

Galgamento do quebra-mar poente de Albufeira: Comparação entre o modelo numérico SPH e medições de campo

E. Didier^(1,2), O. Ferreira⁽³⁾, J. Dias⁽¹⁾, D. Neves⁽¹⁾, A. Carrasco⁽³⁾, M. Reis⁽¹⁾ e M. Neves⁽¹⁾

(1) LNEC. edidier@lnec.pt

(2) UNIDEMI, FCT-UNL.

(3) CIMA/UALG.

Resumo: Os modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), baseados na formulação Lagrangiana das equações da Dinâmica dos Fluidos, são uma opção atractiva para modelar escoamentos com superfície livre, pois não necessitam de malha computacional, permitindo modelar fenómenos complexos, como a rebentação de ondas e o galgamento. Neste trabalho apresenta-se o modelo numérico SPHyCE em desenvolvimento no LNEC e a sua aplicação à determinação do galgamento no quebra-mar poente do Porto de Pesca de Albufeira (Algarve), no qual foram realizadas as primeiras campanhas de medição de galgamento num quebra-mar em Portugal no âmbito do projecto SPACE (Desenvolvimento e validação de um modelo SPH para aplicações a estruturas costeiras). Apresenta-se a metodologia de acoplamento dos modelos SWAN, Bouss2D e SPHyCE, para modelar a propagação das ondas do largo até ao quebra-mar, assim como as campanhas de campo. São analisados e comparados os galgamentos obtidos com o modelo numérico e os medidos.

Palavras-chave: Smoothed Particle Hydrodynamics, galgamento, quebra-mar, dados de campo.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos numéricos têm vindo a desenvolver-se no sentido de aproximar os cenários simulados às condições físicas observadas. Contudo, devido à complexidade dos fenómenos envolvidos no caso da propagação de ondas e da interacção com estruturas costeiras, convém adoptar uma metodologia de acoplamento que conjugue as potencialidades e especificidades de diferentes modelos numéricos.

Apresenta-se uma técnica de acoplamento dos modelos SWAN, Bouss-2D e SPHyCE, para modelar a propagação das ondas do largo até ao quebra-mar poente do porto de Albufeira (Fig. 1) e calcular o galgamento.



Fig. 1. Porto de Albufeira, Algarve, e posição da secção monitorizada no quebra-mar poente do Porto de Albufeira.

A metodologia PCM (*Probability Calculation Method*), proposta por Goda (2000), é adoptada para modelar a agitação marítima irregular no modelo SPHyCE. Os resultados numéricos de galgamento são comparados com dados recolhidos *in situ* aquando da ocorrência de galgamentos no local.

2. MODELO NUMÉRICO INTEGRADO

O modelo numérico integrado é constituído por três modelos numéricos acoplados passivamente, transferindo a informação de agitação de um para o outro em cascata: o modelo SWAN, que permite modelar a propagação das ondas do largo até às proximidades da costa; o modelo Bouss-2D que simula a propagação das ondas até às proximidades do quebra-mar; e o modelo SPHyCE que permite modelar a interacção entre a onda incidente e o quebra-mar.

2.1. Modelo de propagação de ondas SWAN

O modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) é um modelo numérico espectral para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação da conservação da acção de onda (Booij *et al.*, 1999). O modelo SWAN é capaz de simular a propagação da agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção e empolamento devido a variações do fundo, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido ao efeito da fricção do fundo, e transmissão através de obstáculos. O modelo pode ser executado em modo estacionário ou não estacionário.

2.2. Modelo de propagação de ondas Bouss-2D

O modelo Bouss-2D é um modelo numérico que permite modelar a propagação e transformação de ondas em zonas costeiras e tem em conta fenómenos hidrodinâmicos como: refacção, rebentação, difracção, atrito de fundo e fenómenos não lineares associados à interacção entre ondas e interacção onda-corrente (Nwogu e Demirbilek, 2001). Este

modelo resolve as equações estendidas de Boussinesq integradas na vertical, válidas para águas pouco-profundas a profundidades intermédias. Numericamente, utiliza um esquema de integração temporal do tipo Crank-Nicolson e o método das diferenças centrais para a discretização espacial.

