



# VI SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 12 à 14 de Novembro de 2014

## MODELAGEM NUMÉRICA E FÍSICA DE UM QUEBRA-MAR POROSO

Eric Didier<sup>1,2</sup>, Diogo R.C.B. Neves<sup>3</sup>, João Dias<sup>3</sup>, Paulo R.F. Teixeira<sup>4</sup>, Maria da Graça Neves<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente  
Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal  
e-mail: edidier@lnec.pt

<sup>2</sup> UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa  
2829-516, Caparica, Portugal

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal  
e-mail: jdias@lnec.pt; dneves@lnec.pt; gneves@lnec.pt

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande (FURG)  
Campus Carreiros, CP. 96201-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil  
e-mail: pauloteixeira@furg.br

### RESUMO

*Os modelos Lagrangianos de tipo Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) apresentam-se como uma alternativa interessante para modelar a interação entre ondas e estruturas costeiras e marítimas. Estes modelos permitem representar corretamente a física dos fenômenos. No entanto, como qualquer modelo numérico, a precisão dos resultados depende fortemente da resolução, i.e. da dimensão das partículas. O estudo de análise da convergência com a resolução, para a elevação da superfície livre e o galgamento, mostra assim que a convergência é obtida para resoluções diferentes em função do tipo de fenômeno analisado e para resoluções mais finas quando a não-linearidade dos fenômenos aumenta. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais obtidos em canal de ondas evidenciando a convergência quer da elevação de superfície livre quer do galgamento com a resolução.*

### 1. INTRODUÇÃO

O modelo numérico SPHyCE é um modelo baseado no código SPHysics (Gómez-Gesteira et al., 2012) e especificamente desenvolvido no LNEC para o estudo da interacção das ondas com estruturas costeiras (Didier e Neves, 2012; Didier et al., 2012, 2013a, 2013b, 2014a, 2014b). O modelo é baseado nas equações Lagrangianas da Dinâmica dos Fluidos e numa técnica de partículas (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) utilizada pela discretização e resolução destas equações. É já conhecido que estes modelos permitem modelar os escoamentos complexos e que a física dos fenômenos é relativamente bem representada, pelo menos qualitativamente: é o caso, por exemplo, da rebentação das ondas e das rupturas de barragens. No entanto, como qualquer modelo numérico, a precisão dos resultados depende dos esquemas de discretização, da integração no tempo e da resolução, i.e. da dimensão das partículas.

No presente trabalho, um estudo de convergência com a resolução é realizado com o objectivo de definir o melhor critério a considerar para assegurar a melhor resolução do problema de interacção entre uma onda e um quebra-mar poroso.

Devido à extensão do canal de ondas dos ensaios experimentais, que favorece a transformação da onda incidente ao longo do canal (aparição de harmónicas), uma técnica de acoplamento passivo (Didier et al., 2013b, 2014a) é utilizada entre o modelo Fluinco (Teixeira e Awruch, 2005), que permite propagar a onda desde o batedor até uma dada secção do canal computacional (secção de acoplamento), e o modelo SPHyCE, que permite modelar a interacção

onda-estrutura. O acoplamento entre os dois modelos consiste na transferência do modelo Fluinco para o modelo SPHyCE das componentes espectrais na seção de acoplamento, quer da amplitude quer da fase, permitindo ter em conta as características da onda que chega ao quebra-mar.

Com o objectivo de modelar estruturas costeiras com manto poroso, quer de enrocamento, quer de blocos artificiais, foi implementado no modelo SPHyCE a possibilidade de colocar blocos de forma rectangular que permitam modelar directamente os blocos do manto, o escoamento fora e dentro do manto (i.e., entre os blocos que constituam o manto).

Para validar os resultados numéricos obtidos foram realizados ensaios experimentais em canal de ondas nas instalações do LNEC de um quebra-mar poroso à escala 1:30 (quebra-mar Poente do Porto de pesca de Albufeira, Portugal), testando várias alturas e períodos de onda incidente regular.

## 2. MODELO FÍSICO

No sentido de validar o modelo numérico, foi construído, num dos canais das instalações do LNEC, um modelo físico representativo da secção real do quebra-mar Poente do porto de Pesca de Albufeira (Algarve, Portugal), segundo a semelhança de Froude, à escala geométrica de 1:30, como ilustra a Fig. 1.

