

MEDIÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA LANCHA EM PROVAS DE MAR

Guedes Soares, C.¹; Machado Santos, F.²; Pascoal, R.²; Costa, M.³

¹Prof. Catedrático, ²Eng. Naval, ³Eng. Físico
Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval
Instituto Superior Técnico



RESUMO

Descrevem-se as provas de mar destinadas a medir a resposta dinâmica de uma lancha à excitação das ondas. O programa experimental foi planeado com o objectivo de validar os resultados de um método numérico de previsão dos movimentos do navio. Realizaram-se várias provas a duas velocidades e rumos pré estabelecidos. Durante as provas mediu-se a elevação da superfície livre e os movimentos principais de translação e rotação da lancha através da utilização de acelerómetros e inclinómetros. A embarcação foi também equipada com extensómetros nas zonas em que se previam maiores deformações estruturais.

1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento dinâmico de um navio no mar é uma área onde os métodos teóricos continuam a aperfeiçoar-se e onde continua a ser necessário haver dados experimentais disponíveis para os validar.

A resposta de um navio às condições de mar tem um papel condicionante da sua segurança, desempenho e operacionalidade. Em navios de carácter comercial, sejam eles de carga, pesca ou passageiros, existe na maior parte das vezes a possibilidade de efectuar manobras evasivas em mares de severidade elevada, sendo comum a redução da velocidade de avanço ou mudança de rumo. Contudo, este género de acções opõe-se claramente à filosofia dos navios de carácter militar em missão, ou eventualmente em actividades no domínio do serviço público, em particular a

fiscalização ou a busca e salvamento. É nesta perspectiva que o estudo desta lancha tem um interesse acrescido por forma a identificar os limites de operacionalidade desta classe de embarcações.

Para prever a resposta do navio como corpo rígido, à excitação das ondas, pode-se recorrer a :

- a) Ensaios de modelos à escala em canais de experiências;
- b) Métodos numéricos de previsão;
- c) Registo dos movimentos do navio no mar (Provas de Mar).

A forma mais frequente de validar os métodos de cálculo é o recurso ao ensaio de modelos (eg. Guedes Soares, 1990). No entanto, as provas de mar à escala natural são muito importantes e sempre que possível recorre-se a elas para obter dados sem efeito de escala (Guedes Soares et al, 1999, Stredulinsky et al, 2000).

Nas provas de mar realizadas pretendeu-se adquirir o máximo de informação possível para aferir um modelo de cálculo que tem em consideração vários aspectos não-lineares inerentes ao movimento de navios (Fonseca e Guedes Soares, 1998).

Estes ensaios revestem-se de especial importância atendendo às usuais dificuldades de ter disponíveis navios para a sua execução.

2. PROVAS DE COMPORTAMENTO NO MAR

Os navios da classe "Argos" possuem cascos de formas planantes com as características principais descritas na tabela I.



Fig 1 - Lancha Classe "Argos" (fonte: www.marinha.pt)

Comprimento total:	27.20 m
Comprimento entre perpendiculares:	25.20 m
Boca :	5.90 m
Imersão :	1.4 m
Deslocamento máximo :	94 t
Velocidade máxima :	≈ 28 nós
Velocidade de cruzeiro :	≈ 15 nós

Tabela I. Características do Navio

Os ensaios realizaram-se entre os dias 11 e 13 de Novembro, tendo-se planeado a obtenção de registos para as seguintes condições de operação:

- i. Embarcação aproada ao vento com velocidade, em relação ao fundo, aproximadamente nula;
- ii. Rumos predeterminados à velocidade de serviço;
- iii. Rumos predeterminados à máxima velocidade possível.

A condição i. tinha como objectivo a validação das leituras do radar ondógrafo instalado à proa da embarcação.

Para as condições ii. e iii. tentou-se caracterizar a embarcação nas situações de operação mais comuns.

