AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE FERRAMENTAS NEURONAIS APLICAÇÃO À PRAIA DA VITÓRIA, TERCEIRA, AÇORES

RUI DE ALMEIDA REIS[1], CONCEIÇÃO JUANA FORTES[2], MARIA TERESA REIS[3], PEDRO POSEIRO[4], JOÃO ALFREDO SANTOS[5]

RESUMO

Neste trabalho, descreve-se a aplicação ao porto e baía da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores, Portugal, da metodologia de avaliação do risco de galgamentos em estruturas marítimas em desenvolvimento no LNEC, considerando duas ferramentas neuronais para cálculo dos galgamentos baseadas em resultados da aplicação de redes neuronais artificiais, nomeadamente a ferramenta NN_*Overtopping2* e a *Overtopping Predictor* v1.1. Em particular, avalia-se comparativamente quais as implicações que a utilização de cada uma destas ferramentas tem em termos de número de eventos de galgamento e magnitude dos caudais médios galgados, bem como consequente grau de risco, para as 9 secções-tipo de estruturas marítimas estudadas no porto e baía da Praia da Vitória. O período de estudo é de 5 anos (2008 a 2012).

PALAVRAS-CHAVES: FERRAMENTAS NEURONAIS. GALGAMENTOS. NN_*OVERTOPPING2*. *OVERTOPPING PREDICTOR* V1.1. PORTO. PRAIA DA VITÓRIA. RISCO.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL TOOLS APPLICATION TO PORT OF PRAIA DA VITÓRIA, TERCEIRA, AÇORES

ABSTRACT

This work describes an application to the Port of *Praia da Vitória* (*Terceira,* Azores, Portugal) of the methodology for the wave overtopping risk assessment on maritime structures, which has been developed by LNEC. Two neural tools are considered to calculate overtopping discharges based on the application of artificial neural networks: NN_Overtopping2 and Overtopping Predictor v1.1. In particular, a comparative analysis between the results of each neural tool regarding the number of overtopping events and magnitude of average discharge flow was performed, as well as the consequent risk level for the 9 representative sections of *Praia da Vitória* Port maritime structures. A 5-year period was studied (from 2008 to 2012).

KEYWORDS: RISK. OVERTOPPING. NEURAL TOOLS. NN_OVERTOPPING2. OVERTOPPING PREDICTOR V1.1. PORT. *PRAIA DA VITÓRIA*.

[1] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Mestre em Engenharia da Energia do Ambiente, rreis@lnec.pt
[2] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Doutora em Engenharia Mecânica, jfortes@lnec.pt
[3] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Doutora em Engenharia Civil, treis@lnec.pt
[4] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Doutorando em Engenharia Civil, pposeiro@lnec.pt
[5] Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Doutor em Matemática Aplicada, jasantos@dec.isel.pt

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

A determinação dos galgamentos de estruturas marítimas em zonas portuárias e costeiras é um assunto de elevada importância para a avaliação, quer do risco de falha das próprias estruturas, quer dos riscos associados à inundação das zonas por estas protegidas. No âmbito das atividades portuárias, a preocupação com o galgamento de estruturas marítimas resulta dos prejuízos que lhe podem estar associados: inoperacionalidade do posto de acostagem, danos nos equipamentos ou edifícios protegidos pelas estruturas galgadas, danos em navios amarrados, ferimentos em pessoas que em último caso podem levar à perda de vida.

Por essa razão, considera-se importante dotar as autoridades nacionais de um sistema de previsão e alerta que, com a devida antecedência, informe da possibilidade de ocorrência de situações de emergência e permita a adoção por essas entidades de medidas para evitar vítimas e minimizar prejuízos económicos e ambientais. Além disso, é importante que esse sistema seja também uma ferramenta de gestão a longo prazo, permitindo simular cenários futuros que considerem as mudanças provocadas pelas alterações climáticas, nomeadamente o aumento do nível médio das águas do mar e a ocorrência de fortes tempestades. Só deste modo, é possível fazer um planeamento e gestão integrada e sustentada das zonas portuárias e costeiras.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, tem vindo a desenvolver uma metodologia para avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos em estruturas marítimas [6,11,12,14,15,16], com o objetivo final de criar um sistema de previsão e alerta em tempo real e, consequentemente, uma ferramenta de gestão e planeamento para as zonas portuárias e costeiras. Esta metodologia consiste em:

- Definir o regime de agitação marítima incidente nas estruturas portuárias recorrendo a dados obtidos *in situ* e/ou a resultados de modelos numéricos de propagação de ondas, tais como *WaveWatch* III [18], *SWAN* [2] e/ou *DREAMS* [5];
- Calcular a resposta da estrutura em termos de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, com a utilização da ferramenta baseada em resultados da aplicação de redes neuronais artificiais (ferramenta neuronal) NN_*Overtopping2* [4], desenvolvida no âmbito do Projeto Europeu CLASH, e/ou de fórmulas empíricas;

- Calcular o grau de risco associado à ocorrência de galgamentos acima de um determinado caudal médio pré-definido para cada estrutura, em função do tipo de estrutura galgada e das atividades e bens por ela protegidos.

A aplicação da metodologia já foi efetuada a vários portos portugueses, como é o exemplo do porto de Sines [7] e dos portos da Praia da Vitória [9] e de Ponta Delgada [8], ambos localizados nos Açores. Nas diferentes aplicações, utilizou-se a ferramenta neuronal NN_*Overtopping*2. No entanto, devido a limitações inerentes à própria ferramenta, constatou-se que existia um conjunto de situações em que a ferramenta não fornecia valores de caudal médio galgado para situações onde realmente se verificava a sua existência e, consequentemente, não era possível considerá-los para cálculo do grau de risco.

Para colmatar tal limitação, julgou-se interessante testar outra ferramenta neuronal, desenvolvida separadamente da anterior e mais abrangente no cálculo dos galgamentos de estruturas marítimas, e avaliar comparativamente, face à NN_*Overtopping*2, os resultados, quer em termos de número de eventos de galgamento e magnitude desses eventos, quer em termos de grau de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis e de grau de risco. O caso de estudo foi o porto e baía da Praia da Vitória.

