



Aplicação do modelo SWASH para a estimativa de galgamentos em eventos de tempestade no porto da Ericeira

Anika Manz¹; Ana Catarina Zózimo²; Juan L. Garzon³

¹ Universidade do Algarve, ² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ³ CIMA – Centre for Marine and Environmental Research, FCT, Universidade do Algarve
a67280@ualg.pt, aczozimo@lnec.pt, jlhervas@ualg.pt

Resumo

Este trabalho analisa a potencialidade do modelo numérico SWASH ser implementado no protótipo do sistema HIDRALERTA para o porto da Ericeira para a estimativa do galgamento.

O modelo SWASH foi aplicado a dois perfis transversais do porto da Ericeira com características geométricas distintas, diferentes orientações face à agitação incidente e com diferentes blocos de betão no manto principal. Esta comunicação foca-se nos resultados para um perfil cujo manto principal é constituído por tetrápodes. O coeficiente de Manning foi utilizado como parâmetro de calibração dos resultados do modelo SWASH, na simulação de duas tempestades, tendo como referência os resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Foram deduzidas três expressões empíricas para a determinação do coeficiente de Manning com base em variáveis conhecidas, pois a possibilidade de calcular os valores dos coeficientes de Manning de forma automática é essencial para que se possa implementar o modelo SWASH no sistema HIDRALERTA.

Introdução

À medida que a população mundial continua a aumentar e a concentrar-se nas zonas costeiras, as comunidades tornam-se mais vulneráveis a fenómenos de inundação e de erosão provocados por eventos extremos. O aquecimento global e a consequente subida do nível médio do mar, em conjunto com alterações nas características das tempestades (eg. Meehl *et al.*, 2007), conduzirão a um aumento dos riscos referidos anteriormente. Em muitas regiões, as comunidades costeiras e as atividades socioeconómicas dependem da existência de estruturas costeiras que sejam capazes de reduzir os efeitos das inundações associadas a estes eventos extremos. Esta capacidade é frequentemente medida em termos do caudal de galgamento (Pillai *et al.*, 2017). Também com o objetivo de minimizar os danos causados por riscos costeiros, os sistemas de previsão e alerta têm vindo a ser implementados em muitas regiões costeiras, permitindo identificar situações de emergência e despoletar as medidas de segurança que sejam necessárias (Lavell *et al.*, 2012). Estas características fazem com que estes sistemas sejam fundamentais como uma medida adaptativa face às alterações climáticas.

Em Portugal, apesar da sua elevada exposição face a riscos costeiros, não existe ainda nenhum sistema nacional de previsão de galgamentos e inundações completamente operacional. O Sistema HIDRALERTA pretende preencher esta lacuna (Poseiro, 2019; Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020). O sistema HIDRALERTA é um sistema de previsão, de alerta e de avaliação do risco da ocorrência de situações de emergência associadas aos efeitos da agitação marítima (galgamento, inundação, navegação) em zonas costeiras e portuárias. Corre em tempo real e fornece previsões, com 72 horas de antecipação, das características da agitação marítima e dos níveis de risco.

No sistema HIDRALERTA, o módulo de estimativa do galgamento utiliza a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) para determinar o caudal médio de galgamento sobre estruturas portuárias (q) correspondente a uma dada condição de agitação marítima/nível de água verificada em cada secção transversal analisada das estruturas na zona de estudo. Os alertas são emitidos quando limiares pré-definidos de q são ultrapassados, e as previsões são enviadas diariamente aos responsáveis pela tomada de decisão (Poseiro, 2019; Fortes *et al.*,



2020, Pinheiro *et al.*, 2020).

A estimativa do galgamento é muitas vezes efetuada com recurso a modelação física ou a fórmulas (semi-)empíricas (e.g. Tonelli e Petti, 2013; EurOtop, 2018). No entanto, os recentes avanços em termos da capacidade computacional disponível, tornam possível a utilização de modelos numéricos para obter estimativas precisas da propagação e transformação das ondas em águas pouco profundas, e dos galgamentos sobre estruturas (Suzuki *et al.*, 2017). A descrição mais completa do escoamento em três dimensões é dada pelas equações de Navier-Stokes (NS), que resolvem a pressão, as três componentes da velocidade do escoamento e a turbulência. Apesar de previsões precisas do galgamento e da sua boa concordância com os resultados dos modelos físicos, os modelos baseados nas equações de NS requerem muita perícia em modelação numérica e elevado tempo computacional para representarem todo o fenómeno do galgamento (Suzuki *et al.*, 2017). Uma aproximação mais simples e eficiente pode ser obtida através das equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW). Estas equações descrevem o escoamento livre (uni ou bidimensional) integrado na profundidade, assumindo uma pressão hidrostática e desprezando as acelerações verticais. Vários modelos baseados nas equações NLSW foram já desenvolvidos e validados. Convém, no entanto, realçar que estes modelos podem apresentar limitações devido à hipótese de pressão hidrostática, que limita a capacidade de os mesmos descreverem de forma precisa os fenómenos hidrodinâmicos na zona de espraiamento (Suzuki *et al.*, 2017).

Uma aproximação recente na modelação do galgamento é baseada nas equações NLSW dispersivas, que permitem uma pressão não-hidrostática, assim como a resolução do escoamento vertical e respetiva estrutura. O modelo SWASH (acrónimo de Simulating WAVes till SHore) (Zijlema *et al.*, 2011), simula escoamentos de superfície livre não-hidrostáticos e rotacionais, uni ou bidimensionais. O modelo é assim capaz de descrever escoamentos complexos e rapidamente variáveis sobre topo-hidrografias detalhadas, como as que são sujeitas a eventos de inundações costeiras. Vários estudos demonstraram as boas capacidades deste modelo na simulação de caudais de galgamento (Suzuki *et al.*, 2012, 2014, 2017 e Zhang *et al.*, 2020).

