

VI SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 12 à 14 de Novembro de 2014

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM NAVIO AMARRADO NO TERMINAL XXI DO PORTO DE SINES

Liliana V. Pinheiro¹, João A. Santos², Conceição J. Fortes¹

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: lpinheiro@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

² Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Rua do Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa, Portugal
e-mail: jasantos@dec.isel.ipl.pt

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da ferramenta numérica SWAMS para caracterizar o comportamento de um navio amarrado na bacia do Terminal de Contentores do Porto de Sines. São analisados os movimentos do navio, as forças nas amarras e nas defensas. Analisa-se ainda a influência do vento e da introdução de pré-tensionamento nas amarras assim como a resposta do sistema quando sujeito a ondas longas. Os resultados permitem avaliar qual destes fatores tem maior influência sobre os movimentos do navio e a sua segurança.

1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima pode perturbar as atividades de carga e descarga de navios bem como causar problemas significativos nas infraestruturas portuárias e nas embarcações presentes no interior de um porto. Uma previsão e caracterização corretas do campo de ondas dentro do porto, mais precisamente, ao longo das trajetórias dos navios e nos postos de acostagem permitem caracterizar a resposta dos navios aos estados de mar neles incidentes, quer estejam amarrados, parados ou em manobra.

A ferramenta SWAMS apresentada neste trabalho tem como característica inovadora o acoplamento de um modelo do tipo Boussinesq - o modelo BOUSS-WMH BOUSSinesq *Wave Model for Harbours*, Pinheiro et al. (2011) - para a propagação não linear das ondas com os modelos WAMIT, Korsemeyer et al. (1988) e BAS, Mynett et al. (1985), para a interação navio-ondas.

Na secção 2 descreve-se a ferramenta SWAMS. Na secção 3 apresenta-se o caso de estudo, as condições de cálculo dos modelos e os resultados obtidos. A secção 4 é referente a conclusões.

2. FERRAMENTA SWAMS

SWAMS – *Simulation of Wave Action on Moored Ships* – é uma ferramenta integrada para modelação numérica da propagação de ondas bem como do comportamento de navios amarrados no interior de bacias portuárias. Consiste num interface gráfico com o utilizador e num conjunto de módulos que tratam da execução dos modelos numéricos. O SWAMS divide-se em dois módulos: o módulo WAVEPROP – para a propagação das ondas e o módulo MOORNAV – para o comportamento do navio amarrado, Fig. 1.

2.1 Módulo de propagação de ondas WAVEPROP

Este módulo inclui 3 modelos numéricos para a propagação de ondas e um gerador de malhas de elementos finitos:

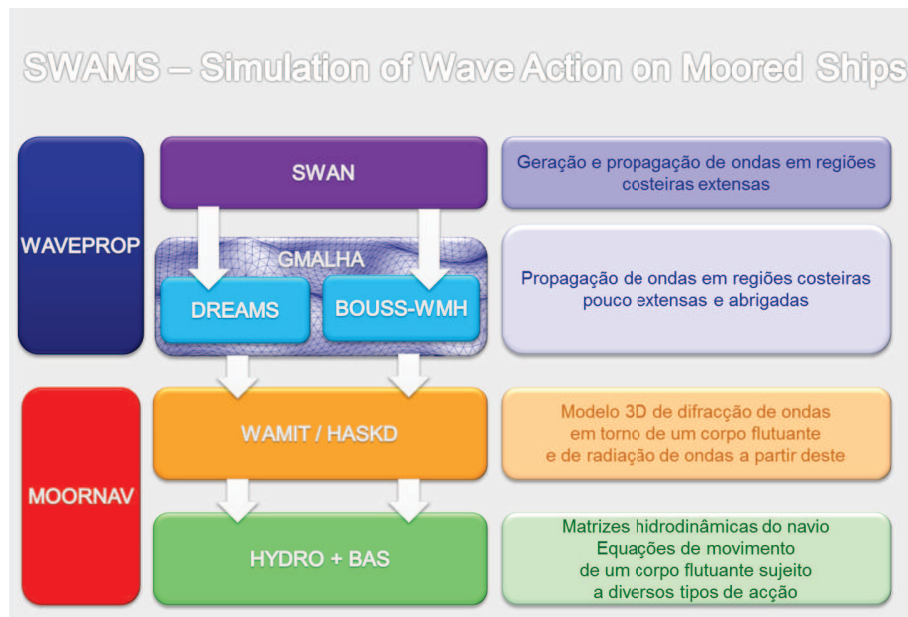


Figura 1. Ferramenta SWAMS.

