



VI SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 12 a 14 de Novembro de 2014

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO DE ONDAS COM UM QUEBRA-MAR POROSO UTILIZANDO O CÓDIGO OPENFOAM

José M. P. Conde^{1,2}, Diogo J. S. Afonso¹, Eric Didier^{1,2}

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL)
Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial (UNIDEMI)
Campus de Caparica, 2829-516 Monte de Caparica, Portugal

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA)
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
e-mails: jpc@fct.unl.pt; dj.afonso@campus.fct.unl.pt; edidier@lnec.pt

RESUMO

No presente artigo apresentam-se as simulações numéricas feitas utilizando o código OpenFOAM®, recorrendo à biblioteca porousWaveFoam, para simular a interação de ondas com um quebra-mar poroso. O código numérico resolve as equações VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) em regime transitório e utiliza um esquema do tipo VoF (Volume of Fluid) para identificar a superfície livre. O meio poroso é modelado pela equação de Darcy–Forchheimer. Os resultados numéricos são comparados com dados obtidos experimentalmente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para um modelo de quebra-mar à escala 1:30. Foi considerada uma onda incidente regular com 2,19 s de período e 0,083 m de altura. São feitas comparações de elevação de superfície livre para 10 sondas colocadas em diferentes posições ao longo do canal e é apresentada uma análise estatística, de modo a avaliar quantitativamente a diferença entre os resultados numéricos e os experimentais. Constata-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas e ao próprio modelo de meio poroso.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas porosas são correntemente utilizadas em engenharia costeira. Um exemplo deste tipo de estruturas são os quebra-mares. Um quebra-mar de talude típico é constituído por um núcleo de material poroso, normalmente de enrocamento de tamanho variável. Este núcleo é protegido da ação erosiva do mar por um submanto, com uma ou várias camadas de enrocamento, que por sua vez é protegido por um manto resistente. O manto resistente pode ser de enrocamento ou constituído por blocos de betão. Um quebra-mar poroso permite o fluxo de água através da estrutura. A fim de garantir o seu correto funcionamento, é essencial que o quebra-mar permaneça estável sob a ação das ondas.

Um procedimento comum durante o processo de conceção de um quebra-mar é a realização de ensaios experimentais em modelo reduzido. Nesses ensaios, o perfil do quebra-mar é construído incluindo o material do núcleo, do submanto e do manto resistente. Nos últimos anos, os métodos numéricos e os recursos computacionais desenvolveram-se a um nível que torna possível a sua utilização na fase de projeto. No entanto, uma resolução completa da estrutura porosa do quebra-mar ainda não é viável. Um método para simular o efeito de um meio poroso, sem discretizar pormenorizadamente esse meio, pode ser através de termos fonte de resistência. O meio poroso, constituído por um esqueleto rígido e poros, é tratado como um meio contínuo que exerce forças sobre o líquido. Essa resistência pode ser descrita pela equação de Darcy-Forchheimer, cujos coeficientes de resistência são determinados a partir de dados experimentais.

No âmbito da engenharia costeira os códigos de resolução numérica são tradicionalmente baseados em equações do tipo Boussinesq. Recentemente, graças ao aumento da capacidade computacional, os códigos que resolvem as

equações de Navier-Stokes em valor médio, RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), tornaram-se de uso mais generalizado. As equações RANS têm a vantagem de permitir determinar, por exemplo, as características da turbulência que ocorre na zona de rebentação e os esforços resultantes dos impactos das ondas nas estruturas costeiras.

O OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) é um pacote de bibliotecas (códigos numéricos) gratuito e de código fonte aberto (*Open Source*) que pode ser utilizado para resolução de problemas de mecânica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), entre outros. É desenvolvido pela OpenCFD Ltd (ESI Group) e distribuído pela OpenFOAM® Foundation. Por estar sob a Licença Pública Geral da GNU (GNU GPL), o utilizador tem a total liberdade de executar, adaptar, redistribuir e aperfeiçoar o OpenFOAM®.

