varepsilon$ , também pode ser escrito como :

$$\varepsilon = \sqrt{1 - (T_C/T_Z)^2} \quad (\text{II.28})$$

que é função da razão do período médio entre picos e o período médio entre zero-ascendentes. Quando não há máximos múltiplos em qualquer intervalo do tempo,  $T_C = T_Z$ ,  $\varepsilon = 0$  e o espectro é chamado de banda estreita. Nesse caso, a densidade de probabilidade de máximos segue a distribuição de Rayleigh. De maneira oposta, quando há um grande número de máximos,  $T_C \ll T_Z$ ,  $\varepsilon \rightarrow 1$  e o espectro é chamado de banda larga. A densidade de probabilidade neste caso segue a distribuição de Gauss.

Assim como o histograma das alturas das ondas de um mar irregular segue, de forma aproximada, a distribuição de Rayleigh, o mesmo ocorre com as amplitudes de movimento da embarcação. Nesses casos, os valores extremos das amplitudes podem ser aproximados por :

$$\sqrt{2 \ln N} m_0 \quad (\text{II.29})$$

onde  $N$  é o número de ocorrências esperadas.

Uma outra medida de intensidade normalmente utilizada é a estimativa do valor médio dos  $1/n$  maiores máximos do estado de mar considerado. O valor médio estatístico dos valores de  $\Xi$  maiores do que  $\Xi_{1/n}$  é dado por :

$$\langle \Xi_{1/n} \rangle = n \int_{\Xi_{1/n}}^{\infty} \Xi p(\Xi) d\Xi \quad (\text{II.30})$$

Na prática, a medida da altura da onda de um mar aleatório mais comumente utilizada é a altura significativa,  $h_{1/3}$  ou  $h_s$ , que para  $\varepsilon = 0$  vale :

$$\langle (h_w)_{1/3} \rangle = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (\text{II.31})$$

#### II.4 - ESPECTRO DIRECIONAL

Todos os parâmetros anteriormente definidos para o espectro do ponto podem também ser aplicados para o espectro direcional. Entretanto, é necessário incluir mais um parâmetro para caracterizar as quantidades direcionais. Usualmente, o espectro direcional  $S(\omega, \mu)$  é dividido em dois fatores, um função da frequência e outro função da direção:

$$S(\omega, \mu) = S(\omega)M(\mu) \quad (\text{II.32})$$

onde  $S(\omega)$  é o espectro do ponto e  $M(\mu)$  é a chamada função de

espalhamento. É prática usual adotar

$$M(\mu) = \frac{1}{\mu_s} \cos^n\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right) \frac{\pi}{2} \quad ; \text{ para } -\mu_s < \mu < \mu_s \quad (\text{II.33})$$

onde  $\mu_w$  é o ângulo entre a onda componente e a direção da onda dominante e  $\mu_s$  é o intervalo de variação dos ângulos  $\mu_s$  das ondas componentes para cada lado da direção predominante. Quando se adota  $n = 2$  e  $\mu_s = 90$  graus, a função de espraiamento é dita do cosseno ao quadrado e pode ser escrita como:

$$M(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\mu)$$

## II.5 - MODELOS MATEMÁTICOS DE ESPECTROS

Os modelos matemáticos dos espectros geralmente se baseiam em um ou mais parâmetros, como por exemplo, altura de onda significativa, período médio de zero-ascendente, fator de forma, etc. O espectro monoparamétrico mais comum é o de Pierson-Moskowitz, o qual utiliza como parâmetro a altura de onda significativa ou velocidade do vento. Os espectros bi-paramétricos mais utilizados são o de Bretschneider, Scott, ISSC e ITTC. o espectro de JONSWAP utiliza cinco parâmetros mas usualmente três desses parâmetros são mantidos constantes. Um modelo de espectro mais complexo foi desenvolvido por Ochi

e Humble baseado em seis parâmetros. É um espectro que apresenta dois picos, como por exemplo, um mar gerado por vento em combinação com "swell". Os modelos dos vários espectros podem ser encontrados na referência [4], de onde foi retirada a figura II.4.

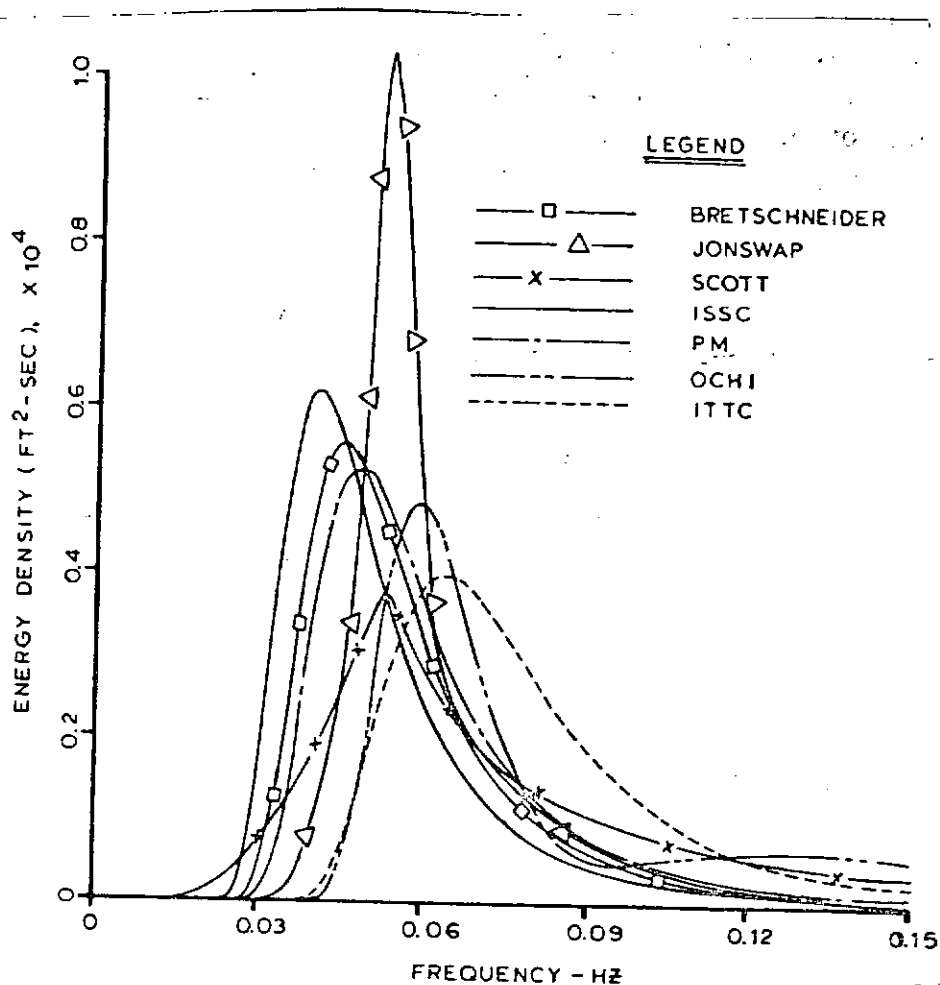


Fig. II.4 - EXEMPLO DE MODELOS DE ESPECTRO

Neste trabalho foi utilizado o espectro do ISSC, cuja forma é :

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

$$A = 173 (h_{1/3})^2 T_1^{-4}$$

$$B = 691 T_1^{-4}$$

onde  $h_{1/3}$  é a altura significativa em metros,  $T_1$  é o período médio em segundos e  $\omega$  é a frequência das ondas componentes em rad/seg.

## CAPÍTULO III

### FORÇAS E MOVIMENTOS

#### III.1 - INTRODUÇÃO

A resposta de uma balsa navegando é um fenômeno complexo que envolve a interação entre a dinâmica da embarcação e diversas forças hidrodinâmicas distintas. Tal resposta é obtida através da equação do movimento em vários graus de liberdade. No caso da embarcação se movendo numa série de ondas regulares, os deslocamentos de corpo rígido se dão em seis graus de liberdade. Isto é, o movimento pode ser considerado como uma composição de três movimentos de translação, "surge", "sway" e "heave" e três movimentos de rotação, "roll", "pitch" e "yaw".

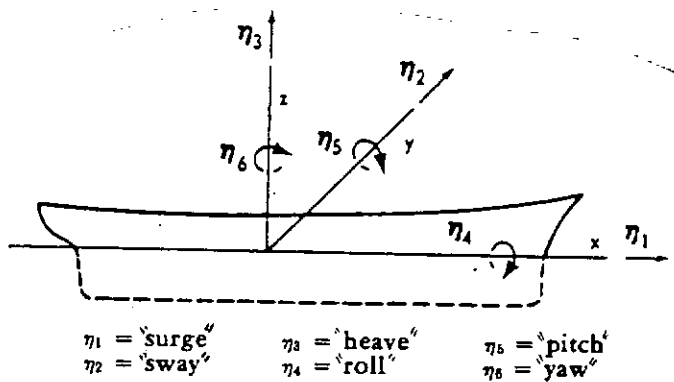


Fig. III.1 - MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO

Para uma casco de forma qualquer, a determinação dos movimentos resume-se na solução de um sistema de seis equações de movimento a seis incógnitas. Devido à presença de amortecimento não linear e forças de excitação e restauração não lineares, as equações são em geral não lineares. A solução geral dessas equações, considerando-se todas as não linearidades, pode ser obtida somente através de métodos numéricos, como por exemplo diferenças finitas ou elementos finitos. Entretanto, para embarcações esbeltas em estados de mar moderados, é possível assumir que os movimentos da embarcação serão pequenos e então desenvolver uma teoria linearizada. Para os casos usuais de balsas com simetria de casco bombordo/estibordo, o sistema de seis equações não lineares reduz-se a dois sistemas de três equações lineares. Os movimentos longitudinais ("surge", "heave" e "pitch") são desacoplados dos movimentos transversais ("sway", "roll" e "yaw"). As equações das forças induzidas pelas ondas são expressas em função das respostas dos movimentos e de coeficientes hidrodinâmicos determinados.

Existem duas abordagens para o problema da dinâmica dos corpos flutuantes: análise no domínio da frequência e análise no domínio do tempo.

A análise no domínio da frequência é efetuada para a solução linearizada, a qual permite estimar as respostas a uma

excitação randômica de onda através da formulação espectral. A limitação mais importante da abordagem na freqüência é que todas as não linearidades das equações do movimento devem ser substituídas por aproximações lineares. Por outro lado, a computação no domínio da freqüência é mais simples do que no domínio do tempo e os resultados são de interpretações mais simples e mais fáceis de se utilizar em análises subseqüentes.

A análise no domínio do tempo utiliza a integração numérica direta da equação do movimento, permitindo a inclusão de todas as não linearidades do sistema. Entretanto, essa análise apresenta a desvantagem de aumentar o tempo computacional e a complexidade dos resultados, tornando-os de difícil interpretação e aplicação.

Neste capítulo será apresentada de forma simplificada a formulação utilizada na solução do problema da interação do corpo flutuante com o meio fluido. Muito do apresentado baseia-se no trabalho de Salvensen, Tuck e Faltinsen [5].

### III.2 - EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Considere uma embarcação com aproamento qualquer, navegando a uma velocidade constante  $U_0$  em ondas regulares senoidais. Assume-se que os movimentos oscilatórios são lineares e harmônicos. Sejam  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $(x, y, z)$  e  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$



três sistemas de referência ortogonais.

O sistema  $(x_0, y_0, z_0)$  é fixo em relação à Terra, com a origem em uma posição qualquer. O sentido positivo de  $z_0$  é para cima e o plano  $x_0 - y_0$  é normalmente coincidente com o nível das águas calmas. O eixo  $x_0$  é normalmente orientado no sentido do deslocamento da embarcação. Este sistema é utilizado para definir o sistema de ondas incidentes.

O sistema  $(x, y, z)$  move-se com velocidade constante  $U_0$  na direção de  $x_0$  positivo, sendo denominado sistema de referência inercial. O plano  $x-y$  também é coincidente com o nível das águas calmas e o eixo  $z$  é positivo para cima. O eixo  $x$  é coincidente com o eixo  $x_0$ . A transformação do sistema  $(x_0, y_0, z_0)$  para o sistema móvel é dado por

$$\begin{aligned}x_0 &= x + U_0 t \\Y_0 &= y \\z_0 &= z\end{aligned}\tag{III.1}$$

O sistema  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  é fixo na embarcação e move-se com todos os deslocamentos dela. O plano  $x-y$  é coincidente com o plano da linha d'água da embarcação e  $\bar{x}$  é positivo em direção à proa.

Os movimentos da embarcação, três translações e três

rotações, são determinados pela orientação do sistema  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  em relação ao sistema  $x, y, z$ . Como a embarcação navega com velocidade constante  $U_0$  e com aproamento qualquer em relação às ondas (ângulo  $\mu$ ), a frequência de oscilação será alterada para a frequência de encontro da onda,

$$\omega_e = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U_0 \cos \mu = \omega_0 - k U_0 \cos \mu \quad (\text{III.2})$$

onde  $\omega_0$  é a frequência da onda regular.

As equações do movimento baseiam-se na segunda lei do movimento de Newton, que deve ser considerada em um sistema de coordenadas inercial. Mas as forças e momentos atuantes no corpo são definidos no sistema de eixos do corpo. Para se obter as equações do movimento no sistema de eixos do corpo, são aplicadas transformações que dão origem às chamadas equações de Euler para o movimento de corpo rígido, as quais são altamente não lineares. Devido a isso, em geral o estudo do movimento inicialmente lineariza tais equações.

A forma geral da equação básica linearizada do movimento em seis graus de liberdade, segundo os eixos do corpo é,

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{ij} \ddot{\eta}_k(t) = F_j(t) \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{III.3})$$

onde  $\Delta_{ij}$  são as componentes da matriz de massas generalizadas

da embarcação;  $\ddot{\eta}_k$  são as acelerações do modo k;  $F_j$  representa todas as forças e momentos atuantes no corpo na direção j. As quantidades  $\ddot{\eta}_k$  e  $F_j$  são funções harmônicas do tempo.

Para embarcações com simetria lateral, como é o caso das balsas, a equação (III.3) podem ser escrita como :

$$\begin{aligned}
 \Delta (\ddot{\eta}_1 + \bar{z}_c \ddot{\eta}_5) &= F_1 \\
 \Delta (\ddot{\eta}_2 - \bar{z}_c \ddot{\eta}_4 + \bar{x}_c \ddot{\eta}_6) &= F_2 \\
 \Delta (\ddot{\eta}_3 - \bar{x}_c \ddot{\eta}_5) &= F_3 \\
 I_{44} \ddot{\eta}_4 - I_{46} \ddot{\eta}_6 - \Delta \bar{z}_c \ddot{\eta}_2 &= F_4 \\
 I_{55} \ddot{\eta}_5 + \Delta (\bar{z}_c \ddot{\eta}_1 - \bar{x}_c \ddot{\eta}_3) &= F_5 \\
 I_{66} \ddot{\eta}_6 - I_{64} \ddot{\eta}_4 + \Delta \bar{x}_c \ddot{\eta}_2 &= F_6
 \end{aligned}
 \tag{III.4}$$

onde :  $F_j(t)$ ,  $j = 1, 2, 3$  são as forças totais nas direções  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  respectivamente

$F_j(t)$ ,  $j = 4, 5, 6$  são os momentos totais em relação aos eixos  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  respectivamente

$\Delta$  é a massa total da embarcação

$I_{jj}$ ,  $j = 4, 5, 6$  são momentos de inércia em relação aos eixos  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  respectivamente

$I_{46} = I_{64}$  = produto de inércia "roll-yaw"

$(\bar{x}_c, 0, \bar{z}_c)$  são as coordenadas do centro de gravidade da embarcação carregada no sistema de referência  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ .

$\ddot{\eta}_j(t)$  é a aceleração no grau de liberdade j, referenciado ao sistema de eixos  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$

Como visto,  $F_j$  e  $\ddot{\eta}_j$  foram considerados no sistema de referência do corpo.

Na formulação e resolução dos problemas hidrodinâmicos associados com o movimento de embarcações, geralmente é mais conveniente trabalhar no sistema de referência inercial. Para as equações do movimento, a determinação das forças, momentos e amplitudes dos movimentos é indiferente ao sistema de eixos utilizado, já que a distinção entre os dois sistemas foi perdida durante a linearização das equações.

Na teoria linear, a resposta da embarcação é linear com a amplitude da onda e apresenta frequência igual à frequência de encontro da onda. Como as ondas consideradas são lineares (Airy), as respostas  $\ddot{\eta}_j(t)$  serão senoidais e podem ser escritas na forma:

$$\ddot{\eta}_j(t) = \bar{\eta}_j \exp(i\omega_e t); \quad j=1,2,\dots,6 \quad (\text{III.5})$$

onde :  $\bar{\eta}_j$  é a amplitude da resposta  
 $\omega_e$  é a frequência de encontro

### III.3 - FORÇAS DEVIDAS AO FLUIDO

Neste ponto é interessante considerar as forças  $F_j(t)$  como:

$$F_j(t) = F_{c_j} + F_{H_j}(t) \quad (\text{III.6})$$

onde :  $F_{c_j}$  é a componente da força gravitacional atuando na direção  $j$   
 $F_{H_j}(t)$  é a componente da força devida ao fluido atuando na direção  $j$

As forças gravitacionais são devidas ao peso da embarcação carregada, aplicadas no centro de gravidade. Já que as forças médias gravitacionais são equilibradas pelas forças médias de empuxo, usualmente elas são combinadas com a parte hidrostática da força devida ao fluido, dando origem às forças hidrostáticas líquidas.

As forças hidrostáticas e hidrodinâmicas atuantes na embarcação são obtidas integrando-se a pressão do fluido sobre a porção submersa do casco. Então, as componentes das forças devidas ao fluido em cada um dos seis graus de liberdade pode ser obtida por:

$$F_{H_j}(t) = \int_S \int P(t) n_j ds \quad (\text{III.7})$$

onde  $P(t)$  é a pressão do fluido  
 $n_j$  é o vetor unitário generalizado, normal à  
superfície do casco, apontando para dentro  
 $S$  é a superfície molhada do casco

As componentes do vetor normal generalizado são iguais às normais usuais de superfície para os casos de translação ( $j=1,2,3$ ) e iguais aos momentos dos vetores normais unitários para os modos de rotação ( $j=4,5,6$ ). Conseqüentemente, pode ser escrito que:

$$(n_1, n_2, n_3) = \underline{n} \quad (\text{III.8})$$

$$(n_4, n_5, n_6) = \underline{r} \times \underline{n}$$

onde:  $\underline{n}$  é a normal unitária à superfície do casco  
 $\underline{r}$  é o vetor da origem a um ponto qualquer do casco  
 $= x \underline{i} + y \underline{j} + z \underline{k}$

Segundo a equação de Bernoulli, a pressão em um fluxo sem viscosidade e irrotacional é dada por

$$P = \frac{1}{2} \rho U_0^2 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi \times \nabla \Phi) - \rho g z \quad (\text{III.9})$$

onde :  $\rho$  é a densidade do fluido  
 $U_0$  é a velocidade de deslocamento da embarcação  
 $\Phi$  é o potencial de velocidade  
 $\nabla \Phi$  é o vetor de velocidade total que representa o  
fluxo fluido

A consideração de fluxo irrotacional e sem viscosidade permite o desenvolvimento de uma teoria linear. Para alguns movimentos ("Roll" e "Yaw") essa teoria não é satisfatória, sendo necessária a utilização de algum tipo de correção.