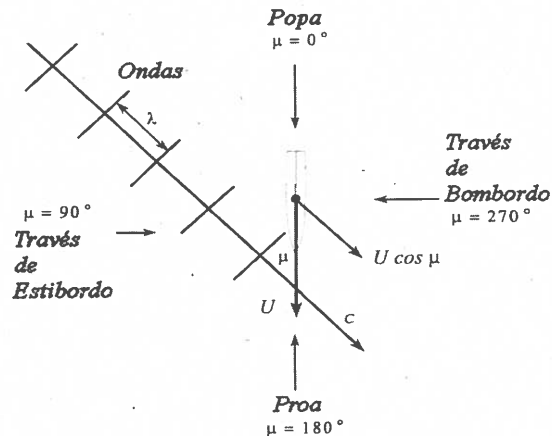


Fig 2 - Definições dos Rumos

Durante as provas foram realizadas corridas de aproximadamente 20 minutos, em rumos espaçados de 45°, i.e., de 180, 135, 90, 45 e 0 graus. Como representado na figura 2, assume-se a convenção de 180°, 90° e 0° para mares de proa, través de estibordo e popa respectivamente. Este tipo de estratégia é comum em provas de mar (Stredulinsky et al, 2000).

A tabela II descreve estas três condições.

Rumo (°)	Velocidade (nós)
180*	0 (i.)
180	16 (ii.)
135	16 (")
90	16 (")
45	16 (")
0	16 (")
180	20 (iii.)
135	20 (")
90	20 (")
45	20 (")
0	20 (")

*Junto à bóia ondógrafo.

Tabela II. Provas de Comportamento no Mar

O sistema de bordo destinado a medir a elevação da superfície livre do mar necessita de ser aferido, por esta razão a primeira prova consistiu em posicionar o navio junto a uma bóia ondógrafo.

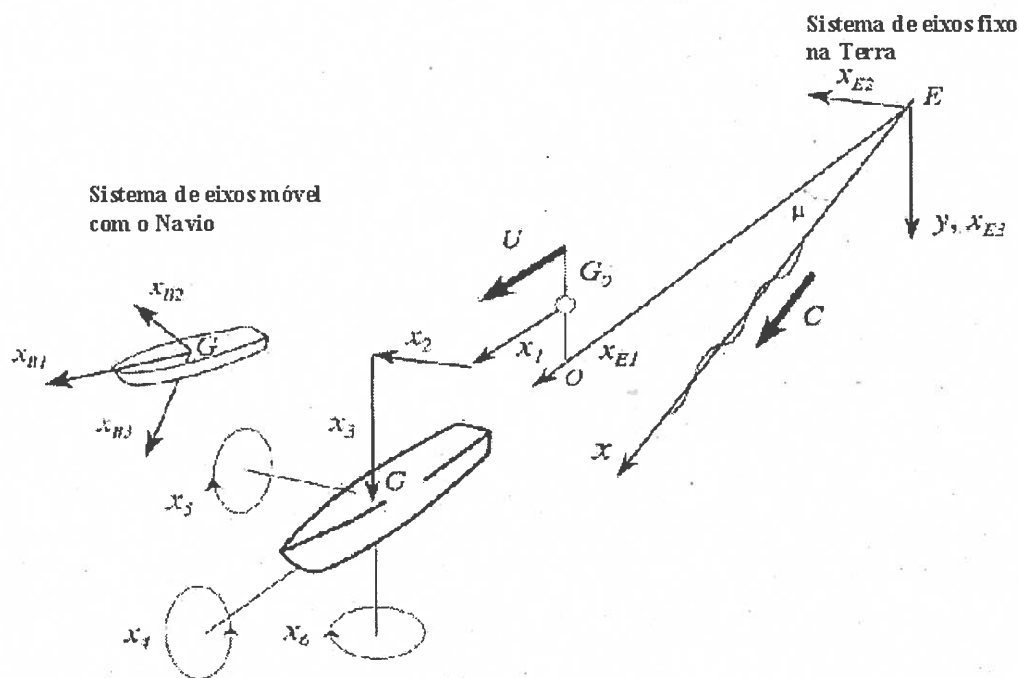


Figura 3 – Nomenclatura e Referenciais

No que se refere à identificação do estado do mar, a condição de operação foi realizada com numa situação de capa ou proa à vaga, condição i., mantendo o mínimo de velocidade possível unicamente por forma a garantir estabilidade direccional.

