

Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada

D. Pereira⁽¹⁾, L. G. Lopes⁽¹⁾, M. T. Reis⁽²⁾, C. J. Fortes⁽²⁾ e P. Poseiro⁽²⁾

(1) Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira. (debora@uma.pt)

(2) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Resumo: Neste trabalho, descreve-se a aplicação de uma metodologia para a avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias ao porto de Ponta Delgada, Açores. Esta metodologia envolve, primeiramente, a caracterização da agitação marítima, sendo o estudo da propagação das ondas desde o largo até ao interior do porto feito através do uso combinado dos modelos numéricos WAVEWATCH III, SWAN e DREAMS. Foi considerado um período de estudo de dois anos, entre 2011 e 2012. Os resultados do modelo SWAN foram validados através de comparação com dados *in situ* medidos por boia-ondógrafo. Com base nos valores fornecidos pelo modelo DREAMS, efetuou-se a determinação do caudal médio de galgamento em cinco secções de estruturas portuárias pré-selecionadas, com recurso à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. A avaliação do risco associado ao galgamento para cada secção analisada, a partir da probabilidade de ocorrência de galgamento e das consequências a ele associadas, permitiu a criação de mapas de risco, importantes para o planeamento de operações e de futuras intervenções nos locais em estudo.

Palavras-chave: engenharia costeira, galgamento de estruturas portuárias, avaliação de risco, agitação marítima, modelação numérica, porto de Ponta Delgada.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração da população e das atividades económicas em regiões costeiras pode contribuir para o incremento da vulnerabilidade das infraestruturas e das pessoas expostas à severidade e irregularidade da agitação marítima. Esta poderá produzir danos em equipamentos e estruturas, causar problemas à navegação e às atividades piscatórias, provocar a interrupção da circulação rodoviária e pedonal, causar inquietação nas populações locais e, no extremo, levar à perda de vidas humanas. Desta forma, torna-se cada vez mais necessário estimar o risco de ocorrência de galgamentos de estruturas costeiras e portuárias, tanto para prever e minimizar as suas consequências, como para verificar o correto dimensionamento das próprias estruturas.

Uma metodologia para a avaliação do risco de ocorrência de galgamentos de estruturas implantadas nessas regiões tem vindo a ser desenvolvida no LNEC, objetivando aprimorar um mecanismo de alerta capaz de indicar às autoridades competentes as situações em que tal fenómeno possa causar prejuízos e colocar em perigo a segurança de bens e pessoas, fornecendo assim um instrumento para o correto planeamento e gestão de intervenções que visem minimizar a possibilidade de ocorrência dessas situações (Santos *et al.*, 2011).

Nesse sentido, Silva (2012) efetuou uma primeira aplicação daquela metodologia ao porto de Ponta Delgada (costa sul da Ilha de São Miguel), o qual constitui a principal porta de entrada e saída de pessoas e de mercadorias no arquipélago dos Açores. Naquele trabalho, foi efetuada apenas uma análise

do galgamento de duas estruturas do porto para um período de um mês de dados de agitação marítima e ventos, considerando constante o nível de maré. O presente trabalho é uma extensão do anterior, na avaliação do risco de galgamento de cinco estruturas do referido porto, considerando um período de dados de agitação marítima de dois anos, bem como a variação do nível de maré.

As cinco secções do porto analisadas correspondem a dois pontos no molhe principal, um localizado no início do molhe, no chamado cais Nacional (ponto D1), e outro no cais NATO (ponto D2), um terceiro ponto na piscina natural (ponto D3), um no terminal de cruzeiros (ponto D4) e um no molhe da marina nascente (ponto D5). Estas secções foram escolhidas devido ao facto de estarem localizadas em áreas onde é constante a incidência das ondas, o que pode pôr em causa as atividades aí desenvolvidas (Fig.1).



Fig.1. Localização dos pontos em estudo no porto de Ponta Delgada.

2. METODOLOGIA

2.1. Etapas principais

Sumariamente, a metodologia empregue na avaliação do risco de galgamento consiste nas seguintes etapas:

- Define-se o regime de agitação marítima incidente nos pontos em estudo, recorrendo a modelos

- numéricos de geração e propagação de ondas e a medições *in situ* efetuadas por boia-ondógrafo;
- Caracterizada a geometria da estrutura em cada uma das secções, calcula-se o caudal médio de galgamento em cada secção, recorrendo à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005);
- Estabelecem-se os valores admissíveis do caudal médio galgado, com base nas recomendações de Pullen *et al.* (2007) e de informação fornecida por entidades locais, tendo em conta o perfil transversal da estrutura galgada, bem como a utilização e as características da zona abrigada pela mesma;
- Calcula-se o grau de risco de ocorrência de galgamentos que excedam os valores admissíveis pré-estabelecidos, por meio da multiplicação do grau de probabilidade dessa ocorrência (Neves *et al.*, 2012) - adquirido a partir da análise dos caudais médios estimados com o NN_OVERTOPPING2 e dos valores admissíveis - e do grau das respetivas consequências a ela associadas (Neves *et al.*, 2012);
- A partir do grau de risco associado a cada secção em estudo, pode-se criar um mapa de risco para a área em estudo.

