

Determinação do caudal galgado numa estrutura porosa utilizando um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamics*

E. Didier (1, 2), M. G. Neves (1) e M.T. Reis (1)

(1) NPE/DHA, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, edidier@lnc.pt, gneves@lnc.pt, treis@lnc.pt

(2) MARETEC, IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

Resumo: A interacção entre uma onda, em condição de tempestade, e um quebra-mar de taludes, Zeebrugge na Bélgica, é estudada usando um modelo numérico SPH – *Smoothed Particle Hydrodynamics*. O quebra-mar foi monitorizado, o que permitiu medir a elevação de superfície livre e o galgamento da estrutura. O caso apresentado no presente trabalho corresponde à tempestade de 8 de Novembro de 2001. Verifica-se que os resultados obtidos pelo modelo numérico SPH e as medições no protótipo são da mesma ordem de grandeza.

Palavras chave: Engenharia Costeira, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, quebra-mar de Zeebrugge, galgamento

1. INTRODUÇÃO

As obras marítimas intervêm na protecção da linha de costa, zonas portuárias e estruturas existentes nas suas imediações. O estudo da resposta hidrodinâmica destas estruturas de protecção costeira é, por isso, importante para assegurar a sua funcionalidade. O estudo da resposta hidrodinâmica das estruturas, quando sofrem a interacção da onda, é uma tarefa complexa devido à não linearidade dos fenómenos envolvidos, tais como a rebentação de ondas e o galgamento. No estudo destes fenómenos é usual o recurso a formulações semi-empíricas e a modelos físicos. Com o desenvolvimento dos métodos de cálculo numérico e do poder de cálculo dos computadores, tem-se recorrido a modelos numéricos, mais ou menos sofisticados, que permitem modelar escoamentos com superfície livre com apreciável precisão.

O modelo numérico SPH desenvolvido e utilizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) é baseado numa formulação puramente Lagrangeana e permite modelar escoamentos com grande deformação da superfície livre (rebentação e galgamento). É um método sem malha, onde o fluido é representado por volumes elementares de água sendo considerados, conceptualmente, como partículas fluidas. As equações de Navier-Stokes são resolvidas para cada partícula fluida e as trajectórias das partículas são calculadas ao longo do tempo.

No presente trabalho, apresenta-se o modelo numérico SPH desenvolvido no LNEC e a aplicação deste modelo à determinação do volume galgado no quebra-mar de taludes de Zeebrugge, na Bélgica, que foi objecto de numerosos estudos no âmbito do projecto CLASH (<http://www.clash.ugent.be/>). Os resultados do modelo numérico são comparados com as medições obtidas no protótipo para a tempestade de 8 de Novembro de 2001, no que diz respeito aos maiores volumes galgados registados durante este evento.

2. MODELO SPH

2.1. Princípio fundamental

O princípio fundamental dos métodos SPH consiste em aproximar um escalar, uma função ou um tensor usando a teoria dos integrais de interpolação que não necessita de malha. O integral de interpolação de uma função $f(r)$ é dado por:

$$f(r) = \int f(r')W(r-r',h)dr' \quad (1)$$

onde W é uma função analítica, o *kernel*, e h a dimensão do suporte desta função, denominado de *smoothing length*, que controla a dimensão do domínio de influência do *kernel*. Numericamente, a função $f(r)$ é conhecida apenas em pontos discretos, as partículas, e os integrais de interpolação são aproximados por um somatório. A aproximação da função f na partícula a à posição r_a é dada por:

$$f(r_a) \approx \sum_b m_b \frac{f_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (2)$$

onde f_b é o valor da função f na partícula b em r_b , $W_{ab}=W(r_a-r_b, h)$ é o valor da função de interpolação, m_b a massa e ρ_b a massa volúmica da partícula b .