O intervalo de 20 minutos para o registo temporal de movimentos é normalmente aceite como o período em que se pode considerar que o processo é estacionário.

3. INSTRUMENTAÇÃO

Considerando o navio como um corpo rígido com seis graus de liberdade, pretendia-se medir fundamentalmente os movimentos de rotação transversal e longitudinal, i.e., balanço e cabeceio respectivamente, bem como a translação vertical ou arfagem. São estes os principais movimentos originados pelas ondas.

Foi instalado na embarcação um equipamento que regista a elevação absoluta da onda, permitindo a obtenção do espectro da agitação marítima.

Para medição da resposta, dois inclinómetros registaram os movimentos de rotação em planos perpendiculares, i.e., balanço e cabeceio. Assim sendo, a utilização de três acelerómetros em locais predeterminados no navio permitiu a determinação do movimento de translação vertical, arfagem, e ainda a confirmação dos registos dos movimentos rotacionais.

Face à dificuldade em conhecer a posição exacta do centro de gravidade da embarcação, torna-se necessário proceder a correcções das leituras dos transdutores, quando colocados noutras posições. A figura 3 descreve a nomenclatura utilizada, sendo todas as unidades no Sistema Internacional.

Se os acelerómetros foram colocados nas posições (x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}) mediram as acelerações absolutas locais \ddot{s}_1, \ddot{s}_2 e \ddot{s}_3 dadas pelas equações diferenciais (1), (2) e (3).

$$\ddot{x}_1 = \ddot{s}_1 + x_{B2}\ddot{x}_6 - x_{B3}\ddot{x}_5 \quad [(m/s^2)] \quad (1)$$

$$\ddot{x}_2 = \ddot{s}_2 + x_{B3}\ddot{x}_4 - x_{B1}\ddot{x}_6 \quad [(m/s^2)] \quad (2)$$

$$\ddot{x}_3 = \ddot{s}_3 - x_{B2}\ddot{x}_4 + x_{B1}\ddot{x}_5 \quad [(m/s^2)] \quad (3)$$