2.2. Modelação da agitação marítima

A caracterização da agitação marítima nas zonas de interesse foi feita com base em estimativas da agitação marítima ao largo, obtidas com o modelo numérico de previsão da agitação à escala regional WAVEWATCH III (WWIII) (Tolman, 1991), transferida para as zonas em estudo com recurso aos modelos numéricos de propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes, 1993), para a propagação das ondas até à zona costeira e, depois, até ao interior do porto, respetivamente.

2.1.1 Modelo SWAN

Para a utilização deste modelo, foi necessária a malha batimétrica da zona a modelar, a implantação da malha espacial e a definição das variáveis de entrada, nomeadamente a introdução dos dados de agitação ao largo dos Açores a cada seis horas para um período de dois anos, 2011 e 2012, no ponto de coordenadas geográficas 37°42'N e 25°45'W, obtidos com o modelo WWIII, e dos correspondentes dados de maré fornecidos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Antunes, 2007). Como tais previsões do nível do mar referem-se apenas à variação da maré astronómica no local, foi adicionada uma sobrelevação constante de 0.40 m, valor este usualmente utilizado em projetos no arquipélago dos Açores (Silva, 2012).

Os cálculos foram efetuados com a versão 40.72 do SWAN, em regime estacionário, considerando apenas o fenómeno da difração, sem correntes e ventos, tendo sido utilizada uma malha retangular principal com 142×77 elementos e resolução de 500 m e uma malha fina, cobrindo a região de interesse, com 225×132

elementos e resolução de 100 m.

As condições de agitação marítima no período de 730 dias considerado foram obtidas com o modelo SWAN em dois pontos distintos: o ponto P1, correspondente à boia-ondógrafo “Bond 2”, com coordenadas M, P (612688.09, 4176197.78), com cota batimétrica aproximada de -98 m (ZH), e o ponto P2, na zona exterior do porto, com coordenadas M, P (616493.23, 4176032.00) e cota batimétrica de -40 m (ZH).

2.1.2 Modelo DREAMS

Os parâmetros da agitação marítima necessários para o cálculo do caudal médio de galgamento foram obtidos com recurso ao modelo DREAMS.

Para a sua aplicação, foi necessária a construção da malha de elementos finitos, a definição do domínio de cálculo, de modo a abranger o interior do porto e a área marítima adjacente até ao ponto P2, bem como o estabelecimento das condições de agitação marítima à entrada do domínio e a definição das características das fronteiras terrestres correspondentes aos segmentos que circunscvem o porto, onde foram impostos coeficientes de reflexão.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização da agitação marítima

Numa primeira instância, fez-se a avaliação dos resultados do modelo SWAN para o ponto P1, por meio da sua comparação com dados medidos *in situ* no período de 1 de abril a 31 de maio de 2012. Tendo o modelo conseguido representar de forma satisfatória as condições de agitação preponderantes no ponto em causa, ainda que tenha sido verificada alguma discrepância, principalmente para a direção média da agitação marítima (Pereira, 2013), assumiu-se que os resultados fornecidos pelo mesmo para o ponto P2 poderiam ser utilizados como parâmetros de entrada para o modelo DREAMS.

Relativamente aos resultados do modelo DREAMS, constatou-se que os maiores valores de altura significativa da agitação marítima (H_s) no período em estudo correspondem aos pontos D1 ($H_s = 4.81$ m) e D2 ($H_s = 4.25$ m). Para o ponto D5, no molhe da marina nascente, o valor máximo de H_s , de 1.56 m, verificou-se em meados de fevereiro de 2012. Para a mesma ocasião, os resultados fornecidos pelo modelo indicaram valores máximos de H_s de apenas 1.43 m no ponto D4, situado no terminal de cruzeiros, protegido das ondas de sudoeste e sul pelo molhe do cais comercial, e de 0.68 m no ponto D3, igualmente localizado no interior do porto.

A direção média incidente (θ_m) no ponto D1 foi essencialmente de sudoeste e sul, sendo de sudeste para os restantes pontos.

Além disso, como os pontos localizados no interior do porto não estão protegidos a sudeste por nenhuma

estrutura marítima, as ondas neles incidentes têm predominantemente esse rumo, apesar deste variar entre 83.4° e 126°, sendo a direção sudeste a principal entrada da agitação marítima para o interior da bacia do porto em estudo.

3.2. Caudal médio galgado

Relativamente aos galgamentos obtidos pela ferramenta NN_OVERTOPPING2, foram observadas no molhe do cais comercial (ponto D1) duas ocasiões de galgamento, sendo que o maior caudal, de 0.22 l/s/m, verificou-se em finais de setembro de 2011 e ocorreu em simultâneo com o único evento de galgamento da secção D2, de 0.18 l/s/m.

Em todos os instantes em que se verificou a ocorrência de galgamento na piscina natural (ponto D3), também se constatou galgamento no terminal de cruzeiros (ponto D4), tendo sido em fevereiro de 2012 que se verificou o caudal médio de galgamento máximo de 8.01 l/s/m neste ponto.

Foi no terminal de cruzeiros (ponto D4) que se obtiveram os caudais mais elevados e mais ocasiões de galgamento, nomeadamente 12. Porém, na secção do molhe da marina nascente (ponto D5) não se verificou qualquer galgamento.

Ainda nesta análise, constatou-se que na altura dos galgamentos nos pontos exteriores, onde a direção das ondas é usualmente de sudoeste, verificou-se a ausência de galgamento para os locais interiores, podendo concluir-se que a ocorrência deste fenómeno para os pontos D3 e D4 deve-se ao facto destes não estarem protegidos a sudeste.

Segundo a informação obtida junto do porto, seria mais exatável a estimativa de galgamentos no molhe do cais comercial do que no terminal de cruzeiros, o que não se verificou.

Acerca do registo sistemático de ocorrência do fenómeno de galgamento, existem unicamente registos dos dias de tempestade (27 de setembro de 2011, 22 de março e 20 de agosto de 2012). Com o uso da ferramenta neuronal, apenas na primeira data foi prevista a ocorrência de galgamento.

3.3. Valores admissíveis

Os valores admissíveis adotados basearam-se nas recomendações de Pullen *et al.* (2007):

- Qualquer uma das estruturas marítimas se enquadra numa defesa frontal, com danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa - 200 l/s/m;
- A circulação de pessoas no molhe do cais comercial (pontos D1 e D2) é restrita, assumindo-se assim que seja apenas pessoal treinado que tenha acesso ao molhe - 1 l/s/m. Na zona das piscinas (ponto D3), a circulação é pública, envolvendo pessoas totalmente desprevenidas - 0.03 l/s/m. Nos restantes locais, considera-se que os utilizadores não ficam perturbados ou assustados com o facto de ficarem

molhados - 0.1 l/s/m;

- Os veículos circulam a baixa velocidade nos pontos D1, D2, D4 e D5 - 10 l/s/m;
- Os contentores no molhe do cais comercial (ponto D1) e o equipamento (gruas, barcos para reparação, equipamento de amarração, etc.) localizado nos pontos D2 a D5 estão a 5-10 m da estrutura - 0.4 l/s/m;
- Danos em grandes barcos localizados nos pontos D1, D2 e D4 e afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10 m da estrutura (ponto D5) - 10 l/s/m;
- Na superestrutura do molhe do cais comercial (ponto D1) existem armazéns, na piscina natural existe um edifício de restauração e o terminal de cruzeiros apresenta na sua proximidade o edifício Portas do Mar - 1 l/s/m.

3.4. Avaliação de risco

Após a obtenção dos valores críticos para as diversas categorias, calculam-se as probabilidades de ocorrência de galgamento excessivo para os cinco pontos considerados e as consequências associadas.

A probabilidade de ocorrência de galgamento excessivo na secção em estudo é dada pelo quociente entre o número de vezes que, no período de tempo considerado, o caudal médio obtido supera o caudal médio admissível pré-definido e o número total de caudais médios de galgamento da amostra. Assim, associando tais valores aos definidos por Neves *et al.* (2012), obtém-se o grau de probabilidade, que para todos os pontos em estudo enquadra-se no intervalo de 0-1% (acontecimento improvável, de grau 1).

Posteriormente, definiu-se o grau de consequências associado, tendo em conta a informação das entidades locais, atribuindo-se para os pontos D1 e D2 um grau igual a 10 (consequências muito sérias), para os pontos D3 e D4 um grau igual a 5 (consequências sérias) e para o ponto D5 um grau igual a 2 (consequências reduzidas).

Por fim, o grau de risco pode ser obtido pela multiplicação dos dois graus anteriormente caracterizados (Tabela I).