A batimetria e geometria da secção da estrutura são representativas da secção real do quebra-mar. A batimetria considerada é constituída por um zona horizontal de 23.04 m e uma rampa de 13.96 m com uma inclinação de 2.1% localizada antes da estrutura. O pé da estrutura está localizado a 37 m do batedor do tipo pistão. O nível de maré em todos os ensaios foi de 0.51 m junto ao batedor, e 0.217 m no pé do talude, o que corresponde à escala real +3.5 m (ZH) ao nível de maré. A estrutura é composta por um manto de enrocamento com declive de 1.6:3 e com uma cota de coroamento +7.0 m (ZH). Na zona central do quebra-mar existe um passadiço de betão impermeável com 3.0 m de largura, cujo coroamento se encontra +6.5 m (ZH). A estrutura está fundeada +3.0 m (ZH). O manto exterior é composto por duas camadas de blocos de 90 a 120kN e apresenta um elevado nível de arrumação dos blocos produzindo uma camada pouco porosa. A Fig. 2 mostra o perfil transversal da secção modelada.



Figura 1. Modelação física: canal e modelo (2D) à escala 1:30.

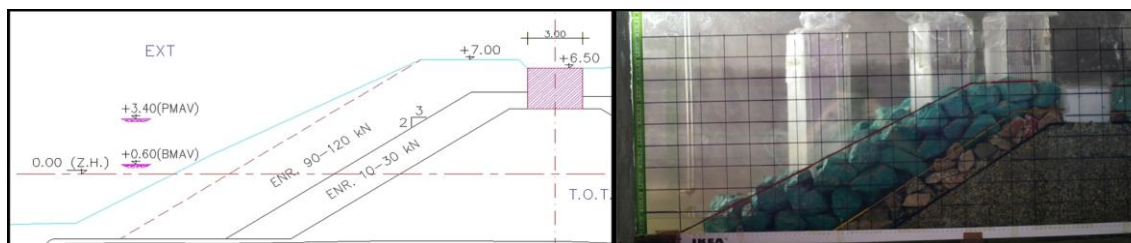


Figura 2. Perfil da secção de estudo (escala de protótipo) e modelo à escala 1:30.

Foram colocadas 10 sondas resistivas para medir a elevação da superfície livre em 10 posições ao longo do canal, tanto a barlar da estrutura como no interior da estrutura e no seu coroamento. O volume galgado foi também medido através de uma sonda de nível colocada num reservatório que capta o volume de água galgada. A Fig. 3 apresenta um esquema do canal, as principais dimensões e a posição das sondas. A Tab. 1 indica a posição das sondas de elevação de superfície livre em relação ao referencial localizado ao pé do quebra-mar.

A Fig. 4 mostra dois instantes da interacção da onda com o quebra-mar nos ensaios experimentais, para  $T=2.19$  s e  $H=0.083$  m, correspondentes aos máximos de refluxo (*run-down*) e espraiamento (*run-up*). Na figura são visíveis

as 3 sondas que foram colocadas no interior da estrutura para verificar os níveis de água (sonda G8, G9 e G10). Para este caso não ocorre galgamento, apenas um espraioamento no quebra-mar até ao coroamento.

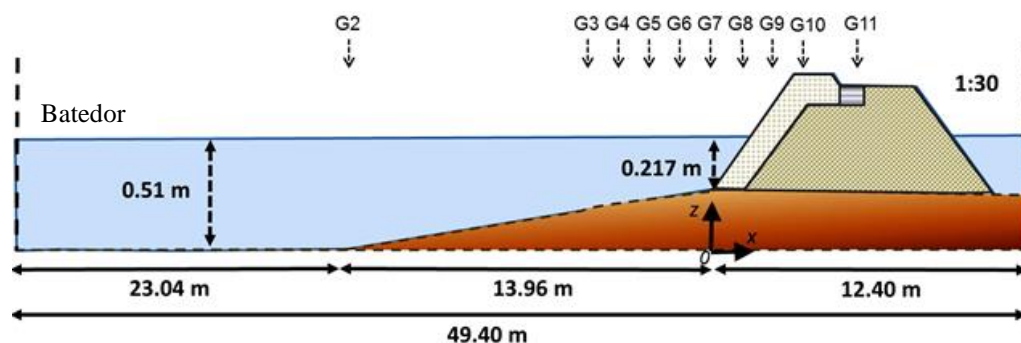


Figura 3. Perfil do canal de ondas dos testes em modelo físico.