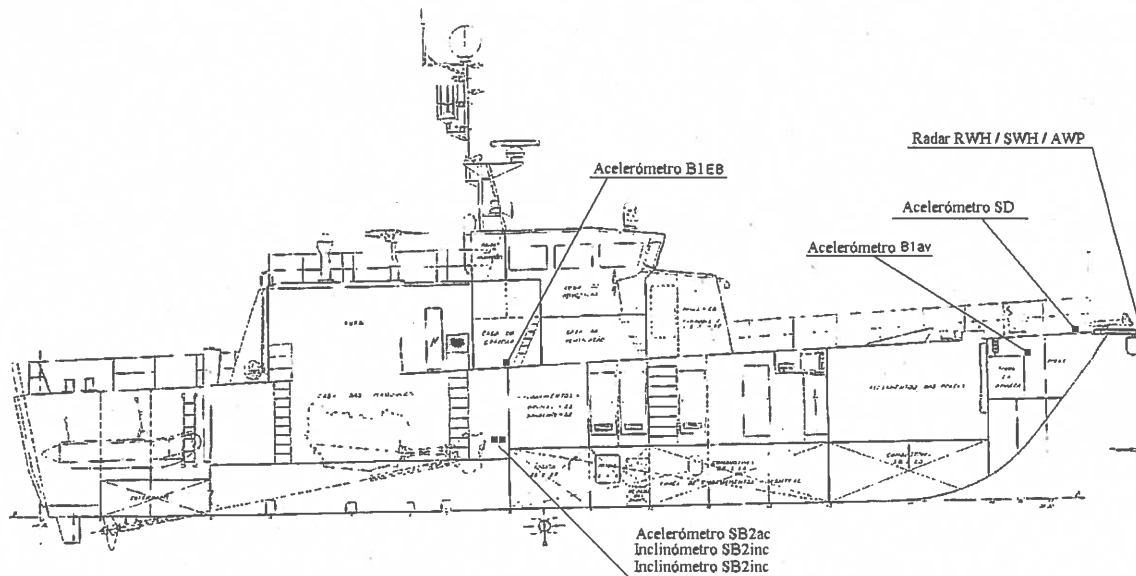


Fig 4 – Localização dos Transdutores

A figura 4 apresenta a localização dos transdutores e as tabelas III e IV as variáveis registadas.

Tipo de Transdutor	Movimento Medido	Referência	Unidades (leitura)
Acelerómetro	Arfagem	SB2ac	[m/s ²]
Inclínómetro	Cabeceio	SB2inc	[°]
Inclínómetro	Balanço	SB1inc	[°]
Acelerómetro	Balanço/ Arfagem	B1EB	[m/s ²]

Tabela III. Transdutores de Movimento

Transdutores do sistema radar	Movimento Medido	Referência	Unidades (leitura)
Acelerómetro *	Cabeceio/ Arfagem	SD	[m]
Radar microondas	Elevação Relativa de Onda	RWH	[m]
Integração electrónica	Elevação Absoluta de Onda	WH	[m]
Integração electrónica	Altura de Onda Significativa	SWH	[m]
Integração electrónica	Período Médio de Encontro	AWP	[s]

*com plataforma estabilizada

Tabela IV. Sistema Radar Microondas

4. REGISTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

4.1 Aquisição de Sinal

Um sistema de aquisição de sinal registou dados de todos os transdutores com uma taxa de amostragem de 30 Hz.

Espectro de X	$S_X(\omega_e)$
Média de X	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$
Desvio Padrão	$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$
Variância	$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}$
Máximo	Max[X _i]
Mínimo	Min[X _i]
RMS (valor quadrático médio)	$\sigma_0 = \sqrt{\int_0^{\infty} S_X(\omega) d\omega}$

Tabela V. Estatísticas

A aquisição de sinal dos extensómetros foi realizada por um algoritmo desenvolvido em LabView, da National Instruments. O programa desenvolvido para o efeito acede à saída de um conversor A/D de 16bit, em forma de carta PCMCIA, ligado a um condicionador de sinal com oito canais multiplexados, sendo cada canal independentemente configurável.

4.2 Metodologia utilizada na análise de dados

Para cada estado do mar, rumo e velocidade da embarcação, os sinais foram caracterizados e analisados com base no cálculo do espectro de frequência e parâmetros estatísticos referidos na tabela V.

4.3 Pós processamento de Sinal dos transdutores.

O sinal obtido a 30 Hz, para todas as corridas, foi filtrado recorrendo a uma rotina implementando o filtro "Butterworth" passa-baixo de ordem 8 com uma frequência de corte variando entre os 0,020 e 0,037 Hz, escolhido por forma a evitar o efeito *alias* e consequente falta de resolução na representação dos picos mais elevados.

No que respeita a frequência de corte utilizada, garantiu-se que os dois sinais filtrados se encontrassem na mesma relação de fase com os registos originais.

Foi sempre realizada uma correspondência directa, em frequência, entre solicitação e resposta, isto é, assume-se linearidade no sistema.

Para a obtenção das ordenadas espectrais, foi desenvolvido um algoritmo baseado na transformada rápida de Fourier. Este implementa ainda um alisamento com espectro estimado em 4 segmentos, em que se dividiu a série segundo o método de "Bartlett".