O principal objetivo deste trabalho é investigar as possibilidades de implementação do modelo numérico SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) no módulo de galgamento e inundação do sistema HIDRALERTA para o protótipo do porto da Ericeira, e enquadra-se no âmbito do projeto To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017). De modo a atingir esse objetivo, a versão unidimensional do modelo SWASH é aplicado ao porto da Ericeira para a simulação do galgamento durante uma tempestade, e os seus resultados são comparados com os da metodologia atualmente implementada no HIDRALERTA (DREAMS + NN_OVERTOPPING2). A tarefa principal consistiu na calibração do modelo através da variação do coeficiente de Manning (que representa o atrito do manto principal do quebra-mar), de forma a desenvolver uma expressão que possa ser utilizada para calcular automaticamente este coeficiente para um determinado tipo de blocos do manto principal.

Metodologia

Área de estudo

O porto da Ericeira localiza-se na costa oeste de Portugal Continental, a aproximadamente 30 km a norte de Lisboa. O porto é abrigado por um quebra-mar com 430 m de comprimento, orientado a sudoeste, e tem um cais no seu tardoz. Para as simulações com o modelo SWASH foi escolhida a secção transversal que apresenta o cais no seu tardoz. O manto principal é constituído por tetrápodes, e a secção transversal tem uma orientação de 309°N (Figura 1).

As características da secção escolhida são apresentadas na Figura 2 e na Tabela 1, em que R_c é o bordo livre da parte impermeável do coroamento da estrutura relativo ao nível de repouso, A_c é o bordo livre do manto permeável da estrutura, G_c é a largura do coroamento da estrutura e $\gamma_{f\text{ armour}}$ é o coeficiente de rugosidade.

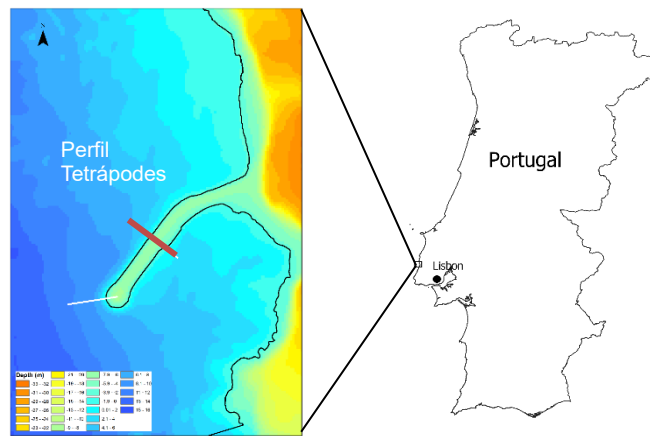


Figura 1. Porto da Ericeira e secção transversal do quebra-mar (linha vermelha) cujo manto principal é constituído por com tetrápodes.

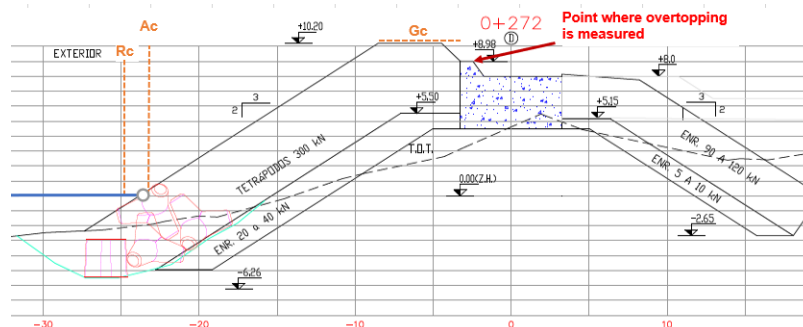


Figura 2. Corte transversal do troço com tetrápodes no manto principal. Fonte: LNEC.

Tabela 1. Características da secção transversal com tetrápodes no manto principal.

Declive	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)	Tipo de blocos	γ_{farmor}
1:1,5	9,98	10,2	5,28	Tetrápodes	0,4

Foram efetuadas simulações para as tempestades que atingiram a área de estudo entre os dias 15 e 23 de dezembro de 2019. As características da agitação incidente foram obtidas num ponto situado a 335 m do quebra-mar, a uma profundidade de 9,5 m (ZH). Utilizou-se a metodologia implementada atualmente no HIDRALERTA para a obtenção das características da agitação incidente, que consiste na utilização dos modelos SWAN (SWAN team, 2006) e DREAMS (Fortes, 2002) para a propagação da agitação desde o largo até à costa. A ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 foi utilizada para a estimativa do galgamento ocorrido durante o período analisado. Tanto as características da agitação incidente, como a estimativa do galgamento foram calculadas com um intervalo de 1 hora.

Condições de cálculo

As simulações foram efetuadas com a versão unidimensional do modelo numérico SWASH para um período computacional correspondente a 500 ondas (calculado relativamente ao período



médio da onda), ao qual foi adicionado um período para a estabilização do modelo igual a 15% do período computacional. O intervalo de tempo da simulação foi inicializado com o valor de 0,008 s e foi controlado automaticamente, de forma a garantir que o número de Courant permanecesse no intervalo [0,1-0,5].

O número de camadas verticais utilizado nas simulações foi determinado com base na frequência máxima associada a cada caso simulado, para que não existissem incorreções no cálculo da celeridade. Para as simulações efetuadas, uma camada vertical foi suficiente. O manual de utilização do SWASH define um coeficiente de Manning igual a 0,019 s/(m^{1/3}) para simulações da propagação das ondas em grandes distâncias, pelo que foi imposto um valor mínimo de 0,02 s/(m^{1/3}) para a calibração do modelo, pois a camada de tetrápodes do quebra-mar é suscetível de causar maior atrito do que a encontrada na zona de aproximação ao quebra-mar.