Recentemente foram desenvolvidas duas bibliotecas, baseadas no OpenFOAM®, para resolver problemas de engenharia costeira: waves2Foam (Jacobsen et al., 2012) e IHFoam (Higuera et al., 2013); que apresentam potencial para resolver a grande maioria dos problemas associados a estruturas costeiras.

Neste artigo são apresentados resultados de simulações numéricas de propagação de ondas regulares e da sua interação com um modelo de quebra-mar poroso. Os resultados numéricos são comparados com dados obtidos experimentalmente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para um modelo de quebra-mar à escala 1:30.

2. CÓDIGO OPENFOAM®

O código OpenFOAM® é tradicionalmente compilado em sistema operativo Linux. Nas simulações efetuadas neste trabalho foi utilizada a versão OpenFOAM® 2.2.1 (OpenFOAM, 2013), instalada em sistema operativo Ubuntu 12.04 LTS.

Nas simulações apresentadas neste artigo foi utilizado a biblioteca porousWaveFoam. Esta corresponde a uma das opções de utilização da biblioteca waves2Foam, que por sua vez é baseado na InterFoam. A biblioteca InterFoam permite resolver escoamentos bifásicos com superfície livre. Esta resolve as equações RANS, Eq. (1), e da continuidade, Eq. (2), para dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, juntamente com a equação de transporte da fração de volume, α , que toma o valor 0 no ar e 1 na água, Eq. (3). O algoritmo é baseado no método VoF (*Volume of Fluid*). Este código utiliza o método limitador multidimensional universal para solução explícita, MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*), para manter os limites da fração de volume independentes do esquema numérico subjacente e da estrutura da malha. O algoritmo utilizado pela biblioteca waves2Foam é o PIMPLE, trata-se de uma combinação dos algoritmos PISO e SIMPLE (OpenFOAM, 2013).

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T] = -\nabla \cdot p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}] + \sigma_T \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (3)$$

Nestas equações, $\mathbf{u} = (u \ v \ w)$ é o campo de velocidades em coordenadas cartesianas $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$, p^* é a pressão subtraindo a componente hidrostática, \mathbf{g} a aceleração gravítica, ρ a massa volúmica e μ a viscosidade dinâmica molecular. O último termo da Eq. (1) contabiliza o efeito da tensão superficial, onde σ_T é a tensão superficial e κ_α a curvatura da superfície. O tensor das tensões de Reynolds é definido pela Eq. (4) onde μ_t é a viscosidade turbulenta e k a energia cinética turbulenta. Na equação de transporte da fração de volume, Eq. (3), o último termo do membro esquerdo é um termo compressivo estabilizador da superfície livre, sendo \mathbf{u}_r a velocidade relativa (Jacobsen et al., 2012).

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t \left[\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (4)$$

A biblioteca porousWaveFoam resolve as equações VARANS (*Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) utilizadas na biblioteca porousFoam permitindo utilizar as rotinas de geração e absorção de ondas da

biblioteca waves2Foam. As equações VARANS são obtidas efetuando uma média de volume nas equações RANS. O meio poroso é modelado pela equação de Darcy–Forchheimer (Jensen et al., 2014).

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios em modelo físico

Os testes experimentais foram realizados num dos canais das instalações do LNEC (Didier et al., 2013, 2014). Neste canal foi construído um modelo físico representativo da secção real do quebra-mar poente do porto de pesca de Albufeira (Algarve, Portugal), à escala geométrica de 1:30, segundo a semelhança de Froude, como se ilustra na Fig. 1.



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

A batimetria e a geometria da secção transversal 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% a barlar 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 (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 a +3,0 m (ZH). O manto exterior é composto por duas camadas de blocos de 90 a 120 kN e apresenta um elevado nível de arrumação dos blocos produzindo uma camada pouco porosa. A Fig. 2 ilustra o perfil transversal da secção modelada.

