



APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO AMAZON AO CÁLCULO DO GALGAMENTO DE ESTRUTURAS COSTEIRAS E PORTUÁRIAS

Maria Teresa Reis, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A., Portugal

Maria da Graça Neves, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

Keming Hu, Royal Haskoning, Reino Unido

Terry Hedges, University of Liverpool, Reino Unido

RESUMO

Neste artigo descreve-se o modelo numérico AMAZON para o cálculo do galgamento em estruturas costeiras e portuárias, baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas. Este modelo tem a grande vantagem de simular de forma rápida um estado de mar de 1000 ondas ou mais, facilitando e tornando célere a análise do galgamento de diversas variantes de geometria de uma estrutura sujeita à acção de diferentes condições de agitação.

Para ilustrar as capacidades do modelo no cálculo do galgamento, apresentam-se dois casos de aplicação, um correspondendo a uma gama de estruturas de protecção marginal e o outro a uma estrutura de protecção portuária, composta por um quebra-mar de estrutura mista. Os resultados do modelo são comparados com os resultados de fórmulas empíricas/semi-empíricas, da ferramenta NN_OVERTOPPING2 e de ensaios em modelo físico. Verifica-se que, quer para as estruturas de protecção marginal, quer para o quebra-mar de estrutura mista, os resultados obtidos com o AMAZON são satisfatórios, apesar de, na sua versão actual, o modelo estar essencialmente desenvolvido para estruturas impermeáveis. Por fim, descrevem-se os trabalhos de desenvolvimento futuro do modelo.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, em Portugal, é na zona costeira que se concentra a maior parte da população e das diferentes actividades económicas, tais como a indústria e o comércio. A segurança destas zonas depende em grande parte do comportamento das estruturas de protecção aí construídas, especialmente no que respeita ao galgamento, já que a ocorrência de galgamentos pode ter consequências fatais e de custos avultados (Bouma *et al.*, 2004; Allsop, 2005; Reis *et al.*, 2006a). Numa era em que a subida do nível médio do mar é um tema emergente, a eficiência dessas obras deve ser continuamente verificada de forma a garantir os níveis mínimos de segurança. Também a segurança e funcionalidade dos portos, muitas vezes expostos a condições extremas de agitação, dependem, em grande parte, do comportamento das estruturas marítimas que os protegem no que respeita à sua estabilidade e galgamentos.

Actualmente, as ferramentas mais utilizadas para determinar o galgamento de uma estrutura marítima são as formulações empíricas (Owen, 1980; Bradbury e Allsop, 1988; Pedersen e Burcharth, 1992; Franco *et al.*, 1994; 1995; Pedersen, 1996; Van der Meer *et al.*, 1998; Besley, 1999) ou semi-empíricas (Hedges e Reis, 1998, 2004; Reis *et al.*, 2007) baseadas em resultados de ensaios em modelo físico. No entanto, a aplicação directa destas formulações é limitada a configurações simples de estruturas e a condições específicas de agitação. A modelação física continua a ser o método mais fiável de determinar o galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento, calibração e validação de outros métodos de cálculo do galgamento. No caso de ensaios em modelo físico, reveste-se da maior importância o conhecimento dos efeitos de escala e de modelo que podem ocorrer. Resultados de protótipo e de ensaios em modelo físico a grandes escalas são muito raros e só recentemente foram efectuados vários estudos (Franco *et al.*, 2004; Geeraerts e Boone, 2004; Geeraerts e Willems, 2004; Hordijk,



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

2004; Kortenhous *et al.*, 2004a; Pullen e Allsop, 2004a, 2004b) para preencher esta lacuna e permitir uma investigação desses efeitos (Kortenhous *et al.*, 2004b, 2005; de Rouck *et al.*, 2005).

O uso de redes neuronais parece ser também uma ferramenta de futuro na determinação do galgamento (Medina *et al.*, 2002; Wedge *et al.*, 2005). Recentemente, uma ferramenta de cálculo do galgamento baseada na análise de redes neuronais, NN_OVERTOPPING2, foi desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH (Coeveld *et al.*, 2005; Medina *et al.*, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005). Os resultados são baseados em cerca de 8400 combinações de *input-output* provenientes de ensaios em modelo físico para diversas características da agitação e diferentes tipos de estruturas, tais como quebra-mares de talude e quebra-mares verticais (Steendam *et al.*, 2004). Esta ferramenta utiliza 15 parâmetros de entrada que incluem informação sobre a onda e a geometria da estrutura. No entanto, Coeveld *et al.* (2005) recomendam que a fiabilidade dos resultados da NN_OVERTOPPING2 deve ser verificada através de modelação física específica para as condições de agitação e geometria da estrutura em questão. Como tal, este método pode ainda ter aplicação limitada, apesar da sua simplicidade de utilização e rapidez de cálculo.

Devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se cada vez mais atractivo. Entre os modelos existentes podem destacar-se os baseados nas equações NLSW (*non-linear shallow-water*) (Hu, 2000; Hu *et al.*, 2000; Hu e Meyer, 2005), os modelos VOF (*volume of fluid*) (Lin e Liu, 1998; Kortenhous *et al.*, 2005; Lara *et al.*, 2006), os modelos SC (*surface capturing*) (Ingram *et al.*, 2002, 2004) e os modelos SPH (*smoothed particle hydrodynamics*) (Shao *et al.*, 2006). Apesar dos modelos mais recentes (VOF, SC e SPH) serem mais completos, a sua aplicação em casos práticos de engenharia tem ainda algumas limitações, apesar de serem mais flexíveis que as fórmulas ou os modelos físicos, já que uma vez calibrados e validados, podem ser configurados e aplicados com fiabilidade a uma gama alargada de configurações alternativas de estrutura e de agitação. Algumas das limitações estão relacionadas com o tempo elevado de cálculo e com a necessidade de calibração de cada caso de estudo; outras limitações dizem respeito à representação de certas características estruturais, tais como a porosidade (Neves *et al.*, 2006). Os modelos mais simples, baseados nas equações NLSW, apesar das suas limitações essencialmente relacionadas com as equações de base, têm como grande vantagem a rapidez de cálculo.

O modelo AMAZON (Hu, 2000) é um exemplo de modelo baseado nas equações NLSW. Este modelo é muito utilizado actualmente no dimensionamento de estruturas em talude impermeáveis galgáveis e em estudos de previsão de inundação. O modelo foi desenvolvido para estudos de galgamento em estruturas em talude impermeáveis, embora permita simular estruturas porosas através do recurso a uma dissipação artificial. Pela sua rapidez de cálculo e a qualidade de resultados obtidos é uma ferramenta útil no dimensionamento de estruturas costeiras.

Neste artigo descreve-se o modelo numérico AMAZON e apresentam-se dois casos de aplicação ao cálculo do galgamento: uma gama de estruturas de protecção marginal em talude impermeáveis e uma estrutura de protecção portuária, composta por um quebra-mar de estrutura mista. Os resultados do modelo são apresentados, discutidos e comparados com os resultados de fórmulas empíricas/semi-empíricas, da ferramenta NN_OVERTOPPING2 e de ensaios em modelo físico. Estes exemplos permitem ilustrar as capacidades do modelo, assim como as suas vantagens e limitações.

Assim, no ponto 2 apresenta-se uma breve descrição do modelo AMAZON. No ponto 3 descrevem-se os casos de estudo, apresentam-se os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por fim, o ponto 4 contém as conclusões e os futuros desenvolvimentos do modelo numérico.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo AMAZON foi desenvolvido em Manchester Metropolitan University (Hu, 2000). Baseia-se na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (NLSW), que resultam de uma simplificação das equações de *Reynolds* por integração na profundidade. O modelo incorpora um modelo de turbulência simples *zero-equation*.

Utilizando o método de volumes finitos, permite gerar uma malha constituída por elementos

que podem ter qualquer forma (tal como rectangular, triangular, hexagonal, etc.) e dimensões variáveis, podendo ter uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

O modelo permite simular ondas irregulares, quer na versão unidimensional (canal) aqui utilizada, quer na bidimensional (em planta) e a rebentação é simulada utilizando o conceito de macaréu (*bore*).

No que diz respeito à fronteira de entrada do modelo, AMAZON incorpora um método numérico de absorção de ondas imposto nesta fronteira que permite absorver mais de 98% das ondas reflectidas pela estrutura. Este método de absorção é muito importante já que permite colocar a fronteira de entrada perto da estrutura, evitando a modelação desde águas profundas, onde o modelo tem limitações, já que se baseia na resolução das equações NLSW. Segundo Hu e Meyer (2005), o modelo requer, para optimização de resultados, que a fronteira de entrada seja colocada a aproximadamente um comprimento de onda, L_s , do pé da estrutura, em que L_s é o comprimento de onda à profundidade d_s do pé da estrutura e L_s é calculado da seguinte forma: $L_s = T_p \sqrt{gd_s}$, sendo g a aceleração da gravidade e T_p o período de pico do espectro incidente.

Modela várias configurações de estruturas (Figura 1), como estruturas em talude (com e sem berma, com e sem superestrutura) e verticais, apesar de usar um artifício para modelar este tipo de estruturas. Não permite modelar a parte reflectora de um muro-cortina, por fazer integração na profundidade.

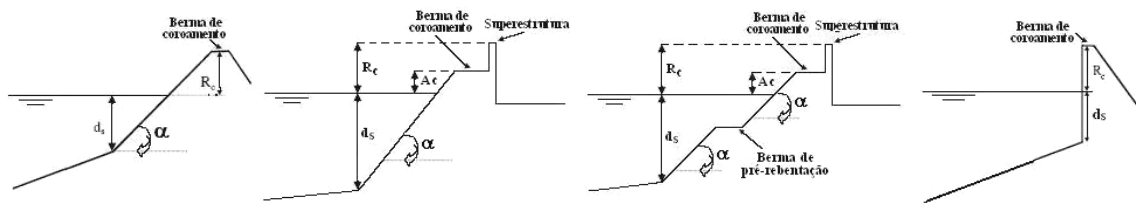


Figura 1 – Exemplo de configurações de estruturas possíveis de modelar com o AMAZON.