O domínio computacional (Figura 3) tem um comprimento de 419 m, dos quais 334,5 m correspondem à zona de aproximação ao quebra-mar, 48 m ao quebra-mar e 36,5 m à zona após o tardoz da estrutura e até ao final do domínio. A batimetria foi construída com dados do EMODnet (com espaçamento de 150 m) e da DGTerritorio (levantamento LiDAR de 2011, com 2 m de espaçamento). O perfil transversal foi definido com um espaçamento constante de 0,5 m.

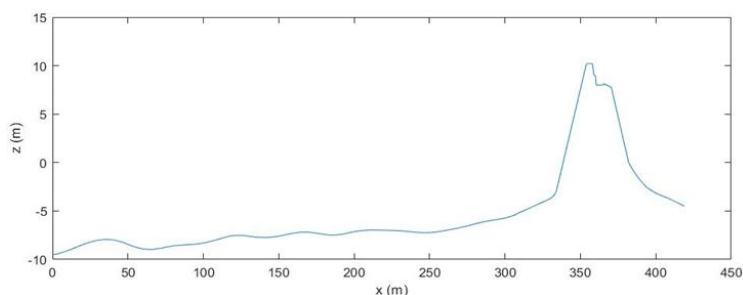


Figura 3. Batimetria e domínio computacional utilizados nas simulações.

Na fronteira de entrada foi imposto um espectro Jonswap com $\gamma=3,3$ e uma condição de fronteira “weakly-reflective”, que permite a saída das ondas provenientes do interior do domínio. Foi imposta uma condição de radiação de Sommerfeld na fronteira de saída do modelo. As condições de fronteira foram definidas com base nos estudos de galgamento com o modelo SWASH de Suzuki *et al.* (2014, 2017). Para o termo não-hidrostático da pressão foi utilizado um esquema Keller-Box com um pré-condicionador ILU, para aumentar a estabilidade do modelo.

Calibração do modelo

Uma possível abordagem para simular o fenómeno do galgamento sobre um quebra-mar consiste na definição do quebra-mar em termos da porosidade do seu material constituinte. No entanto, no modelo SWASH, as estruturas porosas são consideradas como uma caixa de dissipação numérica e não como um obstáculo físico às ondas incidentes. Em resultado, as ondas são dissipadas, mas não são defletidas para cima, conduzindo à inexistência de galgamento sobre a estrutura (Pés, 2013). Em alternativa, um quebra-mar permeável pode ser considerado como uma estrutura impermeável, utilizando um coeficiente de atrito de fundo para representar a dissipação de energia em consequência da rugosidade e da infiltração (Pés, 2013).

Neste trabalho, o atrito e a rugosidade do quebra-mar foram incluídas sob a forma de um coeficiente de Manning, que é uma aproximação simples de implementar em sistemas operacionais como o HIDRALERTA. O modelo foi calibrado variando os coeficientes de Manning para obter caudais de galgamento semelhantes aos estimados pelo sistema HIDRALERTA com a utilização da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Os resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 foram considerados como uma referência devido à inexistência de dados de campo e à ampla utilização desta ferramenta.



Os resultados de Zhang *et al.* (2020) demonstraram a existência de uma correlação entre o coeficiente de atrito e: i) a declividade da onda, S_{op} (relação entre a altura, H , e o comprimento da onda, L); ii) a relação entre o bordo livre da parte impermeável do coroamento da estrutura relativo ao nível de repouso, com a altura significativa da onda, R_c/H_s . Consequentemente, os casos a simular foram selecionados de forma a abranger um intervalo alargado de condições de S_{op} e R_c/H_s .

Foram efetuadas 24 simulações que incluíram estados de agitação das tempestades ocorridas entre 15 e 23 de dezembro de 2019. Essas tempestades tiveram ângulos de incidência da onda relativamente à secção transversal da estrutura (β) que variaram entre 18° e 49°. Com base nos estudos de Galland (1994), não existem diferenças significativas no galgamento sobre um quebra-mar protegido por um manto para ondas incidentes com β entre 0° e 15°. É de notar que a versão unidimensional do modelo SWASH não tem em consideração a direção de incidência da onda. Os valores de declividade da onda variaram entre 0,02 e 0,05 e os valores de R_c/H_s variaram entre 1,0 e 1,9.

Desenvolvimento e validação da expressão para determinação do coeficiente de Manning

Com base nas conclusões da bibliografia existente, foi investigada a relação entre a declividade da onda e o bordo livre relativo (R_c/H_s) com os caudais de galgamento e os coeficientes de Manning obtidos na fase de calibração ($n_{calibrated}$).

De seguida, foi desenvolvida uma expressão empírica para o cálculo do coeficiente de Manning ($n_{calculated}$) em função das condições hidrodinâmicas. Para o desenvolvimento dessa expressão empírica utilizou-se a função Matlab CFtool. Para avaliar a precisão da expressão empírica, foram calculados os erros quadráticos médios (RMSE) associados à comparação dos caudais de galgamento obtidos considerando $n_{calibrated}$ com os caudais de galgamento obtidos com $n_{calculated}$, e com os caudais de galgamento calculados com a NN_OVERTOPPING2.

Numa primeira fase, consideraram-se as 24 simulações selecionadas dos estados de agitação do período entre 15 e 23 de dezembro de 2019. Tendo em conta os resultados obtidos na primeira fase, as simulações foram separadas em dois estados de agitação: estado de agitação 1, com menores declividades de onda e com valores de β entre 15° e 30° e estado de agitação 2, com maiores declividades de onda e com valores de β entre 30° e 50°. Como a versão unidimensional do modelo SWASH não tem em consideração a direção da onda, foi também investigada a influência do ângulo de incidência da onda. No total, foram desenvolvidas três expressões empíricas para o cálculo do coeficiente de Manning:

- (i) definição de $n_{T,oblique}$ em função de R_c/H_s e $\cos(\beta)$, onde $n_{T,oblique}$ é o coeficiente de Manning para o manto com tetrápodes. Esta equação tem em consideração a obliquidade da onda e só é aplicável para ondas com $\beta > 15^\circ$;
- (ii) definição de $n_{T,oblique(15-30)}$ em função de R_c/H_s e de S_{op} , onde $n_{T,oblique(15-30)}$ é o coeficiente de Manning para o manto com tetrápodes para ondas com β entre 15° e 30°. Esta equação é baseada nos dados do estado de agitação 1;
- (iii) definição de $n_{T,oblique(30-50)}$ em função de R_c/H_s e de S_{op} , onde $n_{T,oblique(30-50)}$ é o coeficiente de Manning para o manto com tetrápodes para ondas com β entre 30° e 50°. Esta equação é baseada nos dados do estado de agitação 2.

Resultados

Após a calibração, os caudais médios de galgamento obtidos com o modelo SWASH tiveram uma boa correspondência com os obtidos pela NN_OVERTOPPING2 para a maioria dos 24 casos simulados. Os caudais médios de galgamento obtidos com a NN_OVERTOPPING2 variaram entre 0,13 e 59 l/s/m. Para a maioria dos casos simulados, o RMSE associado à comparação entre q calculado pelo modelo SWASH e pela NN_OVERTOPPING2 não excedeu 3 l/s/m. No entanto, para alguns casos, os caudais calculados pelo SWASH foram bastante inferiores aos calculados pela NN_OVERTOPPING2 (com diferenças que chegaram a 44 l/s/m



e RMSE de 10,49 l/s/m). Nestes casos, não foi possível reduzir mais o coeficiente de Manning utilizado no modelo SWASH de forma a aumentar o valor de q , pois já tinha sido atingido o limite mínimo imposto para este coeficiente: $0,02 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$.

Para os 24 casos simulados, não foi encontrada nenhuma relação clara entre o coeficiente de Manning, e S_{op} e entre o coeficiente de Manning e R_c/H_s (Figura 4 e Figura 5).

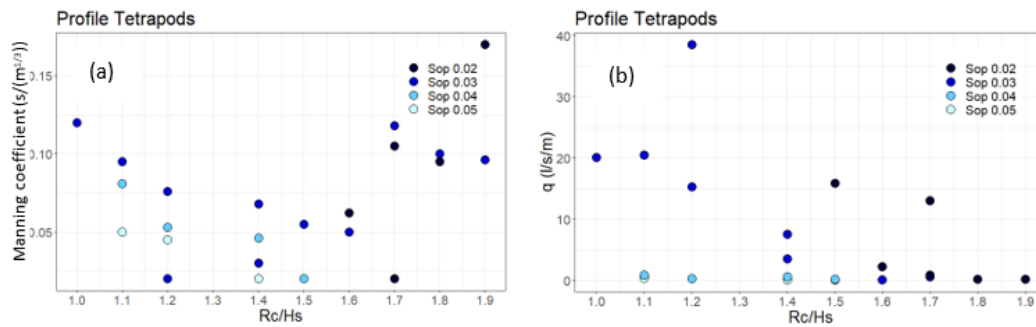


Figura 4. Relação entre o coeficiente de Manning e R_c/H_s (a) e entre q e R_c/H_s (b).

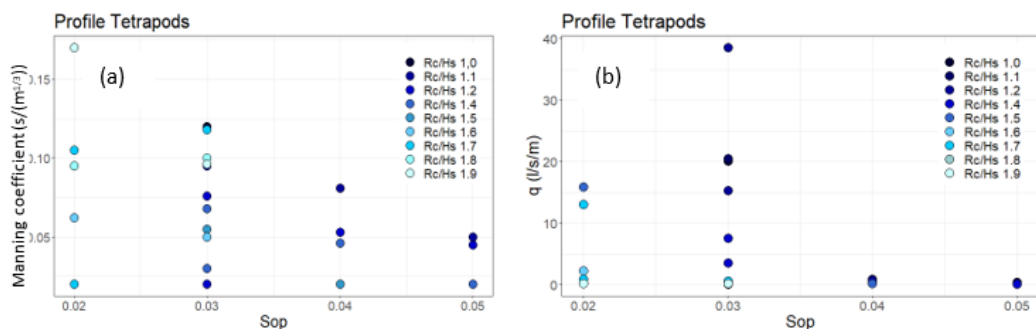


Figura 5. Relação entre o coeficiente de Manning e S_{op} (a) e entre q e S_{op} (b).

No entanto, verificou-se uma clara relação entre β e S_{op} (Figura 6). Os casos simulados que apresentavam elevados valores de β (baixos valores de $\cos(\beta)$) tinham valores elevados de S_{op} , enquanto a casos com baixos valores de β correspondiam menores valores de declividade da onda.

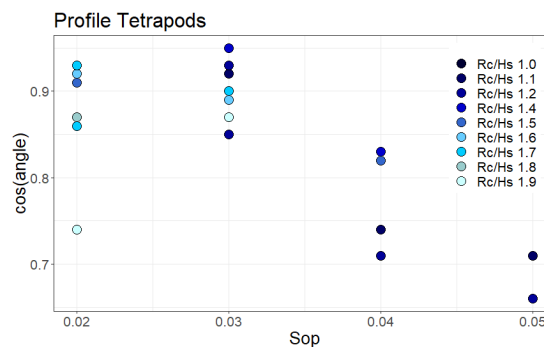


Figura 6. Relação entre $\cos(\beta)$ e S_{op} .

