



21

*Territórios de risco: processos,
vulnerabilidades e segurança*

AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE GALGAMENTOS NÃO ADMISSÍVEIS NO POSTO 2 DO
TERMINAL DE GRANÉIS LÍQUIDOS DO PORTO DE SINES*

95

Maria Teresa Reis
Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas, LNEC
treis@lnecc.pt

João Alfredo Santos
Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
jasantos@dec.isel.pt

Diogo Ruben Neves
Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas, LNEC
dneves@lnecc.pt

Rui Capitão
Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas, LNEC
rcapitao@lnecc.pt

Conceição Juana Fortes
Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas, LNEC
jfortes@lnecc.pt

RESUMO

Descrevem-se os procedimentos para avaliar o caudal médio galgado sobre um trecho de um quebra-mar de taludes a partir das características da agitação marítima incidente no mesmo trecho. Apresenta-se uma metodologia para estimação de valores extremos daquele caudal, partindo das séries temporais da mesma variável, e ilustram-se esses procedimentos num trecho do molhe oeste do porto de Sines que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos da ação da agitação marítima. Este regime de extremos do caudal médio galgado é fundamental para a avaliação do risco de ocorrência de galgamentos não admissíveis no posto 2.

Palavras-chave: Galgamento, redes neuronais, caudais médios extremos, Porto de Sines.

RESUMEN

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de rebase no admisible en el puesto 2 de la terminal de graneles líquidos del puerto de SINES - Se describen los procedimientos para evaluar el flujo medio de caudal de rebase en un tramo de un rompeolas a partir de las características de la agitación marítima incidente en el mismo tramo. Se presenta una metodología para estimar los valores extremos de la serie temporal de la misma variable y se ilustra la aplicación de los procedimientos descritos en el tramo del muelle oeste del puerto de Sines, que protege el puesto 2 del terminal de graneles líquidos de la acción de la agitación marítima. Este régimen de extremos del flujo medio de caudal de rebase es fundamental para la evaluación del riesgo de ocurrencia de rebases inadmisibles en el puesto 2.

Palabras clave: Rebase, redes neuronales, caudales medios extremos, Puerto de Sines.

RÉSUMÉ

Évaluation de la probabilité d'occurrence de débordements non admissibles au poste 2 du terminal de vrac liquide du port de Sines - Les procédures d'évaluation du débit moyen de débordement sur un tronçon d'un brise-lames de type talus sont décrites à partir des caractéristiques de l'agitation maritime incidente sur ce tronçon. Une méthode pour estimer les valeurs extrêmes de ce débordement à partir des séries temporelles de cette même variable est présentée ainsi que l'application des procédures décrites au tronçon de la jetée ouest du port de Sines qui protège le poste 2 du terminal de vrac liquide de l'action des vagues. Ce régime des extrêmes du débit moyen de débordement est fondamental pour évaluer le risque d'occurrence de débordement non-admissible au poste 2.

Mots-clé: Débordement, réseaux de neurones, débits moyens extrêmes, Port de Sines.

ABSTRACT

Evaluation of the occurrence probability of non-admissible wave overtopping discharges at berth 2 of the port of Sines liquid bulk terminal - The procedures to evaluate the mean wave overtopping discharge over a stretch of a rubble-mound breakwater from the characteristics of the incident sea waves are presented. A method is also presented for estimating extreme values of such discharge from the time series of the same variable. The application of the described procedures is illustrated with the evaluation of the extreme regime for the mean overtopping discharge over the stretch of the western breakwater that protects berth 2 of the port of Sines liquid bulk terminal from wave action. Such extreme regime for the mean wave overtopping discharge is fundamental for assessing the risk associated to non-admissible overtopping at berth 2.

Keywords: Wave overtopping, neuronal networks, extreme mean discharges, Port of Sines.

* O texto deste artigo corresponde à comunicação apresentada ao VII Encontro Nacional de Riscos e I Fórum ISCIA, tendo sido submetido em 30-10-2013, sujeito a revisão por pares a 20-02-2014 e aceite para publicação em 07-05-2014.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 21, 2014, © Riscos, ISBN: 0872- 8941.

Introdução

À agitação marítima que chega à costa ou a zonas portuárias estão associados múltiplos acontecimentos perigosos, não só para os utilizadores dessas zonas e para as atividades que aí se desenvolvem, mas também para as estruturas de proteção costeira e portuária e para as infraestruturas aí localizadas ou na sua vizinhança. Exemplos desses acontecimentos são a variação da posição da linha de costa, o encalhe ou mesmo o naufrágio de navios em manobra, o dano ou a ruína das estruturas de proteção e a inundação dessas zonas devido ao galgamento destas estruturas. Ao longo da costa portuguesa já ocorreram vários episódios de galgamentos que causaram danos relevantes (fig. 1): o galgamento do quebra-mar de proteção da Marina de Cascais, em outubro de 1999, que interrompeu parte das operações da marina; o galgamento do quebra-mar do Porto da Praia da Vitória, Açores, completamente destruído após a tempestade de dezembro de 2001; o galgamento do quebra-mar de proteção da Marina do Lugar de Baixo, destruído como consequência de tempestades ocorridas em 2005, pouco depois de terminada a sua construção; o galgamento do quebra-mar do Porto de Ponta Delgada, Açores, em setembro de 2011, onde ocorreram graves constrangimentos à atividade portuária, especialmente carga e descarga de mercadoria; o galgamento do paredão da frente urbana da Costa da Caparica, em janeiro de 2014, que levou à interdição da circulação de pessoas desde São João da Caparica até à Nova Praia, para além de avultados danos materiais; e o galgamento frequente do paredão Estoril-Cascais, que danifica o próprio paredão e afeta a sua utilização por pessoas e veículos.

Neste âmbito, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo a desenvolver uma metodologia para a avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos não admissíveis em estruturas costeiras e portuárias (D. SILVA *et al.*, 2012; D. NEVES *et al.*, 2012; T. ROCHA *et*

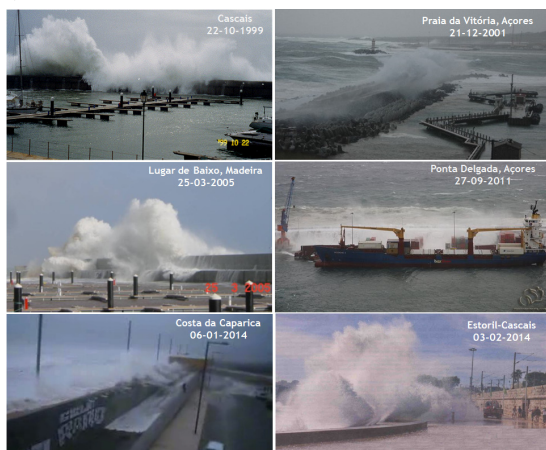


Fig. 1 - Exemplo de galgamentos em Portugal.

Fonte: elaboração própria a partir de imagens de arquivo do LNEC, do Jornal Público e do Jornal Notícias de Cascais.

al., 2013; P. POSEIRO *et al.*, 2013), que foi implementada na ferramenta informática HIDRALERTA (C. FORTES *et al.*, 2013), que é um upgrade do sistema GUIOMAR (D. NEVES *et al.*, 2009, 2010). Trata-se de um sistema integrado de apoio à decisão na gestão costeira e portuária que aproveita as potencialidades dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O primeiro passo desta metodologia é sempre a determinação da agitação marítima ao largo do local em estudo, seguida da aplicação, através do sistema HIDRALERTA, de modelos numéricos capazes de simular a evolução das características da mesma desde o largo até à costa ou interior de bacias abrigadas.

Depois, é necessário avaliar os efeitos da agitação marítima em termos de galgamento, normalmente caracterizado pelo caudal médio que transpõe a estrutura exposta à ação direta das ondas. Sendo os principais fins das estruturas marítimas a proteção e o abrigo, a existência de galgamentos pode levar à ocorrência, para além de danos na própria estrutura, de danos na instalação portuária protegida pela estrutura, de danos pessoais, de inundações e de outros prejuízos. Consoante a utilização da zona protegida pela estrutura, assim é estabelecido um valor limite para o caudal médio galgado, o que permite definir a ocorrência de galgamento não admissível.

Face ao caráter irregular da agitação marítima incidente nas estruturas, à diversidade das soluções construtivas e aos diferentes materiais empregues, a estimação do caudal médio galgado por unidade de comprimento de determinada estrutura marítima envolve um processo complexo que deve ser efetuado levando em conta as características da geometria da estrutura, do nível de maré e da agitação nela incidente, sendo por conseguinte comum a utilização de ferramentas empíricas (P. BESLEY, 1999; T. PULLEN *et al.*, 2007; M. REIS *et al.*, 2008; E. COEVELD *et al.*, 2005) baseadas em resultados de ensaios em modelo físico e/ou em medições em protótipo (M. REIS *et al.*, 2011) para esse efeito. Com tais ferramentas, é possível estimar a série temporal dos caudais médios galgados no trecho em estudo a partir da série temporal da agitação marítima incidente no mesmo trecho.

À semelhança do que se faz com a altura de onda ou o período de onda, também o caudal médio galgado, q , pode ser tratado como uma variável aleatória. Do tratamento estatístico de amostras constituídas a partir da série de caudais podem estabelecer-se os chamados regime geral observado, médios e de extremos para esta grandeza. Também, utilizando a teoria dos extremos, é possível definir a distribuição de probabilidade da variável aleatória q , o que permite o cálculo da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis, isto é, de ocorrência de valores de caudais médios galgados que ultrapassam o limiar de admissibilidade referido atrás. Assim, com base nessa probabilidade de ocorrência

e no valor do prejuízo associado aos galgamentos não admissíveis, pode avaliar-se o risco, isto é, o valor esperado do mesmo prejuízo, assumindo que aquele depende apenas do limiar estabelecido e não varia com o valor do caudal médio efetivamente galgado.

Neste artigo, apresenta-se uma metodologia para estimação de valores extremos do caudal médio galgado num trecho de um quebra-mar de taludes partindo de uma série temporal daquele caudal obtida das características da agitação incidente no mesmo trecho do quebra-mar. Trata-se de um ponto fundamental para a correta estimação do risco associado a galgamentos em zonas portuárias e costeiras. Assim, depois deste capítulo de introdução, apresentam-se os procedimentos numéricos para avaliação do caudal médio galgado num dado trecho de um quebra-mar de taludes. Começa-se por descrever a transferência das características da agitação marítima desde o largo (zona afastada da estrutura onde são conhecidas as características da agitação marítima) até um ponto frente ao trecho em estudo. Em seguida apresenta-se a ferramenta numérica para avaliação do caudal médio galgado e ilustra-se a aplicação dos procedimentos descritos à determinação do regime de extremos do caudal médio galgado no trecho do molhe oeste do porto de Sines que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos da ação da agitação marítima. O artigo termina com uma secção de conclusões.