As derivadas da função f são calculadas analiticamente, derivando o *kernel*, o que constitui uma das vantagens do método SPH: o *kernel* de interpolação pode ser diferenciado sem necessitar de uma malha espacial. Numericamente, o *kernel* é uma função com um suporte compacto dentro duma região circular em 2D determinada por um raio de $2h$. O parâmetro h tem uma dimensão superior à separação inicial das partículas, do , e toma classicamente o valor $2^{1/2}do$. A função de interpolação é normalmente máxima no seu centro, dando assim uma contribuição predominante à partícula a .

Nas simulações numéricas realizadas no presente estudo é utilizado o *kernel quadratic*, por ter a particularidade de não ter ponto de inflexão nas suas primeira e segunda derivadas no intervalo de definição da função. Este *kernel* é definido por:

$$W(q, h) = \frac{3}{2\pi h^2} \left(\frac{q^2}{4} - q - 1 \right), \text{ para } 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

onde $q = (r_a - r_b) / h$.

2.2. Modelo numérico SPH

O método SPH, que não necessita de malha, permite modelar as trajetórias das partículas do fluido que interagem entre si segundo as equações de Navier-Stokes escritas no formalismo SPH, ou seja, escritas com base na teoria dos integrais de interpolação que usam *kernels* de interpolação, de acordo com a equação (1). Um dos modelos SPH que se encontra actualmente em desenvolvimento é o modelo *free-ware* SPHysics que permite modelar escoamentos com superfície livre (Crespo, 2008; SPHysics code, 2009).

O modelo numérico SPH utilizado e desenvolvido no LNEC é baseado no código SPHysics, na sua versão 1.4 (SPHysics code, 2009), inspirado na formulação proposta por Monaghan (1994). Neste modelo, é utilizada a técnica de fluido pouco compressível: a pressão é calculada através de uma equação de estado, que relaciona a pressão no fluido com a massa volúmica.

As equações SPH são baseadas na formulação Lagrangeana da equação de conservação da quantidade de movimento e de continuidade:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \Pi + g \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\text{div}(v) \quad (5)$$

onde t é o tempo, Π representa os termos viscosos, $g = (0, 0, -9.81) \text{ m.s}^{-2}$ é a aceleração da gravidade, v , P e ρ são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa volúmica.

Na formulação SPH *standard* (Monaghan, 1994), na qual o fluido é considerado pouco compressível, a pressão é directamente calculada a partir da massa volúmica do fluido:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \text{ com } B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \quad (6)$$

sendo $\gamma=7$, ρ_0 a massa específica de referência e c_0 a velocidade do som. Por razões de ordem numérica, é normalmente considerado um valor de velocidade do som menor que o seu valor real, o que permite aumentar o passo de tempo.

O modelo numérico SPH utilizado no LNEC é uma versão alterada do modelo SPHysics, para modelação específica de propagação de ondas e de interacção entre ondas e estruturas costeiras.

No modelo numérico, a integração no tempo é realizada utilizando o algoritmo *predictor-corrector* com o passo de tempo controlado automaticamente respeitando as condições de estabilidade numérica. O modelo *Sub-Particle Scale* de turbulência, derivado dos métodos de *Large Eddy Simulation*, é utilizado para modelar os efeitos ligados à turbulência. A condição de fronteira repulsiva é utilizada, ou seja, é imposto uma força de repulsão nas partículas que constituem a fronteira sólida do domínio computacional.

Várias análises do modelo numérico permitiram definir as melhores opções do programa a adoptar para modelar escoamentos com superfície livre (Didier e Neves, 2009a, 2009b, 2010; Didier *et al.*, 2011).

A geração das ondas é efectuada através de um batedor pistão com absorção dinâmica das ondas. Esta técnica permite dispor de um canal de onda semi-infinito, permitindo realizar simulações numéricas para intervalos de tempo suficientemente grandes para calcular parâmetros estatísticos relevantes (Didier e Neves, 2012).

3. QUEBRA-MAR DE ZEEBRUGGE

3.1. Descrição do quebra-mar de Zeebrugge

No âmbito do projecto CLASH (2004), o quebra-mar de Zeebrugge foi monitorizado para analisar a interacção entre onda e quebra-mar e medir o volume galgado. Um corte transversal do quebra-mar é apresentado na Figura 1, na qual se pode identificar o reservatório de medição do volume galgado. Um equipamento adequado (bóia) permitiu também medir a elevação da superfície livre e o nível da água médio em frente ao quebra-mar, a 150.0m do coroamento da superestrutura.