- SWAN é um modelo não linear espectral, Booij et al. (1996), baseado na equação de conservação da ação da onda e capaz de simular a propagação de ondas irregulares;
- DREAMS é um modelo linear de elementos finitos, Fortes (2002), baseado na equação de declive suave para simular a propagação de ondas regulares;
- BOUSS-WMH é um modelo não linear de elementos finitos, Pinheiro et al. (2011), baseado nas equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993) sendo capaz de simular a propagação de ondas regulares e irregulares;
- GMALHA é um gerador de malhas de elementos finitos triangulares, Pinheiro et al. (2008), especialmente definidas para serem utilizadas pelos modelos DREAMS e BOUSS-WMH, sendo a densidade de nós das malhas variável de acordo com o comprimento de onda local.

2.2 Módulo de comportamento de navios amarrados

A determinação do movimento do navio amarrado num posto de acostagem sujeito à agitação incidente é realizada utilizando o pacote numérico MOORNAV, Santos (1994). Trata-se essencialmente de dois modelos numéricos e um conjunto de rotinas que faz a interligação entre eles:

- WAMIT, Korsemeyer et al. (1988), que resolve, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difração da interação de um corpo flutuante livre com as ondas nele incidentes;
- BAS, Mynett et al. (1985), que monta e resolve, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado no posto de acostagem levando em conta as séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio, as funções de resposta a impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos de amarração e defensas).

2.2.1 Interação de corpos flutuantes com onda monocromáticas

O WAMIT, Korsemeyer et al. (1988) é um modelo desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica do *Massachusetts Institute of Technology* e que utiliza um método de painel para resolver no domínio da frequência os problemas de radiação e de difração de um corpo flutuante livre. Este modelo baseia-se na segunda igualdade de Green para determinar a intensidade das distribuições de fontes e dipolos nos painéis utilizados na discretização da superfície molhada do casco do navio com as quais é possível gerar os potenciais harmônicos dos escoamentos associados aos problemas de radiação e de difração de um navio livre colocado numa zona de profundidade constante mas não limitada horizontalmente. Nos pontos seguintes apresenta-se a formulação analítica dos problemas de radiação e de difração no domínio da frequência.

Potencial de velocidades

Seja ϕ o potencial de escoamento quando o navio se move sob a ação de ondas. Da linearidade do sistema navio / ondas é possível decompor o potencial na soma de vários potenciais devidos cada um deles a uma das seguintes causas: a) onda incidente, ϕ_0 ; b) onda difratada pelo navio parado, ϕ_7 ; c) ondas geradas pelo movimento do navio em águas de outro modo paradas, segundo cada uma das seis coordenadas generalizadas ϕ_1 a ϕ_6

$$\phi = \text{Re} \left[\sum_{j=0}^7 \phi_j \right] \quad (1)$$

Escrevendo cada um dos potenciais devidos ao movimento segundo a coordenada j em função da amplitude complexa da velocidade do mesmo movimento, a Eq. (1) fica

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

onde φ_j é um potencial complexo estacionário e ε_j é a amplitude complexa do movimento do corpo segundo a coordenada j . Assim consegue separar-se o problema do escoamento do movimento do corpo, sendo apenas necessário determinar os potenciais do escoamento para velocidades de amplitude unitária segundo cada uma das coordenadas generalizadas.

Conhecido o potencial de velocidade, a pressão sobre o corpo flutuante pode ser determinada a partir da equação de Bernoulli linearizada. Considerando apenas a parcela dinâmica da pressão, já que a parcela hidrostática está contabilizada no cálculo da matriz de restituição hidrostática, a força atuante segundo cada uma das coordenadas k vem dada por:

$$F_k = i\rho\omega \int_S (\varphi_0 + \varphi_7) n_k e^{-i\alpha} dS + \sum_{j=1}^6 -\rho\omega^2 \varepsilon_j \int_S \varphi_j n_k e^{-i\alpha} dS \quad (3)$$