A ferramenta neuronal considerada foi a *Overtopping Predictor* v1.1, desenvolvida por Verhaeghe [19] na Universidade de Gent (Bélgica), em paralelo com o Projeto Europeu CLASH, cujos resultados têm provado ser mais adequados à realidade. Com efeito, em Bravo; Reis; Santos [3] compararam-se estas duas ferramentas neuronais, em termos de caudal médio galgado, para uma secção do molhe oeste do porto de Sines, em frente ao posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto. Esta comparação foi efetuada também com resultados obtidos em modelo físico. Concluiu-se que as ferramentas estimam valores de galgamento bastante próximos dos valores observados no modelo físico, sendo essa concordância mais visível para os caudais médios galgados mais elevados. Para os caudais médios galgados mais reduzidos, os quais são muitas vezes condicionantes do ponto de vista da utilização da estrutura e das áreas circundantes, as ferramentas nem sempre são capazes de calcular galgamentos, limitadas pelo seu domínio de aplicabilidade. De qualquer forma, verifica-se que nessa situação, quando as ferramentas calculam os caudais médios galgados, estes tendem a ser superiores aos medidos. Ao contrário da ferramenta NN_*Overtopping*2, a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 é capaz de identificar estados de agitação incidentes na estrutura que originam galgamentos nulos. Além disso, as previsões de galgamento da ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 foram, na

maior parte dos casos, mais próximas das medições no modelo físico reduzido do que aquelas estimadas pela NN_*Overtopping2*.

1.2 Caso de estudo – O Porto e Baía da Praia da Vitória

O porto e a baía da Praia da Vitória localizam-se na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores, Portugal (FIGURA 1). A baía, limitada a norte pela Ponta da Má Merenda e a sul pela Ponta do Espírito Santo, tem cerca de 2400 m de comprimento e 1100 m de largura máxima.

Enraizado na Ponta da Má Merenda e com a direção norte-sul, encontra-se o chamado quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a dar abrigo às instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes (Estruturas portuárias 2). O quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, encontra-se enraizado no lado sul da baía, para abrigar o Cais 12 e as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas do porto da Praia da Vitória (Estruturas portuárias 1). A linha de costa da baía caracteriza-se pela existência de uma defesa frontal aderente com cerca de 1 km de comprimento e de um campo de cinco esporões na zona central que enraízam na defesa frontal. Existem algumas praias ao longo da baía, onde se destaca a Praia Grande, no lado norte. Junto a esta praia encontra-se uma marina com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio.



Figura 1: Fotografia aérea do Porto e baía da Praia da Vitória.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Metodologia de Avaliação de Risco

A metodologia utilizada para a avaliação do risco da ocorrência de galgamentos de estruturas marítimas, em desenvolvimento no LNEC, contempla três etapas principais: I – Caracterização da agitação marítima; II – Cálculo do galgamento; III - Avaliação do Risco. Nas seguintes subsecções, apresenta-se uma breve descrição de cada uma dessas etapas, dando especial destaque à etapa II – Cálculo do galgamento, explicando-se o uso de ferramentas neuronais.

2.1.1 Etapa 1 – Características da agitação marítima

O objetivo deste módulo é a determinação das características da agitação marítima na zona em estudo (zonas portuárias ou costeiras) em termos de altura de onda significativa (Hs), período de onda (médio, Tm, ou de pico, Tp) e direção média (Dir_p). Essas características de agitação marítima podem ser obtidas com base em longas séries temporais fornecidas ao largo da zona em estudo por modelos numéricos de previsão da agitação marítima à escala regional, como é o caso do modelo *WaveWatch* III [18]. Com base nestas estimativas da agitação marítima são aplicados outros modelos numéricos para a propagação da agitação marítima desde o largo até junto à costa ou até ao interior de uma zona abrigada ou portuária.

2.1.2 Etapa 2 – Cálculo do galgamento

A avaliação dos galgamentos pode ser efetuada com recurso a modelos físicos, modelos numéricos, fórmulas empíricas ou ferramentas neuronais. De acordo com a metodologia de avaliação de risco em desenvolvimento no LNEC, são usadas, neste trabalho, duas ferramentas neuronais para estimar galgamentos em estruturas do tipo quebra-mar de talude e defesa frontal aderente em talude, quando nelas incide um estado de agitação marítima: a ferramenta NN_*Overtopping*2 [4] e a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 [19].

A primeira ferramenta utiliza os resultados produzidos por 700 redes neuronais para estimar o valor médio do caudal médio galgado, bem como de outros parâmetros estatísticos daquela amostra de 700 valores. Na segunda ferramenta são considerados dois estágios, sendo que a passagem ao segundo é condicionada pelos resultados do primeiro. No primeiro estágio (*classifier*) utilizam-se os resultados de 61 redes neuronais para decidir se determinado estado de agitação incidente produz (ou

não) galgamento na estrutura. Caso a resposta seja afirmativa, o segundo estágio (*quantifier*) determina, tal como a ferramenta NN_*Overtopping*2, o valor médio do caudal médio galgado e alguns parâmetros estatísticos. No estágio *quantifier* utilizam-se os resultados produzidos por cerca de 100 redes neuronais.

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 valores provenientes de ensaios em modelo físico reduzido e de protótipo. A base de dados, criada no projeto CLASH e comum às duas ferramentas, contém informação de testes efetuados em vários laboratórios (à volta 10 500 testes) 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 informação relativa às estruturas em estudo. A base de dados inclui ainda informação geral sobre a fiabilidade do teste e a complexidade das estruturas.

As principais diferenças entre as duas ferramentas estão relacionadas com o número de testes de galgamentos e algoritmos matemáticos usados no treino e teste das ferramentas. A principal mais-valia proporcionada pela ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 é a sua capacidade em identificar condições de agitação marítima incidentes na estrutura que conduzem a situações de galgamento nulo.

As duas redes neuronais utilizam parâmetros de entrada que incluem informação sobre a agitação marítima e a geometria do perfil da estrutura (FIGURA 2). Relativamente às redes neuronais da ferramenta NN_*Overtopping*2 são considerados quinze parâmetros de entrada. Três parâmetros descrevem a agitação marítima incidente na estrutura: a altura de onda significativa espectral no pé da estrutura (H_{mo}), o período médio de onda espectral no pé da estrutura ($T_{m-1,0}$) e a direção de incidência da onda (β). Para descrever a forma geométrica do perfil da estrutura são considerados 12 parâmetros (FIGURA 2): a profundidade da água em frente à estrutura (h), a profundidade da água na banqueta do pé do talude da estrutura (h_t), a largura da banqueta do pé do talude (B_t), a rugosidade/permeabilidade do manto (Y_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).

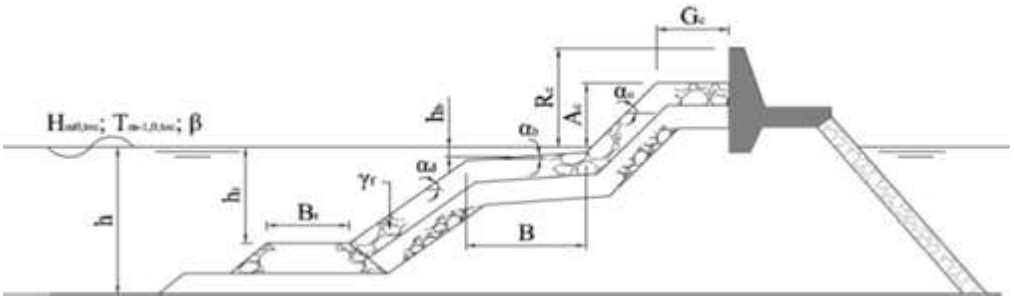


Figura 2: Parâmetros de entrada das ferramentas NN_*Overtopping*2 e *Overtopping Predictor* v1.1.