Expressão empírica considerando os 24 casos simulados



A expressão empírica para calcular o coeficiente de Manning para um manto principal com tetrápodes, considerando os 24 casos simulados, n_T *calculated*, foi desenvolvida em função de R_c/H_s e de $\cos(\beta)$. Como se verificou uma estreita relação entre $\cos(\beta)$ e S_{op} , esta última variável não foi incluída na equação e foi substituída por $\cos(\beta)$. Adicionalmente, os valores de $\cos(\beta)$ tinham variabilidade superior à de S_{op} (que apenas apresentava quatro valores). A equação para calcular o coeficiente de Manning n_T (s/(m^{1/3})) é dada pela Eq. 1:

$$n_{T\text{-calculated}} = a_1 + a_2 (R_c/H_s) + a_3 \cos(\beta) + a_4 \left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 + a_5 (R_c/H_s) \cos(\beta) + a_6 [\cos(\beta)^2] \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

$$a_1 = 1.655; a_2 = -0.738; a_3 = -2.827; a_4 = 0.3895; a_5 = -0.4065; a_6 = 2.114$$

Esta equação é válida para $\beta = [18-49]^\circ$ ($\cos(\beta) = [0,66-0,95]$) e $R_c/H_s = [1,0-1,9]$.

Os valores de n_T *calculated* calculados com a Eq. 1 apresentaram algumas diferenças relativamente aos coeficientes de Manning calibrados, n_T *calibrated* (Figura 7). Embora alguns valores sejam muito próximos, ou mesmo iguais, outros apresentaram diferenças de 0,02 s/(m^{1/3}) ou superiores (casos 4, 5, 8, 10, 13, 18, 19, 23 e 24 da Figura 7). O RMSE entre os n_T calculados e calibrados para os 24 casos testados foi de 0,02 s/(m^{1/3}).

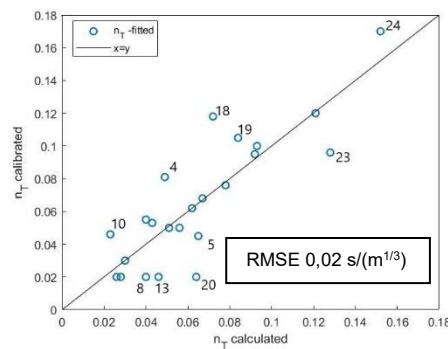


Figura 7. Comparação entre n_T *calculated* e n_T *calibrated*. Os casos assinalados correspondem aos que apresentaram as maiores diferenças entre valores calibrados e calculados.

Os valores de n_T *calculated* foram utilizados para efetuar simulações com o modelo SWASH para obter o caudal médio de galgamento. Os valores de caudal médio de galgamento provenientes de simulações com o modelo SWASH utilizando n_T *calibrated*, foram comparados com os obtidos com o modelo SWASH utilizando n_T *calculated* calculados pela Eq.1. Essa comparação demonstrou que os resultados diferiam mais para os casos com valores mais baixos de caudal médio de galgamento. Nesses casos, o caudal médio de galgamento era geralmente sobrestimado com a utilização de n_T *calculated* (Figura 8a).

Verificou-se também que os valores de q simulados com o modelo SWASH utilizando n_T *calculated*, apresentavam maiores diferenças face aos valores calculados com a ferramenta NN_OVERTOPPING2. No geral, o galgamento foi sobrestimado nos casos aos quais correspondiam menores caudais médios e subestimado nos casos correspondentes aos maiores caudais médios (Figura 8b). O RMSE entre os valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando os valores de n_T *calibrated* e n_T *calculated*, relativamente aos valores estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 foi de 10,49 l/s/m e 10,62 l/s/m, respetivamente.

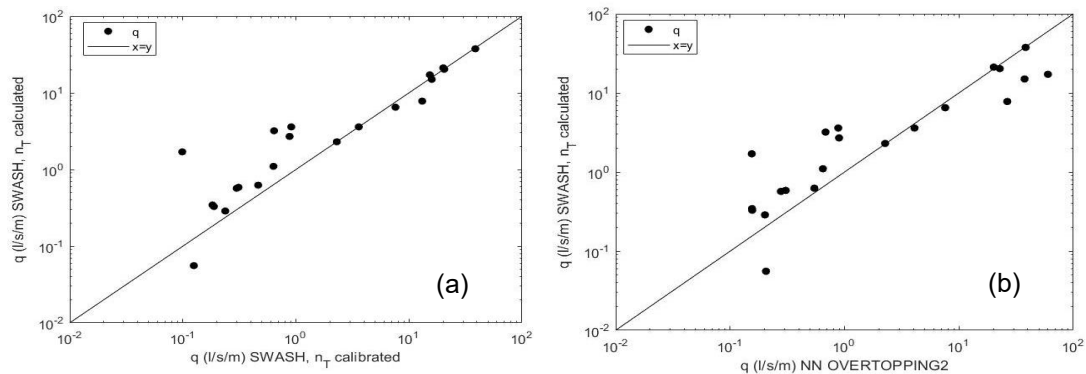


Figura 8. Comparação dos valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando os valores de n_T *calculated* com os valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando os valores de n_T *calibrated* (a) e com os valores de q estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 (b).

Expressão empírica considerando o Estado de Agitação 1

A equação para o cálculo do coeficiente de Manning $n_{T\text{oblique}(15-30)}$ ($s/(m^{1/3})$) é dado pela Eq. 2:

$$n_{T\text{oblique}(15-30)} = a_1 + a_2 (R_c/H_s) + a_3 S_{op} + a_4 (R_c/H_s)^2 + a_5 (R_c/H_s) S_{op} + a_6 (R_c/H_s)^3 + a_7 (R_c/H_s)^2 S_{op} \quad (\text{Eq.2})$$

onde:

$$a_1 = -12,96; a_2 = 15,26; a_3 = 460,3; a_4 = -4,398; a_5 = -548,2; a_6 = -0,03234; a_7 = 162,9$$

Esta equação é válida para $\beta = [15-30]^\circ$, $R_c/H_s = [1,0-1,8]$ e $S_{op} = [0,02-0,03]$.

