

AVALIAÇÃO DO GALGAMENTO DE ESTRUTURAS PORTUÁRIAS: PORTO DE PONTA DELGADA

OVERTOPPING ASSESSMENT OF PORT STRUCTURES: PONTA DELGADA'S HARBOR

David Manuel Fernandes Silva

Mestre em Engenharia Civil /// FCTUC

Conceição Juana Fortes

Investigadora Principal /// Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Maria Teresa Reis

Investigadora Auxiliar /// Laboratório Nacional de Engenharia Civil

José Simão Antunes do Carmo

Professor Associado /// Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil

Anabela Simões

Bolseiro de investigação /// Universidade dos Açores, LAMTEC /// 9700-416 Praia da Vitória, Portugal

Conceição Rodrigues

Administração dos Portos dos Açores, SA, (PA, S.A.), Av. Gago Coutinho e Sacadura Cabral, 7 – 9900-062 Horta

RESUMO: Neste trabalho descreve-se a aplicação de uma metodologia de avaliação de galgamentos de estruturas portuárias ao caso do porto de Ponta Delgada, Açores. Esta metodologia consiste em caracterizar a agitação marítima na zona através de modelos numéricos de propagação de ondas desde o largo até ao interior do porto e calcular os galgamentos gerados por essa agitação em frente a estruturas marítimas do porto.

Nesse sentido, a agitação marítima na zona do porto, e mais concretamente em frente a estruturas em estudo, é caracterizada recorrendo a previsões de agitação marítima fornecidas pelo modelo WAVEWATCH III e aos modelos de propagação de ondas SWAN e DREAMS. Posteriormente, com base nessas características de agitação e com a ajuda da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, determina-se o galgamento nas estruturas em estudo.

Esta metodologia foi aplicada a duas estruturas do porto de Ponta Delgada, o molhe principal e a zona das piscinas naturais, para o período de 21 de abril a 21 de maio de 2012 e para um conjunto de situações correspondentes a tempestades. Foi efetuada uma validação do modelo SWAN com dados medidos *in situ* por uma boia-ondógrafo.

Palavras-chave: porto de Ponta Delgada, agitação marítima, galgamentos de estruturas portuárias, simulação numérica.

ABSTRACT: This work describes the application of a methodology for evaluating overtopping of harbor structures to the case of the harbor of Ponta Delgada, Azores. This methodology characterizes the wave climate in the area through numerical modeling of wave propagation from offshore to the inner harbor and calculates the corresponding overtopping in front of the harbor structures.

The sea-wave climate in the harbor area, and more specifically in front of the studied structures, is characterized using the forecast provided by the model WAVEWATCH III and the wave propagation models SWAN and DREAMS. Subsequently, based on the wave characteristics and using the neuronal network tool NN_OVERTOPPING2, overtopping was determined at the structures under study.

This methodology was applied to two structures of the harbor of Ponta Delgada, the main protecting breakwater and the natural pools, for the period of 21 April to 21 May 2012 and for a number of storms. A validation of the SWAN model was performed with data measured *in situ* by a wave buoy.

Keywords: Ponta Delgada's harbor, wave climate, overtopping of harbor structures, numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima ao incidir sobre estruturas portuárias pode provocar diversas consequências, como danos em estruturas e equipamentos, problemas na navegação e operacionalidade do porto, interrupção de atividades piscatórias, interrupção da circulação de pessoas e tráfego em zonas de risco, derramamento de substâncias perigosas para o ambiente, perda de bens materiais, desconforto para as populações e, no caso mais grave, pode levar à perda de vidas humanas.

Para esse efeito, a metodologia utilizada na caracterização da agitação e do galgamento em estruturas costeiras e portuárias recorre à modelação numérica (Neves *et al.*, 2010, Santos *et al.*, 2011, Silva *et al.*, 2011, Reis *et al.*, 2011, Neves *et al.*, 2012). Esta metodologia já foi aplicada com sucesso no arquipélago dos Açores, em concreto no porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira (Santos *et al.*, 2011, Reis *et al.*, 2011, Rocha, 2012). Pretende-se agora aplicar esta metodologia ao porto de Ponta Delgada, que é um porto de maior dimensão, com um maior volume de negócios e de maior importância estratégica para o arquipélago dos Açores.

Note-se que neste porto, são frequentes os galgamentos da estrutura principal de proteção do porto, que inviabilizam as operações portuárias de carga e descarga em determinadas zonas dessa estrutura com consequências económicas evidentes. Nesse sentido, a implementação da referida metodologia nesta zona portuária, passando pela caracterização da agitação e a determinação de galgamentos, é o objetivo do presente trabalho. Esta metodologia é a base de um sistema de apoio à decisão na gestão e planeamento da zona portuária, de modo a resolver ou minimizar os problemas devidos aos galgamentos. Assim, partindo de previsões da agitação marítima fornecidas pelo modelo de previsão WAVEWATCH III, WWIII (Tolman, 2002), usaram-se essas previsões no modelo espectral de propagação de ondas SWAN (Booij e Holthuijsen, 1999) para determinar a agitação marítima na proximidade do porto, agitação essa que foi propagada para a zona marítima adjacente e para o interior do porto com o modelo de declive suave DREAMS (Fortes, 1993). Dos diversos parâmetros para caracterização da agitação, apenas se consideraram os parâmetros de altura significativa H_s (m), período de pico T_p (s) e direção θ ($^\circ$), que foram também obtidos para dois pontos, um em frente ao molhe principal de proteção do porto e outro na zona das piscinas

naturais. Estes locais foram escolhidos por serem os de maior interesse do ponto de vista de galgamentos, uma vez que no tardoz do molhe existem os serviços da alfândega e cais comercial, com grande circulação de bens materiais, e nas piscinas naturais pela circulação de pessoas na zona.

Foram também extraídos estes valores no local da boia-ondógrafo que se encontra na proximidade de Ponta Delgada, de modo a efetuar uma comparação entre resultados do modelo numérico SWAN e dados reais.

Finalmente, após a obtenção dos parâmetros da agitação dentro do porto e no exterior junto às suas estruturas de proteção, determinou-se o caudal médio galgado q ($m^3/s/m$) por metro linear de estrutura, recorrendo à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005). Esta metodologia foi aplicada para o período de dados de 20 de abril a 21 de maio de 2012, o qual, embora seja bastante curto, demonstra as vantagens e desvantagens desta metodologia aplicada ao caso do porto de Ponta Delgada. Foi também aplicada a um conjunto de situações correspondentes a tempestades.

2. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

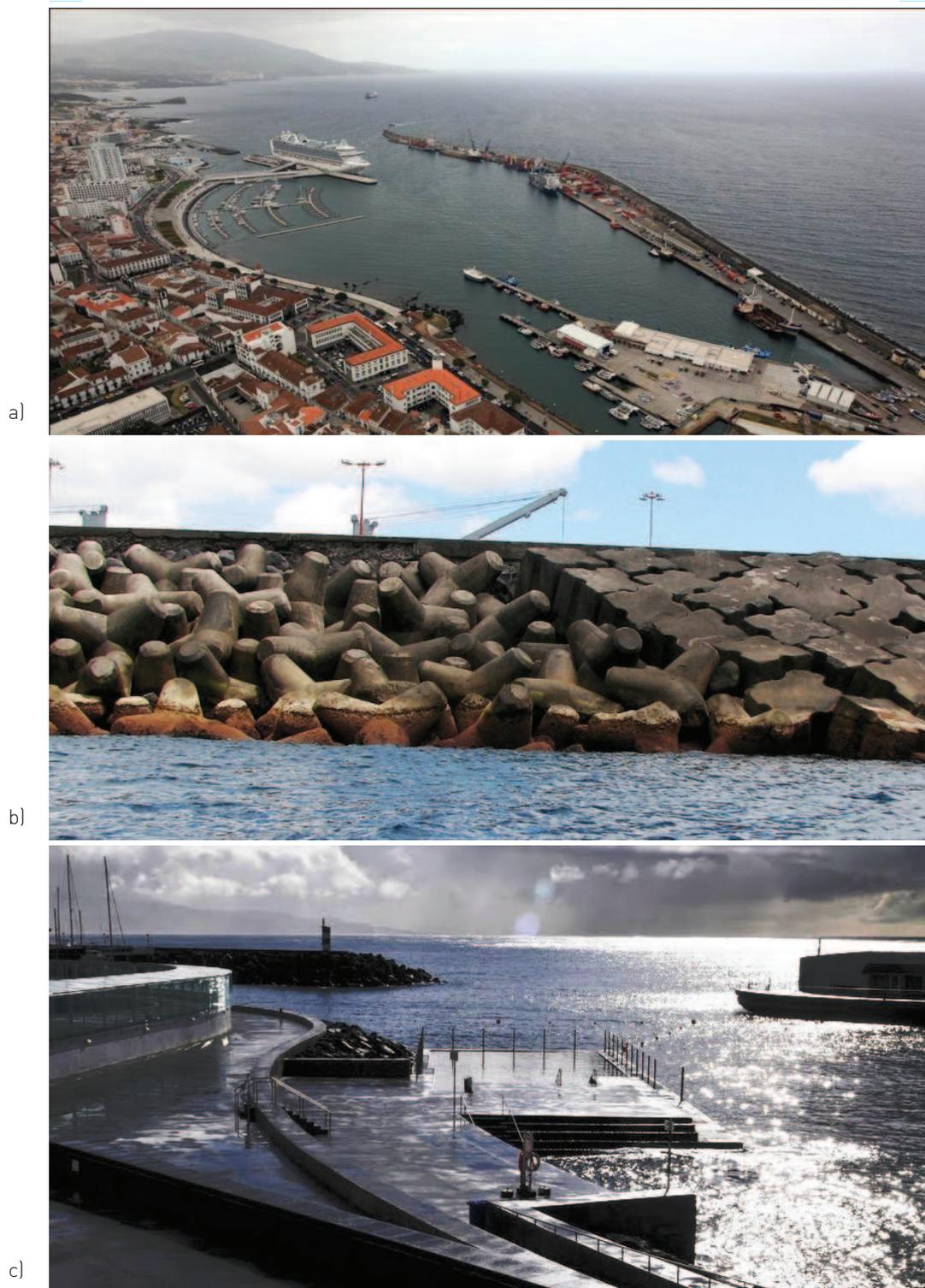
O porto de Ponta Delgada situa-se na costa sul da ilha de S. Miguel, sendo um dos principais portos dos Açores, com cerca de 67 ha de área da baía protegida pelo molhe principal a sul e a sua entrada orientada para nascente, conforme a Figura 1a).

A defesa é composta por um molhe com cerca de 1 km de comprimento, em tetrápodos e cubos Antifer, com muro-cortina no seu tardoz, onde funciona o cais comercial do porto, Figura 1b). Este cais acostável possui um parque de contentores, armazéns, abastecimento de navios e ainda os serviços de alfândega.

Na zona poente existe o porto de pesca, com duas pontes cais, com vista à amarração de embarcações de pesca de pequeno e médio porte. Neste local existe também a edificação mais antiga do porto, o antigo Forte de S. Brás, destinado à proteção do porto no século XVI e hoje com funções de Museu Militar.

Na zona central do porto foi construído, em 2008, o complexo Portas do Mar. Trata-se de um terminal de cruzeiros turísticos em "T" assente em pilares perfurados, com terminal de *ferry-boats* inter ilhas, um anfiteatro, um Pavilhão do Mar, zona

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em setembro de 2012, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em novembro de 2012. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 33, Nº 2, 37-51, novembro de 2012.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh33n2-3



a)

b)

c)

Figura 1 – a) Fotografia de satélite do porto de Ponta Delgada (Google, 2012); b) Zona do molhe principal; c) zona das piscinas.

de estacionamentos, zona de restauração e ainda piscinas naturais, Figura 1c). Com a construção deste empreendimento surgiu, também, a necessidade de expandir a marina núcleo nascente, sendo construído o núcleo poente, aumentando assim o número de amarrações para um total de 670 iates. É de referir ainda a avenida marginal da cidade, assente sobre um prisma em TOT revestido por agregados selecionados, com passeio marítimo e zonas de lazer.

O conhecimento do local é fundamental para se conhecerem as zonas de maior preocupação em caso de galgamento, de modo a proteger pessoas, bens, estruturas e equipamentos. Também é importante conhecer bem as margens, pois o tipo de talude condicionará o caudal galgado sobre essa estrutura.

3. CARATERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

3.1. Modelo SWAN

Para se transferir a agitação marítima desde o largo até próximo da costa utilizou-se o modelo SWAN. Este modelo é um modelo numérico de agitação marítima baseado na equação de ação de balanço espectral de variância (Booij e Holthuijsen, 1999; SWAN Team, 2010) que modela a geração, propagação e dissipação da energia das ondas do mar. O modelo propaga a agitação marítima do largo até junto à costa, tomando em conta quer os fenómenos de geração, dissipação e interação não linear de quatro ondas associados a propagações em águas profundas, quer fenómenos característicos de águas costeiras, tais como, a dissipação devida ao atrito de fundo, a rebentação devida à diminuição da profundidade e por excesso de declividade e a interação não linear de três ondas. A equação de balanço espectral de ação de onda é dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma},$$

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

em que $E(\sigma, \theta)$ é o espectro densidade de energia na frequência relativa σ e direção θ , x e y são os eixos coordenados e c_x e c_y são as velocidades de propagação segundo esses eixos. Os termos c_σ e c_θ são as velocidades de propagação no espectro. A variável tempo é representada por t e S_{tot} é o termo das fontes e sumidouros dado por:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2)$$

em que S_{in} representa o crescimento da onda por ação do vento, S_{nl3} e S_{nl4} são termos representativos dos fenómenos de interações não lineares triplas e quádruplas, respetivamente, $S_{ds,w}$ representa a dissipação por *whitecapping*, $S_{ds,b}$ traduz a dissipação de energia por atrito de fundo e, finalmente, a rebentação induzida pela profundidade é representada pelo termo $S_{ds,br}$.

O modelo SWAN tem como principal limitação o fato de a sua aplicação a zonas confinadas, como portos, baías ou lagos, não ser viável (SWAN Team, 2010), devido à importância dos fenómenos de reflexão aí presentes e que não são tidos em conta no modelo.

3.2. Aplicação do modelo SWAN

A zona em estudo é uma área de 71 km por 38.5 km que engloba toda a ilha de S. Miguel e abrange também zonas suficientemente profundas (cerca de 1500 m), conforme apresentado na batimetria da Figura 2.

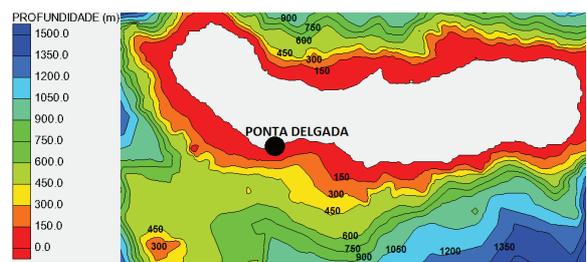


Figura 2 – Batimetria da zona em estudo em volta da ilha de S. Miguel.