Caraterização da agitação marítima incidente na estrutura

Para caraterizar os estados de agitação marítima incidentes no interior do porto, i.e., junto às estruturas portuárias para as quais se pretende estudar o galgamento, são considerados os seguintes passos (fig. 2):

- Caraterização dos estados de agitação marítima ao largo do porto (que pode ser efetuada com

base em séries temporais de dados de agitação marítima provenientes de uma boia ondógrafo ou em resultados de modelos de previsão da agitação marítima), em termos de altura de onda significativa, período médio e direção média;

- Cálculo da matriz de transferência das condições de agitação do largo para o interior do porto utilizando modelos numéricos de propagação de ondas, como os modelos SWAN (N. BOOIJ *et al.*, 1999) e DREAMS (C. FORTES, 2002);
- Caraterização dos estados de agitação marítima no interior do porto, através do uso do programa REGIMES (L. PINHEIRO *et al.*, 2006) e da matriz de transferência para transferir os dados do largo para os pontos localizados no interior do porto.

Em D. NEVES *et al.* (2010) apresenta-se uma descrição mais detalhada destes passos.

Resposta da estrutura em termos de galgamento

Ferramentas de cálculo

Embora os modelos numéricos tenham vindo a tornar-se uma ferramenta interessante para a avaliação de galgamentos, ainda não existe um modelo numérico capaz de, simultaneamente, produzir resultados rápidos, precisos e eficientes a nível computacional. Por essa razão, muitos dos procedimentos para avaliação do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento de uma estrutura marítima ainda se baseiam nos resultados de ensaios em modelo de escala reduzida ou em observações de protótipo.

Estão disponíveis formulações empíricas (P. BESLEY, 1999; T. PULLEN *et al.*, 2007) ou semiempíricas (M. REIS *et al.*, 2008), bem como modelos baseados em resultados de redes neuronais (E. COEVELD *et al.*, 2005). Enquanto as formulações empíricas ou semiempíricas consideram, de

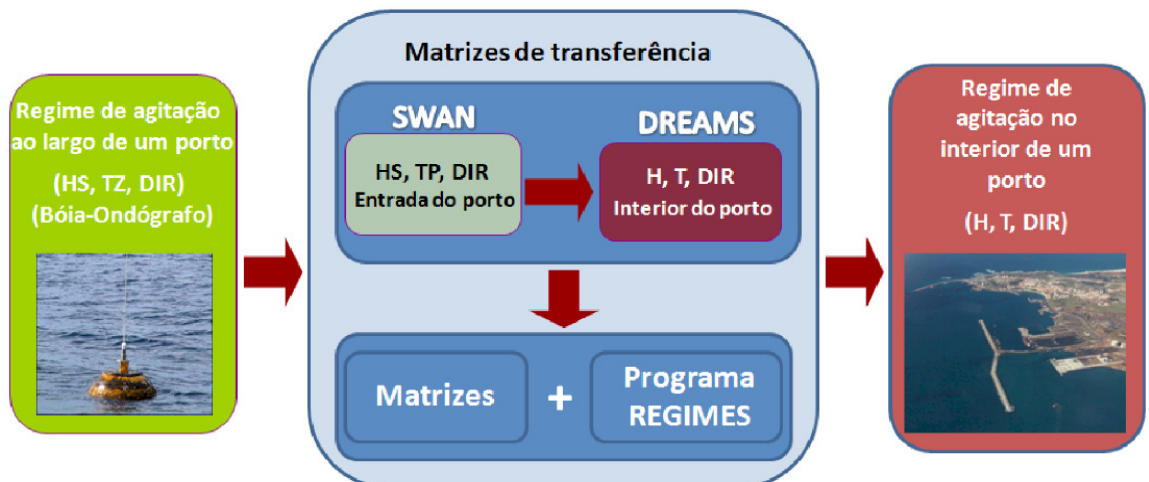


Fig. 2 - Procedimento para a caracterização da agitação marítima no interior de um porto.

Fonte: D. NEVES *et al.*, 2010.

forma explícita, alguns dos fenómenos condicionantes do galgamento, nas ferramentas baseadas em resultados de redes neuronais dispõe-se apenas de um procedimento de transformação de parâmetros de entrada do problema (por exemplo, as características geométricas do perfil da estrutura e os parâmetros definidores do estado de agitação incidente naquele perfil) na variável de saída (no caso, o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura).

Com efeito, a rede neuronal é uma ferramenta matemática de modelação e identificação de sistemas físicos para os quais é difícil perceber o papel das variáveis de entrada no comportamento dos mesmos. Partindo de uma analogia com o funcionamento do cérebro, a aplicação de tal ferramenta a um conjunto suficientemente extenso de “pares” (variáveis de entrada, variável de saída) permite encontrar as conexões entre as variáveis de entrada que originam o valor observado da variável de saída. Um subconjunto dos “pares” de dados é utilizado na chamada fase de “treino” da rede neuronal, em que são definidos os parâmetros e as ligações entre os “neurónios” da rede, que vão minimizar o erro entre o valor observado e o previsto com base na rede, enquanto os pares restantes são utilizados na fase de “teste” da rede onde se confirma a bondade das previsões fornecidas pela rede.

Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta NN_OVERTOPPING2 (E. COEVELD *et al.*, 2005) baseada em redes neuronais e desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH (E. COEVELD *et al.*, 2005; J. VAN DER MEER *et al.*, 2005; M. VAN GENT *et al.*, 2005). Esta ferramenta processa os resultados produzidos por 700 redes neuronais, fornecendo o valor médio do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, q , e outros parâmetros estatísticos daquela amostra de resultados.

As redes neuronais contidas naquela ferramenta são baseadas em cerca de 8.400 combinações de pares input-output provenientes de ensaios em modelo físico para diversas características da agitação e diferentes tipos de estruturas, tais como quebra-mares de talude, de estrutura mista e verticais. Os ensaios foram realizados em diferentes laboratórios da Europa, América e Japão.

Todas as redes neuronais utilizam os mesmos 15 parâmetros de entrada, que incluem informação sobre a agitação marítima e a geometria da estrutura (fig. 3), o que lhes confere maior flexibilidade do que as fórmulas empíricas/semiempíricas.

Para descrever a agitação marítima incidente na estrutura, são considerados três parâmetros: a altura de onda significativa espectral na base da estrutura (H_{m0}), o período médio de onda espectral na base da estrutura ($T_{m-1,0}$), e a direção de ataque da onda (β).

Para descrever a forma geométrica da estrutura, são considerados 12 parâmetros (fig. 3): a profundidade da água em frente à estrutura (h), a profundidade da água no pé do talude da estrutura (h_t), a largura do pé do talude (B_t), a rugosidade/permeabilidade do manto (γ_r), o declive da estrutura abaixo da berma ($\cot(\alpha_d)$), o declive da estrutura acima da berma ($\cot(\alpha_u)$), a largura da berma (B), a profundidade da água na berma (h_b), o declive da berma ($\tan(\alpha_b)$), o bordo livre da parte impermeável do coroamento da estrutura (R_c), o bordo livre do manto permeável da estrutura (A_c) e a largura do coroamento da estrutura (G_c).

Importa referir que tanto as tradicionais formulações empíricas como as redes neuronais são ferramentas empíricas, isto porque têm como base um conjunto alargado de testes em modelo físico, limitando assim o cálculo do galgamento à definição das características tanto das estruturas estudadas, como das condições de onda presentes nos ensaios em modelo físico.

Avaliação do regime de extremos do caudal médio galgado

De forma análoga ao que se faz habitualmente para a agitação marítima, determinou-se neste trabalho o regime de extremos de caudais médios (isto é, máximos anuais e máximos acima de nível pré-definido). Considera-se esta analogia lícita pelo facto de as amostras de valores de caudais produzidas poderem ser consideradas aleatórias, isto é, as correspondentes observações podem ser consideradas: i) independentes e ii) provenientes da mesma população (S. COLES, 2001).

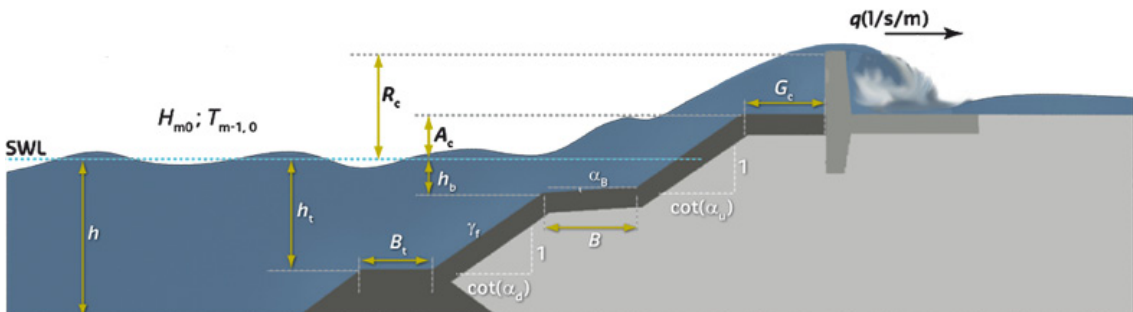


Fig. 3 - Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2.
Fonte: <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>.

A metodologia de estabelecimento do regime de extremos do caudal médio galgado consiste no cálculo de estimativas dos valores extremos dos caudais, para vários períodos de retorno e inicia-se com o estabelecimento de amostras apropriadas de valores, a partir dos dados disponíveis. As amostras têm de ser aleatórias.

Como se explica em M. CARVALHO (1983), o mais correto será, portanto, considerar que cada ano produz uma só observação, isto é, um único valor de caudal. Para garantir a independência das observações, é preferível ainda considerar os máximos observados em cada inverno marítimo, que se estende pelos meses de outubro a março e abarca, portanto, dois anos civis. Realmente, é mais plausível admitir a independência de máximos de invernos diferentes que apenas de anos diferentes. Neste último caso, seria possível, até, eventualmente, considerar dois valores máximos anuais, provenientes afinal dum mesmo acontecimento ocorrido de fins de dezembro a princípios de janeiro, o que seria incorreto, pois cortar-se-ia a unidade que constitui o inverno. Por este processo, garante-se a independência das observações e a constância das características das variáveis.

Este método de estabelecer as amostras é, à parte a consideração dos invernos marítimos, uma versão do chamado método dos máximos anuais, método AM (*Annual Maxima*). Neste trabalho, usa-se ainda o método do pico acima de limiar, método POT (*Peak-Over-Threshold*), que considera máximos acima de nível pré-definido (limiar).

Notar também o aspeto da validade das extrapolações. De um modo geral, só no caso em que o modelo da distribuição que se adota para descrever o comportamento de certa variável tiver sido deduzido de hipóteses verificáveis (M. CARVALHO, 1983), é que se podem fazer extrapolações para além do domínio dos valores observados. Como, no caso dos caudais médios em estudo, os modelos são adotados empiricamente, quaisquer extrapolações que se façam têm de ser encaradas com reservas, e isto mesmo quando o modelo empírico tenha sido estabelecido a partir de amostras suficientemente grandes. Ora, para o caso das distribuições assintóticas de extremos de alturas de onda, E. COPEIRO (1978) mostrou que, até cerca de 20 valores anuais, os ajustes das diferentes distribuições são todos razoáveis. O problema é que, para além dos 20 anos, as distribuições divergem bastante e, por isso, só com um período de observações significativamente superior a 20 anos se pode esperar uma definição razoável do modelo de distribuição a escolher. No caso presente, as amostras são de tamanho inferior a 20, pelo que as extrapolações obtidas devem ser vistas com as habituais reservas. Claramente, uma maior confiança surgirá quando houver realmente ainda mais anos de observações.

No estabelecimento da distribuição de probabilidade a usar para as extrapolações dos máximos anuais dos caudais médios, q_{\max} , são usadas distribuições assintóticas de máximos, dos tipos I (Gumbel), II (Fréchet) e III (Kimball). No entanto, a distribuição de Kimball, uma vez que é limitada à direita, tem pouco interesse para extrapolações, pelo que, em seu lugar, foi neste trabalho usada a distribuição de mínimos tipo III, conhecida por distribuição de Weibull. Estudaram-se também, para maior abrangência do estudo, as distribuições Exponencial e Log-normal. Assim, utilizando o programa ADAPTA (M. CARVALHO e R. CAPITÃO, 1990), consideraram-se as distribuições Gumbel, Fréchet, Weibull, Exponencial e Log-normal e a posição gráfica $i/(N+1)$, recomendada por E. GUMBEL (1953). Para a estimação dos parâmetros característicos das distribuições, aplicou-se o método dos mínimos quadrados.

Para distinguir a qualidade do ajuste dos diferentes modelos às amostras disponíveis de q_{\max} foram usados os seguintes parâmetros (A. FILIPE *et al.*, 1999), calculados com o programa ADAPTA, para as diferentes distribuições:

- o erro padrão das estimativas, e ;
- o coeficiente de correlação, r ;
- a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, d .

O ajuste será tanto melhor quanto menor for o valor de d , quanto mais próximo de 1 for o valor de r e quanto mais próximo de zero for o valor de e .

Para se poder escolher a distribuição ou distribuições a usar, usa-se um parâmetro, designado por parâmetro combinado, c , que contém informação (normalizada) de dois dos parâmetros acima referidos (erro padrão de estimativas e estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, visto que o coeficiente de correlação, r , e o erro padrão das estimativas, e , contém a mesma informação):

$$\square c = e_0 + d_0 \quad (1)$$

em que

$$\square e_0 = e / e_{\max}$$

$$\square d_0 = d / d_{\max}$$

sendo e_{\max} e d_{\max} os valores máximos de e e de d na amostra para as diferentes distribuições.

Valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis

Para se estabelecerem os valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis, levam-se em conta as consequências da ocorrência do galgamento (que dependem da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, do perfil da estrutura galgada e da necessidade de garantir a segurança de

peças e infraestruturas nessa zona). Com efeito, embora se mantenha o fenómeno observado, variando eventualmente de zona para zona o valor da variável relevante (caudal médio galgado) para definição de situação perigosa (ocorrência de galgamentos não admissíveis), o que é perigoso para uma dada zona pode não o ser para outra.

Do QUADRO I ao QUADRO IV apresentam-se os valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis por metro linear de estrutura, q , recomendados no manual de galgamentos (T. PULLEN *et al.*, 2007).

É de notar, em especial, a gama crítica de caudais médios por comprimento unitário da estrutura, q , que vai desde valores tão pequenos como 0.01 l/s/m (para veículos) até 200 l/s/m (para a estrutura galgada). Mais ainda, constata-se que, para garantir a segurança de pessoas que se encontram na vizinhança da estrutura marítima, T. PULLEN *et al.* (2007) referem ainda uma taxa crítica mais severa de $q = 0.03$ l/s/m, mas apenas para casos especiais de pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem visualizar a agitação incidente, que podem facilmente ficar perturbadas ou assustadas, que não estão vestidas de forma apropriada para se molharem e que se deslocam numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.

Estudo de caso

Caraterização geral

O porto de Sines, localizado na costa oeste de Portugal continental, é uma das principais entradas comerciais

e económicas da Península Ibérica, considerando-se um porto de extrema importância geográfica e estratégica para Portugal e Espanha (fig. 4).

Neste momento, o complexo do porto de Sines é composto por várias infraestruturas marítimas para abrigo e acostagem, tornando-o num dos poucos portos europeus de águas profundas (batimétricas até aproximadamente -50 m (ZH)) que permitem a acostagem de navios de grande porte. Os elevados valores anuais de movimentação de mercadorias (essencialmente granéis líquidos e sólidos) transformaram o porto de Sines no primeiro porto nacional em tonelagem anual movimentada.

O porto é abrigado por dois molhes principais, o oeste e o este, que protegem um conjunto de terminais (terminal XXI, terminal de gás natural liquefeito, terminal de granéis líquidos, terminal petroquímico e terminal multiusos), o porto de recreio, o porto de pesca e a praia Vasco da Gama. O molhe oeste é também o principal responsável pelo bom funcionamento do porto em termos de abrigo relativamente à agitação marítima, permitindo a regular navegação no interior do porto e o funcionamento correto de um porto com tais características.

Molhe Oeste: perspetiva histórica

A construção do molhe Oeste decorreu entre 1973 e 1978. Originalmente, o molhe tinha 2 km de comprimento, atingindo profundidades de 50 m e consistia num quebra-mar de taludes com um manto exterior protegido por duas camadas de dolos de 42 ton (de betão não armado),



Fig. 4 - Porto de Sines. Localização, molhes de proteção e postos de acostagem. Fonte: Elaboração própria a partir de imagem Google EarthTM e de fotografia aérea do Instituto Geográfico Português (IGP).

QUADRO I - Valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis para a estrutura marítima.

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (l/s/m)
Estruturas de Defesa com Talude no Tardoz	Sem danos se o coroamento e o tardoz estiverem bem protegidos	50 - 200
	Sem danos no coroamento e no tardoz de um dique de argila coberto por relva	1 - 10
	Sem danos no coroamento e no tardoz mesmo se não estiverem protegidos	0.1
Defesas Frontais	Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal	200
	Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas	50

Fonte: adaptado de T. PULLEN *et al.*, 2007.

101

QUADRO II - Valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis para pessoas.

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (l/s/m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar		1 - 10
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga ⁽¹⁾		0.1
⁽¹⁾ Estas condições não têm que se verificar todas em simultâneo.		

Fonte: adaptado de T. PULLEN *et al.*, 2007.

QUADRO III - Valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis para veículos.

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (l/s/m)
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura (pulsating overtopping), sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso		10 - 50 ⁽¹⁾
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade (impulsive overtopping) ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo		0.01 - 0.05 ⁽²⁾
⁽¹⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento efetivo obtido na via de circulação. ⁽²⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.		

Fonte: adaptado de T. PULLEN *et al.*, 2007.

QUADRO IV - Valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis para barcos, edifícios e equipamento localizados na zona abrigada pela estrutura.

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (l/s/m)
Danos significativos ou afundamento de grandes barcos		50
Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10 m da estrutura. Danos em grandes barcos		10 ⁽¹⁾
Danos em edifícios		1 ⁽²⁾
Danos em equipamento localizado a 5-10 m da estrutura		0.4 ⁽¹⁾
⁽¹⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima. ⁽²⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento efetivo obtido no edifício.		

Fonte: adaptado de T. PULLEN *et al.*, 2007.

dispostos num talude a 2(V):3(H). O molhe tinha duas funções principais: servir de suporte às condutas de petróleo e conferir ao porto o abrigo necessário das ondas do Oceano Atlântico. A superestrutura de betão incluía, na parte exterior, um deflector de ondas e, na parte interior, uma passagem para veículos e o local de passagem das condutas de petróleo que serviam os três postos de acostagem de petroleiros, construídos em caixotões ligados ao molhe.

O molhe foi originalmente projetado para uma altura de onda significativa, H_{sd} , de 11 m, com um período de retorno de 100 anos (Quadro V), baseada num ano de dados da boia de Sines e em sete anos de dados da boia da Figueira da Foz. Era a estrutura de maior envergadura do seu género exposta a um clima de agitação marítima tão severo.

A construção estava praticamente terminada quando, a 26 de fevereiro de 1978, ocorreram estragos muito avultados no molhe durante uma tempestade à qual muitos associaram um valor de H_S inferior a 11 m. Daí resultou a perda de aproximadamente dois terços do manto de proteção e danos muito severos em alguns locais da superestrutura. Em dezembro de 1978 e em fevereiro de 1979, tempestades causaram o colapso de quase a totalidade do manto exterior do molhe e da sua superestrutura (fig. 5).

Depois do colapso da estrutura foram conduzidas várias investigações sobre as suas eventuais causas. O colapso foi muito provavelmente consequência de uma combinação de fatores adversos, uns mais determinantes que outros, e levou à realização de trabalhos de reparação imediatamente após os acidentes de 1978/79 para proteger e reativar os Postos 2 e 3, trabalhos estes que ficaram conhecidos como Reparação de Emergência (fig. 6).

QUADRO V -Alturas de onda de projeto, H_{sd} - as datas referem-se ao período de construção .

Período de Retorno (anos)	Projeto Original & Reparação de Emergência (1973-81)	Reabilitação (1989-92)	Reabilitação Final (ainda não implementada)
50	10	13	11
100	11	14	12

Fonte: Port Sines Investigating Panel, 1982; M. DINIS & J. TOPPLER, 1993; H. LIGTERINGEN *et al.*, 1993a,b; F. ABECASIS & C. Pita, 1993; CONSULMAR, 2006, 2008).



Fig. 5 - Colapso do manto de proteção e da superestrutura do molhe oeste do Porto de Sines . Fonte: M. Reis *et al.*, 2011b.

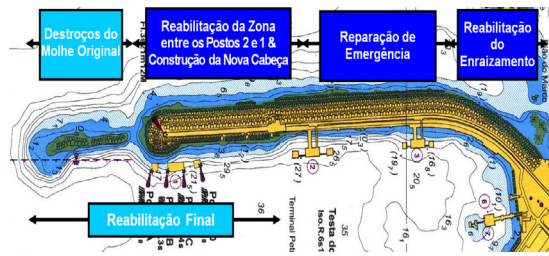


Fig. 6 - - Diferentes trabalhos de reabilitação do molhe Oeste do Porto de Sines. Fonte: M. REIS *et al.*, 2011b).

Entre 1989 e 1992, foram analisados e realizados vários trabalhos de reabilitação em praticamente toda a extensão da estrutura, exceto na parte final do molhe original, cujos destroços ainda hoje se podem observar (fig. 4, fig. 6).

Assim, atualmente, o molhe tem um comprimento de aproximadamente 1.6 km ao nível do coroamento e é protegido por cubos Antifer de 400 kN no enraizamento, de 900 kN no tronco e de 900 kN e 1050 kN na nova cabeça do molhe. Apenas dois dos três postos de acostagem existentes no intradorso do molhe oeste se encontram em funcionamento: o Posto 2 e o Posto 3 (fig. 4). O Posto 1 não está acessível, está sujeito à ação direta da agitação marítima e, com a sua fundação à batimétrica -38 m (ZH), está coberto até à cota -15 m (ZH) pelos materiais utilizados nas reabilitações entretanto realizadas. A zona localizada a sul do Posto 1, zona estável de destroços do molhe original, nunca foi reconstruída. Por solicitação da Administração do Porto de Sines, foram efetuados na última década estudos para a futura reabilitação final do molhe, com o objetivo principal de reativar o Posto 1 (para receção, carga e descarga de petroleiros), mas também de melhorar as condições de abrigo e a operacionalidade do porto (CONSULMAR, 2006, 2008).

As soluções propostas para esta futura reabilitação foram projetadas usando um regime de extremos da agitação marítima baseado em 18 anos de dados da boia ondógrafo direcional de Sines. A onda de projeto correspondente a um período de retorno de 100 anos foi definida por $H_{sd}=12$ m (QUADRO V) com períodos de pico até 20 s. Note-se que o regime de extremos usado para os trabalhos de reabilitação realizados entre 1989 e 1992 conduziu ao valor de $H_{sd}=14$ m para o mesmo período de retorno (QUADRO V), tendo sido baseado em 25 anos de previsões de um modelo de reconstituição da agitação marítima (DHL, 1981), quando ainda não havia dados suficientes da boia ondógrafo. Note-se que as diferenças entre os valores das várias alturas de onda de projeto apresentadas no QUADRO V se devem essencialmente às diferenças nos dados de base usados na definição dos respetivos regimes de extremos (M. REIS *et al.*, 2011b).

Caraterização geral do posto 2

A fig. 7 apresenta o trecho do molhe oeste que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto de Sines. O perfil deste trecho consiste num manto exterior de cubos Antifer de 900 kN, colocados em duas camadas, irregularmente abaixo do ZH e

regularmente acima do ZH. O coroamento é composto por uma berma com 20 m de largura à cota +18.0 m (ZH), encostada a uma superestrutura de betão com defletor de onda, com o coroamento à cota +19.0 m (ZH) e com plataformas às cotas +13.0 m (ZH) e +8.0 m (ZH). Este perfil foi dimensionado para uma altura de onda significativa de projeto de 14 m (QUADRO V) e um período de pico de 20 s.

Note-se que, neste porto, o nível de baixa-mar (BM) é 0.0 m (ZH) e o de preia-mar (PM) é +4.0 m (ZH).

A ocorrência de galgamentos no trecho do molhe que protege o posto 2 pode ter consequências para a integridade da própria estrutura, para as pessoas e veículos envolvidos nas operações portuárias, para as operações, para o equipamento existente (no qual aqui se incluem as condutas de petróleo bruto) e para os navios atracados nesse posto.

Como foi apresentado na secção relativa aos valores críticos dos caudais médios galgados admissíveis, estes valores podem ser definidos, de forma preliminar, a partir das tabelas apresentadas em T. PULLEN *et al.* (2007).

Atendendo ao exposto, obtém-se como valores limites do caudal médio por metro linear do coroamento da estrutura os indicados no QUADRO VI.

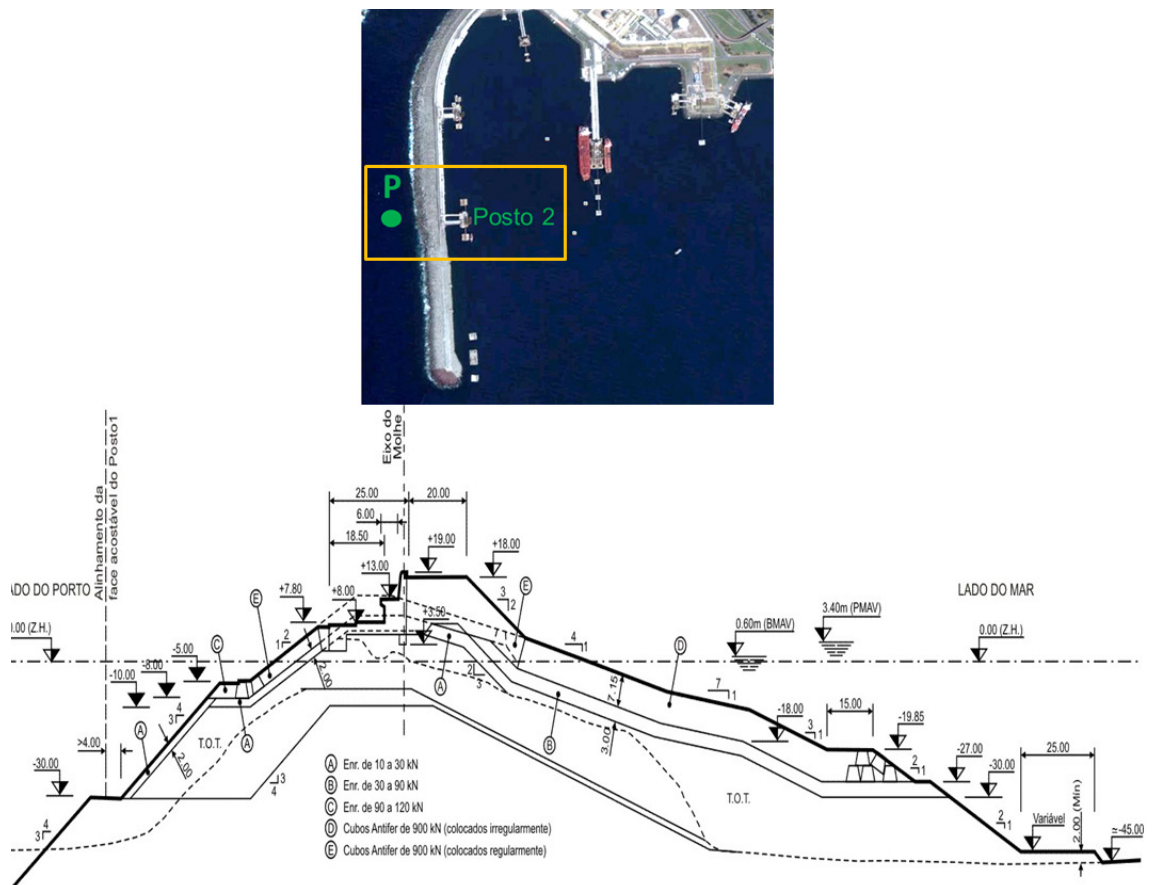


Fig. 7 - Trecho do molhe oeste que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto de Sines.

QUADRO VI - Valores limites do caudal médio por metro linear do coroamento da estrutura para o posto 2 do molhe oeste do porto de Sines considerando as eventuais consequências para a estrutura, os veículos, os navios, as pessoas e o equipamento.

	Estrutura	Veículos	Navios	Pessoas	Equipamento
Valores Limites	Classificando esta como uma defesa frontal e adotando o valor mais baixo de caudal admissível: 200 l/s/m	Considerando que a circulação se faz a baixa velocidade: 50 l/s/m	Devido à elevada importância da segurança dos navios atracados: 50 l/s/m	Assumindo que os utilizadores são trabalhadores treinados, com equipamento e calçado adequado, com percepção de que se podem molhar: 1 l/s/m	Condutas de petróleo bruto a 5-10m da estrutura galgada: 0.4 l/s/m

Fonte: adaptado de T. PULLEN *et al.*, 2007.

Uma vez que se pretende avaliar a probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis no posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto e como esses galgamentos são causados pela agitação marítima, apresenta-se, seguidamente, a caracterização da agitação marítima ao largo do porto e no ponto P, que se localiza em frente ao trecho do molhe oeste que protege o posto 2 (fig. 7), bem como a resposta à ação das ondas, em termos de galgamento, do trecho do molhe selecionado.

Cálculo do regime de agitação marítima em frente ao posto 2

Introdução

Para a caracterização da agitação marítima no local em estudo, recorreu-se aos dados da boia ondógrafo, designada por “Sines 1D”, localizada ao largo do porto de Sines (37°55’N e 08°55’W). O conjunto de dados utilizados perfaz um total de 32 807 registos obtidos entre maio de 1988 e dezembro de 2002 (L. PINHEIRO *et al.*, 2004). Apesar de esta série de aproximadamente 15 anos de dados ser algo limitada para os objetivos deste estudo, achou-se mais fiável a utilização dos dados disponíveis da boia localizada em frente ao porto do que o recurso a modelos de previsão da agitação marítima que, apesar de permitirem séries longas de previsões, também têm as suas limitações.

Estes valores foram transferidos para frente do trecho do molhe oeste que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos, ponto P, a que corresponde a batimétrica -40 m (ZH), com recurso ao modelo numérico SWAN (N. BOOIJ *et al.*, 1999), usado para a propagação e a deformação da agitação marítima.

O tempo de cálculo necessário para executar este modelo é um fator limitativo (cada simulação com o modelo SWAN demora cerca de 5 minutos), pelo que para a totalidade dos 32 807 registos seriam necessários vários meses para efetuar todos os cálculos. Por isso, optou-se pelo uso de uma matriz de transferência largo-ponto P (L. PINHEIRO *et al.*, 2004), isto é, uma matriz que contém as características da agitação marítima (altura significativa, período de pico e direção média) no ponto P para uma variação sistemática das mesmas características ao largo.

Uma vez conhecida esta matriz de transferência, para cada conjunto de características da agitação marítima ao largo (HS, TZ, DIR) obtido num dado instante, o programa REGIMES procede a uma interpolação tridimensional simples utilizando a matriz de transferência e fornece a previsão das características da agitação marítima nesse ponto.

Tal implica a simulação *a priori* de um vasto leque de condições de agitação que cubra de forma adequada as combinações possíveis das três variáveis relevantes. Este método, para além de reduzir drasticamente o tempo de cálculo, permitindo simulações quase instantâneas, tem ainda a vantagem de tornar muito mais simples o processo de transposição das características da agitação marítima do largo para o ponto de interesse, consistindo este de apenas uma interpolação relativa à propagação já realizada pelo modelo SWAN.

Desta forma, seguindo a metodologia descrita anteriormente, após o cálculo da matriz de transferência para o modelo SWAN e através da aplicação do programa REGIMES, é obtido o regime de agitação no ponto P. Assim, os passos que definem o procedimento para o caso de estudo considerado são (fig. 2):

- Definição do regime de agitação marítima ao largo do porto (i.e. na boia ondógrafo “Sines 1D”);
- Cálculo da matriz de transferência largo-ponto P, utilizando o modelo SWAN;
- Uso do programa REGIMES e da matriz de transferência para transferir os dados desde o largo (boia ondógrafo) até ao ponto P;
- Definição do regime de agitação marítima no ponto P.

Seguidamente, são apresentadas as condições para as quais o modelo SWAN foi aplicado, a sua matriz de transferência e o regime de agitação no ponto P.

Regime de agitação ao largo

A fig. 8 resume o regime geral observado na boia ondógrafo de Sines baseado no total de 32 807 registos obtidos entre maio de 1988 e dezembro de 2002.

O QUADRO VII apresenta alguns valores estatísticos deste regime: máximos, médias, mínimos, desvios padrões e gamas mais frequentes dos parâmetros de altura significativa (HS), período médio (TZ), período de pico

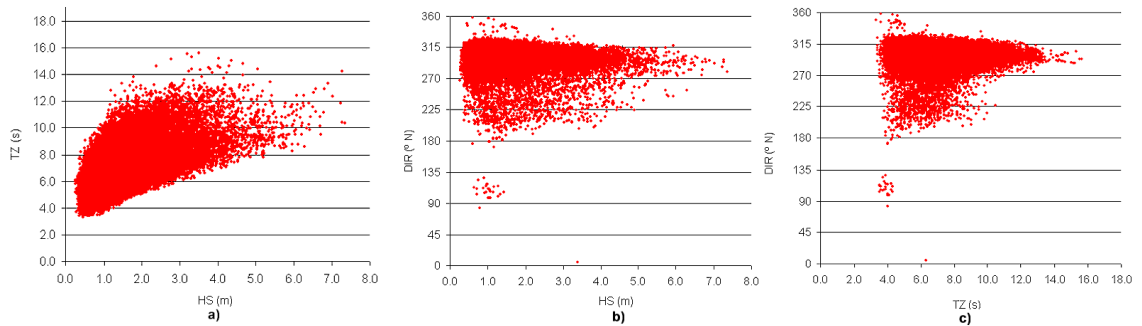


Fig. 8 - Regime geral observado. Relações HS-TZ, HS-DIR e TZ-DIR dos registos na boia ondógrafo de Sines (maio-1988 a dezembro-2002).

QUADRO VII - Valores máximos, médios, mínimos, desvios padrões e gamas mais frequentes de HS, TZ, TP e DIR da boia ondógrafo de Sines (maio-1988 a dezembro-2002).

Parâmetros Estatísticos	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais Frequente
HS (m)	7.35	1.60	0.27	0.90	[1.0 - 2.0] (48.05%)
TZ (s)	15.6	7.0	3.3	1.8	[5.0 - 6.0] (23.37%)
TP (s)	19.8	8.8	4.2	2.3	[6.0 - 7.0] (17.78%)
DIR (°)	358	299	5	18	[300 - 310] (32.68%)

(TP - transformado de TZ, onde $TP = 1.27 \cdot TZ$) e direção média (DIR) das ondas.

Com base no QUADRO VII e na fig. 8, verifica-se que, na boia de Sines: i) as alturas de onda significativas variam entre 0.27 m e 7.35 m, sendo o intervalo de 1.0 m a 2.0 m aquele que regista os valores mais frequentes (48.05%); ii) os períodos médios apresentam valores entre 3.3 s e 15.6 s, sendo os valores no intervalo de 5.0 s a 6.0 s os mais frequentes (23.37%); iii) os períodos de pico apresentam valores entre 4.2 s e 19.8 s, sendo os valores no intervalo de 6.0 s a 7.0 s os mais frequentes (17.78%); e iv) os valores representativos das direções médias de onda apresentam valores entre 5° e 358°, sendo as direções mais frequentes compreendidas entre 300° e 310° (32.68%), constatando-se uma grande, quase total, predominância de direções entre Oeste e Noroeste.

Matriz de transferência SWAN

A fig. 9 mostra a batimetria e o domínio de cálculo utilizados para efetuar os cálculos com o modelo SWAN (versão 40.72AB). A batimetria foi construída a partir de dados de batimetria produzidos pelo Instituto Hidrográfico, nomeadamente das cartas PT324204 (dezembro 2005), PT32205 (dezembro 2005) e PT426408 (março 1995).

Para o modelo SWAN foram definidas 2 malhas computacionais, tendo a malha principal uma dimensão de 8 km por 8 km, cobrindo todo o domínio de cálculo com uma resolução de 80 m, e uma segunda malha encaixada na malha principal com uma dimensão de 5 km por 5 km e resolução de 40 m (fig. 9). As malhas

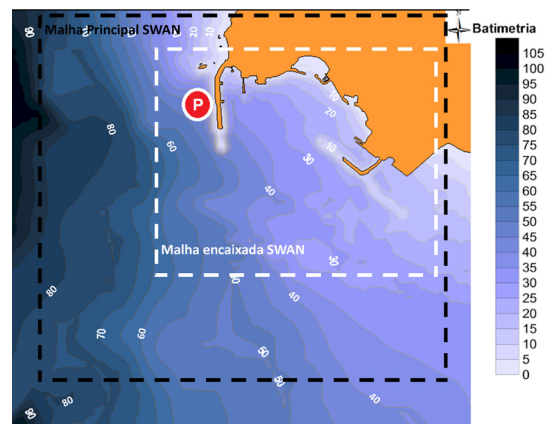


Fig. 9 - Batimetria e domínio computacional do SWAN com o ponto P de extração de resultados.

computacionais foram inteiramente construídas através do sistema HIDRALERTA.

Para definir a matriz de transferência das condições de agitação do largo (boia ondógrafo) para o ponto P, o modelo SWAN foi executado 2 906 vezes, uma para cada condição de agitação ao largo, resultante da combinação de: i) 9 valores da altura significativa, de 1 m a 9 m, com intervalos de 1 m; ii) 17 valores do período de pico, de 4 s a 20 s, com intervalos de 1 s (em que os períodos de pico TP foram obtidos assumindo um espectro de JONSWAP e $TP = 1.27 \cdot TZ$); e iii) 19 valores da direção da onda, de 180° a 360°, com intervalos de 10°. Para cada trio de valores (HS, TP, DIR), a agitação incidente na fronteira do domínio de cálculo do modelo SWAN (isto é, ao largo) foi definida através de um espectro bidimensional, produto de um espectro em frequência do tipo JONSWAP, com fator de pico $\gamma = 3.3$ e de uma função de dispersão direcional cosseno, de potência 20. No cálculo do

espectro da agitação, ao longo do domínio, impôs-se uma discretização em frequência com 23 intervalos, de 0.04 Hz a 1 Hz, e uma discretização em direção com 180 intervalos, de 0° a 360°.

Os cálculos foram efetuados com o modelo SWAN em regime estacionário e consideraram-se os fenómenos de atrito de fundo, difração, empolamento, rebentação devida à influência do fundo e à declividade da onda, e efeito da interação entre triades de ondas (*triad wave-wave interactions*). Não se consideraram os fenómenos devidos à presença do vento (dada a pequena extensão do domínio) e das correntes (por falta de informação).

Regime de agitação no ponto P

A aplicação do programa REGIMES aos dados de agitação da boia de Sines, conjuntamente com a matriz de transferência atrás determinada, permitiu a transferência dos 32 807 registos da boia para o ponto P e aí estabelecer o respetivo regime geral de agitação.

A fig. 10 apresenta a série temporal das alturas significativas da agitação marítima estimadas para o ponto P, obtida com base nos dados de agitação medidos na boia ondógrafo no período entre maio de 1988 e dezembro de 2002, enquanto a fig. 11 mostra, para o mesmo ponto P, o histograma conjunto HS-DIR, os respetivos histogramas marginais e a rosa de direções.

No QUADRO VIII indicam-se os valores dos parâmetros estatísticos (máximo, média, mínimo, desvio-padrão e gama mais frequente) do regime geral de agitação marítima no ponto P.

Os resultados obtidos indicam que, em termos de altura significativa, a média praticamente não se altera entre a boia e o ponto P, apesar de o valor máximo aumentar de 7.35 m para 11.09 m e de o valor mínimo diminuir de 0.27 m para 0.07 m. Os valores dos períodos TP também não sofrem alterações significativas, apesar de a gama mais frequente passar de [6.0 - 7.0] (17.78%), na boia, para [9.0 - 10.0] (22.27%), no ponto P. Em relação às direções da onda, como seria de esperar, junto ao molhe oeste, ponto P, não há variação significativa da direção da onda face à direção da onda na boia.

Como pode observar-se no QUADRO VIII, os valores máximos de altura significativa (11.09 m) e do período de pico (18.9 s) obtidos para as características da agitação marítima no ponto P são inferiores aos considerados anteriormente nas várias reabilitações do molhe oeste (QUADRO V). Contudo, importa referir que aqueles valores dizem respeito a um período de retorno de 100 anos e foram obtidos do ajuste de distribuições de extremos, enquanto os valores do QUADRO VIII resultam

da transferência de dados efetivamente medidos numa boia ondógrafo, embora num período mais curto (cerca de 15 anos).

Cálculo dos galgamentos

Série temporal

Para o cálculo dos galgamentos, utilizou-se a ferramenta NN_OVERTOPPING2. O trecho em estudo do molhe oeste do porto de Sines tem as características geométricas indicadas no QUADRO IX. Neste trabalho, os caudais médios de galgamento, q , foram calculados assumindo o nível de maré de +2.0 m (ZH). Em trabalho futuro, um dos aspetos a ter em atenção é a influência da variação do nível de maré nos valores do caudal médio galgado.

Para analisar os resultados de galgamento, considerou-se a variação de q ao longo de aproximadamente 15 anos (1988 a 2002) e, uma vez que q é fortemente dependente dos valores de HS e $T_{m-1,0}$, considerou-se também a correspondente variação do parâmetro $gHST_{m-1,0}$ (sendo g a aceleração da gravidade), muitas vezes utilizado para o cálculo de caudais adimensionais (M. REIS, 1998).

Na fig. 12 apresentam-se os resultados obtidos. Recorde-se que o nível de maré foi considerado constante ao longo dos anos, o que compromete a fidelidade daqueles resultados obtidos, embora não ponha em causa a ilustração da análise que se pretende realizar neste trabalho.

A série temporal dos caudais médios galgados mostra que as probabilidades de ocorrência de valores iguais ou superiores aos limites definidos no QUADRO VI são as seguintes:

- Estrutura ($q \geq 200$ l/s/m): 0.00%;
- Veículos e navios ($q \geq 50$ l/s/m): 0.00%;
- Pessoas ($q \geq 1$ l/s/m): 0.01%;
- Equipamento ($q \geq 0.4$ l/s/m): 0.18%.

Assim, durante a ocorrência de eventos que põem em causa a segurança das pessoas e a integridade do equipamento, poderia haver a necessidade de evacuar esta zona do molhe e de garantir a inatividade temporária do equipamento para reparação.

Regime de extremos

A partir dos conjuntos de valores tri-horários da série temporal dos caudais médios galgados, q , no trecho do molhe em frente ao ponto P, extraíram-se os máximos de q , q_{max} , por inverno marítimo, considerados independentes, referentes aos 15 anos civis, de 1988 a 2003. Foi, assim, construída a amostra SNS_AM de 15 valores extremos, que se indica na última coluna do QUADRO X, considerando todos os dados e usando o método AM (*Annual Maxima*), referido atrás.

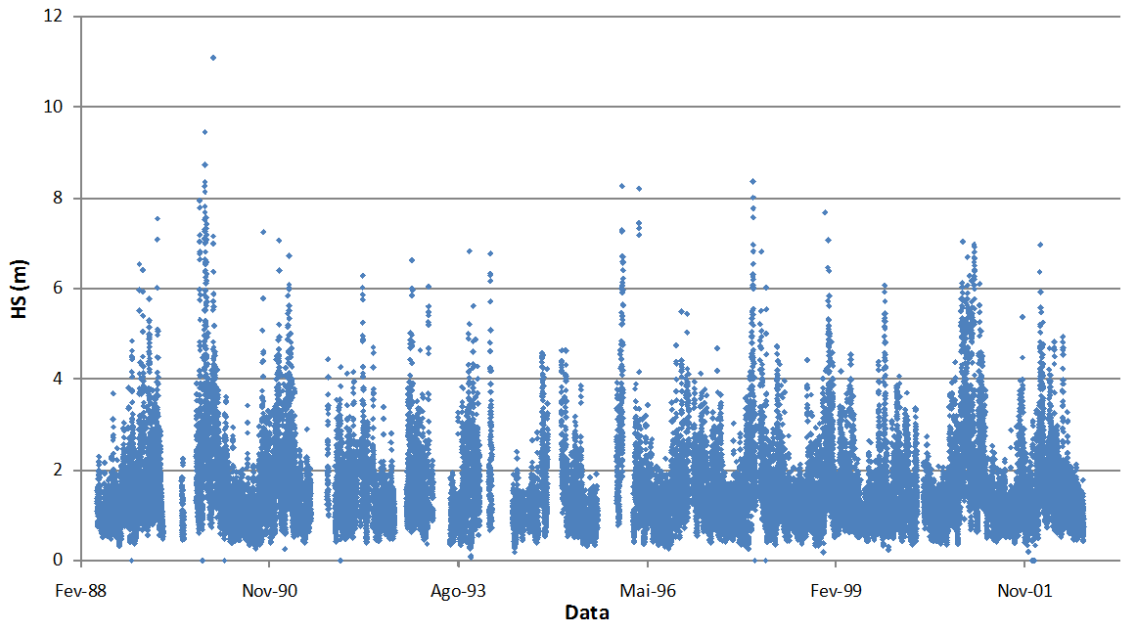


Fig. 10 - Alturas significativas no ponto P, em frente ao trecho do molhe oeste que protege o posto 2, estimadas a partir dos dados medidos na boia ondógrafo "SINES 1D".

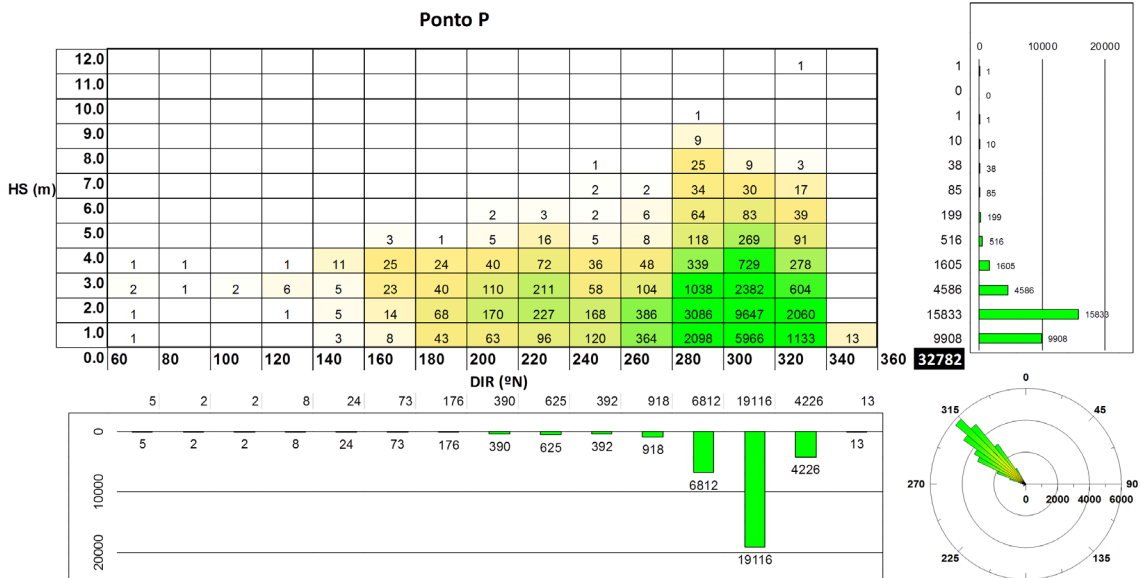


Fig. 11 - Regime geral no ponto P: histograma conjunto HS-DIR das ocorrências, respetivos histogramas marginais e rosa de direções.

QUADRO VIII - Parâmetros estatísticos da agitação marítima no ponto P.

Parâmetros Estatísticos	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais Frequente
HS (m)	11.09	1.54	0.07	0.93	[1.0 - 2.0] (48.26%)
TP (s)	18.9	8.9	4.2	2.3	[9.0 - 10.0] (22.27%)
DIR (°)	353	303	72	25	[310 - 320] (32.34%)

QUADRO IX - Parâmetros geométricos do perfil do molhe oeste de Sines em frente ao posto 2.

h (m)	h_t (m)	B_t (m)	$\cot\alpha_d$ (-)	h_b (m)	B (m)	$\tan\alpha_b$ (-)	$\cot\alpha_u$ (-)	A_c (m)	R_c (m)	G_c (m)	γ_f (-)
42.00	21.86	15.0	5.0	0.00	0.0	0.0	1.9	16.0	17.0	20.0	0.55 - 0.63

108

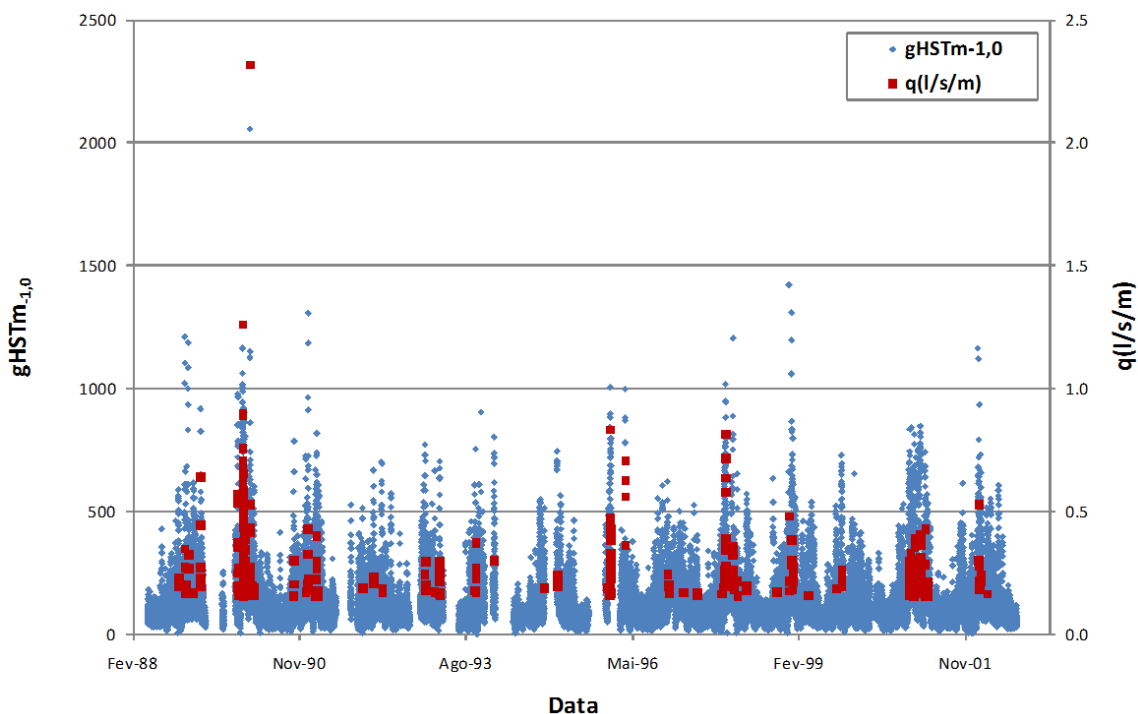


Fig. 12 - Série temporal dos caudais médios galgados, q , e de $gHSTm-1,0$ no ponto P em frente ao trecho do molhe oeste de Sines que protege o posto 2.

De modo idêntico, foi construída a amostra de extremos SNS_POT (QUADRO XI), considerando todos os dados e o método POT (*Peak-Over-Threshold*), descrito atrás. Os 16 valores, q_{max} , desta amostra, iguais ou superiores a $q = 0.4$ l/s/m, estão espaçados de, pelo menos, 3 dias, entre si, para garantir independência dos valores da amostra.

Feitos os cálculos de ajustamento das 2 amostras de q_{max} às distribuições de Gumbel, Fréchet, Exponencial, Log-normal e Weibull, obtiveram-se os regimes de extremos de caudais médios indicados no QUADRO XII (amostra SNS_AM) e no QUADRO XIII (amostra SNS_POT) para 6 valores de período de retorno, $Tr = 1, 5, 10, 25, 50$ e 100 anos. Os valores indicados nas colunas 4 a 8 são caudais médios extrapolados, em l/s/m, para os diversos períodos de retorno, N é o tamanho da amostra considerada e u é o intervalo médio entre valores extremos da amostra.

Mostram-se na fig. 13 a) e b), como exemplo, os gráficos de adaptabilidade (ou de ajuste) das funções de distribuição a) Gumbel/amostra SNS_AM e b) Fréchet/amostra SNS_POT . Notar que no último gráfico (fig. 13b), as especificidades da distribuição de Fréchet obrigam a ter um limite inferior do eixo das abcissas superior a

zero, pelo que não estão grafados os valores de q_{max} entre 0 e 1 (todos exceto 2 valores). Nos gráficos pode ver-se também os valores das extrapolações para os 4 períodos de retorno mais elevados ($Tr = 10, 25, 50$ e 100 anos), dos 6 calculados.