O modelo inclui um parâmetro de atrito de fundo para ter em linha de conta a perda de energia devido, por exemplo, à rugosidade de um talude. Não modela explicitamente a permeabilidade da estrutura, mas em certos casos de estruturas permeáveis, o valor do parâmetro de atrito de fundo pode ser utilizado para entrar em linha de conta com este factor (Hu, 2000).

AMAZON foi desenvolvido na linguagem de programação C++ e tem uma interface bastante agradável e fácil de usar (Figura 2).

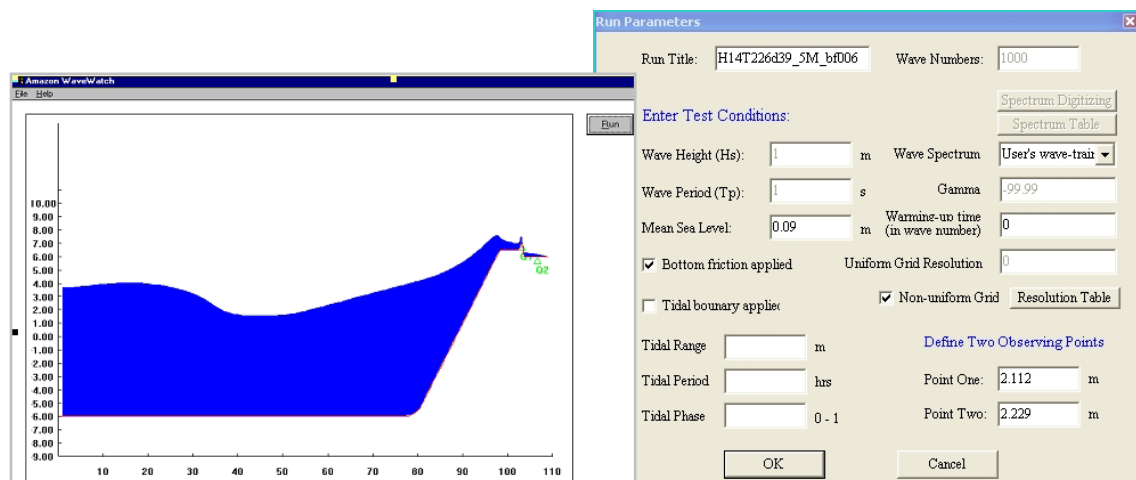


Figura 2 – Exemplo de janelas de entrada e saída do programa.

Como dados de entrada, o modelo necessita dos seguintes elementos:



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

- perfil da estrutura galgada;
- batimetria dos fundos adjacentes;
- parâmetro de atrito de fundo (pode variar ao longo da estrutura e da batimetria);
- nível de água;
- agitação incidente (o modelo permite a escolha de um espectro pré-definido – JONSWAP, Bretshneider-Moskowitz, Sinusoidal e constante – a definição de um novo espectro pelo utilizador ou ainda a introdução de uma série incidente proveniente de ensaios em modelo físico reduzido);
- malha (uniforme/não uniforme, discretização);
- coordenadas de dois pontos de cálculo;
- outros parâmetros do modelo (por exemplo, altura de água mínima em cada célula da malha).

AMAZON pode utilizar dados quer à escala de modelo, quer à escala de protótipo, sendo necessário para isso apenas escalar adequadamente os dados inseridos e alguns parâmetros utilizados no modelo numérico.

Como resultados, o modelo permite obter o perfil da superfície livre, velocidades integradas na vertical e, através destas, a série temporal de caudais instantâneos, o caudal médio e o caudal de pico em dois pontos da estrutura galgada.

A grande vantagem de modelos deste tipo no cálculo do galgamento é que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas, tornando a sua aplicação viável, quer em dimensionamento de estruturas galgáveis, quer em estudos de previsão de inundação. Foi já validado em diferentes casos de estudo com bons resultados (Hu *et al.*, 2000).

3. CASOS DE APLICAÇÃO

3.1. Considerações Gerais

Nas secções seguintes apresenta-se a aplicação do modelo AMAZON para o cálculo do galgamento de:

- i) uma gama de estruturas de protecção marginal – tipo de estrutura para a qual o modelo foi inicialmente desenvolvido e extensivamente validado e para o qual é frequentemente aplicado;
- ii) uma estrutura de protecção portuária – estrutura permeável e para a qual os resultados do modelo não são tão coerentes, já que o modelo não inclui o escoamento em meios porosos.

Para os dois tipos de estrutura, os resultados do AMAZON são comparados com dados de modelo físico e com resultados de fórmulas empíricas/semi-empíricas e de redes neuronais.

O galgamento é normalmente expresso através de um caudal médio por tempo de ensaio e é calculado com base no valor do volume de água, Q , que galga uma zona da estrutura de largura b , medido durante um ensaio de duração D . Assim, neste artigo o valor médio do volume galgado por metro linear de estrutura e por tempo, q , é dado pela seguinte expressão:

$$q = \frac{1}{b} \frac{1}{D} Q \quad (1)$$

3.2. Estruturas de Protecção Marginal

3.2.1. Caso de estudo

Este caso de estudo envolve o cálculo do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura, q , para estruturas de protecção marginal, com taludes exteriores uniformes, impermeáveis, não rugosos, com ângulos, α , com a horizontal de 1:1, 1:2, 1:4, 1:7, 1:10, 1:15 e

1:20. Os fundos em frente às estruturas consistem numa rampa de inclinação constante de 1:50 (Figura 3).

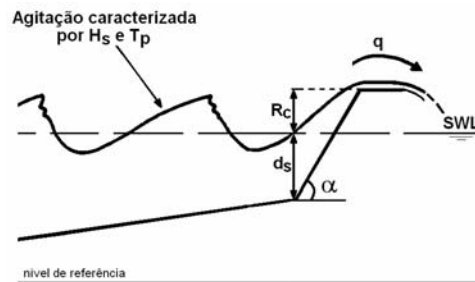


Figura 3 – Representação esquemática das estruturas de protecção marginal estudadas.

Foram consideradas diferentes condições de agitação incidente irregular, perpendicular à estrutura, com uma configuração espectral empírica de JONSWAP (com um factor de esbelteza de $\gamma=3,3$), altura de onda significativa incidente, $H_s=1$ m e declividade da onda, H_s/L_{op} , de 0,01, 0,02 e 0,03, onde L_{op} é o comprimento de onda ao largo, calculado segundo a teoria linear da onda através de $L_{op} = gT_p^2 / 2\pi$.

A profundidade no pé do talude das estruturas era de $d_s=5$ m para $H_s/L_{op}=0,01$ e $0,02$ e $d_s=3$ m para $H_s/L_{op}=0,03$. Esta diferença deve-se a restrições de aplicação do modelo AMAZON. Foi considerada uma gama de valores para R_c/H_s que variou entre 0,5 e 4,0, em que R_c é a altura de coroamento da estrutura acima do nível de repouso da superfície livre, SWL.

Este tipo de estruturas são típicas no Japão e no Reino Unido para protecção costeira. Em Portugal, existem diversas estruturas de protecção marginal semelhantes, tais como o caso das de Buarcos ou da Costa de Caparica, onde o valor de α é de 2:3.

3.2.2. Ensaios em modelo físico

Os dados de ensaios em modelo físico reduzido disponíveis são provenientes do laboratório *HR Wallingford* e da Universidade de Kansai. São quatro os conjuntos de dados considerados: dados de Owen (1980), de Hawkes *et al.* (1998), do projecto SHADOW (Bay *et al.*, 2004) e de Kansai (Mase *et al.*, 2003).

Os ensaios considerados neste estudo foram todos realizados em canal e foram feitas medições de caudais médios para diferentes configurações da estrutura galgada e várias condições de agitação. As estruturas ensaiadas caracterizam-se por taludes uniformes, impermeáveis e não rugosos, com diferentes inclinações do talude exterior. Os ensaios de Owen incluíram taludes a 1:1, 1:2 e 1:4; os ensaios de Hawkes *et al.* contemplaram taludes a 1:2 e 1:4; no projecto SHADOW ensaiaram-se taludes a 1:2, 1:10 e 1:15; e dos ensaios realizados na Universidade de Kansai utilizaram-se, neste estudo, os dados correspondentes a taludes a 1:7, 1:10, 1:15 e 1:20 (foram também realizados alguns ensaios com taludes a 1:1,3, 1:3, 1:5 e 1:6).

No Quadro 1 apresenta-se a gama de condições contempladas pelos ensaios, em que $\xi_p = \tan \alpha / \sqrt{H_s / L_{op}}$ é o número de Iribarren.

Quadro 1 – Gama de condições contempladas pelos ensaios.

Talude	Limites	ξ_p	R_c/H_s	d_s/H_s
1:1	Min; Max	4,71; 6,20	0,57; 2,40	1,65; 5,06
1:2	Min; Max	2,12; 6,52	0,57; 7,65	0,93; 26,31
1:4	Min; Max	1,13; 2,38	0,58; 2,86	0,95; 5,13
1:7	Min; Max	0,70; 1,57	0,06; 2,24	3,45; 21,30
1:10	Min; Max	0,51; 2,55	0,16; 6,29	2,80; 15,50
1:15	Min; Max	0,32; 1,71	0,06; 4,63	2,93; 21,30
1:20	Min; Max	0,22; 0,38	0,13; 0,75	2,76; 15,51



3.2.3. Aplicação do modelo AMAZON

Aplicou-se o modelo AMAZON às condições acima descritas (escala do protótipo). Tal como mencionado no ponto 2, a fronteira de entrada do modelo foi situada a uma distância do pé do talude da estrutura de L_s . Para as condições consideradas, d/L_{op} varia entre 0,061 e 0,116, em que d é a profundidade na fronteira de entrada. Estes valores estão dentro dos limites que a literatura existente tem indicado ($0,016 < d/L_{op} < 0,3$) como valores para os quais se obtém bons resultados com modelos baseados na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (Pullen e Allsop 2003; Hu e Meyer, 2005), como é o caso do modelo AMAZON.

Na fronteira de entrada do modelo, aplicou-se um espectro empírico de JONSWAP ($\gamma=3,3$), $H_s=1$ m e T_p a variar consoante se considerou $H_s/L_{op}=0,01$, 0,02 ou 0,03. Correu-se o modelo para 3000 ondas. A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada 10 m atrás do coroamento da estrutura.