Para a aplicação do modelo SWAN, o domínio foi discretizado com duas malhas em elementos quadrangulares (Figura 3). Assim, foi criada uma malha abrangendo a ilha de S. Miguel, com dimensões de 71 km por 38.5 km e espaçamento igual a 500 m nas duas direções, e outra malha na zona de Ponta Delgada, com dimensões de 22.5 km por 13.2 km com elementos de dimensão de 100 m nas duas direções. Assim, obtiveram-se 10934 elementos na malha maior e 27675 elementos na malha menor.

Para ter em conta a influência do vento na agitação foram inseridos no modelo SWAN dados provenientes do modelo de previsão MM5 (Tomé *et al.*, 2005 e Miranda *et al.*, 2005) para o período considerado.

Para ter em conta as ondas do largo que chegam às fronteiras da 1ª malha de cálculo, consideraram-se os parâmetros estimados pelo modelo de 3ª geração e propagação de ondas WAVEWATCH III, WWIII (Tolman, 1999). Este modelo forneceu, a cada 3 horas e para o período estudado, os valores de H_s , T_p e θ .

As simulações do modelo SWAN foram feitas com a versão SWAN 40.72, em modo estacionário e considerando os seguintes aspetos:

- O espectro direcional foi discretizado em 23 intervalos de frequências de 0.04 a 1 Hz, com distribuição logarítmica. A discretização em direção abrange 360°, dividida em 90 intervalos. O espectro do tipo JONSWAP assume os parâmetros obtidos na campanha JONSWAP levada a cabo no Mar do Norte (Hasselmann *et al.*, 1973);
- Nos fenómenos físicos, foi considerada a difração, interação onda-onda tripla (TRLad), rebentação induzida pelo fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), com o atrito de fundo introduzido segundo a expressão semiempírica de JONSWAP.

Os resultados foram obtidos para a proximidade do porto (Ponto P2) e para o local onde se situa a boia-ondógrafo Bond 2 (Ponto P1), com coordenadas (M, P) aproximadas de [612688, 4176198], situada a Oeste de Ponta Delgada a uma profundidade de, aproximadamente, 100 m, conforme apresentado na Figura 4.

Para a zona da boia (Ponto P1), no período em estudo, obtiveram-se as características da agitação apresentadas nos gráficos das Figuras 5, 6 e 7. Nelas comparam-se os valores de H_s , T_p e θ do modelo numérico SWAN com os valores medidos na boiaondógrafo e com as previsões fornecidas pelo WWIII nas fronteiras do 1º domínio de cálculo do modelo SWAN.

Pelas figuras anteriores verifica-se que, no geral, em termos de altura significativa e de período de pico, o

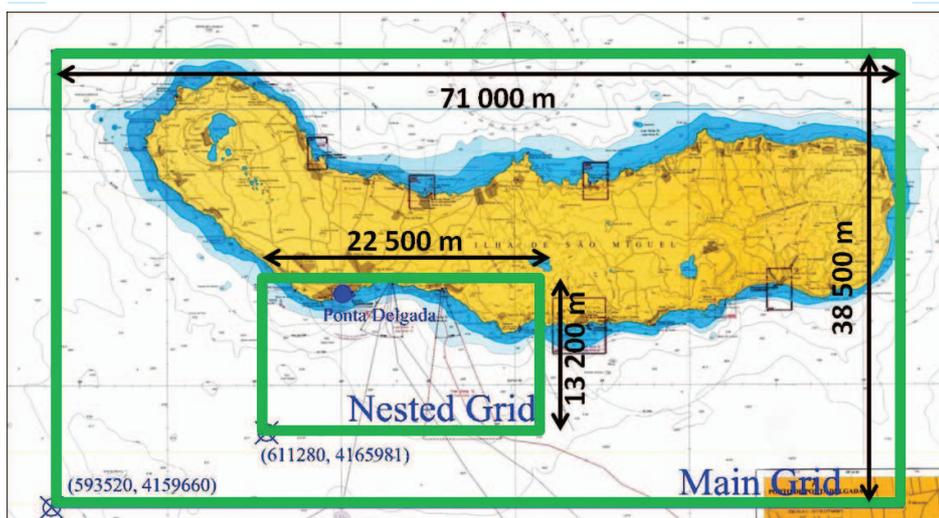


Figura 3 – Localização das malhas do modelo SWAN.

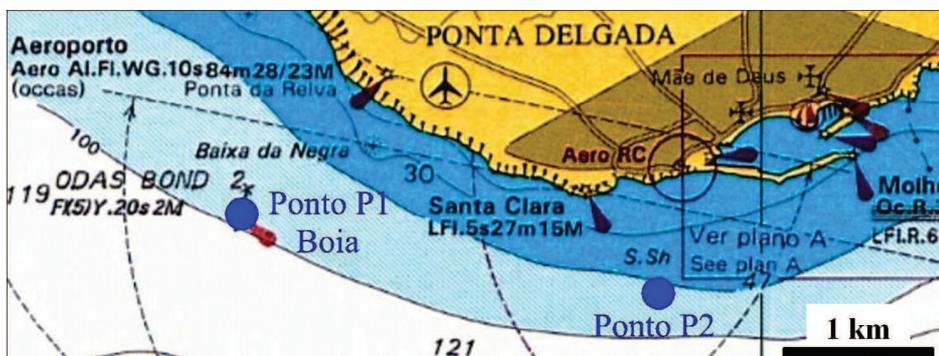


Figura 4 – Locais onde se pretendem resultados do modelo SWAN.

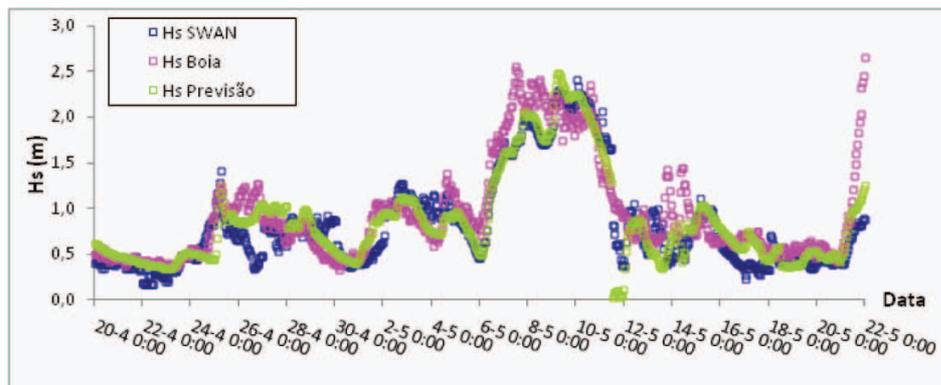


Figura 5 – Comparação da altura significativa H_s entre os dados da boia-ondógrafo, os resultados do modelo numérico SWAN e as previsões do modelo WWIII.

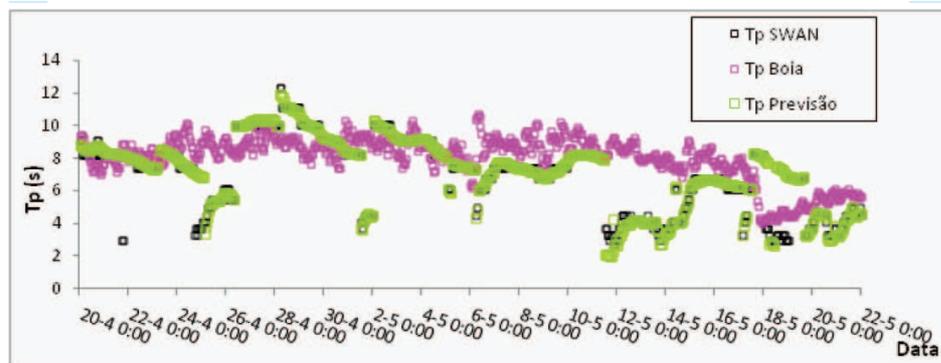


Figura 6 – Comparação do período de pico T_p entre os dados da boia-ondógrafo, os resultados do modelo numérico SWAN e as previsões do modelo WWIII.