A primeira parcela da soma anterior representa a força associada ao problema de difração (força exercida pela onda incidente no navio parado)

$$F_k^D = i\rho\omega \int_S (\varphi_0 + \varphi_7) n_k e^{-i\alpha} dS \quad (4)$$

enquanto a segunda força está associada ao problema de radiação (força que é necessário fazer para que o navio oscile segundo cada uma das coordenadas j em água de outra forma parada)

$$F_k^R = \sum_{j=1}^6 T_{kj} \varepsilon_j e^{-i\alpha} \quad (5)$$

Nas expressões anteriores, S representa a superfície molhada do corpo flutuante e n_k a normal segundo a coordenada generalizada k . Da parte real e da parte imaginária de cada elemento da matriz T_{kj} obtêm-se os coeficientes de massa adicionada, a_{kj} , e de amortecimento b_{kj}

$$T_{kj}(\omega) = \omega^2 a_{kj}(\omega) + i\omega b_{kj}(\omega) \quad (6)$$

Relações de Haskind

Utilizando a segunda igualdade de Green é possível mostrar que não é necessário determinar o potencial da onda difratada pelo corpo, φ_7 , para calcular as componentes da força associada ao problema de difração, Eq. (4). Com efeito, atendendo à equação da continuidade e às condições de fronteira satisfeitas pelos potenciais φ_1 a φ_7 , a seleção de um volume adequado permite escrever a força associada ao problema de difração da forma apresentada em Haskind (1957), habitualmente conhecida por relações de Haskind:

$$F_k^D = -i\rho\omega \int_S \left(\varphi_0 \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} - \varphi_k \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \right) dS e^{-i\alpha x} \quad (7)$$

Com base nestas relações, em vez de se determinar o potencial associado ao problema da difração φ_D para conhecer o valor da componente segundo k da força exercida pelas ondas no navio parado, basta conhecer o potencial da onda incidente nos pontos ocupados pela superfície molhada do corpo φ_0 , bem como os potenciais associados ao problema de radiação para os mesmos pontos φ_k .

Ora, para o problema de radiação, obtém-se uma boa aproximação considerando apenas a fronteira do porto mais próxima do navio, o que torna mais simples a determinação destes potenciais.

Implementação numérica

A utilização do teorema de Green permite transformar em equações integrais as equações diferenciais que controlam os potenciais associados aos problemas de radiação e de difração. Em vez de se ter um conjunto de equações válidas em todo o domínio, obtém-se um conjunto de equações a satisfazer apenas nas fronteiras desse domínio, a região mais relevante para a determinação das forças induzidas pelo escoamento.

Aproximando a posição média da superfície molhada do corpo flutuante por um conjunto de painéis, triangulares ou quadrangulares, em cada um dos quais se assume um valor constante do potencial de velocidades, as equações integrais reduzem-se a um sistema de equações lineares para os valores do potencial de velocidade em cada um dos painéis. Para os potenciais de radiação vem

$$2\pi\varphi_j(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik}\varphi_j(x_k) = \sum_{k=1}^N S_{ik} \frac{\partial \varphi_j(x_k)}{\partial n} \quad (8)$$

em que $i=1,\dots,N$, sendo N o número de painéis. Para o potencial de difração, o sistema de equações é dado por:

$$2\pi\varphi_D(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik}\varphi_D(x_k) = 4\pi\varphi_0(x_i) \quad (9)$$

As matrizes D_{ik} e S_{ik} são definidas por:

$$D_{ik} = \int_{S_k} \frac{\partial G(x_i, \xi)}{\partial n} d\xi \quad (10)$$

$$S_{ik} = \int_{S_k} G(x_i, \xi) d\xi \quad (11)$$

em que S_k representa a superfície do painel k , n a normal a essa superfície e ξ uma variável de posição na mesma superfície e $G(x_i, \xi)$ é a função Green, o potencial de velocidade num ponto ξ devido a uma fonte de intensidade -4π colocada em x_i e que satisfaz não só a condição de fronteira da superfície livre como a condição de radiação. Embora os pontos onde são escritas as equações integrais estejam localizados no centróide de cada um dos painéis, x_i e x_k , os integrais da Eq. (10) e da Eq. (11) a realizar em cada um dos painéis k são obtidos utilizando uma fórmula de quadratura de Gauss com quatro pontos selecionados no painel k . A mesma fórmula de quadratura é utilizada pelo modelo WAMIT para calcular as forças de difração através das relações de Haskind (1957), Eq. (7).