Tabela 1. Posição das sondas ao longo do canal de ondas

| Sonda | G2     | G3    | G4    | G5    | G6    | G7     | G8    | G9   | G10   | G11   |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|
| x (m) | -13.96 | -3.79 | -2.53 | -2.03 | -1.23 | -0.055 | 0.297 | 0.56 | 0.745 | 0.875 |

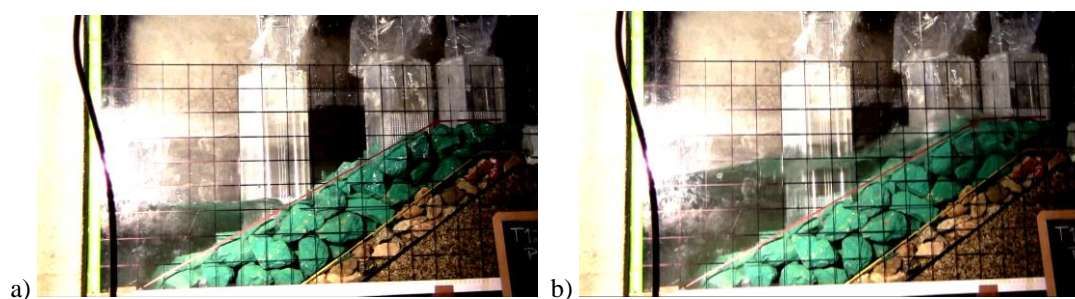


Figura 4. Dois instantes representativos da interacção de uma onda regular ( $T=2.19s$  e  $H=0.083m$ ) com o quebra-mar: (a) refluxo (*run-down*); (b) espraioamento (*run-up*).

### 3. MODELO NUMÉRICO

Devido à extensão do canal de ondas dos ensaios experimentais, que favorece a transformação da onda incidente ao longo do canal (formação de harmónicas), foi utilizada uma técnica de acoplamento passivo (Didier et al., 2013b, 2014a) entre o modelo Fluinco (Teixeira e Awruch, 2005), que permitiu propagar a onda desde o batedor até uma dada secção do canal computacional (secção de acoplamento), e o modelo SPHyCE, que permite modelar a interacção onda-estrutura. O Fluinco usa malhas de elementos finitos e é baseado na integração das equações de Navier-Stokes numa formulação lagrangiana-euleriana arbitrária. O acoplamento consiste na transferência do modelo Fluinco para o modelo SPHyCE das componentes espectrais na secção de acoplamento, quer da amplitude quer da fase, e permite ter em conta as características da onda incidente no quebra-mar.

#### 3.1 Modelo SPHyCE

O modelo SPHyCE (*Smoothed Particle Hydrodynamics for Coastal Engineering*) é baseado na formulação Lagrangiana 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 SPPhysics (Gómez-Gesteira et al., 2012), modelo SPPhysics code v1.4 (2009) e da formulação SPH *standard* proposta por Monaghan (1992, 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 complexos, e onde ocorre rebentação das ondas e galgamento das estruturas marítimas.

O modelo SPHyCE integra várias opções especificamente desenvolvidas para aplicações de interacções ondas-estruturas costeiras sendo de destacar: i) a re-normalização parcial das partículas na zona da estrutura de forma a permitir a propagação de ondas e evitar alguma difusão, garantindo simultaneamente a capacidade de modelar com precisão o campo de pressão junto à estrutura; ii) a implementação de um batedor com absorção dinâmica de ondas e correcção da deriva do batedor, o que permite ter um canal semi-infinito; iii) a modelação de estruturas porosas; iv) o

acoplamento do modelo SPH com modelos de propagação de ondas; v) o refinamento semi-automático, pela divisão das partículas de forma a aumentar a precisão dos resultados e diminuir o tempo de cálculo. Todos estes desenvolvimentos e validações foram realizados com base em dados de ensaios à escala reduzida obtidos através de um modelo físico construído para o efeito nas instalações do LNEC (Didier e Neves, 2012; Didier et al., 2012, 2013a, 2013b, 2014, 2014b).

### 3.2 Modelo Fluinco

O código FLUINCO, desenvolvido por Teixeira (Teixeira, 2001), emprega o método semi-implícito de Taylor-Galerkin de dois passos para discretizar no tempo e no espaço as equações de Navier-Stokes. É usada uma formulação Lagrangeana-Euleriana arbitrária (*arbitrary lagrangean eulerian* - ALE) para permitir a solução de problemas com movimentos da superfície livre, a qual está sujeita a uma pressão atmosférica constante. Para a discretização no espaço é aplicado o método clássico dos resíduos ponderados de Galerkin empregando um elemento tetraédrico. A distribuição espacial da velocidade da malha é tal que a distorção dos elementos é minimizada pela sua suavização através do uso de funções que ponderam a influência da velocidade de cada nó pertencente às superfícies de contorno. Outros detalhes relativos à aplicação deste código a este tipo de problemas podem ser encontrados em Teixeira et al. (2013).