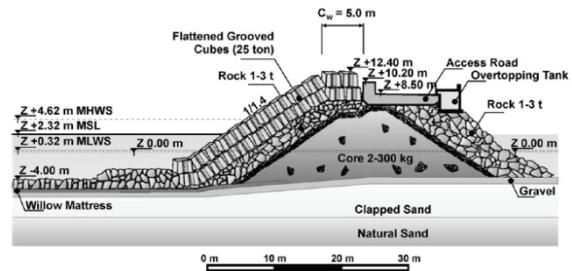


Fig. 1. Secção do quebra-mar de Zeebrugge.

O quebra-mar de Zeebrugge é um quebra-mar de taludes com o manto principal protegido com blocos cúbicos Antifer de 25 toneladas, dispostos em duas camadas, num talude a 1:1.4, rematado superiormente com uma berm de coroamento de 5.00m de largura à cota +12.40m (Z), sendo Z o nível de referência. A superestrutura tem o seu coroamento situado à cota +10.20m (Z) e a zona protegida, à cota +8.50m (Z), serve de estrada de acesso.

Os níveis de maré são de +0.32m (Z) e +4.62m (Z) para baixa-mar e preia-mar, respectivamente (Troch *et al.*, 2004).

3.2. Caso de estudo

O caso analisado no presente estudo corresponde à tempestade de 8 de Novembro de 2001, para a qual $H_s=3.31\text{m}$ e $T_p=10.28\text{s}$, respectivamente a altura de onda significativa e o período de pico (definidos a partir da série temporal de elevação de superfície livre na bóia) e o nível médio do mar igual a $+5.01\text{m}$ (Z). As medições foram realizadas durante 2h e foram registadas 1134 ondas, das quais apenas 29 induziram galgamento (Troch *et al.*, 2004). Analisando a série temporal do volume galgado durante as duas horas do registo, verifica-se que os maiores volumes galgados são da ordem de 0.2 a $0.3\text{m}^3/\text{m}/\text{onda}$.

4. RESULTADOS

Para aplicar o modelo SPH ao caso de estudo, foram realizadas algumas simplificações e aproximações: i) a batimetria é similar à medida em frente ao quebra-mar de Zeebrugge; no entanto, o fundo é considerado impermeável, assim como as camadas de enrocamento subjacentes às duas camadas de blocos cúbicos Antifer; ii) os blocos cúbicos têm dimensões um pouco inferiores às dos blocos do quebra-mar real para tomar em conta a porosidade do quebra-mar; no modelo numérico, sendo bidimensional, as duas camadas são colocadas regularmente uma em cima da outra, o que não corresponde à configuração adoptada *in situ*; iii) as ondas incidentes no modelo numérico são regulares, sendo irregulares nas medições de campo.

Como foi indicado anteriormente, a elevação de superfície livre é medida em frente ao quebra-mar numa bóia localizada a 150.0m do coroamento do quebra-mar e o regime de agitação para a tempestade considerada é caracterizado por $H_s=3.31\text{m}$ e $T_p=10.28\text{s}$. Como no modelo numérico são geradas ondas incidentes regulares, é necessário definir as características equivalentes da elevação de superfície livre no local da bóia (resultado da sobreposição das ondas incidente e reflectida). Assim, são realizadas seis simulações numéricas, com várias alturas de onda incidentes regulares de 4.00 , 5.00 , 6.00 , 6.50 , 6.80 e 7.20m junto ao batedor que correspondem a uma altura de onda (incidente e reflectida), H , na posição da bóia, de 3.00 , 3.85 , 4.75 , 5.65 , 5.90 e 6.30m (Tabela 1). O primeiro valor de H , 3.00m , corresponde a um valor similar ao H_s , determinado na bóia. O penúltimo valor de H , 5.90m , corresponde ao valor H_{max} , determinado como sendo $\sim 1.8H_s$ (Goda, 2000). O valor H_{max} é de facto definido por Goda (2000) como sendo o valor mais provável de altura máxima de onda regular equivalente para um registo de onda irregular, o que não significa que não podem existir ondas com altura maior. Como o galgamento de estruturas marítimas é fortemente condicionado pela elevação de superfície livre em frente ao quebra-mar, considera-se aqui, para a tempestade de 8 de