Como pode ser observado, a pressão apresenta uma contribuição hidrodinâmica (três primeiros termos) e outra hidrostática ( $\rho g z$ ). Introduzindo a expressão da pressão (III.9) na equação (III.7), as forças devidas ao fluido podem ser divididas em forças hidrostáticas e hidrodinâmicas,

$$F_{Hj} = F_{HSj} + F_{HDj}$$

onde :

$$F_{HSj} = (\text{hidrostática}) = -\rho g \int_S z n_j ds \quad (\text{III.10a})$$

$$F_{HDj} = (\text{hidrodinâmica}) = -\rho \int_S \left( \frac{1}{2} U_0^2 - \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \times \nabla \Phi \right) n_j ds \quad (\text{III.10b})$$

### III.3.1 - FORÇAS HIDROSTÁTICAS

Para se obter as forças hidrostáticas, deve-se determinar o valor da integral indicada na equação (III.10a), substituindo o valor de  $z$  por seu correspondente no sistema de eixos  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ . Considerar-se-á a superfície instantânea do

casco submerso que na teoria linear deve ser tomada apenas até a superfície das águas tranqüilas.

Como as forças hidrostáticas médias contrabalanceiam as forças médias gravitacionais, elas são combinadas fornecendo a força líquida hidrostática atuando no corpo na direção  $j$ ,  $F_{HSj}^* = F_{Gj} + F_{HSj}$  ( $j=1,2,\dots,6$ ), como :

$$F_{HSj}^* = - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \bar{\eta}_k \exp(i\omega_e t) \quad (\text{III.11})$$

onde

$C_{jk}$  são os coeficientes das forças hidrostáticas de restauração

$\bar{\eta}_k$  são as amplitudes dos movimentos

Os coeficientes das forças hidrostáticas de restauração fornecem as forças líquidas hidrostáticas atuantes na embarcação na direção  $j$ , devido a um deslocamento unitário na direção  $k$ .

### III.3.2 - FORÇAS HIDRODINÂMICAS

A determinação das forças hidrodinâmicas é feita através da equação (III.10b). Para isso é necessário se conhecer o potencial de velocidades  $\Phi(x,y,z)$ . No atual estado da arte isso é impossível, tornando-se necessária a adoção de



diversas simplificações. A primeira é assumir que o potencial total de velocidade pode ser subdividido em um somatório de vários componentes :

$$\Phi(x, y, z, t) = [ - U_0 x + \phi_S(x, y, z) ] + \phi_T \exp(i\omega_e t) \quad (\text{III.12})$$

onde:

$\phi_S$  é o potencial de perturbação devido a uma translação permanente

$\phi_T$  é o potencial de perturbação não permanente

Pode-se considerar que o potencial  $\phi_T$  é composto por oito parcelas

$$\phi_T = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 \phi_j \bar{\eta}_j$$

onde:

$\phi_I$  é o potencial da onda incidente

$\phi_D$  é o potencial da onda difratada

$\phi_j$  é o potencial de irradiação devido a um movimento unitário na direção j

Convém ressaltar que  $\phi_I$  ,  $\phi_D$  e  $\phi_j$  são todos independentes do tempo e dependem somente das variáveis de posição. A parte permanente de  $\Phi$  ,  $( -U_0 x + \phi_S )$  , é devida à velocidade de deslocamento da embarcação. O termo  $( -U_0 x )$  é o potencial de velocidade constante de avanço,  $\phi_S$  é o potencial de perturbação permanente devido à velocidade,

causada pela existência do casco. O termo  $( -U_0 x + \phi_s )$  é a solução do problema da embarcação navegando à velocidade constante em águas paradas. A velocidade devido ao avanço da embarcação é dada por

$$\underline{W} = \nabla ( -U_0 x + \phi_s ) = -U_0 + \nabla \phi_s \quad (\text{III.13})$$

onde  $\nabla$  é o operador diferencial gradiente.

A parte não permanente do potencial total de velocidade,  $\phi_T \exp(i\omega_e t)$ , contém todos os termos dependentes do tempo. Os potenciais  $\phi_I$  e  $\phi_D$  resultam da solução do problema da difração, onde as ondas incidem sobre a embarcação em sua posição de equilíbrio. As ondas difratadas são resultantes do espalhamento das ondas incidentes ao encontrar o casco. As forças hidrodinâmicas compostas pelas ondas incidentes mais as ondas difratadas são chamadas de forças de excitação. Os potenciais de irradiação ( $\phi_j$ ) são a solução do problema de irradiação onde, a embarcação em águas tranquilas sofre movimentos oscilatórios prescritos em cada um dos seis graus de liberdade. As forças hidrodinâmicas resultantes do problema da irradiação envolvem massas adicionadas e amortecimentos. As interações entre as diversas componentes da parcela não permanente são de ordem superior e são desprezadas na teoria linear.

A componente  $(U_0 x + \phi_s)$  pode ser determinada independentemente da parcela não permanente. Na determinação das componentes variáveis com o tempo, o problema do valor de contorno consistente com a teoria linear apresenta termos envolvendo  $\phi_s$ . Há portanto uma interação entre as componentes invariáveis e variáveis. Normalmente essa interação é desprezada e a componente permanente é aproximada por  $(-U_0 x)$  na determinação das componentes variáveis.

No desenvolvimento da teoria linear, é necessário desprezar o termo não linear da equação de Bernoulli  $\nabla\phi \times \nabla\phi$ . Então, a equação da pressão (III.9) torna-se:

$$P \approx -\rho \left[ i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_T \exp(i\omega_e t) \quad (\text{III.14})$$

e a força hidrodinâmica (III.10b) reduz-se a

$$\tilde{F}_{HDj} \approx -\rho \int_S \int \eta_j \left[ i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_T \exp(i\omega_e t) ds = F_{EXj} + F_{RJ} \quad (\text{III.15})$$

onde a integral é calculada na superfície média submersa do casco. Convém ressaltar que o símbolo  $\sim$  sobre a força hidrodinâmica é para identificar que somente a força hidrodinâmica variável com o tempo está sendo considerada.

$F_{EXj} = \{ F_j^I + F_j^D \}$ , são forças de excitação na direção  $j$

$F_j^I$  é a amplitude da componente da força de excitação devido à onda incidente, usualmente denominada força de Froude-Krylov, e é igual a :

$$-\rho \int_S \int \eta_j \left[ i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_I ds$$

$F_j^D$  é a amplitude da componente da força de excitação devida às ondas difratadas, normalmente denominada força de difração, e é dada por:

$$-\rho \int_S \int \eta_j \left[ i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_D ds$$

$F_{Rj}$  é a força hidrodinâmica na direção  $j$  devido ao movimento forçado, normalmente denominada força de irradiação e dada por:

$$\sum_{k=1}^6 T_{jk} \bar{\eta}_k \exp(i\omega_e t)$$

onde  $T_{jk} \bar{\eta}_k$  é a amplitude da força hidrodinâmica na direção  $j$  devido ao movimento imposto na direção  $k$

Separando as partes real e imaginária de  $T_{jk}$  obtém-se

$$T_{jk} = \omega_e^2 A_{jk} - i \omega_e^2 B_{jk} \quad (\text{III.16})$$

onde  $A_{jk}$  é a massa adicionada no modo  $j$  devido a um movimento unitário na direção  $k$ ,  $R_e(T_{jk}/\omega_e^2)$   $B_{jk}$  é o coeficiente de amortecimento do modo  $j$  devido a um movimento unitário na direção  $k$ ,  $I_m(-T_{jk}/\omega_e)$

Convêm ressaltar que, em geral, a massa adicionada e o amortecimento são funções da frequência.

### III.3.3 - CÁLCULO DAS FORÇAS

Retornando à equação do movimento

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \ddot{\eta}_k = F_j(t) \quad (\text{III.3})$$

e lembrando que :

$$\begin{aligned} F_j(t) &= F_{Gj} + F_{Hj} \\ &= F_{Gj} + (F_{HSj} + F_{HDj}) \\ &= (F_{Gj} + F_{HSj}) + (F_{EXj} + F_{RJ}) \\ &= F_{HSj}^* + (F_{EXj} + F_{RJ}) \quad (\text{III.17}) \\ &= - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \eta_k \exp(i\omega_e t) + [(F_j^I + F_j^D) \exp(i\omega_e t) + \\ &\quad + \sum_{k=1}^6 (\omega_e^2 A_{jk} - i \omega_e B_{jk}) \bar{\eta}_k \exp(i\omega_e t)] \end{aligned}$$

e que

$$\eta_k(t) = \bar{\eta}_k \exp(i\omega_e t) \Rightarrow \ddot{\eta}_k = -\omega_e^2 \bar{\eta}_k \exp(i\omega_e t)$$

vem:

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega_e^2 (\Delta_{jk} + A_{jk}) + i \omega_e B_{jk} + C_{jk}] \bar{\eta}_k = F_j^I + F_j^D ; j=1,,6 \quad (\text{III.18})$$

que é a equação linearizada do movimento de uma embarcação navegando em ondas senoidais.

Como já observado, os coeficientes  $A_{jk}$ ,  $B_{jk}$ ,  $F_j^I$  e  $F_j^D$  são todos dependentes da freqüência, o que implica na solução da equação do movimento no domínio da freqüência onde, para uma dada freqüência os coeficientes são constantes.

Para a determinação da amplitude do movimento,  $\bar{\eta}_j$ , é necessário que os coeficientes  $\Delta_{jk}$ ,  $A_{jk}$ ,  $B_{jk}$ ,  $C_{jk}$  e as amplitudes das forças de excitação  $\bar{F}_j^I$  e  $\bar{F}_j^D$  possam ser calculadas e a equação do movimento resolvida. A matriz de massas  $\Delta_{jk}$  e as forças hidrostáticas de restauração  $C_{jk}$ , podem ser determinadas diretamente. A força de excitação de Froude-Krylov pode ser determinada por integração do potencial da onda incidente sobre o casco da embarcação. A grande dificuldade em se determinar os movimentos da embarcação está no cálculo das forças de excitação de difração e dos coeficientes de massa adicionada e amortecimento. Existem várias técnicas disponíveis para o cálculo das forças hidrodinâmicas. Entre elas está a teoria das faixas ("STRIP THEORY"), que foi a técnica utilizada neste trabalho.

O desenvolvimento da teoria das faixas encontra-se no trabalho de Salvensen, Tuck e Faltinsen [5] e não será reproduzido aqui. A idéia básica é transformar o problema tridimensional em um somatório de problemas bi-dimensionais ao longo do casco da embarcação. Para isso, o casco é dividido em diversas seções transversais e o problema do valor de

contorno é resolvido para cada seção em apenas duas dimensões. Esse resultado será representativo para a faixa que compreende a meia distância entre as seções anterior e posterior a seção em questão. O resultado final será o somatório dos resultados representativos de cada faixa multiplicado pela largura da respectiva faixa.

Existem diversas técnicas para solucionar o problema bidimensional que matematicamente, é denominado problema do valor de contorno misto. Em hidrodinâmica naval os dois métodos mais populares de resolvê-lo são o das integrais de contorno [6,7], e o multipolar [8,9,10]. Neste trabalho foi adotado o método das integrais de contorno.



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISE ESTRUTURAL

#### IV.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo VI é visto que para os casos analisados neste trabalho, o efeito das acelerações devidas à deformação estrutural pode ser desprezado. Assim sendo, o problema da determinação das tensões/deformações em um corpo sendo transportado sobre uma balsa pode ser dividido em duas partes: uma refere-se à análise naval que determina os movimentos de corpo rígido e a outra refere-se à análise estrutural propriamente dita.

Uma vez que as respostas de movimento da embarcação foram determinadas, as forças atuantes no casco, bem como as forças inerciais atuantes nos diversos pontos da estrutura, podem ser facilmente calculadas.

Na análise estrutural, aceitando-se que as frequências naturais da estrutura são muito maiores do que as frequências das ondas dominantes, se houver amplificação dinâmica, esta será de pequena magnitude. Portanto, a resposta estrutural pode ser obtida através de uma análise estrutural estática

[11,12,13]. O sistema estrutural é auto-equilibrado, estando submetido às forças de peso próprio, às forças inerciais devidas aos movimentos e às forças hidrostáticas e hidrodinâmicas devidas às ondas e aos movimentos da embarcação.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos adotados na análise estrutural .

#### IV.2 - ESPECTRO DE RESPOSTA DE ESFORÇO INTERNO SOLICITANTE

Para as estruturas cujo comportamento é linear, ou seja, os esforços são diretamente proporcionais às forças atuantes, que por sua vez são diretamente proporcionais às alturas das ondas, a determinação dos esforços internos solicitantes se faz de forma probabilística, utilizando-se as mesmas técnicas espectrais apresentadas no trabalho de St.Denis e Pierson [2].

Um determinado estado de mar pode ser representado matematicamente por seu espectro de energia,  $S(\omega)$ . Dividindo-se o espectro em um número  $n_f$  de faixas de frequência, pode-se determinar  $n_f$  ondas com alturas unitárias cujas frequências sejam iguais às frequências centrais de cada faixa. O operador de amplitude de resposta de esforço na barra em uma dada frequência  $\omega$ ,  $RAO(\omega)$ , é simplesmente a amplitude

do esforço resultante da aplicação da onda unitária de frequência  $\omega$  ao sistema.

A partir da determinação dos movimentos da embarcação para as  $n_f$  ondas unitárias, todas incidindo com o mesmo ângulo (aproamento), são criados  $n_f$  conjuntos de cargas inerciais e pressões no casco. As velocidades e acelerações do centro de gravidade do conjunto são utilizadas no cálculo das acelerações e conseqüentemente, das forças inerciais nos diversos pontos da estrutura.

A aceleração linear em determinado ponto da estrutura,  $\underline{a}_p$ , distante  $\underline{r}$  do centro de gravidade do conjunto, pode ser aproximada por :

$$\underline{a}_p = \underline{a}_o + \dot{\underline{w}} \times \underline{r} + \underline{w} \times (\underline{w} \times \underline{r}) \quad (\text{IV.1})$$

onde,  $\underline{a}_o$ ,  $\dot{\underline{w}}$  e  $\underline{w}$  são respectivamente a aceleração linear, a aceleração angular e a velocidade angular do centro de gravidade do conjunto. A carga inercial é calculada multiplicando-se a massa nodal pela aceleração linear do ponto.

As forças devidas às pressões atuantes na superfície do casco são aplicadas de maneira apropriada em alguns nós do

modelo estrutural da balsa. Em vista da existência de dois modelos para a balsa, um simulando as características hidrodinâmicas do casco (modelo naval) e outro as características estruturais (modelo estrutural), para se efetuar a análise estrutural é necessário transferir as cargas de um modelo para o outro.

Geralmente cada nó do modelo naval não tem correspondência com nenhum nó do modelo estrutural para receber tais cargas de pressão. Portanto algum tipo de mapeamento deve ser desenvolvido para permitir a transferência das cargas entre os modelos. No programa de computador utilizado, isso foi conseguido tomando-se a carga total atuando em cada faixa (ítem III.3.3), obtida por intermédio da integração da pressão sobre a superfície molhada da faixa, e distribuindo-a através da técnica dos mínimos quadrados pelos nós da estrutura especificados para receber essas cargas.

Objetivando a preservação das relações entre as fases das diferentes forças externas atuantes no sistema, aquelas cargas são representadas por valores complexos que possuem parte real e parte imaginária.

A aplicação do princípio de D'Alambert ao sistema estrutural fornece o sistema de equações que resolvido determina os deslocamentos nodais  $x$  e as forças nas barras. O

sistema de equações é da forma :

$$\begin{array}{ccccccc} K & x & = & F & - & M & \ddot{x} \\ \sim & \sim & & \sim & & \sim & \sim \end{array} \quad (\text{IV.2})$$

onde :  $K$  é a matriz de rigidez estrutural do sistema.

$F$  é o sistema de cargas externas aplicadas.

$M \ddot{x}$  representa o sistema de cargas inerciais oriundas do movimento de corpo rígido.

Convém ressaltar que, como as cargas atuantes são quantidades complexas, os deslocamentos nodais  $x$  devem ser determinados para as partes real e imaginária das cargas.

Sejam  $L_R(\omega, \mu; 0)$  e  $L_I(\omega, \mu; 0)$  os esforços internos solicitantes de uma dada barra, por exemplo força axial, determinados respectivamente para as partes real e imaginária das cargas geradas por uma onda unitária de frequência  $\omega$ , ângulo de incidência  $\mu$  e velocidade da embarcação  $U_0 = 0$ . Então, o operador de amplitude de resposta da força axial para essa onda unitária é dado por :

$$\text{RAO}(\omega, \mu; 0) = \sqrt{L_R(\omega, \mu; 0)^2 + L_I(\omega, \mu; 0)^2} \quad (\text{IV.3})$$

Finalmente, o espectro de resposta,  $S_L(\omega, \mu; 0)$ , pode ser determinado através da combinação dos RAO's com o espectro

pontual de energia representativo do estado de mar  $S(\omega)$ ,

$$S_L(\omega, \mu; 0) = |\text{RAO}(\omega, \mu; 0)|^2 \cdot S(\omega) \quad (\text{IV.4})$$

Os momentos espectrais são dados por :

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_L(\omega, \mu; 0) d\omega \quad (\text{IV.5})$$

e os esforços internos solicitantes máximos por

$$L_{\max} = \sqrt{2 m_0 \ln N} \quad (\text{IV.6})$$

onde  $m_0$  é a variância da resposta e  $N$  o número de ocorrências.

Para o caso de uma embarcação navegando a uma velocidade constante  $U_0$ , com um aproamento dado por  $\mu$ , em um estado de mar multidirecional, os momentos espectrais são dados por [14]

$$m_n = \int_0^{2\pi} m(n, \mu) M(\mu) d\mu \quad (\text{IV.7})$$

onde :

$$m(n, \mu) = \int_0^{\infty} |\omega - (\omega^2 U_0 / g) \cos \mu|^n \times |\text{RAO}(\omega, \mu; U_0)|^2 S(\omega) d\omega ;$$

$g$  é a aceleração da gravidade ;

$M(\mu)$  é a função de espraiamento .