A relação entre o espectro de acelerações e de deslocamentos, no pressuposto de linearidade, obedece à seguinte equação:

$$S_{\ddot{x}}(\omega_n) = \omega_n^4 \cdot S_x(\omega_n) \quad [(m^2/s^4)/(rad/s)] \quad (4)$$

5. VALIDAÇÃO DOS DADOS DO RADAR ONDÓGRAFO

Apresenta-se na **Fig 5** uma comparação dos registos da bóia com os registos temporais do Radar Ondógrafo, colocado à proa da Lancha.

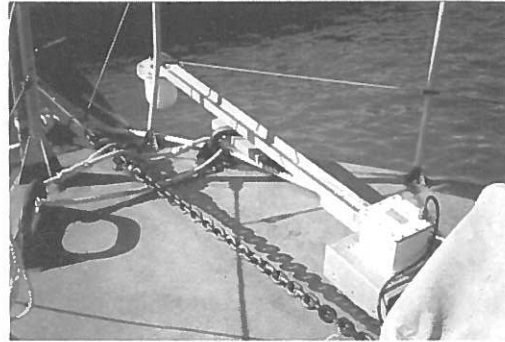


Fig 5 - Radar Ondógrafo

Durante este ensaio a lancha foi posicionada no rumo 180° e com velocidade reduzida ao mínimo possível, simplesmente por forma a garantir a estabilidade direccional da embarcação.

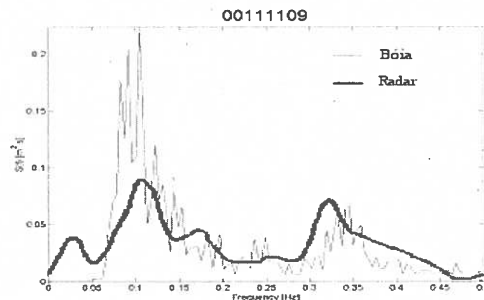


Fig 6 - Densidade Espectral – Registo da Bóia vs Radar

Na **Fig 6** pode observar-se uma elevada largura de banda no espectro da elevação de onda do radar, tal como a existência de dois picos significativos que ocorrem às frequências de 0,12 e 0,32 Hz respectivamente.

Comparando as duas curvas da **Fig 6** observa-se uma largura de banda menor no registo da bóia, mas de uma forma geral as curvas comparam bem, tanto na frequência de onda, como na ordem de grandeza das ordenadas espectrais. A identificação de dois picos energéticos em ambas as curvas é notória, espera-se que análises futuras

revelam algo sobre a direcção de propagação destes sistemas.

Considerando o valor da altura de onda significativa dada pela expressão:

$$H_{1/3}^{(1)} = 4 \cdot \sigma_0 = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (5)$$

E para o caso de se contabilizar a dispersão associada ao gráfico de densidade espectral.

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{T_p^2}{T_z^2}} \quad (6)$$

$$H_{1/3}^{(2)} = 4 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\epsilon^2}{2}} \quad (7)$$

O processamento dos dados de registo do Radar obtiveram-se os valores da tabela VI.

Elevação Absoluta de Onda-WH	
$H_{1/3}^{(1)}$ [m]	0.5136
ϵ	0.7709
$H_{1/3}^{(2)}$ [m]	0.3959
T_m [s]	4.3673
T_z [s]	3.7357
T_o [s]	6.8259
F_o [Hz]	0.1465

Tabela VI. Altura Significativa e Períodos

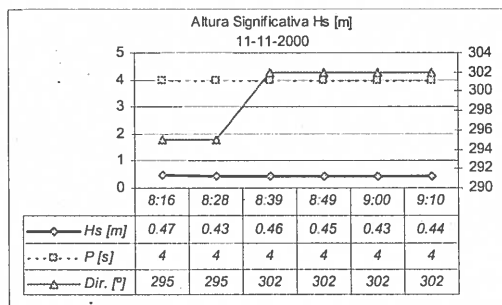


Fig 7 - Registos da Bóia Ondógrafo

A altura significativa média tem o valor de 0,45 metros, valor este que se enquadra entre os valores de $H_{1/3}^{(2)}$ e $H_{1/3}^{(1)}$.