Novembro de 2001, que a altura de onda máxima (onda incidente e reflectida) é de $1.8H_s$, ou seja, 5.90m na posição da bóia, à qual corresponde uma altura de onda regular incidente de 6.80m .

O domínio computacional é constituído por 41902 partículas. A distância inicial entre partículas é de 0.20m . As partículas são inicialmente distribuídas conforme uma grelha cartesiana regular. O batedor está situado a uma distância de 180.50m do coroamento da superestrutura. A profundidade ao pé do batedor é de 12.20m , considerando o nível de água medido de $+5.01\text{m}$ (Z). O domínio computacional nas proximidades do quebra-mar pode ser visto na Figura 4 na qual se identifica o fundo, as duas camadas de blocos cúbicos e o muro-cortina.

A análise dos resultados é realizada a partir do instante onde se verifica que a interacção entre a onda incidente e reflectida é periódica, ou seja a partir do tempo $t=50.0\text{s}$. Na Figura 2 apresenta-se a série temporal de elevação de superfície livre na bóia para uma onda incidente de 6.00m . Verifica-se que neste regime de onda a altura de onda total é de 4.75m na posição da bóia.

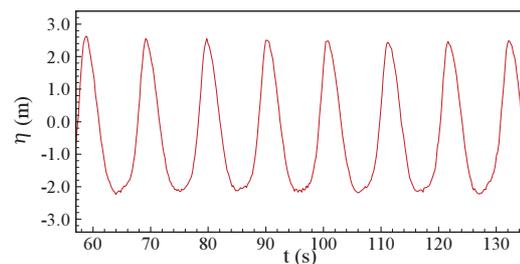


Fig. 2. Série temporal da elevação de superfície livre na bóia, 150.0m em frente ao quebra-mar (onda incidente de 6.00m).

O volume galgado por onda é calculado a partir do volume galgado correspondente a 10 ondas. A série temporal do volume galgado para uma onda incidente de 6.00m de altura é apresentada na Figura 3. Verifica-se que o volume galgado por onda não é constante, mesmo se a onda incidente é regular, devido aos fenómenos aleatórios associados ao complexo fenómeno de rebentação da onda, da interacção com os blocos da estrutura e da interacção entre as ondas incidente e reflectida.

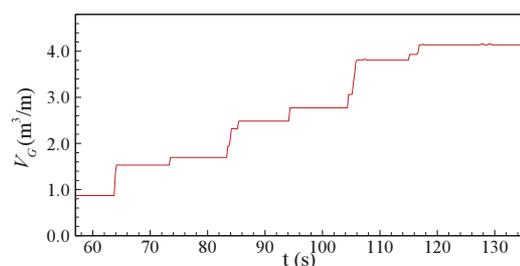


Fig. 3. Série temporal do volume galgado (onda incidente de 6.00m).

Na Tabela 1 apresenta-se o volume galgado por onda, assim como a altura de onda incidente e a altura de onda na posição da bóia para as 6

condições de onda incidente simuladas. Verifica-se galgamento a partir de uma altura de onda incidente de 6.00m, que corresponde a uma altura de onda de 4.75m na bóia, com um volume galgado por onda de 0.446m³/m/onda. O volume galgado calculado para as ondas incidentes superiores a 6.00m de altura é inferior ao obtido para a onda incidente de 6.00m, mas a ordem de grandeza é similar. Para a onda incidente de 6.80m de altura, com $H_{max}=5.90$ m, o volume galgado é de 0.270m³/m/onda.

Altura onda incidente (m)	Altura de onda total na bóia (m)	Volume galgado (m ³ /m) por onda
4.00	3.00	0
5.00	3.85	0
6.00	4.75	0.446
6.50	5.65	0.230
6.80	5.90	0.270
7.20	6.30	0.327

Tab. 1. Altura da onda incidente, elevação de superfície livre na bóia e volume galgado por onda.

Os resultados numéricos de volume galgado, na Tabela 1, são comparados com o estimado a partir da série temporal do volume galgado medido no projecto CLASH, considerando apenas os maiores volumes galgados registados, com um valor de 0.2-0.3m³/m/onda. Verifica-se que o modelo numérico SPH permite estimar a ordem de grandeza do volume galgado devido às maiores ondas. Em particular, o volume galgado calculado para a onda com H_{max} (valor mais provável de altura máxima de onda regular), igual a 0.270m³/m/onda, é similar ao estimado no protótipo, entre 0.2 e 0.3m³/m/onda. A Figura 4 apresenta dois instantes da interacção entre a onda de 6.00m de altura e o quebra-mar: a interacção entre a onda incidente e reflectida (em cima) e o galgamento do quebra-mar (em baixo).

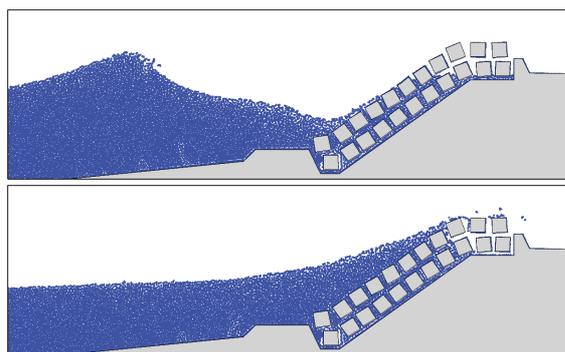


Fig. 4. Interacção da onda incidente de 6.00m com o quebra-mar.

Como conclusão, a versão actual do modelo SPH permite estimar correctamente a ordem de grandeza dos maiores volumes galgados por onda num quebra-mar de taludes complexo, considerando o valor mais provável da altura de onda máxima na posição da bóia, $H_{max}=1.8H_s$, baseada na altura significativa, H_s , da série temporal de elevação de superfície livre medida em frente ao quebra-mar.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007. Os autores agradecem à FCT o financiamento concedido através do projecto PTDC/ECM/114109/2009, "SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamic* para aplicações a estruturas costeiras".

REFERÊNCIAS

- CLASH (2004), *Crest Level Assessment of coastal Structures by full-scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping*. Disponível em: <http://www.clash.ugent.be/>
- Crespo, A.J.C. (2008). *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPPhysics to free-surface hydrodynamics*, Tese de Doutoramento, Universidade de Vigo, Espanha.
- Didier, E., Neves, M.G. (2009a). Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model, *Journal of Coastal Research*, SI 56, 496-500.
- Didier, E., Neves, M.G. (2009b). Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure, *4th International SPHERIC workshop*, Nantes, França, 357-364.
- Didier, E., Neves, M.G. (2010). Study of wave interaction with coastal structures using a SPH numerical model, *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(4), 435-455.
- Didier, E., Martins, R., Neves, M.G., Vasco, J.R.G. (2011). Interaction between wave and coastal structure: validation of two Lagrangian numerical models with experimental results, *MARINE 2011*, Lisboa, Portugal.
- Didier E., Neves M.G. (2012). A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. (em public.).
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*, 2nd edition, Advanced Series on Ocean Engineering.
- Monaghan, J.J. (1994). Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110, 399-406.
- SPPhysics code - versão 1.4 (2009). Disponível em: <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>
- Troch, P., Geeraerts, J., Van de Walle, B., De Rouck, J., Van Damme, L., Allsop, W., Franco, L. (2004). Full-scale wave overtopping measurements on the Zeebrugge rubble mound breakwater, *Coastal Engineering*, 51, 609-628.