### IV.3 - VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA

Para se determinar a resistência de determinado membro, usualmente são adotados critérios que são funções não lineares das diversas tensões nos elementos. Por exemplo, na recomendação API-RP2A [15] um desses critérios para seções tubulares é :

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{(1 - \frac{f_a}{F_e})F_b} \leq 1.0$$

onde  $f_a$ ,  $f_{bx}$  e  $f_{by}$  são respectivamente as tensões atuantes axial, de flexão segundo eixo x e de flexão segundo eixo y;  $F_a$ ,  $F_e$  e  $F_b$  são as tensões admissíveis a esforços axiais e à flexão.

Devido a essa não linearidade, não é possível a utilização de um critério do tipo espectral na verificação da resistência dos elementos estruturais. Para a solução desta questão existem duas alternativas:

- a) Simulação no domínio do tempo a partir do espectro de resposta : neste caso tem-se um conjunto de casos determinísticos e procede-se da maneira convencional. A dificuldade desta

alternativa é decidir sobre o número de casos que devem ser investigados. Se forem muitos, eleva-se em demasia o custo computacional.

b) Uma alternativa utilizada em projetos [16] é construir um conjunto de tensões nos elementos como :

$$\sigma = \sigma_m + \text{sinal}(\sigma_m) |\sigma_p| \quad (\text{IV.8})$$

onde  $\sigma_m$  é a tensão média determinada considerando-se a balsa parada em águas tranquilas e  $\sigma_p$  é a tensão determinada a partir de  $L_{\max}$ .



## CAPÍTULO V

### ANÁLISES REALIZADAS

#### V.1 - INTRODUÇÃO

Conforme já dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é verificar a influência da flexibilidade da balsa no dimensionamento de uma estrutura sob o aspecto da capacidade de resistência máxima dos elementos estruturais, não abordando os aspectos relacionados à fadiga.

Um dos modos de se assegurar a capacidade de resistência de uma determinada barra é garantir que as tensões atuantes nesses elementos fiquem abaixo de certos valores preconizados por normas [15,17]. Como existem as tensões axiais, de flexão e de cisalhamento é necessário que se verifique a interação entre essas diversas tensões. Na norma API [15], isso é conseguido através de fórmulas do tipo :

$$\sum_i C_i \frac{f_i}{F_i} \leq 1.0$$

onde  $f_i$  são as tensões atuantes,  $F_i$  são as tensões admissíveis e  $C_i$  são coeficientes para levar em conta o tipo de carga, a interação entre tensões, etc. Como pode ser observado, essa

expressão é um somatório de razões de tensões que neste trabalho é denominado simplesmente razão de tensão. Portanto, para se assegurar a capacidade portante dos elementos estruturais, é necessário que sua razão de tensão seja no máximo igual à unidade.

Na elaboração destes estudos, adotou-se como parâmetro de comparação a razão de tensão da norma API [15].

## V.2 - DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES

Para cada conjunto estrutura/balsa foram efetuadas duas análises estruturais distintas, uma com balsa rígida e outra com balsa flexível, onde foram determinados os RAO's dos esforços internos solicitantes. As forças inerciais e as pressões do fluido atuantes no casco foram obtidas a partir de uma mesma análise naval, onde se considerou dois aproamentos, 180° e 90° (mar de proa e mar de través).

As forças máximas atuantes em cada barra foram determinadas através de um cálculo espectral para 15 estados de mar unidirecionais com alturas significativas  $h_s = 4.5\text{m}$  e períodos médios variando de 5 a 12 s em intervalos de 0.5 s. Essa variação do período obedece à recomendação da DNV [17] que visa assegurar de maneira suficientemente precisa a

resposta máxima do sistema. Cada um destes estados de mar foi combinado com um RAO para gerar um espectro de resposta de esforço interno solicitante. Os valores máximos foram determinados através da expressão (IV.6) considerando-se o número de ocorrências correspondente a uma tempestade com 3 horas de duração e período médio das ondas de 10 s, ou seja :

$$F_{\max} = 3.73\sqrt{m_0}$$

Como o objetivo deste trabalho é efetuar um estudo comparativo e não um dimensionamento estrutural, na determinação da razão de tensão das barras foi considerada apenas a parcela de carga que varia durante o transporte (inerciais e pressões no casco), não sendo considerada a tensão média atuante na barra (expressão IV.8). Em cada análise foram determinadas 30 razões de tensão para cada barra (15 estados de mar x 2 aproamentos), o que é equivalente a 30 condições de carregamento.

Para relacionar os carregamentos com os aproamentos e estados de mar, aqueles referentes ao mar de través foram identificados como  $BEAM\underline{x}$ , onde  $\underline{x} = 1, 2, \dots, 15$  para os períodos  $T_1 = 5, 5.5, \dots, 12$  s respectivamente e, da mesma forma,  $HEAD\underline{x}$  para mar de proa.

Todos os resultados apresentados neste capítulo foram

obtidos através do programa MOSES [18].

### V.3 - MODELOS UTILIZADOS

Os resultados aqui apresentados foram obtidos através da análise das seguintes estruturas :

ESTRUTURA	L. D. A.	DIMENSÕES TOPO	DIMENSÕES BASE	PESO
Jaqueta Impala	56.0	6.2 x6.2	15.4x15.4	2225
Jaqueta PCP3	86.4	13.7x16.0	43.0x43.0	14000
Jaqueta PAB1	90.0	32.0x49.4	49.4x49.4	49354
Jaqueta PAB2	290.0	25.0x25.0	90.0x90.0	138507
Convés PEO	-	19.0x38.0	19.0x38.0	40000

unidades = kN, m

e das seguintes balsas :

BALSA	DESLOCAMENTO	L	B	P
INTERMAC 650	895000	198.0	51.8	12.2
BGL-2	331760	152.0	36.6	9.5
BS-3	156670	105.0	24.0	7.5

onde: unidades = kN, m; L = comprimento total; B ,P = boca e pontal moldados

Algumas características dessas estruturas merecem destaque : (a) a jaqueta Impala é uma estrutura cuja instalação é por içamento, não possuindo viga de lançamento, (b) as jaquetas PCP3 e PAB1 apresentam a viga de lançamento incorporadas às faces, (c) a jaqueta PAB2 possui viga de lançamento independente. A configuração geral destas estruturas pode ser vista nas figuras V.3a,b,c,d,e.

Os conjuntos Estrutura/Balsa utilizados nas análises comparativas foram os seguintes :

	Intermac 650	BGL-2	BS-3
Jaqueta Impala			X
Jaqueta PCP3			X
Jaqueta PAB1		X	
Jaqueta PAB2	X		
Convés PEO		X	

Tanto as estruturas das jaquetas quanto a do convés foram simuladas como pórticos espaciais, sendo utilizada a mesma discretização da análise de operação, onde foram considerados todos os reforços de juntas ("cans") e excentricidades de nós existentes .

As balsas foram simuladas como estruturas planas modeladas com elementos de pórtico espacial representando as anteparas longitudinais, anteparas transversais, cavernas de apoio das vigas de deslizamento e a própria viga de deslizamento. A figura V.3f apresenta exemplos dessa modelagem.

Na determinação das propriedades geométricas dos elementos discretizados foi adotado o seguinte critério :

- Anteparas longitudinais :

a partir das características geométricas da seção média da embarcação, os momentos de inércia foram distribuídos pelo número de anteparas de forma proporcional à área de influência de cada elemento.

- Anteparas transversais :

foram calculadas as características geométricas de cada elemento considerando-se o efeito da largura efetiva .

- Momentos de inércia à torção

foi adotada a simplificação sugerida pela regra DNV - "Classification Notes 31.4" [19],

$$I_t = \frac{2 X^2 h^2 t_m}{(h + X)}$$

onde :

$I_t$  é a rigidez torcional;

$X$  é a boca, para as vigas longitudinais,  
ou comprimento, para as vigas  
transversais;

$h$  é o pontal;

$t_m$  é a espessura média das chapas.

Convém ressaltar que os resultados obtidos com tal procedimento apresentaram uma discrepância de apenas 5% quando comparados com os resultados de um cálculo mais rigoroso .

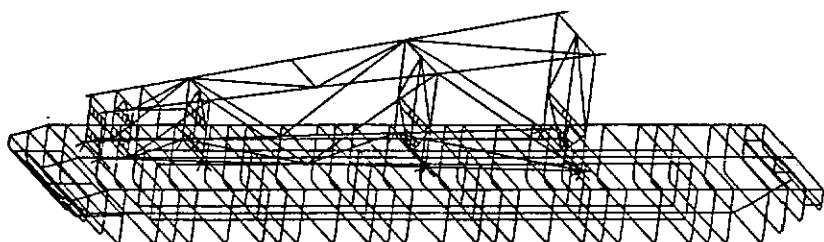
Para os cálculos navais, as geometrias dos cascos foram modeladas para a teoria das faixas através de seções transversais, dadas nos pontos que apresentam mudança de geometria .

A conexão entre a estrutura da balsa e a estrutura transportada foi simulada através de elementos tubulares, representando as amarrações ("tie-down"), rigidamente ligados às duas estruturas. Para o caso das jaquetas, o apoio proporcionado pelo contato da viga de lançamento da jaqueta com a viga de deslizamento da balsa foi representado através de barras de treliça conectadas verticalmente aos pontos duros da viga de lançamento e aos nós correspondentes da viga de

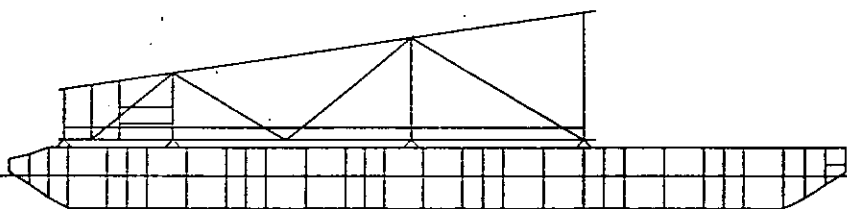
deslizamento.

Como o sistema a ser analisado é auto-equilibrado, a singularidade da matriz de rigidez foi eliminada com o emprego de molas lineares de rigidez extremamente baixa, conectadas aos nós da balsa.



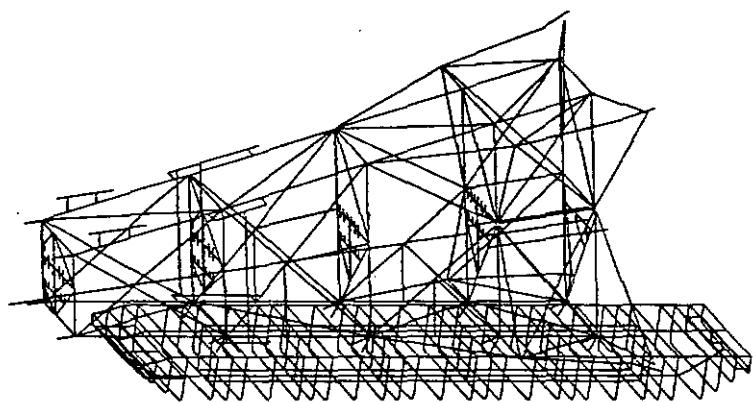


JAQUETA DE IMPALA NA Balsa BS3  
MODELO NAVAL

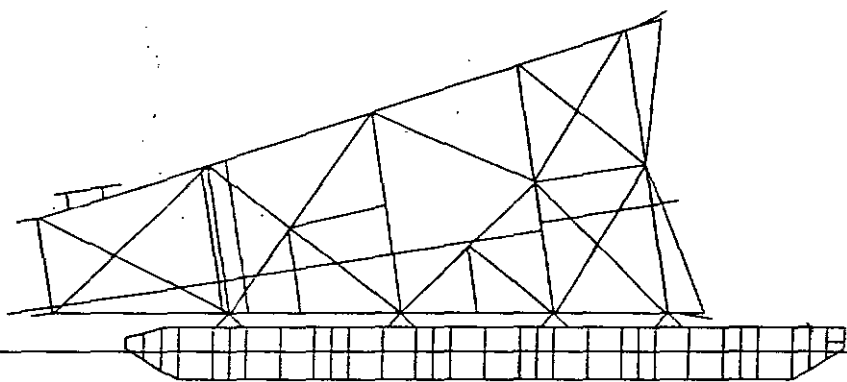


JAQUETA DE IMPALA NA Balsa BS3  
MODELO NAVAL

Fig V.3a - CONJUNTO IMPALA / BS3

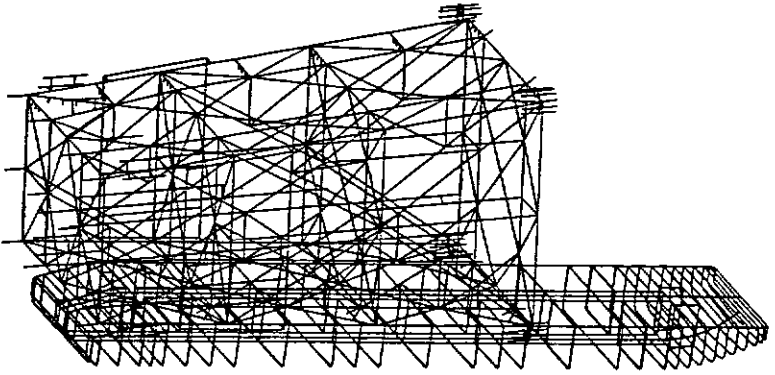


JAQUETA PCP3 NA Balsa BS3  
MODELO NAVAL

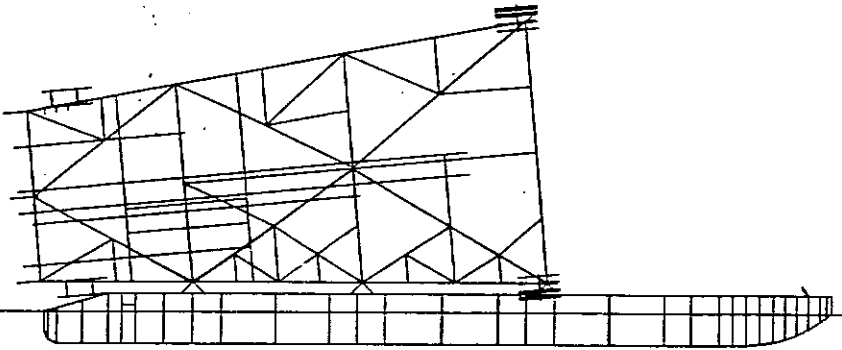


JAQUETA PCP3 NA Balsa BS3  
MODELO NAVAL

Fig V.3b - CONJUNTO PCP3 / BS3

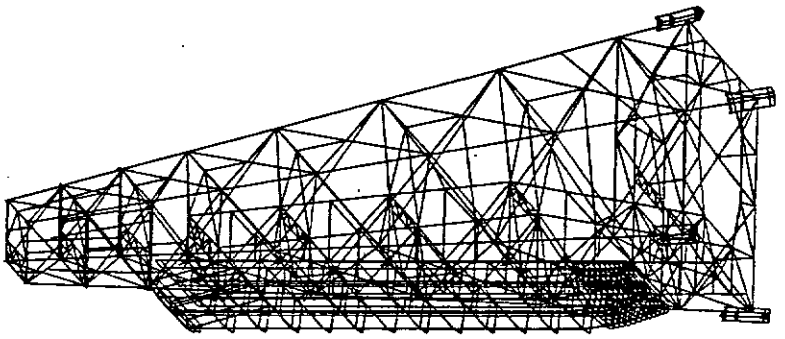


JAQUETA PAB1 NA BALSA BGL2  
MODELO NAVAL

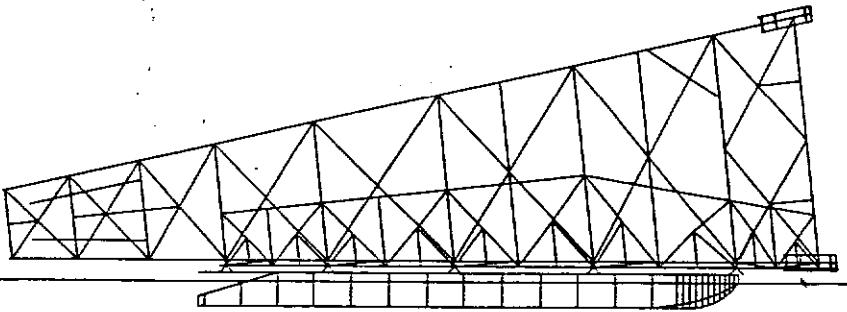


JAQUETA PAB1 NA BALSA BGL2  
MODELO NAVAL

Fig V.3c - CONJUNTO PAB1 / BGL2

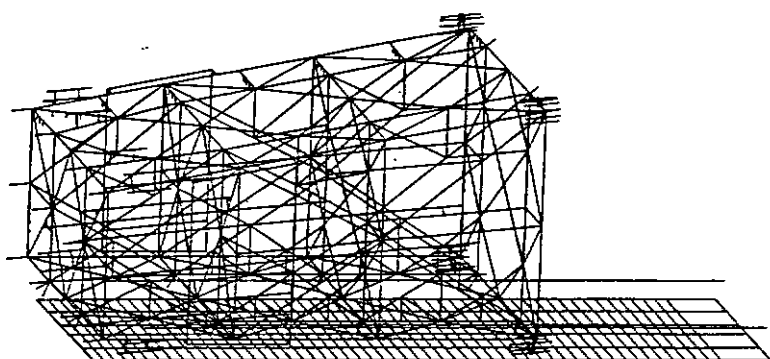


JAQUETA PAB2 NA Balsa INTERMAC-650  
MODELO NAVAL

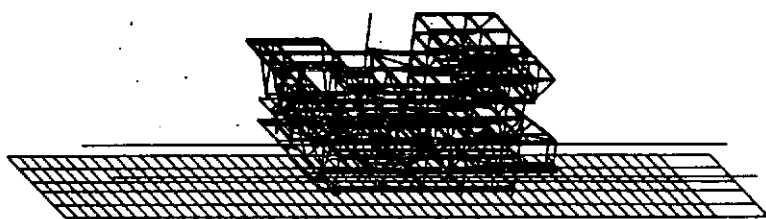


JAQUETA PAB2 NA Balsa INTERMAC-650  
MODELO NAVAL

Fig V.3d - CONJUNTO PAB2 / I650



JAQUETA PAB: NA Balsa BGL2  
MODELO ESTRUTURAL



CONVES DE PBO NA Balsa BGL2  
MODELO ESTRUTURAL

Fig V.3f - EXEMPLOS DE MODELOS ESTRUTURAIS

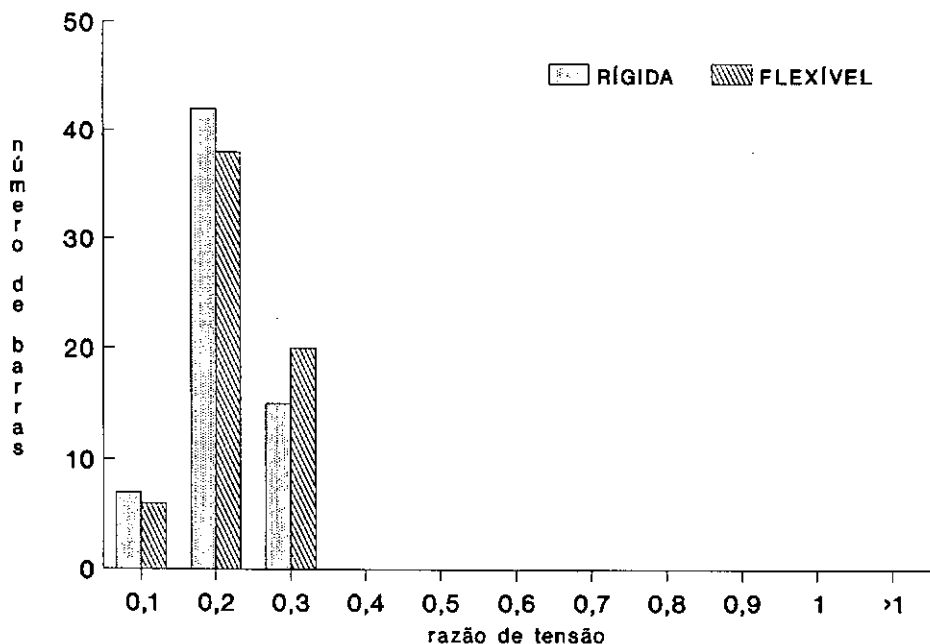
## V.4 - RESULTADOS

### V.4.1 - RAZÕES DE TENSÕES MÁXIMAS

Neste ítem encontram-se os gráficos que representam a distribuição do número de barras por intervalo de razão de tensão máxima, considerando-se uma variação de 0.1 entre intervalos. O valor indicado no eixo das abcissas representa o limite superior de cada faixa, por exemplo o valor 0.5 representa a faixa de razões de tensões compreendida entre 0.4 e 0.5 .

