



AMARRAÇÃO DE NAVIOS NOS TERMINAIS DO PORTO DE SINES EM SITUAÇÕES DE TEMPESTADE

Andreia Gomes¹; Líliliana Pinheiro¹; João Alfredo Santos^{2,3}; Conceição Juana Fortes¹

¹ Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
ahgomes@lnecc.pt, lpinheiro@lnecc.pt, ifortes@lnecc.pt

² ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa
jasantos@dec.isel.ipl.pt

³ CENTEC - Centre for Marine Technology and Ocean Engineering, Universidade de Lisboa

Resumo

Este trabalho descreve a aplicação do sistema SAFEPORrT no Porto de Sines, e em particular, o teste de uma das funcionalidades do sistema relacionada com otimização de operações marítimas em ambiente portuário. O SAFEPORrT é um sistema de previsão e alerta de perigos associados a navegação.

A aplicação do sistema SAFEPORrT permitiu a otimização dos esquemas de amarração de três navios distintos acostados em três terminais do Porto de Sines, sob as condições de agitação marítima provocadas pela tempestade Dora (4 de dezembro de 2020). Foram construídos os modelos dos três navios e analisados vários esquemas de amarração a fim de obter uma solução ótima para cada navio.

Este exercício mostrou que o sistema SAFEPORrT é uma ferramenta útil para apoio à decisão nos sistemas de amarração dos navios. A configuração dos cabos de amarração tem grande influência no comportamento, e conseqüentemente na segurança, dos navios amarrados sujeitos a situações de tempestade.

Introdução

O Porto de Sines é o porto de águas profundas de Portugal, líder nacional na quantidade de mercadorias movimentadas e fundamental no abastecimento energético do país. Opera 365 dias por ano, 24 horas por dia. Ciente da sua importância, a administração do porto tem apostado na modernização e dinamização do seu sector marítimo-portuário.

No âmbito do projeto BlueSafePort encontra-se em desenvolvimento um sistema de segurança para o porto de Sines. O sistema está implementado em plataformas, onde é possível consultar diariamente, parâmetros que permitem aferir os perigos associados à segurança da navegação. O sistema permite antecipar os efeitos sobre os navios da agitação marítima, disponibilizando informações sistemáticas e fidedignas sobre os movimentos dos navios e sobre as forças impostas no sistema de amarração.

Neste trabalho pretende-se explorar o funcionamento do sistema SAFEPORrT para investigar a influência da configuração do sistema de amarração, designadamente da geometria das amarras e da introdução de pré-tensionamento nas mesmas, de três navios distintos acostados em três terminais do Porto de Sines. As simulações foram feitas para as condições de agitação marítima da tempestade Dora, que chegou a Portugal Continental a 4 de dezembro de 2020.

Depois desta introdução, descreve-se a metodologia utilizada. A secção seguinte apresenta os esquemas dos sistemas de amarração utilizados neste trabalho. A seguir, descrevem-se os casos de estudo, nomeadamente a construção dos modelos numéricos do sistema SAFEPORrT, bem como os testes realizados. Na penúltima secção apresenta-se os resultados deste trabalho. A última secção apresenta as principais conclusões desta investigação.





Metodologia

Alguns dos modelos numéricos contidos no sistema de segurança SAFEPORrT, cujo protótipo



operacional é o Porto de Sines, foram utilizados neste trabalho. O sistema fornece previsões diárias para as próximas 72 horas, com intervalos de três horas, da agitação marítima dentro do porto bem como das suas consequências nos navios (em manobras ou amarrados). O sistema emite alertas, baseados numa avaliação das situações de emergência, associados aos movimentos e às forças nos cabos de amarração de navios amarrados dentro do porto (Tabela 1). Com base nos alertas emitidos pelo sistema, é possível modificar a configuração do sistema de amarração proposta para o navio até que os alertas desapareçam, podendo então afirmar-se que foi obtida uma solução adequada para a configuração do sistema de amarração do navio.

Tabela 1. Código de cores e símbolos convencionado no sistema SAFEPORT para os níveis de perigo relativos às forças nos cabos de amarração dos navios.

Parâmetros	Níveis de perigo			
	0	1	2	3
Forças nos cabos de amarração do navio				

Para quantificar os movimentos dos navios amarrados e as forças nos seus cabos de amarração, o sistema inclui o conjunto de modelos numéricos do pacote SWAMS (Pinheiro *et al.* 2013), acrónimo de *Simulation of Wave Action on Moored Ships*.