Nas redes neuronais da ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 são considerados 14 parâmetros. Ao contrário das redes neuronais de NN_Overtopping2, na *Overtopping Predictor* v1.1, o declive da berma, tan α_b, não foi definido como um parâmetro de entrada. Assim, para *Overtopping Predictor* v1.1 o parâmetro B é a projeção horizontal da largura da berma.

Os resultados são o valor médio do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, q, bem como outros valores característicos desta grandeza obtidos a partir da amostra gerada pelo conjunto de redes neuronais. Para além destes valores, as ferramentas também estimam o caudal médio galgado esperado no protótipo, *i.e.*, o valor de q corrigido para ter em linha de conta alguns efeitos de escala (por exemplo, devido a escalar o tamanho do material do núcleo da estrutura de acordo com as suas dimensões e não com as velocidades no núcleo) e de modelo (por exemplo, a não consideração do vento no modelo físico).

Importa também referir que, apesar da sofisticada técnica de modelação de redes neuronais artificiais usada no desenvolvimento destas ferramentas, estas têm como base um conjunto alargado de testes de galgamento realizados em modelo físico reduzido e em protótipo. Tal implica a limitação da utilização destas ferramentas à gama de características tanto das estruturas estudadas, bem como às condições de agitação presentes nos testes.

2.1.3 Etapa 3 – Avaliação do risco

A avaliação do risco de uma dada zona de estudo é baseada na combinação entre os valores de probabilidade de ocorrência de galgamentos superiores a um determinado limiar de caudal médio galgado e os valores de consequências relativos à superação desse limiar. Por simplificação, atribui-se à probabilidade de ocorrência uma escala de graus de probabilidade em vez da probabilidade da ocorrência do

acontecimento perigoso e um grau de consequências em vez do prejuízo associado a este acontecimento.

Assim, o grau de risco é dado por: Grau de Risco = Grau de Probabilidade × Grau de Consequências. Para definir esses graus, a QUADRO 1 é usado como guia de orientação. Note-se que os limites correspondentes aos graus de probabilidade e de consequências, bem como o próprio número de graus, devem refletir as características do problema em análise.

Quadro 1. Avaliação do grau de risco e da sua aceitabilidade.

GRAU DE RISCO		**Consequências**				
		1	2	5	10	25
Probabilidade de Ocorrência	1	1	2	5	10	25
	2	2	4	10	20	50
	3	3	6	15	30	75
	4	4	8	20	40	100
	5	5	10	25	50	125

Grau	**Descrição**	**Controlo de Risco (Guia de Orientação)**
1-3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco
4-10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo, possíveis danos materiais de pequena dimensão
15-30	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é necessário a monotorização.
40-125	Inaceitável	Risco intolerável; tem que se proceder ao controlo do risco (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.)

O processo de avaliação qualitativa do risco de galgamentos de uma estrutura marítima é efetuado da seguinte forma:

- Divisão do local de estudo em subzonas, atendendo ao perfil transversal da estrutura e ao tipo de utilização da zona protegida pela estrutura e consequente variabilidade do caudal médio admissível de galgamento;
- Estabelecimento dos caudais críticos de galgamento associados a cada secção de estrutura analisada tendo em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada. Estes limiares devem ser estabelecidos com base nas recomendações de Pullen et al. [13] e em informação local fornecida pelas autoridades;
- Cálculo da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis, com base na resposta da estrutura à agitação incidente e nos limites admissíveis para cada tipo de estrutura. A classificação dessa probabilidade é efetuada tendo em conta os graus definidos na TABELA 1.

Tabela 1. Grau de probabilidade associado à ocorrência de acontecimento perigoso.

Descrição	Probabilidade de Ocorrência (Guia de Orientação)	Grau
Improvável	0 – 1%	1
Raro	1 – 10%	2
Ocasional	10 - 25%	3
Provável	25 – 50%	4
Frequente	> 50%	5

- Avaliação do grau de consequências de ocorrência de um caudal acima dos limites definidos para cada secção de estrutura. A avaliação deste grau pode ser efetuada de forma simplista, como proposto por Poseiro et al. [9], ou de forma mais elaborada, como proposto em Poseiro et al. [10];
- Obtenção do grau de risco para cada subzona através do produto entre o grau da probabilidade de ocorrência e o grau de consequências de ocorrência de galgamentos não admissíveis, TABELA 1.

2.2 Aplicação ao Porto e Baía Praia da Vitória

Nas seguintes subsecções descreve-se a aplicação a metodologia de avaliação do risco de galgamentos descrita ao caso de estudo - Porto e Baía da Praia da Vitória. O procedimento seguido pode resumir-se nos seguintes passos: 1º) começou-se por efetuar a caracterização da agitação marítima junto às estruturas, com base no modelo de previsão da agitação marítima à escala regional, *WaveWatch* III e em resultados de modelos de propagação de ondas, *SWAN* e *DREAMS*; 2º) depois, efetuou-se o cálculo dos galgamentos para as secções consideradas das estruturas do Porto, com as ferramentas NN_*Overtopping2* e *Overtopping Predictor* v1.1; 3º) e seguiu-se, finalmente, a avaliação do risco associado a galgamentos que excedem limiares pré-estabelecidos de caudal médio galgado para cada secção das estruturas.

2.2.1 Caracterização da agitação marítima

Utilizaram-se os resultados das previsões da agitação marítima ao largo da zona considerada para o período correspondente aos anos de 2008 a 2012, obtidos com o modelo *WaveWatch* III [18]. Aqueles resultados foram transferidos para o interior da baía e do porto com recurso a dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima: o modelo *SWAN* e o modelo *DREAMS* [5].

É de salientar que para 2008, 2011 e 2012 as características de agitação marítima ao largo foram obtidas da base de dados do *USGODAE Data Catalog* (http://www.ncdc.noaa.gov/ oa/rsad/air-sea/seawinds.html), que contêm os resultados do *WaveWatch* III em termos de altura significativa, Hs, período de pico, Tp, e Direção média associada ao período de pico, Dir_p, a cada 6 horas. Quanto aos anos de 2009 e 2010, as características da agitação marítima ao largo foram obtidas pela aplicação do modelo *WaveWatch* III à região dos Açores [17], utilizando os dados de vento do modelo MM5 [18], com um espaçamento temporal de 1 h. Para aplicação dos modelos *SWAN* e *DREAMS*, considerou-se os valores do nível de maré astronómica obtidos com o modelo da Faculdade

de Ciências da Universidade de Lisboa (DEGGE/FCUL, [1], http://webpages .fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia /hidro_mares.html). A sobrelevação meteorológica admitida foi considerada constante e igual a 0.4 m, por ausência de dados de marégrafo. Quanto aos campos de vento utilizados no modelo SWAN foram extraídos da NOAA *National Climatic Data Center* (http://www.ncdc .noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html), a cada 6 h e com resolução de 0.25º.