Para facilitar a interpretação dos resultados das jaquetas, estes foram separados por regiões da estrutura, considerando-se as faces (excluindo-se as pernas), mesas, pernas e vigas de lançamento.

JAQUETA PCP3 / Balsa BS3  
MEMBROS DAS FACES



JAQUETA PCP3 / Balsa BS3  
MEMBROS DAS MESAS

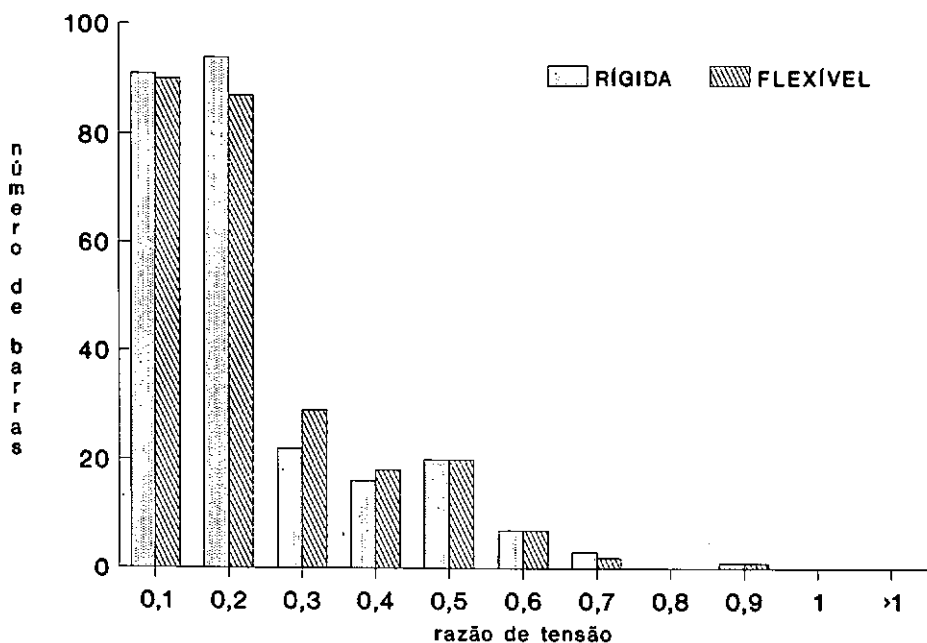
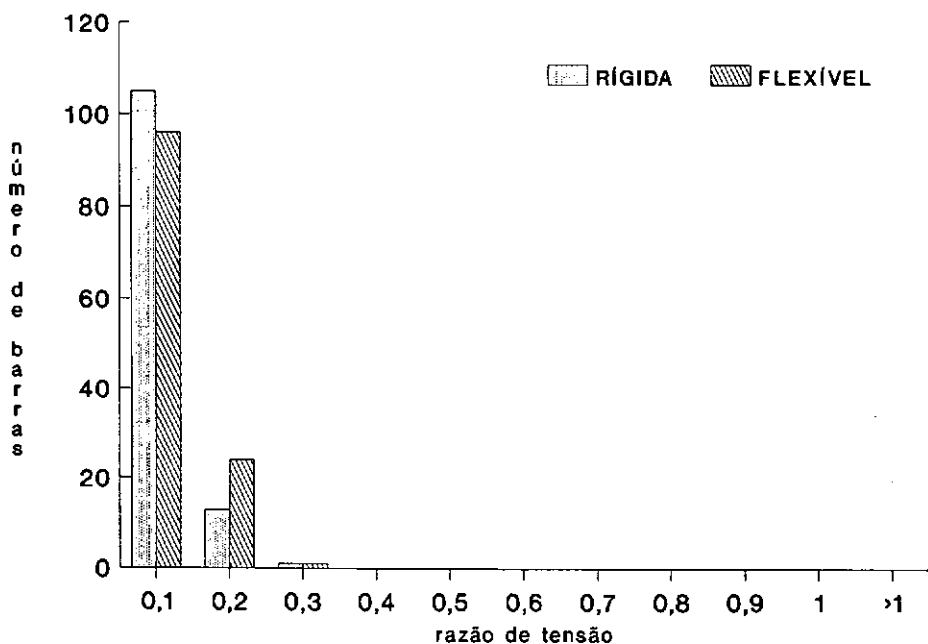


Gráfico V.4.1a - PCP3/BS3 - Faces

Gráfico V.4.1b - PCP3/BS3 - Mesas

JAQUETA PCP3 / Balsa BS3  
MEMBROS DAS PERNAS



JAQUETA PCP3 / Balsa BS3  
MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO

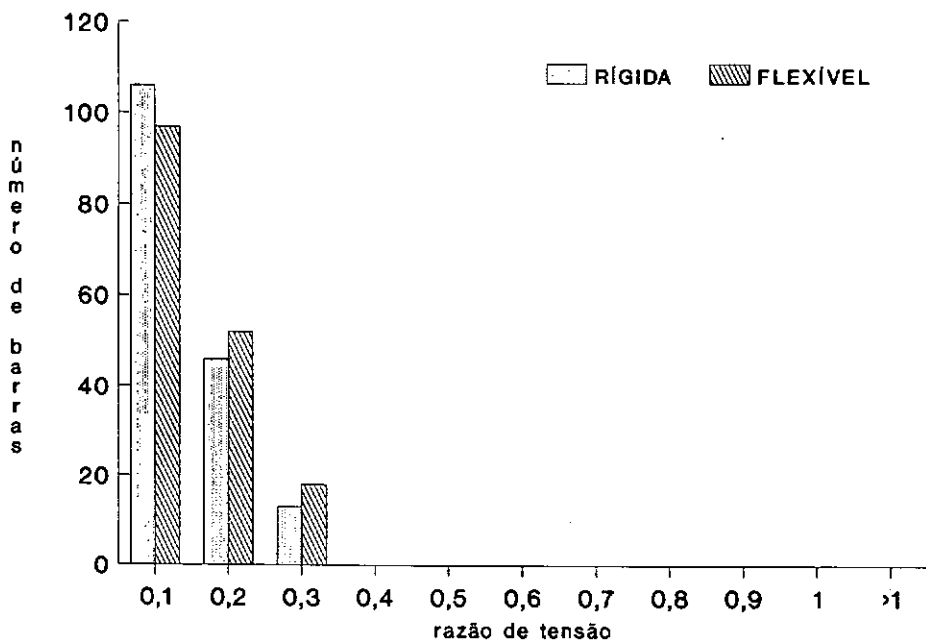
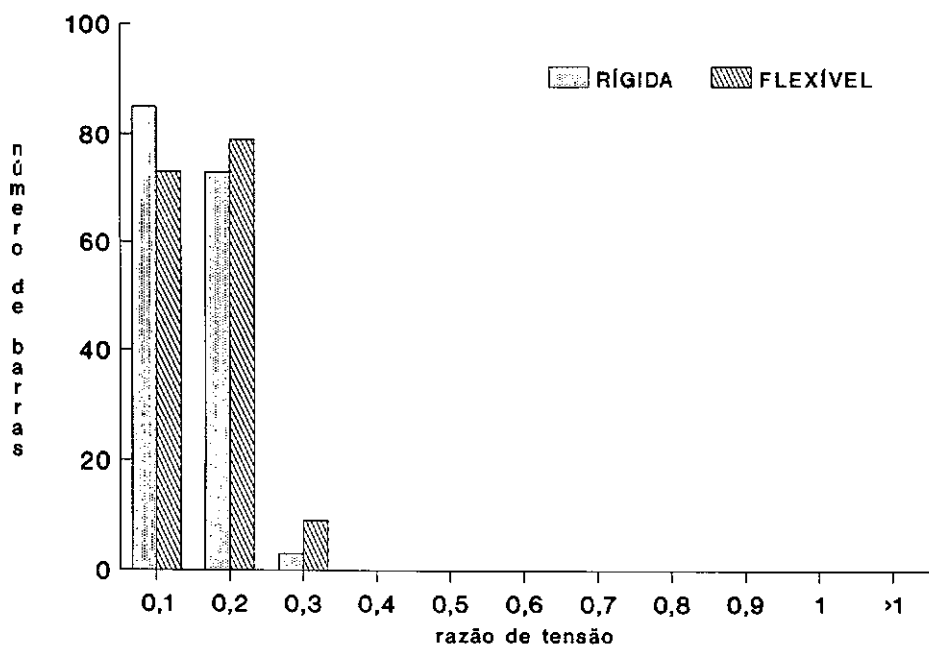


Gráfico V.4.1c - PCP3/BS3 - Pernas

Gráfico V.4.1d - PCP3/BS3 - Vigas de Lançamento



JAQUETA PAB1 / Balsa BGL2  
MEMBROS DAS FACES



JAQUETA PAB1 / Balsa BGL2  
MEMBROS DAS MESAS

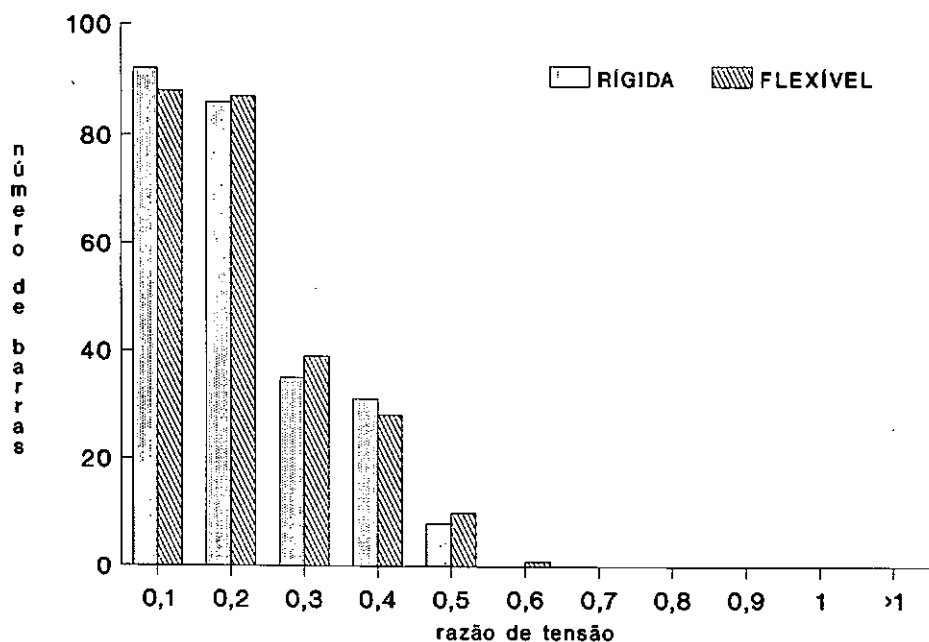
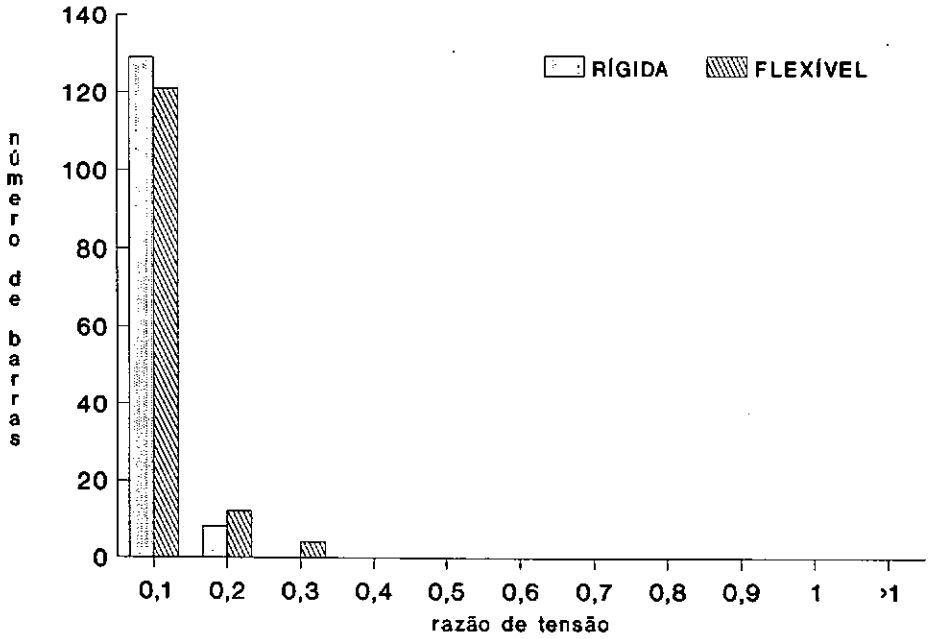


Gráfico V.4.1e - PAB1/BGL2 - Faces

Gráfico V.4.1f - PAB1/BGL2 - Mesas

JAQUETA PAB1 / BALSA BGL2  
MEMBROS DAS PERNAS



PLATAFORMA PAB1 / BALSA BGL2  
MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO

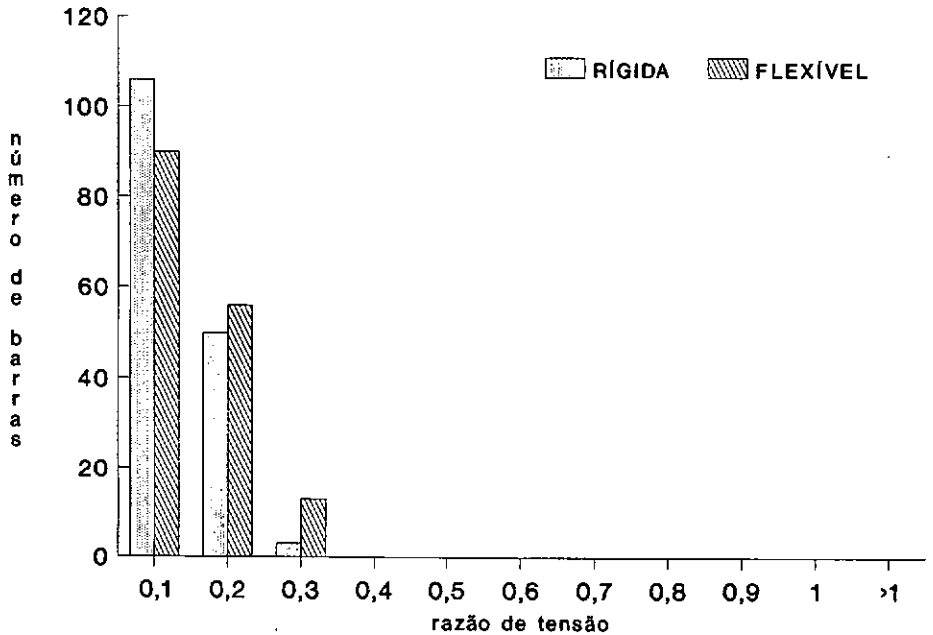
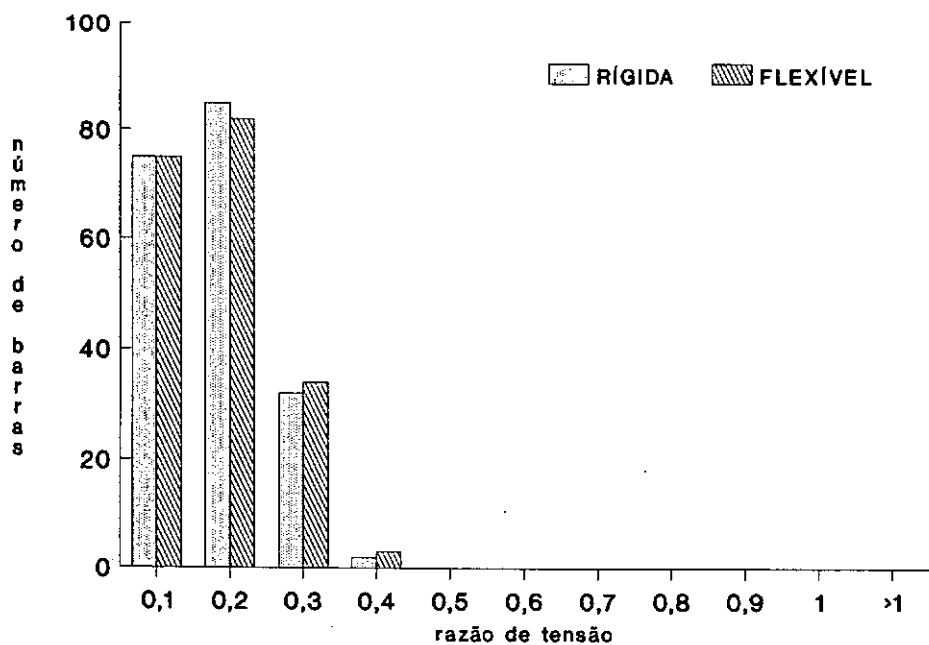