SWAMS é uma ferramenta numérica integrada capaz de simular a resposta de um navio amarrado dentro de um porto, sujeito à ação das ondas, do vento e das correntes. Compreende 2 módulos: o módulo WAVEPROP para a propagação de ondas e o módulo MOORNAV para o comportamento dos navios amarrados. O objetivo do primeiro módulo é determinar as características da agitação marítima na área de estudo. O segundo módulo faz uma estimativa dos movimentos dos navios e das forças exercidas no sistema de amarração.

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

- SWAN (Booij *et al.*, 1996) – um modelo não linear espectral, baseado na equação de conservação da ação da onda e capaz de simular a propagação de espectros ondas irregulares;
- DREAMS (Fortes, 2002) – é um modelo linear de elementos finitos, baseado na equação de declive suave para simular a propagação de ondas monocromáticas;
- BOUSS-WMH (Pinheiro *et al.*, 2011) – é um modelo não linear de elementos finitos, baseado nas equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993), sendo capaz de simular a propagação de ondas regulares e irregulares;
- GMALHA (Pinheiro *et al.*, 2008) – um gerador de malhas de elementos finitos triangulares, 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.

O módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV inclui 2 modelos numéricos, (Santos, 1994):

- WAMIT (Korsemeier *et al.*, 1988) – 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) – 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 ao impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (amarras e defensas).

Configuração dos Sistemas de Amarração

Nesta secção apresenta-se os tipos de configuração dos sistemas de amarração utilizados neste trabalho. Importa referir que a posição das defensas nos esquemas tipo é meramente ilustrativa e, o sistema SAFEPORT ainda não emite alertas relativos as forças nas defensas. Na Figura 1 estão dispostos os tipos de esquema dos cabos de amarração testados. Adicionalmente, está previsto a introdução de pré-tensionamento nos cabos de amarração, quando necessário.

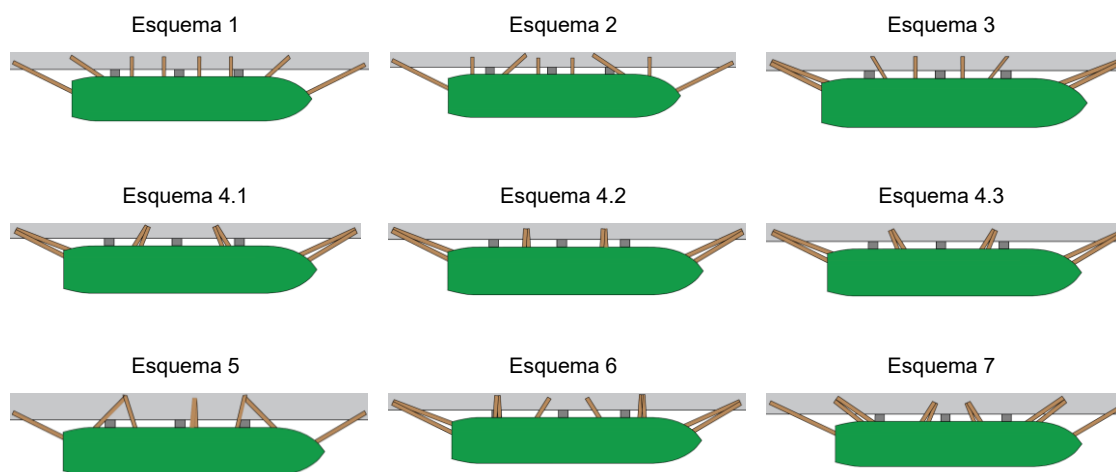


Figura 1. Esquemas dos cabos de amarração.

Casos de estudo

Pretende-se avaliar a influência da configuração do sistema de amarração no comportamento de três navios distintos acostados em três terminais do Porto de Sines (Figura 2), nomeadamente: um petroleiro no terminal de granéis líquidos (TGL), um cargueiro geral no terminal multiusos (TMS) e um porta-contentores no terminal de contentores ou terminal XXI (TXXI). Os navios simulados estão sujeitos às condições de agitação marítima da tempestade Dora, ocorrida a 4 de dezembro de 2020.

Tabela 2. Características geométricas gerais dos navios simulados e os respetivos esquemas testados.

Navio	Calado (m)	Boca (m)	Comprimento fora-a-fora (m)	Esquemas testados
Petroleiro	22,0	26,5	340	3; 4.1; 4.2 e 4.3
Cargueiro Geral	10,5	30,0	220	1; 2; 3; 4.1; 4.2 e 4.3 e 5
Porta-Contentores	8,0	19,0	120	6; 7.1 e 7.2

Caraterização da Agitação Marítima causada pela Tempestade Dora

A tempestade Dora atingiu a sua intensidade máxima entre 4 e 5 de dezembro de 2020. Foi uma tempestade caracterizada por rajadas de vento de mais de 100 km/h (62 mph) nas áreas próximas da costa, neve no norte do país, chuva, e mar agitado com registos de altura máxima de onda de 10,3 metros na boia em frente ao Porto de Sines.



Figura 2. Localização dos casos de estudo.

As previsões da agitação marítima, para os dias 4 e 5 de dezembro de 2020, foram obtidas através do modelo WAM (WAMDI Group, 1988), utilizado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) (Persson, 2001). Foram recolhidos, com um intervalo de 3 horas, os seguintes parâmetros de agitação marítima: altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média (θ_m) (Figura 3).

Os estados de agitação formados pela tempestade Dora tiveram θ_m predominante de Norte, com H_s entre 3 m e 8 m e T_p máximo de aproximadamente 18 s.

A aplicação do modelo SWAN permitiu a propagação da agitação marítima, obtida pela aplicação do modelo WAM, do largo até as proximidades da entrada do Porto de Sines. Os dados da maré foram estimados com o modelo XTide (Flater, 1998) e as estimativas das características do vento foram obtidas através do modelo NAVGEM (Reynolds et al., 2011). A batimetria foi fornecida pela administração do porto.

O domínio do modelo foi discretizado em três malhas retangulares encaixadas. Os fenómenos físicos contabilizados pelo SWAN foram a difração e a dissipação de energia por atrito de fundo. As simulações foram realizadas em modo estacionário bidimensional. Na terceira, a menor, malha foi definido um ponto, nas proximidades da entrada do Porto de Sines, onde os resultados, i.e., H_s , T_p e θ_m , foram extraídos (Figura 4).

No primeiro dia da tempestade, os estados de agitação observados tiveram T_p entre 15 s e 17 s, e H_s entre 3 m e 7,55 m (o H_s máximo ocorreu às 18 horas). A situação mais frequente corresponde a H_s entre 6,0 m e 6,5 m. Quanto a θ_m , as incidências Noroeste representam a direção predominante das ondas. Para o 2º dia da tempestade Dora, as condições de agitação marítima foram menos severas. Foi obtido um H_s máximo de 6,94 m às 00h horas com um T_p de 15,09 s. Quanto ao θ_m predominante foi também o Noroeste.

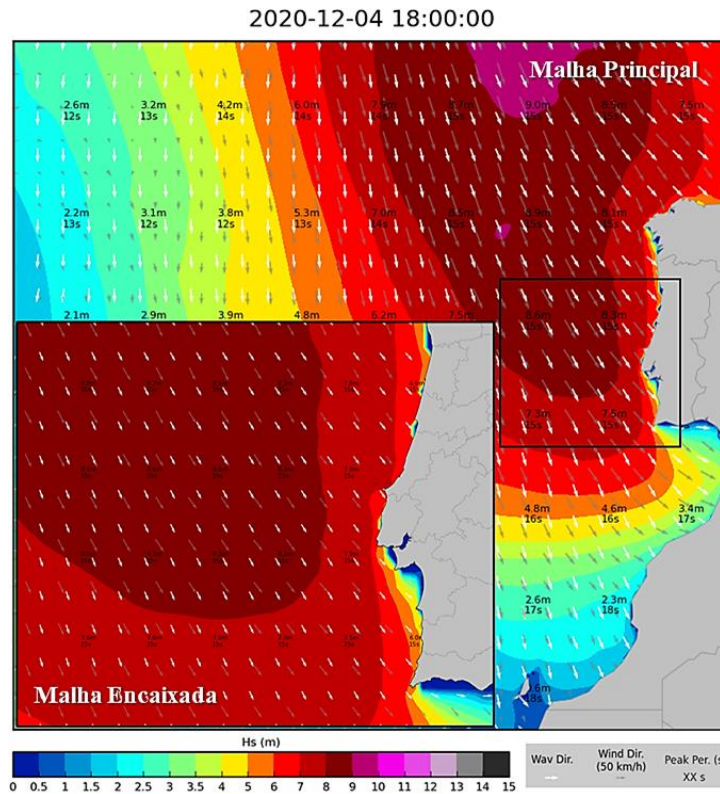


Figura 3. Resultados do modelo WAM ao longo do Porto de Sines (H_s , T_p e θ_m) para 4 de dezembro de 2020 às 18h.

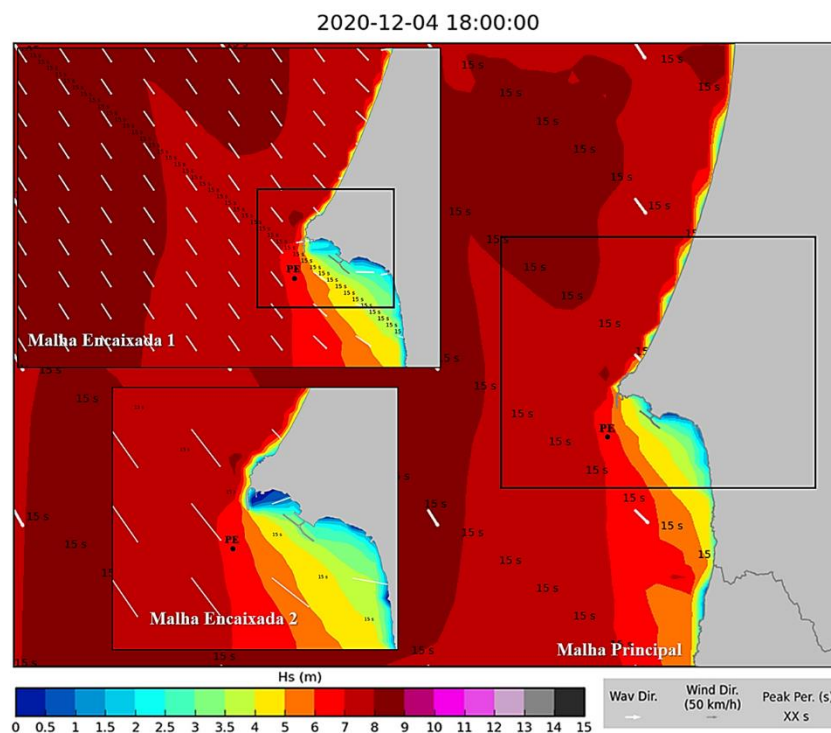


Figura 4. Resultados do modelo SWAN nas proximidades do Porto de Sines (H_s , T_p e θ_m) para 4 de dezembro de 2020 às 18h. PE é o ponto de transferência do SWAN para o DREAMS.

Com a aplicação do modelo DREAMS fez-se a transferência da agitação marítima para dentro do porto de Sines (Figura 5). Para fazer a modelação, foi utilizada uma malha de elementos finitos gerada pela GMALHA (Pinheiro *et al.*, 2008) para caracterizar a morfologia do porto de Sines. Além disso, foi caracterizado cada trecho da fronteira sólida do modelo através do coeficiente de absorção respetivo.

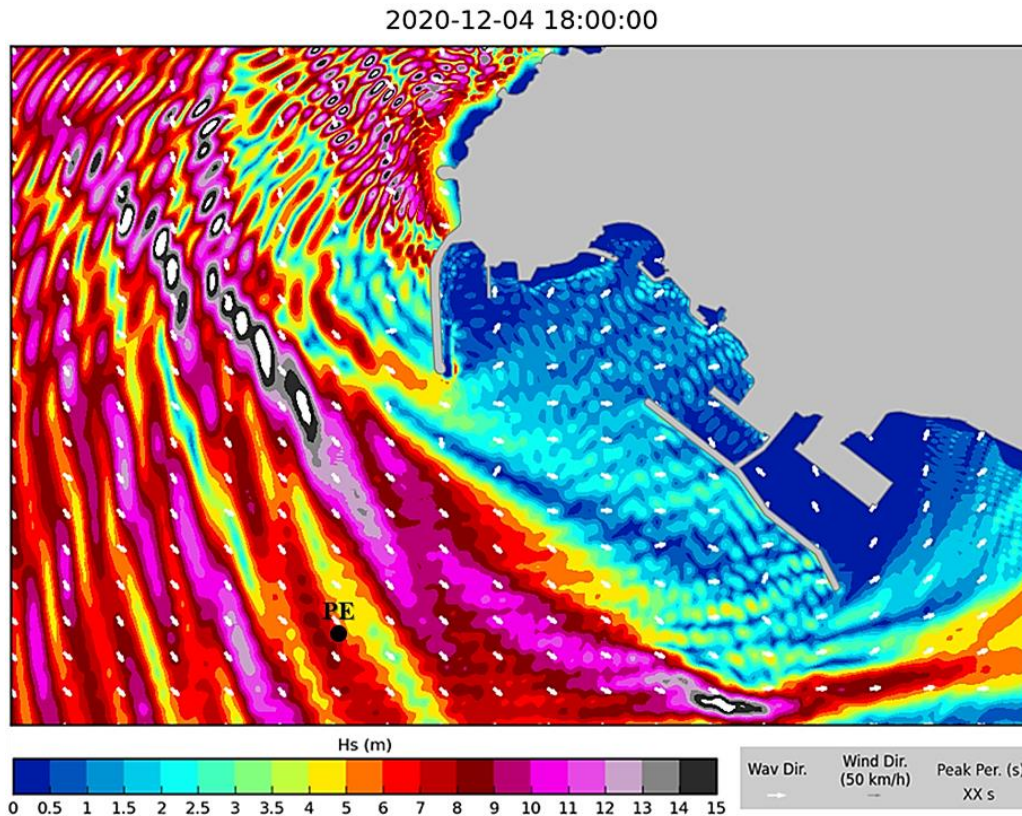


Figura 5. Resultados do modelo DREAMS dentro do Porto de Sines (H_s e θ_m) para 4 de dezembro de 2020 às 18h. PE é o ponto de transferência do SWAN para o DREAMS.

As ondas do mar aproximam-se do TGL com θ_m de sul a sudoeste e H_s que variam entre 0,1 m e 1,2 m. O pico foi registado às 21 horas do dia 4 dezembro, com $H_s = 1,2$ m, $T_p = 15$ s e $\theta_m = 210^\circ$.

O TMS, por sua vez, é afetado por ondas vindas do Oeste com H_s não superiores a 0,7 m. O pico ocorreu às 18 horas, com $H_s = 0,7$ m, $T_p = 15$ s e $\theta_m = 280^\circ$.

Finalmente, no terminal de contentores, TXXI, a agitação marítima incidente caracteriza-se por ondas de sul com H_s a variar entre 0,12 m e 0,84 m. O pico ocorreu às 3h do dia 4 dezembro, com $H_s = 0,8$ m, $T_p = 17$ s e $\theta_m = 174^\circ$.

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados nesta secção dizem respeito às forças exercidas no sistema de amarração dos navios simulados.

O modelo WAMIT foi aplicado para calcular os coeficientes hidrodinâmicos dos navios livres, nomeadamente os coeficientes de amortecimento e de massa adicionada, necessários para que o modelo BAS resolva a equação do movimento de um navio amarrado. Para este fim, foram

necessárias a distribuição da massa (inércias) dos navios e a discretização da geometria dos cascos submersos, em painéis planos retangulares ou triangulares, com o auxílio da ferramenta NPP – *Nautical Pre-Processor* (Santos, 1994).

As defensas não são alvo de estudo neste trabalho, porém foi necessário defini-las, uma vez que as forças nas amarras dependem da posição e das relações constitutivas das defensas. Foram todas posicionadas ao nível do plano de flutuação do navio e igualmente espaçadas pelo comprimento entre as perpendiculares dos mesmos. As relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos e defensas) dos três navios constam na Figura 6.

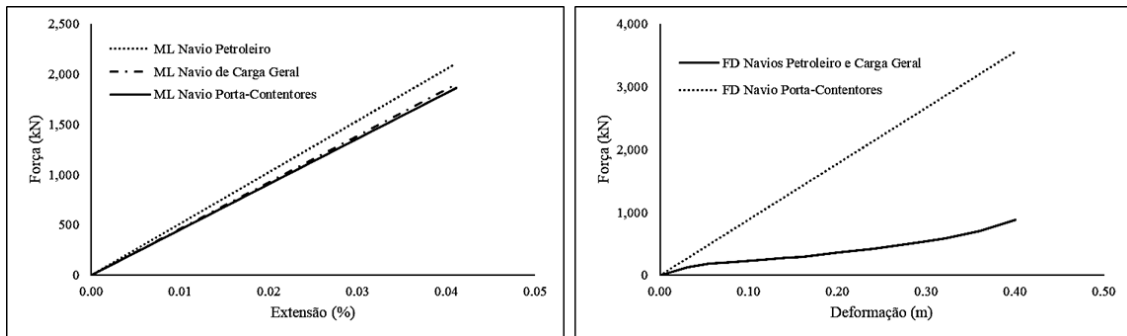


Figura 6. Relações constitutivas dos cabos de amarração (ML) e das defensas (FD).

Os cabos de amarração estão enumerados conforme a Figura 7 e, os esquemas foram selecionados e adaptados a cada caso de estudo, tendo em conta os cabeços de amarração disponíveis nos terminais e a posição dos mesmos. As coordenadas dos pontos de amarração dos navios aos terminais constam em LNEC (2022).

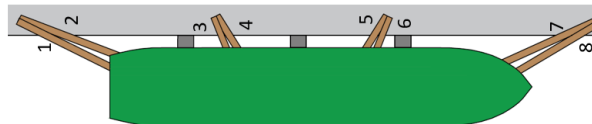


Figura 7. Enumeração dos cabos de amarração

Caso de Estudo 1: Petroleiro no Terminal de Granéis Líquidos

O navio petroleiro possui um comprimento total de 340 m, uma boca de 26.5 m e um calado de 22 m. O casco submerso foi discretizado com 1004 painéis, correspondendo a um volume de 321758.737 m³.

O TGL possui 6 pontos de amarração, sendo que 4 estão na estrutura do cais e os destinados aos cabos de popa e de proa dos navios estão no molhe Oeste do Porto de Sines. No modelo BAS foram definidos 8 cabos de amarração e 3 defensas.

Para este caso foram testadas as configurações dos esquemas 1, 3 e 4 (Figura 1) e os resultados constam no gráfico da Figura 8.

Não foram emitidos alertas relativos ao petroleiro atracado no terminal de granéis líquidos do Porto de Sines. Dado o seu elevado volume, não foram registados movimentos excessivos do navio e, conseqüentemente, as forças nos seus cabos de amarração não atingiram os limites máximos em nenhum dos esquemas de amarração testados.

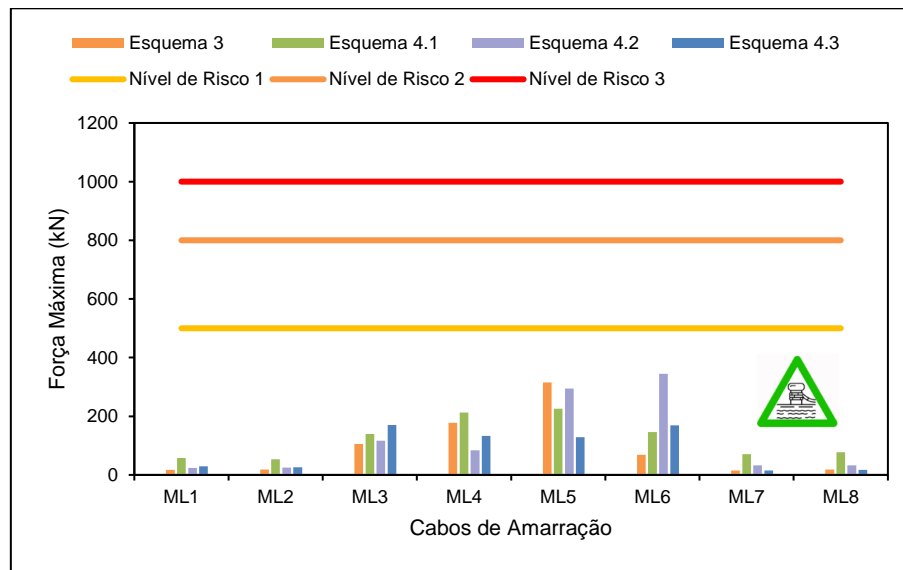


Figura 8. Forças nos cabos de amarração (ML) do navio petroleiro e respetivos níveis de perigo.

Neste caso todos os esquemas testados são soluções aceitáveis de amarração do navio petroleiro. Pode-se optar pelo esquema cuja força total nos cabos seja menor, ou seja, o esquema 4.3.

Caso de Estudo 2: Cargueiro Geral no Terminal Multiusos

O navio de carga geral possui um comprimento total de 220 m, uma boca de 30 m e um calado de 10.5 m. O casco submerso foi discretizado com 1992 painéis, correspondendo a um volume de 56113.867 m³.

O TMS possui 8 pontos de amarração igualmente espaçados, à exceção dos destinados aos cabos de popa e de proa dos navios, pois estes estão mais afastados. No modelo BAS foram definidos 8 cabos de amarração e 3 defensas.

Para este caso foram testadas as configurações dos esquemas 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 1) e os resultados são apresentados na Figura 9.

Foram emitidos alertas em todos os esquemas de amarração do navio de carga geral atracado no terminal multiusos do Porto de Sines. É o navio com mais testes realizados e por isso com uma grande variedade de resultados.

À exceção do esquema 2, em todos verifica-se que os cabos de amarração intermédios (ML3, ML4, ML5 e ML6) são os mais solicitados e estão associados ao nível de perigo 3. À exceção do esquema 4.1, os cabos de amarração da popa e da proa do navio são os menos solicitados, sendo que em alguns esquemas foram emitidos alertas amarelos, ou seja, nível de perigo 1.

Considerando apenas os esquemas em que as forças nos cabos de amarração não são os máximos estimados, as melhores soluções de amarração do navio de carga geral podem ser o esquema 1, o esquema 3 ou o esquema 4.3. Porém, foram emitidos alertas vermelhos aos esquemas 1 e 3.

Assim, a solução mais segura de amarração para o cargueiro geral, face a tempestade Dora, é o esquema 4.3 (semelhante ao do navio petroleiro).

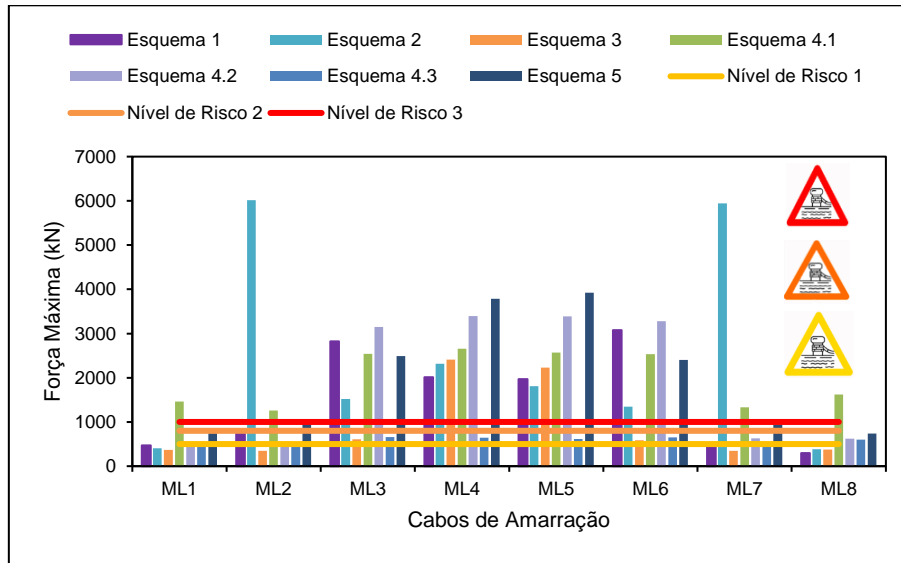


Figura 9. Forças nos cabos de amarração (ML) do navio de carga geral e respetivos níveis de perigo.

Caso de Estudo 3: Porta-Contentores no Terminal XXI

O navio porta-contentores possui um comprimento total de 120 m, uma boca de 19 m e um calado de 8 m. O casco submerso foi discretizado com 3464 painéis, correspondendo a um volume de 12,717 m³.

O Terminal XXI possui 8 pontos de amarração igualmente espaçados, à exceção dos destinados aos cabos de popa e de proa dos navios, pois estes estão mais afastados. Para o modelo BAS do navio porta-contentores, foram definidos um total de 10 cabos de amarração e 5 defensas.

Para este caso foram testadas as configurações dos esquemas 6 e 7 (Figura 1), e do esquema 7.1, que corresponde ao esquema 7 com aplicação de uma pré-tensão de 100 kN nos cabos ML4, ML5, ML 6 e ML7. Os resultados são apresentados na Figura 10.

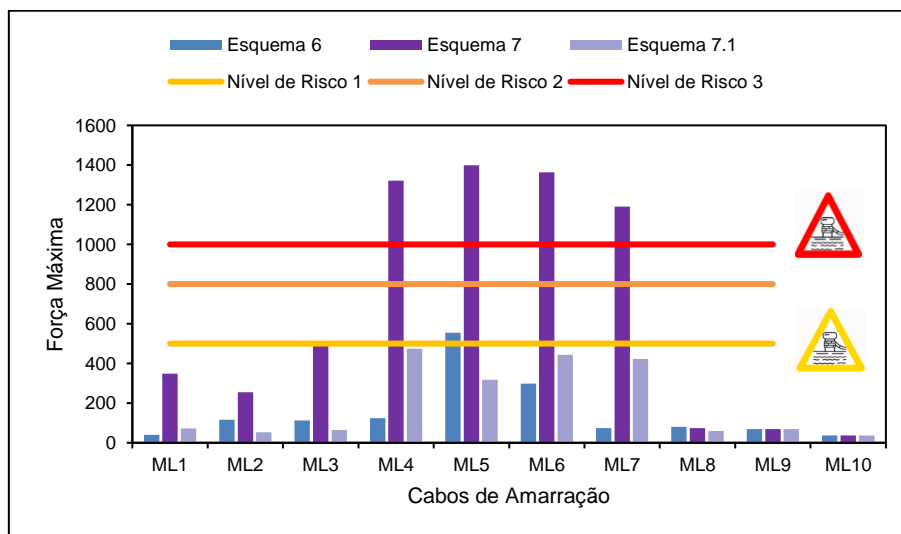


Figura 10. Forças nos cabos de amarração (ML) do navio porta-contentores e respetivos níveis de perigo.



Foi emitido 1 alerta amarelo (nível de perigo 2) ao cabo de amarração ML5 do esquema 6. Quanto ao esquema 7, foram emitidos 4 alertas vermelhos (nível de perigo 3) aos cabos de amarração intermédios (ML4, ML5, ML6 e ML7). Relativamente ao esquema 7.1 não foram emitidos quaisquer alertas.

A aplicação da pré-tensão de 100 kN nos cabos ML4, ML5, ML6 e ML7 do esquema 7, fez com que o esquema de amarração 7.1 se tornasse na solução ótima para o navio porta-contentores, pois reduziu a força exercida em todos os cabos de amarração do navio.

Conclusões

O sistema SAFEPORT permite prever, com alguns dias de antecedência, a agitação marítima num dado porto e as consequências dessa agitação marítima para os navios que se encontram acostados e amarrados no seu interior. Se as consequências corresponderem a situações de emergência, o sistema alertará as autoridades responsáveis para que estas atempadamente implementem medidas de mitigação a fim de evitar acidentes e reduzir perdas económicas.

Para além de um sistema de segurança, neste trabalho o sistema SAFEPORT provou ser também um sistema de apoio à decisão e uma ferramenta útil na monitorização e otimização de operações marítimas em ambiente portuário como, por exemplo, sistemas de otimização de definição de esquemas de amarração.

Concluiu-se com esta investigação que a configuração dos cabos de amarração tem grande influência no comportamento, e consequentemente na segurança, dos navios amarrados dentro dos portos. A escolha do esquema de amarração correto diminui substancialmente os riscos de rotura de cabos e, por conseguinte, aumenta o nível de segurança dentro do porto.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao projeto BLUESAFEPORT (ref: FA_04_2017_016), à Infra-estrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD) por conceder acesso à infra-estrutura digital de apoio à investigação e à Administração dos Portos de Sines e Algarve.

Referências Bibliográficas

- Booij, N.R., Holthuijsen, L.H. e Ris, R.C. (1996). The SWAN wave model for shallow water. ICCE'96: 668-676. Orlando.
- Flater, D. (1998). XTide Manual: Harmonic Tide Clock and Tide Predictor. Technical Report, USA. URL: <https://flaterco.com/xtide>
- 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.
- Korsemeier, F.T., Lee, C.H., Newman, J.N. e Sclavounos, P.D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms. Proc. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: 1-14. Texas: Houston.
- LNEC (2022). BlueSafePort - Sistema de Segurança para Navios em Manobra e Amarrados em Portos. Relatório do Projeto FA_04_2017_016, Lisboa (Em preparação).
- Mynett, A.E., Keunig, P.J. e Vis, F.C. (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbour 23-25: Cranfield: BHRA. The Fluid Engineering Centre, April 1985. England: Birmingham.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 119(6): 618-638.
- Persson, A. (2001). User Guide to ECMWF Forecast Products. Meteorological Bulletin M3.2.



ECMWF: 115.

Pinheiro, L. V.; Fortes, C. J. e 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) 24(4).

Reynolds, C. A., McLay, J. G., Goerss, J. S., Serra, E. A., Hodyss, D. & Sampson, C. R. (2011). Impact of Resolution and Design on the U.S. Navy Global Ensemble Performance in the Tropics, Monthly Weather Review 139: 2145-2155.

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

WAMDI Group (1988). The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model. J. Physical Oceanography (18): 1775-1810.