Os períodos de 4 segundos registados na bóia confirmam as leituras do radar com períodos de cerca de 4,40 segundos.

Com estes elementos comprova-se a qualidade da leitura do radar para este estado do mar.

6. ANÁLISE DA RESPOSTA DE CORPO RÍGIDO

Para mares irregulares os movimentos são fundamentalmente dependentes da frequência de encontro, dada por:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 \cdot U}{g} \cdot \cos \mu \quad (8)$$

em que ω_e e ω representam as frequências circulares, de encontro e das ondas respectivamente, U a velocidade do navio, μ o ângulo de rumo em relação à ondulação e g a aceleração da gravidade. Para melhor identificação destas variáveis poder-se-á observar a Figura 3.

É com base nesta frequência que se realiza o processamento de resultados.

Para comparação com o modelo teórico foi assumido que o domínio de frequências de interesse variava entre 0,15 e 0,40 Hz.

As figuras 8 e 9 são exemplos de curvas determinadas pela via experimental.

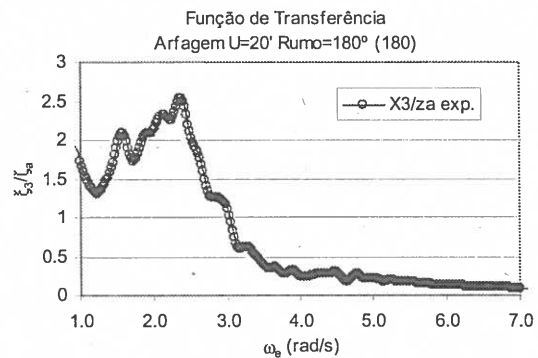


Fig 8 - Função de Transferência - Arfagem

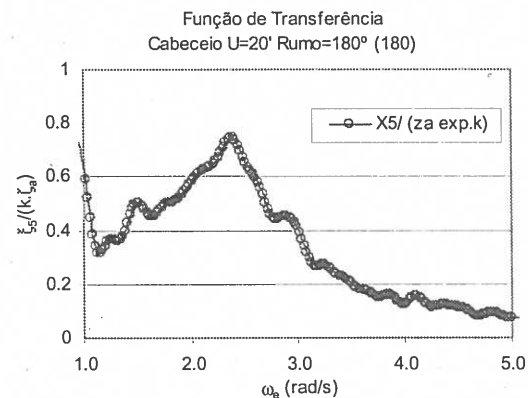


Fig 9 - Função de Transferência - Cabeceio

7. ANÁLISE DA RESPOSTA FLEXÍVEL ESTRUTURA

O navio para além de responder à acção das ondas como um corpo rígido, também se deforma por acção destas e tem vibrações associadas ao comportamento elástico da estrutura. Para analisar o navio como um corpo flexível instalaram-se vários extensómetros e dois acelerómetros de vibrações.

A instalação de extensómetros em situações de adversidade atmosférica, particularmente elevadas temperaturas e humidade, bem como o elevado grau de aleatoriedade das condições em que se realizam os ensaios em navios torna-se muito difícil e de resultados nem sempre bons. Não se conseguiu obter bons resultados de todos os extensómetros, mas os resultados foram mesmo assim encorajadores, pois conseguiu-se caracterizar os efeitos dos movimentos globais e das vibrações.

7.1 Instalação dos Extensómetros e Metodologias

Foram utilizados extensómetros genéricos, liga constantan, com protecção em poliamida, adequados à leitura de tensões estáticas e dinâmicas. Cada extensómetro foi colado à superfície posteriormente ao tratamento adequado desta. Após a instalação, encapsulou-se o extensómetro com polímero isolante, protegendo-o do meio envolvente, em particular da humidade.