Gráfico V.4.1g - PAB1/BGL2 - Pernas

Gráfico V.4.1h - PAB1/BGL2 - Vigas de Lançamento

JAQUETA PAB2 / Balsa I650  
MEMBROS DAS FACES



JAQUETA PAB2 / Balsa I650  
MEMBROS DAS MESAS

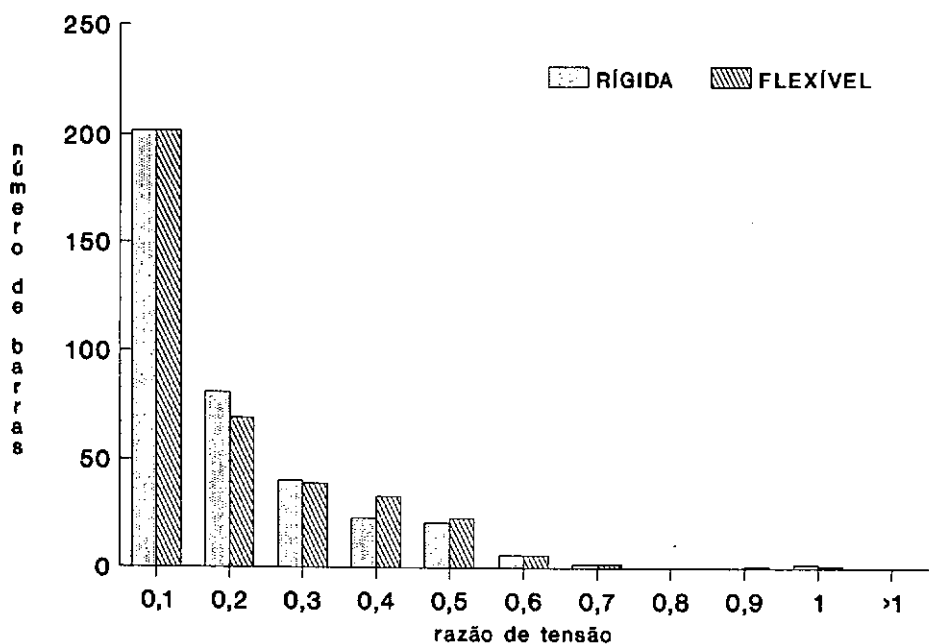
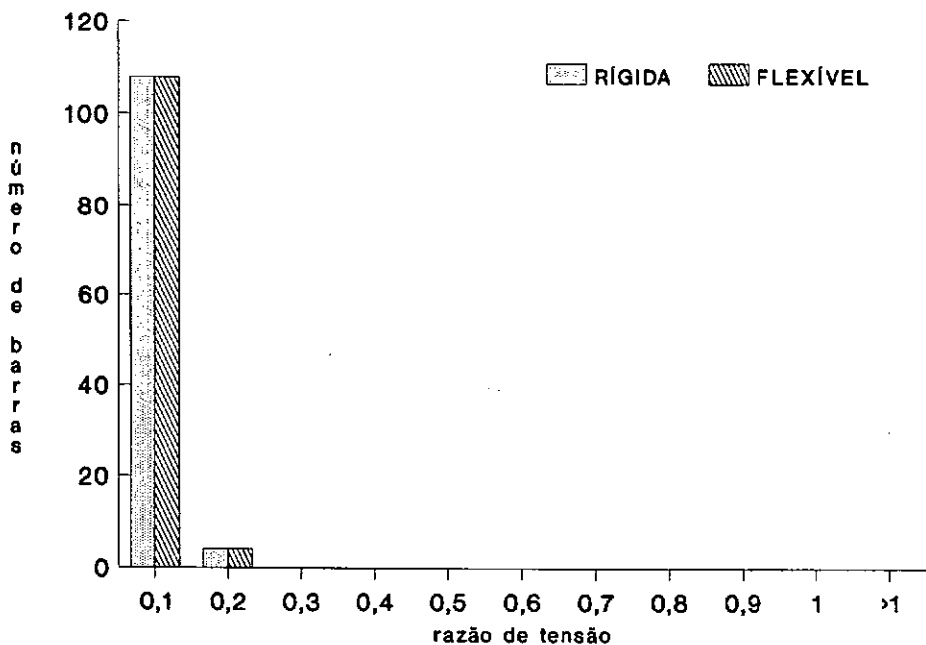


Gráfico V.4.1i - PAB2/I650 - Faces

Gráfico V.4.1j - PAB2/I650 - Mesas

**JAQUETA PAB2 / Balsa I650  
MEMBROS DAS PERNAS**



**PLATAFORMA PAB2 / Balsa I650  
MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO**

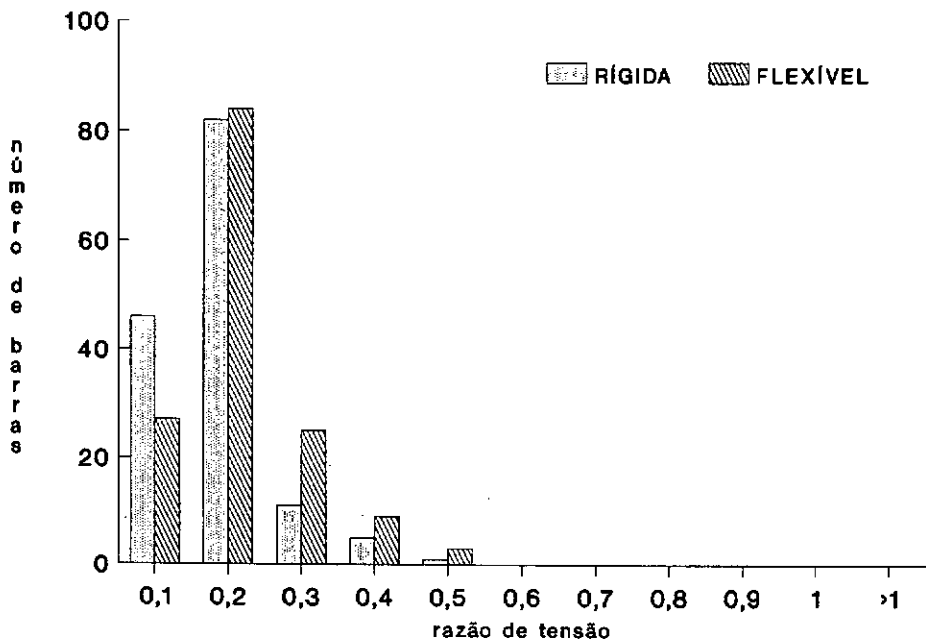
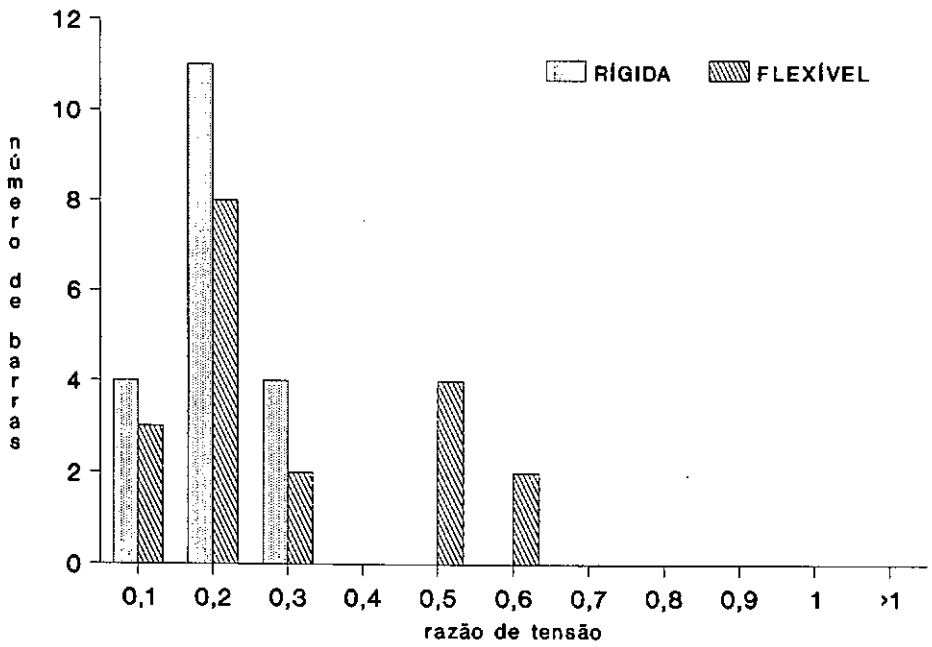


Gráfico V.4.11 - PAB2/I650 - Pernas

Gráfico V.4.1m - PAB2/I650 - Vigas de Lançamento

JAQUETA IMPALA / Balsa BS3  
MEMBROS DAS FACES



JAQUETA IMPALA / Balsa BS3  
MEMBROS DAS MESAS

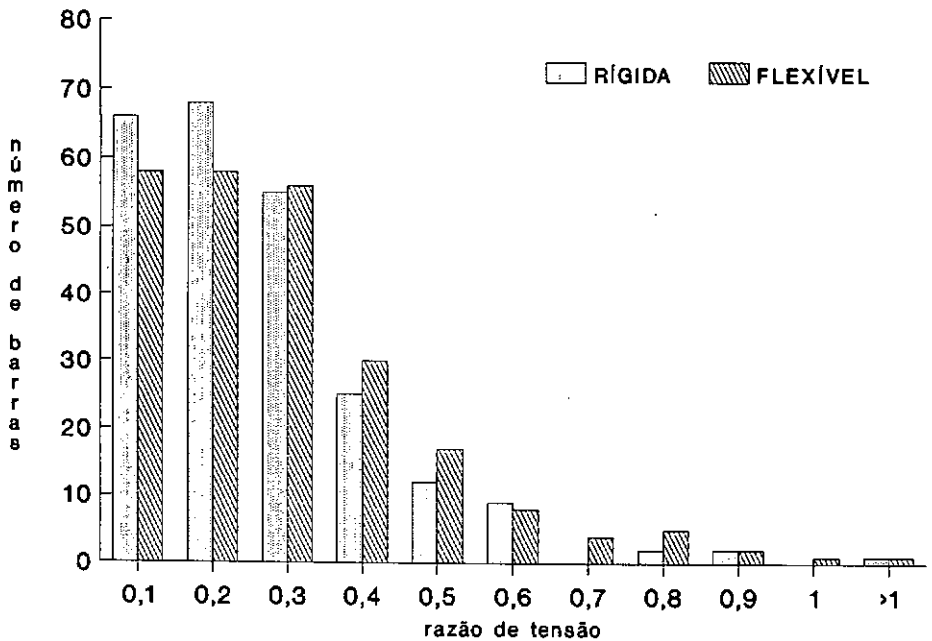
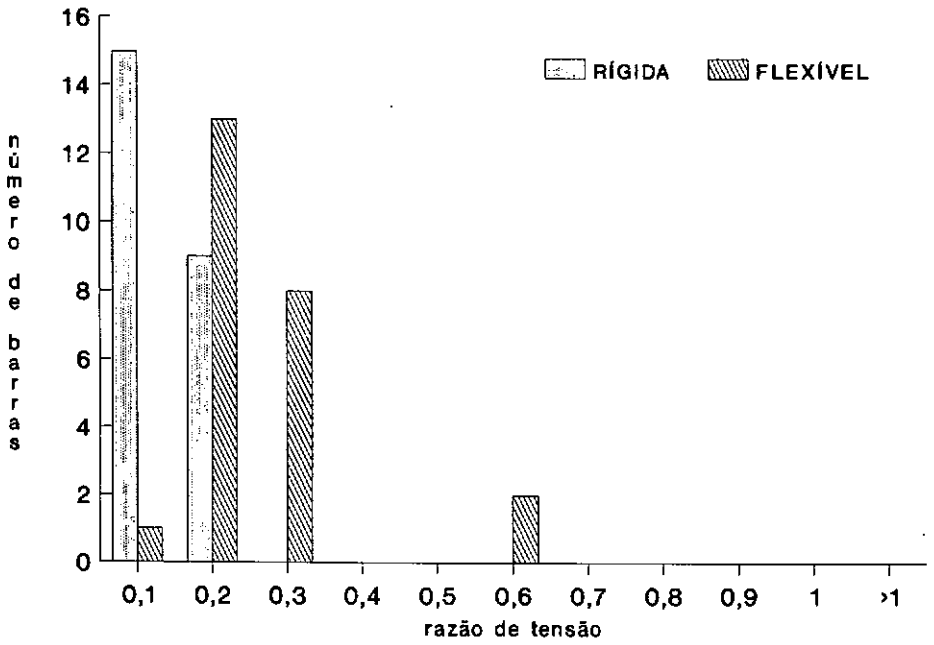


Gráfico V.4.1n - IMPALA/BS3 - Faces

Gráfico V.4.1o - IMPALA/BS3 - Mesas

JAQUETA IMPALA / Balsa BS3  
MEMBROS DAS PERNAS



CONVÉS PEO / Balsa BGL2

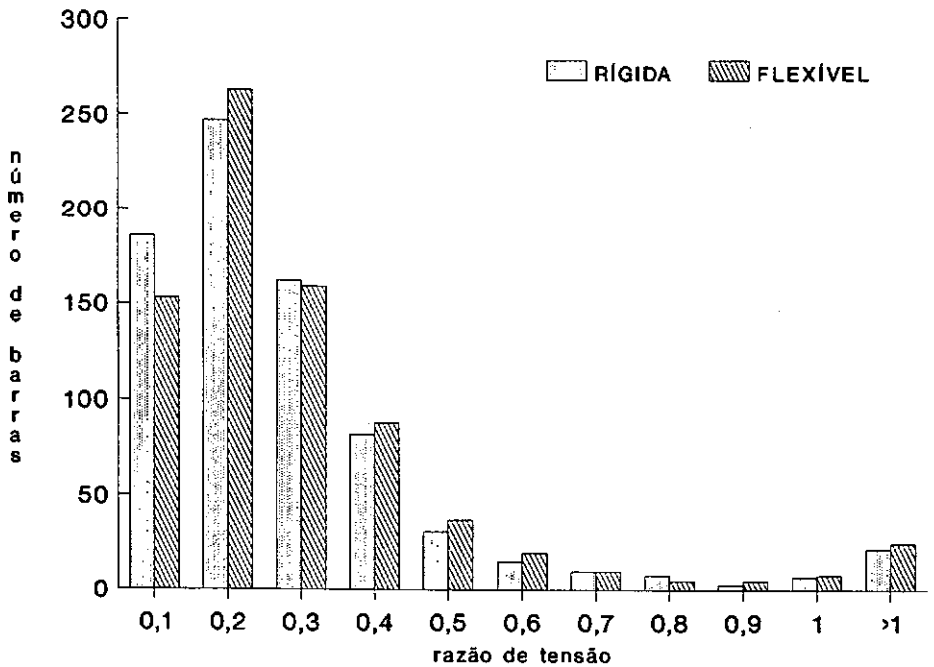


Gráfico V.4.1p - IMPALA/BS3 - Pernas

Gráfico V.4.1q - PEO/BGL2 - Todos os Membros

#### V.4.2 - DISTRIBUIÇÃO DE CARREGAMENTOS

Neste ítem é mostrada a distribuição por faixa de razão de tensão do número de ocorrências dos carregamentos dimensionantes. Entende-se por carregamento dimensionante aquele que provoca a máxima razão de tensão.

A identificação dos carregamentos está mostrada no ítem V.1 e a identificação das faixas de razão de tensão é a mesma do ítem anterior. Para efeito de apresentação, a palavra carregamento será substituída por carga.

Jaqueta PCP3 - MEMBROS DAS FACES

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	4	41	15	0	0	0	0	0	0	0	0	60
BEAM5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	3	26	14	0	0	0	0	0	0	0	0	43
BEAM5	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
BEAM4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD6	0	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	14

Jaqueta PCP3 - MEMBROS DAS MESAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	79	92	22	16	20	7	3	0	1	0	0	240
BEAM5	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
BEAM3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	74	74	21	17	20	7	2	0	1	0	0	216
BEAM5	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
BEAM4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD6	5	11	8	1	0	0	0	0	0	0	0	25
HEAD7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1



Jaqueta PCP3 - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	90	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	103
BEAM5	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	50	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	64
HEAD6	32	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42
BEAM5	14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15

Jaqueta PCP3 - MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	91	45	13	0	0	0	0	0	0	0	0	149
BEAM5	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM6	51	32	12	0	0	0	0	0	0	0	0	95
HEAD6	32	17	6	0	0	0	0	0	0	0	0	55
BEAM5	14	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DAS FACES

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	14	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
BEAM9	71	67	3	0	0	0	0	0	0	0	0	141

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DAS FACES

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	24	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
BEAM9	39	64	3	0	0	0	0	0	0	0	0	106
BEAM7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD10	5	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	14
HEAD9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DAS MESAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM9	70	72	35	30	8	0	0	0	0	0	0	215
BEAM8	18	12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	31
BEAM7	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM9	63	54	37	27	10	1	0	0	0	0	0	192
BEAM8	15	20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	36
BEAM7	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD9	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD10	7	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	14
BEAM6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
BEAM9	67	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75
BEAM7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	64	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69
BEAM9	39	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42
BEAM7	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
HEAD10	10	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	17
HEAD9	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4

Jaqueta PAB1 - MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	23	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
BEAM9	82	45	3	0	0	0	0	0	0	0	0	130
BEAM7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM8	42	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
BEAM9	25	34	3	0	0	0	0	0	0	0	0	62
HEAD10	15	6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	31
BEAM7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Jaqueta PAB2 - MEMBROS DAS FACES

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM7	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
BEAM11	11	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	20
BEAM9	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM10	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
BEAM13	25	40	22	2	0	0	0	0	0	0	0	89
BEAM12	22	27	7	0	0	0	0	0	0	0	0	56
HEAD14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM8	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
BEAM6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM7	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
BEAM11	7	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	18
BEAM9	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
BEAM10	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
BEAM12	24	28	7	0	0	0	0	0	0	0	0	59
BEAM13	25	21	16	1	0	0	0	0	0	0	0	63
BEAM8	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
HEAD15	1	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12
HEAD14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM14	1	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	9
HEAD1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM15	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Jaqueta PAB2 - MEMBROS DAS MESAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM13	115	48	36	22	21	6	2	0	0	2	0	252
HEAD14	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
HEAD15	44	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	53
BEAM12	17	21	1	1	0	0	0	0	0	0	0	40
BEAM11	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
BEAM10	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
BEAM8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM14	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM13	94	32	22	22	20	6	2	0	1	1	0	200
HEAD15	54	12	11	7	2	0	0	0	0	0	0	86
BEAM12	27	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	43
BEAM11	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
HEAD14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
HEAD1	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
BEAM10	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
BEAM8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM14	5	6	1	3	1	0	0	0	0	0	0	16
BEAM9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM15	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5