## 4. ANALISE DOS RESULTADOS

O canal numérico tem as mesmas dimensões que o canal experimental e as características da onda incidente foram similares. Embora as dimensões do quebra-mar sejam iguais, a estrutura difere ligeiramente: i) As duas camadas de blocos de diferentes tamanhos foram colocadas num declive impermeável no SPHYCE. O T.O.T. (Todo O Tamanho) não está representado no modelo numérico; ii) Os blocos irregulares utilizados nos ensaios são modelados por blocos rectangulares no SPHYCE; iii) Sendo o SPHYCE um modelo 2D, a porosidade das camadas de blocos foi adaptada para considerar uma porosidade similar à estrutura 3D dos ensaios. A Fig. 5 apresenta o modelo do quebra-mar.

A seção de acoplamento entre Fluinco e SPHYCE foi localizada na sonda G5. A resolução no SPHYCE é de 284439 partículas, o seja  $do=0.0015$  m,  $do$  sendo a dimensão das partículas. A inclinação dos blocos do manto exterior representa as rugosidades que se verificam no modelo por causa da irregularidade dos blocos utilizados (Fig. 2 e 4), estimada em  $\pm 0.5$  cm. O tempo de simulação é de 15 s com um passo de tempo da ordem de  $1.5 \times 10^{-5}$  s.

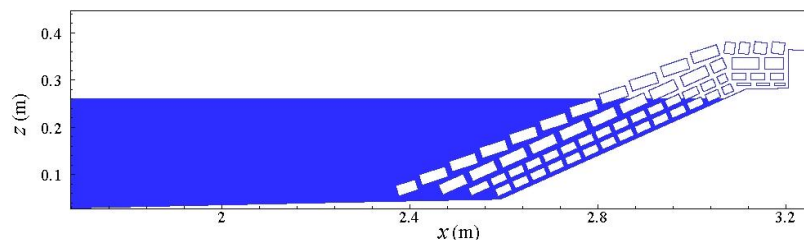


Figura 5. Domínio computacional e modelo do quebra-mar no SPHYCE (escala 1:30).

### 4.1 Estudo de convergência com a resolução

O estudo de convergência com a resolução foi realizado para uma onda regular de 0.110 m de altura e 2.19 s de período. A análise foi realizada para a elevação de superfície livre ao pé do talude do quebra-mar (sonda G7) e o galgamento.

A Fig. 6 mostra a série temporal do volume galgado,  $Q$ , para 6 resoluções, de  $N=48789$  a 323036, onde  $N$  é número de partículas. O galgamento é o fenómeno mais complexo a modelar, pois é condicionado pela simulação de todos os outros fenómenos anteriores, da propagação da onda até o *run-up* no talude. A Tab. 2 indica as características de cada resolução, indicando a dimensão das partículas,  $do$ , o volume galgado por onda,  $Q_w$ , a diferença relativamente à resolução mais fina,  $E$ , e a diferença entre duas resoluções sucessivas,  $Er$ . Verifica-se a convergência com a resolução mais fina a partir da 4ª resolução com 202420 partículas. A diferença de volume galgado médio por onda varia de 1.3% a 3.0%, quando se comparam as resoluções 202420 e 284439 com a resolução mais fina.

A Fig. 7 apresenta a série temporal de elevação de superfície livre ao pé do quebra-mar, na sonda G7. Pode-se verificar que, excetuando algumas diferenças nas várias séries temporais, a superfície livre não é muito sensível à resolução.

Tabela 2. Características da resolução, volume galgado médio por onda e diferenças relativas,  $T=2.19$  s e  $H=0.110$  m.

| Resolução | $do$ (m) | $Q_w$ (m <sup>3</sup> /m/onda) | $E$ (%) | $Er$ (%) |
|-----------|----------|--------------------------------|---------|----------|
| 48789     | 0.00400  | 0.000605                       | 37.8    | 16.5     |
| 100283    | 0.00265  | 0.000725                       | 25.4    | 17.2     |
| 140308    | 0.00220  | 0.000877                       | 9.8     | 8.6      |
| 202420    | 0.00180  | 0.000960                       | 1.3     | 4.1      |
| 284439    | 0.00150  | 0.001001                       | 3.0     | 3.0      |
| 323036    | 0.00139  | 0.000972                       | -       | -        |

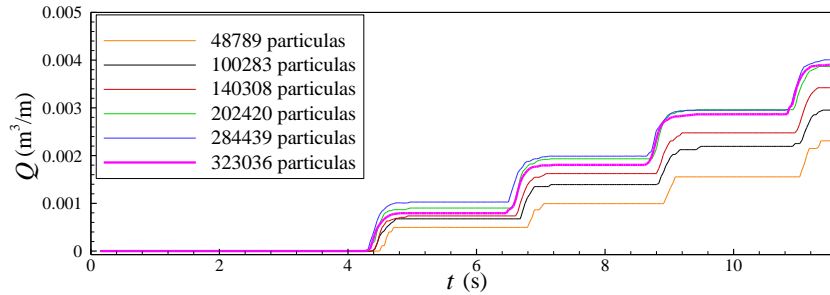


Figura 6. Convergência do volume galgado com a resolução,  $T=2.19$  s e  $H=0.11$  m.

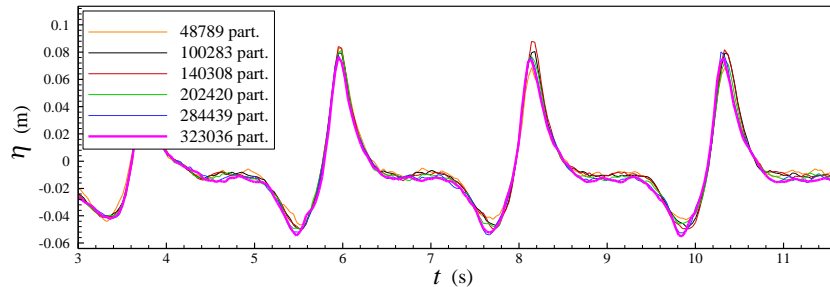


Figura 7. Convergência da elevação de superfície livre em G7 com a resolução,  $T=2.19$  s e  $H=0.11$  m.

#### 4.2 Análise dos resultados para a onda incidente $T=2.19$ s e $H=0.083$ e $0.110$ m

As Fig. 8 e 9 e 10 e 11 apresentam a série temporal de elevação de superfície livre nas sondas G6 a G9, para a onda incidente regular de período  $T=2.19$  s,  $H=0.083$  e  $0.110$  m respectivamente. A Fig. 12 apresenta a série temporal do nível de água no coroamento impermeável e do volume galgado para o caso de altura de onda  $H=0.110$  m (para  $H=0.083$  m, não se verifica galgamento). Uma análise estatística das séries temporais de elevação de superfície livre nas sondas G6 a G9 é apresentada na Tab. 3 através do *bias* (desvio médio dos resultados numéricos relativamente aos dados experimentais), *rms* (*root-mean-square*) e *IC* (índice de concordância) (Willmott et al., 1985).

De modo geral, a superfície livre antes e dentro do quebra-mar foi bem estimada, apresentando boa concordância com as variações experimentais. Na sonda G6, a elevação de superfície livre foi subestimada, particularmente nas cristas (*bias* negativo). Essas diferenças são provavelmente o resultado de pequenas diferenças de fase entre as características da onda incidente no Fluinco e a geração da onda pelo batedor tipo pistão no SPHyCE. No entanto, a elevação de superfície livre na sonda G7 obtida com o SPHyCE apresentou boa concordância com os dados experimentais, o SPHyCE sobrestimou ligeiramente a elevação de superfície livre sendo o *bias* positivo. Para  $H=0.083$  e  $0.110$  m, o *IC* é de 0.96-0.97 para as sondas G6 e G7, indicando um bom acordo entre resultados numéricos e dados experimentais.

O nível de água nas sondas G8 e G9, dentro do manto poroso do quebra-mar, foram bem estimados pelo SPHyCE, apresentando para as duas sondas uma boa concordância com os dados experimentais. O nível de água foi subestimado na sonda G8 (*bias* negativo) mas sobrestimado na sonda G9 (*bias* positivo). O *IC* foi da ordem de 0.90-0.94.

Não se verificou galgamento para  $H=0.083$  m, tal como nos ensaios. O volume galgado foi bem simulado para  $H=0.110$  m tal como o nível de água no coroamento impermeável do quebra-mar e a duração do escoamento da lâmina de água também foi correctamente simulada. A série temporal do volume galgado apresentou a mesma tendência e a diferença de volume galgado médio por onda entre SPHyCE e o experimental foi apenas de 20%.

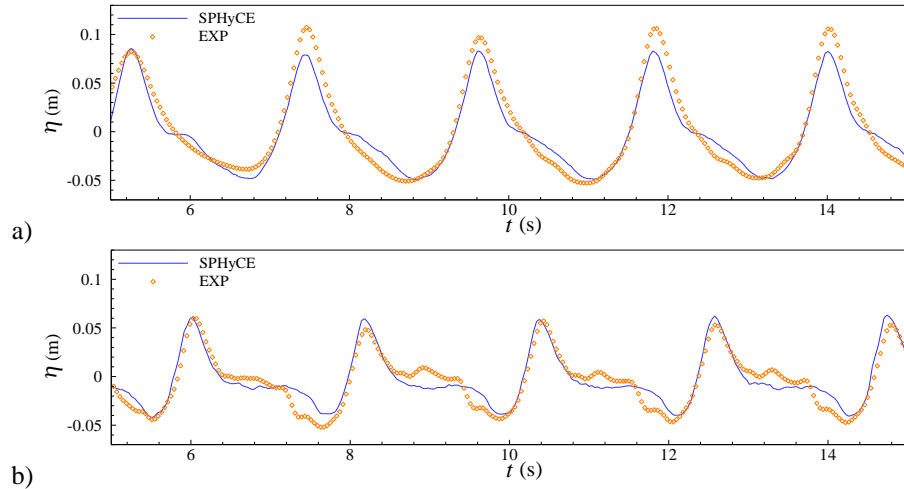


Figura 8. Elevação de superfície livre para  $T=2.19$  s,  $H=0.083$  m: sonda G6 (a) e G7 (b).

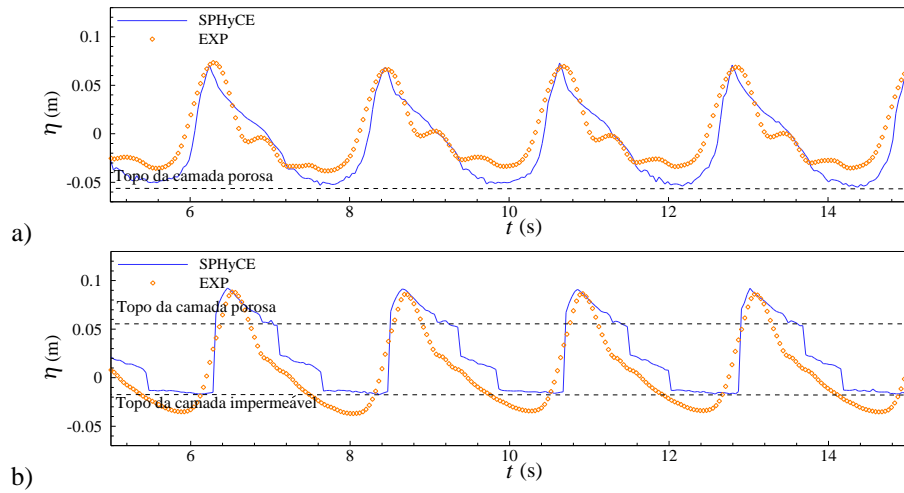


Figura 9. Elevação de superfície livre para  $T=2.19$  s,  $H=0.083$  m: sonda G8 (a) e G9 (b).

