

APLICAÇÕES DO SISTEMA SWAMS NA MODELAÇÃO DE NAVIOS AMARRADOS EM PORTOS

Liliana Pinheiro¹, Conceição J.E.M. Fortes¹, João Alfredo Santos^{2,3}, Joana Simão¹, Francisco Pedro¹, Pedro Poseiro¹, Pedro Lopes¹

¹Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC

Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

lpinheiro@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, jsimao@lnec.pt, fpedro@lnec.pt, pposeiro@lnec.pt, plopes@lnec.pt

²ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa

Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa

jasantos@dec.isel.ipl.pt

³CENTEC - Centre of Marine Technology and Ocean Engineering, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais,

1049-001 Lisboa, Portugal

RESUMO

O pacote numérico SWAMS permite a caracterização da resposta de navios livres e amarrados sujeitos à ação de ondas, ventos e correntes. São dois os módulos constituintes deste pacote: WAVEPROP, para a geração e propagação de ondas; e MOORNAV para o movimento e forças nos navios.

Recentemente, com base neste pacote, foi desenvolvido um sistema de previsão, alerta e avaliação de risco de eventos perigosos associados à navegação em áreas portuárias e ao comportamento dos navios atracados denominado SWAMS_ALERTA.

Nesta comunicação, apresentam-se algumas aplicações do pacote SWAMS e do sistema SWAMS_ALERTA, que evidenciam as potencialidades desta ferramenta.

Primeiramente descreve-se a aplicação do SWAMS_ALERTA a dois casos de navios amarrados nos portos de Leixões e de Sines, para os quais se avaliou o comportamento dos navios quando neles incidem ondas curtas e longas. Depois, apresenta-se um caso de movimentos induzidos por ondas de esteira.

Finalmente, apresenta-se a aplicação deste sistema no porto da praia da Vitória, considerando os movimentos e forças obtidas quando um navio porta-contentores se encontra amarrado ao cais.

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos excessivos dos navios amarrados induzidos pela agitação marítima podem perturbar as actividades de carga e descarga dos navios bem como causar problemas graves, nomeadamente a rotura de amarras e a colisão dos navios com o cais. Daí a importância numa caracterização correcta da resposta de navios amarrados aos estados de mar neles incidentes.

A ferramenta SWAMS apresentada neste trabalho tem como característica inovadora o acoplamento de um modelo do tipo Boussinesq para a propagação não linear das ondas – o modelo BOUSS-WMH (*BOUSSinesq Wave Model for Harbours*, Pinheiro *et al.* 2011) - com o modelo WAMIT (falta referência aqui) para a interação navio-ondas. Os efeitos não lineares no interior dos portos são simulados quer na propagação das ondas quer na resposta dos navios

amarrados. Para além destes, os fenómenos da reflexão e dissipação de energia por fricção de fundo e por rebentação são também tidos em conta.

Ferramentas numéricas deste tipo são ainda escassas e com algumas limitações. A maior parte utiliza a teoria linear para descrever a interacção onda-estrutura flutuante e uma geometria muito simplificada do porto. Contudo, uma correcta representação da geometria do porto é importante para se ter em conta os modos evanescentes junto ao navio e melhor descrever o campo de ondas que actua sobre ele. Diversos autores têm vindo a desenvolver métodos para resolver este problema utilizando modelos cada vez mais complexos e sofisticados (Bingham, 2000, Molen & Wenneker, 2008).

Na secção 2 descreve-se a ferramenta SWAMS. Na secção 3 apresentam-se os casos de estudo em que o SWAMS foi aplicado. A secção 4 é referente a conclusões.

2 FERRAMENTA SWAMS

2.1 Descrição geral

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 numa interface gráfica com o utilizador e num conjunto de módulos que tratam da execução dos modelos numéricos. A interface com o utilizador permite a introdução e a manipulação dos dados, a execução dos modelos numéricos, bem como a visualização dos resultados. Cada modelo corresponde a um módulo ao qual estão associadas as bases de dados que reúnem toda a informação do projeto.

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.

A representação gráfica dos dados e resultados dos módulos do SWAMS é feita recorrendo a programas específicos (Tecplot 360™, Autocad™, MS Excel™), dependendo do modelo numérico.

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, Booij et al. (1996), baseado na equação de conservação da acção da onda e capaz de simular a propagação de espectros 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 e a sua construção otimizada de forma a reduzir recursos computacionais.

2.3 Módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV

Este módulo inclui 2 modelos numéricos, (Santos, 1994):

- WAMIT (Korsemeyer et al., 1988) que resolve, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difracção da interacção 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);

2.4 Arquitetura do pacote SWAMS e do sistema SWAMS_ALERT

O pacote SWAMS foi integrado no sistema HIDRALETA (sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado a galgamentos), dando origem ao sistema SWAMS_ALERT, que é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias, Figura 1.

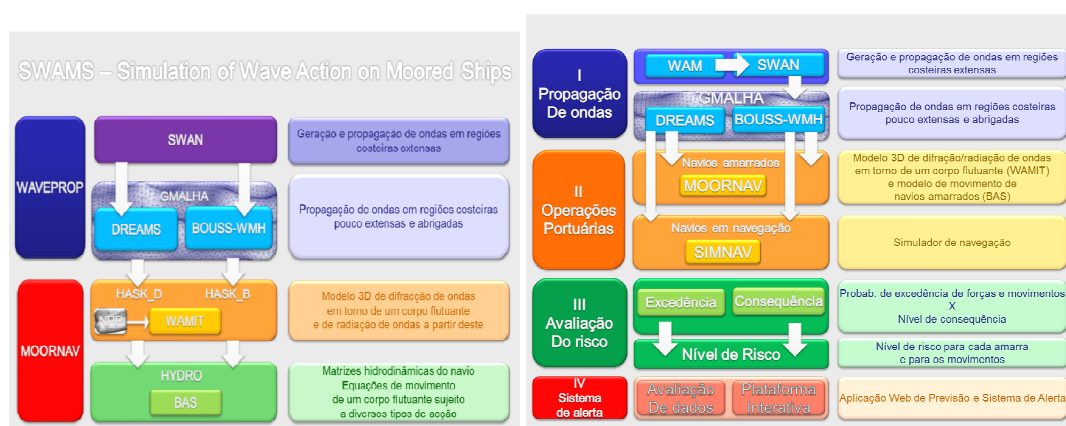


Figura 1 – Estrutura do pacote numérico SWAMS e do sistema SWAMS_ALERT.

3 APLICAÇÕES

3.1 Estudo do comportamento de um petroleiro amarrado no Posto A do Porto de Leixões

Neste estudo, o pacote SWAMS é aplicado a um caso real de um navio petroleiro amarrado no posto A do Terminal 3 do Porto de Leixões. Este caso foi objeto de um extenso trabalho de modelação física, realizado nas instalações experimentais do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia do Porto (Rosa-Santos, 2010).

O Terminal de petroleiros do Porto de Leixões. é constituído por três postos de acostagem, dos quais apenas o posto A é alvo deste estudo. O Posto A localiza-se perto da extremidade do quebra-mar Norte, no seu intradorso, encontrando-se relativamente mais exposto à agitação marítima local. Devido a esta exposição, podem ocorrer alguns problemas operacionais no Posto A: movimentos excessivos por vezes com rotura de alguns cabos de amarração (IHRH-FEUP/ IST, 2005 e Veloso-Gomes *et al.*, 2005).

A estrutura de acostagem é composta por duques d'Alba de acostagem e amarração, e por uma plataforma de descarga. Cada um dos duques d'Alba de acostagem e amarração está equipado com defensas do tipo pneumático e ganchos de amarração duplos. Os restantes pontos de amarração localizam-se ao longo da superestrutura do quebra-mar Norte.

O navio, do tipo petroleiro com 105 000 dwt, utilizado neste estudo pertence à classe dos navios de maior porte que mais frequentemente utilizam o Posto "A" do Terminal de Petroleiros de Leixões.

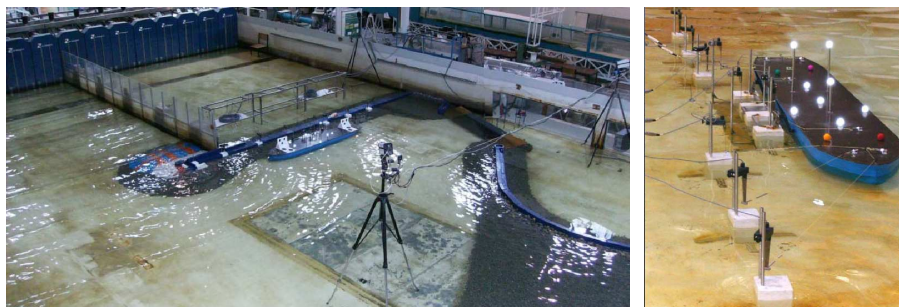


Figura 2 –Modelo físico do navio petroleiro amarrado à estrutura de acostagem. 2.^a fase do estudo. Retirado de Rosa-Santos (2010).

Os testes realizados em modelo físico reduzido e em modelo numérico são divididos em três grupos: testes de decaimento, testes da 1^a fase e testes da 2^a fase. Os testes de decaimento realizados em modelo físico, para avaliação e calibração das propriedades hidrodinâmicas do modelo do navio, foram também reproduzidos em modelo numérico, permitindo calibrar alguns parâmetros do modelo numérico. Estes testes, realizados sem ondas, consistiram em aplicar um deslocamento ou rotação inicial ao navio e deixar que este oscile até atingir o equilíbrio estático. Foram feitos testes de decaimento com e sem amarras e com várias profundidades. Findo o processo de calibração, procedeu-se a simulações com ondas e com o navio amarrado. A 1^a fase destes testes foi realizada num tanque retangular e com o navio isolado no centro. As ondas são de cristas retilíneas e não existem reflexões. A 2^a fase de testes foi realizada no mesmo tanque mas desta vez com a reprodução dos fundos e das fronteiras físicas do porto, incluindo quebra-mares, praias, etc. Na Figura 2 encontra-se o esquema de implantação do modelo físico (fase 2) no tanque de ondas.

A configuração de amarração, ligeiramente assimétrica, é composta por oito cabos de amarração duplos.

Nos modelos numéricos utilizados considerou-se sempre a escala do protótipo. As medições dos ensaios são depois sempre convertidas para a escala do protótipo.

A superfície do casco do navio foi discretizado em 3732 painéis, utilizando o gerador NPP, Figura 3. Utilizando o programa comercial de desenho assistido AutoCAD® é criado um modelo tridimensional do casco do navio, sendo possível obter as suas características geométricas (posição do centro de gravidade, momentos de inércia e raios de giração) considerando uma distribuição de massas homogénea.

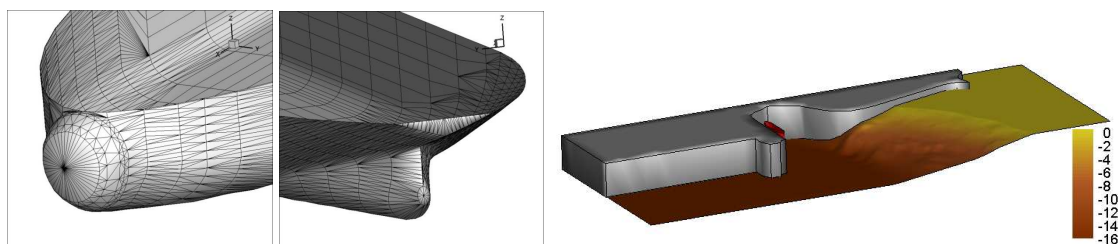


Figura 3 – Discretização da parte submersa do casco do navio em painéis. Domínio de cálculo e batimetria

Foram simulados 87 períodos entre 6.054 s e 502.65 s e 19 direções de onda incidente, entre 170° e 190° para obter os coeficientes hidrodinâmicos e as funções de resposta a impulso.

A batimetria utilizada para as simulações numéricas, Figura 3, foi obtida de um levantamento batimétrico de 11 de junho de 2008. Os fundos na região adjacente ao quebra-mar Norte foram considerados horizontais e à cota de -16 m (ZHL).

Os testes laboratoriais foram efetuados para estados de agitação irregular de crista longa, definidos com base no espectro de JONSWAP, considerando um fator de forma igual a 3.3, com uma direção de propagação perpendicular ao quebra-mar Norte, ou seja, proveniente de um rumo próximo do Oeste (W-20°-S).

A agitação marítima sofre a difração em torno da cabeça do quebra-mar Norte e é refletida pelas estruturas portuárias e pela praia, atingindo o modelo do navio num estado de agitação bem diferente daquele que é gerado no exterior do porto.

Com o modelo BOUSS-WMH, foram simuladas 11 ondas regulares com períodos entre 7 s e 210 s. Para tal foi necessário gerar quatro malhas de elementos finitos distintas de modo a garantir um número mínimo de pontos por comprimento de onda acima de 10 e em média cerca de 25 pontos para todos os períodos simulados. As malhas devem acomodar duas camadas absorventes, uma em cada extremidade do domínio com 2 vezes o comprimento de onda em cada caso e ainda uma zona de geração com 2 vezes o comprimento de onda. Para cumprir estes requisitos e manter o número de elementos dentro das capacidades de memória do computador utilizado nas simulações, as dimensões das malhas variaram com o período de onda simulada.

Os coeficientes de reflexão parcial aplicados nas estruturas físicas foram estimados a partir das inclinações e da rugosidade das fronteiras. Impôs-se a dissipação total da energia das ondas, utilizando camadas de absorção, na Praia de Matosinhos e na entrada do Porto.

A partir dos resultados obtidos com o modelo BOUSS-WMH foram retiradas as séries temporais da elevação da superfície livre e da velocidade nos pontos da malha num retângulo que engloba o navio e foram construídos os potenciais de velocidade (módulo e fase) nos centros de gravidade dos painéis do navio. Estas séries foram tratadas para o domínio da frequência, e com recurso a interpolação, foram transferidas para os centros de gravidade dos painéis do navio. Recorrendo às equações de Haskind foram obtidas as forças segundo cada grau de liberdade do navio devidas a ondas monocromáticas com altura de 1 m. Adicionalmente executou-se o modelo WAMIT® na sua versão original, com o navio próximo a uma parede vertical, sendo os resultados obtidos comparados com os do pacote SWAMS.

Apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos para o ensaio T03 ($T_p=12$ s, $H_s=3$ m).

Na Figura 4 apresenta-se a elevação da superfície livre no domínio de cálculo e na Figura 5 a densidade espectral de energia obtida a partir da série temporal medida na sonda 8 (correspondente à localização do navio). O período de pico obtido pela análise espectral é de 12.8 s e a altura significativa é de 0.5m. A altura de onda correspondente ao período de pico é de 0.35 m.

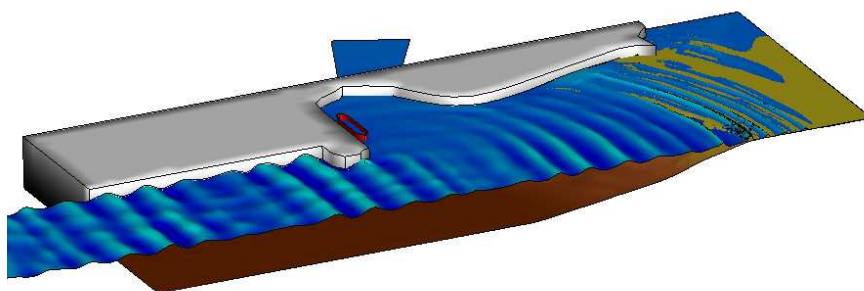


Figura 4 –Elevação da superfície livre para ondas irregulares com $T_p = 12$ s.

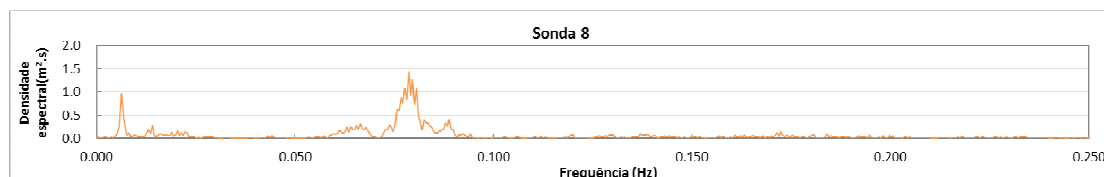


Figura 5 – Porto de Leixões. Fase 2. Densidade espectral na sonda 8 (ensaio T03).

Verifica-se a existência de um segundo pico de energia na frequência de 0.00631 Hz, o que corresponde a um período de 158 s, provavelmente resultante de uma oscilação ressonante

entre o intradorso do molhe principal e o extradorso do segundo molhe. A altura de onda correspondente a este período é de 0.28 m. Não se verifica a geração de harmónicas da frequência principal, mas já se consegue identificar alguma energia nas harmónicas da frequência de pico das ondas longas, o que indicia interações não lineares entre estas ondas resultantes da oscilação natural da configuração portuária.

Na Figura 6 apresenta-se a comparação das medições do movimento de avanço, obtidas no ensaio físico com os resultados numéricos, obtidos com o pacote SWAMS.

A amplitude do movimento de avanço, obtida com o modelo numérico WAMIT® original é significativamente inferior à medida no ensaio físico, Figura 6. Já a simulação com o pacote SWAMS consegue aproximar-se significativamente melhor das medições e inclusivamente as oscilações de alta frequência podem ser identificadas na série temporal.

Na Figura 7 apresentam-se os espectros dos movimentos de avanço, deriva e abatimento obtidos das medições do ensaio físico e dos resultados numéricos do WAMIT® original e do SWAMS.

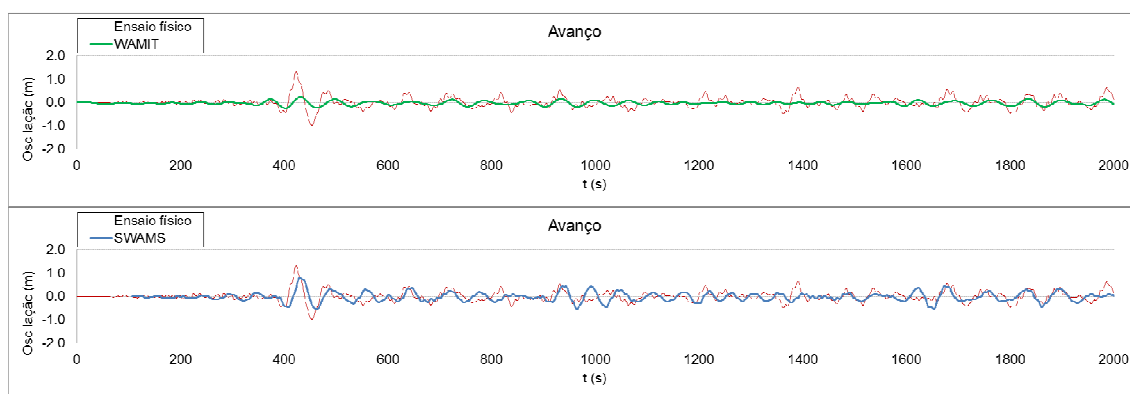


Figura 6 – Porto de Leixões. Fase 2. Movimento de avanço (ensaio T03). Comparação das medições com resultados numéricos, com WAMIT® original, em cima, e com SWAMS em baixo.

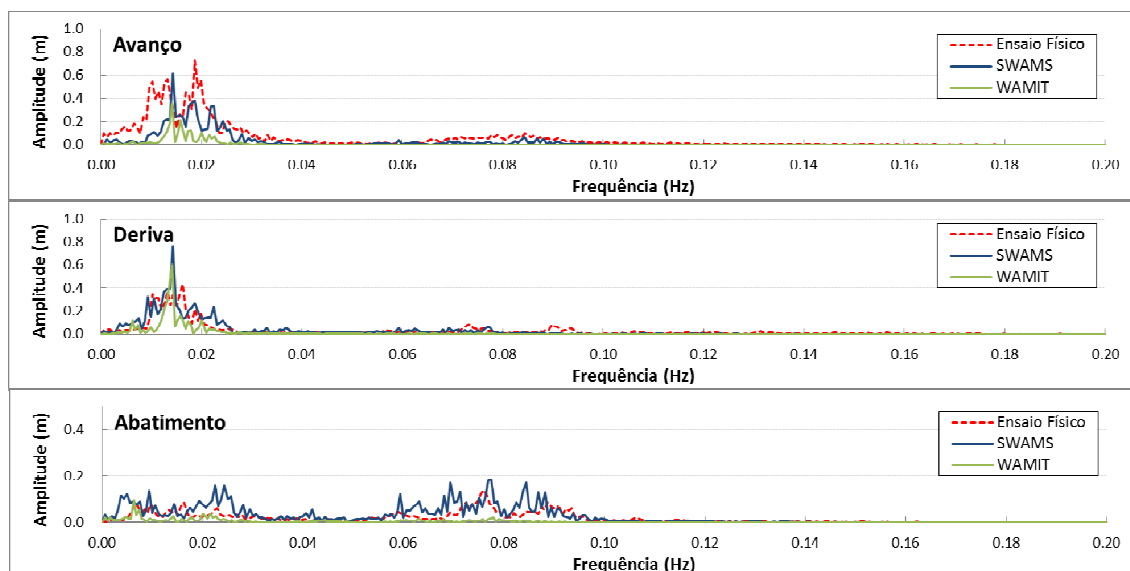


Figura 7 – Espectros dos movimentos (ensaio T03). Comparação das medições (vermelho) com resultados numéricos, WAMIT® original (verde) e SWAMS (azul).

Os movimentos no plano horizontal (avanço, deriva e guinada) têm uma frequência fundamental próxima de 0.02Hz, introduzidos pelo sistema de amarração, enquanto os

movimentos no plano vertical (abatimento, balanço e cabeceio) têm uma frequência fundamental em torno de 0.08Hz, ou seja, a frequência de pico das ondas incidentes.

Os movimentos no plano horizontal são os que mais influência têm nas condições de operacionalidade e de segurança num terminal de petroleiros. O avanço e a deriva apresentam espectros mais achatados na zona da sua frequência fundamental (0.02Hz) e com alguma energia presente nas frequências em torno de 0.08Hz (a frequência de pico das ondas incidentes). Este facto é melhor simulado pelo SWAMS do que pelo WAMIT® original. A distribuição de energia pelo espectro, para os movimentos de abatimento, balanço e cabeceio é também melhor capturada pelo SWAMS.

As séries temporais dos movimentos do navio amarrado mostram que as modificações implementadas, que deram origem ao pacote SWAMS, permitem obter simulações mais próximas da realidade. Uma análise dos parâmetros espectrais, ver Figura 7, permite confirmar esta afirmação.

Na Figura 8 apresentam-se os resultados das forças na amarra L1 obtidas no mesmo ensaio T03 do Porto de Leixões. Pode concluir-se que a magnitude das forças nas amarras é bem simulada com o SWAMS.

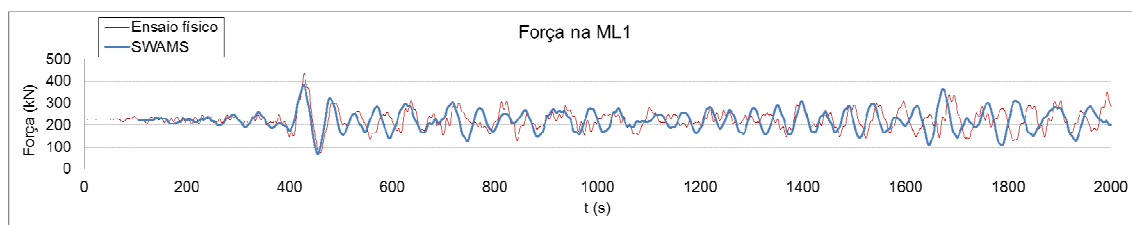


Figura 8 –Forças na amarra L1 (ensaio T03). Comparação das medições com resultados numéricos.

Da análise espectral, Figura 9, pode verificar-se que a forma do espectro também é melhor capturada com o SWAMS. A existência de dois picos de energia nas amarras foi bem reproduzida com o SWAMS enquanto com o WAMIT® original isso não acontece. A energia presente em torno da frequência fundamental das ondas incidentes, embora pequena, também é bem reproduzida pelo SWAMS.

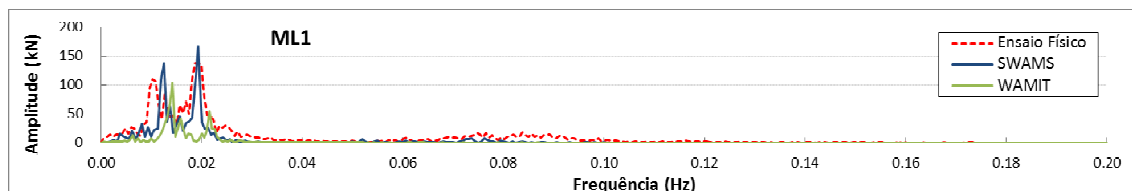


Figura 9 – Espectros das oscilações das forças nas amarras (ensaio T03). Comparação das medições (vermelho) com resultados numéricos, WAMIT® original (verde) e SWAMS (azul).

3.2 Estudo de agitação no Terminal XXI do Porto de Sines

Tendo em vista a implementação, pela Administração do Porto de Sines, do plano de expansão do seu terminal de contentores, designado por Terminal XXI, diversos estudos de previsão e modelação numérica de ondas foram efectuados pelo LNEC, incluindo estudos de agitação e de ondas longas. Com efeito, já têm ocorrido neste terminal movimentos dos navios amarrados superiores aos limites de segurança estabelecidos para as operações de carga e descarga, tendo sido já registados alguns episódios de amarras partidas.

A bacia do Terminal XXI, situa-se na zona mais a Sul do porto e é protegida da agitação incidente pelo quebra-mar leste. Presentemente, é constituída por um quebra-mar de 1500 m e um cais acostável de 940 m. Junto à cabeça do quebra-mar, as profundidades variam entre 18 e 20 m, aproximadamente, enquanto no interior da bacia variam entre 1 e 21 m, aproximadamente, Figura 10.

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento de um navio amarrado no primeiro posto de acostagem, tendo em conta a agitação na zona junto ao cais acostável.

Simulou-se uma condição de agitação marítima com $H=1$ m, Direção de Sul e $T=10$ s.

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

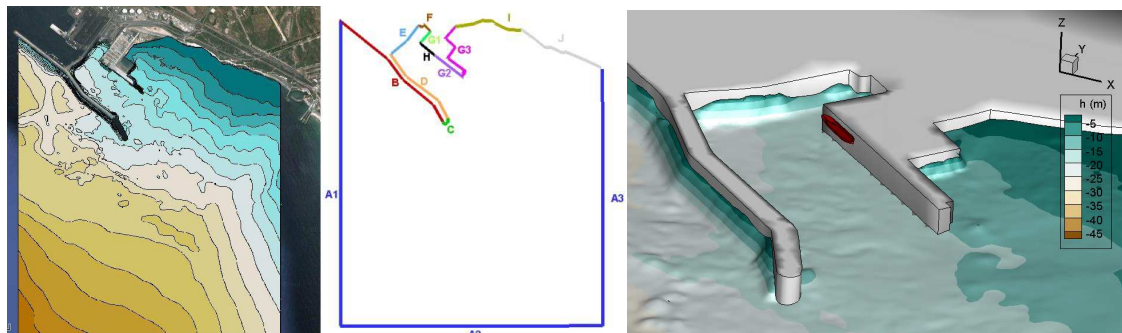


Figura 10 - Porto de Sines. Batimetria. Fronteiras do domínio de cálculo. Pormenor da bacia.

O domínio e batimetria da zona em estudo foram discretizados por elementos finitos e estabeleceram-se condições de fronteira nos diversos troços apresentados na Figura 10.

A malha de elementos finitos foi gerada 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.

Os resultados obtidos mostram que, em geral, existe uma diminuição dos valores dos índices de agitação à medida que a agitação se propaga para o interior do porto. Esta tendência é contrariada por vezes, pela ocorrência de reflexões importantes no interior do porto que conduzem a valores mais elevados dos índices de agitação. Essas reflexões são mais importantes para os períodos mais elevados.

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. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 17 m.

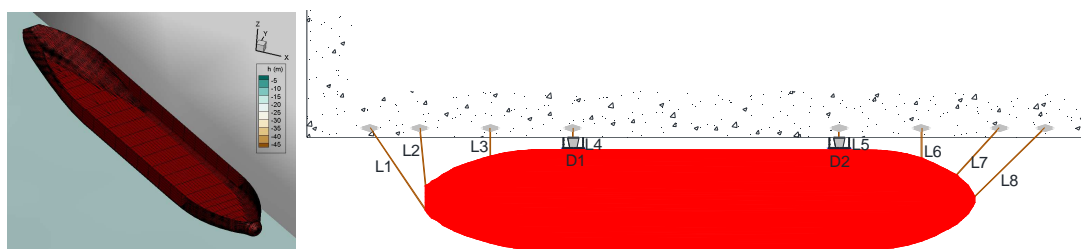


Figura 11 - Painelização do casco do navio simulado. Esquema do sistema de amarração.

Na Figura 11 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 1m.

Na Figura 12 apresenta-se a elevação da superfície livre ao fim de 800s de simulação numérica. Nessa figura pode ver-se a difração da onda em torno do molhe e as reflexões que ocorrerem no interior da bacia. Depois de obtido o campo de ondas na zona onde se encontra o navio determinam-se os pontos da malha de elementos finitos que cobrem a área do navio e determina-se para cada centróide dos painéis do navio o ponto da malha correspondente de modo a haver transferência de informação entre os modelos BOUSS-WMH e WAMIT, ver Figura 12.

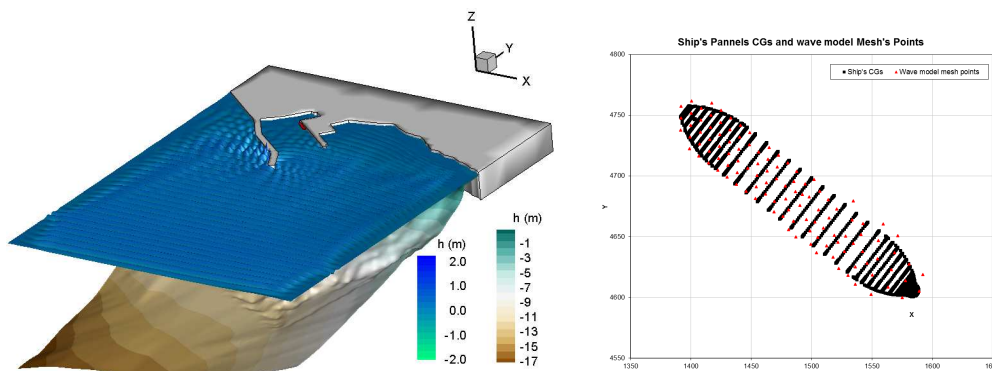


Figura 12 – Elevação da superfície livre ao fim de 800s no domínio de cálculo para a configuração 0. Transferência de informação entre a malha fluido e a malha do casco do navio.

É de referir que os valores de amplificação da onda incidente no interior do porto podem atingir 2.0 e isto acontece precisamente junto ao cais em determinados locais bem identificáveis. Este facto deve-se à ocorrência de reflexões entre o cais e o interior do molhe.

Resolveram-se 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.

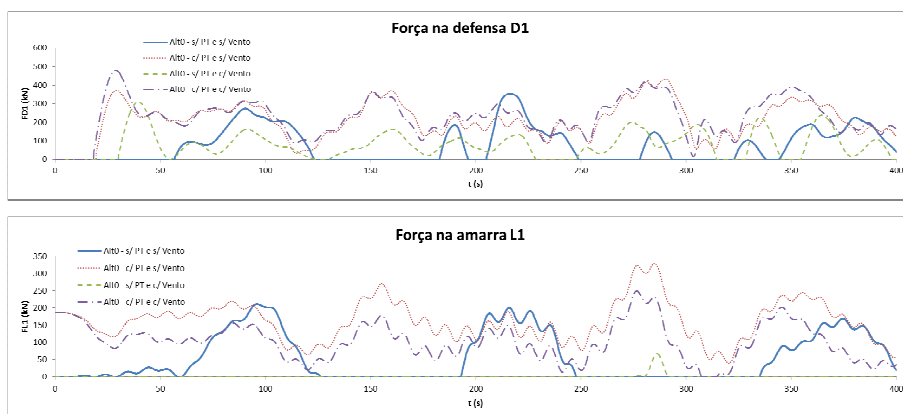


Figura 13 – Série temporal dos esforços na defesa D1 e na amarra L1, com e sem vento (15 m/s), com e sem pré-tensionamento das amarras (10% da carga máxima).

Na Figura 13 apresentam-se as séries temporais dos esforços na defesa D1 e na amarra L1. O período destas oscilações é controlado pela existência das amarras e das defensas. 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.

Os resultados obtidos para as ondas curtas permitem concluir que, o vento 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.

3.3 Estudo de ressonância no Terminal XXI do Porto de Sines

O operador do Terminal XXI, a PSA Sines – Terminal de Contentores s.A. (PSA) três ocorrências de problemas nos navios que atracaram naquele terminal (3 de janeiro, 25 de fevereiro e 3 de março de 2012), não se registando, porém, quaisquer temporais na boia de Sines nesses dias. Assim, foi realizado um estudo de caracterização das ondas longas naquele terminal (Neves et al. 2013) que se resume abaixo, e que foi complementado com o estudo do comportamento de um navio amarrado naquele terminal e sujeito àquelas ondas.

Para as datas em que houve sinalização de problemas na bacia do Terminal XXI, que constam da Tabela 1, apresentam-se as características das ondas de curto período (alturas de onda significativa, H_{s_oc} , e períodos de pico, T_{p_oc}) e de ondas longas (H_{s_ol} e T_{p_ol}), obtidas a partir dos dados recolhidos pelo marégrafo instalado no Terminal XXI. É de referir que entre 19 de novembro e 22 de dezembro de 2011 não há dados do marégrafo, (Neves et al. 2013).

Verificou-se ainda que as direções de agitação se situavam dentro da gama W-NW, para a qual foi referido haver problemas ressonantes no interior da bacia. Os dias em que houve problemas no Terminal nem sempre coincidem com situações de temporal.

As alturas de onda associadas a ondas longas são relevantes (entre 0.04 m e 0.27 m) e os valores mais elevados destas nem sempre coincidem com os períodos de temporal.

Para o estudo das ondas de longo período, caracterizou-se, com o modelo numérico DREAMS, as formas de oscilação ressonante da bacia portuária atual e de mais três configurações resultantes de diferentes soluções para a extensão do cais do Terminal XXI e do quebra-mar leste.

Os cálculos com o modelo DREAMS foram efetuados para as seguintes condições de agitação regular: a) Períodos de onda, T , de 20 a 600 s com intervalo de 20 s; b) direções de onda à entrada do domínio de cálculo de SW (225°), WSW (247.5°) e W (270°); c) níveis de maré de +2.0 m (ZH) (nível médio) e +4.5 m (ZH) (nível de preia-mar de águas vivas).

Tabela 1 – Porto de Sines. Condições de agitação verificadas na boia e no marégrafo instalado no Terminal XXI, para os eventos em que ocorreram problemas na bacia portuárias e em que ocorreu temporal entre abril de 2011 e junho de 2012, retirado de (Neves et al. 2013).

Data	Relatos (PSA)			Boia (SINES 1D)			Vento		Marégrafo (IH)			
	Mov. Excess	Cabos partidos	Temporal	H_s (m)	Dir	T_p (s)	Vel. (m/s)	Dir	H_{s_oc} (m)	T_{p_oc} (s)	H_{s_ol} (m)	T_{p_ol} (s)
23/10/2011	X			2.7	SW	7	16	SSW	0.16	7.5	0.06	671.7
24/10/2011	X		X	4.1	W	8	18	NW	0.24	8.3	0.08	649.6
25/10/2011	X			3.3	NW	11	6	W	0.27	11.3	0.09	149.5
27/10/2011	X		X	5.1	W	10	15	S	0.27	9.3	0.12	153.2
28/10/2011	X			3.9	NW	10	15	WNW	0.15	9.9	0.06	726.1
29/10/2011	X			2.3	NW	18	5	N	0.13	17.8	0.1	659.5
30/10/2011	X	X		3.6	WNW	17	5	N	0.18	17.6	0.19	157.7
31/10/2011		X		2.5	WNW	15	5	W	0.23	15.4	0.1	617.1
03/11/2011		X	X	7	WNW	16	13	WSW	0.26	17.8	0.27	159.4
04/11/2011		X	X	6.4	WNW	15	10	W	0.23	16.2	0.16	159.1
03/01/2012		X		3.8	NW	16	5	N	0.09	16.7	0.04	682.6
25/02/2012		X		2.1	WNW	13	3	W	0.22	15.6	0.09	177.4
03/03/2012		X		2.5	WNW	13	5	W	0.21	15.2	0.08	168.1

O domínio de cálculo foi discretizado com uma malha de 172 329 nós e 342 599 elementos. O espaçamento em x e em y variou ao longo do domínio, tendo em conta a profundidade local, de forma a garantir uma média de 55 pontos de malha por comprimento de onda, considerando uma onda incidente de 20 s de período. Notar que quanto maior o período maior o comprimento de onda, e, consequentemente, maior o número de pontos por comprimento de onda. Assim, para os restantes períodos o comprimento de onda é sempre superior a 55.

Os coeficientes de reflexão em todas as fronteiras foram considerados constantes e iguais a 1, uma vez que para a gama de períodos testada todas as fronteiras atuam como completamente refletoras.

Para as condições atrás referidas, efetuaram-se cálculos sistemáticos de ondas regulares com o modelo DREAMS. Os resultados consistiram nos diagramas da variação dos coeficientes de amplificação na totalidade do domínio em estudo, bem como nas curvas de resposta (H/H_0 , que representam a variação do coeficiente de amplificação com o período da onda) em diversos pontos de controlo.

Na Figura 14 apresentam-se, a título de exemplo, dois dos diagramas de coeficientes de amplificação obtidos para $T = 62$ s e 160 s e direção de W (180°). Para ambos os períodos, é facilmente identificável um nó junto ao cais.

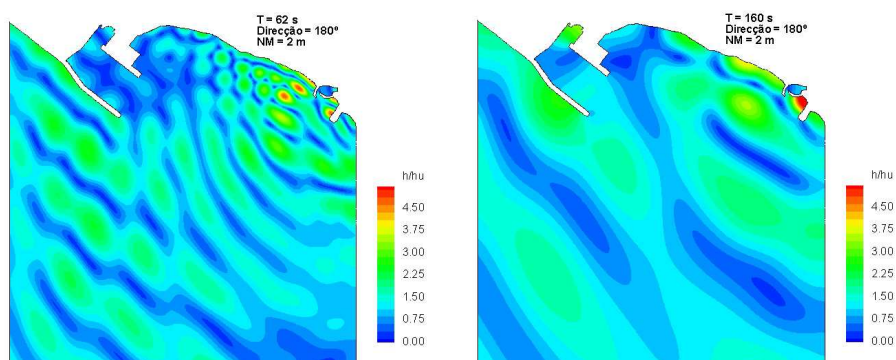


Figura 14 – Porto de Sines. Coeficiente de amplificação da onda para $T = 62$ s e 160 s e nível de maré, de 2.0 m (ZH).

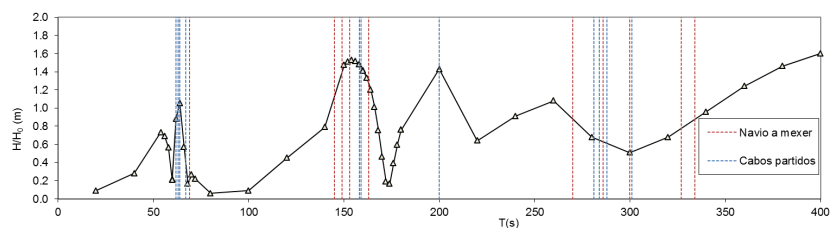


Figura 15 – Porto de Sines. Índices de agitação no posto 1.

Na Figura 15 apresentam-se os índices de agitação no posto 1, para o nível de maré de 2.0 m (ZH).

O modelo conduz a maiores valores de amplificação para a gama entre 140 s e 160 s, valores para os quais estava associada, em geral, a maior energia nas medições efetuadas. Para as outras gamas de períodos onde se verifica amplificação da amplitude da onda, nomeadamente de 60 a 70 s, de 195 a 205 s, 270 a 330 s, estas são, geralmente, menos energéticas. Contudo, verifica-se que, nos dias em análise, os períodos medidos no marégrafo aquando da ocorrência de problemas de cabos partidos nos navios coincidem, na generalidade, com os períodos de ressonância obtidos pelo modelo numérico DREAMS, o que permite intuir que a ressonância das oscilações da superfície livre é o fenómeno que causa a maioria dos problemas operacionais e de segurança neste Terminal.

Para verificar esta hipótese, fizeram-se simulações do comportamento do navio amarrado, utilizando as características simuladas na secção anterior para a configuração do sistema de amarração, sujeito a um conjunto de ondas longas, desde 54 s até 390 s. Utilizou-se para tal uma altura de onda de 0.20 m. Os resultados obtidos encontram-se sumarizados na Figura 16. Nesta figura apresenta-se a força máxima obtida em cada uma das 8 amarras para simulações com duração de 3000 s. Verifica-se que existe uma gama de períodos em que o sistema navio-

ondas-amarração entra em ressonância, entre 80 s e 120 s. No entanto, nos dias analisados, os espectros de agitação não apresentavam muita energia nesta gama.

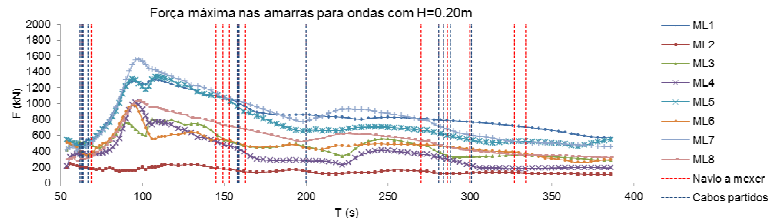


Figura 16 – Força máxima nas amarras para ondas com $H = 0.20$ m.

Decidiu-se então analisar a influência conjunta da altura de onda e do período de pico nas forças máximas das amarras. Em vez de manter a altura de onda constante, fizeram-se as mesmas simulações, mas com a altura a variar entre 0.01 m e 0.31 m de acordo com coeficientes de amplificação das ondas no posto 1. Os resultados obtidos encontram-se, em termos de força máxima nas amarras, apresentados na Figura 17.

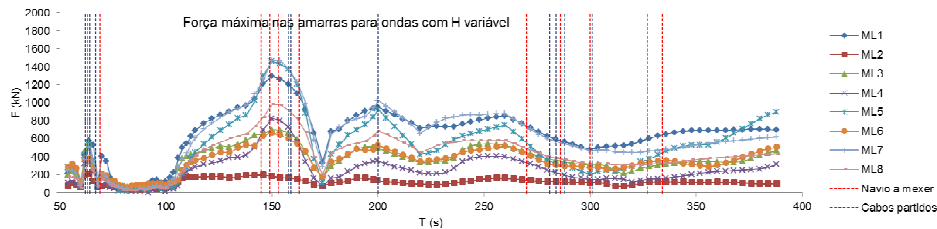


Figura 17 – Força máxima nas amarras para ondas com $H = 0.20 \times H/H_0$.

Verifica-se que as forças máximas nas amarras ocorrem nas gamas de períodos já identificadas para as alturas de onda. A gama de períodos de ressonância do sistema navio-amarração coincide com fatores de amplificação de onda que não ultrapassam 0.2, o que significa que os problemas de ressonância, nesta bacia, neste posto de acostagem em particular e com o sistema de amarração simulado, apenas ocorrem quando a oscilação da superfície livre é amplificada.

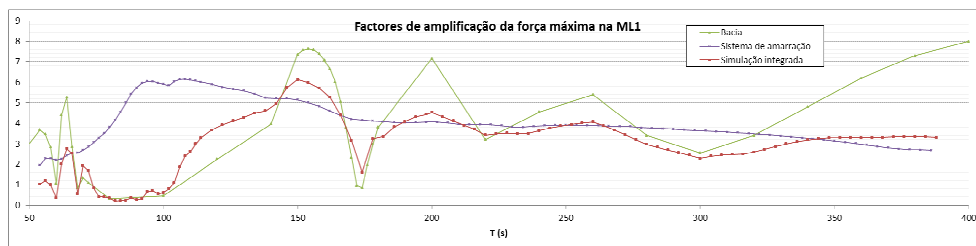


Figura 18 – fatores de amplificação da força máxima na amarra ML1.

Analisando o caso particular da amarra ML1, Figura 18, verifica-se que o fator de amplificação das ondas apresenta picos pronunciados que evidenciam as situações de ressonância da bacia portuária. Se se olhar para os fatores de amplificação das forças na amarra ML1 sempre com a mesma altura de onda (i.e., a altura da onda longa não varia com o período da onda) verifica-se que a ressonância do sistema navio-amarras (linha roxa), ocorre noutra gama de frequências mas é sempre elevada a partir de uma determinada frequência.

Quando se efetuou uma simulação integrada (em que a altura das ondas longas varia com o período da onda), foi possível determinar os fatores de amplificação do sistema bacia+navio+amarras (linha vermelha). Neste caso verificou-se que os maiores valores ocorreram nas mesmas frequências em que ocorreu a ressonância da bacia, mas existem gamas de frequências em que a simulação integrada fornece valores de amplificação superiores aos da bacia. Prova-se aqui a necessidade de realizar simulações integrada que tenham em conta não apenas as alturas de onda, mas também a resposta do navio amarrado.

Existe uma gama de períodos em que o sistema navio-ondas-amarração entra em ressonância, levando as amarras a registrar 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.

3.4 Estudo em modelo físico e numérico do comportamento de um navio petroleiro sujeito a ondas de esteira

Foi realizado um conjunto de ensaios em modelo físico no LNEC, com dois navios, um em movimento “Aurora”, e outro, “Esso Osaka” parado. O objetivo foi caracterizar o campo de ondas de esteira gerado pelo “Aurora” ao longo de uma trajetória retilínea com velocidade constante, bem com os movimentos do “Esso Osaka” induzidos por aquelas ondas.

Foram realizados testes para várias velocidades do “Aurora” e para diferentes níveis de água. Para cada teste (velocidade e nível de água) mediu-se a elevação da superfície livre com um conjunto de sondas resistivas e a velocidade do escoamento induzido pela passagem do navio com um conjunto de ADVs. Os movimentos do “Esso Osaka” foram medidos segundo os seis graus de liberdade, com um giroscópio instalado no seu interior que regista as acelerações lineares e angulares permitindo obter movimentos e rotações instantâneos. Efetua-se uma análise dos resultados obtidos para as diferentes condições de teste, quer da agitação gerada, quer dos movimentos induzidos no “Esso Osaka”.

Para uma das condições de teste, efetuou-se uma simulação com o SWAMS. Estes resultados numéricos são comparados as medições em modelo físico.

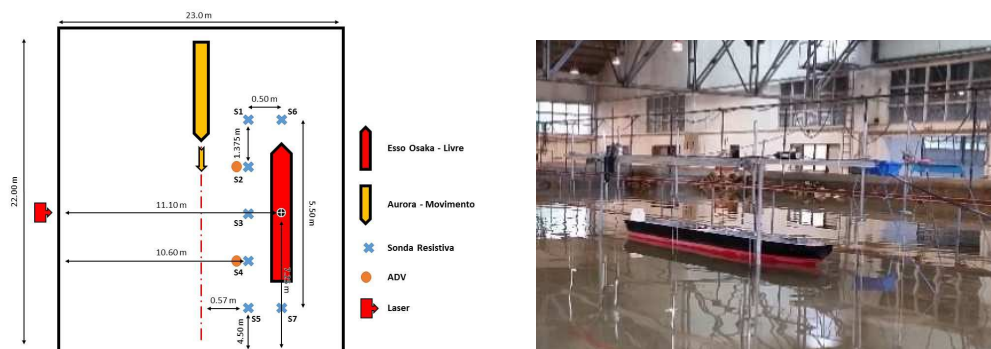


Figura 19. Instalação experimental: Esquema do posicionamento dos navios e do equipamento

Para realização dos ensaios foram utilizados, além dos 2 navios (“Aurora” e “Esso Osaka”): 7 sondas resistivas, 2 velocímetros acústicos (ADV), um giroscópio e um laser scan.

O navio “Aurora” é um modelo à escala do casco do navio de transporte de produtos químicos homónimo e tem um comprimento de 2.59 m, uma boca de 0.43 m e um calado máximo de 0.11 m.

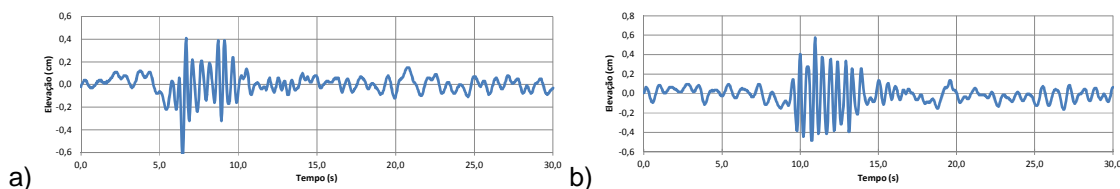


Figura 20. Séries temporais da elevação da superfície livre medida a) na sonda 2 e b) na sonda 3 ao longo do Teste 7.

A Figura 21 apresenta as séries temporais dos movimentos do “Esso Osaka” segundo cada um dos seus seis graus de liberdade no Teste 7 (profundidade no tanque de 0.82 m e velocidade de avanço do “Aurora” de 0.86 ms^{-1}).

A forma do casco foi obtida a partir de uma painelização com 644 painéis. O volume de água deslocado pelo casco painelizado é de 0.220 m^3 .

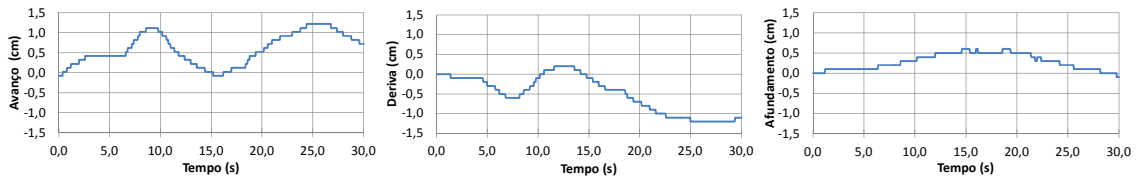


Figura 21. Séries temporais dos movimentos do “Esso Osaka. Teste 7.

Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 0.82m. Resolveram-se os problemas de radiação e de difração do navio livre para 89 frequências entre 0.02 rad/s e 2.72 rad/s. A Figura 22 apresenta as funções de transferência (experimental e numéricas) para os seis movimentos do navio.

Dos resultados obtidos verifica-se que a resposta do navio Esso Osaka (movimento do seu centro de gravidade) é máxima quando a frequência da onda incidente é cerca de 0.90 Hz (ou $T=1.1\text{s}$) nos movimentos de abatimento e cabeceio. Por outro lado, nos movimentos de guinada, deriva e balanço, a resposta é máxima quando a frequência da onda incidente é cerca de 0.62 Hz (ou $T=1.6\text{s}$). Para as frequências das ondas de esteira reproduzidas nos ensaios aqui apresentados (2.041Hz e 2.22Hz), a resposta do navio é muito reduzida, e aproxima-se de zero, em qualquer dos seis movimentos, quando a frequência aumenta.

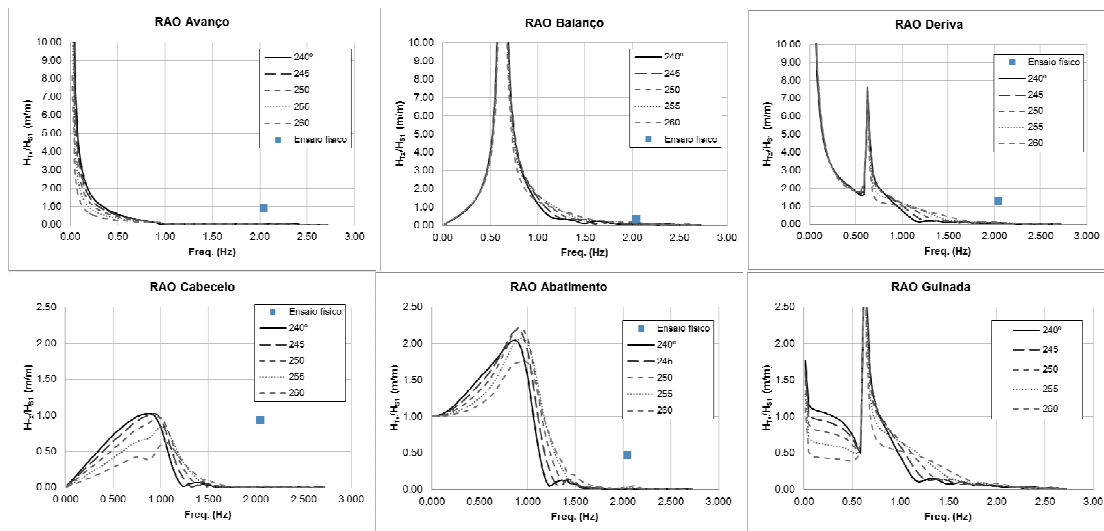


Figura 22. Funções de transferência do navio (RAO), obtidos numericamente (linhas cinzentas) e do Teste 7 (ponto azul).

Os dados do ensaio analisado (Teste 7), com exceção do movimento de guinada, mostram uma resposta também ela de reduzida amplitude. No entanto os valores constantes nos gráficos são sempre superiores aos esperados numericamente. É de salientar que estes ensaios resultam de testes ainda preliminares onde foram identificados uma série de aspetos a melhorar de forma a obter dados mais rigorosos. As amplitudes medidas são tão pequenas que os efeitos laboratório sobrepuseram-se às quantidades medidas. Devido a estas incertezas não é possível elaborar sobre o ângulo de ataque das ondas nos testes experimentais.

3.5 Previsão e avaliação do risco de um porta-contentores no Porto de Praia da Vitória

O sistema SWAMS_ALERTA é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias. Está a ser desenvolvido um protótipo para a área portuária e respetiva baía da Praia da Vitória, Terceira, Açores.

O sistema é composto por quatro módulos: I - Características da agitação marítima; II - Navegação em áreas portuárias; III - Avaliação de Risco e IV - Sistema de Alerta. O sistema está a ser desenvolvido e implementado numa plataforma web totalmente interativa e amigável e utiliza as características da agitação marítima medidas ou previstas para determinar os seus efeitos em termos de movimento vertical excessivo de uma embarcação em manobras que entra ou sai de uma bacia portuária ou em termos de forças em amarras e defensas, bem como de movimentos de um navio amarrado. Para isso, o sistema utiliza um conjunto de modelos numéricos. A comparação dos valores calculados das variáveis relevantes com valores máximos pré-definidos permite a avaliação em tempo real de possíveis situações de emergência ou quando a segurança das operações portuárias estiver em risco e emitir avisos às autoridades competentes; e ainda a construção de mapas de risco, considerando longas séries temporais de ondas de mar medidas ou previstas ou cenários predefinidos associados a alterações climáticas ou eventos extremos. Ilustra-se a aplicação deste sistema ao porto da Praia da Vitória. A descrição detalhada dos diferentes módulos pode ser consultada em Pinheiro *et al.* (2017).

Os limites aos movimentos horizontais, verticais ou de rotação dependem das consequências associadas. Existem limites operacionais, a partir dos quais a movimentação de carga fica condicionada ou mesmo impossibilitada e limites de segurança, a partir dos quais existe risco para as pessoas, os bens ou as estruturas. Diversas organizações ligadas à atividade marítimo-portuária têm vindo a emitir recomendações de limites às alturas de onda, às amplitudes, às velocidades dos movimentos dos navios e aos esforços nos elementos de amarração (OCIMF, 1992; PIANC 1995). Os valores adotados neste trabalho baseiam-se nas recomendações da PIANC (1995) mas podem ser ajustados caso a caso de acordo com critérios e normas internas de cada administração portuária. Quanto aos limites aos esforços nos elementos de amarração, OCIMF (1992), por exemplo, recomenda que os esforços sejam distribuídos de forma uniforme pelas amarras e que estes não excedam 55% do esforço máximo de rotura.

Recentemente, um grupo de trabalho da PIANC atualizou as diretrizes para os movimentos máximos de porta-contentores amarrados que garantem operações de descarga eficientes (PIANC, 2012). Nesse relatório conclui-se que, para grandes navios porta-contentores, a limitação do movimento de avanço é fundamental, uma vez que, hoje em dia, os guindastes não conseguem acompanhar esse movimento de forma eficiente. O mesmo relatório afirma que, quando os movimentos de avanço são mantidos dentro dos limites prescritos, os restantes movimentos acabam por ficar também eles dentro de limites aceitáveis.

Os níveis de alerta são definidos de acordo com uma análise feita “a priori” desses limites, tendo em conta as consequências para as atividades de carga e descarga e a segurança de pessoas, bens e do navio.

Os resultados gerados pelo sistema assumem diversas formas, nomeadamente, gráficos, mapas e relatórios. Estes são depois transmitidos ao utilizador, numa aplicação Web, para permitir a avaliação da situação. A plataforma Web foi criada com o intuito de permitir a visualização e a análise de resultados através de funcionalidades user-friendly, de tal forma que os resultados sejam facilmente legíveis pelo utilizador comum. Esta plataforma contém um conjunto de funcionalidades que passam pela visualização das previsões obtidas pelo sistema para cada um dos modelos numéricos utilizados, bem como, e dos mapas de alerta. Esta plataforma permite a visualização da agitação marítima junto ao navio, os valores máximos dos movimentos de avanço, deriva e balanço, bem como as forças nas amarras. É possível também visualizar os níveis de alerta obtidos nessa zona para o dia e hora referidos.

A aplicação do sistema SWAMS_ALERTA ao porto da Praia da Vitória, é efetuada todos os dias e permite a previsão a 72 horas dos efeitos da agitação marítima em termos de movimentos dos navios acostados ao cais principal (cais 12). Foi escolhido um navio amarrado a esse cais com um casco genérico do tipo porta-contentores com um volume deslocado de 12 717 m³, um comprimento na flutuação de 120 m, uma boca de 19 m e um calado de 8 m. A forma do casco foi discretizada com 3464 painéis retangulares e triangulares. Considerou-se que o navio estava colocado numa zona de fundo horizontal com a profundidade de 10 m sendo amarrado ao cais por 6 amarras (1 lançante à popa, outro à proa, duas regeiras e 2 traveses) e o contacto entre o

navio e o cais é impedido por cinco defensas pneumáticas.

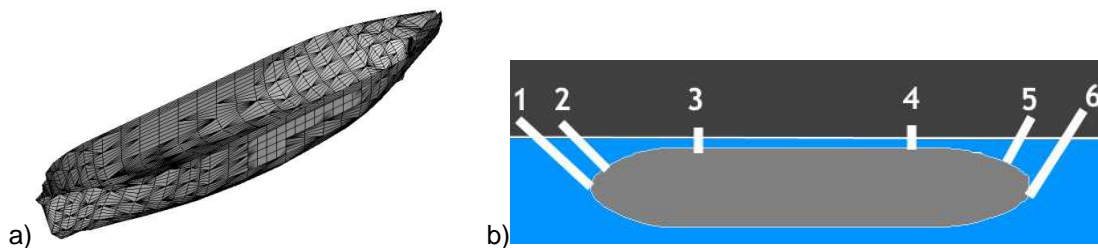


Figura 23. a) Parelização do casco do navio simulado. b) Esquema do sistema de amarração.

Todos os cabos do sistema de amarração têm a mesma relação constitutiva: variação linear desde 0 kN até à carga máxima de 931 kN a que corresponde uma extensão de 8%. A relação constitutiva das defensas também é linear sendo a força de compressão máxima 4900 kN para uma deflexão de 1 m.

Para a caracterização da agitação marítima (H_s – altura significativa, T_m – período médio, T_p – período de pico e Θ - direção) ao largo da Praia da Vitória, o sistema utiliza, uma vez por dia, os resultados das previsões da agitação marítima, para as 72 horas seguintes, obtidos com o modelo WW III (Tolman 1999) e que são disponibilizados pelo The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) de 3 em 3 horas. Para a área em questão, os dados do modelo WW III estão disponíveis com resolução de 1° , desde setembro de 2003. Os dados de vento regional e de níveis de maré, necessários para correr juntamente com os dados do modelo WW III no modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), são disponibilizados também pela FNMOC, através do modelo NAVGEM (Whitcomb, 2012), e pelo software XTide (Flater 1998), respetivamente. Este último é um modelo de previsão de maré astronómica que dispõe de informações de marés desde 1700 até 2100. Como exemplo, apresenta-se na Figura 24 um Layout gerado pelo sistema para os dados provenientes do WW III, H_s e Θ .

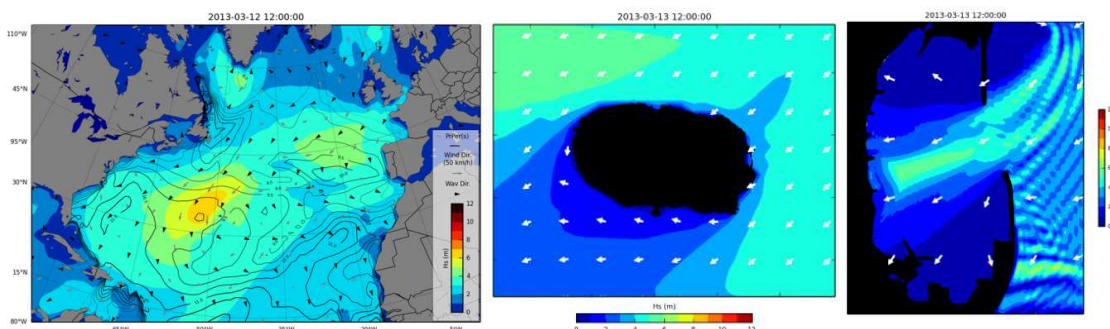


Figura 24. Exemplo do Layout gerado pelo sistema para os dados provenientes do WW III, H_s e Θ e para os resultados obtidos pelo modelo SWAN, H_s e Θ , e DREAMS, H_s e Θ .

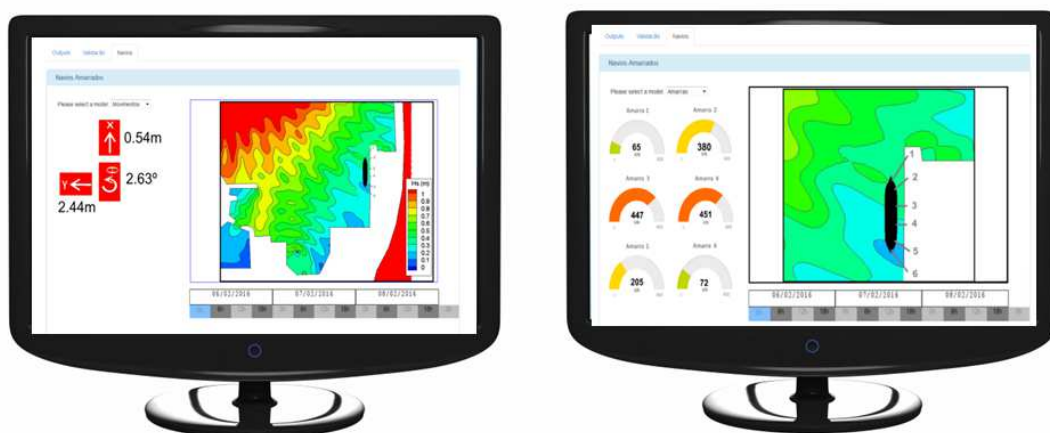


Figura 25. Layout do mapa de alerta de movimentos e de forças nos cabos gerado pelo sistema.

Dos resultados apresentados pelo modelo WW III são extraídos os valores que se encontram mais perto da Ilha Terceira para que estes representem as condições de fronteira para os modelos que serão usados de seguida. Esses valores são transferidos para o interior do porto e da baía da Praia da Vitória com recurso aos dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima: o modelo SWAN e o modelo DREAMS. A utilização dos modelos e as suas condições de aplicação encontram-se descritas em Pinheiro *et al.* (2017). Na Figura 24 são apresentados o tipo de layouts gerados pelo sistema de alerta para os resultados obtidos pelos modelos SWAN e DREAMS, Hs e Θ .

A avaliação do risco baseia-se no conceito de nível de risco (Probabilidade x Consequência) ou seja, o produto entre o nível de probabilidade de exceder os limites estabelecidos para a amplitude dos movimentos dos navios e das forças na amarração e o nível de consequência associado a tal excedência, (Neves *et al.*, 2012). Assim, para avaliar o risco de um determinado navio amarrado:

1. Avalia-se a natureza das atividades que vão ocorrer no terminal portuário onde se encontra amarrado o navio e o impacto dos movimentos do navio na operacionalidade do terminal e na segurança do navio, das infraestruturas e das pessoas;
2. Estabelecem-se limites para os movimentos médios e máximos de acordo com as características do navio e das atividades previstas, assim como limites para as forças nas amarrações. Estes limites podem ser definidos pelas autoridades portuárias ou a partir de recomendações de entidades reconhecidas, por exemplo PIANC (1995) e PIANC (2012), que propõem limites para as alturas de onda, as velocidades e amplitudes de movimentos e ainda para as forças nas amaras e defensas;
3. Definem-se os níveis de consequências;
4. Determina-se a probabilidade de ocorrência de tais movimentos e forças. Esta probabilidade obtém-se após uma análise às séries temporais obtidas no módulo II;
5. Calcula-se o nível de risco.

4 CONCLUSÕES

Descreveu-se uma ferramenta numérica integrada, SWAMS, capaz de caracterizar a resposta de estruturas amarradas sujeitas a estados de agitação complexos, como os que estão presentes no interior de portos.

O SWAMS foi validado com dados de ensaios físicos realizados para o caso de um porta-contentores amarrado no posto A do porto de Leixões, sujeito à ação da agitação marítima. Os resultados mostraram as vantagens de utilizar os diversos modelos numéricos de forma integrada.

Utilizando esta ferramenta, propagou-se um estado de mar desde o largo até ao interior do porto

de Sines e determinou-se a resposta do navio amarrado no primeiro posto de acostagem do terminal XXI. Foram testadas as situações com e sem vento e com e sem pré-tensão nas amarras.

Para o caso do Porto de Sines fez-se ainda um estudo de ressonância, que demonstrou que, apenas uma análise integrada permite identificar todas frequências suscetíveis de causar problemas aos navios amarrados. Verificou-se que existe uma relação entre os períodos de ressonância do sistema navio/amarração obtidos pelo modelo numérico e os casos registados de roturas de amarras.

Mais recentemente o SWAMS foi utilizado para comparação dos dados medidos em ensaios físicos realizados no LNEC com um navio parado livre sujeito a ondas de esteira. O objetivo foi de verificar os procedimentos experimentais.

Por fim, mostrou-se a integração do SWAMS num sistema de alerta afim de auxiliar as autoridades portuárias na gestão das suas operações. O sistema está a ser testado no Porto de Praia da Vitória com um navio genérico.

Do exposto, pode concluir-se que a resposta de um navio amarrado no interior de um porto pode ser subestimada se não forem consideradas todas as transformações lineares e não lineares das ondas inerentes ao facto de estarem confinadas entre fronteiras refletivas e praias onde a profundidade é progressivamente decrescente. Podem existir forças devidas a ondas de longo período ligadas e a ondas de longo período livres que resultam dos fenómenos de transformação nas praias e estas forças não podem ser negligenciadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Porto de Sines e à administração dos portos do Açores, pela autorização concedida para a utilização dos dados de base.

Os autores agradecem ainda ao CENTEC pela cedência dos modelos dos navios e do giroscópio e à FCT pelo financiamento concedido através da bolsa de doutoramento SFRH / BD / 82637 / 2011 e do projeto M&MShips PTDC/EMS-TRA/5628/2014.

REFERÊNCIAS

Bingham H. B. (2000) A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship, *Coastal Engineering*, vol 40 (1), pp 21-38.

Booij, N.R.; Holthuisen, L.H.; Ris, R.C. (1996) - The SWAN wave model for shallow water, *ICCE '96*, Orlando, pp. 668-676.

Flater D. (1998). Xtide: harmonic tide clock and tide predictor. <http://www.flaterco.com/xtide/> (acedido a 30 Maio 2016).

Fortes, C.J.E.M. 2002. *Transformações não lineares de ondas em portos. Análise pelo método dos elementos finitos*. Tese de doutoramento. Lisboa: IST/DEM.

IHRH-FEUP/IST (2005) Estudo sobre as condições de operacionalidade no Terminal Petrolero do Porto de Leixões. 6 Vol.s, Porto, Portugal.

Korsemeyer F.T., Lee C.-H., Newman J.N., Sclavounos P.D. (1988) The analysis of wave effects on tension-leg platforms, *7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, pp. 1-14.

Molen, W.; Wenneker, I. (2008) Time-domain calculation of moored ship motions in nonlinear waves, *Coastal Engineering*, vol 55 (5) Maio, pp 409-422.

Mynett, A.E.; Keunig, P.J.; 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.

Neves, D.R., Santos, J.A., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Simões, A., Azevedo, E.B., Rodrigues, M.C. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 12(3), 291-312.

Neves, M. G., Pinheiro, L. V., Capitão, R., Fortes, C. J. E. M. (2013) Estudo da ressonância da bacia portuária do Terminal XXI. 2º Relatório de progresso. Relatório 24/2013, DHA/NPE, LNEC, janeiro.

OCIMF (1992) Mooring Equipment Guidelines. Witherby e Co. Ltd.

Pedro, F., Hinostroza M. A., L Pinheiro L., Fortes C.J.E.M., Santos J.A., Ramos, A. (2017) Caracterização Experimental de um Navio Parado Sujeito a Ondas de Esteira. 13º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 13 a 15 de Setembro 2017, Porto.

PIANC (1995) Criteria for movements of moored ships in harbors. Technical report Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) Supplement to bulletin no. 88.

PIANC. (2012) Guidelines for berthing structures related to thrusters. PIANC, Brussels, Belgium.

Pinheiro L., Fortes C.J.E.M., Santos J.A., Fernandes L., 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., Lopes, P.; Poseiro, P., Fortes C.J.E.M., Santos J.A. (2017) SWAMS ALERT – Sistema de Previsão, Alerta e Avaliação do Risco Associados À Navegação Em Áreas Portuárias. Novos Desenvolvimentos. 13º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 13 a 15 de Setembro 2017, Porto.

Pinheiro, L. V.; Fortes, C. J.; 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.

Rosa-Santos, P. (2010) Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto A do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. FEUP.

Santos, J.A. (1994) *MOORNAV – Numerical model for the behaviour of moored ships*. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves.

Simão J. P., Pinheiro, L.V., Lesme, H. Hinostroza M. A., Santos, J.A., Fortes, C. J. (2016) Ship Movements' Analysis in a Scale Model. 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, CNME 2016.

Tolman, H. (1999). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III. Version 1.18, NOA/NWS/NCEP/OMB. Technical Note 166, Washington, E.U.A.

Veloso-Gomes F., Taveira-Pinto F., Rosa-Santos P., Brógueira-Dias E. e Guedes-Lopes H. (2005) Berthing characteristics and the behavior of the oil Terminal of Leixões Harbour, Portugal. *Marine Heritage and Modern Ports*, WIT Press, ISBN: 1 -84564-010-1. pp. 481- 492.

Whitcomb, T. (2012). Navy global forecast system, NAVGEM: Distribution and user support. In: *Proceedings of the 2nd Scientific Workshop on ONR DRI: Unified Parameterization for Extended Range Prediction*.