Na implementação das relações de Haskind a onda monocromática incidente na posição do navio poderá já ter sido refratada ou difratada antes de chegar a esta posição. O campo correspondente a esta onda pode ser caracterizada a partir das amplitudes complexas da elevação da superfície livre, $\eta(x,y)$, e das componentes horizontais, $U_0(x,y)$ e $V_0(x,y)$ no nível de repouso, $z=0$, da velocidade do escoamento por ela induzido.

3. CASO DE ESTUDO – TERMINAL XXI DO PORTO DE SINES

A baía do Terminal de Contentores do Porto de Sines, designado por Terminal XXI, situa-se na zona mais a Sul do porto e é protegida da agitação incidente pelo quebra-mar leste, Fig. 2. É presentemente constituída por um quebra-mar de 1500 m e um cais acostável de 730 m. Junto à cabeça do quebra-mar, as profundidades variam entre 18 e 20 m, aproximadamente, enquanto no interior da baía variam entre 1 e 21 m, aproximadamente.

Nesta bacia, são frequentes os relatos de agitação importante que induz movimentos excessivos nos navios amarrados aos cais.

Pretende-se avaliar, aplicando a ferramenta SWAMS, o comportamento de um navio amarrado no primeiro posto de acostagem, Fig. 3.

A aplicação do SWAMS iniciou-se com a propagação de uma condição de agitação marítima ($H=1$ m, Direção de Sul e $T=10$ s) para o interior da bacia do Terminal XXI, com o modelo BOUSS-WMH.

Seguidamente com os modelos WAMIT e BAS determinaram-se as funções de resposta a impulso do navio livre, as massas adicionadas para frequência infinita e, a partir daqui, as séries temporais das forças exercidas pela agitação marítima incidente no navio. Finalmente, foram resolvidas, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado levando em conta as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração. Testaram-se situações sem e com vento (velocidade de 15 ms^{-1} , proveniente de Sul, isto é, com 30° de ângulo de ataque ao navio - ângulo entre a direcção do vento e o eixo longitudinal do navio), sem e com pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima, ou seja 186.2 kN).

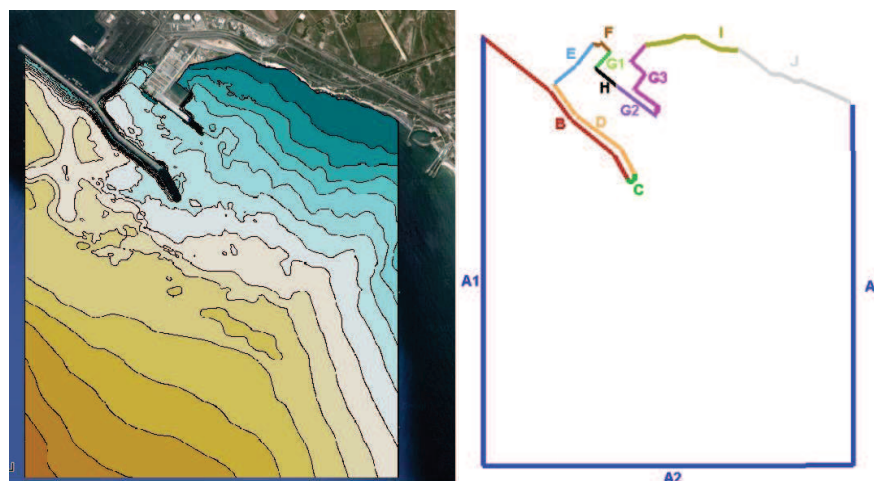


Figura 2. Terminal XXI do Porto de Sines. Batimetria e fronteiras do domínio de cálculo.

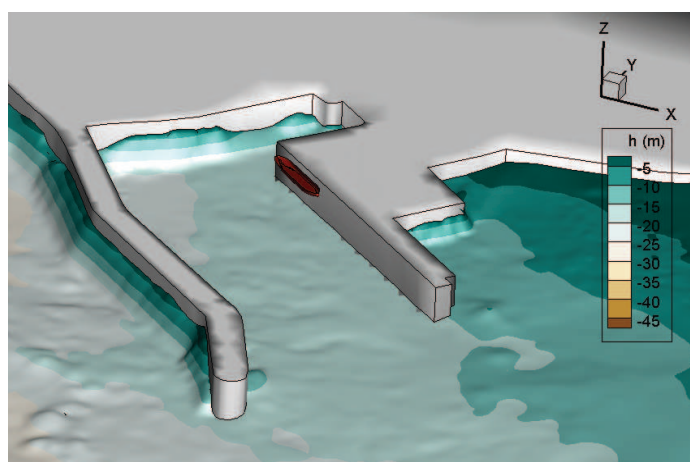


Figura 3. Terminal XXI do Porto de Sines. Pormenor da bacia do terminal.