O comprimento do domínio de cálculo utilizado variou entre 40,5 m e 248,0 m, dependendo da inclinação do talude exterior e da posição da fronteira de entrada (i.e., de L_s). O número total de células variou entre 145 e 1582, respectivamente. A malha de cálculo utilizada tem uma discretização de 0,5 m em frente ao local de implantação da estrutura, onde os fundos têm uma inclinação a 1:50, 0,2 m na zona mais profunda do talude da estrutura e na zona entre o coroamento e a fronteira de saída e 0,1 m na parte superior do talude. A altura de água mínima em cada célula da malha de cálculo foi de 10^{-6} m, o que significa que qualquer célula com uma profundidade inferior a esta é removida dos cálculos e tratada como seca. Todo o domínio foi modelado como impermeável e sem atrito.

3.2.4. Fórmulas empíricas de Owen e de Van der Meer e Janssen

Como actualmente ainda são as fórmulas empíricas as ferramentas mais utilizadas no cálculo dos galgamentos de estruturas marítimas, analisou-se a aplicação das fórmulas de Owen (1980; Besley, 1999) e de Van der Meer e Janssen (1995) ao caso de estudo considerado.

Para o tipo de estruturas consideradas e para ondas a incidir perpendicularmente à estrutura, a fórmula de Owen pode representar-se da seguinte forma:

$$q = A T_m g H_s \exp \left[-B \frac{R_c}{T_m \sqrt{g H_s}} \right] \quad (2)$$

em que A e B são coeficientes empíricos, H_s é a altura de onda significativa medida no pé do talude que antecede a estrutura e T_m é o período médio de zero ascendente. Para os taludes considerados neste estudo, os valores de A e B adoptados são os valores apresentados em Besley (1999) e em Allsop e Pullen (2003).

Como as fórmulas empíricas são, em princípio, válidas apenas para as condições para as quais foram definidas, apresenta-se seguidamente a gama de parâmetros de validade da fórmula de Owen (Owen, 1980; Allsop e Pullen, 2003):

$$\begin{aligned} 10^{-6} < \frac{Q}{T_m g H_s} < 10^{-2}; \quad 0,05 < \frac{R_c}{T_m \sqrt{g H_s}} < 0,50 \\ 0,035 < \frac{H_s}{L_{om}} < 0,055; \quad 1,5 < \frac{d_s}{H_s} < 5,5 \end{aligned} \quad (3)$$

em que L_{om} é o comprimento de onda em águas profundas ($L_{om} = g T_m^2 / 2\pi$). Owen (1980) ainda sugeriu que é possível usar a eq. 2 para extrapolar resultados quando $Q/T_m g H_s < 10^{-6}$.

O modelo empírico de Van der Meer e Janssen (1995) para o cálculo do galgamento médio, q , consiste em duas expressões distintas: uma para rebentação e outra para ausência de rebentação. Este modelo incorpora quatro factores de redução para ter em linha de conta a presença de uma berma, γ_b , de fundos em frente à estrutura que se encontrem em águas pouco profundas (ondas limitadas pela rebentação), γ_h , a rugosidade de um talude, γ_f , e o



ângulo de incidência das ondas na estrutura, γ_β . A aplicação deste modelo deve limitar-se às seguintes condições: $0,3 < R_c / (\xi_p H_s \gamma_b \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta) < 2$ e $(\gamma_b \gamma_h \gamma_f \gamma_\beta) > 0,5$.

Para estruturas do tipo das consideradas neste estudo, para ondas a incidir perpendicularmente à estrutura e desprezando o efeito da rebentação nos fundos em frente à estrutura, o modelo pode representar-se da seguinte forma:

$$\begin{cases} q = \frac{0,06 \xi_p \sqrt{gH_s^3}}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \exp \left[-5,2 \frac{R_c}{\xi_p H_s} \right] & \text{para } \xi_p \leq 2 \\ q = 0,2 \sqrt{gH_s^3} \cdot \exp \left[-2,6 \frac{R_c}{H_s} \right] & \text{para } \xi_p > 2 \end{cases} \quad (4)$$

onde H_s é a altura de onda significativa medida no pé da estrutura.

3.2.5. Fórmula semi-empírica de Hedges e Reis

Analisou-se ainda a aplicação da fórmula semi-empírica de Hedges e Reis (1998, 2004; Reis *et al.*, 2007) ao caso de estudo considerado. Este modelo de galgamentos é baseado na teoria de galgamentos para ondas regulares desenvolvida por Kikkawa *et al.* (1968), mas foi desenvolvido para agitação irregular e pode ser representado através da seguinte expressão:

$$\begin{cases} q = A \sqrt{gR_{\max}^3} \left[1 - \frac{R_c}{R_{\max}} \right]^B & \text{para } 0 \leq \left[\frac{R_c}{R_{\max}} \right] < 1 \\ q = 0 & \text{para } \left[\frac{R_c}{R_{\max}} \right] \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

R_{\max} é o valor máximo observado dos espreiamentos durante uma dada tempestade, definindo-se espreiamento como o nível máximo acima do nível de repouso atingido por uma onda num talude. Embora a condição $R_c > R_{\max}$ garanta a inexistência de galgamentos (excluindo borrifos), é necessário estimar o valor atingido por R_{\max} durante uma tempestade, por não ser conhecido previamente. Hedges e Reis sugerem que seja calculado assumindo que a distribuição de Rayleigh é aplicável aos espreiamentos e usando o valor de R_{\max} não excedido em 37% ou 99% das tempestadas representadas por 100 ondas:

$$\begin{aligned} (R_{\max})_{37\%,100} / H_s &\approx 0,38 + 1,67 \xi_p & \text{para } 0 < \xi_p \leq 2,2 \\ &\approx 4,56 - 0,23 \xi_p & \text{para } 2,2 < \xi_p \leq 9,0 \\ &\approx 2,51 & \text{para } 9,0 < \xi_p \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (R_{\max})_{99\%,100} / H_s &\approx 0,54 + 2,37 \xi_p & \text{para } 0 < \xi_p \leq 2,2 \\ &\approx 6,45 - 0,32 \xi_p & \text{para } 2,2 < \xi_p \leq 9,0 \\ &\approx 3,55 & \text{para } 9,0 < \xi_p \end{aligned} \quad (7)$$

Se a distribuição de Rayleigh for aplicável a espreiamentos, então $(R_{\max})_{37\%,100} = R_{1\%}$, em que $R_{n\%}$ representa o valor excedido por $n\%$ de todos os espreiamentos. Vale a pena referir que, no passado, as estruturas de protecção marítima na Europa continental eram muitas vezes dimensionadas com um valor de R_c igual a $R_{2\%}$. Segundo a distribuição de Rayleigh, $(R_{\max})_{37\%,100}$ é aproximadamente 8,5% superior a $R_{2\%}$. É igualmente interessante referir que se $(R_{\max})_{37\%,100}$ é uma estimativa satisfatória de R_{\max} , então não deviam existir quaisquer sinais de galgamentos de protecções marginais de talude que tenham $R_c > 4,1H_s$, independentemente do talude exterior ou da declividade da onda incidente, uma vez que segundo as eqs. 6 $(R_{\max})_{37\%,100} = 4,1H_s$ é o valor máximo. Efectivamente, Van der Meer e Janssen (1995) não registaram qualquer galgamento nos casos em que $R_c > 4,1H_s$. Apesar disso, numa aproximação mais conservadora, os projectistas podem querer estimar R_{\max} através de $(R_{\max})_{99\%,100} = (R_{\max})_{37\%,10000} = R_{0,01\%}$. Esta opção considera a possibilidade de existência de galgamentos, para certas combinações de talude



exterior e declividade da onda, sempre que $R_c < 5,8H_s$.

Os coeficientes A e B são determinados através das eqs. 8 se se estimar R_{max} através de $(R_{max})_{37\%,100}$ e através das eqs. 9 se se estimar R_{max} através de $(R_{max})_{99\%,100}$:

$$\begin{aligned} A &= 0,0033 + 0,0025 \cot \alpha & \text{para } 1 \leq \cot \alpha \leq 12 \\ &= 0,0333 & \text{para } 12 < \cot \alpha \leq 20 \\ B &= 2,8 + 0,65 \cot \alpha & \text{para } 1 \leq \cot \alpha \leq 8 \\ &= 10,2 - 0,275 \cot \alpha & \text{para } 8 < \cot \alpha \leq 20 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A &= 0,0016 + 0,002 \cot \alpha & \text{para } 1 \leq \cot \alpha \leq 10 \\ &= 0,0216 & \text{para } 10 < \cot \alpha \leq 20 \\ B &= 5,34 + 1,15 \cot \alpha & \text{para } 1 \leq \cot \alpha \leq 7 \\ &= 16,61 - 0,46 \cot \alpha & \text{para } 7 < \cot \alpha \leq 20 \end{aligned} \quad (9)$$

O modelo de Hedges e Reis é válido para as condições apresentadas no Quadro 1, já que foi calibrado com base nos dados de Owen (1980) e de Kansai (Mase *et al.*, 2003), e posteriormente validado para os dados de Hawkes *et al.* (1998) e do projecto SHADOW (Bay *et al.*, 2004).

3.2.6. Rede neuronal NN_OVERTOPPING2

No âmbito do Programa Europeu CLASH (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping*) foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo do galgamento, NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de 700 redes neuronais (Coeveld *et al.*, 2005; Medina *et al.*, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005). Os valores calculados do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura, q , e os intervalos de confiança associados são baseados em cerca de 8400 combinações de *input-output* provenientes de ensaios em modelo físico realizados em vários laboratórios da Europa, América e Japão para diversas características da onda e diferentes tipos de estruturas, tais como quebra-mares de talude e quebra-mares verticais (Steendam *et al.*, 2004). NN_OVERTOPPING2 também calcula o caudal esperado no protótipo, q' , i.e. o valor de q corrigido para ter em linha de conta alguns efeitos de escala e de modelo. Usa 15 parâmetros de entrada que incluem informação sobre a onda e a geometria da estrutura. No entanto, Coeveld *et al.* (2005) recomendam que a fiabilidade dos resultados da NN_OVERTOPPING2 deve ser verificada através de modelação física específica para as condições de agitação e geometria da estrutura em questão. Como tal, este método pode ter aplicação limitada, apesar da sua simplicidade de utilização e rapidez de cálculo.