2.2.2 Cálculo dos Galgamentos: Caracterização das estruturas e representação nas ferramentas neuronais

A FIGURA 3 ilustra a localização das secções consideradas para a representação das estruturas de defesa do Porto e Baía da Praia da vitória: quebra-mares sul e norte e a defesa frontal aderente da baía.



Figura 3: Localização das secções (D1 a D9) representativas das estruturas.

No quebra-mar sul, consideram-se duas secções (FIGURA 3): uma em frente ao Cais 12 (perfil D3) e outra entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar (perfil D8). O trecho do quebra-mar que protege o Cais 12 tem o manto protetor constituído por tetrápodes e um muro-cortina com 3.9 m de altura (FIGURA 4(a)). No trecho entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar sul não existe muro-cortina e o manto protetor é constituído por blocos Antifer (FIGURA 4(b)). O quebra-mar norte é caracterizado por um perfil-tipo (D9) protegido por um manto de acropodes (FIGURA 5). Ao longo da defesa frontal (perfis D1, D2 e D4 a D7), os perfis das estruturas são de dois tipos (FIGURA 6): o perfil (D1) junto ao esporão 3 (FIGURA 6(a)) e o perfil entre esporões (FIGURA 6(b)).

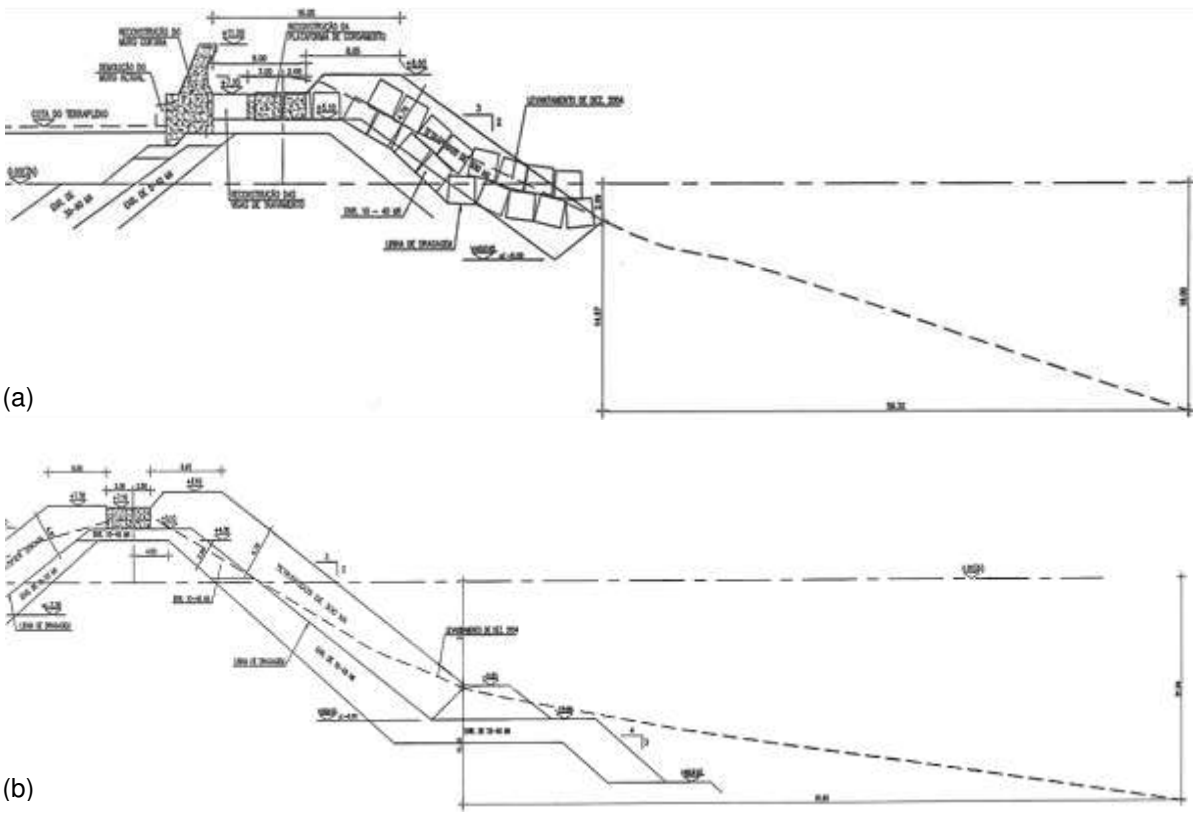


Figura 4: Perfis do quebra-mar sul: (a) Perfil D3 - perfil junto ao Cais 12; (b) Perfil D8 – perfil entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar.

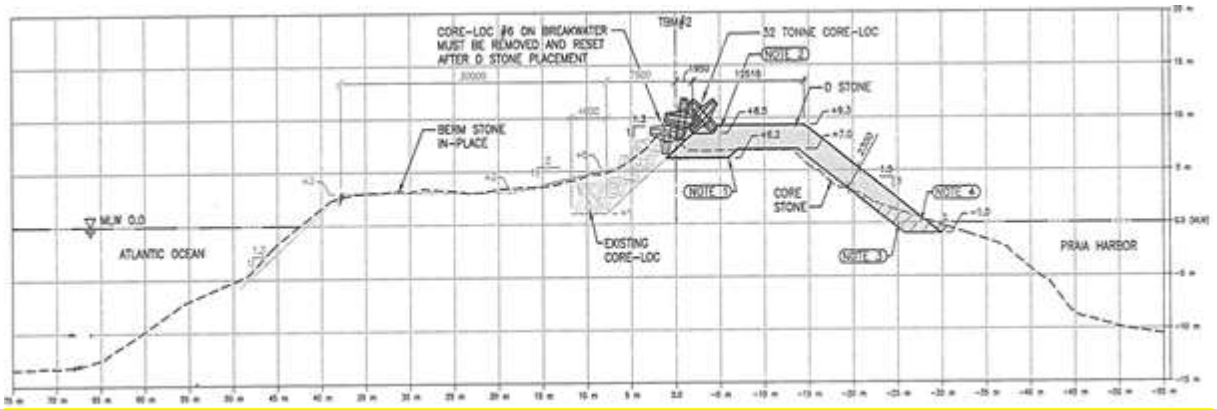
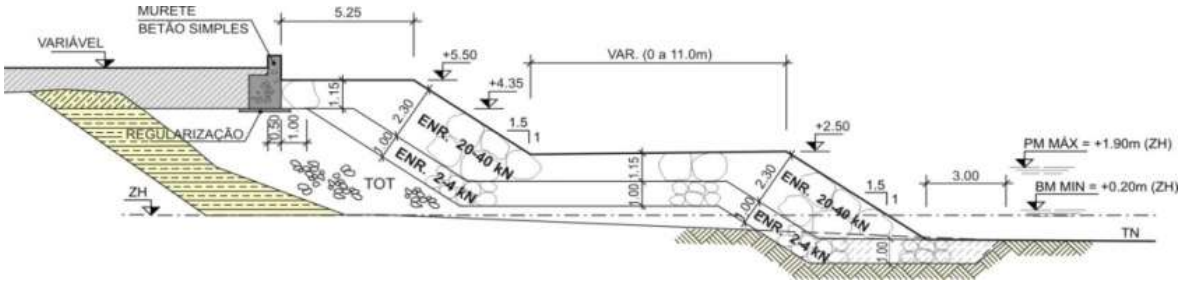