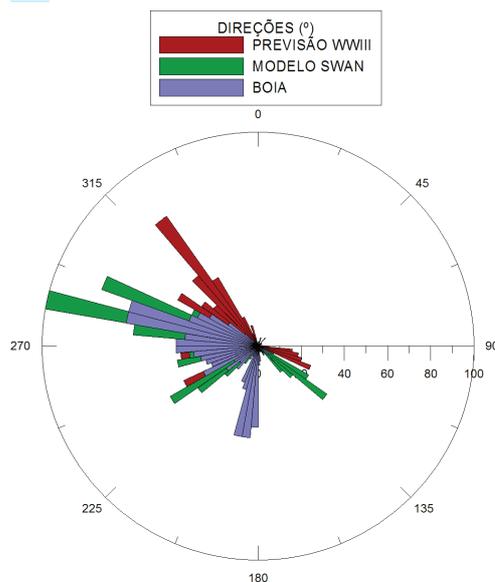


Figura 7 – Comparação da direção θ entre os dados da boia-ondógrafo, os resultados do modelo numérico SWAN e as previsões do modelo WWIII.

modelo numérico SWAN se aproxima bastante bem dos valores medidos pela boia-ondógrafo. No entanto, para o parâmetro da direção, verificam-se diferenças significativas, as quais, segundo um breve estudo estatístico realizado, apresentam em média 34° de diferença entre os resultados do modelo numérico e os dados medidos *in situ*, podendo chegar a diferenças máximas de 172° (Quadro 1).

Em relação ao local próximo do porto de Ponta Delgada (Ponto P2), os resultados são apresentados nas Figuras 8, 9 e 10.

Os resultados do modelo SWAN para a proximidade do porto (Ponto P2) são valores próximos dos valores obtidos para a zona da boia. Em termos de altura significativa, obteve-se uma média de 0.72 m com alturas máximas de 2.25 m. O período de pico variou entre 2.4 s e 12.3 s, sendo em média de 6.7 s. A agitação vem essencialmente de oeste e sudoeste, com alguma agitação vinda também de sudeste.

Quadro 1 – Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições da boia.

DIFERENÇA	Máximo	Média	Desvio Padrão
Altura H_s (m)	1.77	0.23	0.22
Período T_p (s)	6.5	1.8	1.4
Direção média θ (°)	172	34	36

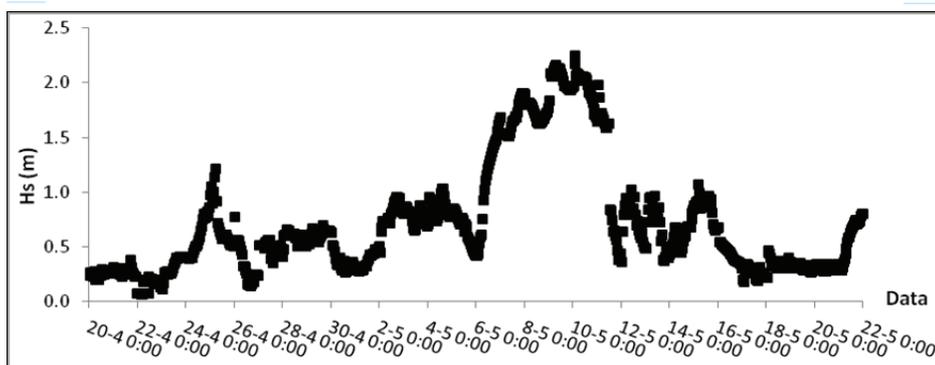


Figura 8 – Altura significativa H_s no Ponto P2 em frente ao porto de Ponta Delgada.

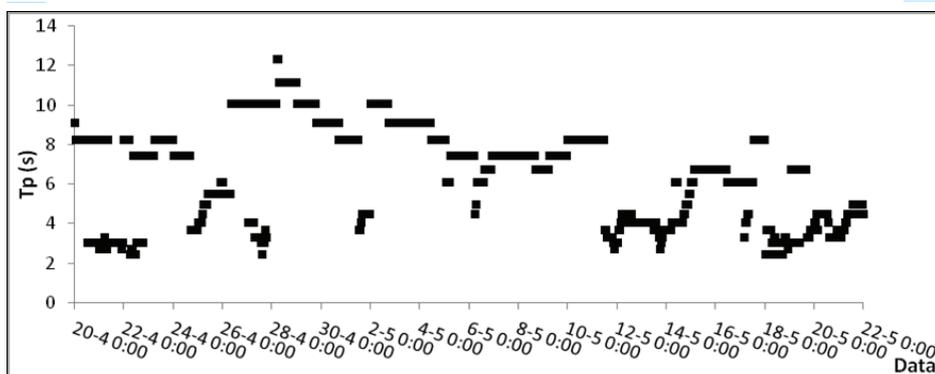


Figura 9 – Período de pico T_p no Ponto P2 em frente ao porto de Ponta Delgada.

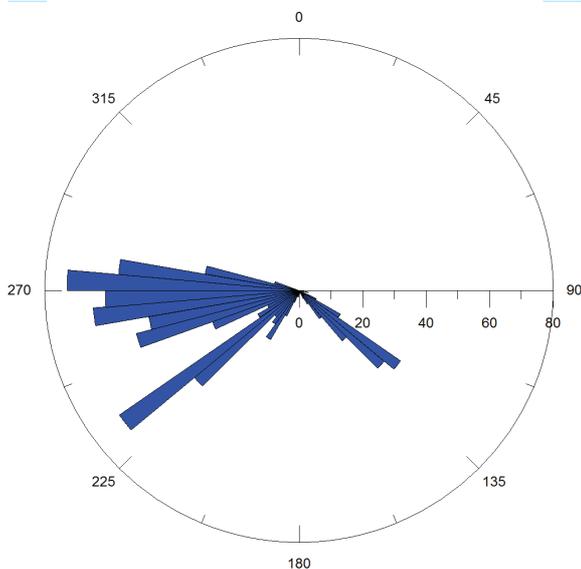


Figura 10 – Direção média θ no Ponto P2 em frente ao porto de Ponta Delgada.

3.3. Modelo DREAMS

Considerando que o modelo SWAN não deve ser aplicado em zonas confinadas, como é o caso do

interior de portos, recorreu-se ao modelo DREAMS para propagar a agitação desde a proximidade do porto de Ponta Delgada (Ponto P2) até ao seu interior. Este modelo baseia-se na equação de declive suave para ondas monocromáticas:

$$\nabla(C C_g \nabla \eta) + k^2 C C_g \eta = 0 \quad (3)$$

com

$$C = \frac{w}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$$

$$C_g = \frac{1}{2} C \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$$

em que C é a velocidade de fase, C_g é a velocidade de grupo, ω é a frequência angular e h é a profundidade local. A aceleração gravítica é representada por g , η é a elevação da superfície da água e k é o número de onda. Contudo, este modelo está limitado a declives de fundo suaves (até 1/3), além de ser um modelo linear, pelo que as interações não lineares entre ondas e correntes não são tidas em conta.