Visto que eram conhecidas as direcções principais de extensão, o que em situações de campo permite uma maior rapidez de instalação, o circuito de medida utilizado foi a montagem em quarto de ponte de Wheatstone, com um extensómetro passivo de compensação.

A tensão de excitação dos extensómetros foi de 3,333V e introduziu-se um ganho de 1000. Posteriormente verificou-se uma captação excessiva de ruído, consequência das inúmeras interferências electromagnéticas existentes a bordo da embarcação, em especial junto ao quadro eléctrico principal. Finalmente, escolheram-

se dois locais de instalação; o Pique de Vante, pequeno compartimento à proa da embarcação, e a Casa das Máquinas. Na instalação do primeiro encontrou-se uma elevada percentagem humidade, no limiar condensação. No segundo as temperaturas rondavam os 40 graus centígrados.

Comum a estes dois locais estava a irregularidade da superfície encontrada neste casco construído em Plástico Reforçado a Fibra de Vidro e com inúmeras camadas de tinta, típicas de um navio com 10 anos.

7.2 Resultados de Extensometria

Na Fig 10 observa-se a existência de deformações com conteúdo espectral na banda do espectro da agitação marítima, as quais se podem associar à deformação do navio pela passagem das ondas.

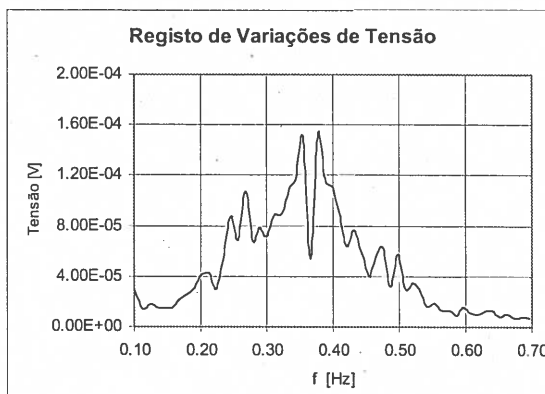


Fig 10 – Deformações devidas ao encontro com as ondas.

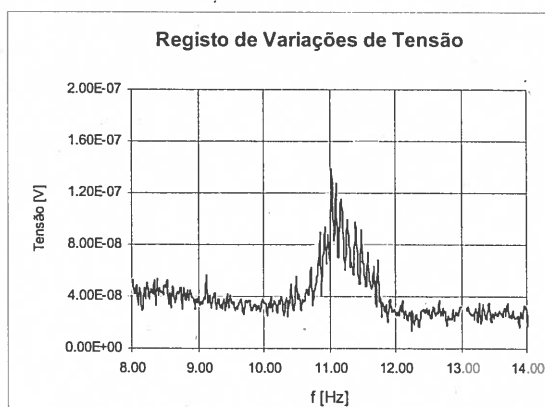


Fig 11 – Deformações devidas à vibração global do casco

Na Fig 11 identifica-se um pico em torno dos 11Hz, frequência bastante acima das associadas à agitação marítima (a frequência de Nyquist era 15). Esta

frequência deve corresponder ao primeiro modo de vibração do casco, a qual se pode estimar por cálculo de elementos finitos.

7.3 Análise Dinâmica em Elementos Finitos

Desenvolveu-se um modelo tridimensional do navio para se determinar os modos próprios de vibrações e posteriormente a resposta vibratória.

A **Fig 12** representa um corte longitudinal do modelo que no total é constituído por 6947 painéis, mostra a estrutura interna do casco tal como a representação das massas mais significativas, como são as máquinas propulsoras e grupo de geradores.

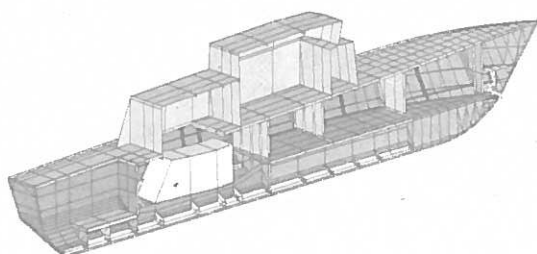


Fig 12 - Corte longitudinal do modelo

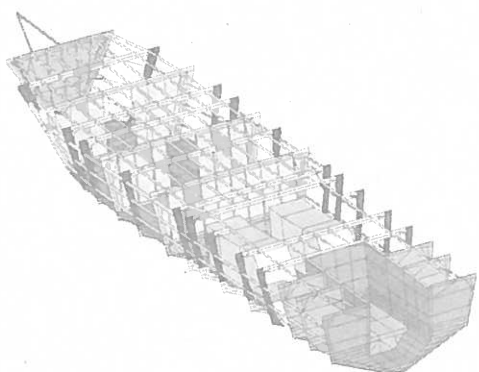


Fig 13 - Representação estrutural detalhada

Exemplos do primeiro modo de vibração vertical e do segundo modo torsional podem ser observados na **Fig 14** e 15, respectivamente.

A frequência natural de vibração do primeiro modo é de 12Hz e a do segundo modo torsional é de 22.5Hz. A frequência de 12Hz obtida para o primeiro modo é suficientemente próxima dos 11Hz determinados experimentalmente para considerar os resultados realistas face ao conjunto de incertezas relacionadas, entre

outros aspectos, com a real distribuição de massas a bordo.

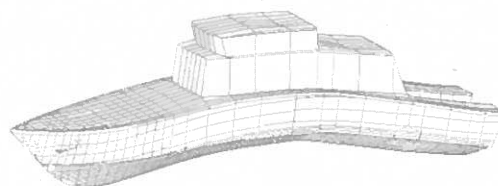


Fig 14 - Primeiro modo de vibração vertical

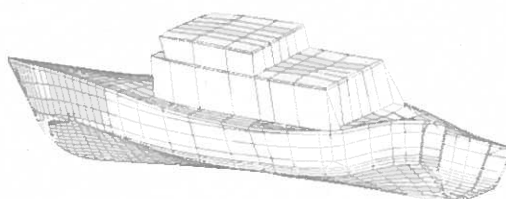


Fig 15 - Segundo modo de vibração torsional

8. CONCLUSÕES

Os dados fornecidos pelo sistema de radar para medição das ondas pela bóia ondógrafo foram validados e demonstrou-se que o sistema é eficiente para determinar o espectro das ondas.

O sistema de medição dos movimentos funcionou de forma excelente e demonstrou-se que era possível determinar as funções de transferência a partir daquelas medições.

As medições da vibração da estrutura foram encorajadoras, em particular nos primeiros modos de vibração.

9. RECONHECIMENTO

O presente trabalho foi elaborado no âmbito do projecto "Identificação e Simulação das Características de Manobra de Navios", o qual foi financiado pela Fundação das Universidades Portuguesas no âmbito do Programa Ambiente-Defesa.

REFERÊNCIAS

Fonseca, N., Guedes Soares, C., 1998, "Time-Domain Analysis of Large-Amplitude Vertical Motions and Wave Loads", *Journal of Ship Research*, Vol. 42, Nº 2, pg. 100-113.

Stredulinsky, D.C., Pegg, N.G., Gilroy, L.E., 2000, "Motion and wave load predictions and measurements on HMCS NIPIGON", *Transactions The Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 142, Part D, pp. 148-158.

Guedes Soares, C., 1990, "Comparison of Measurements and Calculations of Wave Induced Vertical Bending Moments in Ship

Models", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 37, N° 412, pg. 3-374.

Guedes Soares, C., Sutulo, S., Francisco, R.A., Santos, F.M. and Moreira, L., 1999, "Full-Scale Measurements of Manoeuvring Capabilities of a Catamaran", *Proceedings of the International Conference on Hydrodynamics of High Speed Craft*, London, pg. 1-12.