3.1 Condições de aplicação dos modelos BOUSS-WMH, WAMIT e BAS

Para a aplicação do modelo BOUSS-WMH, é necessária a definição do domínio de cálculo e da batimetria da zona de estudo, a sua discretização por elementos finitos e o estabelecimento de condições de fronteira. O domínio e batimetria da zona em estudo são apresentados na Fig. 2.

A malha de elementos finitos foi gerada com o GMALHA de modo ter um mínimo de oito pontos por comprimento de onda para um período de 10 s, para que a variação espacial da elevação da superfície livre possa ser adequadamente descrita pelo modelo numérico, Pinheiro et al. (2011). Resultou então uma malha com 504 925 elementos e largura de banda de 978. Quanto às condições de fronteira, os troços A2, I e F são de saída (dissipativos). Nos restantes troços, foram estabelecidas condições de fronteira com reflexão parcial. Os valores

dos coeficientes de reflexão foram determinados com base nas características de cada troço (tais como porosidade, declive do talude e profundidade no pé do talude) e ainda, as características da onda.

Para a aplicação dos modelos WAMIT e BAS, é necessário definir as características do navio e do sistema de amarração. O navio estudado tinha um volume deslocado de $108\,416\text{ m}^3$, um comprimento na flutuação de 243 m, uma boca de 42 m e um calado de 14.35 m. A forma do casco foi discretizada com 2694 painéis retangulares e triangulares, Fig. 4. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 17 m.

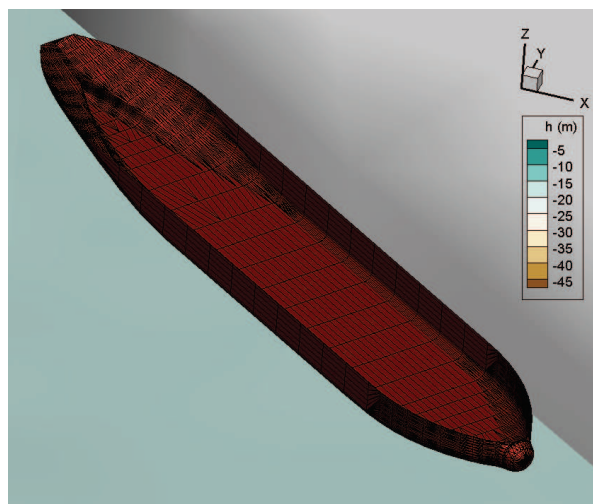


Figura 4. Painelização do casco do navio simulado.

Na Fig. 5 apresenta-se a configuração do sistema de amarração no qual o navio está amarrado ao cais por 8 amarras (2 lançantes à popa, L1 e L2, dois lançantes à proa, L7 e L8, e quatro traveses, L3, L6, L4 e L5). O contato entre o navio e o cais é impedido por duas defensas pneumáticas (D1 e D2). Considerou-se a mesma relação constitutiva para todos os cabos do sistema de amarração: variação linear desde 0 kN até à carga máxima de 1862 kN a que corresponde uma extensão de 4%. A relação constitutiva das defensas também é linear sendo a força de compressão máxima 8900 kN para uma deflexão de 1 m.



Figura 5. Esquema do sistema de amarração.

3.2 Resultados

O modelo BOUSS-WMH para a condição de agitação marítima admitida ($T=10\text{ s}$, $H=1\text{ m}$, Direção Sul), permite obter a série temporal da elevação da superfície livre no centróide do navio.

Utilizou-se o modelo numérico WAMIT para resolver os problemas de radiação e de difração do navio livre para 87 frequências entre 0.0125 rad/s e 1.04 rad/s. Todas funções resposta a impulso foram calculadas com intervalo de tempo de 0.1 s e uma duração máxima de 50 s. Efetuaram-se cálculos considerando as situações, sem e com vento (15 m/s, proveniente de Sul), sem e com pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima). Na Fig. 6 apresentam-se as séries temporais do movimento de avanço e de afundamento do navio amarrado.