Jaqueta PAB2 - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM11	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
BEAM12	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51
BEAM8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM13	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
BEAM14	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD15	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
BEAM9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Jaqueta PAB2 - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM12	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40
BEAM7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
BEAM10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM13	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
HEAD13	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
HEAD15	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
BEAM15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
BEAM14	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
BEAM8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Jaqueta PAB2 - MEMBROS DA VIGA DE LANÇAMENTO

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM13	26	64	9	5	1	0	0	0	0	0	0	105
BEAM12	11	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	25
BEAM11	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
BEAM9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
HEAD14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
HEAD15	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
BEAM7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
HEAD15	6	32	5	4	0	0	0	0	0	0	0	47
BEAM15	1	12	5	4	0	0	0	0	0	0	0	22
BEAM14	1	9	4	0	0	0	0	0	0	0	0	14
BEAM12	5	7	1	0	1	0	0	0	0	0	0	14
HEAD12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BEAM11	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM13	11	22	10	1	2	0	0	0	0	0	0	46
BEAM10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HEAD9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Jaqueta IMPALA - MEMBROS DAS FACES

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM1	4	11	4	0	0	0	0	0	0	0	0	19

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM1	3	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	11
HEAD6	0	2	0	0	4	2	0	0	0	0	0	8

Jaqueta IMPALA - MEMBROS DAS MESAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM1	54	63	54	25	12	9	0	2	2	0	1	222
BEAM2	12	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	18

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM1	40	44	48	24	15	8	4	2	1	1	1	188
HEAD6	5	8	7	6	2	0	0	3	1	0	0	32
HEAD7	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
BEAM2	11	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15
HEAD5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Jaqueta IMPALA - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM1	13	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
BEAM2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Jaqueta IMPALA - MEMBROS DAS PERNAS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
HEAD6	1	9	8	0	0	2	0	0	0	0	0	20
BEAM2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
BEAM1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Conves PEO - TODOS OS MEMBROS

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Rígida

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM5	176	247	160	81	31	15	10	8	3	7	22	760
BEAM4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
BEAM6	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
HEAD10	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6

RAZÃO DE TENSÃO - Balsa Flexível

CARGA	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	>1	TOTAL
BEAM5	134	253	151	87	37	20	10	5	5	8	25	735
HEAD10	9	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	23
HEAD11	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5
BEAM4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
BEAM6	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
HEAD9	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3



## V.5 - COMENTÁRIOS

Por facilidade, todos os comentários quando não detalhados referem-se à análise com balsa flexível (caso flexível) quando comparada com a análise com balsa rígida (caso rígida). O termo razão de tensão será abreviado para RT.

### V.5.1 - JAQUETA PCP3 / Balsa BS3

Analisando-se os resultados das faces (graf. V.4.1a), nota-se um aumento do número de barras na faixa de RT mais elevada (0.3) e um decréscimo nas outras faixas. A distribuição dos carregamentos indica que para o caso rígida, as solicitações máximas não ocorreram para nenhum mar de proa, o que também ocorreu para as demais regiões desta jaqueta. Para o caso flexível, o carregamento dimensionante de grande parte das barras dentro dessa faixa foi o HEAD6 (30%). Esse carregamento também foi dimensionante para 22% do total de barras das faces. Como esse carregamento é proveniente de um mar de proa, que induz uma flexão no plano vertical do conjunto balsa/jaqueta semelhante ao modo de vibração representado na fig. VI.3b, pode-se inicialmente dizer que a flexão vertical do conjunto foi responsável pela maior solicitação das barras das faces. A razão de tensão média para as barras dessa região foi de 0.213 para o caso rígida e 0.222

para o caso flexível, o que representa um aumento de 4.2% .

As barras das mesas (graf. V.4.1b) foram as que sofreram alterações menos significativas, observando-se um aumento no número das barras na faixa de  $RT = 0.3$  e um decréscimo na faixa de  $RT = 0.7$ . O carregamento dimensionante para 10% do total das barras foi novamente o HEAD6. Nesta região foi verificado um aumento de 0.9% nas razões de tensões médias.

Para as pernas (fig. V.4.1c) observa-se um aumento considerável do número de barras na faixa de  $RT = 0.2$  (uma das mais elevadas). A distribuição dos carregamentos indicou que 50% das barras dessa faixa foram dimensionadas pelo carregamento HEAD6, que também é dimensionante para 35% do total de barras desta região. A razão de tensão média para estas barras foi de 0.113 para o caso rígida e 0.121 para o caso flexível (aumento de 7.1%) .

Nas vigas de lançamento (graf. V.4.1d) também foi observada uma alteração no número de barras nas faixas de  $RT$  mais elevadas sendo que para a faixa de  $RT = 0.3$  , 30% das barras foram dimensionadas pelo carregamento HEAD6. Este carregamento também foi dimensionante para 33% das barras desta região. Para o caso rígida, a  $RT$  média foi de 0.144 e para o caso flexível foi de 0.153 (aumento de 6.25%).

Para esta estrutura as barras mais sensíveis à flexibilidade da balsa foram as pernas. Como esta é uma jaqueta de quatro pernas e apresenta a viga de lançamento incorporada à face, possivelmente a deformação do conjunto por flexão no plano vertical faz com que as pernas trabalhem como os banzos de uma treliça constituída pelas pernas e faces verticais.

#### V.5.2 - JAQUETA PAB1 / Balsa BGL2

Os membros das faces (graf. V.4.1e) foram os que apresentaram menor variação da razão de tensão média (aumento de 0.6%), entretanto, nota-se aumento considerável no número de barras na faixa de RT mais elevada (0.3), onde o carregamento HEAD10 foi dimensionante para 67% das barras. No total, os carregamentos devidos à mar de proa foram dimensionantes para 9% das barras.

Para os membros das mesas (graf. V.4.1f) nota-se um aumento do número de barras nas faixas de RT mais elevadas (0.5 e 0.6). A distribuição dos carregamentos indica que para essas faixas os carregamentos dimensionantes foram os mesmos do caso rígida e que os carregamentos de mar de proa foram dimensionantes para as faixas de RT mais baixas. Neste caso, o efeito da flexão no plano vertical foi pouco significativo. Para o caso rígida, a RT média foi de 0.212 contra 0.216 no

caso flexível (aumento de 1.9%).

Observa-se para o caso das pernas (graf. V.4.1g) que a faixa de maior RT (0.3) apresenta elementos apenas para o caso flexível, o que também ocorreu para as mesas. Neste caso todos os elementos foram dimensionados pelo carregamento HEAD10, que também foi dimensionante para 12% dos elementos desta região. No total 15% das barras das pernas foram dimensionadas pelo mar de proa. A razão de tensão média para o caso rígida foi de 0.106 e para o caso flexível 0.115 (aumento de 8.5%).

Nesta estrutura os membros das vigas de lançamento (graf. V.4.1h) foram os que apresentaram maior variação na razão de tensão média, com o valor de 0.135 para o caso rígida e 0.152 para o caso flexível, o que representa um aumento de 12.6%. Nesta região o aumento mais significativo do número de barras ocorreu na faixa de RT mais elevada (0.3), onde 76% das barras foram dimensionadas pelo carregamento HEAD10. No total, 23% das barras são dimensionadas pelo mar de proa.

Para esta jaqueta também foi observado que para o caso rígida, com uma única exceção todos os carregamentos dimensionantes foram de mar de través.

Observa-se no gráfico dos membros das faces (graf. V.4.1i) um pequeno aumento do número de barras nas faixas de RT mais elevadas (0.3 e 0.4). A distribuição dos carregamentos indica que tanto no caso rígida quanto no caso flexível os carregamentos que dimensionaram o maior número de barras foram originados por mar de través, 98.4% no caso rígida e 89% no caso flexível. A razão de tensão média para esta região foi de 0.180 para o caso rígida e 0.182 para o caso flexível (aumento de 1.1%).

Na região das mesas (graf. V.4.1j) verificou-se um aumento no valor da razão de tensão média de 3.52% . Para o caso rígida este valor foi de 0.199 contra 0.206 para o caso flexível. Nas faixas de RT mais elevadas quase não ocorreram alterações nos números das barras, observando-se uma redução na faixa de RT = 1.0 . A distribuição dos carregamentos indica uma predominância do carregamento BEAM13 para ambos os casos. Os carregamentos de mar de proa foram dimensionantes para 16% do total de barras para o caso rígida e para 26% deste total para o caso flexível.

É interessante observar que para a região das pernas (graf. V.4.1l) a consideração da flexibilidade da balsa não alterou a distribuição do número de barras em nenhuma faixa,

entretanto, a distribuição dos carregamentos indica que houve uma redistribuição dos carregamentos dimensionantes, com os carregamentos de mar de través dimensionando quase a totalidade das barras para os dois casos analisados.

A região da viga de lançamento (graf. V.4.1m) foi a que apresentou maior alteração, observando-se um aumento mais acentuado no número de barras na região de  $RT = 0.3$ . A distribuição dos carregamentos indica que enquanto apenas 3% do número de barras do caso rígida foram dimensionadas para os carregamentos devidos à mar de proa, essa porcentagem passa para 33% no caso flexível. A razão de tensão média das barras dessa região sofreu um acréscimo de 17.29%, passando de 0.185 para 0.217, indicando ser esta a região mais sensível à consideração da flexibilidade da balsa.

Uma explicação para o comportamento desta estrutura pode ser devida a posição da viga de lançamento, que é independente das faces da jaqueta, justificando a maior sensibilidade dessa região para os mares de proa, responsáveis em grande parte pelo aumento do número de barras nas faixas de RT mais elevadas.

#### V.5.4 - JAQUETA IMPALA / Balsa BS3

Como pode ser observado, esta estrutura apresenta uma

grande sensibilidade à consideração da flexibilidade da balsa. Os membros das faces (graf. V.4.1n) apresentam razão de tensão média de 0.2 para o caso rígida e de 0.3 para o caso flexível, o que representa um aumento de 50% . Nas barras desta região a distribuição dos carregamentos mostra que para o caso rígida o único carregamento dimensionante foi o BEAM1 e que para o caso flexível, nas faixas de RT mais elevadas (0.6 e 0.5), o carregamento dimensionante foi o HEAD6 para a totalidade das barras. Esse carregamento também foi dimensionante para 42% dos membros das faces.

Os membros das mesas (graf. V.4.1o) foram os que apresentaram menor variação do número de barras por faixa de RT. Observa-se que nas faixas de RT mais elevadas (0.7, 0.8 e 1.0) as variações no número de barras ocorreram principalmente devido ao mar de través, ficando o carregamento HEAD6 dimensionante para 42% das barras desse intervalo. A razão de tensão média foi de 0.256 para o caso rígida e 0.288 para o caso flexível (aumento de 12.5%).

Os membros das pernas (graf. V.4.1p) foram os que mostraram maior sensibilidade para o de mar de proa. O carregamento HEAD6 foi dimensionante para 83% das barras dessa região. O caso rígida apresentou razão de tensão média de 0.138 e o caso flexível 0.263, o que representa um aumento de 90.5% .

Toda balsa apresenta um calado ideal para navegação no qual os movimentos da embarcação são os mais favoráveis, tanto sob o ponto de vista naval, quanto estrutural. Esse calado é conseguido adicionando-se lastro nos tanques da balsa. Das estruturas analisadas, a jaqueta de Impala é a mais leve (222 tf), o que torna necessário um grande volume de lastro para se obter esse calado. Neste caso foi necessário adicionar 6343 tf de lastro (28.5 vezes o peso da jaqueta). Se este lastro não for bem distribuído no comprimento da balsa, durante o transporte aparecerão cargas inerciais também mal distribuídas, fazendo com que o conjunto balsa/estrutura se deforme excessivamente durante a navegação. Esta pode ser uma justificativa para o comportamento apresentado por esta estrutura.

Convém recordar que esta estrutura não possui viga de lançamento, o que faz com que a estrutura como um todo absorva os esforços originados pelo alquebramento/tosamento da balsa (flexão no plano vertical).

#### V.5.5 - CONVÉS DE PEO / Balsa BGL2

Esta estrutura apresentou razão de tensão média de 0.255 para o caso rígida e 0.265 para o caso flexível (aumento de 3.9%) (graf. V.4.1q). A distribuição de carregamentos indica



que para o casos rígida e flexível, os carregamentos de mar de proa foram dimensionantes apenas para poucas barras nas faixas de RT mais baixas.

Embora este convés tenha somente 4 pernas, a sua fixação na balsa foi feita em 20 pontos para se evitar que grandes vãos e balanços da estrutura ficassem sem apoio durante o transportê. Isso torna a estrutura um pouco mais sensível à consideração da flexibilidade da balsa.

#### V.5.6 - CARREGAMENTOS DIMENSIONANTES

Apresenta-se em anexo a saída do programa MOSES relativa às forças inerciais geradas no centro de gravidade da estrutura transportada, para os 15 estados de mar e 2 aproamentos considerados. A análise desses resultados mostra que em geral os carregamentos dimensionantes são aqueles associados ao estado de mar que produzem as máximas forças inerciais.

## CAPÍTULO VI

### CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DINÂMICA ESTRUTURAL

#### VI.1 - INTRODUÇÃO

Quando um corpo é acelerado num meio fluido, ocorre uma transmissão de energia cinética para o fluido e uma dissipação de energia através da geração de ondas. Tais efeitos hidrodinâmicos podem ser relacionados aos conceitos de massa adicionada e amortecimento. Como já visto no capítulo III, esses efeitos foram considerados para os movimentos de corpo rígido e dependiam dos mesmos; por exemplo, a massa adicionada de um corpo flutuando com movimento de "heave" geralmente é diferente da massa adicionada do movimento de "surge". No caso de vibrações devidas às deformações elásticas, esses efeitos dependerão do modo de vibração da estrutura. Portanto, existe um acoplamento entre o problema hidrodinâmico e estrutural. A hidroelasticidade é a ciência que estuda o comportamento de corpos vibrando elasticamente em um meio fluido.

#### VI.2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A equação da vibração forçada de um sistema estrutural

elástico pode ser escrita como

$$\underset{\sim}{a} \underset{\sim}{\ddot{p}}(t) + \underset{\sim}{b} \underset{\sim}{\dot{p}}(t) + \underset{\sim}{c} \underset{\sim}{p}(t) = \underset{\sim}{Z}(t) \quad (\text{VI.1})$$

onde :

$\underset{\sim}{p}(t)$ , solução da equação VI.1, é a matriz ( $n \times 1$ ) de coordenadas generalizadas associada com os modos de vibração da estrutura no vácuo, sendo  $n$  o número de coordenadas generalizadas necessárias para descrever a resposta do sistema

$\underset{\sim}{Z}(t)$  é a matriz ( $n \times 1$ ) de forças externas generalizadas atuando na estrutura

$\underset{\sim}{a}$  é a matriz ( $n \times n$ ) de massa generalizada, cujos elementos são  $a_{rr}$  ;  $r = 1, 2, \dots, n$

$\underset{\sim}{b}$  é a matriz ( $n \times n$ ) de amortecimento estrutural generalizado, cujos elementos são  $b_{rr} = 2 \xi_r \omega_r a_{rr}$

$\underset{\sim}{c}$  é a matriz ( $n \times n$ ) de rigidez generalizada, cujos elementos são  $c_{rr} = \omega_r^2 a_{rr}$  ;  $r = 1, 2, \dots, n$

$\omega_r$  é a frequência natural de ordem  $r$  de vibração no vácuo.

$\xi_r$  é o fator de amortecimento modal.

Na teoria linear a variação da carga externa em relação ao tempo se dá de forma senoidal e os elementos da matriz  $\underset{\sim}{Z}(t)$

podem ser escritos como

$$\begin{aligned}
 Z_r(t) &= Z_r \exp(i\omega_e t) \\
 &= \left[ \Xi_{or} + \Xi_{Dr} + \sum_{k=1}^6 p_k (\omega_e^2 A_{rk} - i\omega_e B_{rk} - C_{rk}) \right] \exp(i\omega_e t)
 \end{aligned}
 \tag{VI.2}$$

para  $r = 1, 2, \dots, n$

onde,  $\Xi_{or}$  e  $\Xi_{Dr}$  representam respectivamente as forças generalizadas de Froude-Krilov e de difração na direção  $r$ ; os coeficientes hidrodinâmicos  $A_{rk}$ ,  $B_{rk}$  e  $C_{rk}$  representam respectivamente as massas adicionadas, os amortecimentos e as forças de restauração generalizadas e  $\omega_e$  é a frequência de excitação (frequência de encontro).

A solução da equação da vibração forçada no sistema de coordenadas generalizadas será :

$$\tilde{p}(t) = \tilde{p} \exp(i\omega_e t)$$

com elementos  $p_r$  e deverá atender à expressão :

$$\left[ -\omega_e^2 (\tilde{a} + \tilde{A}) + i\omega_e (\tilde{b} + \tilde{B}) + (\tilde{c} + \tilde{C}) \right] \tilde{p} = \tilde{\Xi} \tag{VI.3}$$

onde  $\tilde{\Xi}$  é a matriz de força de excitação generalizada com elementos  $|\tilde{\Xi}_r| = |\tilde{\Xi}_{or} + \tilde{\Xi}_{Dr}|$

Obtida a solução da equação da vibração forçada, o

deslocamento  $U$  em qualquer ponto da estrutura poderá ser obtido como

$$U(x,y,z,t) = \sum_{k=1}^6 U_r(x,y,z) p(t)$$

onde  $U_r(x,y,z)$  é o autovetor associado ao modo de vibração livre de ordem  $r$ .

A base do sistema de coordenadas generalizadas inclui os modos de corpo rígido ( $r = 1,2,3,4,5,6$ ) e os modos de deformação estrutural ( $r \geq 7$ ). Por definição, para os modos de corpo rígido, a frequência de vibração  $\omega_r$  tem o valor igual a zero ( $\omega_r = 0$  para  $r = 1,2,3,4,5,6$ ).

Para os casos de balsas rebocadas, os modos de vibração de deformação que interessam são os de flexão nos planos vertical e horizontal, sendo que as flexões verticais apresentam frequências naturais mais baixas do que as horizontais. Dependendo da frequência de excitação das ondas, esses modos verticais podem ser excitados de forma a apresentar alguma amplificação dinâmica. Na literatura inglesa esse fenômeno de vibração (de alta frequência) no plano vertical é denominado "SPRINGING".

