



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^{1,2}, Diogo R.C.B. Neves³, João Dias³, Paulo R.F. Teixeira⁴, Maria da Graça Neves³

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

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

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

⁴ 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 interação 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 interação

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 espraio no quebra-mar até ao coroamento.

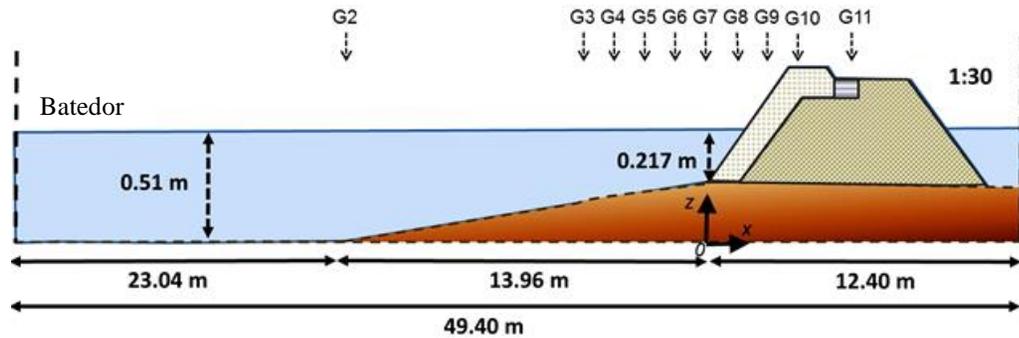


Figura 3. Perfil do canal de ondas dos testes em modelo físico.

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

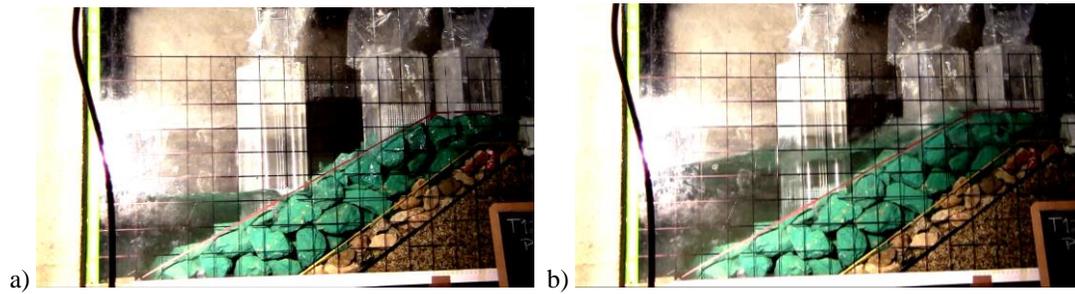


Figura 4. Dois instantes representativos da interação de uma onda regular ($T=2.19s$ e $H=0.083m$) com o quebra-mar: (a) refluxo (*run-down*); (b) espraio (*run-up*).

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 harmônicas), 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 seção do canal computacional (seção de acoplamento), e o modelo SPHyCE, que permite modelar a interação 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 seção 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 interações 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 correção 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 ± 0.5 cm. O tempo de simulação é de 15 s com um passo de tempo da ordem de 1.5×10^{-5} s.

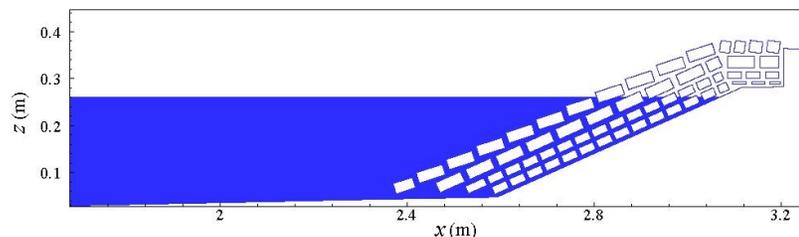


Figura 5. Domínio computacional e modelo do quebra-mar no SPHyCE (escala 1:30).

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 ³ /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	-	-

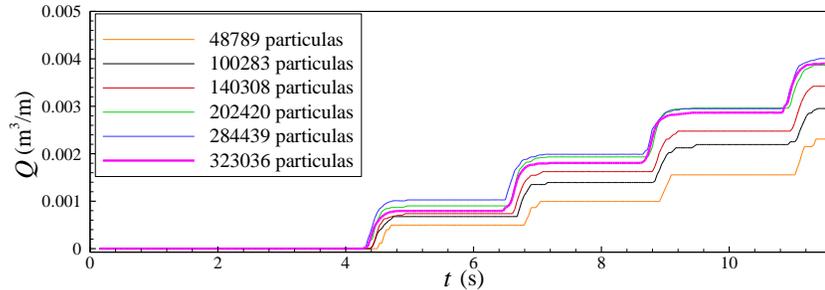


Figura 6. Convergência do volume galgado com a resolução, $T=2.19$ s e $H=0.11$ m.