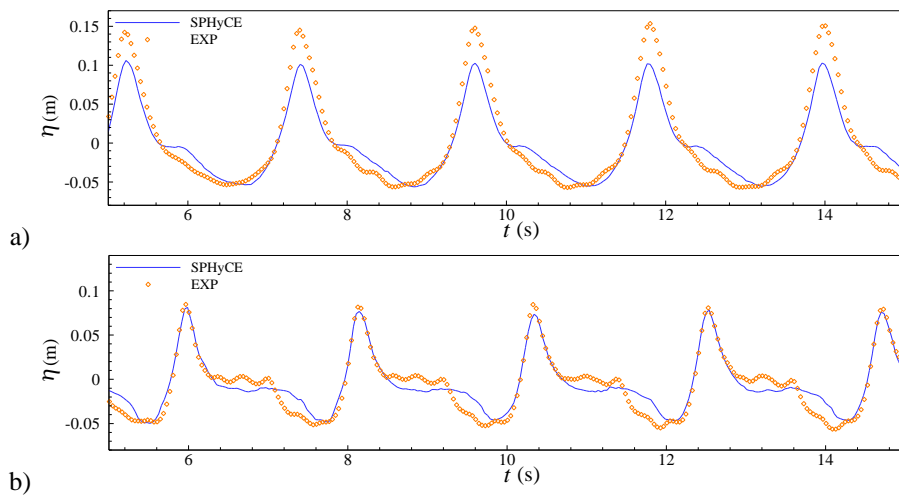


Figura 10. Elevação de superfície livre para  $T=2.19$  s,  $H=0.110$  m: sonda G6 (a) e G7 (b).

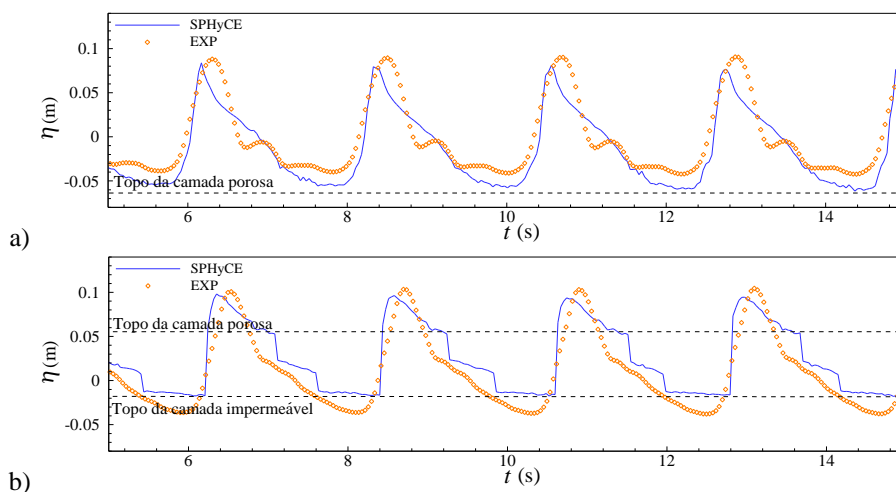


Figura 11. Elevação de superfície livre para  $T=2.19$  s,  $H=0.110$  m: sonda G8 (a) e G9 (b).

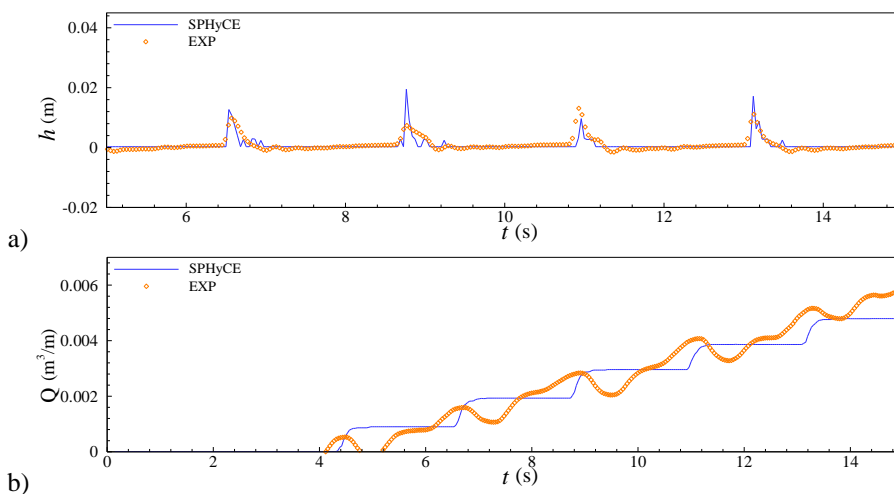


Figura 12. Nível de água no coroamento impermeável (a) e volume galgado para  $T=2.19$  s,  $H=0.110$  m.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos das séries temporais de elevação de superfície livre para as sondas G6 até G9 para uma onda incidente  $T=2.19$  s e  $H=0.083$  m e  $0.110$  m.