3.2.7. Análise dos resultados

Apresentaram-se nas secções anteriores diferentes métodos de cálculo do valor do caudal médio galgado, q , no topo de um talude uniforme, impermeável, não rugoso. No presente caso de estudo, consideraram-se inclinações do talude entre 1:1 e 1:20. A Figura 4 e a Figura 5 ilustram a comparação dos valores de q adimensionais, $q/(gH_s^3)^{0,5}$, medidos nos ensaios considerados e os valores calculados pelos vários métodos, para estruturas de protecção marginal com taludes exteriores a 1:2 e 1:4, respectivamente. Representam somente exemplos dos muitos resultados obtidos durante o estudo, no entanto, a análise que se apresenta seguidamente diz respeito a todo o conjunto de resultados. É de salientar que o valor de ξ_p é inferior a 2,5 excepto no caso dos taludes a 1:1, 1:2 e 1:4 ($H_s/L_{op}=0,01$).

Note-se que, teoricamente, não se deveria fazer comparação directa entre os resultados da fórmula de Van der Meer e Janssen e da NN_OVERTOPPING2 com os dados de Owen, Hawkes e Kansai, uma vez que a expressão e a ferramenta utilizam o valor de H_s no pé da estrutura enquanto que para os ensaios referidos, a agitação foi medida no pé do talude dos fundos existentes em frente à estrutura (para os ensaios SHADOW, H_s foi medido no pé da estrutura). Contudo, as diferenças entre os valores de H_s nos dois locais devem ser pequenas na ausência de rebentação nos fundos em frente à estrutura. Da mesma forma, também não é teoricamente correcta a comparação directa

entre os dados provenientes dos ensaios e os resultados do AMAZON, visto que este modelo não foi utilizado para exactamente as mesmas condições que foram adoptadas nos ensaios (por exemplo, é desconhecida a série incidente a um comprimento de onda do pé da estrutura). No entanto, é possível fazer comparação directa dos dados dos ensaios com os resultados dos modelos de Owen e de Hedges e Reis, já que estes modelos utilizam na sua formulação o valor de H_s no pé do talude dos fundos existentes em frente à estrutura.

Os resultados do modelo numérico AMAZON dependem fortemente da localização da fronteira de entrada, com os caudais adimensionais a aumentar com a aproximação entre a fronteira e o pé da estrutura. Quando a fronteira foi colocada a um comprimento de onda do pé da estrutura, AMAZON calculou os valores adimensionais do caudal ligeiramente por excesso para $\xi_p > 3$, aproximadamente. Para $\xi_p < 3$, existe um bom ajuste dos resultados do AMAZON aos dados.

Em geral, também existe um bom ajuste entre os resultados do modelo de Hedges e Reis e os dados de laboratório, quer para os dados usados na sua calibração (Owen e Kansai), quer para os dados usados apenas na sua validação (Hawkes e SHADOW). Dos modelos empíricos/semi-empíricos considerados, este foi o que apresentou um ajuste mais consistente aos dados para a gama de estruturas e as condições de agitação consideradas.

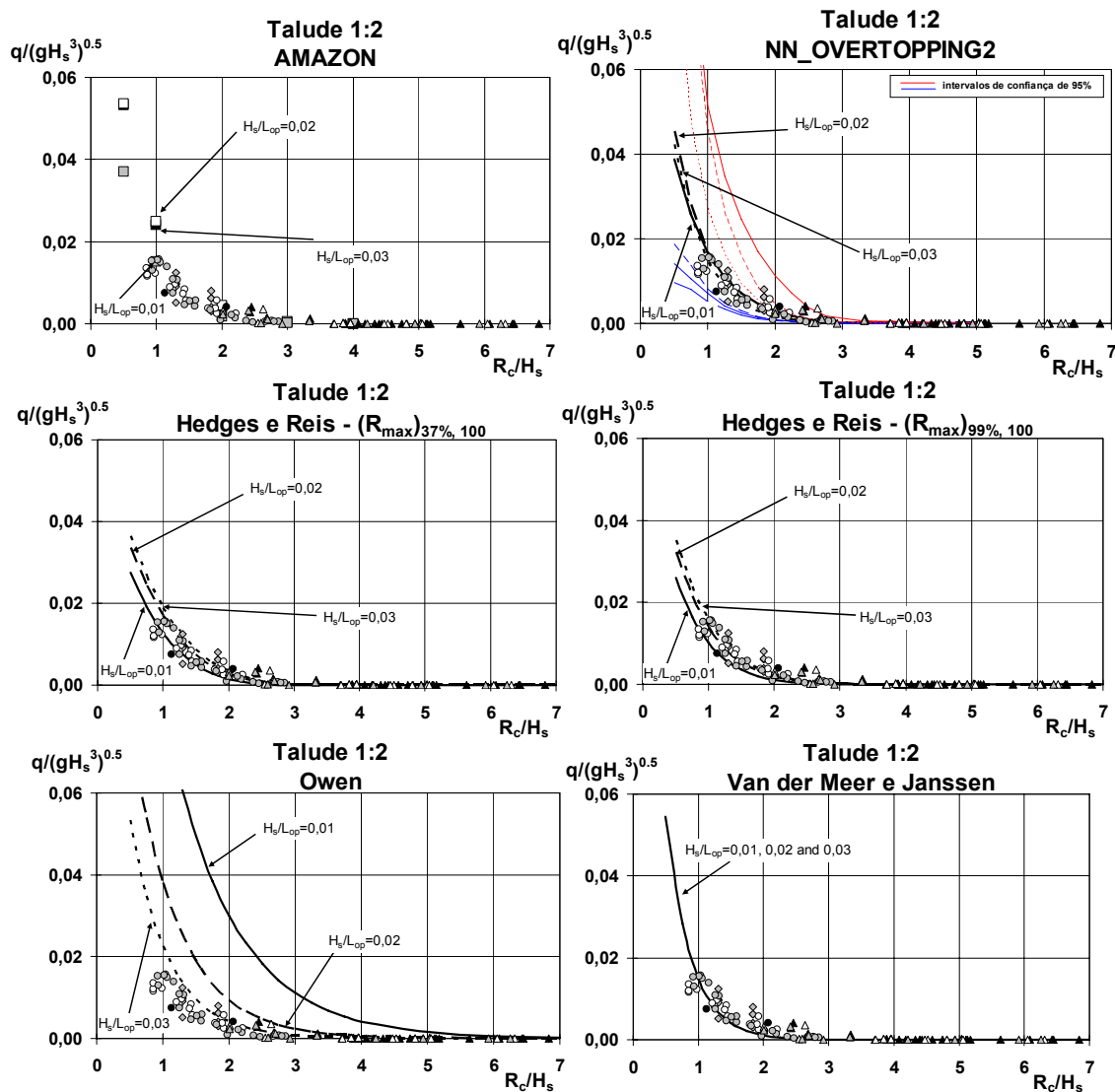


Figura 4 – Comparação de q calculado pelo AMAZON (\blacksquare : $H_s/L_{op}=0,01$; \square : $H_s/L_{op}=0,02$; \blacksquare : $H_s/L_{op}=0,03$), NN_OVERTOPPING2, modelos de Hedges e Reis, de Owen e de Van der Meer e Janssen com os dados de Owen (\diamond), Hawkes (\circ) e SHADOW (\triangle) para um talude a 1:2 (símbolos pretos: $0,005 < H_s/L_{op} < 0,015$; brancos: $0,015 < H_s/L_{op} < 0,025$; cinzentos: $0,025 < H_s/L_{op} < 0,035$).