Os coeficientes de Manning calculados pela Eq. 2 apresentaram uma melhor concordância com os calibrados do que os coeficientes calculados pela Eq. 1 (Figura 9), tendo sido obtido um valor de RMSE de $0,012 s/(m^{1/3})$.

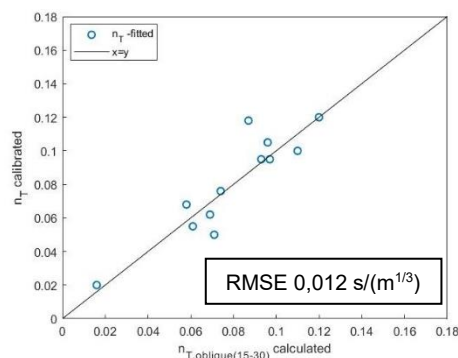


Figura 9. Comparação entre n_T *calibrated* e n_T *oblique(15-30)*.

Os caudais de galgamento obtidos com o modelo SWASH utilizando os coeficientes $n_{T\text{oblique}(15-30)}$ apresentaram valores mais próximos dos obtidos com o modelo SWASH com a utilização dos coeficientes calibrados. À exceção do caso 2 (com diferenças de $4 l/s/m$), todos os casos



apresentaram diferenças inferiores a 2 l/s/m (Figura 10a). Os valores de q obtidos com o modelo SWASH utilizando os coeficientes $n_{T\ oblique(15-30)}$ apresentaram valores próximos dos calculados com ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Figura 10b). Apenas um caso apresentou uma diferença de 12 l/s/m (caso 15). O RMSE entre os valores de q obtidos com o modelo SWASH utilizando os coeficientes de Manning calibrados e calculados relativamente aos valores estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 foi de 6,26 l/s/m e 6,28 l/s/m, respetivamente.

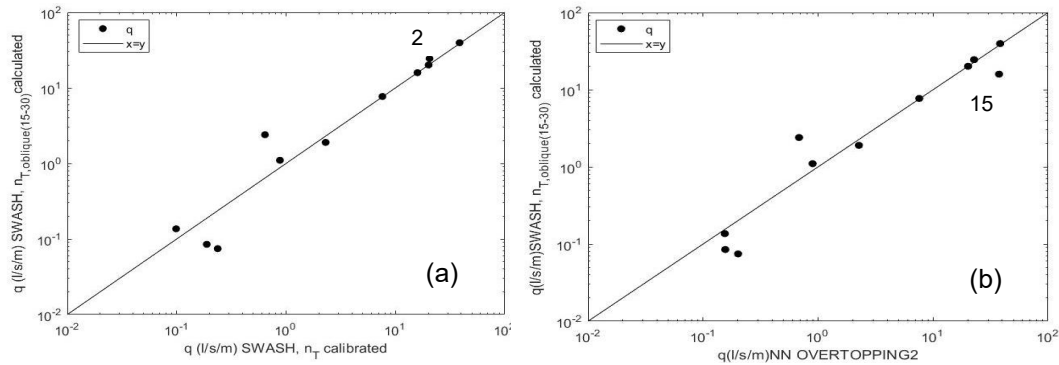


Figura 10. Comparação dos valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando $n_{T\ oblique(15-30)}$ com os valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando $n_{T\ calibrated}$ (a) e com os valores de q estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 (b).

Estado de Agitação 2

A equação para o cálculo do coeficiente de Manning $n_{T\ oblique(30-50)}$ ($s/(m^{1/3})$) é dado pela Eq. 3:

$$n_{T\ oblique(30-50)} = a_1 + a_2 (R_c/H_s) + a_3 S_{op} + a_4 (R_c/H_s)^2 + a_5 (R_c/H_s) S_{op} + \quad (\text{Eq.3})$$

$$+ a_6 S_{op}^2 + a_7 (R_c/H_s)^3 + a_8 (R_c/H_s)^2 S_{op} + a_9 (R_c/H_s) S_{op}^2 + a_{10} S_{op}^3$$

em que:

$$a_1 = 2,617; a_2 = - 11,47; a_3 = 188,8; a_4 = 7,496; a_5 = 66,13; a_6 = - 5562; a_7 = - 1,312; a_8 = - 49,98; a_9 = 686,7; a_{10} = 3,756e^{+04}$$

Esta equação é válida para $\beta = [30-50]^\circ$, $R_c/H_s = [1,1-1,9]$ e $S_{op} = [0,02-0,05]$.

Os coeficientes de Manning calculados pela Eq. 3 são próximos dos calibrados. A Figura 11 representa a comparação entre $n_{T\ calibrated}$ e $n_{T\ oblique(30-50)}$. O RMSE associado foi de 0,006 $s/(m^{1/3})$.

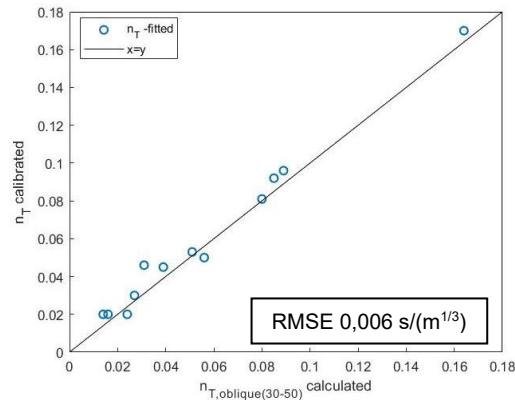


Figura 11. Comparação entre n_T calibrated e n_T oblique(30-50).

Os valores de q obtidos com o modelo SWASH utilizando os coeficientes n_T oblique(30-50) apresentaram valores muito próximos aos obtidos com a utilização dos coeficientes calibrados. A maior diferença verificada foi de 1,9 l/s/m (Figura 12a). Os valores de q para este estado de agitação foram geralmente baixos, apresentando a maioria dos casos caudais inferiores a 1 l/s/m.

Os caudais simulados com o modelo SWASH com os coeficientes n_T oblique(30-50) foram também muito próximos dos obtidos com a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Houve apenas duas exceções, para os casos que apresentavam os maiores caudais (casos 8 e 20, com caudais de 60 e 26 l/s/m, respetivamente), para os quais foram obtidas diferenças de 45 e 13 l/s/m (Figura 12b).

O RMSE entre os caudais simulados pelo modelo SWASH utilizando os coeficientes de Manning calibrados e calculados relativamente aos valores estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 foi de 13,44 l/s/m e 13,46 l/s/m, respetivamente.

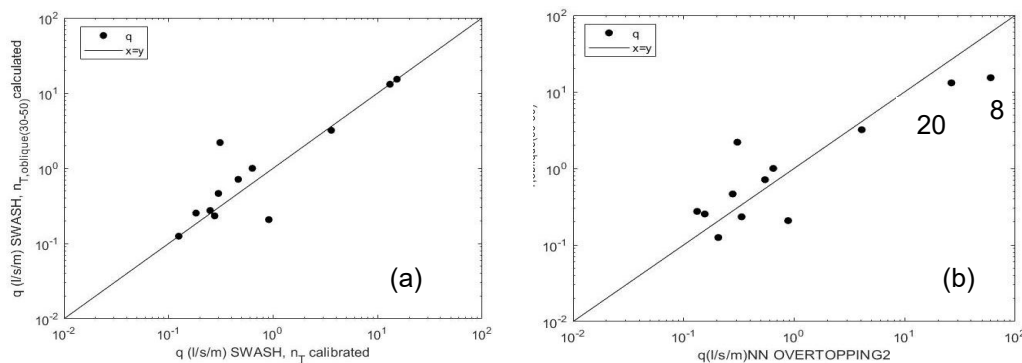


Figura 12. Comparação dos valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando n_T oblique(30-50) com os valores de q simulados pelo modelo SWASH utilizando n_T calibrated (a) e com os valores de q estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 (b).

Discussão

As simulações com o modelo SWASH para o porto da Ericeira demonstraram que este modelo fornece resultados semelhantes aos da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 quando se procede ao ajustamento do coeficiente de atrito do manto da estrutura. No entanto, houve casos em que, mesmo atingindo o limite mínimo para o coeficiente de Manning 0,02 s/(m^{1/3}), o caudal



de galgamento obtido com o modelo SWASH foi inferior ao obtido com a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Um comportamento semelhante já tinha sido observado por Vanneste *et al.* (2014), que verificaram que o modelo SWASH claramente subestimou o caudal de galgamento para estruturas complexas. Esses autores sugeriram que existe uma subestimação da velocidade da massa de água do galgamento, porque as diferenças de velocidade entre o fundo e a superfície na zona em frente à estrutura não são bem descritas pelo modelo quando apenas é utilizada uma camada vertical nas simulações. No entanto, é de recordar que os resultados obtidos pelo modelo SWASH não foram comparados com dados de campo, e sim com uma outra ferramenta de previsão do caudal de galgamento. Para que se possa confirmar se é o modelo SWASH que subestima o caudal de galgamento, ou se é a ferramenta NN_OVERTOPPING2 que o sobrestima, os dados de campo são essenciais e infelizmente inexistentes para o porto da Ericeira.

A calibração do modelo para o perfil com o manto principal constituído por tetrápodes incluiu condições de agitação incidente com diferentes características, e o modelo SWASH conseguiu valores próximos dos obtidos com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 para a maioria das condições. O erro quadrático médio foi de 10,49 l/s/m, mas esse valor elevado deveu-se a poucas condições de agitação incidente para as quais q foi subestimado pelo modelo SWASH em mais de 10 l/s/m.

Para o desenvolvimento de uma expressão para o cálculo automático do coeficiente de Manning, os resultados demonstraram que, embora com as simulações com o modelo SWASH se tenham obtido caudais de galgamento semelhantes aos calculados com a ferramenta NN_OVERTOPPING2, não se observou uma relação clara entre o coeficiente de Manning e R_c/H_s e S_{op} . O facto de as simulações incluírem uma grande gama de períodos e alturas de onda, e de cobrirem ângulos de incidência entre 18° e 49° pode contribuir para a dificuldade de encontrar estas relações. Diversos estudos demonstraram que a obliquidade da onda tem influência na estimativa do galgamento (e.g. Galland, 1994; EurOtop, 2018).

Devido ao relativamente elevado valor do erro quadrático médio das simulações com a utilização do coeficiente de Manning calculado pela equação que contemplou todos os casos simulados (Eq. 1) e do comportamento aleatório do coeficiente de Manning, os casos simulados foram analisados e separados em dois estados de agitação de acordo com as suas características. Tal permitiu analisar se o comportamento do coeficiente de Manning estava relacionado com as características da agitação incidente.

As equações que resultaram da separação das simulações em dois estados de agitação deram origem a erros muito pequenos no cálculo do coeficiente de Manning (0,01 s/(m^{1/3}) para a equação desenvolvida para β entre 15° e 30° (Eq.2) e 0,006 s/(m^{1/3}) para a equação desenvolvida para β entre 30° e 50° (Eq.3). A correlação entre o coeficiente de Manning e R_c/H_s e entre o coeficiente de Manning e S_{op} foi observada quando se dividiram os casos simulados em dois estados de agitação. No entanto, as equações desenvolvidas possuem uma menor gama de aplicabilidade. Este ponto deverá ser tido em consideração na integração do modelo SWASH no sistema HIDRALERTA. Outro aspeto que terá de ser tido em conta na implementação do modelo SWASH num sistema operacional é o tempo necessário para cada simulação. As simulações foram efetuadas num sistema operacional Windows™ com um processador Intel™ Core i5-1035G1 (CPU 1,0 GHz, 4 cores). Utilizando apenas um processador, cada simulação demorou cerca de dez minutos.

Conclusões

Este estudo foi desenvolvido para investigar a integração do modelo SWASH no protótipo do porto da Ericeira do sistema HIDRALERTA através de: i) calibração da versão unidimensional do modelo para um perfil com um manto principal constituído por tetrápodes e ii) desenvolvimento de uma equação para o cálculo automático do coeficiente de Manning para o manto principal.

A fase de calibração demonstrou que o desempenho do modelo na estimativa do caudal de



galgamento é muito dependente do coeficiente de Manning. Com um coeficiente de Manning calibrado, o modelo fornece bons resultados quando comparados com os da NN_OVERTOPPING2 e também a um baixo custo computacional. No entanto, em alguns casos simulados o modelo SWASH subestimou o caudal de galgamento. As simulações demonstraram que, para o desenvolvimento de uma expressão para o cálculo do coeficiente de Manning, o ângulo de incidência da onda terá de ser considerado. Consequentemente, ou as expressões a desenvolver deverão focar apenas uma pequena gama de ângulos de incidência da onda, ou, quando a gama de ângulos de onda incidente é grande, dever-se-á incluir o cosseno do ângulo da onda incidente como uma variável independente no desenvolvimento da fórmula. Desta forma, é possível ter em consideração a obliquidade da onda, pois esta variável não pode ser incluída nas simulações com a versão unidimensional do modelo SWASH.

Como conclusão final, pode-se afirmar que a versão unidimensional do modelo SWASH teve um bom desempenho e é passível de ser implementada no sistema HIDRALERTA. Adicionalmente, o modelo SWASH tem também a capacidade de modelar, tanto a propagação da onda como o fenómeno de galgamento, permitindo a definição da área inundada, algo impossível de obter com ferramentas como a NN_OVERTOPPING2. O desenvolvimento de mecanismos de cálculo automático das variáveis necessárias para a aplicação do modelo é essencial para que o mesmo possa ser implementado no sistema HIDRALERTA em substituição da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2.

Agradecimentos

Agradece-se aos projetos To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017) e EW-COAST (Ref. ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657, financiado através do UIDP/00350/2020).

Referências Bibliográficas

- Coeveld, E.M., van Gent, M.R.A. & Pozueta, B. (2005). "Neural Network: Manual NN_OVERTOPPING2", CLASH WP8 – Reharbour BV.
- EurOtop (2018). "Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application". Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. & Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.
- Fortes, C.J.E.M. (2002). "Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias. Análise pelo método dos Elementos Finitos", Phd. Thesis, IST/DEM.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Pinheiro, L., Poseiro, P., Serrazina, V., Mendonça, A., Smithers, N., Santos, M.I., Barateiro, J., Azevedo, E.B., Salvador, M., e Reis, F.V. (2020). "The Hidralerta System: Application to The Harbours of Madalena do Pico and São Roque do Pico, Azores". *Journal Of Aquatic Ecosystem Health & Management*.
- Galland, J. (1994). "Rubble mound breakwater stability under oblique waves: an experimental study." *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. Kobe* pp 1061-1074.
- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., Weber, E. (2012). "Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience." In C. Field, V. Barros, T. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 25-64). Cambridge University Press.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W. Collins, P. Friedlingstein, A. Gaye, J. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti & Co-authors, (2007). "Global climate projections. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.



- Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, 747-846.
- Pillai, K., Etemad-Shahidi, A., & Lemckert, C. (2016). "Wave overtopping at berm breakwaters: Review and sensitivity analysis of prediction models." *Coastal Engineering*, 120, 1–21.
- Pés, V.M. (2013). "Applicability and Limitations of the SWASH model to predict Wave Overtopping." Master Thesis, TU Delft & Universitat Politècnica de Catalunya.
- Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., Soares, C. G. (2020). Risk forecast system for moored ships, In proceedings of vICCE (virtual International Conference on Coastal Engineering), 6 a 9 de outubro.
- Poseiro, P. (2019). "Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Harbour Areas: Development of a Model and Risk Assessment." Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, IST-UNL.
- Suzuki, T., Altomare, C., Veale, W., Verwaest, T., Trouw, K., Troch, P., & Zijlema, M. (2017). „Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using SWASH." *Coastal Engineering*, 122, 108–123.
- Suzuki, T., Altomare, C., Verwaest, T., Trouw, K., & Zijlema, M. (2014). „Two-Dimensional Wave Overtopping Calculation Over A Dike In Shallow Foreshore By Swash." *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 3.
- Suzuki, T., Verwaest, T., Veale, W., Trouw, K., & Zijlema, M. (2012). „A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores." *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 50.
- SWAN team (2006). "SWAN Technical documentation." SWAN cycle III, version 40.51
- Tavares, A. O., Barros, J. L., Freire, P., Santos, P. P., Perdiz, L., & Fortunato, A. B. (2021). "A coastal flooding database from 1980 to 2018 for the continental Portuguese coastal zone." *Applied Geography*, 135, 102534.
- Tonelli, M., & Petti, M. (2013). "Numerical simulation of wave overtopping at coastal dikes and low-crested structures by means of a shock-capturing Boussinesq model." *Coastal Engineering*, 79, 75–88.
- Vanneste, D. F. A., Altomare, C., Suzuki, T., Troch, P., & Verwaest, T. (2014) "COMPARISON OF NUMERICAL MODELS FOR WAVE OVERTOPPING AND IMPACT ON A SEA WALL." *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 5.
- Zhang, N., Zhang, Q., Wang, K.-H., Zou, G., Jiang, X., Yang, A., & Li, Y. (2020). „Numerical Simulation of Wave Overtopping on Breakwater with an Armor Layer of Accropode Using SWASH Model." *Water*, 12(2), 386.
- Zijlema, M., Stelling, G.S., e Smit, P. (2011). "SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters". *Coastal Engineering*, 58(10), 992–1012.