

MOVIMENTOS DE NAVIOS NA ENTRADA DE UM PORTO INDUZIDOS PELA AGITAÇÃO MARÍTIMA

Sara Rodrigues

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa
e-mail: srodrigues@lnec.pt

João A. Santos

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa
e-mail: jasantos@dec.isel.pt

Diogo Rúben Neves

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa
e-mail: dneves@lnec.pt

Ricardo Oliveira

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa
e-mail: a23035@alunos.isel.pt

RESUMO

No interior de um porto, a agitação marítima pode originar movimentos verticais de grande amplitude nos navios ao longo da sua trajectória de entrada no porto, levando ao encalhe ou mesmo ao naufrágio desses navios, dependendo do material do fundo do porto e da sua capacidade para danificar o casco do navio.

Com base na modelação numérica da interacção de corpos flutuantes com ondas e assumindo como linear esta interacção, é possível, partindo da função resposta em frequência do navio, definida como a amplitude do movimento vertical estacionário de um ponto seleccionado no navio sujeito a ondas monocromáticas, determinar o espectro da resposta do navio a partir do espectro da agitação incidente no navio. A mesma assumção de linearidade permite levar em conta a velocidade não nula do avanço do navio modificando a frequência de encontro de cada uma das componentes do espectro.

Nesta comunicação, apresentam-se os resultados obtidos com a modelação numérica da interacção da agitação incidente na entrada do porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores, com o "N/M Fernão Gomes", um navio com comprimento de 114 m, uma boca de 19 m e um calado de 7 m, e avalia-se a possibilidade desse estado de agitação induzir movimentos verticais excessivos do navio ao longo da sua trajectória, bem como a inoperacionalidade da faixa de navegação associada a movimentos verticais cuja altura seja ultrapassa por um limiar pré-definido.

O modelo numérico WAMIT, Newman & Slavounos (1988), foi utilizado para determinar a função resposta em frequência do navio "N/M FernãoGomes" tendo-se analisado a influência nos resultados obtidos, não só da profundidade da zona onde o navio se desloca mas também da velocidade de avanço do mesmo.

Palavras-chave: Resposta de navios, Movimentos verticais, Agitação marítima.

1 INTRODUÇÃO

As operações portuárias podem ser fortemente condicionadas pela agitação marítima. Com efeito, a agitação marítima pode levar a movimentos excessivos de navios amarrados nos terminais o que pode causar interrupções naquelas operações ou mesmo estragos nos navios, nas infra-estruturas portuárias, nos navios vizinhos e até no ambiente portuário. Se um navio está a navegar na entrada ou no interior do porto, a agitação marítima pode originar movimentos verticais do navio de grande amplitude causando o encalhe ou mesmo naufrágio do navio, dependendo do material do fundo do porto e da sua capacidade para danificar seriamente o casco do navio.

Do exposto pode concluir-se que as actividades de gestão de qualquer autoridade portuária beneficiarão certamente com o desenvolvimento da capacidade de previsão da agitação marítima e dos seus efeitos nas operações portuárias, nomeadamente nos navios em manobra no porto.

Os modelos numéricos regionais de previsão da agitação marítima são capazes de produzir estimativas muito exactas das características dos estados de agitação gerados pelo vento ao largo de qualquer porto. Depois, utilizando modelos numéricos para propagação de ondas, transferem-se aquelas características desde o largo até qualquer ponto no interior de uma bacia portuária.

No âmbito do projecto MOIA, Santos et al. (2009), acoplou-se um conjunto destes modelos tendo como objectivo último o desenvolvimento de uma ferramenta integrada para apoio à tomada de decisão na gestão portuária. Tal ferramenta será capaz de prever os efeitos da agitação marítima nas infra-estruturas, na navegação e nas operações portuárias, emitindo mensagens de aviso ou de alerta para os membros relevantes da comunidade portuária sempre que a segurança do porto estiver em causa.

Já está em operação uma versão preliminar da interface com o utilizador desta ferramenta, cujo nome coincide com o do projecto, Brejo (2009), que permite a selecção pelo utilizador dos pontos de cálculo relevantes para a sua actividade. Para cada um desses pontos podem ser impostos limiares aos parâmetros de agitação marítima calculados com os modelos numéricos levando a ultrapassagem daqueles limiares à divulgação de mensagens de aviso.

O objectivo desta comunicação é apresentar uma metodologia para determinar a resposta de um navio à agitação marítima incidente ao longo da sua trajectória de entrada num porto, avaliando a possibilidade de um dado estado de agitação induzir movimentos excessivos do navio em manobra.

Depois deste capítulo de introdução, faz-se uma breve descrição do pacote MOIA. De seguida, apresenta-se o modelo numérico utilizado para determinar a função de resposta em frequência do navio, avaliando-se a influência da profundidade e da velocidade de avanço do navio na amplitude do movimento vertical de um ponto seleccionado no mesmo. Por fim, apresenta-se o caso de estudo aplicado ao porto da Praia da Vitória. A comunicação termina com algumas conclusões sobre o trabalho realizado apontando também direcções a seguir em trabalho futuro.

2 PACOTE MOIA

A ideia base do pacote MOIA é a possibilidade de conhecer, com um ou dois dias de antecedência, as características da agitação marítima ao largo de qualquer zona portuária e de transferir essas características para o interior da bacia portuária, sendo possível fazer uma previsão do estado de agitação no interior da bacia portuária. Tal permitirá a emissão de mensagens de aviso ou de alerta sempre que exista a possibilidade de ocorrência de acontecimentos perigosos, o que levará à redução da ocorrência de situações de emergência nas actividades portuárias.

O sistema MOIA tem as seguintes funcionalidades: (i) caracterização da agitação marítima no interior da bacia portuária a partir das previsões obtidas ao largo com modelos regionais; (ii) caracterização dos efeitos da agitação marítima nas infra-estruturas, na

navegação e nas operações portuárias; (iii) emissão de mensagens de aviso e de alerta para as diversas áreas portuárias. Toda a informação importante será armazenada numa base de dados.