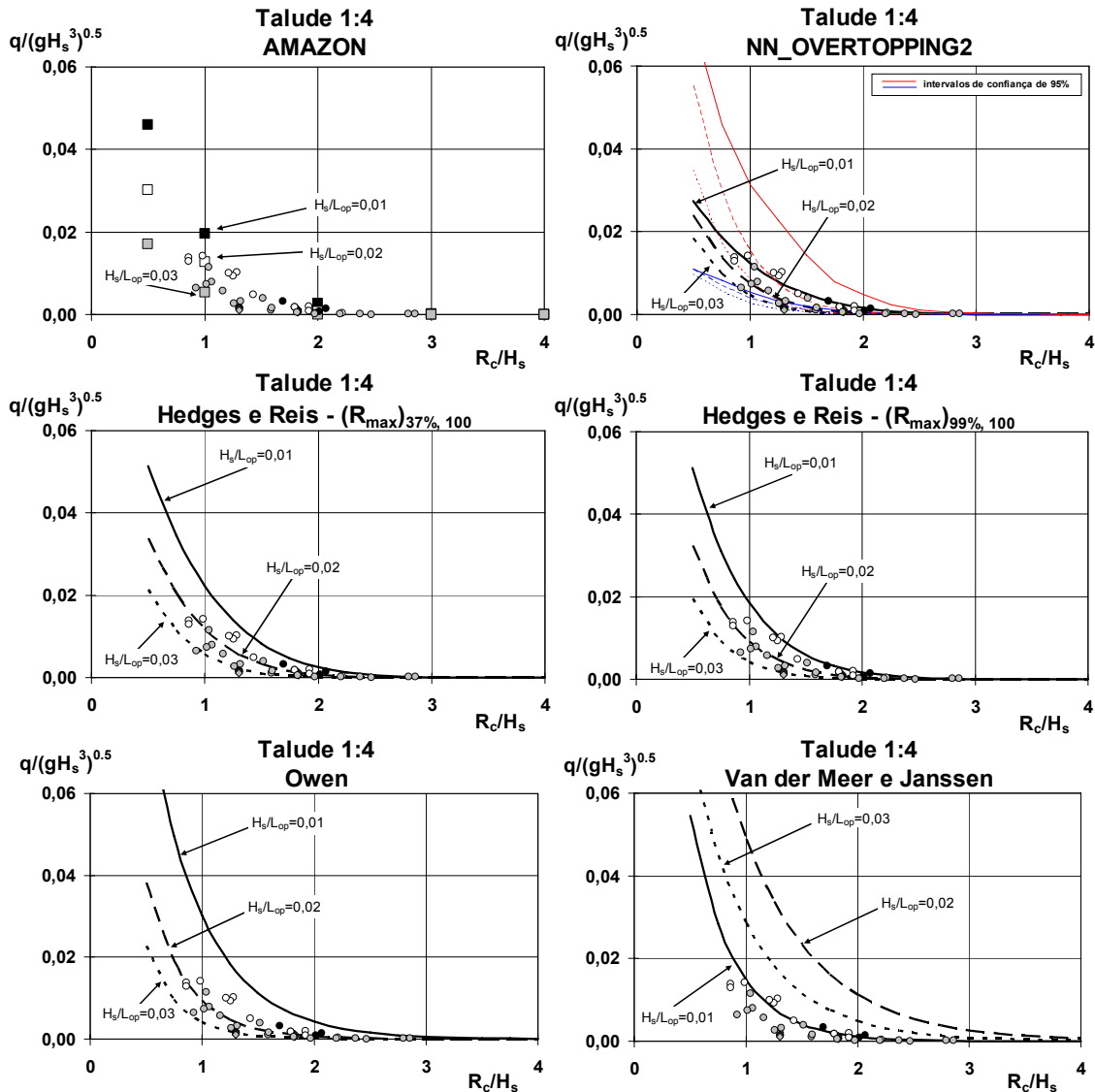


Figura 5 – Comparação de q calculado pelo AMAZON (\blacksquare : $H_s/L_{op}=0,01$; \square : $H_s/L_{op}=0,02$; \square : $H_s/L_{op}=0,03$), NN_OVERTOPPING2, modelos de Hedges e Reis, de Owen e de Van der Meer e Janssen com os dados de Owen (\diamond) e Hawkes (\circ) para um talude a 1:4 (símbolos pretos: $0,005 < H_s/L_{op} < 0,015$; brancos: $0,015 < H_s/L_{op} < 0,025$; cinzentos: $0,025 < H_s/L_{op} < 0,035$).

O modelo de Hedges e Reis sugere que, à medida que H_s/L_{op} varia, também varia ξ_p , o que produz variações correspondentes em R_{max}/H_s (ver eqs. 6 e 7) e nos galgamentos médios. Consequentemente, é de esperar que R_{max} e os galgamentos aumentem com a diminuição de H_s/L_{op} para $\xi_p < 2,2$. Por outro lado, para $2,2 < \xi_p < 9$, R_{max} e os galgamentos diminuem com H_s/L_{op} . Para $\xi_p < 2,2$, os dados de modelo físico parecem confirmar este comportamento, tal como os resultados do AMAZON, da NN_OVERTOPPING2 e dos modelos empíricos de Owen e de Van der Meer e Janssen. Para $\xi_p > 2,2$, o comportamento esperado não é tão obviamente confirmado pelos dados de laboratório. Além disso, os resultados do AMAZON, da NN_OVERTOPPING2 e do modelo de Owen contradizem o comportamento esperado e o modelo de Van der Meer e Janssen sugere que o galgamento não varia com H_s/L_{op} para $\xi_p > 2,2$ (ver eqs. 4).

O modelo de Owen prevê o caudal adimensional sistematicamente por excesso para $\xi_p > 2,5$ (tanto dentro como fora das suas condições de aplicabilidade). Para $\xi_p \leq 2,5$, o modelo de Owen comporta-se de forma quase tão satisfatória como o modelo de Hedges e Reis, com uma ligeira tendência para estimar por excesso nalguns taludes (ex: 1:7) e por defeito noutros (ex: 1:4).

Para $\xi_p > 2$, o modelo de Van der Meer e Janssen comporta-se de forma semelhante ao modelo de Hedges e Reis no intervalo $0,75 < R_c / H_s < 3$, mas originando sempre valores superiores do caudal adimensional fora deste intervalo (tanto dentro como fora das suas condições de aplicabilidade). Para $\xi_p < 2$, o modelo de Van der Meer e Janssen determina um caudal adimensional sistematicamente por excesso.

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 tem um melhor ajuste aos dados de laboratório para $\xi_p > 2,5$, apesar de apresentar uma ligeira tendência para sobrestimar tanto os maiores caudais como os mais pequenos. Para $\xi_p \leq 2,5$, mantém-se a tendência para sobrestimar os menores caudais, mas para os maiores caudais, há uma tendência para subestimar os dados de laboratório. Convém referir que NN_OVERTOPPING2 é muito simples e de rápida utilização. No entanto, a largura dos intervalos de confiança de 95%, dados pelos percentis $q_{2,5\%}$ e $q_{97,5\%}$, apoia a recomendação feita pelos autores da ferramenta que os seus resultados devem ser usados com cuidado e apenas para dimensionamentos de estruturas marítimas realizados no âmbito de estudos prévios. Nem sempre os dados de laboratório estão dentro dos intervalos de confiança de 95%. Note-se que, com esta ferramenta, não é possível obter resultados para condições que estejam fora da sua gama de aplicabilidade. Este foi o caso dos taludes a 1:15 e 1:20 e algumas outras condições para alguns taludes.

3.3. Estrutura de Protecção Portuária

3.3.1. Caso de estudo: molhe sul do porto de pesca da Póvoa de Varzim

Apresenta-se neste ponto o caso de estudo correspondente a uma das várias soluções alternativas propostas para a reabilitação do enraizamento do molhe sul do porto de pesca da Póvoa de Varzim (Figura 6). Dado que o enraizamento do molhe protege directamente o edifício do Clube Náutico Povoense, este é o trecho sobre o qual recai a maior exigência de eficácia relativamente aos galgamentos, já que estes podem causar perturbação e danos no edifício e nas zonas a ele adstritas. Consequentemente, a solução estudada visa reduzir a valores aceitáveis os galgamentos, mesmo nas condições mais adversas de agitação e de níveis oceânicos.

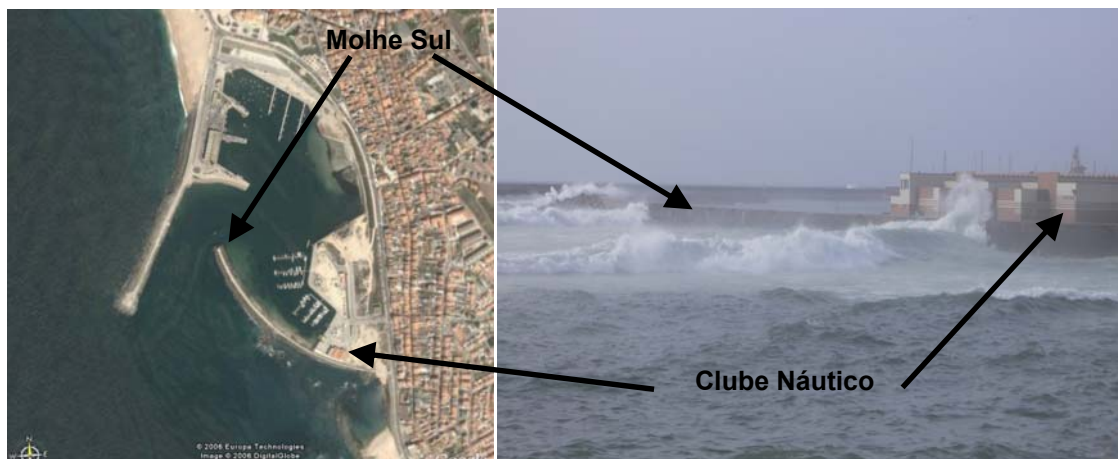


Figura 6 – Porto de pesca da Póvoa de Varzim: vista aérea e aspecto dos galgamentos ocorridos no molhe sul em Março de 2006 (cedido por A. Pires Silva).

O perfil-tipo proposto consiste num quebra-mar misto, composto por um talude reperfilado com a inclinação de 2:1, rematado superiormente por uma banquetta com 15 m de largura à cota + 5,25 m (ZH) (Figura 7). O reperfilamento é feito por enrocamentos da gama 75-100 kN, sem filtro nem núcleo, encostado ao paramento vertical exterior do molhe. Este enrocamento assenta sobre o maciço irregular existente, constituído por enrocamento da gama 10-50 kN. O edifício localiza-se a cerca de 10 m do paramento vertical interior do molhe.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

O canal estava equipado com seis sondas de condutância que permitem a medição de variações rápidas de nível: três próximas do batedor e três em frente à obra (Figura 8). Em cada grupo de três sondas, a distância entre cada uma das sondas foi escolhida de forma a permitir utilizar correctamente o método Mansard e Funke (1980) para a separação de agitação incidente e reflectida. A sonda 4 foi colocada a aproximadamente um comprimento de onda do pé da estrutura (ver secção 2).

Para a medição do volume galgado, foi colocado um tanque de recolha de água a jusante da obra e a água era direccionada para o tanque através de uma rampa de 0,30 m de largura (Figura 8). A quantificação do volume de água que transpunha o paramento vertical do molhe era feita através de um limnómetro calibrado instalado no tanque, que media o aumento do nível de água durante um ensaio. Os sinais provenientes das sondas e do limnómetro foram adquiridos à taxa de 40 Hz e guardados em forma digital num computador, num ficheiro que continha informação simultânea de todos os instrumentos.

Os ensaios foram realizados para diferentes condições de agitação incidente irregular, com uma configuração espectral empírica de JONSWAP ($\gamma=3,3$), períodos de pico do espectro ao largo, T_{op} , entre 1,7 e 2,3 s e alturas de onda significativa ao largo, H_{os} , entre 0,08 e 0,14 m, aproximadamente, valores estes referidos ao modelo. Primeiro, cada uma das 4 condições de ensaio era repetida para 12 durações de ensaio diferentes, entre 300 e 3600 s, em patamares de 300 s. Posteriormente, para algumas das durações consideradas, cada ensaio era repetido várias vezes, variando as séries incidentes, todas com uma configuração espectral de JONSWAP mas variando o número de *seed* para cada uma delas (Reis *et al.*, 2006b).