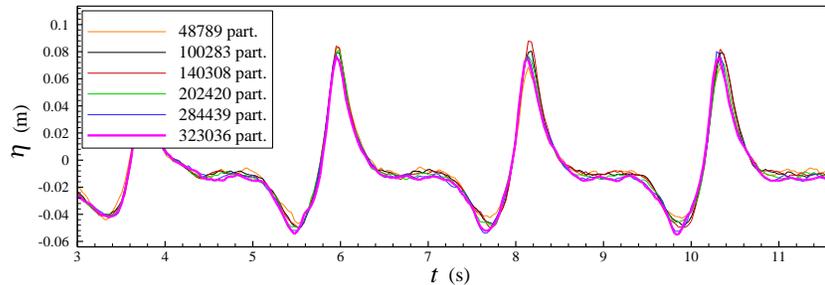


Figura 7. Convergência da elevação de superfície livre em G7 com a resolução, $T=2.19$ s e $H=0.11$ m.

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%.

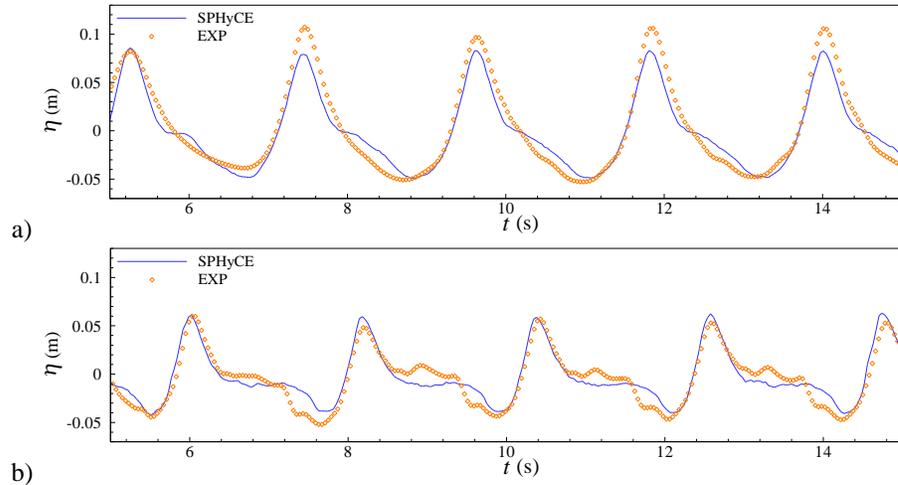


Figura 8. Elevação de superfície livre para $T=2.19$ s, $H=0.083$ m: sonda G6 (a) e G7 (b).

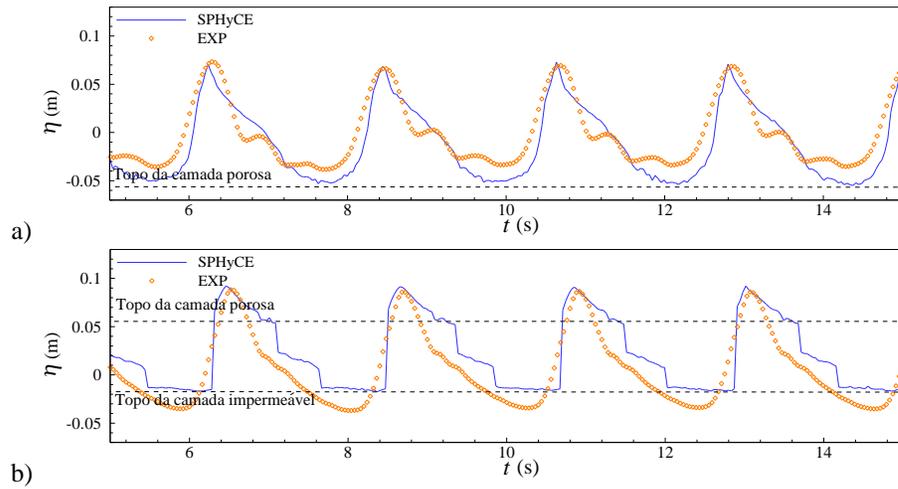


Figura 9. Elevação de superfície livre para $T=2.19$ s, $H=0.083$ m: sonda G8 (a) e G9 (b).

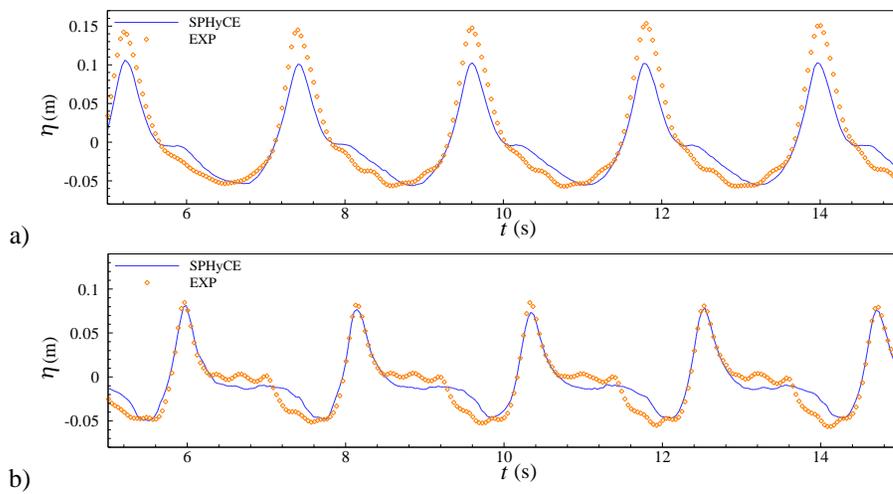


Figura 10. Elevação de superfície livre para $T=2.19$ s, $H=0.110$ m: sonda G6 (a) e G7 (b).

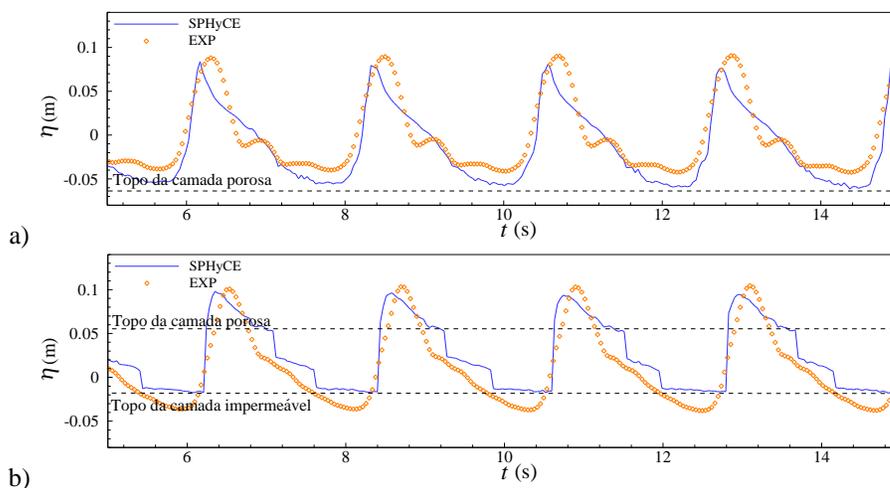


Figura 11. Elevação de superfície livre para $T=2.19$ s, $H=0.110$ m: sonda G8 (a) e G9 (b).

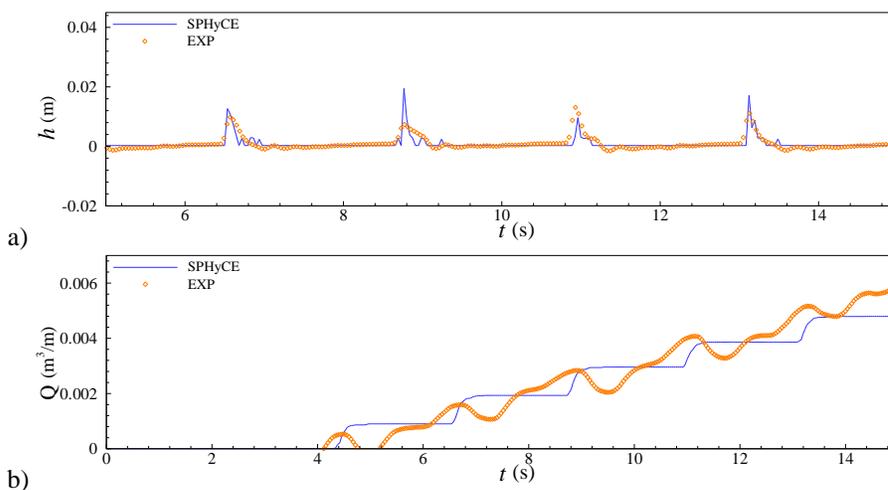


Figura 12. Nível de água no coroamento impermeável (a) e volume galgado para $T=2.19$ s, $H=0.110$ m.

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.

$H=0.083\text{m}$	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
$H=0.110\text{m}$	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, PPGEC-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.