| $H=0.083$ m | G6      | G7     | G8      | G9     |
|-------------|---------|--------|---------|--------|
| <i>Bias</i> | -0.0038 | 0.0020 | -0.0101 | 0.0169 |
| <i>Rms</i>  | 0.0130  | 0.0106 | 0.0183  | 0.0230 |
| <i>IC</i>   | 0.977   | 0.962  | 0.931   | 0.908  |
| $H=0.110$ m | G6      | G7     | G8      | G9     |
| <i>bias</i> | -0.0058 | 0.0019 | -0.0115 | 0.0155 |
| <i>rms</i>  | 0.0211  | 0.0112 | 0.0193  | 0.0211 |
| <i>IC</i>   | 0.961   | 0.972  | 0.944   | 0.934  |

## 5. CONCLUSÕES

O modelo numérico SPHyCE foi aplicado para modelar a interação de um onda incidente regular com um quebra-mar poroso à escala 1:30. A propagação das ondas no canal, similar ao dos ensaios em modelo físico, foi realizada pelo modelo Fluinco. Um método de acoplamento entre o Fluinco e o SPHyCE permitiu transferir as características da onda perto do bater para o modelo SPHyCE. Os resultados numéricos foram comparados aos dados obtidos em modelo físico no canal de ondas do LNEC. A elevação de superfície livre fora e dentro do quebra-mar foi bem estimada para as duas ondas estudadas,  $T=2.19$  s e  $H=0.083$  e  $0.110$  m, embora apareçam algumas diferenças devidas, provavelmente, a pequenas variações na fase entre as características da onda incidente do Fluinco

e a onda gerada pelo batedor pistão do SPHyCE. No entanto, o galgamento apresenta uma boa concordância com os dados experimentais: para a onda  $H=0.083$  m não houve galgamento e para  $H=0.110$  m o volume médio galgado por onda obtido pelo modelo SPHyCE foi apenas 20% menor que o experimental, um valor relativamente pequeno tendo em conta a complexidade da interação onda-quebra-mar.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projecto PTDC/ECM/114109/2009. O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Didier, E. e Neves, M.G., 2012. "A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics". *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 22, Nº3, pp. 193-199.
- Didier, E., Neves, D.R.C.B., Martins, R. e Neves M.G., 2012. "Modelação de um quebra-mar de talude impermeável: comparação entre modelo numérico SPH e modelo físico". In *Proceedings of V Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – V SEMENGO*, Rio Grande, RS – Brazil, pp. 71-83.
- Didier, E., Martins, R. e Neves, M.G., 2013a. "Numerical and Experimental Modeling of Regular Wave Interacting with a Composite Breakwater" *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 23, Nº 1, pp. 46-54.
- Didier, E., Neves, D.R.C.B., Teixeira, P.R.F., Neves, M.G., Soares, H. e Viegas, M., 2013b. "Coupling of FLUINCO mesh-based and SPH mesh-free numerical codes for the modelling of wave overtopping over a porous breakwater". In *Proceedings of 6th SCACR - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 4-7 de Junho, Lisboa, Portugal.
- Didier, E., Neves, D.R.C.B., Teixeira, P.R.F., Dias, J. e Neves M.G., 2014a. "SPH numerical and physical modeling of wave overtopping a porous breakwater". In *Proceedings of 3rd IAHR European Congress*, Porto, Portugal.
- Didier, E., Neves, D.R.C.B., Martins, R. e Neves, M.G., 2014b. "Wave interaction with a vertical wall: SPH numerical and experimental modelling". *Ocean Engineering*, Vol. 88, pp. 330-341.
- 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*, Vol. 48, pp. 289-299.
- Teixeira, P.R.F. e Awruch, A.M., 2005. "Numerical simulation of fluid-structure interaction using the finite element method". *Computer & Fluids*, Vol. 34, pp. 249-273
- Monaghan, J.J., 1992. "Smoothed Particle Hydrodynamics". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 30, pp. 543-574.
- Monaghan, J.J., 1994. "Simulating free surface flows with SPH". *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pp. 399-406.
- SPHysics code v1.4, 2009, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>
- Teixeira, P.R.F., 2001. "Simulação numérica da interacção de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos". Porto Alegre, Tese de doutorado, PPGE-UFRGS.
- Teixeira, P.R.F., Davyt D.P., Didier, E. Ramalhais R., 2013. "Numerical simulation of na oscillating water column device using a code based on navier-Stokes equations". *Energy*, Vol 61, pp. 513-530.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. e Rowe C.M., 1985. "Statistics for the evaluation and comparison of models". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, Nº c5, pp. 8995-9005.

## 8. AVISO DE RESPONSABILIDADE

O autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste paper.