Com o auxílio de Neves *et al.* (2012), é possível classificar e impor medidas de controlo do risco de galgamento, caso necessário. Assim, conclui-se que para a marina (ponto D5) não são necessárias quaisquer medidas do controlo desse risco, classificando-se o mesmo como insignificante. No entanto, para os demais pontos, é necessário adotar medidas de controlo do risco de galgamento.

Tabela I - Grau de risco para as cinco secções em estudo.

Local	Grau de Probabilidade	Grau de Consequências	Grau de Risco
D1	1	10	10
D2	1	10	10
D3	1	5	5
D4	1	5	5
D5	1	2	2

4. CONCLUSÕES

Para a obtenção de valores de caracterização da agitação marítima mais próximos da realidade, é preponderante a reanálise da modelação numérica da propagação da agitação feita por meio do modelo SWAN, com a consideração do vento e a revisão da malha batimétrica utilizada.

Relativamente aos resultados do modelo DREAMS, observou-se que existe uma clara mudança das características da agitação marítima do exterior para a zona abrigada do porto, sendo a piscina natural a zona interna do porto mais protegida, nomeadamente pelo terminal de cruzeiros e pelo molhe do cais comercial. Assim, o ponto D3 é aquele onde foram obtidas as menores alturas significativas.

Os caudais médios de galgamento obtidos pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 para os pontos em análise demonstraram que, no período considerado, o terminal de cruzeiros foi a secção onde se observou maiores galgamentos e com mais frequência. Segundo a informação obtida junto do porto, seria mais expectável a estimação de galgamentos para o molhe do cais comercial, o que não se verificou.

Um dos possíveis motivos desta discrepância poderá incidir em alguns aspetos dos modelos numéricos de propagação da agitação marítima, como os relacionados com os coeficientes de reflexão adotados.

Na avaliação de risco, conclui-se que o risco é insignificante para o molhe da marina nascente, sendo reduzido para todas as restantes secções analisadas, para as quais será necessário seleccionar um conjunto de medidas para o seu controlo, de modo que o risco possa ser considerado aceitável. No entanto, o risco de ocorrência de galgamento apenas foi analisado para um espaço temporal de dois anos, o que não é representativo deste fenómeno.

A implementação desta metodologia de avaliação de riscos é simples e os seus resultados dependem, principalmente, da qualidade e da quantidade dos dados de agitação marítima disponíveis, do conhecimento dos locais em estudo, da escolha informada dos valores críticos admissíveis de galgamento, da aplicabilidade das ferramentas utilizadas para o cálculo do galgamento às condições/estruturas em estudo e da identificação das consequências associadas a um dado caudal médio superior ao admissível.

Esta metodologia é, assim, indispensável para o planeamento de eventuais intervenções nos locais em estudo, contribuindo, desta forma, para o desenvolvimento de um sistema de alerta, caso a agitação marítima coloque em risco bens, pessoas e o ambiente, bem como para a redução dos prejuízos que o galgamento possa causar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento concedido através do projeto HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010). Agradecem ainda ao Eng. Pedro Silva e ao Topógrafo-Geómetra Gonçalo Azevedo, dos Portos dos Açores, à Eng. Conceição Rodrigues, da Azorina, à Eng. Lucília Luís, da Consulmar, e ao Eng. David Silva pela disponibilidade no fornecimento da informação necessária para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2007). *Previsão de marés dos portos principais de Portugal*. http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html.
- Booij, 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): 7649-7666.
- Coeveld, E. M., van Gent, M. R., Pozueta, B. (2005). *Neural network manual: NN_OVERTOPPING 2. Report*. WL/Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.
- Fortes, C. J. E. M. (1993). *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)*. Dissertação de Mestrado. IST/UTL, Lisboa.
- Neves, D. R., Santos, J. A., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Simões, A., Azevedo, E. B., Rodrigues, M. C. (2012). *Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal*. *RGCI*, 12(3): 291-312.
- Pereira, D. M. F. (2013). *Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: o caso do porto de Ponta Delgada (Açores, Portugal)*. Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., van der Meer, J. W. (2007). *EurOtop - Wave overtopping of sea defenses and related structures: Assessment manual*. *Die Küste: Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast*, 73: 1-178.
- Santos, J. A., Reis, M. T., Neves, D., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues, S., Azevedo, E., Rodrigues, M., Simões A., Ramalheira, J., Raposeiro, P. (2011). *Porto da Praia da Vitória: estimativa de galgamentos da proteção marginal da baía*. *Actas das 7.^{as} JPECP*, AIPCN/PIANC, Porto.
- Silva, D. M. F. (2012). *Avaliação do galgamento de estruturas portuárias*. Dissertação de Mestrado, FCT/UC, Coimbra.
- Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21(6): 782-797.