Figura 5: Perfil do quebra-mar norte.

(a)



(b)

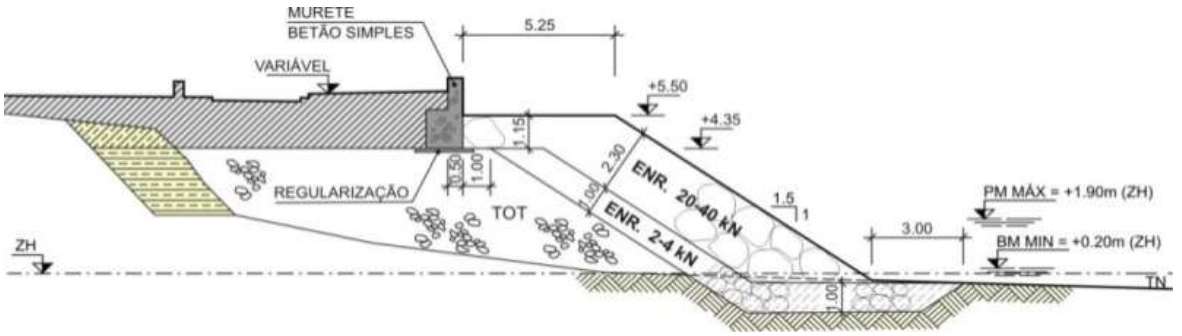


Figura 6: Perfis ao longo da defesa frontal: (a) perfil junto ao esporão 3 (D1); (b) perfil entre esporões (D2 e D4 a D7).

No cálculo dos galgamentos nas secções das estruturas (D1 a D9) com as ferramentas NN_*Overtopping2* e *Overtopping Predictor* v1.1, as variáveis relevantes constam na TABELA 2. Nesta tabela, encontram-se a cinzento os valores que não são constantes ao longo do período de tempo analisado e que variam com NM$\pm$1.5H_{m0} (*i.e.*, com as características da estrutura na zona ativa do manto: tipo de blocos do manto de proteção – D9, variação da inclinação do talude – D3 e D8, existência/ausência de berma – D1 e D9) ou com a presença de um defletor de onda – D3.

Devido à complexidade de alguns perfis considerados no porto e baía da Praia da Vitória, houve que efetuar algumas considerações relativamente à sua representação nas ferramentas neuronais, de acordo com Coeveld; van Gent.; Pozueta [4]. Assim:

- Para os perfis D3 e D8, dado que podem apresentar duas inclinações de talude distintas na zona ativa do manto, considerou-se a presença de uma berma fictícia (com B=0, tanα_b=0, h_b=2.99+NM e h_b=9.80+NM, respetivamente), permitindo considerar valores diferentes de inclinação do talude acima (cot (α_u)) e abaixo (cot (α_d)) da berma;
- Os perfis D1 e D9 apresentam, em certos casos, berma na zona ativa do manto (B=11 m, tanα_b=0, h_b=-2.50+NM para D1 e B=30 m, tanα_b=0.07, h_b=-5.00+NM para D9), enquanto noutros não (B=0 m, tanα_b=0, h_b=0 m);

- Nos perfis D3 e D9, utilizou-se uma variação em γ_f para representar a presença de um defletor de onda (D3) e a variação da rugosidade/permeabilidade do manto da estrutura na zona ativa devido à presença de diferentes tipos de blocos (D9).

TABELA 2. Características das estruturas marítimas nos pontos D1 a D9 (NM – nível de maré).

Perfil	h (m)	h_t (m)	B_t (m)	γ_f (-)	cot (α_d) (-)	cot(α_u) (-)	R_c (m)	B (m)	h_b (m)	tan(α_B) (-)	A_c (m)	G_c (m)
Quebra-mar Sul												
D3_1	18.0+NM	18.0+NM	0.0	0.4	3.4	1.5	11.00-NM	0	2.99+NM	0	8.60-NM	8.00
D3_2												16.00
D8	21.0+NM	21.0+NM	0.0	0.4	7.3	1.5	7.10-NM	0	9.80+NM	0	8.60-NM	8.00
Defesa Frontal												
D1	1.0+NM	1.0+NM	0.0	0.5	1.5	1.5	6.50-NM	11	-2.50+NM	0	5.50-NM	5.25
D2	1.4+NM	1.4+NM					6.95-NM					
D4	1.3+NM	1.3+NM					6.65-NM					
D5	0.7+NM	0.7+NM	0.0	0.5	1.5	1.5	6.33-NM	0	0.00	0	5.50-NM	5.25
D6	0.6+NM	0.6+NM					6.80-NM					
D7	0.0+NM	0.0+NM					6.27-NM					
Quebra-mar Norte												
D9	12.0+NM	12.0+NM	0.0	0.5	1.3	1.3	10.3-NM	30	-5.00+NM	0.07	13.0-NM	5.00

2.2.3 Avaliação do risco de galgamento

Para a avaliação do risco de galgamento nas três estruturas deve-se: a) avaliar a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e qual o impacto do galgamento na segurança de pessoas e infraestruturas; b) estabelecer os caudais críticos admissíveis consoante o tipo de estrutura e atividades; c) avaliar o grau de probabilidade de ocorrência desses caudais; d) avaliar o grau de consequências; e) avaliar o grau de risco.