2.3. Modelo SPHyCE

O modelo SPHyCE (*Smoothed Particle Hydrodynamics for Coastal Engineering*) é baseado na formulação Lagrangian das equações bidimensionais da dinâmica dos fluidos e num método de discretização de tipo SPH que permite não recorrer a uma malha. O modelo é derivado do modelo SPHysics (Gómez-Gesteira *et al.*, 2012) e da formulação SPH *standard* proposta por Monaghan (1994) baseada numa formulação de fluido pouco compressível. Graças à formulação Lagrangiana e à metodologia sem malha, a técnica SPH revela-se particularmente interessante para modelar escoamentos com superfícies livres complexas, como a rebentação e o galgamento. O modelo SPHyCE integra uma técnica de geração de ondas com absorção dinâmica de ondas reflectidas e várias opções especificamente desenvolvidas para aplicações de interacções ondas-estruturas costeiras (Didier e Neves, 2012; Didier *et al.*, 2013, Neves *et al.*, 2012).

3. CAMPANHA DE CAMPO

As medições de galgamento foram efectuadas no quebra-mar poente do Porto de Albufeira (Fig. 1), no dia 19 de Janeiro de 2013, ao longo de um ciclo de maré, durante períodos de marés mortas (amplitude de maré de 1.5 m).

Ao longo da campanha foram recolhidos dados de maré, agitação marítima (ao largo), alturas da lâmina de água que galga a estrutura, com o objectivo de calcular o galgamento a partir da altura e da velocidade da lâmina de água no coroamento do quebra-mar. Os dados de maré foram obtidos a partir do marégrafo de Huelva (Espanha), localizado a cerca de 100 km a leste da área de estudo. Para caracterizar as condições de agitação (H_s , altura significativa da onda e T_p , período de pico), utilizaram-se os dados da bóia de Faro (pertencente ao Instituto Hidrográfico), localizada 30 km a leste da área de estudo (profundidade de 93 m, em relação ao NMM). Foram observados vários eventos de galgamento (Fig. 2) representativos de tempestade moderada (H_s médio ~ 3-4 m e T_p médio ~ 8-10 s), com direcção de onda dominante de SW, frequente durante o inverno marítimo.

Cada episódio de galgamento foi identificado e isolado, sendo definido como qualquer passagem de uma lâmina de água sobre o coroamento da estrutura. A altura da lâmina de água acima do coroamento foi obtida através da diferença entre o pico de altura medido pelo sensor de pressão em

cada episódio e uma linha de referência definida como a altura mínima de medição. Assim, apenas foram consideradas as alturas de lâmina de água superiores a duas vezes o erro de medição do sensor, definido como 0.006 m. Foram também considerados unicamente os galgamentos que respeitam critérios compatíveis com a metodologia de cálculo do galgamento (Ferreira *et al.*, 2013).



Fig. 2. Galgamento do quebra-mar poente do Porto de Albufeira durante a recolha de dados no dia 19 de Janeiro de 2013.

4. RESULTADOS

A análise do galgamento do quebra-mar foi realizada para o intervalo de tempo entre as 8H00 e as 8H30, com um nível de maré de 2.75 m (ZH), no qual se registou o maior número de episódios de galgamento. As características da secção em estudo do quebra-mar, o nível de maré e a posição dos sensores utilizados para cálculo do galgamento estão descritos na Fig 3.

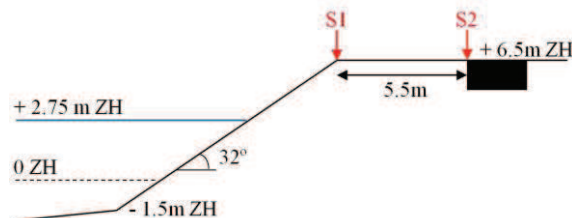


Fig. 3. Esquema do quebra-mar com as principais dimensões e a posição dos sensores utilizados para cálculo do galgamento.

4.1. Cálculo do galgamento a partir das medições de campo

O galgamento foi calculado a partir da determinação da velocidade frontal de galgamento (velocidade da frente da lâmina de água) e da velocidade entre picos de galgamento (velocidade da lâmina de água de galgamento considerando as alturas máximas da lâmina de água). A velocidade frontal de galgamento foi obtida usando a diferença de tempo de chegada do galgamento (primeiro registo) nos sensores S1 e S2 no coroamento (Fig. 3). A velocidade entre picos de galgamento foi obtida usando a diferença de tempo de chegada das alturas máximas da lâmina de água nos mesmos sensores. Com base nas velocidades definidas e nas alturas médias e máximas da lâmina de água, determinaram-se descargas médias frontais e de pico (Q_f e Q_p), bem como os volumes máximos de galgamento correspondente (V_f e V_p) (Carrasco *et al.*, 2014).