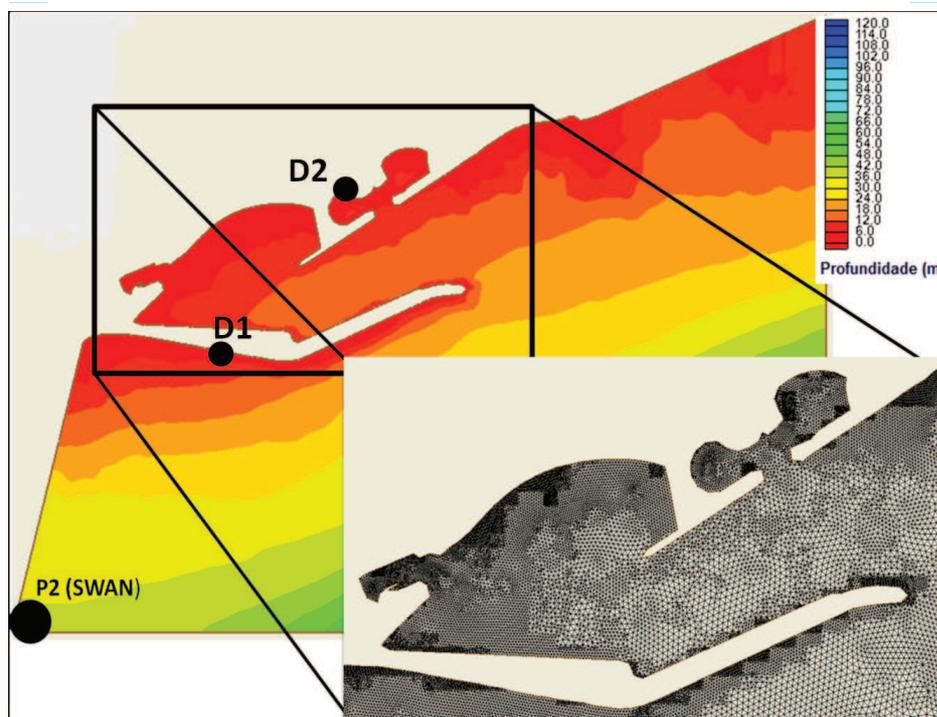


Figura 11 – Batimetria do interior do porto e envolvente exterior e pormenor de parte da malha gerada.

3.4. Aplicação do modelo DREAMS

A aplicação do modelo DREAMS pressupõe a discretização da zona de estudo por uma malha de elementos finitos, a identificação dos diferentes tipos de fronteira e o estabelecimento das condições de agitação marítima à entrada do domínio de cálculo.

Para a geração da malha de elementos finitos recorreu-se ao *software* GMALHA (Pinheiro *et al.*, 2008) criando uma malha de 94568 elementos triangulares de tamanho variável e 48280 nós. Refira-se ainda que a batimetria de base foi fornecida pela CONSULMAR - Projectistas e Consultores Lda. (Figura 11).

Em relação às condições de fronteira, consideraram-se condições de reflexão parcial ao longo de todas as margens que constituem a bacia portuária. O coeficiente de reflexão variou consoante as características quer da agitação marítima, quer das estruturas que integram essas margens. Quanto às fronteiras de mar, para a agitação vinda do quadrante sudeste consideram-se fronteiras de entrada a este e a sul e condição de saída a oeste; para a agitação vinda do quadrante sudoeste, considerou-se entrada da agitação pelas fronteiras sul

e oeste e saída pela fronteira este.

A agitação marítima incidente é definida com base na agitação calculada no Ponto P2, Figuras 8, 9 e 10. Os cálculos foram realizados para os níveis de maré médio (NM=1 m ZH) e máximo (NM=2 m ZH) com uma sobrelevação de 0.40 m, associada à passagem de depressões atmosféricas e/ou à ação continuada de ventos fortes de mar para terra. Este valor de sobrelevação encontra-se dentro da gama de valores usualmente considerada em projeto de obras marítimas nos Açores.

Os resultados com o modelo DREAMS foram obtidos em todo o domínio de cálculo, incluindo nos pontos em frente ao molhe principal (Ponto D1) e à zona das piscinas naturais (Ponto D2), uma vez que no tardoz do molhe existem os serviços da alfândega e cais comercial, com grande circulação de bens materiais, e nas piscinas naturais pela circulação de pessoas na zona. Nas Figuras 12, 13 e 14 apresentam-se, respetivamente, os valores de altura significativa H_s , de período de pico T_p e de direção média θ nesses dois pontos.

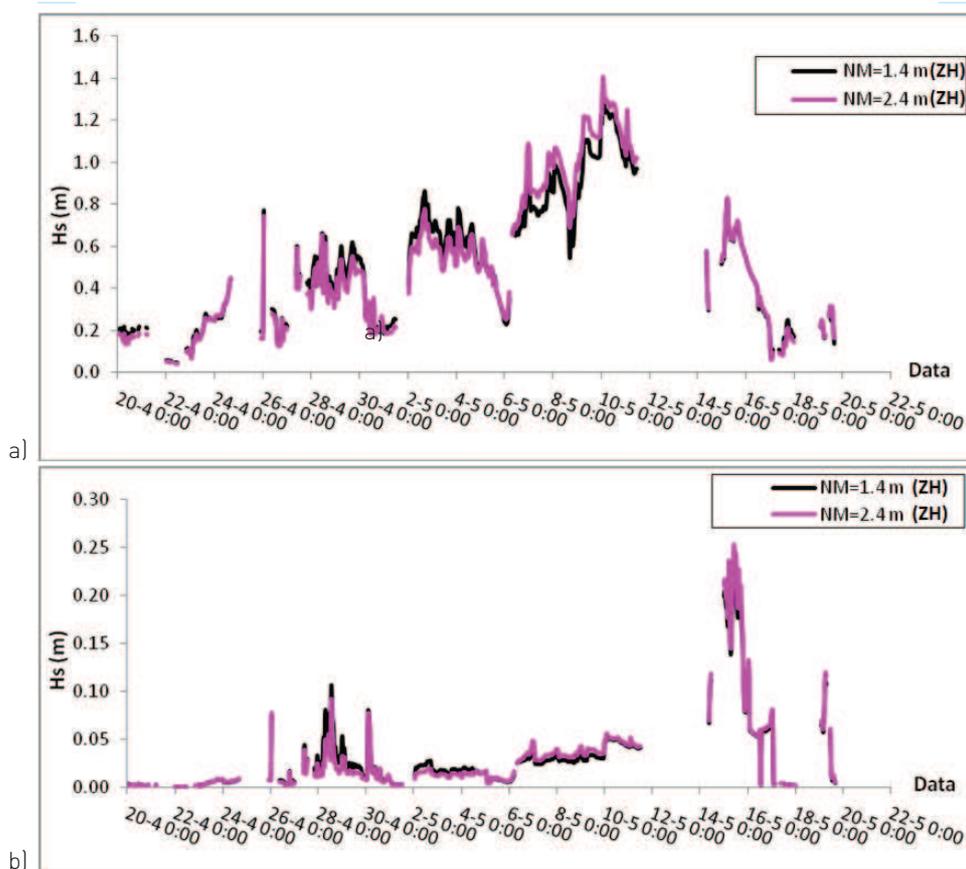


Figura 12 – Altura significativa H_s : a) Ponto D1; b) Ponto D2.

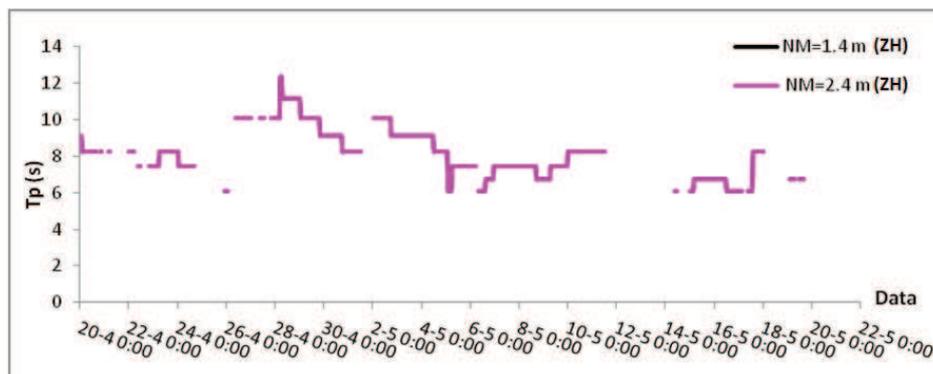


Figura 13 – Período de pico T_p nos pontos D1 e D2.

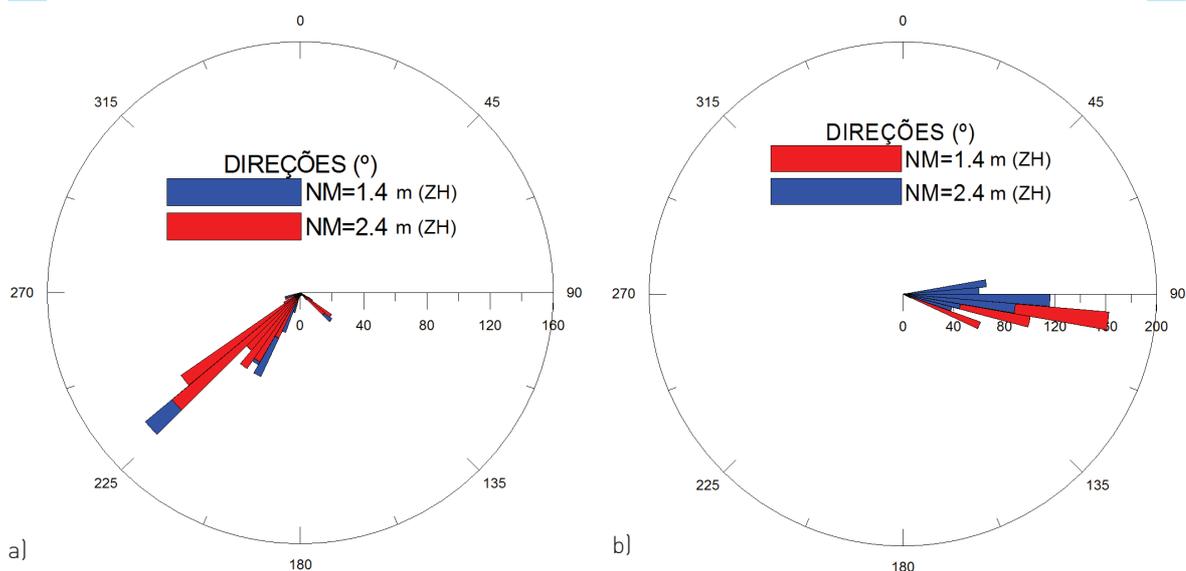


Figura 14 – Direção média θ : a) Ponto D1; b) Ponto D2.

Observa-se que a agitação é mais intensa na zona do molhe, tal como seria expectável, atingindo uma altura significativa máxima de, aproximadamente, 1.5 m para o nível de 2.4 m (ZH). Tendo em conta que o modelo DREAMS é linear, o período é igual para qualquer ponto do domínio (Figura 13). As direções, no exterior (Ponto D1) vêm essencialmente de sudoeste, enquanto no seu interior (Ponto D2), devido aos fenómenos de reflexão e difração, acaba por vir de leste.

4. ESTUDO DE GALGAMENTOS

4.1. Ferramenta NN_OVERTOPPING2

Redes neuronais são ferramentas matemáticas de modelação e identificação de sistemas físicos para os quais é difícil perceber o papel das variáveis de entrada (por exemplo, as características geométricas do perfil da estrutura e os parâmetros definidores do estado de agitação incidente naquele perfil) no comportamento

do sistema (no caso, o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura). No entanto as premissas que explicam o processo são simples, tirando partido essencialmente do esforço computacional para resolver equações e algoritmos matemáticos. Partindo de conceitos associados ao funcionamento do cérebro, a aplicação de tais ferramentas a um conjunto suficientemente extenso de “pares” (variáveis de entrada, variáveis de saída) permite encontrar as conexões entre as variáveis de entrada que originam os valores observados das variáveis 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 baseada em redes neuronais e desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH (Coeveld *et al.*, 2005). Esta ferramenta processa os resultados produzidos por 700 redes neuronais fornecendo o valor médio, q , e intervalos de confiança daquela amostra de resultados. Para além destes parâmetros estatísticos do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, a ferramenta também estima o caudal médio galgado esperado no protótipo, i.e., o valor de q corrigido para ter em linha de conta alguns efeitos de escala e de modelo.

Cada uma daquelas redes neuronais foi “treinada” e “testada” utilizando um conjunto de dados obtido por um procedimento de amostragem “bootstrapping” aplicado aos pares (valores de entrada, caudal

médio galgado) contidos numa base de dados de 8400 valores de ensaios em modelo físico reduzido. Aquela base de dados contém informação de testes efetuados em vários laboratórios incluindo, para cada teste, informação relativa ao comportamento de vários parâmetros hidráulicos (por exemplo: características das ondas incidentes e medições dos caudais galgados), assim como a informação relativa às estruturas em estudo. A base de dados criada inclui ainda informação geral sobre a fiabilidade do teste e a complexidade das estruturas. Assim, tal como qualquer ferramenta neuronal, a NN_OVERTOPPING2 é uma ferramenta empírica, pois tem como base um conjunto alargado de testes em modelo físico, limitando assim o cálculo do galgamento à gama de geometrias de estruturas estudadas e às condições de onda presentes nos ensaios em modelo físico que lhe deram origem. A fiabilidade dos seus resultados depende fortemente da qualidade e da quantidade de dados que tem disponíveis.

Todas as 700 redes neuronais têm a mesma configuração e utilizam os mesmos 15 parâmetros de entrada que incluem informação sobre a agitação marítima e a geometria da estrutura (Figuras 15 e 16), o que lhes confere uma maior flexibilidade que outras ferramentas empíricas de cálculo do galgamento (e.g. fórmulas empíricas).

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), i.e. o ângulo entre a direção da onda incidente e a normal ao talude.

Para descrever a forma geométrica da estrutura, são considerados os restantes 12 parâmetros (Figura 15): a profundidade da água em frente à estrutura (h), a

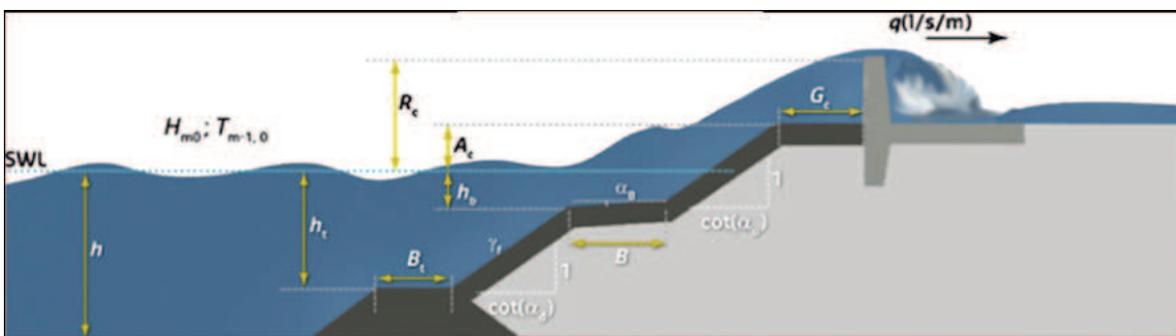


Figura 15 – Parâmetros de entrada da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (http://nn_overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx).