Para os trechos D1 a D9, dos quadros de Pullen et al. [13] obtêm-se recomendações relativas aos valores limites do caudal médio por metro linear do coroamento da estrutura. Para a definição desses valores, considerou-se que:

- As secções das estruturas em D1 a D8 têm uma geometria, do lado do tardoz, que pode ser enquadrada no caso defesa frontal. O mesmo não acontece em D9, mas o coroamento e o tardoz da estrutura são protegidos - 200 l/s/m;
- A circulação nas diferentes zonas protegidas pelas estruturas é feita a baixa velocidade - 10 l/s/m;

- Existe um edifício localizado no esporão 3 (D1) e o farol (D8) na cabeça do quebra-mar sul - 1 l/s/m;
- Os contentores no Cais 12 (D3) encontram-se a 5-10 m da estrutura galgada - 0.4 l/s/m;
- Os utilizadores do terrapleno junto ao Cais 12 (D3) não ficam facilmente perturbados ou assustados e, além disso, deslocam-se numa zona larga. As pessoas movendo-se ao longo da defesa frontal têm uma visão clara do mar e encontram-se numa zona larga. O acesso ao quebra-mar norte é limitado e os utilizadores têm uma visão clara do mar e não ficam facilmente perturbados ou assustados - 0.1 l/s/m;
- Dado o Cais 12 ter largura de 130 m, os navios acostados estão suficientemente longe dos galgamentos sobre a estrutura para se interromperem as operações portuárias. Em D8, assume-se que navegam suficientemente longe da estrutura.

Perante estes valores limites adotados para as diversas categorias de consequências, obtêm-se as probabilidades de ocorrência de galgamentos que excedem esses limites para os 9 locais de estudo. Estas opções relativas aos limites de caudal médio admissível dão origem à ocorrência de galgamentos de risco para o farol no quebra-mar norte, os contentores presentes no Cais 12, as pessoas que se encontram/deslocam nas estruturas e/ou nas zonas por elas protegidas e os veículos que eventualmente se desloquem na parte terminal do quebra-mar sul. Com estas percentagens, classificam-se os locais de estudo através de graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos perigosos recorrendo à TABELA 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Galgamentos

Na FIGURA 7 apresentam-se, a título de exemplo, os caudais médios galgados por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, q, estimados pelas ferramentas neuronais NN_*Overtopping*2 e *Overtopping Predictor* v1.1 para cada um dos pontos D1 a D9. A figura mostra também os valores de $gH_{m0}T_{m-1,0}$ (utilizado frequentemente para adimensionalizar o caudal médio), o que permite relacionar a grandeza de dois (H_{m0} e $T_{m-1,0}$) dos três parâmetros (H_{m0}, $T_{m-1,0}$, β) da agitação marítima considerados com os valores de q obtidos.

Note-se que os pontos referentes à ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 (a verde) que se encontram no limite superior dos gráficos representam casos em que o *classifier*

identifica a ocorrência de galgamento, mas em que o *quantifier* não consegue quantificar, por estar fora da sua gama de aplicabilidade.

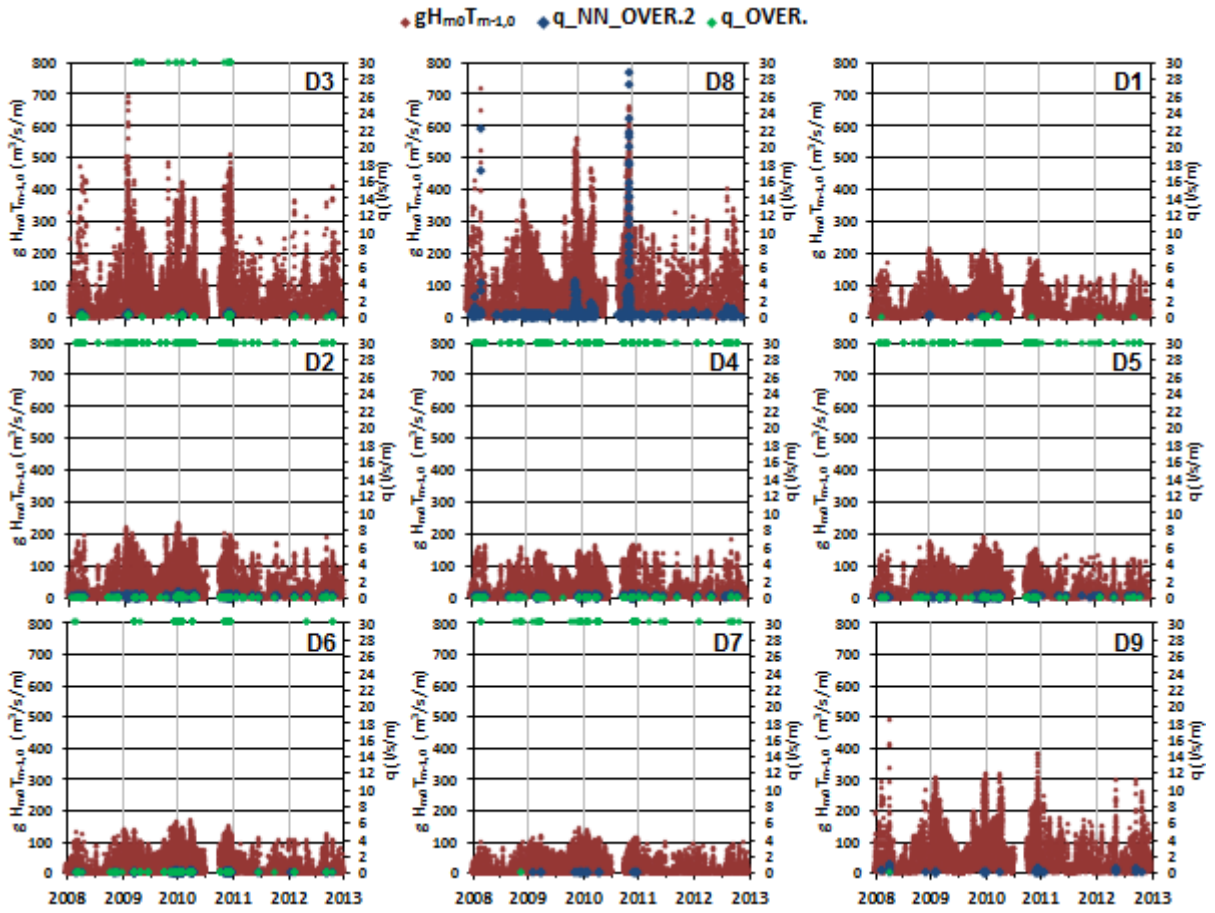


Figura 7: Séries temporais dos valores de $gH_{m0}T_{m-1,0}$ e dos caudais médios galgados, q, em D1 a D9, obtidos com as ferramentas neuronais NN_*Overtopping*2 e *Overtopping Predictor* v1.1.

Tabela 3. Comparação dos valores de probabilidade de ocorrência de galgamentos não nulos, de $q_{máx}$ e de q_{med} nos pontos D1 a D9, considerando as ferramentas neuronais NN_*Overtopping2* e *Overtopping Predictor* v1.1.