Os galgamentos ocorreram de forma turbulenta, semelhante ao fluxo de *white water* descrito por Pullen *et al.* (2007). As velocidades máximas frontais para o intervalo de tempo considerado foram de 20 m/s, com valores médios próximos dos 13 m/s. As velocidades máximas de pico foram de 14 m/s, com valores médios próximos dos 11 m/s. Os volumes médios e máximos galgados por onda, obtidos a partir das duas metodologias de cálculo, V_f e V_p , foram de 185 e 308 l/m e 308 e 508 l/m por onda, respectivamente. Os valores V_f e V_p foram obtidos considerando 5 e 3 eventos de galgamento, respectivamente. A metodologia de aquisição dos dados e de cálculo não permite considerar todas as ondas que galgaram efectivamente o quebra-mar, o que impossibilita calcular o caudal médio galgado.

4.2. Determinação do galgamento a partir da modelação numérica

O modelo SWAN permitiu propagar as características de agitação marítima (JONSWAP) desde a bóia de Faro até às proximidades da costa, a 800 m a Sul do quebra-mar poente, recorrendo a duas malhas de 45 m e 5 m para dois domínios de cálculo, grande e pequeno, respectivamente.

O modelo Bouss-2D foi utilizado para propagar a agitação marítima na zona da batimetria medida no âmbito deste projeto, a Sul do quebra-mar poente, de uma profundidade máxima de -11.5 m (ZH) até às proximidades do quebra-mar. A propagação da agitação no domínio computacional, com uma malha cartesiana regular de elementos de 2 m, foi gerada sem o quebra-mar, no sentido de poder apenas registar as características da onda incidente. A secção de acoplamento com o modelo SPHyCE foi definida a 102 m a Sul do pé do talude do quebra-mar. Nesta secção, a profundidade é $d=5.96$ m, para o nível de maré considerado, e as características da onda irregular incidente foram de $H_s=3.0$ m e $T_p=9.84$ s. A incidência da onda foi praticamente normal ao quebra-mar ($<10^\circ$).

O modelo SPHyCE não permite modelar ondas incidentes irregulares, pois o tempo de cálculo é demasiado elevado para simular um número suficientemente grande de ondas. Por este motivo, utilizou-se o método PCM (*Probability Calculation Method*) de Goda (2000) baseado na probabilidade teórica de Rayleigh da distribuição de alturas de onda, regulares, correspondentes à agitação irregular. Uma probabilidade, P_H , é assim associada a cada altura de onda. Portanto, as alturas de onda consideradas variaram desde a altura máxima, $H_{max}=5.4$ m ($=1.8H_s$), até 0.3 m, com um intervalo entre alturas de 0.3 m. O período de todas as ondas regulares foi o período de pico calculado pelos modelos de propagação de onda, $T=9.84$ s. Para cada onda foi determinado um volume médio galgado por onda, V_{m_H} , ou um caudal médio galgado, Q_{m_H} . O volume médio galgado total por onda, V_m , e o caudal médio galgado total, Q_m , foram calculados

como sendo a soma da contribuição de cada onda regular simulada, ponderando o volume galgado pela probabilidade de ocorrência desta mesma onda (Ortuño, 2010). O método PCM tem a vantagem de necessitar apenas de simular as ondas regulares que galgam o quebra-mar. As simulações no SPHyCE foram realizadas usando uma resolução de 115688 partículas; o volume de uma partícula, v_p , foi de 0.00555 m³/m. Simulou-se um tempo de 123 s com um passo de tempo de aproximadamente 1.3×10^{-4} s. A análise dos resultados foi realizada a partir do instante de tempo 50 s, aquando do estabelecimento periódico do escoamento.

Os resultados do volume médio galgado por onda, V_{m_H} , obtido para cada onda regular e a sua probabilidade associada estão representados na Fig. 4. A partir destes resultados, o caudal médio galgado, Q_m , foi de 4.67 l/m/s. A maior contribuição correspondeu à onda regular com $H=2.4$ m, para a qual o volume médio galgado por onda foi de 239 l/m, com uma probabilidade de 0.55, representando 87% do volume galgado total. Este valor pode, assim, ser considerado como um valor indicativo da ordem de grandeza dos maiores volumes galgados.

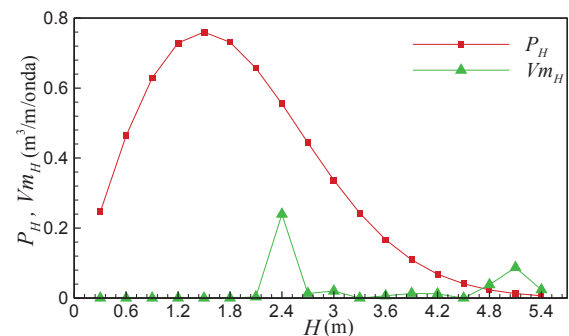


Fig. 4. Probabilidade P_H e volume galgado por onda V_{m_H} para as várias alturas de onda regulares simuladas com o SPHyCE.

5. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados numéricos, volume médio galgado e caudal médio galgado, foram comparados com os dados das medições de campo e com os obtidos a partir da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), respectivamente.

O volume galgado por onda obtido a partir das medições de campo teve um valor médio de 185 e 308 l/m por onda, conforme a metodologia de cálculo, ou seja, um valor médio de 232 l/m por onda. Este valor pode ser visto como representativo da média dos maiores galgamentos medidos. Numericamente, o maior galgamento, que pode ser considerado como um valor indicativo da ordem de grandeza dos maiores galgamentos, ocorre para $H=2.4$ m, com o valor de 239 l/m, da mesma ordem de grandeza do valor medido de 232 l/m.

O caudal médio galgado foi comparado com os resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, considerando $H_s=2.4$ m,

$T_p=9.84$ s e $\gamma_f=0.5$ (valor recomendado para o quebra-mar de Albufeira). O caudal médio galgado foi de 0.53 l/s/m com um intervalo de confiança de 95% [0.14; 1.96] l/s/m. O valor numérico foi de 4.67 l/s/m, um ordem de grandeza superior ao valor da ferramenta neuronal e fora do intervalo de confiança de 95%.

No entanto, observou-se que os blocos do manto superior do quebra-mar estão muito arrumados o que contribui, *a priori*, para uma redução da rugosidade. Com esta observação, considerou-se $\gamma_f=0.6$, mantendo os outros parâmetros. O caudal médio galgado foi 1.00 l/s/m com intervalo de confiança de 95% [0.21; 5.02] l/s/m. Com esta hipótese, o caudal médio galgado numérico de 4.67 l/s/m já foi da mesma ordem de grandeza que o caudal médio galgado obtido através da ferramenta neuronal, encontrando-se dentro do intervalo de confiança. Esta última análise mostra a dificuldade de comparação dos resultados medidos, da modelação numérica, e da ferramenta neuronal, uma vez que não se conhecem exactamente todas as condições limites e estruturais do caso em estudo.

A primeira aplicação do modelo numérico integrado e do método PCM de Goda para calcular o caudal médio galgado de um quebra-mar poroso revelou-se relativamente positiva, visto que os resultados apresentam valores similares às primeiras medições de campo realizadas em Portugal e aos resultados obtidos através da ferramenta neuronal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento concedido através dos projectos SPACE PTDC/ECM/114109/2009 e DITOWEC PTDC/ECM-HID/1719/2012, e da bolsa SFRH/BPD/37901/2007.

REFERÊNCIAS

- Booij, N., Ris, R.C., e Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geographical Research*, 104(C4), 7649-7666.
- Carrasco, A.R., Reis, M.T., Neves, M.G., Ferreira, Ó., Matias, A, e Almeida, S. (2014). Overtopping hazard on a rubble mound breakwater. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 247-252.
- Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A., e Pozueta, B. (2005). Neural Network. Manual NN_OVERTOPPING 2. CLASH WP8, WL Delft Hydraulics, June.
- Didier, E., e Neves, M.G. (2012). A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 22(3), 193-199.
- Didier, E., Martins, R., e Neves, M.G. (2013). Numerical and experimental modeling of regular wave interacting with composite breakwater. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(1), 46–54.
- Ferreira, Ó., Reis, M.T., Carrasco, A.R., Neves, M.G., e Didier, E. (2013). Small Overtopping discharges at Albufeira Harbour: field measurements and modelling. In: *Proceedings of 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, Lisboa, Portugal.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Crespo, A.J.C., Dalrymple, R.A., Narayanaswamy, M., e Dominguez, J.M. (2012). SPHysics – development of a free-surface fluid solver – Part 1: Theory and formulations. *Computers & Geosciences*, 48, 289-299.
- Monaghan, J.J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110, 399-406.
- Neves, D.R.C.B., Didier, E., Reis, M.T., e Neves, M.G. (2012). Overtopping of a porous structure using a Smoothed Particle Hydrodynamics numerical model. In: *Proceedings of Coastlab12 – Fourth International Conference of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, Ghent, Belgium, 531-540.
- Nwogu, O., e Demirbilek, Z. (2001). *Bouss-2D: A Boussinesq wave model for coastal regions and harbors*. Coastal and Hydraulics Laboratory Technical Report ERDC/CHL TR-01-25. Vicksburg, U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Ortuño, M.P. (2010). *Optimización de ensayos físicos para la evaluación del rebase en diques de abrigo*. Tese de Mestrado, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, H., Trumpf, H., e Van der Meer, J.W. (2007). *Eurotop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE.