

Simulação numérica integrada do comportamento de um navio amarrado no Terminal XXI do Porto de Sines

LV Pinheiro¹, JA Santos², CJEM Fortes¹, JLM Fernandes³

¹Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

²Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

³Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
email: lpinheiro@lneec.pt, jasantos@dec.isel.pt, jfortes@lneec.pt, leonel@dem.ist.utl.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.

PALAVRAS-CHAVE: SWAMS; Navios amarrados; ondas longas; BOUSS-WMH; WAMIT; BAS.

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*, [7]) para a propagação não linear das ondas com o modelo WAMIT [4] e BAS [5] 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

2.1 Descrição

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, Figura 1.

2.2 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:

- SWAN é um modelo não linear espectral, [1] 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, [2], baseado na equação de declive suave para simular a propagação de ondas regulares;
- BOUSS-WMH é um modelo não linear de elementos finitos [8], baseado nas equações de Boussinesq estendidas deduzidas por [6] sendo capaz de simular a propagação de ondas regulares e irregulares;
- GMALHA é um gerador de malhas de elementos finitos triangulares [8], 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.

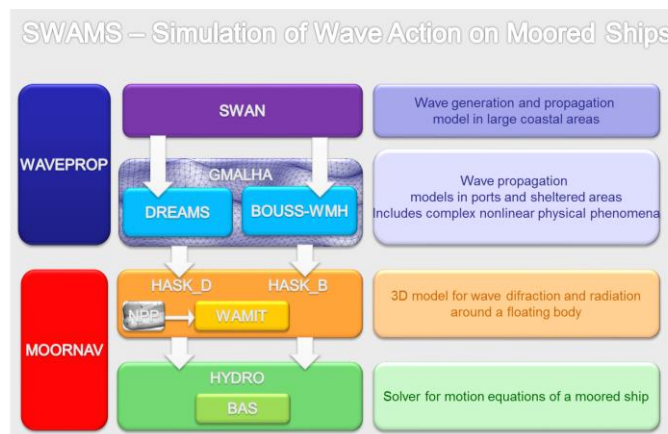


Figura 1: Ferramenta SWAMS.

2.3 Módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV

A determinação do movimento do navio amarrado num posto de acostagem sujeito à agitação incidente é realizada utilizando o pacote numérico MOORNAV [9]. Trata-se essencialmente de dois modelos numéricos e um conjunto de rotinas que faz a interligação entre eles:

- WAMIT [4] 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 [5] 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)

2.3.1 Interação de corpos flutuantes com ondas monocromáticas

O WAMIT [4] 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 harmónicos 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 expressão (1) fica

$$\phi = \left[\phi_0 + \phi_7 + \sum_{j=1}^6 -i\omega\phi_j\varepsilon_j \right] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

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:

$$F_k = i\rho\omega \int_S (\phi_0 + \phi_\gamma) n_k e^{-i\omega t} dS + \sum_{j=1}^6 -\rho\omega^2 \varepsilon_j \int_S \phi_j n_k e^{-i\omega t} dS \quad (3)$$

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

$$F_k^D = i\rho\omega \int_S (\phi_0 + \phi_\gamma) n_k e^{-i\omega t} dS \quad (4)$$

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)

$$F_k^R = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^6 T_{kj} \varepsilon_j e^{-i\omega t} \right] \quad (5)$$

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_γ , para calcular as componentes da força associada ao problema de difração, equação (4). Com efeito, atendendo à equação da continuidade e às condições de fronteira satisfeitas pelos potenciais ϕ_1 a ϕ_γ , a seleção de um volume adequado permite escrever a força associada ao problema de difração da forma apresentada em Haskind [3], habitualmente conhecida por relações de Haskind:

$$F_k^D = -i\rho\omega \int_S \left(\phi_0 \frac{\partial \phi_k}{\partial n} - \phi_k \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \right) dS e^{-i\omega t} \quad (7)$$

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

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

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

$$2\pi\phi_D(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik}\phi_D(x_k) = 4\pi\phi_0(x_i) \quad (9)$$

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 das equações (10) e (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 [3], equação (7).

Na implementação das relações de Haskind [3] 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

3.1 Introdução

A bacia 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. 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 variavam entre 18 e 20 m, aproximadamente, enquanto no interior da bacia variam entre 1 e 21 m, aproximadamente. Nesta bacia, são frequentes os relatos de agitação importante que induz movimentos excessivos nos navios amarrados ao cais, Figura 2.

Pretende-se avaliar, aplicando a ferramenta SWAMS, o comportamento de um navio amarrado no primeiro posto de acostagem, Figura 2.

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 com e sem vento (15 m/s), com e sem pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima).

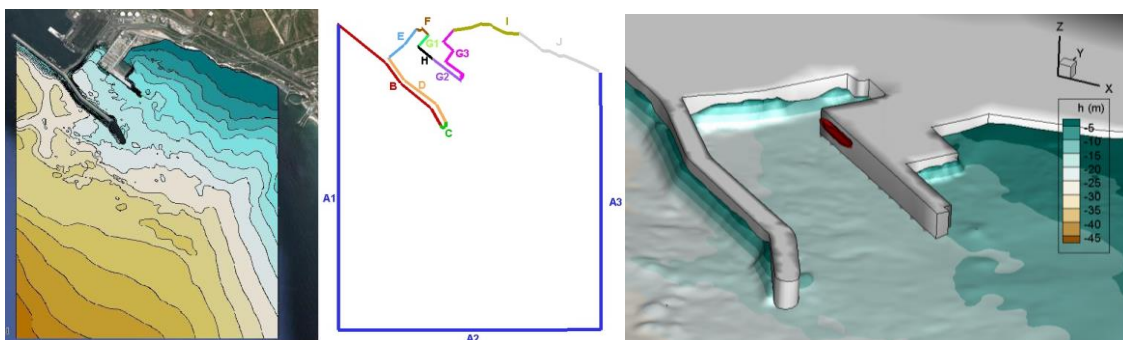


Figura 2: Porto de Sines. Batimetria. Fronteiras do domínio de cálculo. Pormenor da bacia.

3.2 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 Figura 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. 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 m³, 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 rectangulares e triangulares. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 17 m.

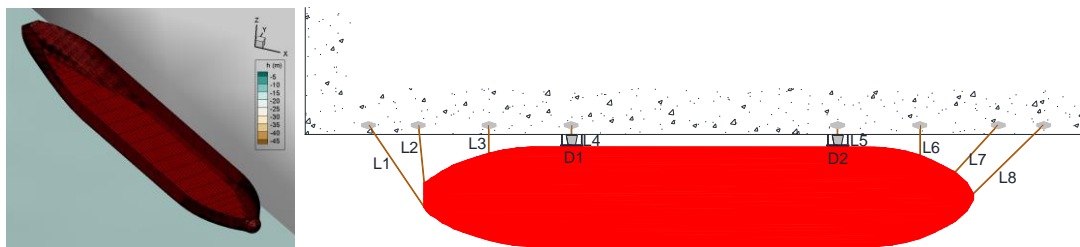


Figura 3: Pannelização do casco do navio simulado. Esquema do sistema de amarração.

Na Figura 3 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 contacto 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 é de 8900 kN para uma deflexão de 1 m.

3.3 Resultados

O modelo BOUSS-WMH para a condição de agitação marítima admitida ($T=10$ s, $H=1$ 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, com e sem vento (15 m/s), com e sem pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima). Na Figura ?? apresentam-se as séries temporais do movimento de avanço e de afundamento do navio amarrado.

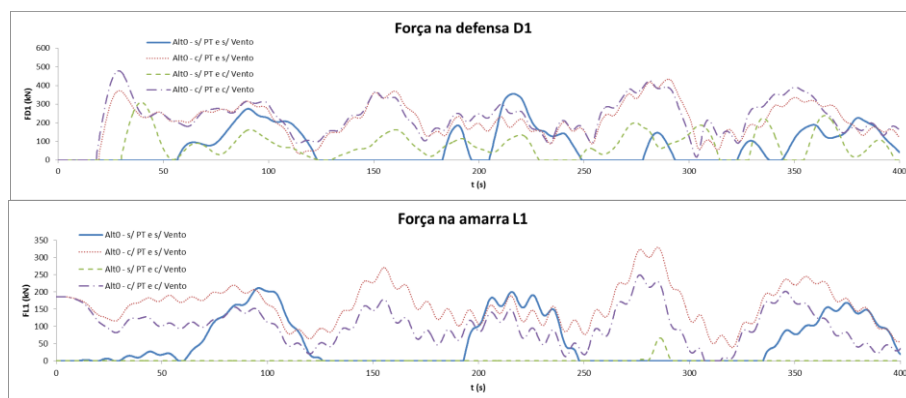


Figura 4: Série temporal dos esforços na defesa D1 e na amarra L1, com e sem vento (15 m/s), com e sem pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima).

A primeira 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 Figura 4, 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.

Verifica-se que, como o vento vem de Sul, empurra o navio em direção ao cais, e isto alivia as forças nas amarras. Pelo contrário o pré tensionamento aumenta as forças nas amarras. No caso das defensas tanto o vento como a pré-tensão aumentam os esforços de compressão.

Fizeram-se também simulações do comportamento do navio amarrado sujeito a um conjunto de ondas longas, desde 54 s até 390 s. Utilizou-se para tal uma altura de onda de 0.20m. Os resultados obtidos encontram-se sumarizados na Figura 5. Nesta figura apresenta-se a força máxima obtida em cada uma das 8 amarras para simulações com duração de 3000 s.

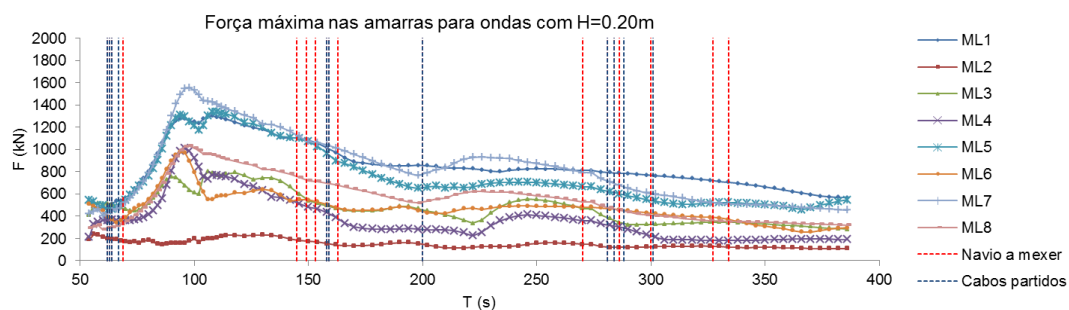


Figura 5: Força máxima nas amarras para ondas com $H = 0.20$ m.

Verifica-se que existe uma gama de períodos em que o sistema navio–ondas–amarração entra em ressonância, entre 80 s e 120 s. Se as ondas tiverem períodos nesta gama podem levar a forças muito próximas do limite de rotura (1860 kN) em certas amarras (L1, L5 e L7).

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 permitiu 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.

Existe uma gama de períodos em que o sistema navio-ondas-amarração entra em ressonância, levando as amarras a registar tensões muito próximas do seu limite de rotura. Assim, mais do que a altura das ondas, a existência de vento ou de pré-tensão, o fator que mais coloca em risco a segurança do navio amarrado é o período das ondas que incidem sobre este, se existir energia na gama de períodos críticos para o sistema navio-sistema de amarração, as forças exercidas sobre as amarras são amplificadas até valores próximos da rotura.

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 através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/82637/2011 e através do projeto HIDRALERTA.

REFERÊNCIAS

- [1] NR Booij, LH Holthuijsen, RC Ris (1996). The SWAN wave model for shallow water. In *Proceedings of the 25th Conference on Coastal Engineering*, 1996, Orlando, Florida, 668–676.
- [2] CJEM Fortes (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Portos: Análise pelo Método dos Elementos Finitos*, Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [3] MD Haskind (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).
- [4] FT Korsemeyer, C-H Lee, JN Newman, PD Sclavounos (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms. In *7th International Conference Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1–14.
- [5] AE Mynett, PJ Keunig, FC Vis (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. In JH Pounsford, Ed., *Papers Presented at the International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours*, Birmingham, England, 23–25 Apr 1985.
- [6] O Nwogu (1993). Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 119(6):618–638.
- [7] L Pinheiro, CJEM Fortes, JA Santos, L Fernandes, M Walkley (2011). Boussinesq-type numerical model for wave propagation near shore and wave penetration in harbors. In *MARTECH 2011: 1st International Conference on Maritime Technology and Engineering*.
- [8] L Pinheiro, CJ Fortes, JL Fernandes (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* 24(4):369–391.
- [9] JA Santos (1994). *MOORNAV – Numerical Model for the Behaviour of Moored Ships*, Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves, Lisbon.

This page was intentionally left blank