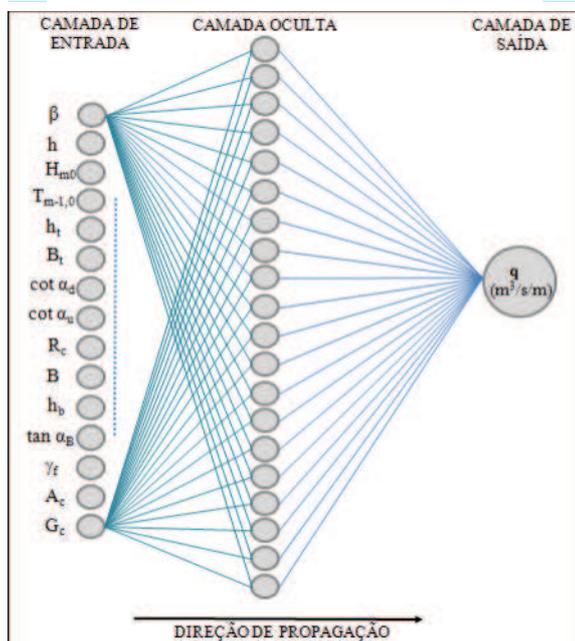


Figura 16 – Configuração das redes neuronais em que se baseia a ferramenta NN_OVERTOPPING2.

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_f), 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).

4.2. Aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2

Para as duas estruturas estudadas, molhe principal e zona das piscinas, as variáveis relevantes destas secções para o cálculo do galgamento através da ferramenta NN_OVERTOPPING2 encontram-se indicadas nos Quadros 2 e 3 e baseiam-se nas figuras das respectivas secções, Figuras 17 e 18. Os resultados da agitação marítima nos Pontos D1 e D2 (apresentados na secção 3.4) foram introduzidos na ferramenta NN_OVERTOPPING2 de modo a calcular o galgamento nestas secções. Neste trabalho, os caudais médios galgados, q , foram calculados assumindo os níveis de maré médio (NM=1 m ZH) e máximo (NM=2 m ZH), com uma sobrelevação de 0.40 m.

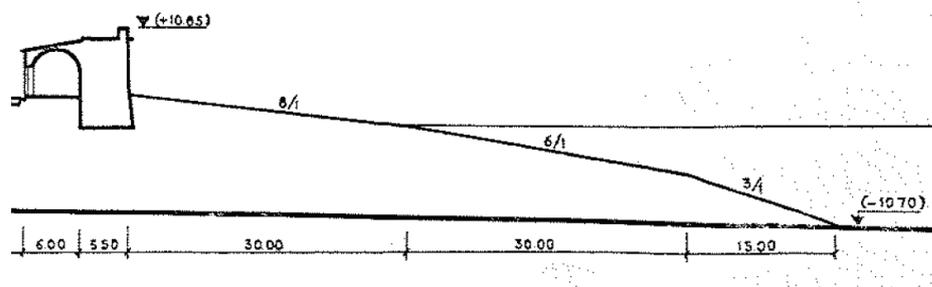


Figura 17 – Secção transversal do molhe principal na zona em estudo (cotas referentes ao ZH).

Quadro 2 – Parâmetros geométricos do perfil do molhe principal.

NM (m ZH)	h_t (m)	B_t (m)	γ_f (-)	$\cot \alpha_d$ (-)	$\cot \alpha_u$ (-)	R_c (m)	B (m)	h_b (m)	$\tan \alpha_b$ (-)	A_c (m)	G_c (m)	h (m)
1.4	12.1	0.00	0.4	6.0	8.0	9.25	0.00	0.70	0.0	3.05	0.00	12.10
2.4	13.1	0.00	0.4	6.0	8.0	8.25	0.00	1.70	0.0	2.05	0.00	13.10

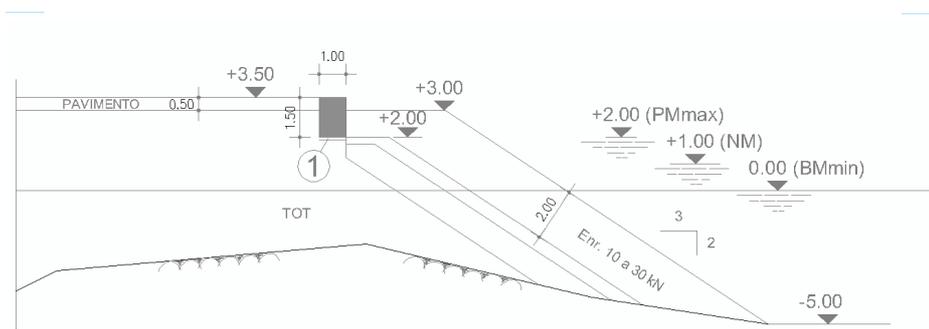


Figura 18 – Secção transversal da retenção junto às piscinas naturais (cotas referentes ao ZH).

Quadro 3 – Parâmetros geométricos do perfil da retenção junto às piscinas naturais.

NM (m ZH)	h_t (m)	B_t (m)	γ_f (-)	$\cot \alpha_d$ (-)	$\cot \alpha_u$ (-)	R_c (m)	B (m)	h_b (m)	$\tan \alpha_b$ (-)	A_c (m)	G_c (m)	h (m)
1.4	6.40	0.00	0.5	1.5	1.5	2.10	0.00	0.00	0.0	1.60	3.66	6.40
2.4	7.40	0.00	0.5	1.5	1.5	1.10	0.00	0.00	0.0	0.60	3.66	7.40

Note-se que o parâmetro β , que varia entre 68° e 90° no período considerado, é determinante na zona das piscinas, pois devido à configuração da estrutura neste local, a agitação incidente é essencialmente tangencial ao seu talude, tornando o galgamento pouco provável e, em alguns casos, impossível de estimar com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 (fora da sua gama de aplicabilidade). Além disso, a agitação marítima na zona das piscinas apresenta valores de altura significativa muito baixos, de cerca de 0,25 m (Figura 12b), quando comparados com as características da secção transversal da retenção (Figura 18) e com os níveis de maré analisados. Por conseguinte, este trabalho concentrou-se no estudo de galgamentos no molhe principal do porto.

Para as condições de agitação marítima em frente ao molhe principal (Ponto D1) e as características geométricas da secção do molhe atrás descritas, os cálculos com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 permitiram obter os valores dos caudais médios galgados, q , correspondentes à secção do molhe localizada em frente ao Ponto D1. Contudo, os valores de q encontrados sugerem que, para o período considerado, não houve qualquer ocorrência de galgamentos. Tal é consequência da agitação marítima apresentar valores de altura significativa baixos, de cerca de 1,5 m (Figura 12a) para o molhe principal, o que não origina a ocorrência de galgamentos.

Perante uma agitação marítima tão reduzida neste período, decidiu-se testar, a título ilustrativo, valores

de agitação frequentes em situações de tempestade nos Açores (Esteves *et al.*, 2009), assumindo que estes valores correspondem a resultados de agitação provenientes da aplicação dos modelos numéricos de propagação de ondas, em frente ao molhe principal. Esta agitação foi caracterizada por alturas significativas de 6 m, 7 m, 8 m e 9 m, com um período médio associado de 12 s, e testou-se a direção mais frequente, vinda de sudoeste (225°), e a direção normal à estrutura, vinda de sul-sudoeste (187°). As condições de agitação e resultados correspondentes em termos de caudal médio galgado por metro linear do molhe encontram-se apresentados no Quadro 4.