O primeiro problema a ser abordado foi a propagação da agitação marítima. As características da agitação marítima previstas para o largo pelo modelo WAVEWATCH III (WWIII), um modelo de terceira geração desenvolvido no NOAA/NCEP, Tolman (1999), são propagadas para a costa primeiro com o modelo SWAN, Booij et al. (1999), até à entrada do porto e depois transferidos para o interior do porto com o modelo DREAMS, Fortes (2002).

Para que possam ser úteis no processo de tomada de decisão relativo à gestão de operações portuárias, as previsões das características das ondas em pontos seleccionados do interior do porto devem estar disponíveis numa base regular para os membros da comunidade portuária.

Cada um dos 36 valores horários associados a uma corrida do WWIII tem atribuído o mesmo instante de produção. Assim qualquer previsão realizada com o MOIA tem sempre dois instantes associados: o instante de produção e o instante a que a previsão diz respeito. Isto permite o cálculo da idade da previsão do WWIII e a decisão sobre a necessidade de actualizar o conjunto das previsões mais recentes das características da agitação marítima no interior do porto.

Uma vez que este é o conjunto de características da agitação marítima que pode levar à emissão de mensagens de alerta de acordo com os limiares definidos por cada membro da comunidade portuária, esta actualização das previsões não implica a eliminação das anteriores mas apenas a adição de um conjunto de registos à base de dados que armazena a informação do MOIA. Utiliza-se este procedimento para permitir a rastreabilidade da informação em que se apoiaram as decisões de gestão.

3 MOVIMENTOS DO NAVIO

As equações do movimento estabelecem o equilíbrio dinâmico entre as forças de inércia associadas à massa do navio e as forças externas que actuam no navio em resultado das interações entre o casco e o fluido.

O navio é considerado um corpo rígido e que oscila em seis graus de liberdade. Os movimentos oscilatórios consistem em três translações segundo cada um dos eixos de coordenadas (avanço - "surge", abatimento - "sway", arfagem - "heave"), e três rotações em torno dos mesmos eixos (balanço - "roll", cabeceio - "pitch", guinada - "yaw"), Figura 1.

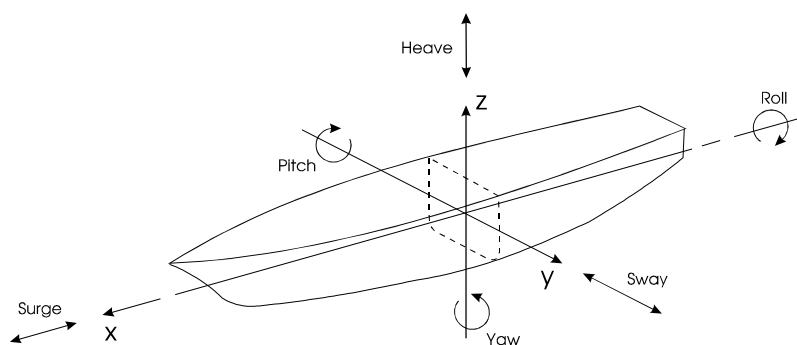


Figura 1. Movimentos do navio segundo cada um dos seis graus de liberdade.

Os modelos numéricos para o cálculo dos potenciais dos problemas de difracção e de radiação foram desenvolvidos inicialmente para a indústria de exploração de petróleo ao largo da costa. Um desses modelos é o WAMIT, Newman & Sclavounos (1988), desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology. Este modelo vai ser usado para determinar a resposta

do navio, em termos da altura dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do mesmo para uma gama de períodos de onda, profundidades e ângulos entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda expectável na zona em estudo.

Trata-se de um modelo numérico em que se assume a linearidade da interacção entre o corpo flutuante e as ondas nele incidentes. Esta linearidade permite a decomposição daquela interacção em dois problemas mais simples: os chamados problemas de difracção e de radiação, Figura 2.

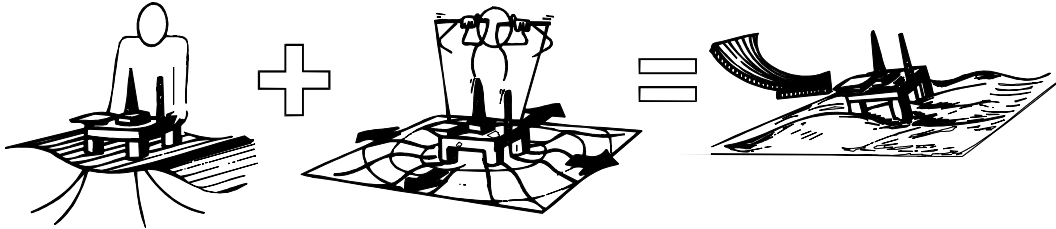


Figura 2. Decomposição da interacção de um corpo flutuante com as ondas nos problemas de difracção e de radiação, adaptado de Faltinsen (1990).

No problema de difracção determinam-se as forças exercidas pelas ondas incidentes no navio imobilizado na sua posição média, enquanto no problema de radiação se determinam as forças necessárias para deslocar o navio em águas de outra forma paradas. É também devido à linearidade desta interacção que é possível definir as funções potencial do campo de velocidades dos escoamentos associados a estes problemas:

$$\phi = \phi^D + \phi^R \quad (1)$$

Nesta equação ϕ designa o potencial para a interacção do corpo flutuante com as ondas, ϕ^D é o potencial do escoamento associado ao problema de difracção e ϕ^R o potencial do escoamento do problema de radiação. Problemas mais simples podem ser definidos estudando a interacção com ondas monocromáticas. Nesse caso o potencial de radiação pode escrever-se como o resultado da sobreposição dos potenciais associados à oscilação independente do navio segundo cada um dos seis graus de liberdade apresentados na Figura 1, vindo então ϕ

$$\phi = \left[\varphi_0 + \varphi_7 + \sum_{j=1}^6 -i\omega\varphi_j\varepsilon_j \right] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

em que ω é a frequência das ondas monocromáticas, ε_j é a amplitude complexa da oscilação segundo a coordenada generalizada j e φ_0 a φ_7 designam a variação espacial dos potenciais associados ao problema de difracção (φ_0 e φ_7) e ao problema de radiação (φ_1 a φ_6). Porque o escoamento em torno do casco é claramente tridimensional, isso implica que no problema de radiação os movimentos segundo uma das coordenadas generalizadas produzirá certamente forças segundo outras coordenadas generalizadas (i.e. existirá interferência mútua entre os vários modos de oscilação).

Decompondo as forças do problema de radiação nas componentes em fase com a aceleração e com a velocidade do navio, isto é tomando as partes real e imaginária de

$$F_{kj}^R = \rho \int_{S_B} \varphi_j n_k dS \quad (3)$$

obtêm-se os chamados coeficientes de massa adicionada e de amortecimento,

respectivamente, a_{kj} e b_{kj} :

$$a_{kj} = -\rho \operatorname{Re} \left[\int_{S_B} \varphi_j n_k dS \right] \quad (4)$$

$$b_{kj} = -\rho \omega \operatorname{Im} \left[\int_{S_B} \varphi_j n_k dS \right] \quad (5)$$

n_k é a componente segundo a coordenada generalizada k do vector normal à superfície molhada do casco, S_B . Assim, a_{kj} é $1/\omega^2$ da componente da força segundo a coordenada k em fase com a aceleração do corpo quando ocorre uma oscilação forçada segundo j e b_{kj} é $1/\omega$ da componente da força em fase com a velocidade do corpo.

Com modelo numérico WAMIT determinaram-se os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, bem como as forças de difracção do “N/M Fernão Gomes”, um navio com um comprimento de 114 m, uma boca de 19 m e um calado de 7 m, para um conjunto de 40 frequências igualmente distribuídas entre 0.025 rad/s e 1.0 rad/s (períodos entre 251.3 s e 6.28 s). A superfície molhada do casco do navio foi discretizada com 421 painéis, Figura 3.

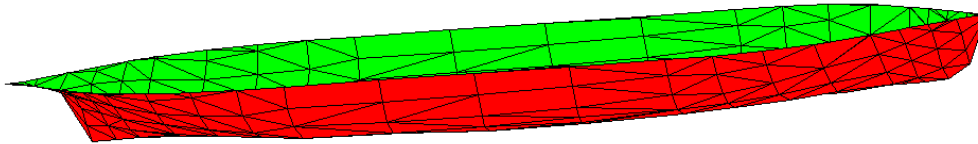


Figura 3. Painelização da superfície molhada do casco do navio “N/M Fernão Gomes”.

Os gráficos da evolução com a relação profundidade/calado dos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, Figura 4, para o modo de oscilação de arfagem (“heaving”), mostram que estes coeficientes são muito sensíveis à profundidade da zona onde o navio está, aumentando o valor daqueles coeficientes com a redução da profundidade.

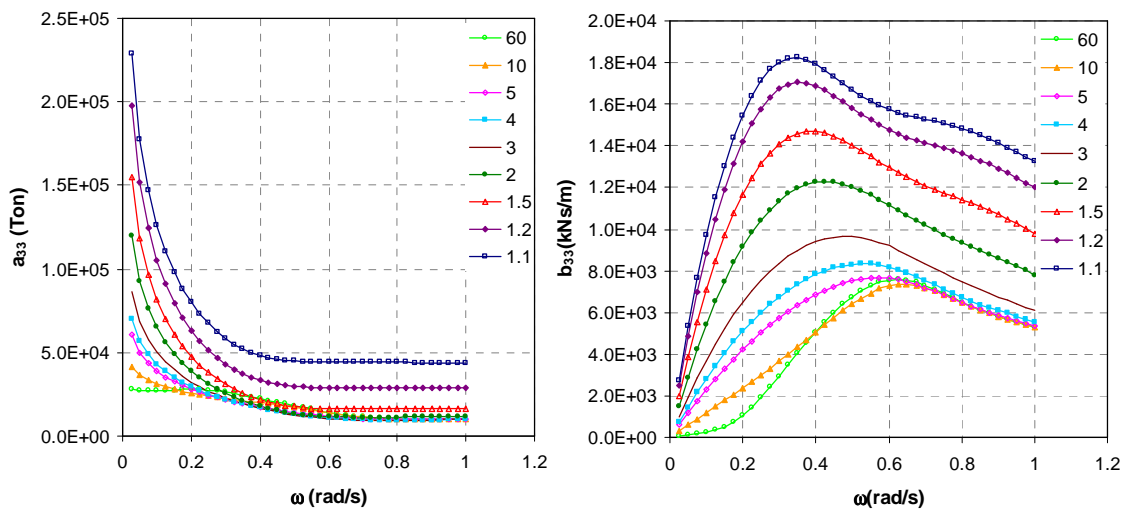


Figura 4. Influência da relação profundidade/calado nos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de arfagem do “N/M Fernão Gomes”.

No gráfico do coeficiente de amortecimento verifica-se que para os períodos mais baixos uma relação calado/profundidade igual a 4 já produz valores semelhantes aos de valores maiores da mesma relação, algo que está de acordo com o esperado, atendendo a que estes coeficientes estão relacionados com a geração de ondas em águas de outra paradas.

No que diz respeito à força de difracção segundo a arfagem, a Figura 5, com a influência da profundidade nesta força quando o “N/M Fernão Gomes” está sujeito a ondas que fazem um ângulo de 30° com o eixo longitudinal do navio, mostra que, para valores da relação profundidade/calado superiores a 3, já é difícil distinguir a influência desta relação naquela força. Além disso, a figura mostra que há um aumento daquela força quando a profundidade diminui, para períodos pequenos, e um aumento para períodos grandes. Outro resultado interessante nesse gráfico é a convergência dos valores da força, independentemente da profundidade, para o valor correspondente à impulsão hidrostática à medida que o período da onda incidente aumenta.

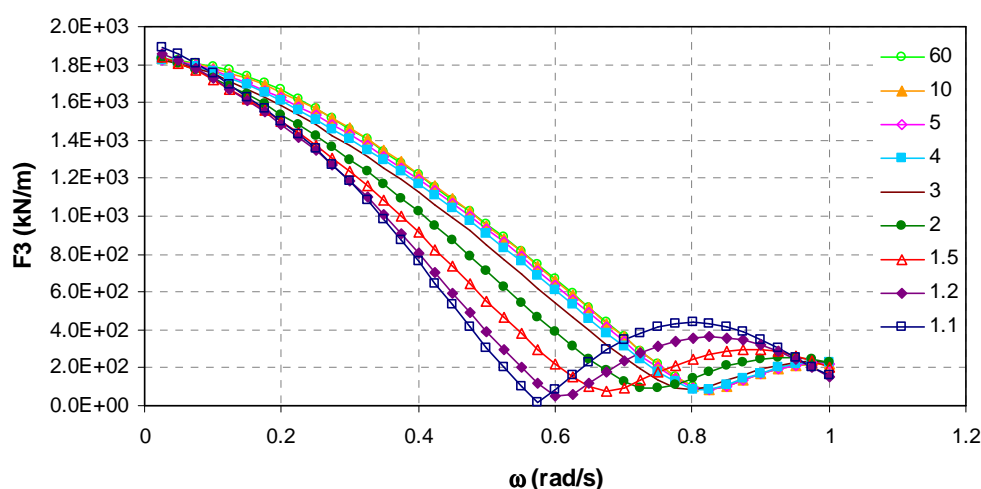


Figura 5. Influência da relação profundidade/calado na força vertical no “N/M Fernão Gomes” provocada por ondas incidentes cujo vector número de onda faz um ângulo de 30° com o eixo longitudinal do navio.

3.1 FUNÇÃO RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A caracterização do movimento vertical de um ponto seleccionado no navio sujeito a uma agitação irregular qualquer pode realizar-se utilizando os resultados no domínio da frequência. Tal deve-se à inexistência de componentes de segunda ordem significativas nas forças actuantes no navio quando este se desloca na entrada ou no interior do porto. Assim é possível determinar o espectro da resposta do movimento desse ponto, $S_R(\omega)$, a partir do espectro da agitação incidente no navio, $S(\omega)$, e da função de resposta em frequência (em termos da amplitude da oscilação desse ponto no navio) nos pontos que definem as trajectórias do navio.

$$S_R(\omega) = |H(\omega)|^2 S(\omega) \quad (6)$$

Se o navio tem velocidade de avanço não nula, U , a frequência da onda incidente no navio, ω , deve ser substituída pela frequência de encontro, ω_e :

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos \beta \quad (7)$$

Em que β é o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente.

A função de resposta em frequência pode ser obtida através da solução das equações para o movimento estacionário do navio livre:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{kj} + a_{kj})\ddot{\xi}_j + b_{kj}\dot{\xi}_j + C_{kj}\xi_j] = F_k^E \quad k = 1, \dots, 6 \quad (8)$$

em que M_{kj} e C_{kj} são, respectivamente, as matrizes de massas e de restituição hidrostática do navio, a_{kj} e b_{kj} são os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, e F_k^E designa a força de excitação devida às ondas (associadas ao problema de difracção) segundo a coordenada generalizada k para ondas monocromáticas de amplitude unitária e frequência ω cujo vector número de onda faz um ângulo β com o eixo longitudinal do navio. ξ_j representa a amplitude da oscilação segundo a coordenada generalizada j do ponto seleccionado no navio, enquanto $\dot{\xi}_j$ e $\ddot{\xi}_j$ designam, respectivamente, a velocidade e a aceleração da mesma oscilação.

As soluções das equações diferenciais lineares de segunda ordem, equação (8), são movimentos do tipo harmónico:

$$\xi_j(t) = \text{Re} \left\{ \xi_j^A(\omega) e^{i\omega t} \right\} = \xi_j^a \cos(\omega t + \theta_j) \quad (9)$$

onde ξ_j^A é a amplitude complexa do movimento oscilatório, ξ_j^a é a amplitude real do movimento e θ_j é a fase do movimento em relação à passagem da onda na posição do centro de gravidade do navio (i.e. o atraso da resposta no tempo). De acordo com a equação anterior, a função de transferência de resposta do sistema é dada pela amplitude do movimento do navio, sendo:

$$H_j(\omega) = \xi_j^a(\omega) \quad (10)$$

Para um ângulo de incidência de 30° , a Figura 6 ilustra a influência da relação profundidade/calado na amplitude do movimento vertical de um ponto no "N/M Fernão Gomes" cujas coordenadas no referencial do navio são (45.5, 5.4, 0.0). A figura mostra que a diminuição da profundidade implica um aumento do período onde ocorre o máximo da resposta, verificando-se também um ligeiro aumento do valor desta amplitude máxima.

Importa referir que os valores apresentados nos gráficos são os correspondentes a uma onda incidente com 1 m de amplitude o que, para algumas situações, pode ser muito mais do que o expectável no local onde está o navio.

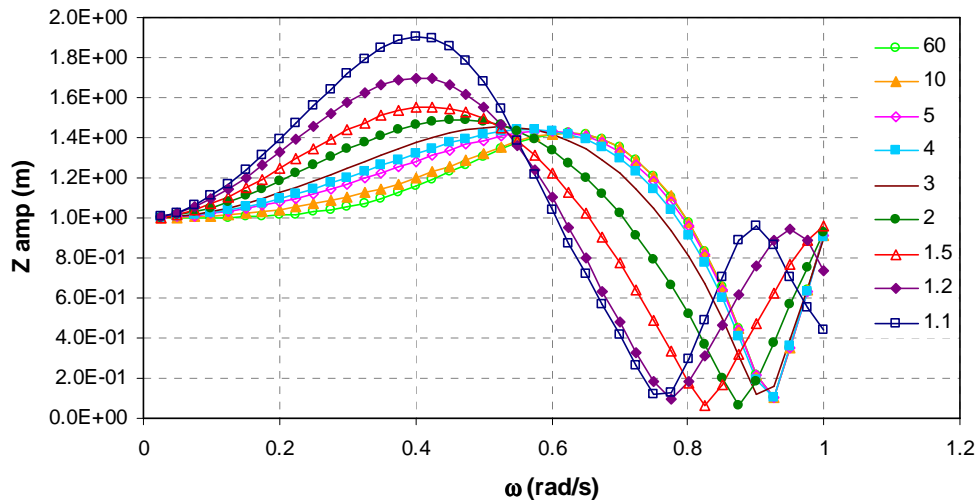


Figura 6. Influência na amplitude do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” da profundidade da zona onde o navio está para um ângulo de 30° entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio.

A Figura 7 ilustra a influência da velocidade de avanço do navio na altura do movimento vertical para uma relação de profundidade/ calado igual a 2 quando este se encontra sujeito a ondas monocromáticas cujo o vector número de onda faz um ângulo de 30° com o eixo longitudinal do navio.

Como o navio se desloca no mesmo sentido que as ondas, a frequência de encontro é inferior à frequência das ondas incidentes. Uma vez que a abcissa do gráfico é a frequência das ondas incidentes no navio observa-se que o aumento da velocidade de avanço do navio (que corresponde a diminuir a frequência de encontro) implica a deformação segundo as abcissas da curva correspondente à velocidade nula. De notar que apenas a partir da frequência 0.6 rad/s se torna mais evidente esta deformação. Em geral, observa-se um aumento da resposta com o aumento da velocidade de avanço, embora a mudança de sinal da derivada da curva da resposta nas frequências mais altas inverta esta tendência.

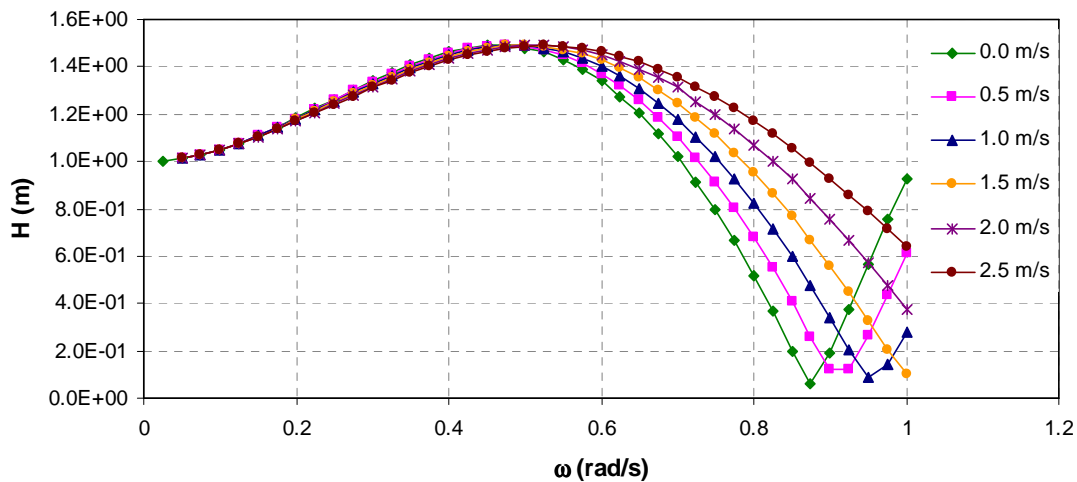


Figura 7. Influência da velocidade de avanço do “N/M Fernão Gomes” na altura do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do navio numa profundidade de 14 m e sujeito a ondas incidentes cujo o vector número de onda faz um ângulo de 30° com o seu eixo longitudinal.

4 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo apresenta-se a avaliação de inoperacionalidade devido a movimentos verticais excessivos na viagem de entrada do “N/M Fernão Gomes” no porto de Praia da Vitória. Trata-se de uma análise directamente relacionada com a gestão das operações portuárias, pois quantifica-se o número de vezes que determinada actividade não pode ser realizada por ser esperada a ocorrência de um dado fenómeno. Tal análise tem interesse para a gestão quotidiana das operações portuárias cujo objectivo é sobretudo evitar problemas, mais do que avaliar as consequências dos mesmos.

O porto da Praia da Vitoria localiza-se na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores (Portugal), Figura 8. Trata-se de um pequeno porto protegido por dois molhes que definem uma baía aproximadamente rectangular com cerca de 1 km x 2 km.



Figura 8. Porto da Praia da Vitória.

4.1 AGITAÇÃO MARÍTIMA NA ENTRADA E NO INTERIOR DO PORTO

Na caracterização da agitação marítima ao largo do porto em estudo recorreu-se a modelos de previsão de escala regional. Assim partindo de um campo de ventos (também fornecido por modelos numéricos, Tomé et al. (2005)), o modelo WAVEWATCH III, Tolman (1999), prevê as características da agitação marítima na região do arquipélago, Simões et al. (2009).

Depois, transferiram-se aquelas características para o interior do porto utilizando dois modelos numéricos acoplados para propagação de ondas: com o modelo SWAN, Booij et al. (1999), e o modelo DREAMS, Fortes (2002), Figura 9 a). Assim, obtiveram-se primeiramente os valores da agitação marítima no ponto P1 (exterior ao porto) com o modelo SWAN, que foram transferidos para o interior do porto com o modelo DREAMS, correspondentes aos valores nos pontos P2 a P4, Figura 9 b).

A razão para a utilização destes dois modelos numéricos deve-se à inexistência de um único modelo capaz de simular, de forma computacionalmente eficaz, a propagação da agitação marítima nesta vasta região tendo em conta todos os fenómenos relevantes para aquela propagação.

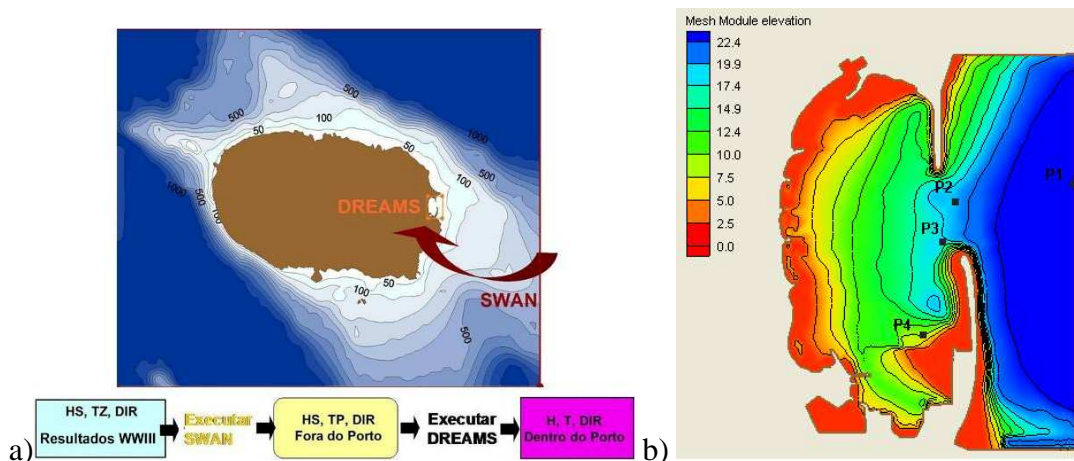


Figura 9. a) Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (resultados do WWII) para o interior do porto da Praia da Vitória; b) Batimetria com a localização dos pontos P1 a P4.

Neste trabalho, o conjunto de dados utilizados perfaz um total de 14571 valores horários correspondentes a 2 anos de previsões, desde o dia 1 de Janeiro de 2009 até 31 de Dezembro de 2010, no período desde o dia 6 de Julho de 2010 a 13 de Outubro de 2010 não houve registos dos estados de agitação medidos na bóia-ondógrafo colocada no exterior do porto, sobre uma profundidade de aproximadamente de 90 m e a 4 km a Nordeste do porto.

A Figura 10 apresenta para o período em estudo a série temporal da altura significativa, H_s , para os pontos P1 a P4, cujas profundidades são: 37.90 m, 19.72 m, 17.93 m e 8.89 m, respectivamente. Na Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos (máximo, média, mínimo, desvio padrão e gama mais frequente) para as características da agitação marítima em cada um dos pontos seleccionados (P1 a P4).

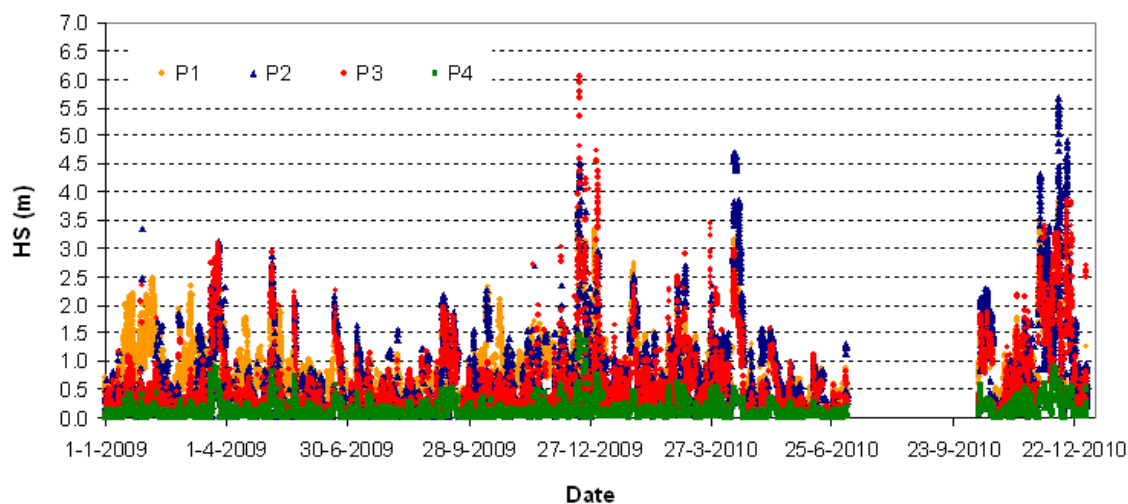


Figura 10. Série temporal dos valores da altura significativa para os pontos P1 a P4, para um período de 1 de Janeiro 2009 a 31 de Dezembro de 2010.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos da agitação marítima ao largo e nos pontos P1 a P4, desde o dia 1 de Janeiro de 2009 até ao dia 31 de Dezembro de 2010.

Pontos \ Parâmetros estatísticos		Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais frequente
P1	Hs (m)	4.58	0.85	0.04	0.61	[0.0 - 1.0] (69.96%)
	Tp (s)	16.69	9.19	2.21	2.50	[10.0 - 11.0] (18.46%)
	DIR (°)	359.32	63.14	0.036	40.90	[20 - 30] (16.15%)
P2	Hs (m)	5.66	0.58	0.004	0.75	[0.0 - 1.0] (81.33%)
	Tp (s)	16.69	9.51	4.06	2.14	[10.0 - 11.0] (19.48%)
	DIR (°)	158.83	71.61	21.15	29.52	[60 - 70] (19.71%)
P3	Hs (m)	6.04	0.51	0.006	0.66	[0.0 - 1.0] (84.84%)
	TP (s)	16.69	9.51	4.06	2.14	[10.0 - 11.0] (19.48%)
	DIR (°)	138.47	53.98	9.18	18.23	[30 - 40] (25.25%)
P4	Hs (m)	1.47	0.12	0.002	0.15	[0.0 - 1.0] (99.77%)
	Tp (s)	16.69	9.51	4.06	2.14	[10.0 - 11.0] (19.48%)
	DIR (°)	175.19	76.77	1.79	42.22	[30 - 40] (12.70%)

Em termos de altura significativa o ponto P4 encontra-se mais protegido da agitação incidente do que os restantes pontos, com valor inferior aos registados nos outros pontos fora e à entrada do porto.

Relativamente aos pontos P1, P2 e P3 localizados no exterior ou próximo da entrada do porto, eles são submetidos à maioria das ondas incidentes, verificando-se valores elevados de altura significativa máxima de onda. Verifica-se que o ponto P3 é aquele que apresenta uma altura significativa máxima maior, com 6.04 m, que é resultado também de reflexões da estrutura portuária. Como se pode observar para o dia 19 de Dezembro de 2009, os valores da altura significativa apresentam um máximo nos pontos P1, P2 e P3 de 3.37 m, 3.26 m e 6.04 m, respectivamente.

4.2 RESPOSTA DO NAVIO À AGITAÇÃO INCIDENTE

Conhecidas as características da agitação marítima nas várias posições ocupadas pelo navio, é possível avaliar o espectro de resposta do navio, isto é o espectro do movimento vertical do navio ao longo da sua trajectória de entrada num porto.

Neste estudo, assume-se que a agitação marítima incidente no navio pode ser caracterizada por um espectro JONSWAP com a altura significativa, Hs, e o período de pico, Tp, dados pelos modelos numéricos para propagação de ondas.

Face ao exposto, é possível determinar a altura significativa do movimento vertical do navio a partir do conhecimento daquele espectro de resposta. Com efeito, admitindo que ambos os espectros da agitação incidente e o da resposta do navio são de banda estreita, então as alturas das ondas individuais na série temporal do estado de agitação incidente e do movimento vertical do navio em resposta a esse estado de agitação seguem uma distribuição de Rayleigh.

A altura significativa dos movimentos de um ponto seleccionado no navio é dada por:

$$H_S = 1.42\sqrt{8m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad (11)$$

em que m_0 é o momento de ordem zero do espectro dos movimentos do navio.

Ao longo da trajectória de entrada do navio no porto de Praia da Vitória, a faixa que pode ser ocupada pelo navio é dividida num conjunto de troços por forma a se observar, nos centróides de cada um desses troços, os movimentos verticais do ponto seleccionado do navio.

Aqueles centróides correspondem aos pontos P1 a P4 da Figura 9 b) e nesses pontos são determinadas as características das ondas incidentes. Na abordagem que aqui se descreve, teve-se em conta cinco velocidades de avanço do navio (0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s e 2 m/s) e assumiu-se o mesmo limiar de 0.5 m para a altura significativa dos movimentos verticais para a avaliação da inoperacionalidade. O rumo do navio variou entre 270° no ponto P1 e 180° no ponto P4, sendo 255° e 225° nos pontos P2 e P3, respectivamente.

Assim, considerando os valores previstos de Hs, Tp e DIR nos pontos P1 a P4 no dia 21 de Novembro de 2009 às 01:00, ou seja, (0.98 m, 11.14 s, 20°), (0.12 m, 11.14 s, 32°), (0.18 m, 11.14 s, 33°) e (0.12 m, 11.14 s, 79°), para uma velocidade nula do navio obtêm-se os seguintes valores para a altura significativa do movimento vertical do navio: 1.46 m, 0.17 m, 0.21 m e 0.13 m, respectivamente. Isto significa que se o limiar for excedido é emitida uma mensagem de aviso, neste caso para o ponto P1. Considerando uma velocidade de avanço do navio de 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s e 2 m/s, tem-se um ligeiro aumento dos valores da altura significativa do movimento vertical do navio com o aumento da velocidade de avanço do mesmo, para cada ponto do trajecto do navio, verificando-se que para cada valor de velocidade de avanço considerado, uma diminuição da altura significativa do movimento vertical do navio à medida que a profundidade diminui. Isto é, para a velocidade de avanço do navio igual a 0.5 m/s obtêm-se os seguintes valores para a altura significativa do movimento vertical do navio: 1.44 m, 0.17 m, 0.21 m e 0.13 m, enquanto para uma velocidade de avanço igual a 2 m/s têm-se: 1.41 m, 0.17 m, 0.24 m e 0.14 m, sendo 1.43 m, 0.17 m, 0.22 m e 0.13 m para uma velocidade de avanço igual a 1 m/s e 1.42 m, 0.17 m, 0.23 m e 0.13 m para uma velocidade de avanço igual a 1.5 m/s. O que significa que para o ponto P1 o valor do limiar foi sempre ultrapassado para as velocidades de avanço do navio consideradas.

Repetindo o procedimento para a série temporal completa da altura significativa e direcções nos pontos P1 a P4, para o período de 1 de Janeiro de 2009 a 31 de Dezembro de 2010 obtêm-se as séries temporais das alturas do movimento vertical do navio. Na Figura 11 representa-se a altura significativa média do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” nos quatro pontos considerados para a trajectória de entrada no porto.

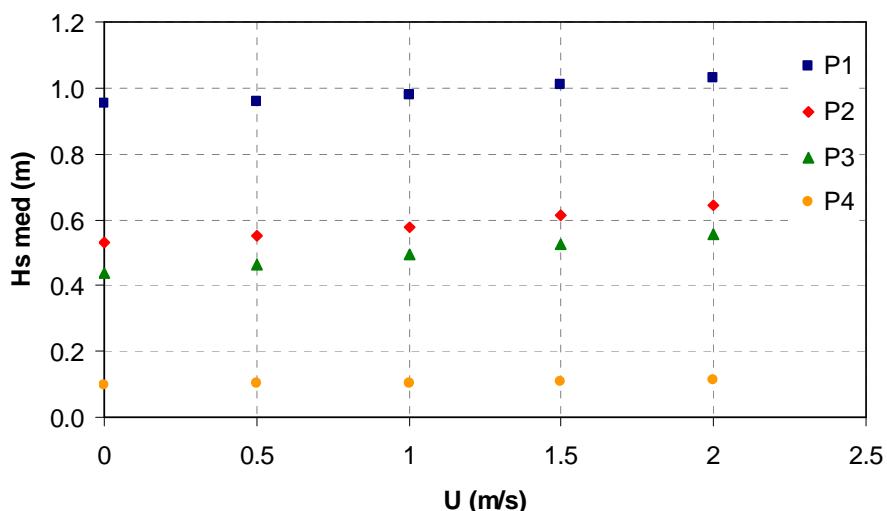


Figura 11. Influência da velocidade de avanço do navio no valor médio da altura significativa do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” nos pontos que definem a trajectória de entrada no porto.

Utilizando uma abordagem em frequência e tendo em conta que o número total dos dados de previsão da agitação não é o mesmo para todos os pontos (14571 valores para P1, 13751 para P2, P3 e P4), obtêm-se o valor esperado da probabilidade da altura significativa do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) no “N/M Fernão Gomes” exceder 0.5 m. Estes valores de probabilidade são apresentados na Tabela 2.

Como seria expectável, para uma velocidade de avanço nula, os valores diminuem de

0.71 fora do porto, no ponto P1, para 0.02 no ponto P4, dentro do porto, sendo 0.34 e 0.26 nos pontos P2 e P3. Aumentando a velocidade de avanço do navio para 2 m/s verifica-se um aumento daqueles valores de probabilidade passando para 0.74 no ponto P1 e para 0.03 no ponto P4, sendo 0.38 e 0.33 nos pontos P2 e P3.

Tabela 2. Probabilidade de ocorrência de movimentos verticais do ponto (45.5, 5.4, 0.0) cuja altura ultrapasse o limiar de 0.5 m, quando o “N/M Fernão Gomes” entra no porto da Praia da Vitória.

Pontos \ U(m/s)	0	0.5	1	1.5	2
P1	0.710	0.715	0.723	0.732	0.743
P2	0.335	0.344	0.356	0.369	0.381
P3	0.256	0.273	0.294	0.312	0.330
P4	0.023	0.024	0.026	0.027	0.033

5 CONCLUSÕES

Esta comunicação teve como objectivo o desenvolvimento de uma metodologia para determinar a resposta dos movimentos verticais de um navio livre à agitação marítima incidente ao longo da sua trajectória de entrada num porto, tendo em conta a velocidade de avanço do navio. Tal metodologia permite avaliar a possibilidade desse estado de agitação induzir movimentos excessivos do navio em manobra, bem como avaliar a inoperacionalidade da faixa de navegação associada a movimentos verticais cuja altura seja ultrapassa por um limiar pré-estabelecido.

Supondo que a agitação incidente no navio é descrita por um espectro JONSWAP, a altura significativa do movimento foi determinada a partir do momento de ordem zero do espectro da resposta do movimento.

Esta metodologia foi testada com a avaliação da inoperacionalidade associada aos movimentos excessivos do “N/M Fernão Gomes” na sua manobra de entrada no porto da Praia da Vitória, considerando um limiar de 0.5 m para os movimentos verticais desse navio, determinou-se a probabilidade de ocorrência de movimentos verticais do navio que excedem esse limiar.

Tendo em conta a velocidade de avanço do navio, num trabalho futuro pretende-se investigar a variável aleatória mais adequada para a distribuição das alturas do movimento vertical do navio em águas pouco profundas analisando a série temporal dos movimentos verticais do ponto seleccionado no navio quando o navio é sujeito a um estado de agitação irregular.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia de Portugal dado aos projectos PTDC/AMB/67450/2006, PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006.

REFERÊNCIAS

Booij N., Ris R.C. & Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, C4, pp. 7649-7666.

- Brejo S. 2009. Développement d'un outil logiciel pour envoyer en temps réel ou consulter des informations pertinentes pour la gestion des activités portuaires. Rapport de stage de 2ème année, Polytech' Clermont-Ferrand.
- Faltinsen O.M. 1990. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press. Cambridge.
- Fortes, C.J.E.M., 2002. Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias. Análise pelo método dos Elementos Finitos. Tese de doutoramento, IST/DEM.
- Newman, J.N. & Sclavounos, P.D. 1988. The computation of wave loads on large offshore structures. Proc. BOSS 88, Norway, pp. 1-19.
- Santos, J.A., Guilherme, L., Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L & Simões, A. 2009. Coupling numerical models for wave propagation in the MOIA package. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proc. 10th International Coastal Symposium), pp.544–548.
- Simões, A., Tomé, R., Reis, F., Azevedo, E., 2009. Avaliação da Qualidade das Previsões de Agitação Marítima no Arquipélago dos Açores. Projectos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5.
- Tolman, H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166, 110 pp.
- Tomé, R., Ramalho, C., Ferreira, J.P., Miranda, P.M.A., 2005. Previsão do tempo nos Açores com Modelos de Alta Resolução. 4º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Sesimbra, Portugal.