Local	Probabilidade (%)		$q_{máx}$ (l/s/m)		q_{med} (l/s/m)	
	NN_OVER.2	OVER.	NN_OVER.2	OVER.	NN_OVER.2	OVER.
Quebra-mar Sul						
D3	0.56	1.60	0.437	0.230	0.268	0.036
D8	10.62	-	28.800	-	0.497	-
Defesa Frontal						
D1	0.092	0.11	0.148	0.032	0.090	0.007
D2	4.82	6.60	0.617	0.238	0.138	0.040
D4	2.28	4.65	0.380	0.095	0.116	0.020
D5	2.59	3.87	0.356	0.083	0.096	0.020
D6	1.26	0.94	0.225	-	0.084	-
D7	0.16	0.82	0.103	-	0.057	-
Quebra-mar Norte						
D9	0.28	0.006	0.958	0.036	0.220	0.036

Pode-se concluir que para as duas ferramentas aplicadas (quando aplicáveis), FIGURA 7 e TABELA 3:

- Nos pontos D8 (quebra-mar sul) e D2 (defesa frontal) verificam-se os valores mais elevados de galgamento, sendo que no ponto D8 se verificou o valor mais elevado (~29 l/s/m). No trecho D3 (quebra-mar sul frente ao cais 12) o número de eventos de galgamento e os valores de $q_{máx}$ e q_{med} são mais baixos que em D8, devido essencialmente ao efeito do defletor de onda existente no muro-cortina da estrutura em D3;
- Quanto ao número de eventos de galgamento, foi maior também em D8 (quebra-mar sul) e D2 (defesa frontal);
- Existem trechos em que a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 não consegue quantificar os casos em que previu a existência de galgamento, como são os casos dos perfis D6 e D7, que correspondem aos pontos mais protegidos da agitação marítima;
- Tal como seria de esperar, os maiores valores de q estão associados a valores mais elevados de $gH_{m0}T_{m-1,0}$;

A análise comparativa das ferramentas neuronais permite concluir que:

- A *Overtopping Predictor* v1.1 conduz a um maior número de ocorrências de galgamento face à ferramenta NN_*Overtopping2*, excetuando nos pontos D6 e D9;
- A Overtopping Predictor v1.1 obtém valores máximos e médios de caudal médio galgado significativamente inferiores face à ferramenta NN_*Overtopping2*;

Note-se que, para D8 apenas se obtiveram resultados com a ferramenta

NN_*Overtopping*_2, pois as condições estão fora da gama de aplicabilidade de *Overtopping Predictor* v1.1, não se conseguindo neste caso concluir sobre a existência (ou não) de galgamento.

3.2 Risco de Galgamento

Uma vez que o valor de caudal médio galgado mais restrito está associado aos perigos relativos às pessoas (TABELA 4), apenas se apresenta na TABELA 5 o cálculo dos graus de probabilidade, consequências e risco para esse perigo.

Nota-se na TABELA 4 que, considerando apenas eventos de galgamento não admissíveis para pessoas, a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 conduz a um menor número e, consequente, menor probabilidade de ocorrências de galgamento face a NN_*Overtopping2*.

Tabela 4. Probabilidade de ocorrência de galgamentos nos pontos D1 a D9 acima dos limites estabelecidos para as 5 categorias de consequências [13], obtidos com as ferramentas neuronais NN_*Overtopping2* e *Overtopping Predictor* v1.1.

	Probabilidade (%)									
Local	**Estrutura** 200 l/s/m		**Edifícios** 1 l/s/m		**Equipamento** 0.4 l/s/m		**Pessoas** 0.1 l/s/m		**Veículos** 10 l/s/m	
	NN_OVER.2	**OVER.**	**NN_OVER.2**	**OVER.**	**NN_OVER.2**	**OVER.**	**NN_OVER.2**	**OVER.**	**NN_OVER.2**	**OVER.**
Quebra-mar Sul										
D3	0.00	0.00			0.02	0.00	0.56	0.10	0.00	0.00
D8	0.00	0.00	0.70	-			7.35	-	0.10	-
Defesa Frontal										
D1	0.00	0.00	0.00	0.00			0.02	0.00	0.00	0.00
D2	0.00	0.00	0.00	0.00			3.04	0.03	0.00	0.00
D4	0.00	0.00					1.22	0.00	0.00	0.00
D5	0.00	0.00					1.04	0.00	0.00	0.00
D6	0.00	0.00					0.36	0.00	0.00	0.00
D7	0.00	0.00					0.01	0.00	0.00	0.00
Quebra-mar Norte										
D9	0.00	0.00					0.28	0.00		

É de notar que os campos em branco na TABELA 4 correspondem a situações em que a categoria de consequências não é aplicável para o local da estrutura.

Para a definição do grau de consequências, adotou-se o método simples [9], sendo aquele grau igual a 2 para todas os trechos estudados. O cálculo do grau de risco para cada zona passa pela multiplicação do grau de consequências encontrado pelo grau de probabilidade considerando apenas o perigo para pessoas (TABELA 5).

Tabela 5. Grau de risco de ocorrência de galgamentos não admissíveis (categoria pessoas) nos pontos D1 a D9, considerando os resultados das duas ferramentas.

Perfil	Probabilidade (%)		Grau de probabilidade		Grau de consequências	Grau de risco	
	NN_OVER.2	OVER.	NN_OVER.2	OVER.		NN_OVER.2	OVER.
Quebra-mar Sul							
D3	0.56	0.10	1	1	2	2	2
D8	7.35	-	2	-	2	4	-
Defesa Frontal							
D1	0.02	0.00	1	1	1	1	1
D2	3.04	0.03	2	1	2	4	2
D4	1.22	0.00	2	1	2	4	2
D5	1.04	0.00	2	1	2	4	2
D6	0.36	0.00	1	1	2	2	2
D7	0.01	0.00	1	1	2	2	2
Quebra-mar Norte							
D9	0.28	0.00	1	1	2	2	2

A TABELA 5 mostra que a ferramenta NN_*Overtopping2* conduz a um grau de risco de galgamento igual ou superior à da ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1. Tal é consequência de se ter obtido com NN_*Overtopping2* valores significativamente superiores em termos de caudal médio galgado em relação ao obtido com *Overtopping Predictor* v1.1, apesar de com esta última a ocorrência de eventos de galgamento ser na sua maioria superior, mas também de baixo valor.

4. CONCLUSÕES

Aplicaram-se duas ferramentas neuronais distintas para cálculo dos galgamentos de várias estruturas do porto e baía da Praia da Vitória, nomeadamente a NN_*Overtopping2* e a *Overtopping Predictor* v1.*1*, sendo o período de estudo de 5 anos (2008 a 2012). Avaliou-se comparativamente quais as implicações que a utilização de cada uma das ferramentas tem em termos de número de eventos de galgamento e magnitude dos caudais médios galgados, bem como consequente grau de risco, para as 9 secções-tipo de estruturas marítimas estudadas (quebra-mares sul e norte, defesa frontal aderente).