Idealmente, os modos de vibração estrutural devem ser

considerados a fim de se computar a contribuição dos modos superiores na deformação da estrutura. Entretanto, visto que o fenômeno de "SPRINGING" é de ocorrência rara, muitos autores não o consideram, determinando as deformações estruturais a partir de uma análise estática [11,12,13].

Considerando-se apenas os modos de corpo rígido,  $\omega_e = 0$ , as matrizes  $\tilde{b}$  e  $\tilde{c}$  tornam-se matrizes nulas e a equação (VI.1) reduz-se a

$$\tilde{a} \ddot{\tilde{p}}(t) = \tilde{z}(t)$$

que, a menos da identificação dos termos, é idêntica à equação do movimento apresentada no capítulo III (eq.III.3).

A seguir será feita uma análise qualitativa da possibilidade de ocorrência de vibrações de alta frequência ("SPRINGING"). Para tal, será determinada a frequência natural de vibração livre no meio fluido e em seguida será feita uma comparação com o espectro de excitação a fim de se verificar se a energia do mar é considerável na faixa da frequência de ressonância.

### VI.3 - PERÍODOS NATURAIS DE VIBRAÇÃO

Inicialmente, dentre os conjuntos balsa/estrutura analisados, será determinado de forma simplificada aquele que apresenta a menor frequência natural para o primeiro modo de flexão vertical no meio fluido. Para isso será empregada a fórmula proposta por Kumai [20] para navios :

$$N_{2V} = 1.62 \times 10^6 \sqrt{\frac{I_v}{\Delta_i L^3}} \text{ (Hz)}$$

onde

$I_v$  = momento de inércia ( $m^4$ )

$\Delta_i = \left( 1.2 + \frac{1}{3} \frac{B}{T_m} \right) \Delta$  = deslocamento incluindo massa de água adicionada (kg)

$L$  = comprimento entre perpendiculares (m)

$B$  = boca na seção média (m)

$T_m$  = calado médio (m)

CONJUNTO	$I_v^{(1)}$	L	B	TM	$\Delta$	$N_{2V}$
IMPALA/BS3	13.84	105	24.0	4.0	9504	1.016
PCP3/BS3	13.84	105	24.0	4.0	9504	1.016
PAB1/BGL2	64.96	152	36.6	6.0	32640	0.678
PEO/BGL2	64.96	152	36.6	6.0	32640	0.678
PAB2/I650	214.75	152	36.6	8.7	80856	0.530

(1) considerada apenas a inércia do casco

Como o conjunto PAB2/I650 apresenta a menor frequência natural, o mesmo será adotado para uma determinação mais precisa dessa frequência. Esse cálculo será efetuado através de um programa de análise dinâmica estrutural (sistema ADEP). A descrição dos modelos simulados da jaqueta, da balsa e da amarração da jaqueta na balsa pode ser encontrada no capítulo V. As restrições ao movimento de corpo rígido do conjunto foram dadas através de molas lineares conectadas a todos os nós da estrutura da balsa, cujas rigidezas procuraram representar o empuxo hidrostático.

Na determinação das frequências naturais, as massas por terem uma importância significativa, devem estar bem modeladas. Nesta análise, foram efetuadas as seguintes discretizações das massas:

- massa correspondente ao peso próprio da jaqueta - discretizada como massas nodais concentradas nos nós das pernas da jaqueta. A distribuição do peso próprio para esses nós obedecem à distribuição real das massas da jaqueta;
- massa correspondente ao peso próprio da embarcação - discretizada como massas nodais concentradas em todos os nós da estrutura da balsa. O peso próprio da embarcação foi considerado como uniformemente distribuído;
- massa correspondente ao lastro da embarcação -



discretizada como massas nodais concentradas nos nós do perímetro dos tanques de lastro, considerando-se o volume de lastro de cada tanque;

- massa de água adicionada - discretizada uniformemente ditribuída como massas nodais concentradas em todos os nós da estrutura da balsa.

O cálculo da massa de água adicionada baseou-se no método proposto por Lewis [21] no qual a massa de água adicionada por unidade de comprimento em uma posição longitudinal  $x$  é :

$$m(x) = \frac{\pi}{8} \rho B^2(x) C(x) J_n \quad (t/m)$$

onde :

$\rho$  é a densidade do fluido, ( $t/m^3$ )

$B(x)$  é a boca da seção na posição  $x$ , (m)

$C(x)$  é o coeficiente de massa adicionada bidimensional para a seção (fig. VI.3a).

$J_n$  é o fator de Lewis de redução da massa de água adicionada bidimensional para levar em consideração sua distribuição tridimensional (fig.VI.3a).

Para o conjunto em questão  $B=52m$ ,  $L=198m$ ,  $T=8.7m$ ,  $C(x)=1.3$ ,  $J_n=0.66$  e  $m(x)=933.9t/m$  .

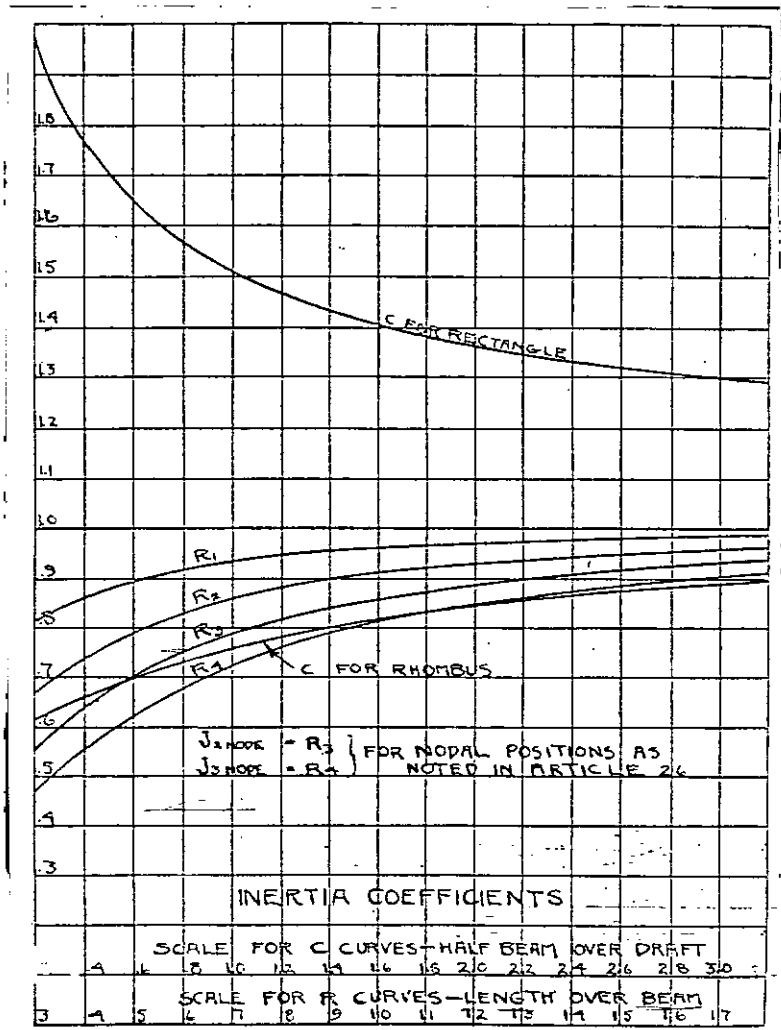


Fig. VI.3a - COEFICIENTE DE MASSA ADICIONADA (C) E FATOR DE REDUÇÃO DE LEWIS (J) [21].

O resultado da análise computacional indicou que os seis primeiros modos de vibração são de corpo rígido. O sétimo modo de vibração, flexão no plano vertical (fig. VI.3b), apresentou frequência natural de 0,6873 Hz (4,3184 rd/s), o que corresponde a um período natural de 1.455 segundos .

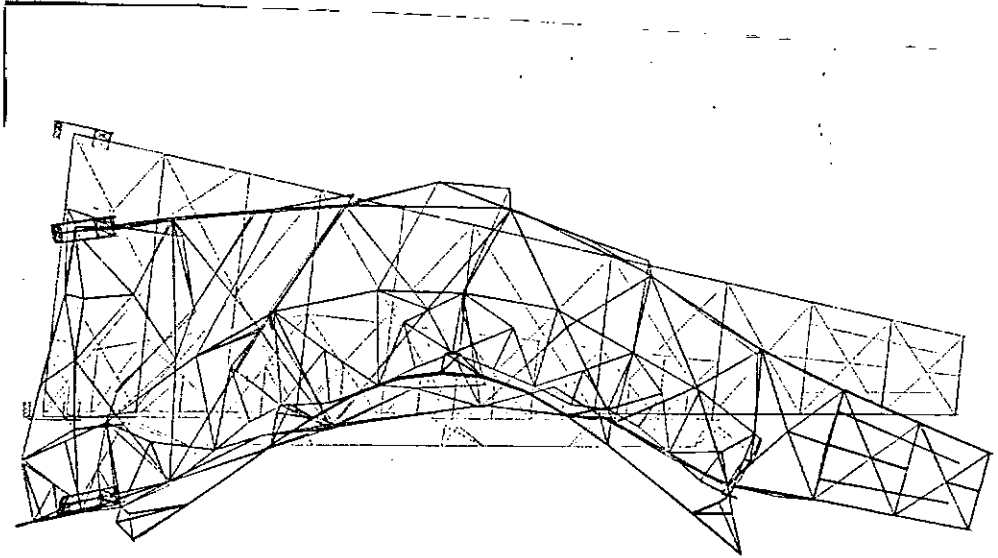


Fig VI.3b - CONFIGURAÇÃO DEFORMADA PARA 7º MODO DE VIBRAÇÃO

## VI.4 - CONCLUSÃO

Na figura VI.4 estão plotados os gráficos dos espectros de energia (ISSC) para estados de mar com altura significativa,  $H_s$ , de 4.5 metros e períodos médios,  $T_1$ , de 5, 8.5 e 12 segundos. Como pode ser observado, para esses estados de mar a energia das ondas na região da frequência natural de interesse, 7º modo (4.3 rd/s), é quase nula, o que indica que esse modo de vibração praticamente não será excitado. Portanto, para os estados de mar utilizados neste trabalho, os estudos comparativos podem ser feitos com base em uma análise estrutural estática.

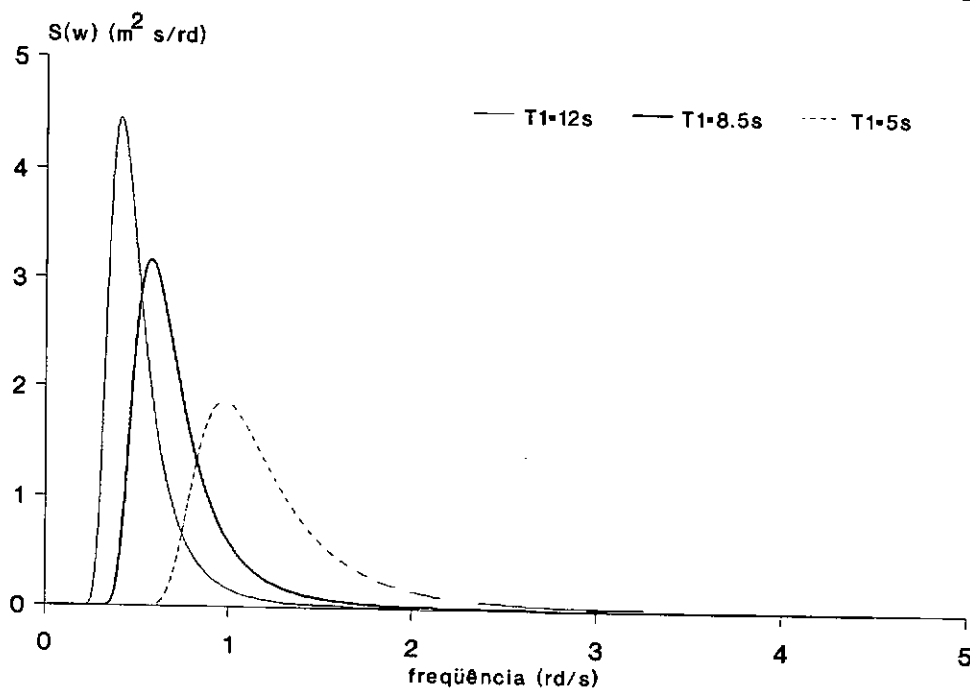


FIG.VI.4 - ESPECTRO DE MAR ISSC

ALTURA SIGNIFICATIVA  $H_s = 4.5$  m

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES

Conforme já mencionado no capítulo introdutório, ao se efetuar uma análise estrutural para a fase de transporte, uma dúvida que surge é quanto à necessidade da consideração da flexibilidade da balsa. Procurando responder a esta questão foram analisados 5 conjuntos estrutura/balsa considerando-se a balsa rígida e flexível. Os resultados mostraram que para todos os casos analisados a consideração da flexibilidade aumentou a solicitação dos elementos estruturais.

Para os modelos analisados não foi possível criar uma regra que dite quando a flexibilidade da balsa deve ser considerada, visto que em todos os casos ela mostrou certa influência. Foi constatado para o caso das jaquetas, que essa influência é menos significativa para a região das mesas e é mais significativa para as regiões das vigas de lançamento e pernas.

Na maioria dos casos constatou-se que o tosamento/alquebramento da balsa (flexão do conjunto no plano vertical) foi o fator responsável pelo acréscimo das solicitações nas estruturas.

Também foi observado que a posição da viga de lançamento é relevante para a distribuição dos esforços provenientes do tosamento/alquebramento, visto que os membros das pernas e das faces participam mais efetivamente na absorção desses esforços quando a viga de lançamento é integrada à face da jaqueta.

Um fato que merece destaque é que a influência da flexibilidade da balsa causou maior impacto na menor estrutura analisada, contrariando as expectativas existentes ao início da elaboração deste estudo. Conforme já comentado, essa estrutura não possui viga de lançamento e por ser bastante leve, foi necessária a inclusão de um volume de lastro equivalente a 28 vezes o seu peso para se obter o calado ideal de transporte. A má distribuição desse lastro causou uma deformação excessiva do conjunto, o que induziu um acréscimo de esforços principalmente nos membros das pernas e das faces, mostrando assim a importância da distribuição do lastro em uma análise com balsa flexível.

Outra dúvida apontada no capítulo I é relativa à necessidade de se efetuar uma análise dinâmica estrutural. No capítulo VI foi feita uma análise qualitativa para julgar essa necessidade constatando-se que para os tipos de estruturas analisadas, em estados de mar com períodos médios acima de 5 segundos, essa consideração não é necessária, o que confirma a

opinião de diversos autores [11,12,13].

Quanto ao período médio dos estados de mar, observou-se em todas as estruturas que os estados de mar que governaram o dimensionamento do maior número de barras foram aqueles que originaram as maiores forças inerciais e não aqueles cujos comprimentos de ondas médios entre zero ascendentes  $\langle L_{\omega} \rangle$  eram iguais aos comprimentos das embarcações.

O tema da análise de transporte é bastante amplo, oferecendo uma grande possibilidade para estudos futuros. Como complementação deste trabalho poderia ser analisada a influência da flexibilidade da balsa na resistência à fadiga. Outro assunto de interesse é a verificação da influência da geometria da amarração na transferência de carga entre a balsa e a estrutura transportada. Na área da hidroelasticidade, seria interessante analisar de maneira quantitativa o efeito da amplificação dinâmica na análise da fadiga para mares irregulares com baixo período médio.

Espero que este trabalho tenha contribuído para uma maior compreensão do comportamento estrutural durante uma análise de transporte, possibilitando que se projete esses tipos de estrutura com maior segurança.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hogben, N.; Dacunha, N.M.C; Olliver, G.F. - "Global Wave Statistics", British Maritime Technology, (1986).
- [2] St.Denis, M.; Pierson, W.J. - "On the Motions of Ships in Confused Seas", SNAME Transactions, vol.61 Society of Naval Architects and Marine Engineers (1953).
- [3] Cartwright, D.E.; Longuet-Higgins, M.S. - Proceedings, Royal Society of London, Series A, vol.237, (1956).
- [4] Chakrabarti, S.K.; "Hydrodynamics of Offshore Structures", Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, (1987)
- [5] Salvesen, N.; Tuck, E.O.; Faltinsen, O. - "Ship Motions and Sea Loads", SNAME Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1970).
- [6] Frank, W. - "Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids", Report Number 2375 David Taylor Research Center, Bethesda, Md., USA
- [7] Yeung, R.W. - "Numerical Methods in Free-Surface Flows",



- [8] Ursell, F. - "On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid", Quarterly Journal of Applied Mathematics, Vol. 2, (1949).
- [9] Porter, W.R.- "Pressure Distributions, Added Mass and Damping Coefficients for Cylinders Oscillating in a Free Surface", University of California, Berkeley, Report, 82-16.
- [10] DeJong, B. - "Computation of the Hydrodynamic Coefficients of Oscillating Cylinders", Netherlands Ship Research Center Report, (1973).
- [11] Szajnberg, R.; Greiner, W.; Chen, H.T.; Rawstron, P., "Practical Design Approaches for the Analysis of Barge Performance in Offshore Transportation and Launching", SNAME Transactions, vol.88, Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1980)
- [12] Chianis, J.W.;Mangiavacchi, A. - "A Critical Review of Transportation Analysis Procedures", Offshore Technology Conference, Houston, OTC 4617 (1983).
- [13] Zedan, M.F.; Bayazitoglu, Y.O.; Chianis, J.W.; Tein, Y. -"A Quasi-Static Approach for Transportation

Analysis of Offshore Plataforms", Offshore Technology Conference, Houston, OTC 4161 (1981).

- [14] Lewis, E.V. (editor); - "Principles of Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1989).
  
- [15] API-RP-2A - "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", American Petroleum Institute, 19th. ed., (1991).
  
- [16] Ultramarine, Inc. - "Assessing the Integrity Of a Body Subjected to a Seaway", Internal paper, (1989).
  
- [17] DNV - "Rules for Design Construction and Inspection of Offshore Structures", Det Norske Veritas, (1977).
  
- [18] "Reference Manual for MOSES - Multi-Operational Structural Engineering Simulator", Ultramarine, Inc. (1992)
  
- [19] DNV - Classification Notes 31.4 - "Strength Analysis of Main Structures of Column Stabilized Units", Det Norske Veritas, (1985).
  
- [20] Kumai, T. - "On the Estimation of Natural Frequencies of Vertical Vibration of Ships", Reports of Research

Institute of Applied Mechanics, Vol. 16, No. 54,  
(1968).

- [21] Lewis, F.M. - "The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship", Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1929).