No Quadro 2 apresenta-se a síntese das condições dos 4 ensaios considerados neste estudo. Os valores apresentados correspondem a valores do modelo, onde h representa a profundidade junto ao batedor (Figura 8), H_{os} e T_{op} representam valores também medidos junto ao batedor, H_s e T_p são valores medidos em frente à estrutura e q foi calculado através da eq. 1. Apresenta-se ainda para cada ensaio a gama de variação de q obtida.

Quadro 2 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q , medidos nos 4 ensaios considerados neste estudo e gama de variação de q .

Ensaio	h (m)	H_{os} (m)	T_{op} (s)	H_s (m)	T_p (s)	Q ($m^3/s/m$)	Gama de variação de q ($m^3/s/m$)
1	0,39	0,09	1,69	0,07	1,75	1,66E-5	0,90E-5 a 2,83E-5
2	0,39	0,08	2,24	0,07	2,24	2,65E-5	2,65E-5 a 8,44E-5
3	0,39	0,11	2,28	0,08	2,33	1,65E-4	1,15E-4 a 2,02E-4
4	0,39	0,14	2,21	0,09	2,93	4,44E-4	3,43E-4 a 4,69E-4

Os ensaios estão numerados por ordem crescente de galgamento, q . As diferenças no valor de q devem-se às diferentes características das ondas que incidem no molhe e à sua diferente forma de rebentação. Como seria de esperar, a variação dos valores de q em relação à média é maior para os menores valores de q .

3.3.3. Resultados do modelo AMAZON

O modelo AMAZON foi aplicado ao caso de estudo acima descrito (escala do modelo). Para os 4 casos a que se aplicou o modelo AMAZON, d/L_{op} varia entre 0,019 e 0,035, em que d é a profundidade na fronteira de entrada (isto é, na sonda 4). Como referido no caso de aplicação anterior, estes valores estão dentro dos limites que a literatura existente tem indicado ($0,016 < d/L_{op} < 0,3$) como valores para os quais se obtém bons resultados com modelos baseados na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas (Pullen e Allsop 2003; Hu e Meyer, 2005).

Na fronteira de entrada do modelo, aplicou-se a série incidente em frente à obra obtida por aplicação do método Mansard e Funke aos dados medidos nas sondas 4, 5 e 6 (ver Figura 8).



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Para tal, a sonda 4, foi colocada a aproximadamente um comprimento de onda do pé da estrutura (ver secção 2). A fronteira de saída do modelo é uma fronteira de absorção total e foi colocada a 0,16 m a jusante da superestrutura do molhe. Note-se que a aplicação do método Mansard e Funke apresenta erros significativos quando ocorre rebentação. No entanto, nos 4 testes considerados, só as maiores ondas rebentaram entre as sondas 4 e 6. Consequentemente, é de esperar que a série incidente aplicada no modelo seja ligeiramente diferente da série nos ensaios em modelo físico.

O domínio de cálculo utilizado foi de 2,4 m de comprimento e o número total de células foi de 555. A malha de cálculo utilizada tem uma discretização de 1 cm na parte mais profunda do domínio, ou seja, em frente ao local de implantação do molhe e na zona a jusante da estrutura, 4 mm na zona junto ao pé da estrutura e 2 mm na zona do molhe. A altura de água mínima em cada célula da malha de cálculo foi de 2×10^{-5} cm, o que significa que qualquer célula com uma profundidade inferior a esta é removida dos cálculos e tratada como seca.

As características geométricas dos fundos em frente ao molhe e da envolvente do molhe do modelo físico foram fielmente representados no AMAZON. No entanto, visto o AMAZON não permitir modelar explicitamente os meios porosos, não foi feita distinção entre os dois mantos de enrocamento existentes. Os fundos em frente ao molhe e a superestrutura foram modelados como impermeáveis e sem atrito. A permeabilidade dos mantos de enrocamento foi tida em consideração apenas através do parâmetro de atrito de fundo, AF. No Quadro 3 e na Figura 9 podem observar-se os valores utilizados para este parâmetro e a variabilidade do caudal médio obtido em função deste. Nesta figura, q_{MF} representa o caudal médio obtido nos ensaios.

Quadro 3 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q , calculados com o modelo AMAZON em função do parâmetro de atrito de fundo, AF.

Ensaio	q ($m^3/s/m$)							
	Modelo Físico	AMAZON						
		Sem atrito	AF=0,001 m	AF=0,006 m	AF=0,01 m	AF=0,02 m	AF=0,03 m	AF=0,04 m
1	1,66E-5	6,76E-5	6,54E-5	6,10E-5	5,87E-5	5,45E-5	5,13E-5	Erro
2	2,65E-5	9,21E-5	8,87E-5	8,20E-5	7,88E-5	7,25E-5	6,75E-5	Erro
3	1,65E-4	2,76E-4	2,70E-4	2,57E-4	2,51E-4	2,39E-4	2,29E-4	Erro
4	4,44E-4	4,61E-4	4,53E-4	4,37E-4	4,29E-4	4,14E-4	4,01E-4	Erro

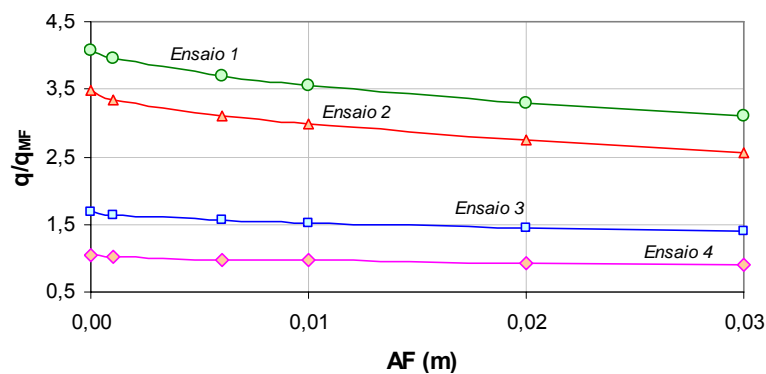


Figura 9 – Variação dos valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q , calculados com o modelo AMAZON em função do parâmetro de atrito de fundo, AF.

Os casos foram simulados num computador AMD Athlon 64, com 2,2 GHz e 1 GB de RAM. Os tempos de execução médios foram de 1 hora para ensaios de 300 s.

3.3.4. Resultados da fórmula empírica de Pedersen

Analisou-se a aplicação das fórmulas apresentadas em Besley (1999) e no *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2003) ao caso de estudo considerado



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

(Brito, 2006). Concluiu-se que é a equação de Pedersen (1996) que origina os melhores resultados para a geometria da estrutura e as condições de agitação consideradas, apesar de ter sido desenvolvida para uma estrutura em talude de enrocamento, permeável, com uma berma em frente a um muro cortina (sem deflector), fundado sobre o núcleo, enquanto no caso do molhe da Póvoa de Varzim a superestrutura desenvolve-se desde a fundação do molhe até à cota de coroamento. Tal como nos 4 testes considerados, a fórmula de Pedersen foi desenvolvida para condições de agitação incidente em que só as maiores ondas rebentaram.

A fórmula é dada por:

$$q = 3,2 \cdot 10^{-5} \frac{L_{om}^2}{T_{om}} \left(\frac{H_s}{R_c} \right)^3 \frac{H_s^2}{A_c B \cot \alpha} \quad (10)$$

onde T_{om} é o período médio do espectro ao largo, H_s é a altura de onda significativa incidente (definida como $H_s=4(m_0)^{0,5}$, em que m_0 é o momento de ordem zero do espectro incidente), A_c é altura da berma de coroamento acima do nível de repouso e B é a largura desta berma (ver Figura 8). Como o valor de H_s no pé da estrutura não foi medido para os 4 testes considerados, o valor de H_s utilizado corresponde ao valor de H_s para a série incidente em frente à obra obtida por aplicação do método Mansard e Funke aos dados medidos nas sondas 4, 5 e 6.

Apresentam-se no Quadro 4 os intervalos de aplicabilidade da fórmula de Pedersen e os correspondentes intervalos para os 4 ensaios considerados. Como se pode verificar, para os 4 ensaios analisados, alguns dos parâmetros utilizados na fórmula estão fora dos seus intervalos de aplicabilidade e, como tal, os valores de q calculados através da eq. 10 e apresentados no Quadro 5 devem apenas ser encarados como valores indicativos.

Quadro 4 – Intervalos de aplicabilidade da fórmula de Pedersen e intervalos para os 4 ensaios considerados.

Parâmetro da Fórmula de Pedersen	Intervalos de Aplicabilidade da Fórmula de Pedersen	Intervalos Verificados nos 4 Ensaios
H_s	0,10-0,18 m	0,07-0,09 m
T_{om}	1,07-1,94 s	1,36-1,64 s
T_{op}	1,20-2,20 s	1,69-2,28 s
$s_{om}=H_{os}/L_{om}$	0,02-0,06	0,023-0,034
$\xi_{om}=\tan \alpha/(s_{om})^{0,5}$	1,1-5,1	2,72-3,29
R_c/H_s	0,7-3,6	0,7-0,9
H_s/A_c	0,5-1,7	4,6-5,8
A_c/B	0,3-1,1	0,05
$\cot \alpha$	1,5-3,5	2
h	0,51-0,59 m	0,15 m
R_c	0,11-0,37 m	0,06 m
A_c	0,11-0,19 m	0,015 m
B	0,18-0,36 m	0,3 m

Quadro 5 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q , calculados através da fórmula de Pedersen (1996).

Ensaio	q (m ³ /s/m)	
	Modelo Físico	Fórmula de Pedersen
1	1,66E-5	1,84E-4
2	2,65E-5	2,08E-4
3	1,65E-4	4,05E-4
4	4,44E-4	9,02E-4

É de notar que, apesar da simplicidade e rapidez de utilização, o uso fiável de fórmulas empíricas é limitado em casos práticos de engenharia: frequentemente os parâmetros a



considerar estão fora das condições para as quais as fórmulas foram definidas e as complexas geometrias das obras reais são raramente consideradas no seu desenvolvimento.

3.3.5. Resultados da rede neuronal NN_OVERTOPPING2

No Quadro 6 apresentam-se os valores de q calculados com a ferramenta NN_OVERTOPPING2 para os 4 testes analisados neste estudo e os intervalos de confiança de 95%. Estes valores foram obtidos usando as condições de agitação medidas em frente à estrutura (Quadro 2), já que, tal como referido anteriormente, o valor de H_s no pé da estrutura não foi medido para os 4 testes considerados.