Dos resultados obtidos, constata-se que à exceção do caso D8, as duas ferramentas identificam as estruturas onde ocorrem os maiores galgamentos e o maior número de eventos de galgamento. No entanto, a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 não consegue quantificar os casos em que previu a existência de galgamento nos casos de D6 e D7 que correspondem à defesa frontal aderente, mais protegida da agitação marítima, ao contrário do verificado através da NN_*Overtopping2*. Para o caso do perfil D8 a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1 não é aplicável. As principais diferenças entre as duas ferramentas são que a *Overtopping Predictor* v1.1 conduz a um maior número de galgamentos face à NN_*Overtopping2*, excetuando em D9

(quebra-mar norte) e D6 (defesa frontal), e a valores máximos e médios significativamente inferiores à NN_*Overtopping2*. Principalmente este fato leva a que o risco associado aos galgamentos para valores calculados com a ferramenta NN_*Overtopping2* seja igual ou superior ao obtido com a ferramenta *Overtopping Predictor* v1.1. Apesar do estudo anterior com NN_*Overtopping2* estar do lado da segurança, prevendo um grau de risco mais elevado do que o mesmo estudo com *Overtopping Predictor* v1.1., tal pode provocar um grau de risco associado ao galgamento das estruturas marítimas elevado e assim sugerir a necessidade de implementação de medidas de controlo de risco, que na realidade podem ser dispensáveis.

Futuramente é fundamental a validação das duas ferramentas e da metodologia geral do sistema HIDRALERTA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANTUNES, C.; TABORDA, R. Sea level at cascais tide gauge: data, analysis and results. **Journal of Coastal Research**, SI 56 . In: **Proc. 10th International Coastal Symposium**, 218-222. 2009.

[2] BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, model description and validation. **Journal of Geographical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.

[3] BRAVO, A. A.; REIS, M. T.; SANTOS, J. A. Comparação de duas ferramentas de cálculo do galgamento baseadas na análise de redes neuronais. In: **Proc. 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**, AIPCN/PIANC, Lisboa, 10 e 11 de outubro de 2013.

[4] COEVELD, E. M.; van GENT, M. R. A.; POZUETA, B**. Neural network: manual NN_Overtopping 2. Clash WP8 – Report**. 2005.

[5] FORTES, C. J. E. M. **Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal, 1993.

[6] NEVES, D. R.; SANTOS, J. A.; REIS, M. T.; FORTES, C. J.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E. B.; RODRIGUES, M. C. Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. **Revista de Gestão Costeira Integrada (Journal of Integrated Coastal Zone Management)**, v.12, n. 3, p. 291-312, 2012.

[7] NEVES, D. R. C. B.; ZÓZIMO, A. C.; PINHEIRO, L. V.; FORTES, C. J. Guiomar: new developments and application to Sines harbour. In: **Proc. 6ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**, Funchal, Madeira, 8 e 9 de outubro de 2009.

[8] PEREIRA, D.; LOPES, L. G.; REIS, M. T.; FORTES, C. J. E. M.; POSEIRO, P. Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada. In: **Proc. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica**, IH, Lisboa, Portugal, 24 a 26 de junho de 2014.

[9] POSEIRO, P.; FORTES, C. J. E. M.; REIS, M. T.; SANTOS, J. A.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, C.; AZEVEDO E. A methodology for overtopping risk assessment in port areas: application to the Port of Praia da Vitória (Azores, Portugal). In: **Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research**, Lisbon, 4-7 June 2013. 2013a.

[10] POSEIRO, P.; ÂNGELO, J.; FORTES, C. J. E. M.; REIS, M. T.; SANTOS J. A.; CAPITÃO, R.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, C.; AZEVEDO, E. Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da Baía da Praia da Vitória. In: **Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**, AIPCN/PIANC, Lisboa, 10 e 11 de outubro de 2013. 2013b

[11] POSEIRO, P.; SABINO, A.; FORTES, C. J. E. M.; REIS, M. T.; RODRIGUES, A. Aplicação do sistema de previsão e alerta Hidralerta: caso de estudo da Praia da Vitória. In: **Proc. 12º Congresso da Água**, Lisboa, Portugal. 2014a

[12] POSEIRO, P., REIS, M.T., FORTES, C.J.E.M., SABINO, A. e RODRIGUES, A.,. Aplicação do Sistema de Previsão e Alerta de Inundações HIDRALERTA: Caso de estudo da Costa da Caparica. In: **Proc. 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica**, Lisboa, Portugal. 2014b

[13] PULLEN, T.; ALLSOP, N. W. H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHUTTRUMPF, H.; van der MEER, J. W. **EurOtop: wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual**. Environment Agency, UK, Exper. Netwerk Waterkeren, NL, Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE. 2007.

[14] REIS, M. T.; FORTES, C. J. E. M.; NEVES, D. R. C. B.; RODRIGUES, S.; VIEIRA, A. S.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E. B. Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta. In: **Proc. VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras**, Boa Vista, Cabo Verde, 2011.

[15] ROCHA, T. **Avaliação do galgamento de estruturas portuárias. Aplicação ao porto da Praia da Vitória, Açores**. Tese de mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica, FEUP, 2012.

[16] SANTOS, J. A.; REIS, M. T.; NEVES, D. R. C. B.; FORTES, C. J. E. M.; RODRIGUES, S.; AZEVEDO, E. B.; RODRIGUES, M. C.; SIMÕES, A.; RAMALHEIRA, J.; RAPOSEIRO, P. Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no Porto da Praia da Vitória. In: **Proc. 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**, AIPCN/PIANC, Porto, 6 e 7 de outubro de 2011. 2011.

[17] SIMÕES, A.; TOMÉ, R.; REIS, F.; AZEVEDO, E. **Avaliação da qualidade das previsões de agitação marítima no Arquipélago dos Açores**. Projetos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5, 2009.

[18] TOLMAN, H. **User manual and system documentation of WAVEWATCH-III**. version 1.18, NOA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166, 110p, Washington, USA,. 1999.

[19] VERHAEGHE, H. **Neural network prediction of wave overtopping at coastal structures**. PhD Thesis, Universiteit Gent, Belgium. 2005.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da FCT através do projeto HIDRALERTA - PTDC/AAC-AMB /120702/2010, à Portos dos Açores e Azorina na pessoa da Engª. Conceição Rodrigues e à Universidade dos Açores nas pessoas da Dra. Anabela Simões e do Prof. Eduardo de Azevedo toda a ajuda prestada durante este trabalho. Agradecem também aos projetos CLIMAAT e MacSIMAR (FEDER–INTERREG_IIIB, Mac/2.3/A3, 03/Mac/2.3/A5; FEDER-MAC-Mac/1/A089) a utilização dos dados de agitação marítima.