ANEXO

RESULTADOS DO PROGRAMA MOSES

FORÇAS INERCIAIS NO C.G. DA ESTRUTURA TRANSPORTADA

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA PCP3 NA Balsa BS3                               *
*      ANALISE COM Balsa RIGIDA E FLEXIVEL                                   *
*      Draft = 4.0 Meters           Trim Angle = 0.00 Deg.           G-Metacenter = 8.0 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 11.7 Meters   Pitch Gy. Radius = 26.7 Meters   Yaw Gy. Radius = 26.2 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters         Period = 12.0 Sec.           M. Heading = 90.0 Deg.     *
*                                     S. Coef.=100.0                             *
*
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 67.8 Y = -0.3 Z = 23.4 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 4.120

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	13.03	605.03	423.71	4090.60	51.68	387.46
5.50	13.79	700.69	440.64	4821.62	50.86	459.98
6.00	14.40	789.65	441.11	5525.18	48.56	549.02
6.50	14.89	855.50	430.80	6068.14	45.50	636.66
7.00	15.29	891.99	414.02	6394.20	42.19	709.82
7.50	15.62	901.16	393.85	6512.97	38.91	763.26
8.00	15.90	889.13	372.38	6467.15	35.84	797.46
8.50	16.15	862.56	350.92	6305.74	33.03	815.61
9.00	16.36	826.98	330.18	6070.40	30.50	821.57
9.50	16.55	786.44	310.48	5792.14	28.23	818.78
10.00	16.72	743.73	291.95	5492.64	26.19	809.99
10.50	16.86	700.65	274.59	5186.43	24.35	797.27
11.00	16.99	658.24	258.32	4881.89	22.68	781.98
11.50	17.10	616.74	242.90	4581.54	21.14	764.77
12.00	17.21	575.82	227.96	4283.43	19.69	745.75

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA PCP3 NA BALSA BS3                             *
*      ANALISE COM BALSA RIGIDA E FLEXIVEL                                 *
*      Draft = 4.0 Meters           Trim Angle = 0.00 Deg.           G-Metacenter = 8.0 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 11.7 Meters   Pitch Gy. Radius = 26.7 Meters   Yaw Gy. Radius = 26.2 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters       Period = 12.0 Sec.           M. Heading = 180.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                             *
*
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 67.8 Y = -0.3 Z = 23.4 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 4.120

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	124.15	2.80	72.02	24.50	3475.00	3.55
5.50	153.98	5.29	82.65	43.83	4326.33	5.21
6.00	180.21	7.97	93.54	64.52	5060.25	6.91
6.50	200.03	10.22	103.69	81.63	5593.81	8.25
7.00	212.76	11.74	112.29	93.10	5917.04	9.08
7.50	219.10	12.56	118.93	99.10	6058.33	9.45
8.00	220.34	12.83	123.57	100.81	6059.59	9.46
8.50	217.84	12.70	126.39	99.55	5961.37	9.23
9.00	212.73	12.33	127.65	96.42	5796.37	8.87
9.50	205.89	11.81	127.64	92.21	5588.82	8.43
10.00	197.96	11.21	126.64	87.44	5356.05	7.96
10.50	189.41	10.59	124.85	82.46	5110.21	7.48
11.00	180.52	9.95	122.45	77.46	4858.63	7.01
11.50	171.40	9.33	119.49	72.53	4603.61	6.55
12.00	162.00	8.71	115.96	67.64	4343.38	6.10

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA PAB1 NA BALSA BGL2                             *
*      ANALISE COM BALSA RIGIDA E FLEXIVEL                                   *
*      Draft = 6.0 Meters           Trim Angle = 0.00 Deg.           G-Metacenter = 13.2 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 18.0 Meters   Pitch Gy. Radius = 36.7 Meters   Yaw Gy. Radius = 37.0 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters       Period = 12.0 Sec.           M. Heading = 90.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                             *
*                                     -----                             *
*****
    
```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++  
 =====

About the Point X = 104.7 Y = 0.1 Z = 30.7 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	45.70	1001.31	621.28	8471.89	1872.76	1160.24
5.50	49.16	1149.80	744.38	10778.21	1965.21	1157.79
6.00	50.12	1310.80	832.97	13565.04	1966.47	1218.66
6.50	49.24	1476.58	886.36	16504.56	1903.83	1334.60
7.00	47.18	1628.76	909.90	19223.68	1803.04	1482.71
7.50	44.47	1750.06	910.87	21439.97	1683.76	1634.65
8.00	41.51	1831.88	896.23	23027.34	1559.44	1768.40
8.50	38.53	1874.08	871.61	23990.42	1438.18	1872.55
9.00	35.67	1881.48	841.05	24406.38	1324.09	1944.29
9.50	32.99	1860.80	807.26	24379.04	1218.76	1985.92
10.00	30.51	1818.91	772.02	24012.82	1122.50	2002.07
10.50	28.23	1761.85	736.48	23399.82	1034.92	1997.87
11.00	26.14	1694.28	701.22	22611.11	955.17	1977.84
11.50	24.20	1618.89	666.21	21690.16	881.88	1944.96
12.00	22.37	1536.63	630.94	20655.17	813.31	1900.64

```

*****
*                               *** MOSES ***                               *
*                               -----                               *
*                               May 17, 1992                               *
*   TRANSPORTE DA JAQUETA PAB1 NA Balsa BGL2                               *
*   ANALISE COM Balsa RIGIDA E FLEXIVEL                                   *
*   Draft = 6.0 Meters           Trim Angle = 0.00 Deg.           G-Metacenter = 13.2 Meters *
*   Roll Gy. Radius = 18.0 Meters   Pitch Gy. Radius = 36.7 Meters   Yaw Gy. Radius = 37.0 Meters *
*   ISSC Height = 4.5 Meters        Period = 12.0 Sec.           M. Heading = 180.0 Deg.   *
*                               S. Coef.=100.0                               *
*                               *                                       *
*****
    
```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 104.7 Y = 0.1 Z = 30.7 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	183.14	0.40	96.22	8.37	4184.98	1.59
5.50	223.11	0.80	121.92	14.20	5156.26	2.05
6.00	262.73	1.63	151.15	25.84	6333.46	2.84
6.50	302.75	2.84	181.59	42.75	7595.14	3.96
7.00	340.49	4.18	210.92	61.44	8763.14	5.17
7.50	372.62	5.42	237.18	78.38	9715.96	6.24
8.00	397.19	6.38	259.22	91.56	10408.90	7.04
8.50	413.84	7.05	276.65	100.49	10850.22	7.54
9.00	423.19	7.44	289.67	105.55	11073.49	7.79
9.50	426.34	7.60	298.75	107.49	11119.54	7.83
10.00	424.46	7.60	304.44	107.07	11027.60	7.73
10.50	418.65	7.46	307.27	104.97	10831.57	7.52
11.00	409.75	7.25	307.66	101.71	10557.00	7.25
11.50	398.25	6.97	305.84	97.64	10218.37	6.92
12.00	384.26	6.64	301.82	92.92	9819.91	6.56



```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA PAB2 NA Balsa INTERMAC 650                       *
*      ANALISE COM Balsa RIGIDA E FLEXIVEL                                     *
*      Draft = 8.5 Meters              Trim Angle = 0.00 Deg.              G-Metacenter = 16.6 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 27.6 Meters   Pitch Gy. Radius = 64.0 Meters     Yaw Gy. Radius = 63.2 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters        Period = 12.0 Sec.                M. Heading = 90.0 Deg.     *
*                                     S. Coef.=100.0                        *
*
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 79.2 Y = 0.0 Z = 47.0 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 4.120

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	140.62	1710.53	1004.57	23631.68	34339.36	12306.26
5.50	130.14	1954.64	1281.05	29947.39	30843.75	11484.59
6.00	123.87	2206.49	1531.04	37279.27	28219.90	11226.83
6.50	121.66	2473.06	1731.29	45292.87	26322.57	11542.57
7.00	123.28	2747.25	1873.68	53377.13	25040.35	12356.13
7.50	128.05	3011.42	1961.25	60829.62	24248.99	13547.97
8.00	135.02	3248.79	2002.90	67181.04	23812.77	14985.22
8.50	143.40	3449.89	2009.04	72282.59	23610.66	16535.46
9.00	152.85	3611.55	1989.08	76191.48	23555.84	18074.51
9.50	163.39	3733.55	1950.60	79032.72	23598.69	19491.82
10.00	175.29	3816.78	1899.42	80929.45	23718.04	20701.19
10.50	188.96	3862.80	1839.84	81984.82	23910.48	21648.57
11.00	205.18	3873.12	1774.65	82270.75	24184.31	22307.36
11.50	225.26	3847.93	1704.90	81808.66	24556.88	22663.81
12.00	250.63	3785.70	1630.16	80569.77	25047.18	22706.40

```

*****
*                               *** MOSES ***                               *
*                               -----                               *
*                               May 17, 1992                               *
*   TRANSPORTE DA JAQUETA PAB2 NA Balsa INTERMAC 650                   *
*   ANALISE COM Balsa RIGIDA E FLEXIVEL                                 *
*   Draft = 8.5 Meters           Trim Angle = 0.00 Deg.           G-Metacenter = 16.6 Meters *
*   Roll Gy. Radius = 27.6 Meters   Pitch Gy. Radius = 64.0 Meters   Yaw Gy. Radius = 63.2 Meters *
*   ISSC Height = 4.5 Meters       Period = 12.0 Sec.           M. Heading = 180.0 Deg.   *
*                               S. Coef.=100.0                               *
*                               *                                       *
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 79.2 Y = 0.0 Z = 47.0 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 4.120

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	370.97	0.29	293.12	14.63	68964.03	6.22
5.50	424.49	0.34	309.30	15.39	66155.63	6.20
6.00	488.32	0.46	335.74	18.08	66739.28	6.64
6.50	556.82	0.68	367.22	23.51	70947.05	7.72
7.00	634.31	1.01	399.42	31.74	78607.66	9.65
7.50	721.21	1.45	430.48	42.21	88414.96	12.51
8.00	811.62	1.97	459.61	54.09	98641.70	16.13
8.50	898.39	2.53	486.27	66.42	107992.19	20.15
9.00	976.53	3.08	509.95	78.31	115797.41	24.16
9.50	1043.65	3.58	530.24	88.99	121843.73	27.83
10.00	1099.13	4.01	546.86	97.94	126173.42	30.95
10.50	1143.48	4.36	559.68	104.86	128947.59	33.38
11.00	1177.72	4.61	568.62	109.68	130348.36	35.09
11.50	1202.90	4.76	573.52	112.46	130502.47	36.10
12.00	1219.85	4.83	573.99	113.24	129455.74	36.43

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA INPALA NA BALSA BS3                             *
*      ANALISE COM BALSA RIGIDA E FLEXIVEL                                     *
*      Draft = 4.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      G-Metacenter = 10.5 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 7.9 Meters      Pitch Gy. Radius = 23.6 Meters      Yaw Gy. Radius = 24.6 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters      Period = 12.0 Sec.      M. Heading = 90.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                             *
*
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 65.5 Y = -0.3 Z = 13.3 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	1.89	159.33	62.72	330.28	0.98	27.72
5.50	1.97	156.65	65.21	328.12	0.95	33.37
6.00	2.05	149.14	65.24	314.90	0.91	38.09
6.50	2.11	139.17	63.67	295.76	0.86	41.77
7.00	2.16	128.31	61.14	274.11	0.81	44.50
7.50	2.21	117.49	58.10	252.09	0.76	46.43
8.00	2.25	107.27	54.88	230.98	0.71	47.72
8.50	2.28	97.89	51.66	211.41	0.66	48.49
9.00	2.31	89.42	48.56	193.61	0.62	48.87
9.50	2.34	81.83	45.63	177.54	0.57	48.93
10.00	2.36	75.04	42.88	163.08	0.54	48.74
10.50	2.38	68.95	40.30	150.09	0.50	48.36
11.00	2.40	63.48	37.90	138.35	0.47	47.79
11.50	2.42	58.50	35.62	127.63	0.44	47.06
12.00	2.43	53.88	33.43	117.64	0.41	46.12

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA JAQUETA IMPALA NA BALSA BS3                             *
*      ANALISE COM BALSA RIGIDA E FLEXIVEL                                     *
*      Draft = 4.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      G-Metacenter = 10.5 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 7.9 Meters      Pitch Gy. Radius = 23.6 Meters      Yaw Gy. Radius = 24.6 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters      Period = 12.0 Sec.      M. Heading = 180.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                                             *
*
*****

```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++  
 =====

About the Point X = 65.5 Y = -0.3 Z = 13.3 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	14.60	0.07	9.88	0.15	213.59	0.02
5.50	17.67	0.07	11.10	0.16	260.47	0.02
6.00	20.39	0.07	12.42	0.16	301.50	0.02
6.50	22.47	0.07	13.75	0.15	331.65	0.03
7.00	23.84	0.07	14.96	0.14	350.03	0.03
7.50	24.53	0.07	15.96	0.13	358.04	0.03
8.00	24.66	0.06	16.71	0.12	357.98	0.03
8.50	24.39	0.06	17.21	0.12	352.14	0.03
9.00	23.83	0.06	17.50	0.11	342.37	0.02
9.50	23.07	0.05	17.61	0.10	330.09	0.02
10.00	22.18	0.05	17.57	0.09	316.31	0.02
10.50	21.22	0.04	17.41	0.08	301.73	0.02
11.00	20.21	0.04	17.15	0.08	286.80	0.02
11.50	19.18	0.04	16.81	0.07	271.65	0.02
12.00	18.11	0.04	16.38	0.07	256.17	0.02

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     May 17, 1992                             *
*      TRANSPORTE DA DO CONVES DE PEO NA Balsa BGL2                             *
*      ANALISE COM Balsa RIGIDA E FLEXIVEL                                       *
*      Draft = 6.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      G-Metacenter = 15.4 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 12.9 Meters      Pitch Gy. Radius = 32.6 Meters      Yaw Gy. Radius = 33.9 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters      Period = 12.0 Sec.      M. Heading = 90.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                             *
*                                     -----                             *
*****
    
```

+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++

About the Point X = 76.0 Y = -1.2 Z = 20.5 of Body VESSEL

Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	28.08	1196.82	503.62	5788.17	317.18	312.58
5.50	30.27	1381.46	597.67	7128.28	331.63	281.36
6.00	30.87	1500.14	664.52	8077.50	330.53	259.55
6.50	30.31	1552.21	703.83	8603.01	318.84	244.61
7.00	29.01	1550.04	719.87	8768.58	301.02	234.76
7.50	27.32	1509.66	718.40	8669.67	280.37	228.71
8.00	25.48	1445.76	704.92	8398.14	259.10	225.45
8.50	23.63	1369.54	683.85	8026.46	238.52	224.19
9.00	21.85	1288.44	658.34	7604.67	219.27	224.31
9.50	20.19	1207.00	630.51	7164.72	201.57	225.38
10.00	18.65	1127.85	601.71	6726.13	185.46	227.05
10.50	17.24	1052.39	572.82	6300.31	170.84	229.07
11.00	15.95	981.09	544.29	5892.32	157.56	231.25
11.50	14.75	913.52	516.08	5501.23	145.38	233.44
12.00	13.62	848.61	487.77	5121.80	134.01	235.53

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                                     *
*                                     May 17, 1992                               *
*      TRANSPORTE DA DO CONVES DE PEO NA BALSA BGL2                          *
*      ANALISE COM BALSA RIGIDA E FLEXIVEL                                    *
*      Draft = 6.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      G-Metacenter = 15.4 Meters *
*      Roll Gy. Radius = 12.9 Meters  Pitch Gy. Radius = 32.6 Meters  Yaw Gy. Radius = 33.9 Meters *
*      ISSC Height = 4.5 Meters      Period = 12.0 Sec.      M. Heading = 180.0 Deg. *
*                                     S. Coef.=100.0                                               *
*
*****

```

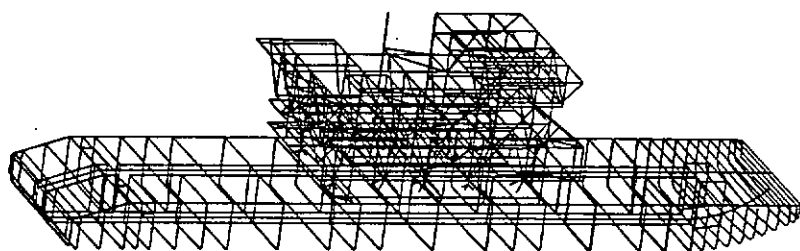
+++ STATISTICS OF FORCES IN IRREGULAR SEAS +++  
=====

About the Point X = 76.0 Y = -1.2 Z = 20.5 of Body VESSEL

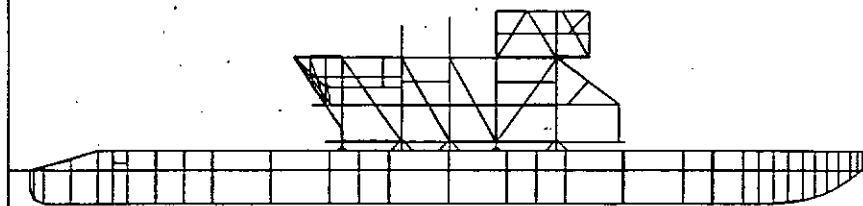
Maximum Responses Based on a Multiplier of 3.720

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Period	Long For	Tran For	Vert For	Roll Mom	Pitch Mom	Yaw Mom
5.00	122.62	1.95	61.07	13.02	677.63	1.14
5.50	146.70	2.82	75.01	17.90	816.08	1.31
6.00	168.70	3.62	85.89	22.17	977.81	1.53
6.50	189.97	4.23	93.96	25.24	1151.15	1.77
7.00	210.00	4.61	101.12	27.00	1313.16	1.99
7.50	227.35	4.80	108.73	27.63	1446.57	2.17
8.00	241.00	4.82	116.97	27.43	1544.34	2.29
8.50	250.60	4.75	125.33	26.69	1607.07	2.36
9.00	256.37	4.60	133.20	25.61	1639.15	2.39
9.50	258.81	4.41	140.15	24.36	1646.16	2.39
10.00	258.49	4.20	145.92	23.02	1633.54	2.36
10.50	255.96	3.98	150.44	21.67	1606.04	2.31
11.00	251.66	3.76	153.68	20.34	1567.23	2.25
11.50	245.81	3.54	155.62	19.04	1519.12	2.17
12.00	238.46	3.31	156.22	17.76	1462.22	2.09



CONVES DE PEO NA Balsa BGL2  
MODELO NAVAL



CONVES DE PEO NA Balsa BGL2  
MODELO NAVAL

Fig V.3e - CONJUNTO PEO / BGL2