Quadro 6 – Valores médios de volumes galgados por metro linear de estrutura, q , e intervalos de confiança de 95% obtidos com a ferramenta NN_OVERTOPPING2.

Ensaio	Modelo Físico	NN_OVERTOPPING2		
	q (m ³ /s/m)	q (m ³ /s/m)	$q_{2,5\%}$ (m ³ /s/m)	$q_{97,5\%}$ (m ³ /s/m)
1	1.66 10 ⁻⁵	4.75 10 ⁻⁵	8.91 10 ⁻⁶	2.29 10 ⁻⁴
2	2.65 10 ⁻⁵	8.15 10 ⁻⁵	8.87 10 ⁻⁶	6.47 10 ⁻⁴
3	1.65 10 ⁻⁴	1.48 10 ⁻⁴	1.70 10 ⁻⁵	1.05 10 ⁻³
4	4.44 10 ⁻⁴	3.60 10 ⁻⁴	3.80 10 ⁻⁵	3.52 10 ⁻³

3.3.6. Análise dos resultados

Apresentaram-se anteriormente os valores do caudal médio galgado, q , no enraizamento do molhe sul do porto da Póvoa de Varzim. Foram utilizados diferentes métodos existentes: a formulação empírica de Pedersen, modelação física (q_{MF}), modelação numérica (AMAZON) e uma ferramenta baseada em redes neuronais (NN_OVERTOPPING2). Na Figura 10 apresenta-se a síntese destes resultados para cada um dos 4 ensaios analisados. Os 4 resultados do modelo AMAZON correspondem ao valor de $AF=0,03$ m, que resultou nos valores de q que em geral foram mais próximos dos do modelo físico (à excepção do ensaio 4). Apresentou-se no Quadro 2 a gama de variação de q obtida para cada ensaio, i.e. os quatro valores mínimos e quatro valores máximos. Na Figura 10, os oito valores de q/q_{MF} que se apresentam para o modelo físico representam a correspondente relação obtida para cada um dos quatro ensaios.

Como se pode observar, os resultados da fórmula de Pedersen são os que mais se afastam dos medidos em laboratório, especialmente para os valores de q mais pequenos. Os resultados encontram-se sempre fora da gama de variação de q obtida para cada ensaio, estimando por excesso q_{MF} em 2 a 11 vezes. Estes resultados eram esperados, já que, como foi referido anteriormente, os valores de alguns parâmetros para os quatro ensaios estavam fora do intervalo considerado no desenvolvimento da fórmula, o valor de H_s usado não foi medido no pé da estrutura e a geometria do caso em estudo não é exactamente aquela para a qual a fórmula foi desenvolvida. Além disso, a formulação tem apenas em conta alguns parâmetros, não tendo em conta, por exemplo, a variabilidade do registo, factor que condiciona muito o valor do caudal médio galgado.

As diferenças obtidas entre os resultados do modelo AMAZON e os ensaios variam bastante conforme o caso simulado, com o AMAZON a estimar por excesso os valores de q para os caudais mais pequenos (ensaios 1 e 2) e calculando de forma bastante precisa para os caudais mais altos (ensaios 3 e 4). Isto deve-se não só ao facto da série incidente imposta na fronteira de entrada do modelo não ser exactamente a do modelo físico, por ter sido obtida através do método de Mansard e Funke, mas também, e essencialmente, à forma como são modeladas as características dos meios porosos, isto é, através da utilização do parâmetro de atrito de fundo.

A influência do parâmetro de atrito de fundo nos ensaios 3 e 4 é pequena (Figura 9), visto que os meios porosos se encontram submersos sobre uma considerável camada de água durante grande parte dos episódios de galgamento, levando a que os resultados se aproximem mais dos obtidos nos ensaios. No ensaio 2, os meios porosos têm maior influência, já que se encontram submersos apenas numa pequena parte destes episódios. No ensaio 1, a submersão é ainda menos efectiva,

já que é menos frequente e a camada de água mais fina, levando a uma incorrecta modelação do escoamento. Para os ensaios 1 a 3, nem um valor de AF de 0,03 m (valor do modelo), que é bastante elevado, é suficiente para simular correctamente a influência da porosidade no escoamento. O valor mais alto de AF considerado levou a instabilidades numéricas para todos os ensaios.

Apesar destas limitações, os resultados do modelo estão genericamente dentro da gama de valores obtidos nos ensaios, excepto para o ensaio 1, e o modelo é computacionalmente muito eficaz.

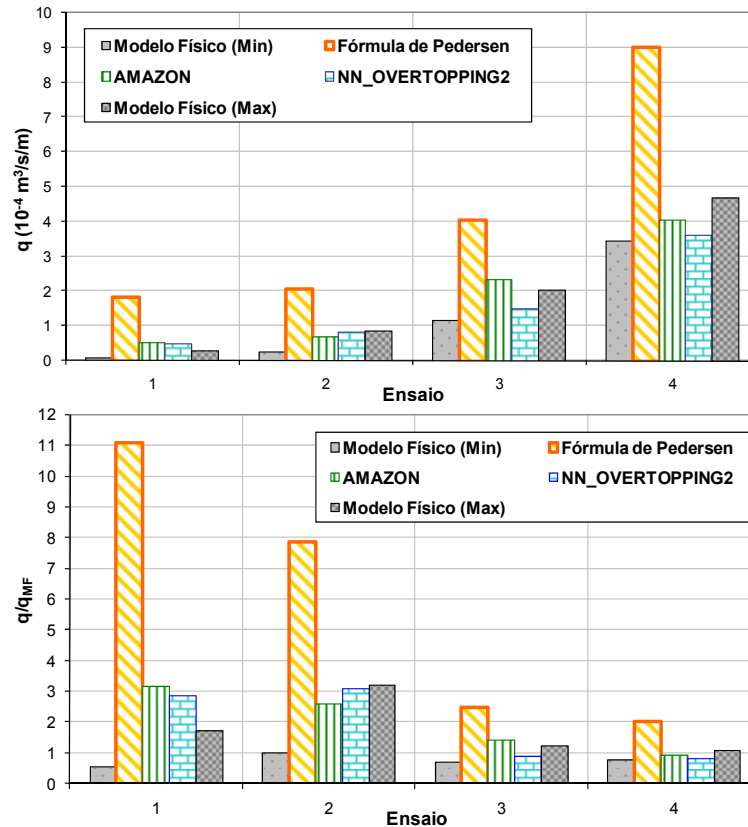


Figura 10 – Valores de q e de q/q_{MF} calculados pelos diferentes métodos apresentados.

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 estima por excesso os resultados do modelo físico para os valores de q mais pequenos (ensaios 1 e 2) e estima por defeito para os valores de q mais elevados (ensaios 3 e 4). Os resultados obtidos para os quatro ensaios geram o mesmo nível de concordância com os resultados de laboratório que o AMAZON e muito melhores resultados que a fórmula de Pedersen. Para os ensaios 2 e 3, os resultados estão dentro das gamas de q medidas em laboratório e as diferenças para os ensaios 1 e 4 são pequenas, apesar do valor de altura de onda usado não ter sido medido no pé da obra. Os intervalos de confiança de 95% calculados pela NN_OVERTOPPING2 englobam sempre os valores de q medidos no modelo físico. Convém referir mais uma vez que, apesar de NN_OVERTOPPING2 ser muito simples e de rápida utilização, a largura dos intervalos de confiança de 95% apoia a recomendação feita pelos autores da ferramenta que os seus resultados devem ser usados com cuidado e apenas para dimensionamentos de estruturas marítimas realizados no âmbito de estudos prévios.

4. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste artigo descreve-se a aplicação de um modelo numérico, AMAZON (Hu, 2000), ao cálculo do galgamento de estruturas de protecção costeira e portuária. O modelo AMAZON baseia-se na resolução das equações não lineares de águas pouco profundas, que resultam de uma simplificação das equações de Reynolds por integração na profundidade e é muito utilizado no cálculo do galgamento de estruturas de protecção costeira em talude impermeáveis.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Para ilustrar as capacidades do modelo, aplicou-se o modelo a dois casos típicos de estruturas marítimas, um correspondendo a uma gama de estruturas de protecção marginal e outro a uma estrutura de protecção portuária.

As estruturas de protecção marginal são em talude, impermeáveis, com o ângulo do talude exterior com a horizontal a variar entre 1:1 e 1:20. Os valores do caudal médio de galgamentos obtidos com o AMAZON foram comparados com dados de ensaios em modelo físico provenientes do laboratório *HR Wallingford* e da Universidade de Kansai, com os resultados da formulação semi-empírica de Hedges e Reis (1998, 2004; Reis *et al.*, 2007) e das formulações empíricas de Owen (1980, 1883; Besley, 1999) e de Van der Meer e Janssen (1995), e ainda com o *output* da ferramenta NN_OVERTOPPING2, desenvolvida no âmbito do programa Europeu CLASH (Van Gent *et al.* 2005).

A estrutura de protecção portuária analisada é um quebra-mar de estrutura mista real, composto por uma superestrutura protegida por um manto de duas camadas de enrocamento. Os resultados do modelo AMAZON foram comparados com os resultados dos ensaios em modelo físico executados no LNEC, com os da fórmula empírica de Pedersen (1996) e com os da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

Quer para as estruturas de protecção marginal, quer para o quebra-mar de estrutura mista, os resultados obtidos com o modelo AMAZON são satisfatórios, apesar de, na sua versão actual, o modelo estar essencialmente desenvolvido para estruturas em talude impermeáveis. Para estruturas permeáveis, o modelo permite, como aproximação, a utilização do parâmetro de atrito de fundo, para se introduzir dissipação de energia. No entanto, os resultados do modelo sugerem que a utilização deste parâmetro para modelar a porosidade não é eficiente, pois tem uma influência muito reduzida quando os meios se encontram submersos e não simula convenientemente o seu efeito quando esses meios não estão submersos ou a submersão se dá sobre uma fina camada de água e apenas num curto período de tempo.