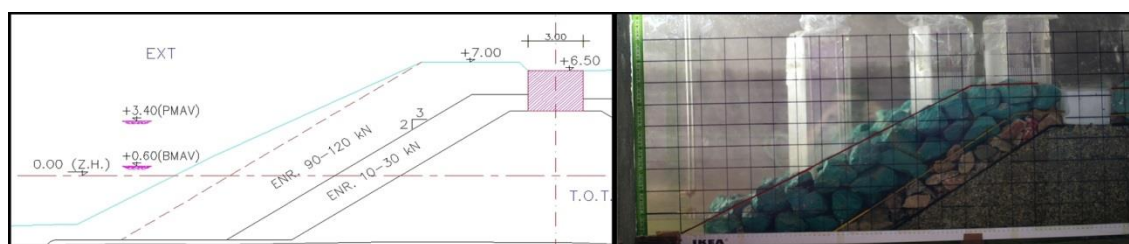


Figura 2. Perfil da secção de estudo à escala de protótipo (esquerda) e modelo à escala 1:30 (direita).

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 medido através de uma sonda de nível colocada num reservatório que capta o volume de água galgada e utilizando uma balança de plataforma. 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 apresenta dois instantes da interação 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 espraçamento (*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 espraçamento no quebra-mar até ao coroamento.

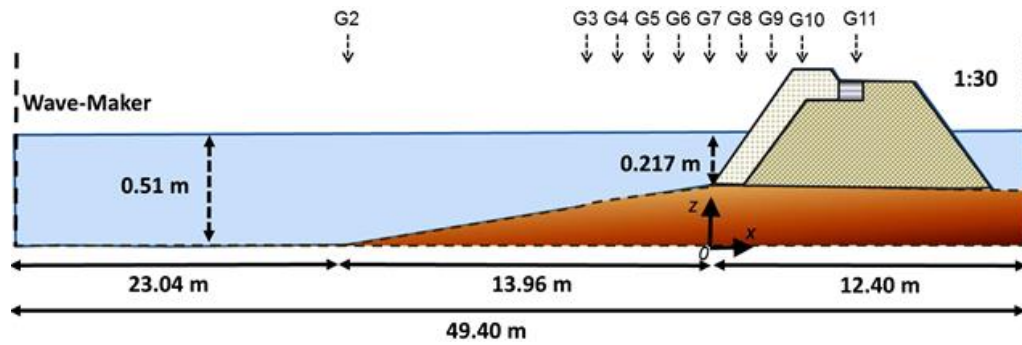


Figura 3. Perfil do canal de ondas dos testes em modelo físico.

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

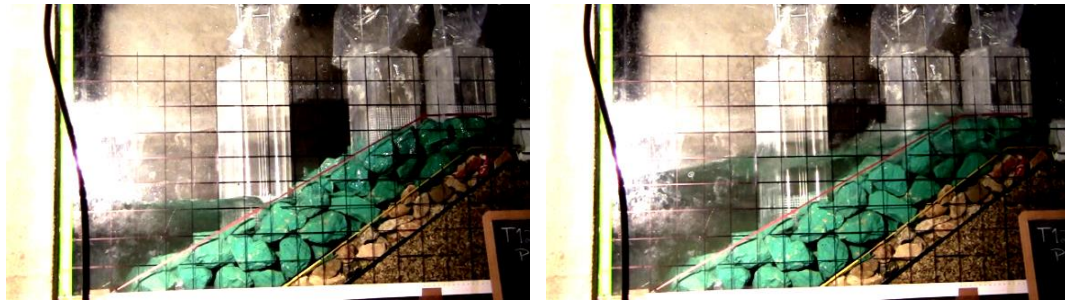


Figura 4. Dois instantes representativos da interação de uma onda regular ($T=2,19$ s e $H=0,083$ m) com o quebra-mar: refluxo (esquerda) e espraio (direita).

3.2 Caracterização das simulações numéricas

Foi criada uma malha de discretização de forma respeitar o mínimo de 10 elementos por altura de onda e 50 por comprimento de onda. A malha é constituída por elementos quadriláteros, mais densa na zona de propagação de onda, e elementos triangulares na zona do quebra-mar poroso devido à complexidade da geometria, com um total de 83892 elementos. A Fig. 5 apresenta a malha utilizada.

Foi utilizado o modelo porousWaveFoam e a simulação foi realizada para uma onda incidente regular, recorrendo à teoria de ondas Stokes de primeira ordem com um período de 12 s, uma altura de onda de 2,5 m, que corresponde a 2,191 s para o período de onda e 0,083 m de altura de onda para o modelo à escala 1:30. A profundidade de água no bater de 0,51 m e 0,217 m no pé do quebra-mar.

3.3 Resultados

3.3.1 Propagação de ondas sem quebra-mar

Numa primeira fase foram feitas simulações sem a presença do quebra-mar para avaliar a qualidade da propagação de ondas no domínio computacional. Na Fig. 6 compara-se a elevação da superfície de ondas regulares, na sonda G2, ao pé do declive suave, obtidas pelo código OpenFOAM®, com dados experimentais e resultados numéricos obtidos pelo código FLUENT® (Didier et al., 2013). Conclui-se que os dois modelos numéricos permitem modelar com precisão o movimento da superfície livre para a posição da solda G2, embora o modelo OpenFOAM® subestime ligeiramente a amplitude das cavas.

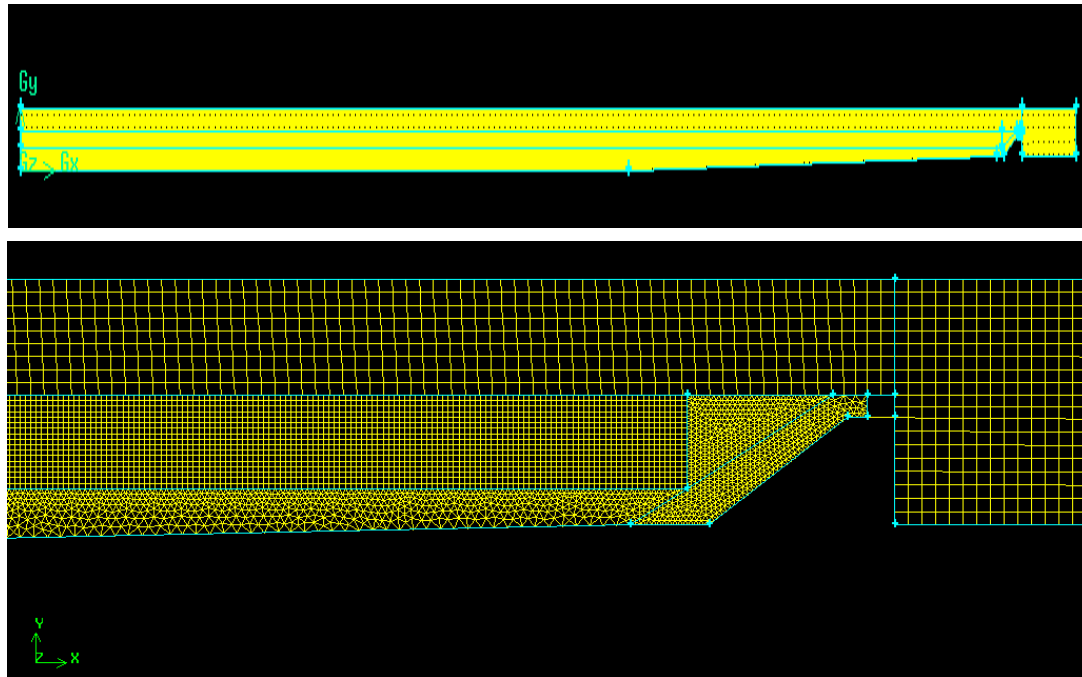


Figura 5. Malha de discretização utilizada na simulação: totalidade do domínio (cima) e pormenor da malha na proximidade do quebra-mar (baixo).

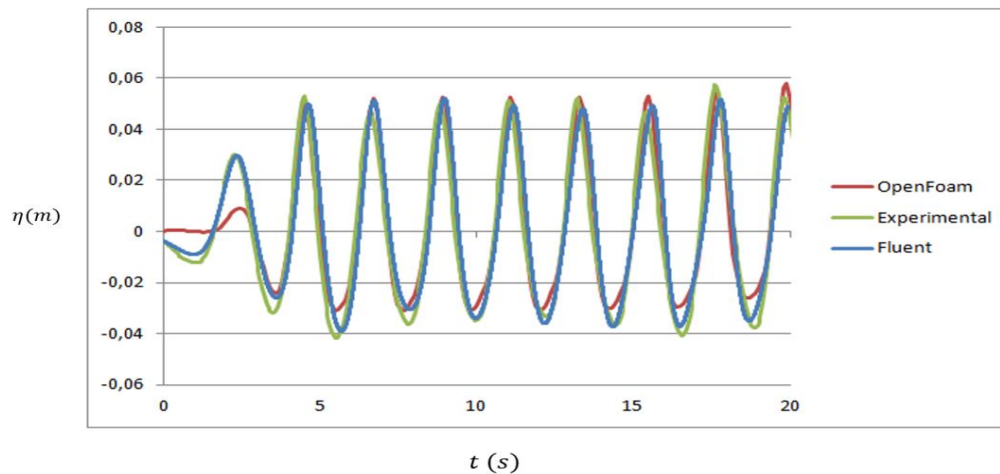


Figura 6. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G2 sem a presença do quebra-mar.

Foi efetuada uma análise estatística de modo a avaliar quantitativamente a diferença entre os resultados numéricos e os experimentais. Foi calculado o enviesamento, Eq. (5), o erro quadrático médio, Eq. (6), e o índice de concordância, Eq. (7).

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^l (y_i - x_i)}{n} \quad (5)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l |y_i - x_i|}{\sum_{i=1}^l (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (7)$$

Onde x_i são os valores experimentais, y_i os valores numéricos, \bar{x} é a média do valor experimental e l é o número de valores considerados. O parâmetro *bias* quantifica o afastamento dos resultados do modelo numérico em relação aos experimentais. O índice de concordância *ic* varia de zero a um, sendo o valor 1 correspondente à concordância perfeita entre os resultados numéricos e os experimentais.

Na tabela 2 estão os valores estatísticos obtidos, comparando assim os valores numéricos relativos ao OpenFoam® e ao FLUENT® (Didier et al., 2013).

Tabela 2. Dados estatísticos para a sonda G2.

	<i>bias</i>	<i>rmse</i>	<i>ic</i>
FLUENT®	$4,65 \times 10^{-4}$	$4,48 \times 10^{-3}$	99,3 %
OpenFoam®	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-2}$	98 %

Os valores estatísticos apresentados na tabela permitem confirmar que os resultados de ambos os modelos numéricos apresentam uma boa concordância global, relativamente aos dados experimentais, para a elevação da superfície livre.

3.3.2 Propagação de ondas e interação onda-quebra-mar

Apresentam-se nesta secção os resultados obtidos para a interação entre ondas incidentes regulares e o quebra-mar poroso. Na Fig. 7 apresenta-se a interação de uma onda com o quebra-mar nos ensaios experimentais e na simulação numérica, para instantes correspondentes. Pode-se verificar que, embora o andamento seja semelhante, o nível de água acima do enrocamento é subestimado pela modelação numérica.

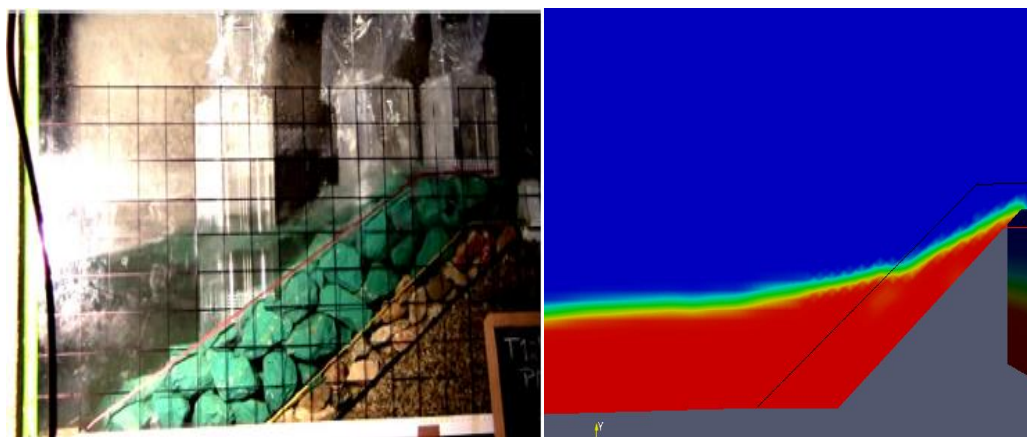


Figura 7. Interação de onda com estrutura porosa: modelo experimental (esquerda) e modelo numérico (direita).

As Fig. 8 a 12 apresentam os resultados da elevação da superfície livre, respetivamente, para as sondas nas posições antes (G6, G7) e dentro do quebra-mar poroso (G8, G9, G10).

O modelo numérico demonstra uma boa correspondência dos resultados com os dados experimentais, modelando muito bem o efeito da reflexão e da interação de onda com o quebra-mar.

Para as sondas a barlar do quebra-mar (G6 e G7) obteve-se resultados próximos dos experimentais. São observadas maiores discrepâncias nas sondas localizadas no quebra-mar (G8, G9 e G10). Estas discrepâncias devem-se sobretudo à colocação das sondas no interior do quebra-mar para a realização dos ensaios experimentais, o que não foi possível reproduzir exatamente no modelo numérico. Por outro lado, a simulação de um meio poroso homogêneo não reproduz os exatamente efeitos tridimensionais que ocorrem no enrocamento real.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se as simulações numéricas feitas utilizando o código OpenFOAM®, recorrendo ao solver porousWaveFoam, para simular a propagação de ondas regulares e a sua interação com um modelo de quebra-mar poroso.

Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente no LNEC para o modelo à escala 1:30. A comparação de resultados permitiu verificar o bom desempenho do código numérico para este tipo de aplicações costeiras. A elevação da superfície é bem estimada, quer a barlar, quer no meio poroso.

Conclui-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas e/ou ao próprio modelo de meio poroso.

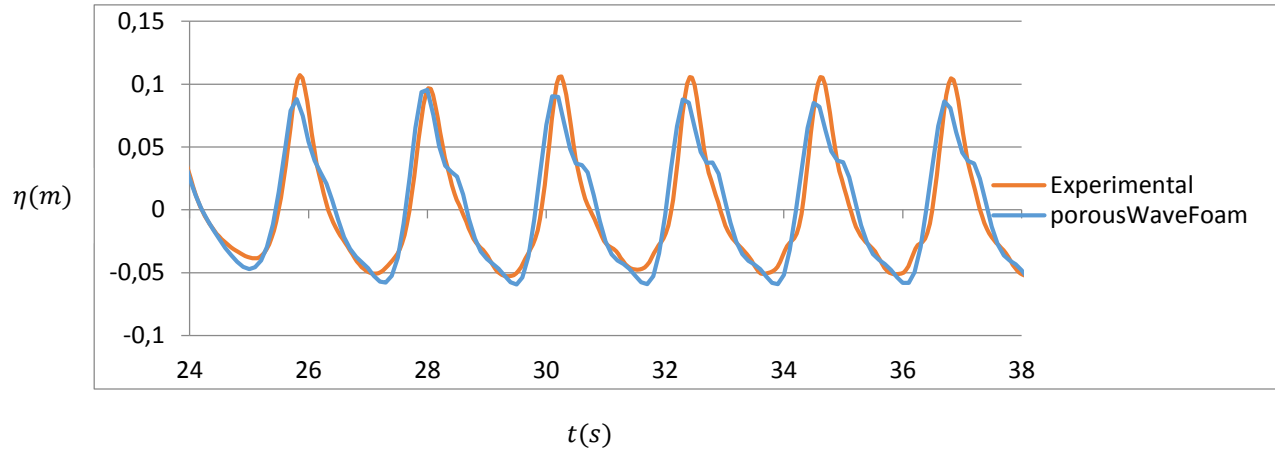


Figura 8. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G6.

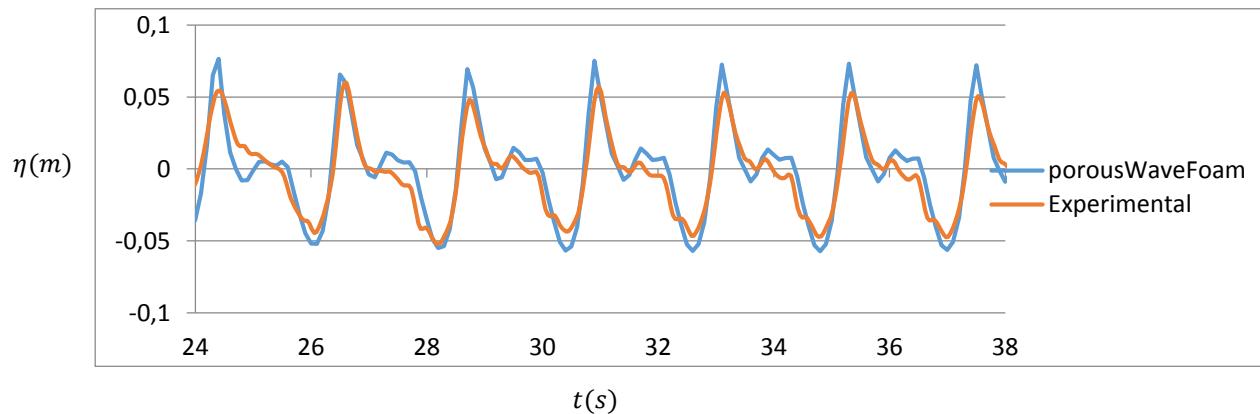


Figura 9. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G7.

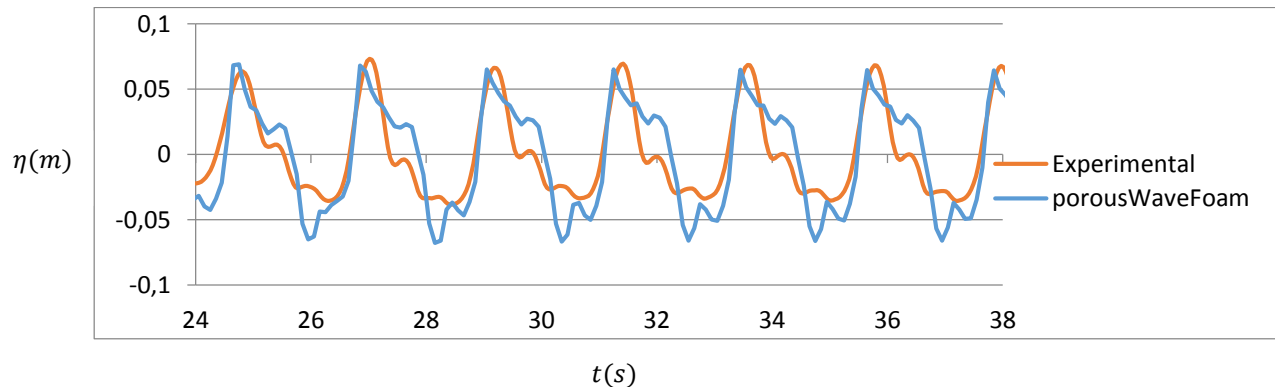


Figura 10. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G8.

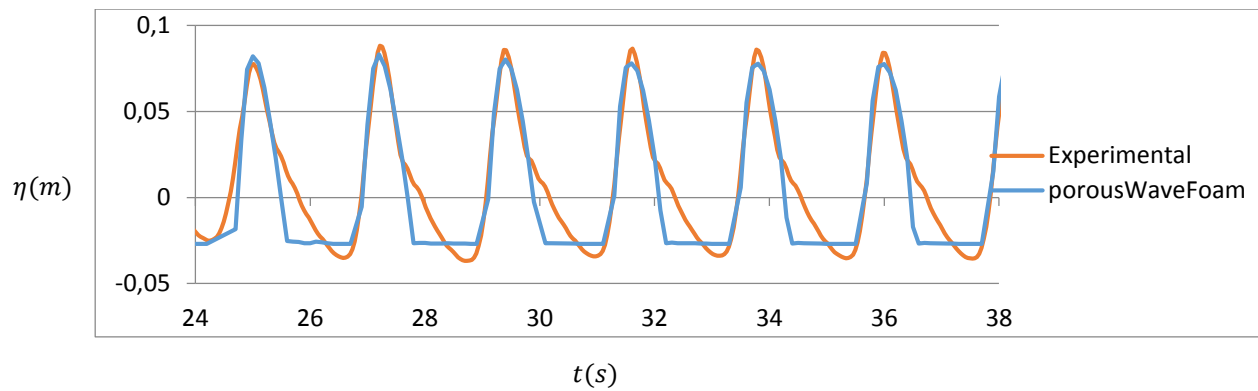


Figura 11. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G9.

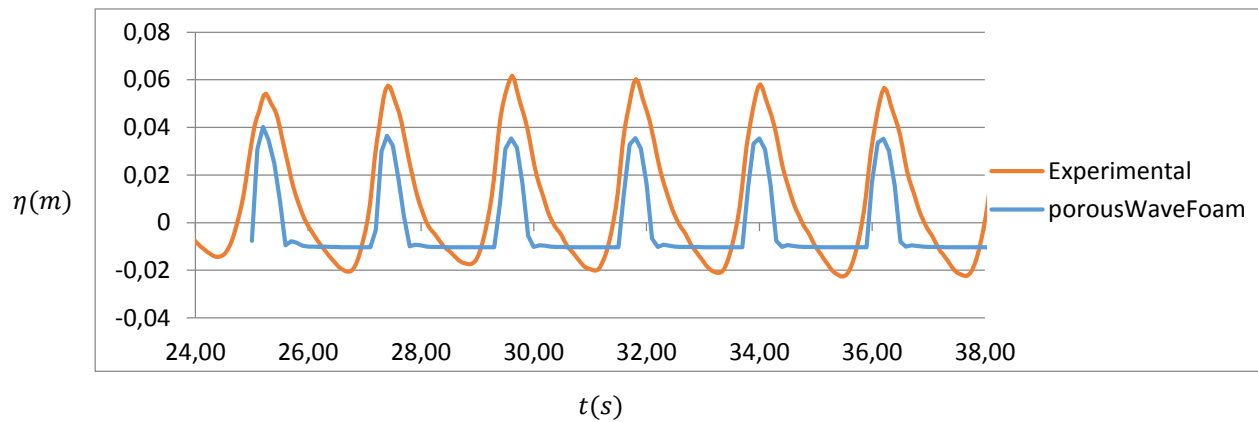


Figura 12. Resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre na sonda G10.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projeto DITOWEC - PTDC/ECM-HID/1719/2012.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Didier, E., Neves, D.R.C.B, Teixeira, P.R.F., Neves, M.G., Soares H., Viegas, M., 2013. “Coupling of FLUINCO mesh-based and SPH mesh-free numerical codes for the modelling of wave overtopping over a porous breakwater”, Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Lisboa, Portugal.
- Didier, E., Neves, D., Teixeira, P.R.F., Dias, J., Neves, M.G., 2014. “SPH numerical and physical modeling of wave overtopping a porous breakwater”, Proc 3rd IAHR European Congress, Porto, Portugal.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013. “Realistic wave generation and active wave adsorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®”, Coastal Engineering, Vol. 71, pp.102-118.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J., 2012. “A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®”, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 70, pp. 1073-1088.
- Jensen, B., Jacobsen, N.G., Christensen, E.D., 2014. “Investigation on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures”, Coastal Engineering, Vol. 84, pp. 56-72.
- OpenFOAM, 2013. OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox User Guide. Version 2.2.1.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste artigo.