Verifica-se que para alturas de onda entre 6 a 9 m, ocorrem caudais médios galgados compreendidos entre, aproximadamente, 1 e 9 l/s/m. Segundo os limites admissíveis de galgamento recomendados em (Pullen *et al.*, 2007), estes caudais não põem em causa a segurança estrutural do molhe, a integridade dos navios acostados no cais e dos veículos que nele se desloquem a baixa velocidade. No entanto, estão no limite de segurança para pessoas, podem causar danos em equipamento existente no cais e danos exteriores no edifício dos serviços da alfândega. Verifica-se também que, tal como seria de esperar, o galgamento é agravado para condições em que a agitação é normal à estrutura ($\beta=0^\circ$).

Quadro 4 – Galgamentos no molhe principal em situações de tempestade.

H_s (m)	T_p (s)	θ (°)	β (°)	q (l/s/m)
6	12	225	38	1.19
7	12	225	38	2.40
8	12	225	38	4.20
9	12	225	38	6.62
6	12	187	0	1.34
7	12	187	0	2.80
8	12	187	0	5.16
9	12	187	0	8.60

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste trabalho descreve-se a aplicação de uma metodologia para caracterizar a agitação marítima, através de modelos numéricos de propagação de ondas desde o largo até ao interior do porto de Ponta Delgada, e para calcular, com recurso a uma ferramenta baseada na análise de redes neuronais, o respetivo galgamento em frente a duas estruturas nesse porto: o molhe principal e a retenção junto às piscinas naturais.

Do ponto de vista dos modelos de propagação utilizados, o modelo SWAN apresenta valores próximos da realidade em termos de altura significativa H_s e período de pico T_p . Contudo, a direção θ apresenta diferenças significativas, pelo que o modelo carece ainda de calibração para este parâmetro. Em relação ao modelo DREAMS, não existem dados reais para comparação, pelo que seria necessário efetuar medições *in situ* para poder calibrar o modelo. Para além disso, o modelo DREAMS é um modelo linear, pelo que é recomendável, em desenvolvimentos futuros, a comparação com resultados de um modelo não-linear, para condições de águas pouco profundas, de modo a estimar qual a influência das interações não lineares.

Por outro lado, verifica-se que o período de dados de agitação marítima disponível é muito curto e caracterizado por valores de alturas de onda significativa muito baixos. Consequentemente, não ocorrem

galgamentos neste período, quer numa estrutura, quer noutra. Para obviar esta situação, recorreu-se, a título ilustrativo, a valores de agitação frequentes em situações de tempestade nos Açores (Esteves *et al.*, 2009), nomeadamente alturas significativas entre 6 e 9 m, com um período médio de 12 s, assumindo que estes valores correspondem a resultados de agitação provenientes da aplicação dos modelos numéricos de propagação de ondas, em frente ao molhe principal e à zona das piscinas naturais. No molhe principal do porto verifica-se que ocorrem caudais médios galgados compreendidos entre, aproximadamente, 1 e 9 l/s/m. Segundo os limites admissíveis de galgamento recomendados em (Pullen *et al.*, 2007), estes caudais não põem em causa a segurança estrutural do molhe, a integridade dos navios acostados no cais e dos veículos que nele se desloquem a baixa velocidade. No entanto, estão no limite de segurança para pessoas, podem causar danos em equipamento existente no cais e danos exteriores no edifício dos serviços da alfândega. Verifica-se também que, tal como seria de esperar, o galgamento é agravado para condições em que a agitação é normal à estrutura. Na zona das piscinas, dada a agitação ser praticamente tangencial à retenção marginal, os galgamentos obtidos são nulos.

Com este estudo pretendeu-se ilustrar a aplicação da metodologia ao porto de Ponta Delgada, servindo de base para estudos mais aprofundados. Contudo, recomenda-se que em futuros estudos se utilize uma base de dados de agitação marítima de maior extensão, com pelo menos alguns anos de duração, para que seja expetável a ocorrência de galgamentos.

Para um estudo mais alargado (para um maior período temporal), recomenda-se uma avaliação do risco de galgamento. Este estudo não faria sentido neste trabalho, uma vez que a agitação é reduzida e o período de dados demasiado curto. Recomenda-se ainda o estudo de galgamento noutros locais dentro do porto e na sua envolvente, de modo a que, juntamente com um estudo de avaliação do risco ao galgamento, se elaborem mapas de risco, que constituem ferramentas úteis no apoio à decisão da gestão e planeamento da zona portuária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Portos dos Açores toda a ajuda prestada durante este trabalho na disponibilização de informação geral sobre o porto e atividades portuárias e fotografias. Agradecem também aos projetos CLIMAAT e MacSIMAR (FEDER-INTERREG_IIB, Mac/2.3/A3, 03/Mac/2.3/A5; FEDER-MAC-Mac/1/A089) a utilização dos dados de agitação

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

BIBLIOGRAFIA

- Booij, N., Holthuijsen, L. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation". *Journal of Geophysical Research*, 104, pp. 7649-7666.
- Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A., Posueta, B. (2005). "Neural Network Manual NN_OVERTOPPING2". CLASH Workpackage 8, WL/ Delft Hydraulics, Report, 38p., Delft, Netherlands.
- Esteves, R., Valente, A., Costa, M., Reis, F., Azevedo, E. (2009). "Dados Direccionais de Agitação Marítima nos Açores (Projecto CLIMAAT-CLIMA e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos)". Comunicação, Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa e Centro do Clima, Meteorologia e Mudanças Globais da Universidade dos Açores.
- Fortes, C.J.E.M. (1993). "Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kriseman, P., Meerburg, A., Müller, D., Olbers, K., Sell, W., Walden, H. (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)". *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, A8 (12).
- Miranda, P.M.A., Ferreira, J., Costa, P., Ramalho, C., Tomé, R., Antunes, C. (2005). "Projectos com MM5". 2ª Reunião da Rede Ibérica, Lisboa, Portugal.
- Neves, D.R.C.B., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Reis, M.T., Rodrigues, S. (2010). "Avaliação do risco para a navegação utilizando o sistema GUIOMAR. O caso de Sines". MyESIC2010, Associação portuguesa de utilizadores de sistemas de informação geográfica (USIG), Oeiras, 10 a 12 de fevereiro.
- Neves, D.R.C.B., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A. (2012). "Avaliação do risco de galgamento no posto 2 do molhe oeste do porto de Sines". 11º Congresso da Água, APRH, Porto, 6 a 8 de fevereiro.
- Pinheiro, L.V., Fortes, C.J.E.M., 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 o Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 24, pp. 369-391.
- 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*, August. ISBN 978-3-8042-1064-6.
- Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Neves, D.R.C.B., Vieira, A.S. (2011). "Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta". *Proc. VI Congresso Sobre Planeamento e Gestão de Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde*, 4 a 8 de abril, CD-ROM.
- Rocha, T.S. (2012). "Avaliação do galgamento de estruturas portuárias. Aplicação ao porto da Praia da Vitória, Açores". *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto*.
- 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 Protecção Marginal da Baía". 7ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Porto, 6 e 7 de outubro.
- Silva, E., Santos, J.A., Reis, M.T. (2011). "Porto da Praia da Vitória. Estimativa dos Galgamentos da Protecção Marginal da Baía". 7ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Porto, 6 e 7 de outubro.
- SWAN Team (2010). "SWAN: Scientific and Technical Documentation" – SWAN Cycle III version 40.85. Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology, Netherlands.
- Tolman, H. (2002). "User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III" – version 2.22, N.O.A.A., National Centers for Environmental Prediction, OMB Technical Note 222, Camp Springs, MD, U.S.A..
- Tomé, R., Ramalho, C., Ferreira, J. P., Miranda, P. M. A. (2005). "Previsão do Tempo nos Açores com Modelos de Alta Resolução". 4º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Sesimbra, Portugal.