Assim, tendo em conta a eficiência do modelo do ponto de vista de esforço computacional, estão actualmente a introduzir-se alterações no modelo de forma a considerar explicitamente a permeabilidade do meio. Além disso, como em muitos casos a onda de projecto é definida ao largo e não junto à estrutura, está a acoplar-se este modelo, que por definição se limita a águas de pequena profundidade, a um modelo de propagação da agitação desde o largo até à estrutura galgada. Estes desenvolvimentos permitem assim estender a sua aplicação à maior parte dos casos de estruturas reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos a permissão dada para a publicação de alguns resultados dos ensaios em modelo físico reduzido de galgamentos do enraizamento do molhe sul do porto da Póvoa de Varzim. Agradecem ainda o financiamento que, próximo da conclusão desta comunicação, foi concedido à Eng^a. Maria Teresa Reis pela FCT, no âmbito da bolsa de Pós-Doutoramento.

REFERÊNCIAS

- Allsop, N.W.H. (2005). *D38 Report on Hazard Analysis*. CLASH WP6 – Report.
- Allsop, N.W.H.; Pullen, T. (2003). *Wave Overtopping of Simple Embankments: Improved Methods*. <www.hrwallingford.co.uk/downloads/projects/overtopping/empirical_model_guidance.pdf>.
- Bay, I.; Hedges, T.; Shareef, M.; Pullen, T. (2004). “Wave overtopping of shallow sloping seawalls: extension and refinement of empirical prediction methods”. *Proc. 29th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2005, 4417-4429.
- Besley, P. (1999). *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*, Environment Agency, R&D Technical Report W178, UK.
- Bouma, J.J.; Schram, A.; François, D. (2004). *D39 Report on Socio-Economic Impacts*. CLASH WP6 – Report.



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

- Bradbury, A.P.; Allsop, N.W.H. (1988). "Hydraulic effects of breakwater crown walls." *Proc. ICE Breakwaters '88*, Thomas Telford, London, 385-396.
- Brito, S.F. (2006). *Estudo de Galgamento em Estruturas Marítimas*. Trabalho de fim de curso, IST.
- Coeveld, E.M.; Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B. (2005). *Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2*. CLASH WP8 – Report.
- De Rouck, J.; Geeraerts, J.; Troch, P.; Kortenhaus, A.; Pullen, T.; Franco, L. (2005). "New results on scale effects for wave overtopping at coastal structures". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, 29-43.
- Franco, L.; Briganti, R.; Bellotti, G. (2004). *D32 Ostia Site: Report on Full Scale Measurements (2nd Full Winter Season)*. CLASH WP3 – Report.
- Franco, L.; De Gerloni, M.; Van der Meer, J.W. (1994). "Wave overtopping at vertical and composite breakwaters." *Proc. 24th ICCE*, B.L. Edge (Ed.), ASCE, New York, 1995, 1030-1045.
- Geeraerts, J.; Willems, M. (2004). *D35 Final Report on Laboratory Measurements – Ostia*, CLASH WP4 – Report.
- Geeraerts, J.; Boone, C. (2004). *D31 Report on Full Scale Measurements – Zeebrugge: 2nd Full Winter Season*, CLASH WP3 – Report.
- Hawkes, P.J.; Coates, T.T.; Jones, R.J. (1998). *Impact of Bi-Modal Seas on Beaches and Control Structures*. HR Wallingford, Report SR 507.
- Hedges, T.S.; Reis, M.T. (2004). "Accounting for random wave run-up in overtopping predictions". *Maritime Engineering*, Proc. ICE, 157(3), 113-122.
- Hedges, T.S.; Reis, M.T. (1998). "Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model". *Water, Maritime & Energy Journal*, Proc. ICE, 130(1), 1-10.
- Hordijk, D. (2004). *D37 Report on Field Measurements – Petten Sea Defence: Storm Season 2003-2004*. CLASH WP3 – Report.
- Hu, K. (2000). *High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling*, PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, UK.
- Hu, K.; Meyer, D. (2005). "The validity of the non-linear shallow water equations for modelling wave runup and reflection". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, 195-206.
- Hu, K.; Mingham, C.G.; Causon, D.M. (2000). "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures by solving NLSW equations". *Coastal Engineering*, 41, 433-465.
- Ingram, D.; Causon, D.; Mingham, C.; Zhou, J.G. (2002). "Numerical simulation of violent wave overtopping". *Proc. 28th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2003, 2286-2298.
- Ingram, D.M.; Causon, D.M.; Gao, F.; Mingham, C.G.; Troch, P.; Li, T.; De Rouck, J. (2004). *Free Surface Numerical Modelling of Wave Interactions with Coastal Structures*. CLASH WP5 – Report.
- Kikkawa, H.; Shi-Igai, H.; Kono, T. (1968). "Fundamental study of wave over-topping on levees". *Journal of Coastal Engineering in Japan*, 11, 107-115.
- Kortenhaus A.; Van der Meer, J.W.; Burchart, H.F.; Geeraerts, J.; Pulen, T.; Ingrand, D.; Troch, P. (2005). *D40 Report on Conclusions of Scale Effects*. CLASH WP7 – Report.
- Kortenhaus, A.; Medina, J.; Gonzalez-Escrivá, J.; Garrido, J. (2004a). *D34 Laboratory Measurements on the Zeebrugge Breakwater*. CLASH WP4 – Report.
- Kortenhaus A.; Oumeraci, H.; Geeraerts, J.; de Rouck, J.; Medina, J.R.; González-Escrivá, J.A. (2004b). "Laboratory effects and further uncertainties associated with wave overtopping measurements". *Proc. 29th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2005, 4456-4468.
- Lara, J.L.; Garcia, N.; Losada, I.J. (2006). "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures." *Coastal Engineering*, 53, 395-417.
- Lemos, R.; Reis, M.T.; Silva, L.G. (2006). *Scale Model Tests of the South Breakwater Root of Póvoa de Varzim Harbour: Overtopping Two-Dimensional Tests*. Relatório 05/06-NPE, LNEC.
- Lin, P.; Liu, P.L.-F. (1998). "A numerical study of breaking waves in the surf zone." *Journal of*



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Fluid Mechanics, 359, 239-264.

Mansard, E.P.D.; Funke, E.R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method". *Proc. 17th ICCE*, B.L. Edge (Ed.), ASCE, New York, 1981, 154-172.

Mase, H.; Hedges, T.S.; Shareef, M.; Nagahashi, S. (2003). "Wave overtopping formula for gentle slopes incorporating wave runup." *Proceedings of Coastal Engineering*, JSCE, 50, 636-640.

Medina, J.R.; de Rouck, J.; Figueres, M.; Gonzalez-Escrivá, J.; Geeraerts, J. (2005). *D43 Synthesis and Design Guidelines*. CLASH WP9 – Report.

Medina, J.R.; Gonzalez-Escrivá, J.A.; Garrido, J.; de Rouck, J. (2002). "Overtopping analysis using neural networks". *Proc. 28th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2003, 2165-2177.

Neves, M.G.; Reis, M.T.; Losada, I.; Hu, K. (2006). "Utilização de modelos numéricos para o cálculo do galgamento de obras marítimas." *I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, APMTAC, Campus de Caparica, 8-9 de Junho, 2006.

Owen M.W. (1980). *Design of Sea Walls Allowing for Wave Overtopping*. Report EX 924, Hydraulics Research, Wallingford, UK.

Pedersen, J. (1996). *Wave Forces and Overtopping on Crown Walls of Rubble Mound Breakwaters – An Experimental Study*. Series Paper N° 12, Aalborg University, Denmark.

Pedersen, J.; Burcharth, H.F. (1992). "Wave forces on crown walls". *Proc. 23rd ICCE*, B.L. Edge (Ed.), ASCE, New York, 1993, 1489-1502.

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2004a). *D36 Final Report on Laboratory Measurements – Samphire Hoe*. CLASH WP4 – Report.

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2004b). *D33 Report on Full Scale Measurements – Samphire Hoe*. CLASH WP3 – Report.

Pullen, T.; Allsop, N.W.H. (2003). *Use of Numerical Models of Wave Overtopping: A Summary of Current Understanding*, <www.hrwallingford.co.uk/downloads/projects/overtopping/num_model_guidance.pdf>.

Reis, M.T.; Hu, K.; Hedges, T.S.; Mase, H. (2007). "A comparison of empirical, semi-empirical and numerical wave overtopping models". *Journal of Coastal Research*, in press.

Reis, M.T.; Hedges, T.S.; Williams, A.; Keating, K. (2006a). Specifying seawall crest levels with the help of a probabilistic method. *Maritime Engineering Journal*, 159(4), 137-145.

Reis, M.T.; Neves, M.G.; Lemos, R.; Silva, L.G. (2006b). "Scale model tests of wave overtopping: their duration for determination of mean discharges". *CoastLab06*, Porto, 8-10 de Maio, 2006, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (CD-ROM).

Shao, S.; Ji, C.; Gram, D.I.; Reeve, D.E.; James, P.W.; Chadwick, A.J. (2006). "Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model". *Coastal Engineering*, 53, 723-725.

Steendam, G.J.; Van der Meer, J.W.; Verhaeghe, H.; Besley, P.; Franco, L.; Van Gent, M.R.A. (2004). "The international database on wave overtopping". *Proc. 29th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2005, 4301-4313.

U.S. Army Corps of Engineers (2003). *Coastal Engineering Manual*. Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.

Van Der Meer, J.W.; Janssen, J.P.F.M. (1995). "Wave run-up and wave overtopping at dikes." *In: Kobayashi N.; Demirbilek Z. (eds.), Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures*, ASCE, 1-27.

Van der Meer, J.W.; Tonjes P.; De Waal J.P. (1998). "A code for dike height design and examination". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '98*, Thomas Telford, London, 5-21.

Van der Meer, J.W.; Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B.; Verhaeghe, H.; Steendam, G.J.; Medina, J.R. (2005). "Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures". *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, 259-268.

Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B.; Van den Boogaard, H.F.P.; Medina, J.R. (2005). *D42 Final Report on Generic Prediction Method*. CLASH WP8 – Report.

Wedge, D.C.; Ingram, D.M.; Mingham, C.G.; McLean, D.A.; Bandar, Z.A. (2005). "Neural network architectures and overtopping predictions". *Maritime Engineering*, Proc. ICE, 158(MA3), 123-133.