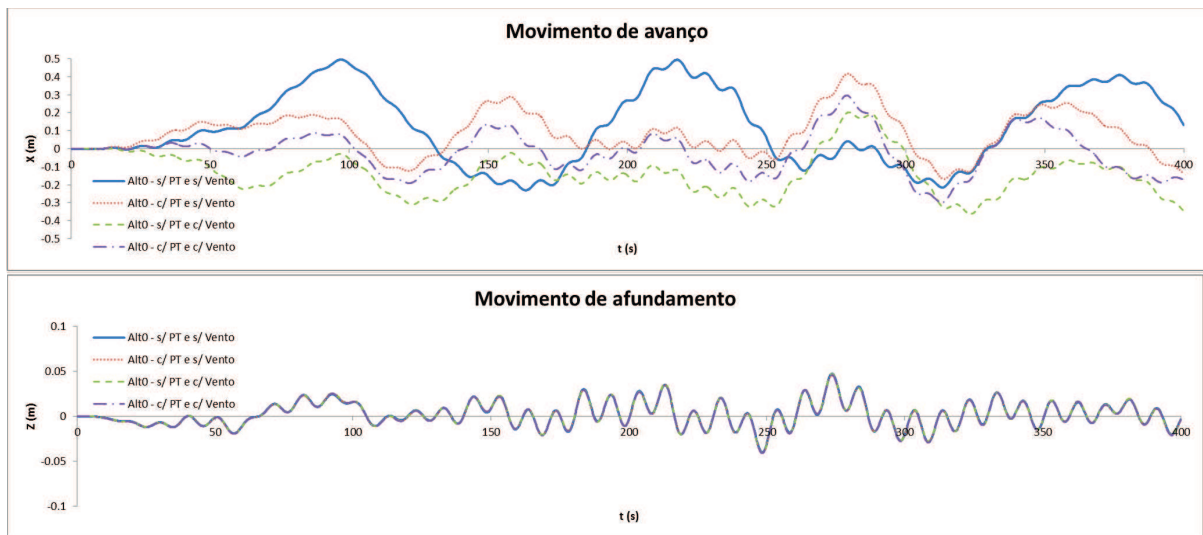


Figura 6. Séries temporais da elevação da superfície livre na posição do centróide do navio e dos movimentos de avanço e de afundamento do navio amarrado.

A primeira série temporal ilustra bem o carácter não linear da resposta do conjunto navio + sistema de amarração. Com efeito, para ondas oscilações da superfície livre cujo período é cerca de 10 s, observam-se oscilações de período muito superior. O período destas oscilações é controlado pela existência das amarras e das defensas, como pode confirmar-se na Fig. 7, com as séries temporais dos esforços na defesa D1 e na amarra L1. Uma vez que os elementos do sistema de amarração produzem forças atuantes no navio maioritariamente no plano horizontal, é para os movimentos neste plano que o comportamento não linear é mais evidente.

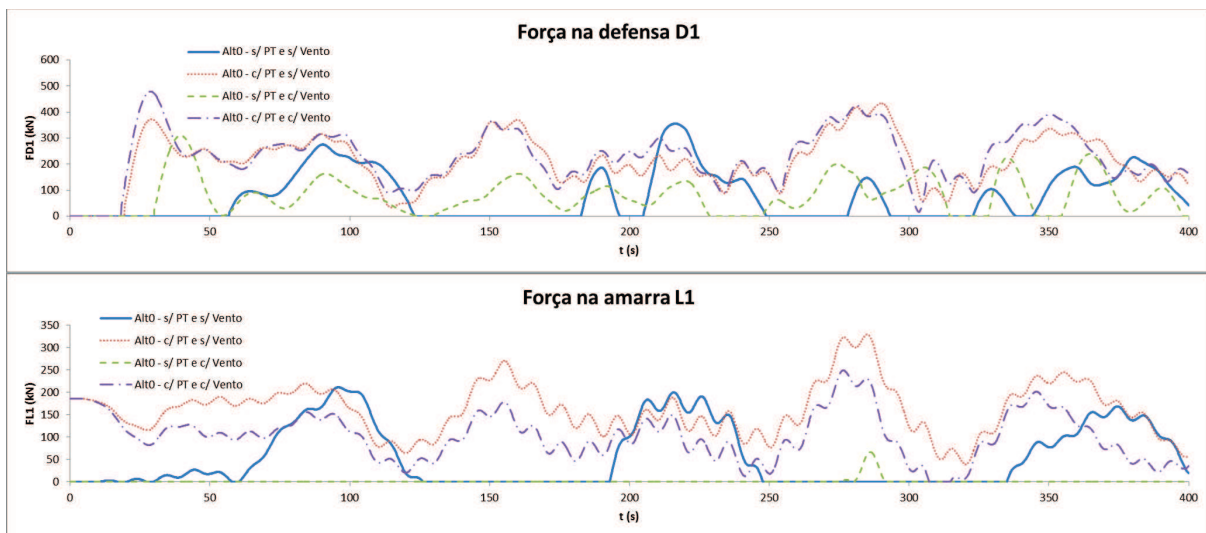


Figura 7. Séries temporais dos esforços na defesa D1 e na amarra L1 sem e com vento (15 ms⁻¹), sem e com pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima).

Os resultados obtidos mostram que o vento, neste caso de Sul, empurra o navio para trás e contra o cais. Isto traduz-se em maiores forças nas defensas e um alívio nas forças das amarras. A aplicação de pré-tensão nas amarras diminui o movimento de avanço mas aumenta os esforços nas amarras. Os movimentos rotacionais, rolo, arfagem e guinada, não são influenciados pelo vento nem pelo pré-tensionamento.

Fizeram-se também simulações do comportamento do navio amarrado sujeito a um conjunto de ondas longas, desde 54 s até 390 s, para se analisar as ocorrências de problemas com navios amarrados no Terminal XXI identificadas pelos utilizadores do mesmo. O nível de maré testado foi 2.0 m (Z.H.) e as ondas longas eram provenientes de Sul.

Para a gama de períodos indicada, utilizou-se o modelo numérico DREAMS para se obter os coeficientes de amplificação (relação entre a altura da onda fora da bacia portuária e a altura da onda no ponto de interesse) no canto NW do cais, local onde está colocado um marégrafo e que está próximo da posição de amarração do navio. Na Fig. 8 pode verificar-se que os máximos daquela curva coincidem com os períodos identificados nos registos

do marógrafo nos dias em que ocorreram problemas com navios amarrados ao cais do Terminal XXI, fossem eles movimentos excessivos do navio amarrado (“Navio a mexer”) ou rotura de amarras (“Cabos partidos”).

Considerando depois uma altura de 1.00 m para a onda incidente no exterior do porto e a configuração do sistema de amarração já descrita (amarras sem pré-tensionamento), avaliou-se a tração máxima em cada uma das 8 amarras para simulações com duração de 3000 s. Os resultados apresentados na Fig. 9 confirmam que as gamas de períodos onde se observam maiores amplitudes da onda na vizinhança da posição do navio amarrado são as mesmas para as quais ocorrem os maiores esforços nas amarras, sendo claramente ultrapassados o limite de rotura das mesmas (1860 kN).

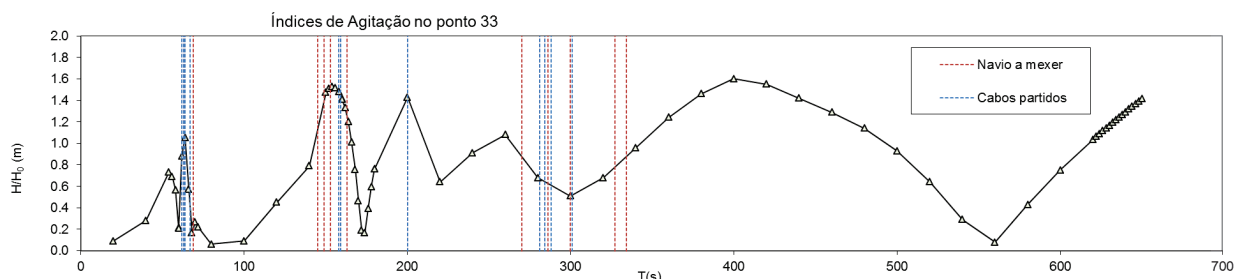


Figura 8. Coeficientes de amplificação na posição do marógrafo. Ondas longas provenientes de Sul, nível de maré 2.0 m (Z.H.)