Em seguida, aplicou-se o método do parâmetro combinado (A. FILIPE *et al.*, 1999) para escolher quais as distribuições mais adequadas às amostras de extremos. Os mesmos QUADRO XII (amostra SNS_AM) e QUADRO XIII (amostra SNS_POT) mostram os valores obtidos para o parâmetro combinado, c , que, como se disse anteriormente, combina as estatísticas do erro padrão das estimativas e do coeficiente de Kolmogorov-Smirnov. Na coluna sombreada, aparecem os valores correspondentes à distribuição escolhida, de acordo com este critério.

Conclui-se que, para ambas as amostras, a distribuição de extremos mais adequada é a distribuição de Fréchet. Notar, porém, que esta distribuição é caracterizada por, relativamente a outras distribuições, produzir valores extremos mais elevados para grandes períodos de retorno (e.g., 100 anos).

Notar também que pelo facto de a variabilidade dos valores da amostra SNS_AM ser maior do que a

QUADRO X - Amostra AM de valores q_{max} utilizada para o cálculo do regime de extremos de caudais médios q .

AM - Máximos anuais		SNS_AM				
Inverno marítimo	Data	Hora	H (m)	T (S)	Dir (°)	q_{max} (l/s/m)
1988-1989	04-01-1989	03:00	6.5	18.90	321.9	0.348
1989-1990	30-01-1990	18:00	11.1	18.90	327.7	2.316
1990-1991	14-01-1991	15:00	7.1	18.90	322.5	0.428
1991-1992	13-02-1992	18:00	4.0	15.62	276.5	0.232
1992-1993	14-03-1993	06:00	6.0	11.91	292.6	0.296
1993-1994	16-10-1993	09:00	6.8	11.29	291.5	0.373
1994-1995	16-02-1995	09:00	4.6	16.43	292.9	0.240
1995-1996	01-01-1996	12:00	8.3	12.42	287.2	0.831
1996-1997	11-12-1996	21:00	5.4	11.70	294.6	0.244
1997-1998	25-11-1997	21:18	8.4	12.42	290.3	0.815
1998-1999	11-12-1998	06:00	7.7	18.90	328.8	0.480
1999-2000	22-10-1999	21:13	5.9	12.57	303.1	0.262
2000-2001	07-03-2001	09:00	6.1	12.42	270.6	0.428
2001-2002	23-01-2002	18:10	7.0	16.43	296.9	0.526
2002-2003	27-12-2002	12:00	8.9	12.42	297.4	0.868

QUADRO XI - Amostra POT de valores q_{max} utilizada para o cálculo do regime de extremos de caudais médios q .

POT - Máximos para $q \geq 0.4$ l/s/m		SNS_POT				
Máximo POT	Data	Hora	H (m)	T (s)	Dir (°)	q_{max} (l/s/m)
1	09-04-1989	03:00	7.5	12.42	285.9	0.638
2	19-11-1989	09:00	7.8	12.81	298.6	0.566
3	17-12-1989	00:00	9.4	12.57	292.3	1.260
4	22-12-1989	00:00	7.6	12.42	285.1	0.654
5	26-12-1989	09:00	7.4	12.42	307.2	0.424
6	30-01-1990	18:00	11.1	18.90	327.7	2.316
7	14-01-1991	15:00	7.1	18.90	322.5	0.428
8	01-01-1996	12:00	8.3	12.42	287.2	0.831
9	06-01-1996	06:00	6.6	12.42	292.2	0.429
10	01-04-1996	15:23	8.2	12.42	293.9	0.707
11	25-11-1997	21:18	8.4	12.42	290.3	0.815
12	11-12-1998	06:00	7.7	18.90	328.8	0.480
13	08-02-2001	06:07	6.7	12.32	298.4	0.404
14	07-03-2001	09:00	6.1	12.42	270.6	0.428
15	23-01-2002	18:10	7.0	16.43	296.9	0.526
16	27-12-2002	12:00	8.9	12.42	297.4	0.868

QUADRO XII - Determinação da distribuição de extremos mais adequada e respetivos valores extrapolados e de adaptabilidade usando a amostra SNS_AM.

Amostra	N u (ano)	Tr (ano)	Caudal médio galgado, q (l/s/m)				
			Gumbel	Fréchet	Exponencial	Log-normal	Weibull
SNS_AM	N = 15 u = 1.00	1	0.476	0.412	0.398	0.446	0.488
		5	1.157	0.844	1.098	0.894	0.905
		10	1.597	1.330	1.617	1.254	1.167
		25	2.153	2.403	2.303	1.744	1.480
		50	2.565	3.077	2.822	2.099	1.699
		100	2.975	5.700	3.341	2.421	1.908
coeficiente de correlação, r			0.851	0.975	0.902	0.937	0.884
estatística K-S, d			1.313	0.631	1.032	3.873	0.832
erro padrão das estimativas, e			0.536	0.226	0.326	0.148	0.478
parâmetro combinado, $c = d/d_{max} + e/e_{max}$			1.339	0.585	0.875	1.276	1.107

QUADRO XIII - Determinação da distribuição de extremos mais adequada e respetivos valores extrapolados e de adaptabilidade usando a amostra SNS_POT.

Amostra	N u (ano)	Tr (ano)	Caudal médio galgado, q (l/s/m)				
			Gumbel	Fréchet	Exponencial	Log-normal	Weibull
SNS_POT	N = 16 u = 0.9144	1	0.720	0.639	0.642	0.685	0.733
		5	1.296	1.066	1.251	1.113	1.119
		10	1.681	1.499	1.709	1.421	1.346
		25	2.169	2.312	2.314	1.808	1.684
		50	2.532	3.190	2.772	2.069	1.777
		100	2.892	4.391	3.229	2.296	1.937
coeficiente de correlação, r			0.873	0.968	0.924	0.918	0.856
estatística K-S, d			1.285	0.749	1.837	4.000	0.902
erro padrão das estimativas, e			0.502	0.258	0.292	0.154	0.533
parâmetro combinado, $c = d/d_{\max} + e/e_{\max}$			1.263	0.671	1.007	1.289	1.226

110

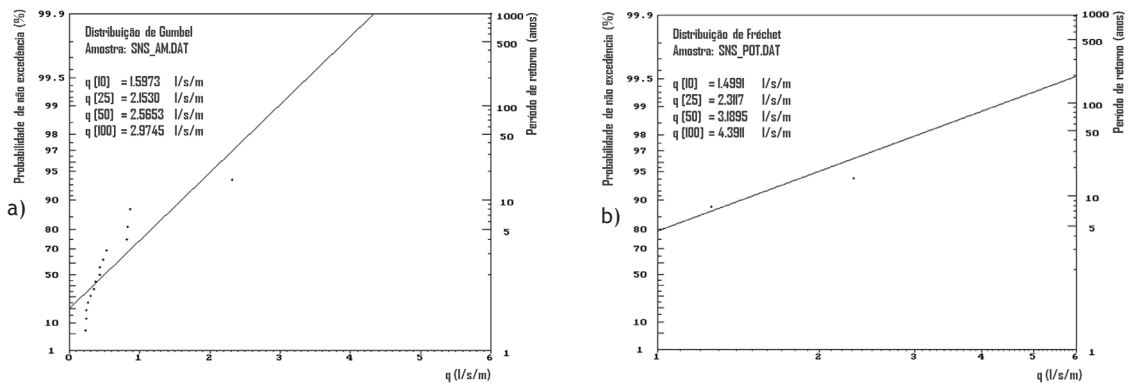


Fig. 13 - Gráficos de adaptabilidade das funções de distribuição/amostra: a) Gumbel/SNS_AM; e b) Fréchet/SNS_POT.

variabilidade dos valores da amostra SNS_POT, os valores extrapolados associados a períodos de retorno elevados (e.g. Tr = 100 anos) da primeira são superiores aos da segunda, apesar de a média dos valores da primeira amostra ser inferior aos da segunda. Claramente, a variabilidade da amostra é o fator principal para a obtenção de uma reta de extrapolação mais ou menos inclinada, com consequentes menores ou maiores (respetivamente) valores extrapolados, qualquer que seja o tamanho da amostra.

Segundo o QUADRO XII, utilizando o método SNS_AM, a integridade do equipamento, localizado a cerca de 5-10 m da estrutura galgada, é posta em causa, em média, anualmente, enquanto a segurança dos trabalhadores, treinados, com equipamento e calçado adequado, e com perceção de que se podem molhar, deve ser salvaguardada para períodos de retorno superiores a 5-10 anos, em média. A segurança dos navios atracados no posto 2, bem como dos veículos que circulam a baixa velocidade nesta secção do molhe, não constitui problema durante a vida útil da obra, cuja estabilidade não parece ser posta em questão devido ao galgamento.

Com o método SNS_POT, (QUADRO XIII) a integridade do equipamento é posta em causa, em média, para períodos de retorno inferiores a 1 ano, enquanto a segurança dos trabalhadores, deve ser salvaguardada para períodos de retorno, em média, superiores a 5 anos. A segurança dos navios e dos veículos, bem como a estabilidade da obra, não são problema durante a vida útil da obra.

Conclusão

Neste artigo, apresentou-se uma metodologia para estimação de valores extremos do caudal médio galgado sobre um trecho de um quebra-mar de taludes partindo de uma série temporal daquele caudal obtida das características da agitação incidente nesse mesmo trecho. Esta metodologia é importante para a avaliação do risco de ocorrência de galgamentos não admissíveis.

Para testar a metodologia, utilizou-se o caso de estudo do posto 2 do molhe oeste do porto de Sines, que contribui para abrigar o terminal de granéis líquidos do porto da ação da agitação marítima.

A metodologia baseia-se, primeiramente, na determinação da agitação marítima no local e no cálculo

dos valores correspondentes do galgamento do trecho da estrutura marítima em questão. A determinação da agitação marítima foi efetuada, no sistema HIDRALERTA, recorrendo ao modelo numérico SWAN para a transferência dos dados de agitação marítima, obtidos entre maio de 1988 e dezembro de 2002, desde a boia ondógrafo de Sines até à zona de estudo. Para o cálculo dos galgamentos foi utilizada a ferramenta NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de redes neuronais. Verificou-se que a ferramenta neuronal apresenta várias vantagens face às formulações empíricas e semiempíricas habitualmente usadas neste tipo de estudos, tais como a aplicabilidade a várias configurações estruturais (incluindo geometrias complexas como a do molhe oeste do porto de Sines), o facto de se poderem estimar caudais médios de galgamento tendo em consideração alguns efeitos de escala e de modelo em quebra-mares de taludes, e, também, a rapidez de cálculo. No entanto, verificou-se igualmente que para condições de cálculo dos menores caudais, muitas vezes determinantes do ponto de vista de utilização da estrutura ou da zona por ela abrigada, a ferramenta neuronal não pode ser aplicada por se encontrar frequentemente fora da sua gama de aplicabilidade.

A determinação do regime de extremos foi concretizada através de: a) identificação das amostras de extremos, constituídas por valores máximos anuais da série temporal dos caudais médios galgados no ponto P em frente ao referido trecho; b) ajuste de diversas distribuições de extremos às amostras do tipo AM (*Annual Maxima*) e POT (*Peak-Over-Threshold*); c) seleção da distribuição mais adequada; e d) com base na(s) distribuição(ões) escolhida(s), cálculo do regime de extremos de caudais médios para vários períodos de retorno. Conclui-se que, para ambas as amostras (associadas aos métodos AM e POT), a distribuição de extremos mais adequada é a distribuição de Fréchet, o que, dado esta distribuição ser caracterizada por produzir valores extremos mais elevados para grandes períodos de retorno (e.g., 100 anos), relativamente a outras distribuições, implica valores relativamente elevados de caudais médios, quando extrapolados para grandes períodos de retorno.

Após a realização de uma análise expedita da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e do impacto na segurança e na integridade da própria estrutura marítima, nos veículos, equipamento, pessoas e navios, foi possível estabelecer valores preliminares dos caudais médios críticos admissíveis que foram, posteriormente, comparados quer com a série temporal de caudais médios, quer com as extrapolações dos caudais médios galgados para vários períodos de retorno. Verificou-se que os resultados obtidos com os métodos AM e POT não diferiam significativamente: a integridade do equipamento localizado a cerca de 5-10 m da estrutura galgada é posta em causa, em

média, para um período de retorno igual ou inferior a 1 ano, enquanto a segurança dos trabalhadores, treinados, com equipamento e calçado adequado, e com a perceção de que se podem molhar, deve ser salvaguardada para períodos de retorno superiores a 5-10 anos, em média. A segurança dos navios atracados no posto 2, bem como dos veículos que circulam a baixa velocidade nesta secção do molhe, não constitui, por conseguinte, problema durante a vida útil da obra, cuja estabilidade, devida ao galgamento, não parece ser posta em questão.

Conclui-se que a metodologia aqui apresentada é de fácil aplicação e a sua complexidade reside essencialmente na definição dos caudais médios admissíveis e das consequências da ocorrência de galgamentos, que devem ser estabelecidos especificamente, para cada caso de estudo, com base em informação histórica sobre a resposta da estrutura à agitação marítima, no levantamento criterioso da zona em estudo e na experiência da comunidade portuária.

Assim, como trabalho futuro está previsto estender a todo o molhe oeste do porto de Sines a análise agora apresentada para o trecho do molhe que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos e realizar uma análise mais profunda de galgamentos, quer no que diz respeito à sua quantificação (incluindo velocidade do escoamento durante o galgamento), quer relativamente às suas consequências, através da partilha de conhecimentos e de experiências com os profissionais envolvidos no quotidiano das atividades portuárias de Sines. Além disso, analisar-se-ão cenários associados aos efeitos das alterações climáticas, quer no nível médio das águas do mar, quer na frequência e gravidade das tempestades marítimas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através do projeto HIDRALERTA - PTDC/AAC-AMB/120702/2010.

Referências bibliográficas

- ABECASIS, F.; PITA, C. (1993) - "Evaluations and Revisions of the Design". *Seminar on Port of Sines West Breakwater*, Sines, setembro 17-18.
- BESLEY, P. (1999) - *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*. Environment Agency, R&D Technical Report W178, UK.
- BOUIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L.H. (1999) - "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation". *Journal of Geophysical Research*, 104/C4, pp. 7649-7666.

- CARVALHO, M. M. (1983) - *Modelação estocástica da agitação marítima*. Programa de Investigação, LNEC, Lisboa.
- CARVALHO, M. M.; CAPITÃO, R. (1990) - *Ajustamento Gráfico de Distribuições*, Relatório 250/90-NPP e Relatório 2/90-A - NATO PO-WAVES, Lisboa, outubro.
- COEVELD, E. M.; VAN GENT, M. R. A.; POZUETA, B. (2005) - *Neural Network: Manual NN_OVERTOPPING 2*, CLASH WP8 - Report, junho.
- COLES, S. G. (2001) - *An introduction to statistical modeling of extreme values*, Springer Series in Statistics, ISBN 1852334592.
- CONSULMAR (2006) - *Reconstrução e Activação do Posto 1 do Molhe Oeste do Porto de Sines. Estudo Prévio*. Lisboa, abril.
- CONSULMAR (2008) - *Reconstrução e Activação do Posto 1 do Porto de Sines. Reabilitação do Molhe Oeste. Projecto de Execução*. Lisboa, dezembro.
- COPEIRO, E. (1978) - "Extremal prediction of significant wave height". *Proc. 16th International Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, 1978.
- DHL (1981) - *Port of Sines. Wave Climate and Refraction Study. Part 1: Report on Computations and Model Studies*. Delft Hydraulics Laboratory, novembro.
- DINIS, M. D. C.; TOPPLER, J. F. (1993) - "Brief History of the Port of Sines and General Presentation of West Breakwater". *Seminar on Port of Sines West Breakwater*, Sines, setembro 17-18.
- FILIFE, A.; CARVALHO, M.M.; CAPITÃO, R. (1999) - *Valores extremos da agitação marítima no Algarve. Faro - Tratamento local dos dados existentes*, Relatório 179/99-NPP, LNEC, Lisboa, julho.
- FORTES, C.J.E.M. (2002) - *Transformações não lineares de ondas em zonas portuárias. Análise pelo método dos elementos finitos*. Tese de doutoramento, IST, Engenharia Mecânica.
- FORTES, C. J. E. M.; REIS, M. T.; POSEIRO, P.; CAPITÃO, R.; SANTOS, J. A.; PINHEIRO, L.P.; RODRIGUES, A.; SABINO, A.; RODRIGUES, M. C.; RAPOSEIRO, P. D.; FERREIRA, J.C.; SILVA, C.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B. (2013) - "O Projeto HIDRALERTA - Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias". *Proc. 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN/PIANC, Lisboa, 10 e 11 de outubro de 2013.
- GUMBEL, E. J. (1953) - *Probability tables for the analysis of extreme-value data*, National Bureau of Standards, Washington.
- LIGTERINGEN, H.; SILVEIRA RAMOS, F.; VAN DER MEER, J.W.; RITA, M. (1993a) - "West Breakwater Sines. Definitive Rehabilitation, General Concept". *Seminar on Port of Sines West Breakwater*, Sines, setembro 17-18.
- LIGTERINGEN, H.; VAN DER MEER, J.W.; RITA, M. (1993b) - "Sines West Breakwater. Emergency Repair, Hydraulic Studies". *Seminar on Port of Sines West Breakwater*, Sines, setembro 17-18.
- NEVES, D.R.; RODRIGUES, S.; REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS, J.A. (2010) - "Aplicação ao porto de Sines de uma nova metodologia de avaliação do risco para a navegação portuária utilizando o sistema de informação geográfica GUIOMAR". *Revista Gestão Costeira Integrada*, 10/4, pp. 483-504.
- NEVES, D. R.; SANTOS, J.A. ; REIS, M. T.; FORTES, C.J. E. M.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B.; RODRIGUES, M.C. (2012) - "Risk assessment methodology for the overtopping of maritime structures. Application to the port and bay of Praia da Vitória, Azores, Portugal". *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 12, 3, pp. 291-312.
- NEVES, D.R.C.B.; ZÓZIMO, A.C.; PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M. (2009) - "GUIOMAR: Geo(graphical) User Interface for Coastal and MARine Modeling. Supported Decision System". *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 1542-1546.
- PINHEIRO, L.V.; COLI, A.B.; CAPITÃO, R.; SANTOS, J.A. (2004) - *Caracterização da Agitação Marítima no Molhe oeste do Porto de Sines. Regime de extremos e eventos notáveis*, Relatório 370/04- NPE, Lisboa, novembro.
- PINHEIRO, L. V., FORTES, C. J. E. M., SANTOS, J. A. & NEVES, M.G. (2006) - "Caracterização de regimes de agitação marítima utilizando a ferramenta SOPRO". *Proc. 8º Congresso da Água*, APRH, Figueira da Foz, Portugal, 13 a 17 de março (CD-Rom).
- PORT SINES INVESTIGATING PANEL (1982) - *Failure of the Breakwater at Port Sines, Portugal*. American Society of Civil Engineers, New York. ASIN: B007ZJLOXQ.
- POSEIRO, P.; FORTES, C. J.; REIS, M.T.; SANTOS, J. A.; CAPITÃO, R.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, M. C.; AZEVEDO, E.B. (2013) - "A Methodology for Overtopping Risk Assessment in Port Areas. Application to the Port of Praia da Vitória (Azores, Portugal)". *Proc. SCACR 2013, 6th International Conference on Applied Coastal Research*, 4 a 7 de junho, LNEC, Lisboa.

- PULLEN, T.; ALLSOP, N.W.H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHUTTRUMPF, H.; VAN DER MEER, J.W. (2007) - *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*, Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, agosto.
- REIS, M.T. (1998) - *Probabilistic Assessment of the Safety of Coastal Structures*. Tese para a Obtenção do Grau de Doctor In Philosophy, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Liverpool, Reino Unido, janeiro.
- REIS, M.T.; HU, K.; HEDGES, T.S.; MASE, H. (2008) - "A comparison of empirical, semiempirical, and numerical wave overtopping models". *Journal of Coastal Research*, 24/2B, pp. 250-262.
- REIS, M.T.; NEVES, M.G.; LOPES, M.R.; HU, K.; SILVA, L.G. (2011a) - "Rehabilitation of Sines West Breakwater: wave overtopping study". *Maritime Engineering Journal*, 164/MA1, pp. 15-32. ISSN: 1741-7597.
- REIS, M. T.; NEVES, M. G.; LOPES, M. R.; SILVA, L.G. (2011b) - "Estudos de galgamento do Molhe Oeste do Porto de Sines". *Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN/PIANC, Porto, 6 e 7 de outubro de 2011.
- ROCHA, T.; FORTES, C.; REIS, M. T.; SANTOS, J. A.; NEVES, D.; PORTELA, L.; PINTO, F.T. (2013) - "Avaliação comparativa do risco de galgamentos na Praia da Vitória, Terceira, Açores". *Vetor - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, Vol. 23(1), pp. 104-120.
- SILVA, D. M. F.; FORTES, C.J.; REIS, M. T.; ANTUNES do Carmo, J.S.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, C. (2012) - "Avaliação do galgamento de estruturas portuárias: Porto de Ponta Delgada". *Recursos Hídricos*, APRH, Vol. 33(2), pp. 37-51.
- VAN DER MEER, J.W.; VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B.; VERHAEGHE, H., STEENDAM, G.J.; MEDINA, J.R. (2005) - "Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters'05*, Thomas Telford, London, UK, pp. 259-268.
- VAN GENT M.R.A.; POZUETA, B.; VAN DEN BOOGAARD, H.F.P.; MEDINA, J.R. (2005) - *D42 Final Report on Generic Prediction Method, CLASH Workpackage 8*. 33p., WL/Delft Hydraulics Report, Delft, The Netherlands.