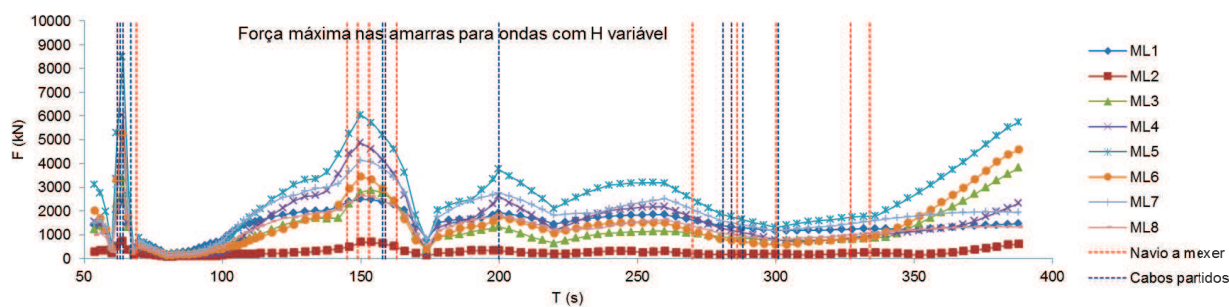


Figura 9. Força máxima nas amarras para ondas longas provenientes de Sul e nível de maré 2.0 m (ZH). Amarras sem pré-tensão.

4. CONCLUSÕES

Descreveu-se uma ferramenta numérica integrada, SWAMS, capaz de caracterizar a resposta dum navio amarrado no interior dum porto sujeito à ação da agitação marítima. A ferramenta foi aplicada para avaliar a resposta de um navio estacionado no cais do terminal de contentores do porto de Sines, quando sujeito a ondas curtas e ondas longas. No caso de ondas curtas estudou-se também a influência do vento e do pré-tensionamento das amarras.

Os resultados obtidos com este exemplo para o caso das ondas curtas permitiram concluir que, o vento, neste caso de Sul, empurra o navio para trás e contra o cais. Isto traduz-se em maiores forças nas defensas e um alívio nas forças das amarras. A aplicação de pré-tensão nas amarras diminui o movimento de avanço mas aumenta os esforços nas amarras. Os movimentos rotacionais, rolo, arfagem e guinada, não são influenciados pelo vento nem pelo pré tensionamento.

Os resultados obtidos para as ondas longas mostraram que a ocorrência de problemas com navios amarrados no Terminal XXI (movimentos excessivos do navio amarrado e rotura de amarras) pode dever-se à ocorrência da amplificação pela bacia portuária da altura da onda na posição em que o navio está amarrado.

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Porto de Sines, pela autorização concedida para a utilização dos dados de base.

Agradece-se ainda à Fundação Para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento concedido ao projecto HIDRALERTA - Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias, PTDC/AAC-AMB/120702/2010, bem como da bolsa de doutoramento da primeira autora da comunicação, SFRH / BD / 82637 / 2011.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Booij, N.R., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C., 1996. The SWAN wave model for shallow water, ICCE'96, Orlando, pp. 668-676.
- Fortes, C.J.E.M., 2002. Transformações não lineares de ondas em portos. Análise pelo método dos elementos finitos. Tese de doutoramento, IST/DEM, Lisboa.
- Haskind, M.D., 1957. The exciting forces and wetting of ships in waves, Izvestia Akademii Nauk S.S.S.R, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk, 7, 65-79. (David Taylor Model Basin Translation N°.307, March 1962).
- Korsemeier F.T., Lee C.-H., Newman J.N. and Sclavounos P.D., 1988. The analysis of wave effects on tension-leg platforms, 7th International Conference Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, pp. 1-14.
- Mynett, A.E., Keunig, P.J. and Vis, F.C., 1985. The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.
- Nwogu, O., 1993. Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119(6):618-638.
- Pinheiro L., Fortes C.J.E.M., Santos J.A., Fernandes L. and Walkley M., 2011. Boussinesq-type Numerical Model for Wave Propagation Near Shore and Wave Penetration in Harbors. MARTECH 2011 1st International Conference on Maritime Technology and Engineering. Lisboa 10 - 12 May.
- Pinheiro, L.V., Fortes, C.J. and Fernandes J.L., 2008. Gerador de Malhas de Elementos Finitos para a Simulação Numérica de Propagação de Ondas Marítimas. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería (RIMNI). Volume 24, número 4 de Dezembro 2008.
- Santos, J.A., 1994. MOORNAV – Numerical model for the behaviour of moored ships. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves.