

## Aplicação do modelo SPHyCE a estruturas porosas: Quebra-mar Oeste do porto de Albufeira

Diogo R. C. B. Neves

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443904, dneves@lnec.pt*

Eric Didier

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443904, edidier@lnec.pt*

Maria da Graça Neves

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443904, gneves@lnec.pt*

### RESUMO

Apresentam-se neste artigo os principais desenvolvimentos realizados no modelo numérico SPHyCE, baseado no método SPH (*Smoothed particle hydrodynamics*), desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com vista à aplicação específica deste modelo a estudos de engenharia costeira. Este trabalho teve como objetivo o estudo e validação do modelo na interação onda-estrutura para estruturas porosas. Para tal foram realizados ensaios experimentais em canal de ondas para uma secção específica do quebra-mar oeste do porto de Albufeira, no Algarve. Foram simuladas 5 configurações diferentes da camada porosa do quebra-mar com o modelo SPH, de forma a estudar qual o caso que se adapta melhor aos resultados dos ensaios experimentais. A comparação dos resultados numéricos com os experimentais possibilita a validação do modelo SPHyCE e a análise de sensibilidade dos resultados com a distribuição e configuração dos blocos do manto poroso.

**Palavras-chave** – Modelação numérica, SPH, canal de ondas, modelação física, quebra-mar poroso.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas marítimas têm como objetivo a criação de áreas abrigadas e a protecção e prevenção de problemas costeiros devidos à acção das ondas. No seu dimensionamento, torna-se necessário o estudo da resposta das estruturas à acção da agitação de forma a assegurar a sua estabilidade e funcionalidade.

A interacção onda-estrutura é capaz de gerar fenómenos fisicamente complexos que envolvem processos fortemente não lineares, como o espraçamento, a rebentação e o galgamento. Estes processos apresentam características diferentes de acordo com as características das estruturas e das ondas. O presente trabalho incide sobretudo no caso das estruturas porosas, compostas por blocos de enrocamento com maior ou menor porosidade de acordo com a necessidade de reflectir ou dissipar a energia das ondas incidentes.

Os modelos numéricos têm vindo a desenvolver-se no sentido de aproximar os cenários simulados às condições físicas observadas. A modelação numérica da interacção onda-estrutura é um desafio devido à forte não-linearidade dos processos envolvidos. Actualmente, apenas alguns modelos numéricos permitem simular os fenómenos complexos que envolvem o cálculo de forças em estruturas e a simulação da interacção das ondas marítimas com estruturas porosas.

Recentemente, têm emergido modelos baseados em métodos Lagrangeanos, como é o caso da abordagem SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*). Este é um método baseado nas equações de Navier-Stokes e completamente livre de malha computacional. Neste trabalho foi testado o modelo SPHyCE, baseado no modelo original SPHysics (SPHysics code v1.4., 2009) e desenvolvido no LNEC especificamente para estudos de interacção de ondas com estruturas costeiras.

Neste artigo é apresentado um estudo da aplicação do SPHyCE a uma estrutura costeira com o objectivo de estudar e validar o modelo na interacção onda-estrutura para meios porosos. Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto SPACE “*A Smoothed Particle Hydrodynamic model development and validation for coastal engineering applications*”, que tem como objetivo o desenvolvimento do modelo SPHyCE utilizando como caso de estudo o quebra-mar Oeste do porto de Albufeira. Para tal, foram realizados ensaios à escala 1:30 numa secção deste quebra-mar num canal de ondas das instalações experimentais do LNEC.

As simulações efectuadas com o modelo SPHyCE foram realizadas de modo a estudar diferentes configurações para a definição da camada porosa do quebra-mar. Estas diferentes abordagens na composição da camada ou camadas porosas do quebra-mar geram obrigatoriamente diferentes resultados de superfície livre e nível de água na estrutura. Os dados experimentais permitiram validar o modelo e definir a configuração adequada do manto poroso para simular a interacção onda-estrutura no quebra-mar Oeste do porto de Albufeira.

A próxima secção apresenta o modelo numérico SPHyCE e descreve as principais novidades implementadas no modelo, a secção 3 indica e explica as condições dos ensaios experimentais realizados no canal de ondas do LNEC, à escala 1:30. Seguidamente são apresentadas as simulações realizadas com o SPHyCE, o estudo de convergência dos resultados com a resolução e as comparações com os dados experimentais em termos de superfície livre, nível de água e galgamentos. Por fim são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 MODELO NUMERICO SPHyCE

Os métodos SPH foram inicialmente desenvolvidos para problemas de astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977) sendo mais tarde adaptados à hidrodinâmica (Monaghan, 1994). O método SPH baseia-se na formulação Lagrangiana das equações da Dinâmica dos Fluidos. Esta metodologia, na qual o fluido é considerado como constituído por volumes de água

assimilados como partículas, não necessita de malha e permite modelar as trajetórias das partículas. Esta particularidade permite modelar escoamentos complexos com superfície livre que envolvem a rebentação das ondas e o galgamento de estruturas.

## 2.1 PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DO MÉTODO SPH

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 o kernel de interpolação, ou seja, uma função analítica, e  $h$  determina a dimensão do suporte desta função, a qual limita a resolução do método. O parâmetro  $h$  é denominado de *smoothing length* e 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  $f$  associada à partícula  $a$  e à posição  $r_a$  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  $f$  associado à partícula  $b$  localizada em  $r_b$ ,  $W_{ab}=W(r_a-r_b, h)$  é o valor da função de interpolação na posição  $(r_a-r_b)$ ,  $m_b$  a massa e  $\rho_b$  a massa específica da partícula  $b$ . A Figura 1 apresenta um esquema da região de aplicação do kernel e da forma do kernel nesta região.

As derivadas da função  $f$  são calculadas analiticamente, simplesmente derivando o kernel, o que constitui uma das vantagens do método SPH. O kernel de interpolação é uma função analítica que pode ser diferenciada sem necessitar de uma malha espacial. Numericamente, o kernel é uma função com um suporte compacto dentro duma região determinada por um raio de  $2h$ , com  $h=0.92*20.5$  do, onde do é a separação inicial das partículas. A função de interpolação é máxima no seu centro, dando assim uma contribuição predominante à partícula  $a$ .

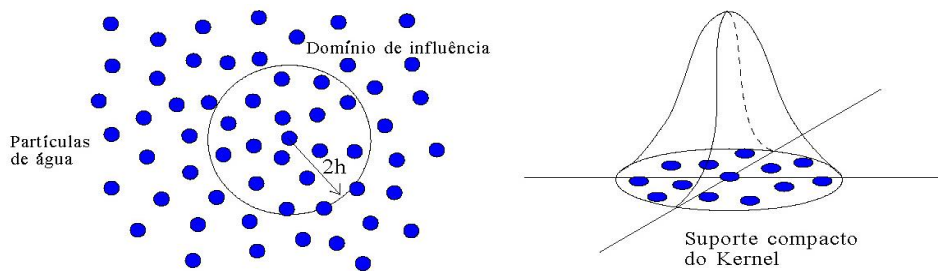


Figura 1 - Domínio de influência do kernel e esquema da variação típica do kernel na região de aplicação

## 2.2 EQUAÇÕES BIDIMENSIONAIS

As equações bidimensionais de Navier-Stokes na forma Lagrangiana para um fluido viscoso escrevem-se:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \Pi + g \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\text{div}(v) \quad (4)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\Pi$  representa os termos viscosos,  $g=(0, -9.81)$  m.s<sup>-2</sup> é a aceleração da gravidade,  $v$ ,  $P$  e  $\rho$  são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa específica.

Na formulação SPH Standard de Monaghan (1994), o fluido é considerado pouco compressível o que permite relacionar a pressão no fluido com a massa específica através da equação de estado (Batchelor, 1974) dada por:

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \text{ com } B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \quad (5)$$

sendo  $\gamma=7$ ,  $\rho_0$  a massa específica de referência e  $c_0$  a velocidade do som.

Finalmente, as trajectórias das partículas são calculadas de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{dr}{dt} = v \quad (6)$$

onde  $r$  é a posição da partícula.

### 2.3 MODELO NUMÉRICO SPHYCE

O modelo numérico SPHYCE é baseado no SPHysics code v1.4 (2009) e inspirado da formulação SPH proposta por Monaghan (1994). O modelo SPHYCE resulta de alterações e melhoramentos do modelo SPHysics com vista à resolução de problemas de engenharia costeira envolvendo escoamentos com superfície livre complexos.

No código SPHYCE, o kernel de interpolação *quadratic* (Johnson, 1996) é utilizado por ter a particularidade de não ter ponto de inflexão na sua primeira e segunda derivada no intervalo de definição da função e é definido pela função analítica dada por:

$$W(q,h) = \frac{3}{2\pi h^2} \left( \frac{q^2}{4} - q - 1 \right) \text{ para } 0 \leq q \leq 2 \quad (7)$$

onde  $q=(ra-rb)/h$ .

Nas equações SPH, a equação discreta de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{Dv_a}{Dt} = \sum_b m_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} + g \quad (8)$$

onde  $v_a$ ,  $P_a$  e  $\rho_a$  são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa específica de uma partícula a,  $P_b$ ,  $\rho_b$  e  $m_b$  são, respectivamente, a pressão, a massa específica e a massa de uma partícula b contida no suporte compacto do kernel,  $W_{ab}$  é um kernel de interpolação e  $\Pi_{ab}$  é o termo de viscosidade. Finalmente,  $\nabla_a W_{ab}$  é dado por:

$$\nabla_a W_{ab} = \nabla_a W(r_a - r_b) = \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a} i + \frac{\partial W_{ab}}{\partial y_a} j \quad (9)$$

onde  $i$  e  $j$  são os vectores unitários na direcção dos eixos coordenados e  $(x_a, y_a)$  são as coordenadas da partícula genérica a.

O modelo de turbulência SPS (*Sub-Particle-Scale model*) (Gotoh et al., 2001) é o utilizado, evitando-se assim o recurso a parâmetros empíricos necessários no caso do modelo de viscosidade artificial proposto por Monaghan (1992), que aparece como sendo um modelo que induz uma difusão numérica importante. O modelo SPS inclui o termo de viscosidade clássico (Morris et al., 1997) e os efeitos ligados à turbulência são modelados através de um modelo de tipo LES (*Large Eddy Simulation*). Este modelo permite obter bons resultados para a propagação das ondas, rebentação, galgamento e forças em estruturas (Didier et al., 2012a, 2013a).

A equação de conservação de massa na sua forma discreta é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (u_a - u_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (10)$$

As partículas movem-se de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{Dr_a}{Dt} = u_a \quad (11)$$

A partir da equação (5), a pressão pode ser calculada directamente a partir da massa específica:

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (12)$$

A integração no tempo é realizada utilizando o algoritmo predictor-corrector (Monaghan, 1989) com o passo de tempo controlado automaticamente, respeitando as condições de estabilidade definidas por Monaghan e Kos (1999).

As condições de fronteira não aparecem directamente no formalismo SPH. É utilizada uma condição de fronteira repulsiva que consiste em impor uma força de repulsão nas partículas que constituem a fronteira sólida do domínio computacional, assegurando assim a impermeabilidade das fronteiras do domínio computacional.

Quanto às condições iniciais, as partículas fluidas são colocadas numa determinada posição no espaço, que corresponde às coordenadas espaciais dos nós de uma malha cartesiana rectangular. Inicialmente o fluido está em repouso: a velocidade das partículas é nula e a pressão hidrostática.

O modelo numérico SPHyCE inclui algumas especificidades desenvolvidas para modelação dos fenómenos em estudos de engenharia costeira; estas são detalhadas a seguir.

A análise de sensibilidade dos resultados com o parâmetro  $\epsilon_{XSPH}$  da correcção XSPH (Monaghan, 1994) de movimento das partículas (eq. 11) demonstrou que aparecem instabilidades quando o valor clássico de 0.5 é utilizado (Didier e Neves, 2009). O valor  $\epsilon_{XSPH}=0$  é sempre adoptado nas aplicações do modelo.

A cinemática dos escoamentos em modelos SPH é geralmente realista. Contudo, quando se utiliza o modelo pouco compressível, as partículas exibem variações de pressão elevadas. Estas instabilidades de pressão podem ser resolvidas corrigindo a função kernel e aplicando o filtro de *Shepard* (Panizzo, 2004). Recalcula-se, assim, o valor da massa específica para cada partícula, geralmente a cada 30 iterações no tempo, valor classicamente utilizado na literatura. No entanto, no modelo SPHyCE a re-normalização da massa específica é aplicada de forma parcial, geralmente nas imediações da estrutura costeira onde se pretende calcular a pressão e a força. Com esta abordagem, a pressão é estabilizada sem prejudicar a correcta propagação das ondas no canal (Didier et al., 2013a).

A geração das ondas é efectuada através de um batedor do tipo pistão, utilizando um método de absorção activa das ondas reflectidas e de correcção da deriva da posição média do batedor. Esta técnica permite dispor de um canal semi-infinito (Didier e Neves, 2012).

O método SPH apresenta, tal como referido, um grande potencial na simulação de escoamentos complexos como os que ocorrem na interação onda-estrutura, tais como a rebentação e o galgamento, embora exija um elevado tempo de execução. Com o objectivo de reduzir o tempo CPU de cálculo do modelo numérico, foi implementada uma técnica de refinamento que consiste na divisão das partículas fluidas em 2, 3 ou 4 partículas ao longo do tempo de cálculo (Figura 2). Esta técnica permite executar o programa com uma resolução relativamente grosseira e com um tempo CPU relativamente curto para modelar a parte transiente do escoamento, *i.e.*, antes da estabilização da interação entre onda incidente e reflectida. Após estabilização, aplica-se a técnica de divisão das partículas fluidas em todo o domínio computacional, permitindo assim aumentar a resolução para obter resultados mais precisos. A técnica é evidentemente aplicada para estudos em canal de ondas semi-infinito, onde a parte relativa ao escoamento transiente não seja relevante para a análise dos resultados (Neves et al., 2013).

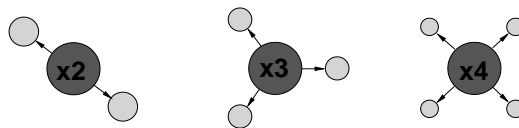


Figura 2 - Refinamento por divisão das partículas fluidas, em duas, três ou quatro partículas mais pequenas

Na mesma perspectiva de reduzir o tempo de cálculo e de poder incluir no modelo SPHyCE os efeitos decorrentes da propagação da onda (geração de harmónicas), foi implementada uma metodologia de acoplamento entre um modelo de propagação, de tipo *RANS* ou *Boussinesq*, e o modelo SPHyCE. Esta técnica permite reduzir significativamente o domínio computacional SPH, em cerca de um comprimento de onda, incluindo as alterações características da propagação de uma onda do largo até a costa (Didier et al., 2013b). A informação do modelo de propagação para o modelo SPH é transferida a partir da serie temporal de elevação de superfície livre obtida numa dada secção de acoplamento. A análise espectral permite obter o periodograma e determinar as amplitudes e fases de cada componente espectral relevante. Estes valores são utilizados para calcular o movimento do batedor pistão que gera a onda no canal SPH.

O modelo SPHyCE permite modelar os blocos das camadas do manto exterior de uma estrutura costeira porosa. A modelação directa destas camadas requer uma resolução suficientemente fina para uma correcta modelação do escoamento no interior deste meio poroso. A principal vantagem desta abordagem é que pode se calcular as forças exercidas em cada bloco ao longo do tempo. Todavia, esta abordagem exige considerar as camadas subjacentes impermeáveis e implica que os blocos do manto exterior estejam assentes sobre uma fronteira impermeável. Os blocos são igualmente simplificados e têm uma forma rectangular (Didier et al., 2012b). A Figura 3 apresenta um exemplo de aplicação o manto exterior é composto por duas camadas de blocos cúbicos.

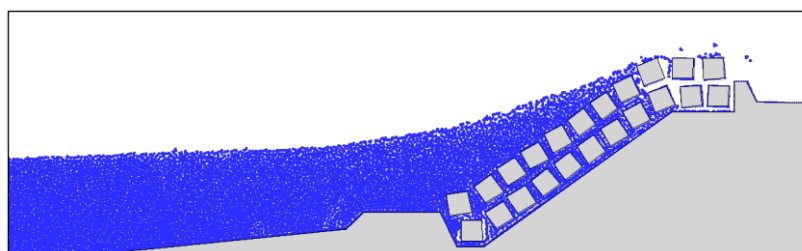


Figura 3 - Modelo do manto exterior de uma estrutura costeira

### 3 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais da propagação de onda e interação com o quebra-mar de Albufeira foram realizados num canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), à escala de 1:30. O canal de ondas apresenta um comprimento total de 49.4 m, uma largura constante de 1.6 m e uma altura de 1.2 m. Experimentalmente foi construído o fundo representativo da aproximação à secção estudada do quebra-mar Oeste do porto de Albufeira (Figura 4), caracterizado por uma zona horizontal de 23.04 m e uma rampa de 13.96 m com declive 2.1% até à estrutura. O pé do quebra-mar ficou localizado a 37.0 m do gerador de ondas, constituído por um batedor do tipo pistão. O nível de água junto ao batedor foi mantido constante e igual a 0.51 m, o que corresponde a 0.217 m no pé da estrutura, representando, no protótipo, um nível de maré de +3.5 m (ZH). A Figura 4 mostra o perfil longitudinal do canal ao longo de todo a seu comprimento.

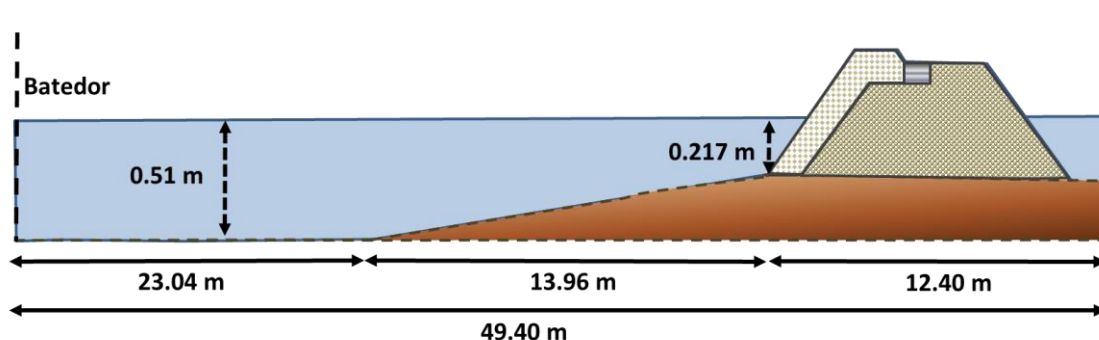


Figura 4 – Perfil esquemático do canal de ondas dos ensaios experimentais (escala 1:30)

A estrutura modelada no canal, representativa de uma secção do quebra-mar Oeste do porto de Albufeira, 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 Figura 5 mostra o perfil transversal da secção modelada.

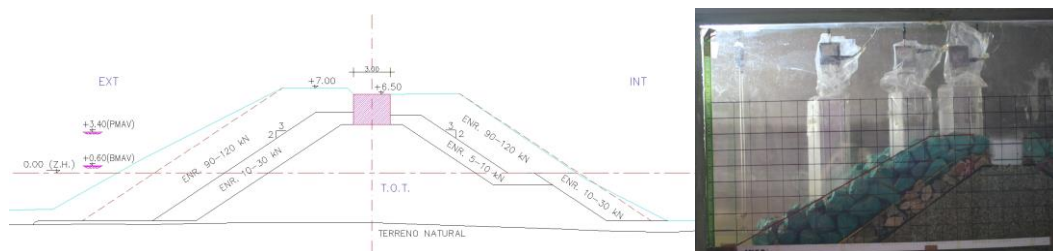


Figura 5 – Vista transversal da secção em estudo do quebra-mar e da estrutura no canal de ondas

Nos ensaios foram testadas ondas regulares para um nível de maré (+3.5 m de ZH), variando a altura de onda ( $H$ ) e o período ( $T$ ). Foram colocadas, ao longo do canal, 10 sondas resistivas para medir a elevação da superfície livre em 10 posições ao longo do canal, tanto a barlamar da estrutura como no interior da estrutura e no seu coroamento (Figura 6).

A Tabela 1 indica a posição, no canal, das sondas de nível G2 a G11, considerando o referencial  $Ox_z$  no pé da estrutura (Figura 6). A sonda G2, localizada no início da rampa, foi colocada com a função de controlar a onda que era gerada pelo batedor. As sondas G3 a G7

permitiram obter as séries temporais da elevação da superfície livre a barlar da estrutura. Na sonda G8 à sonda G10, localizados no interior da estrutura, foram medidos valores de nível de água no interior da estrutura porosa. Por fim a sonda G11 foi colocada no coroamento da estrutura, numa zona impermeável, para a medição do nível de água que passa sobre o passadiço central do quebra-mar. O volume galgado foi também medido através de uma sonda de nível colocada num reservatório que capta o volume de água galgada.

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

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

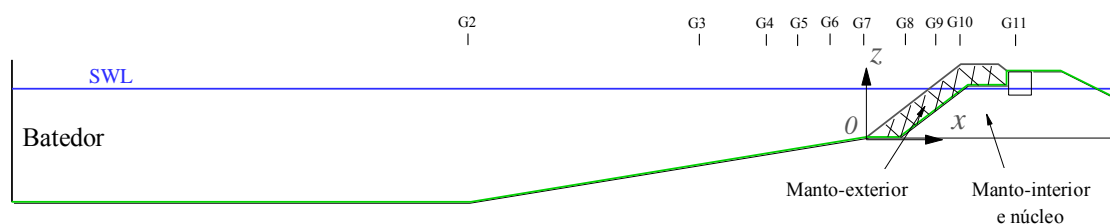


Figura 6 – Perfil do canal e do quebra-mar dos ensaios experimentais – Posição das sondas

A Figura 7 mostra dois instantes da interação da onda com a estrutura nos ensaios experimentais, para  $T=12$  s e  $H=2.5$  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).

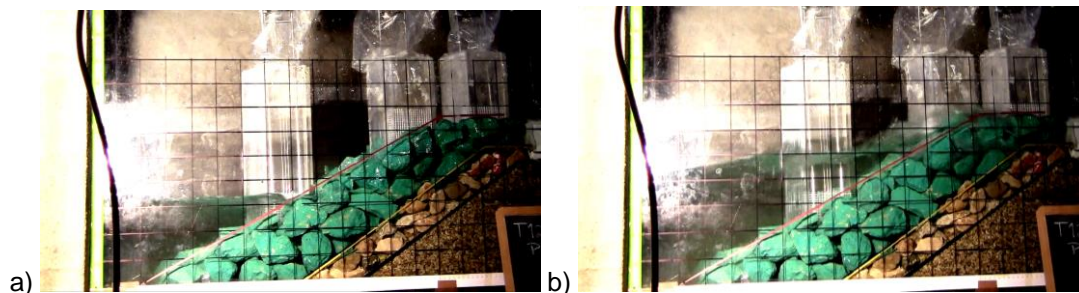


Figura 7 – Dois instantes representativos da interação de uma onda regular ( $T = 12$  s e  $H = 2.5$  m) com a estrutura modelada: (a) refluxo (*run-down*); (b) espraiamento (*run-up*).

#### 4 RESULTADOS

Como foi referido anteriormente, este trabalho pretende estudar o comportamento do modelo SPHyCE na simulação da interação onda-estrutura, considerando uma estrutura porosa como a que foi modelada experimentalmente para representar à escala uma secção do quebra-mar Oeste do porto de Albufeira.

A estrutura modelada no SPHyCE apresenta as mesmas características que nos ensaios experimentais. A onda testada foi a onda incidente regular gerada nos ensaios em modelo físico, com  $T = 12$  s e  $H = 2.5$  m.



Para tomar em conta a transformação da onda ao longo da sua propagação no canal, quer na parte de fundo horizontal quer na de declive suave, utilizou-se a metodologia de acoplamento descrita em Didier et al. (2013). O acoplamento é realizado na sonda G5, onde uma análise de harmónicas da série temporal da elevação de superfície livre permite definir o periodograma, i.e. a amplitude e a fase das várias harmónicas do espectro. Como o método de acoplamento funciona para uma onda incidente, ou seja, sem a influência da onda reflectida, esta análise é realizada a partir de ensaios sem a estrutura no canal. Todas as outras características dos ensaios são as mesmas que as dos ensaios realizados com a estrutura. Com esta metodologia, a onda gerada no domínio do modelo SPHyCE é semelhante à onda incidente, integrando as componentes harmónicas relevantes. Tal como foi referido, o acoplamento é feito na sonda G5 que corresponde, no modelo SPHyCE, à posição inicial do batedor. O domínio computacional é, assim, reduzido a uma dimensão inferior a um comprimento de onda, o que permite limitar a eventual difusão numérica e reduzir o tempo CPU.

Para a correcta modelação do escoamento no meio poroso é necessário implementar no modelo SPHyCE uma resolução das fronteiras sólidas do domínio computacional mais fina que a resolução no meio fluido. Esta técnica aumenta a impermeabilidade das fronteiras porosas e permite estabilizar o movimento das partículas fluidas nas proximidades das fronteiras solidas (Neves et al., 2013).

A análise dos resultados do modelo SPHyCE para estruturas costeiras porosas é dividida em duas partes:

- (i) Estudo de convergência dos resultados com a resolução (número de partículas), particularmente no meio poroso;
- (ii) Sensibilidade do modelo à distribuição dos blocos das camadas porosas: são consideradas 5 configurações diferentes mas com uma porosidade semelhante, de 42%.

A análise dos resultados foi realizada através da análise da elevação de superfície livre em diversos pontos do canal, do nível de água na zona da estrutura e do volume galgado. Os resultados foram comparados com os resultados experimentais.

Importa finalmente referir que, nos ensaios experimentais, não se registaram galgamentos, embora o nível de água atingisse o nível do coroamento do manto exterior. Os galgamentos resultantes das simulações numéricas com SPHyCE apresentam um caudal exíguo, podendo ser considerados equivalentes à situação de não galgamento registada nos ensaios experimentais.

#### **4.1 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA COM A RESOLUÇÃO**

O estudo de convergência foi realizado variando a resolução do domínio computacional, ou seja, a dimensão das partículas ( $d_0$ ). A Tabela 2 mostra as características das três resoluções usadas para verificar a independência da solução face à resolução do domínio computacional. Nesta tabela estão indicadas as dimensões das partículas ( $d_0$ ), o número total de partículas do domínio e o número de partículas entre os blocos da camada porosa.

A Figura 8 mostra o domínio computacional do SPHyCE e a camada porosa utilizada para o presente estudo de convergência com a resolução.

A Figura 9 mostra o volume galgado para as 3 resoluções utilizadas no estudo de convergência dos resultados com a resolução do domínio computacional (Tabela 2).

A Tabela 3 mostra o erro médio,  $E(Q)$ , entre as simulações menos refinadas (1 e 2) e a mais refinada (3), considerando a média do galgamento por onda obtida a partir das últimas 4 ondas. Verifica-se claramente uma convergência dos valores de galgamento nas duas simulações mais refinadas.

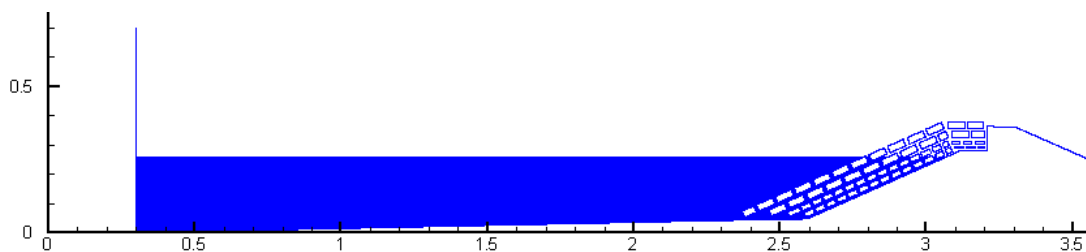


Figura 8 – Domínio computacional do SPHyCE – Camada porosa utilizada para o estudo de convergência com a resolução

Tabela 2 - Posição das sondas ao longo do canal de ondas

Caso	$d_o$ (m)	Nº de partículas	Nº de partículas entre blocos
<b>Resolução 1</b>	0.0022	131503	5
<b>Resolução 2</b>	0.0018	190976	6
<b>Resolução 3</b>	0.0015	284232	7

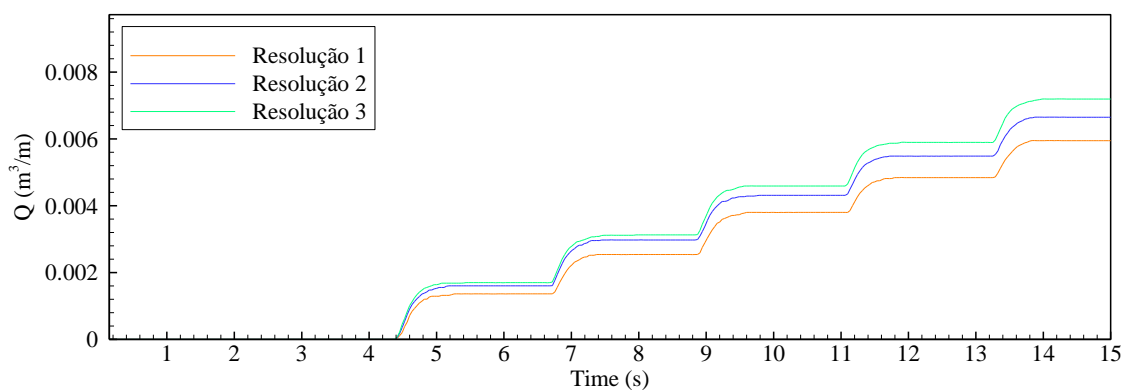


Figura 9 – Análise de convergência com a resolução – Volume galgado

Tabela 3 - Convergência – Erro médio em relação à simulação mais refinada

Caso	Nº de partículas	Média do volume galgado por onda ( $m^3/m$ )	Erro médio (%) $E(Q)$
<b>Resolução 1</b>	131503	0.00115	16.56
<b>Resolução 2</b>	202249	0.00126	8.19
<b>Resolução 3</b>	284232	0.00137	-

#### 4.2 ANÁLISE DA CAMADA POROSA DO SPHYCE

Como indicado anteriormente foram estudadas 5 configurações diferentes para a definição da camada porosa. Os resultados da superfície livre,  $\eta$ , e do nível de água,  $h$ , no interior do manto exterior são apresentados e comparados com os resultados experimentais nas sondas G6 a G10.

A Figura 10 apresenta as diferentes configurações testadas para a definição da camada porosa no SPHyCE. A Tabela 4 indica os nomes e as características dos casos em estudo.

Assim foram considerados 5 casos diferentes para definir a camada porosa no SPHyCE:

- (i) Casos com um manto definindo por duas camadas de blocos ordenados, grandes, A, e pequenos,  $A_{\text{pequenos}}$ , ou blocos grandes desordenados,  $A_{\text{desordenados}}$
- (ii) Um caso de 2 mantos com tamanhos de blocos diferentes ( $A_{\text{2 mantos}}$ ), cada um deles com duas camadas
- (iii) Um caso para uma estrutura completamente impermeável ( $A_{\text{impermeável}}$ ).

Importa referir que, excepto no caso impermeável, a porosidade foi de 42% para todas as configurações das camadas porosas (Neves *et al*, 2012).

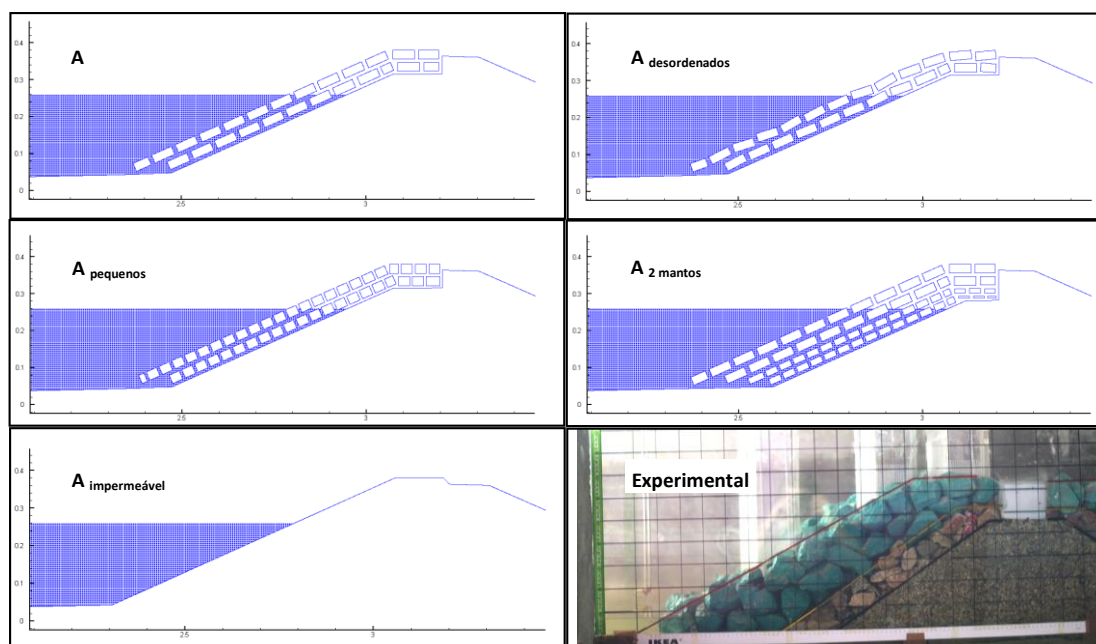


Figura 10 – Diferentes configurações para a camada porosa no SPHyCE e configuração experimental

Tabela 4 – Características das diferentes configurações para a camada porosa no SPHyCE

Caso	Nº de partículas	Configuração da camada porosa
A	190976	1 manto de blocos ordenados
$A_{\text{desordenados}}$	190992	1 manto de blocos desordenados
$A_{\text{pequenos}}$	193185	1 manto de blocos pequenos
$A_{\text{2 mantos}}$	202249	2 mantos de blocos ordenados
$A_{\text{impermeável}}$	177378	Estrutura impermeável

#### 4.2.1 ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE E NÍVEL DE ÁGUA NA CAMADA POROSA

As figuras abaixo (Figura 11 à Figura 35) mostram a comparação, entre os resultados numéricos e os dados experimentais para cada configuração da Tabela 4, da elevação da superfície livre  $\eta$ , obtida nas sondas G6 e G7 localizadas a barlar da estrutura e do nível de água,  $h$ , nas sondas G8 a G10, localizadas no interior do manto poroso do quebra-mar.

Apesar de não se apresentar neste artigo, foi verificado que a onda gerada no canal numérico do SPHyCE nas proximidades do batedor é muito similar à onda medida na sonda G5 nos ensaios em modelo físico.

Das figuras da elevação da superfície livre,  $\eta$ , e nível de água,  $h$ , verifica-se que os resultados são bastante similares para as diferentes configurações, à excepção do caso da estrutura impermeável, que mostra valores efectivamente diferentes dos outros casos.

Para as sondas G6 e G7 verifica-se, para as configurações de quebra-mar poroso, uma boa concordância entre os resultados numéricos e os dados experimentais, embora na sonda G6 a altura de onda prevista pelo modelo SPHyCE seja um pouco subestimada. Na sonda G7 a elevação de superfície livre está em muito boa concordância com os dados experimentais, indicando que o modelo numérico consegue simular correctamente a interacção complexa entre a onda incidente e a reflectida pela estrutura. Verifica-se também, comparando os resultados numéricos obtidos para o quebra-mar poroso e impermeável e os dados experimentais, que o modelo de camadas porosas utilizado no código SPHyCE permite simular correctamente a interacção entre a onda incidente, o meio poroso e a onda reflectida por este meio.

Para as sondas localizadas no interior da estrutura verifica-se, como esperado, melhores resultados para as várias configurações de quebra-mar poroso ficando o caso da estrutura impermeável muito longe dos valores experimentais.

No caso das sondas G8 e G9 verifica-se claramente a dinâmica das partículas de água no interior dos blocos, em que a superfície da água se encontra sobre a estrutura ou dentro da camada porosa. Na sonda G8 verifica-se uma muito boa concordância entre o modelo SPHyCE e os resultados experimentais. O nível de água no meio poroso é bem simulado pelo modelo numérico, particularmente para as configurações  $A_{\text{desordenados}}$  e  $A_{2 \text{ mantos}}$ . Na sonda G9, a concordância entre resultados numéricos e experimentais é ainda aceitável. Os resultados do nível de água medido e simulado no meio poroso são semelhantes. A altura da lâmina de água acima das camadas porosas é correctamente modelada pelo modelo numérico e o nível de água na camada porosa é da mesma ordem de grandeza das medições.

Para a sonda G10 os resultados são mais díspares entre o modelo SPHyCE e as medições. Verifica-se que nos ensaios a água penetra no interior do meio poroso e que não há lâmina de água acima das camadas porosas. Nenhuma das configurações de mantos porosos modeladas permite obter resultados concordantes com os experimentais, embora a configuração com dois mantos,  $A_{2 \text{ mantos}}$ , permita uma melhor previsão do nível de água na sonda na zona do meio poroso mais perto do pé da estrutura. Verifica-se ainda a existência, modelo numérico, de uma lâmina de água sobre as camadas porosas, que vai induzir a galgamento (não verificado nos ensaios).

As diferenças observadas entre modelo numérico e modelo físico podem ser devidas à falta de rugosidade dos blocos que modelam as camadas porosas no SPHyCE, ou até mesmo devido às condições experimentais (Figura 6), onde se verifica que a instalação das sondas neste local, que implica a colocação de caixas vazias dentro do meio poroso que podem afectar a propagação da lâmina de água sobre a camada porosa da estrutura. No modelo poroso implementado no SPHyCE não foi considerado o núcleo de T.O.T., o que pode também explicar as diferenças observadas, particularmente na sonda G10.

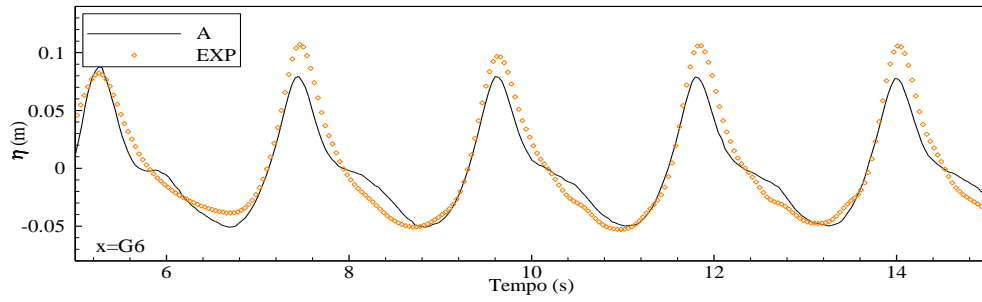


Figura 11 – Estrutura A – Superfície livre na sonda G6 e dados experimentais

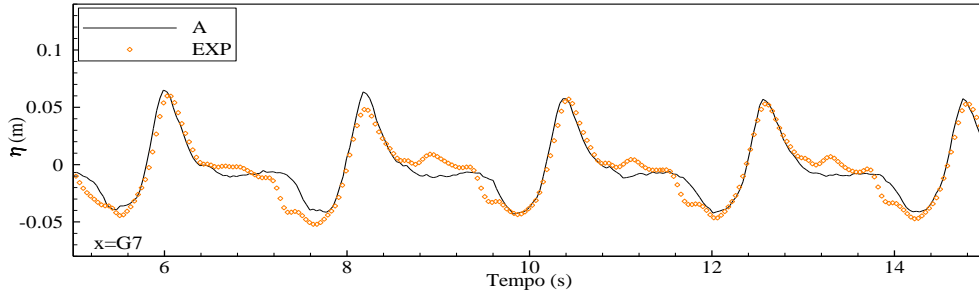


Figura 12 – Estrutura A – Superfície livre na sonda G7 e dados experimentais

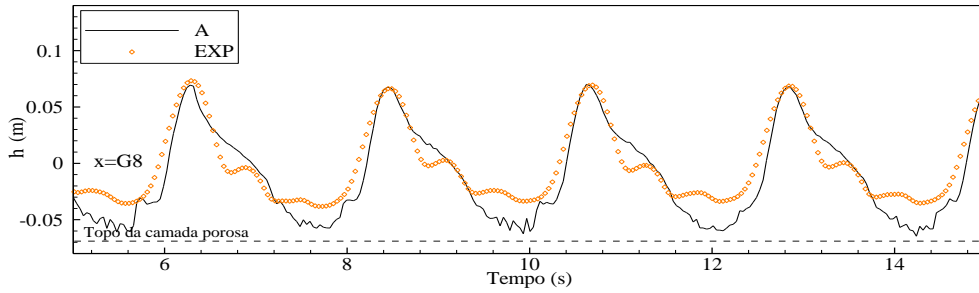


Figura 13 – Estrutura A - Nível de água na sonda G8 e dados experimentais

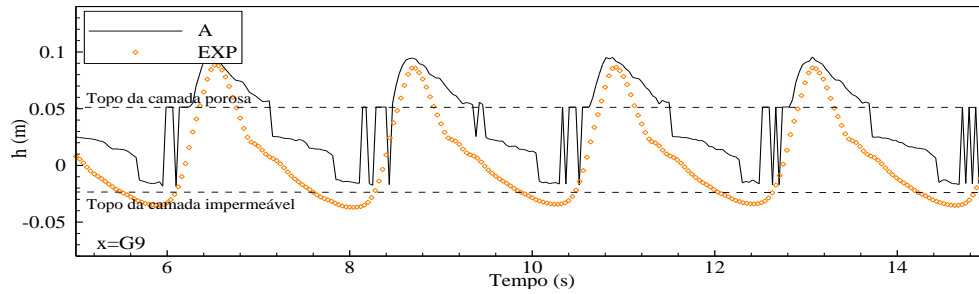


Figura 14 – Estrutura A - Nível de água na sonda G9 e dados experimentais

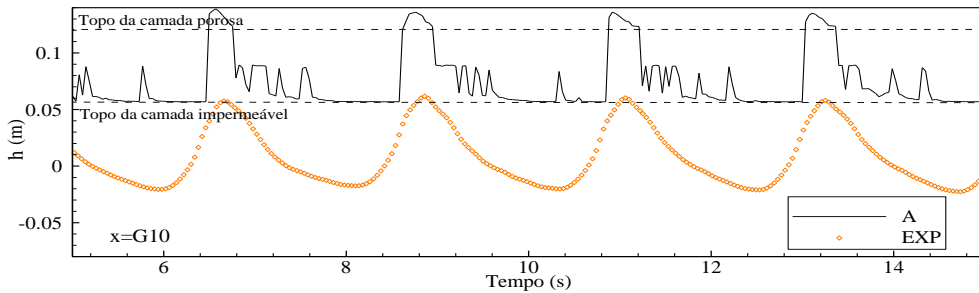


Figura 15 – Estrutura A - Nível de água na sonda G10 e dados experimentais

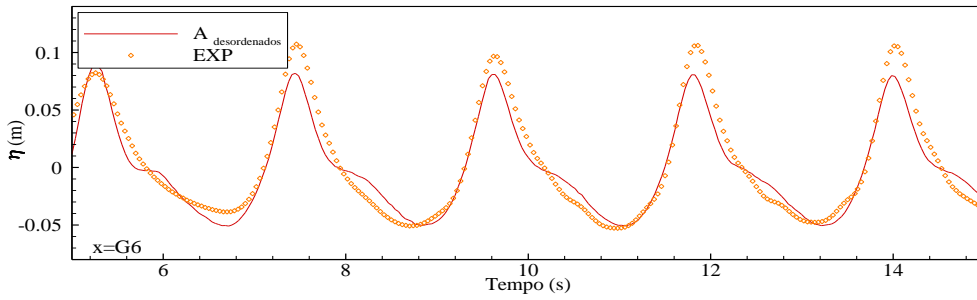


Figura 16 – Estrutura A<sub>desordenados</sub> – Superfície livre na sonda G6 e dados experimentais

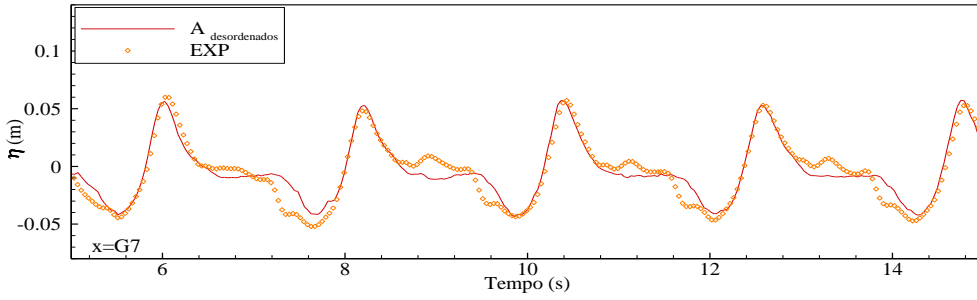


Figura 17 – Estrutura A<sub>desordenados</sub> – Superfície livre na sonda G7 e dados experimentais

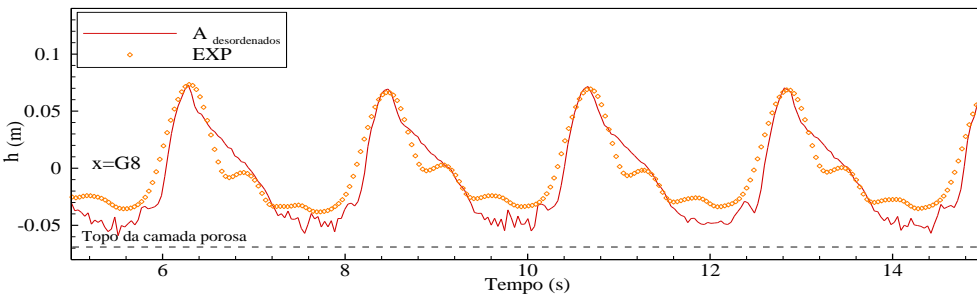


Figura 18 – Estrutura A<sub>desordenados</sub> - Nível de água na sonda G8 e dados experimentais

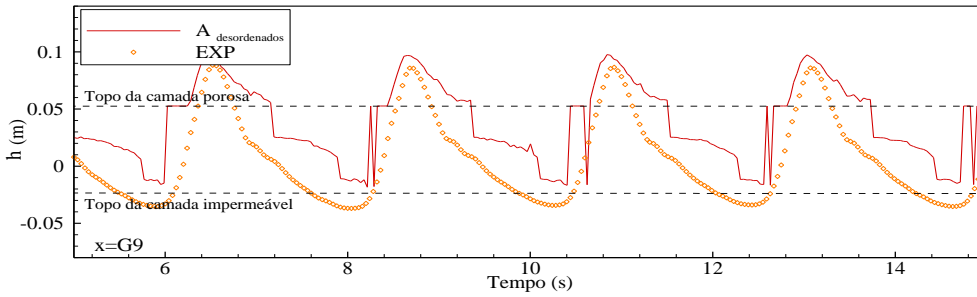


Figura 19 – Estrutura A<sub>desordenados</sub> - Nível de água na sonda G9 e dados experimentais

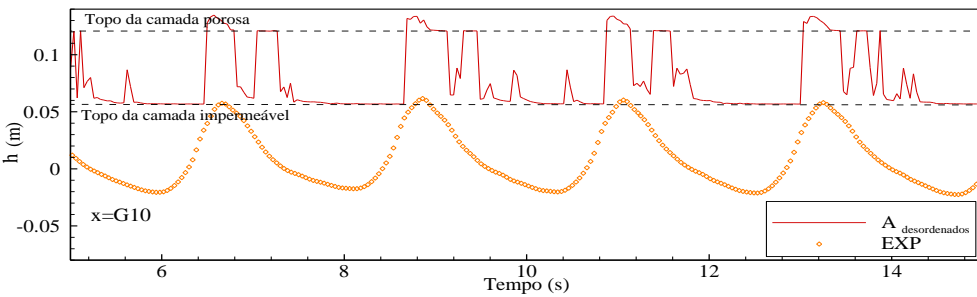


Figura 20 – Estrutura A<sub>desordenados</sub> - Nível de água na sonda G10 e dados experimentais

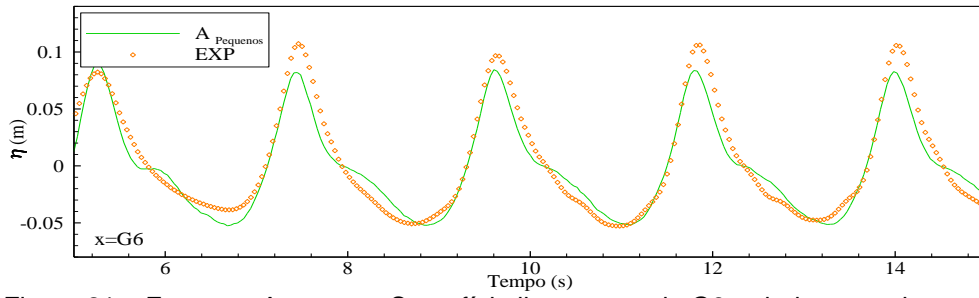


Figura 21 – Estrutura  $A_{\text{pequenos}}$  – Superfície livre na sonda G6 e dados experimentais

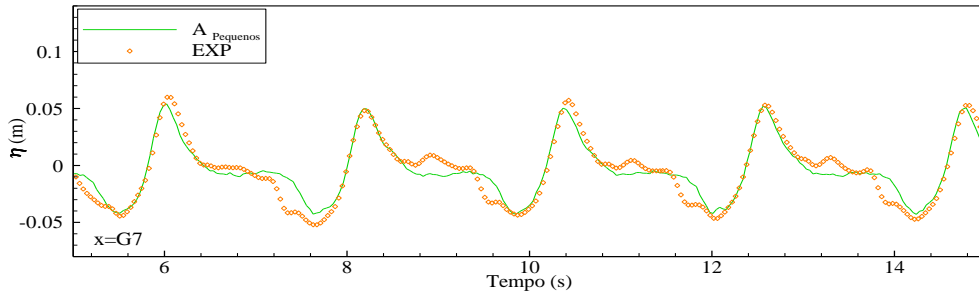


Figura 22 – Estrutura  $A_{\text{pequenos}}$  – Superfície livre na sonda G7 e dados experimentais

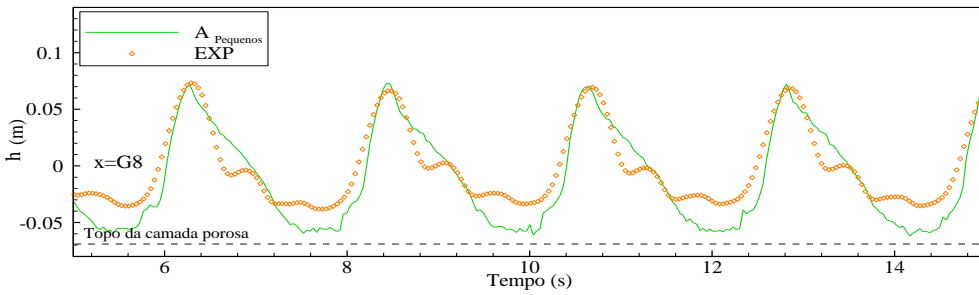


Figura 23 – Estrutura  $A_{\text{pequenos}}$  - Nível de água na sonda G8 e dados experimentais

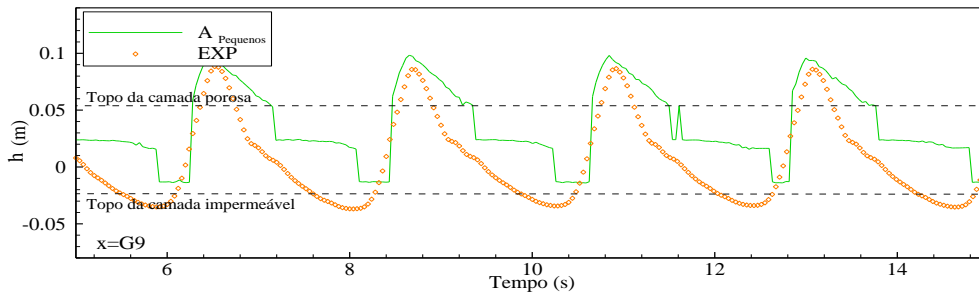


Figura 24 – Estrutura  $A_{\text{pequenos}}$  - Nível de água na sonda G9 e dados experimentais

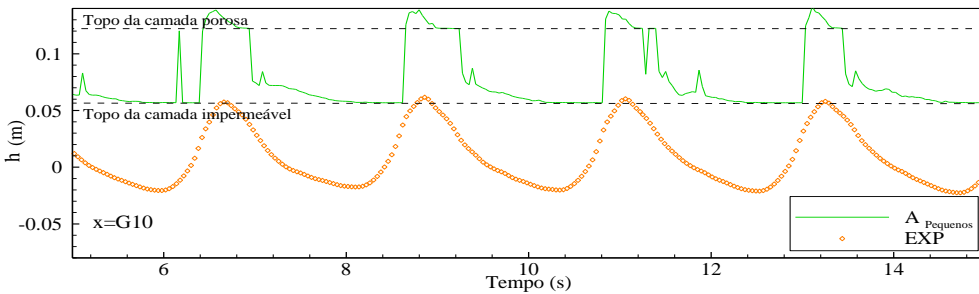


Figura 25 – Estrutura  $A_{\text{pequenos}}$  - Nível de água na sonda G10 e dados experimentais

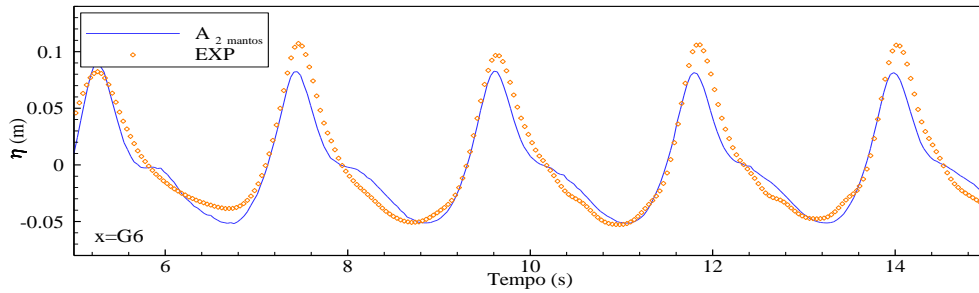


Figura 26 – Estrutura A<sub>2</sub> mantos – Superfície livre na sonda G6 e dados experimentais

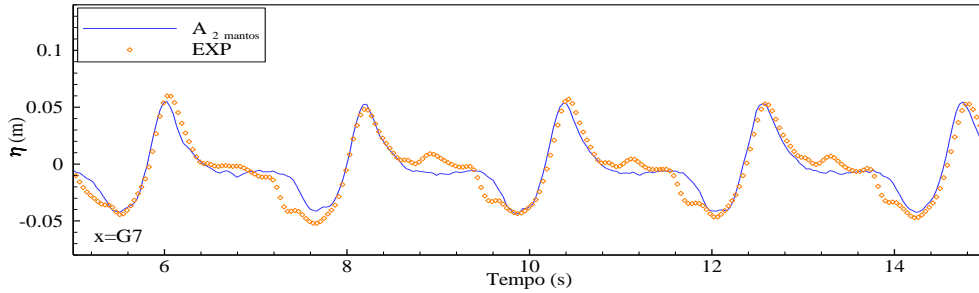


Figura 27 – Estrutura A<sub>2</sub> mantos – Superfície livre na sonda G7 e dados experimentais

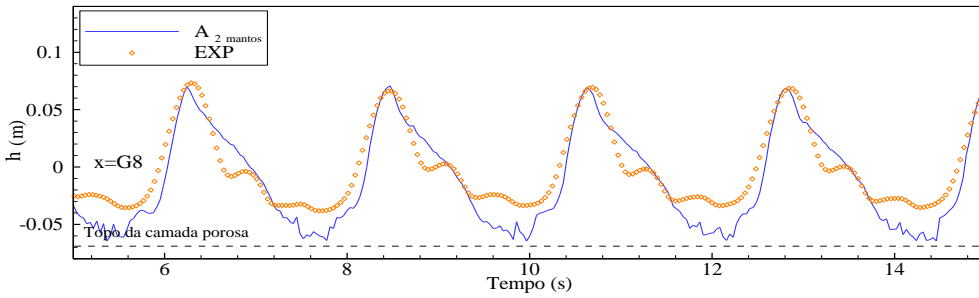


Figura 28 – Estrutura A<sub>2</sub> mantos - Nível de água na sonda G8 e dados experimentais

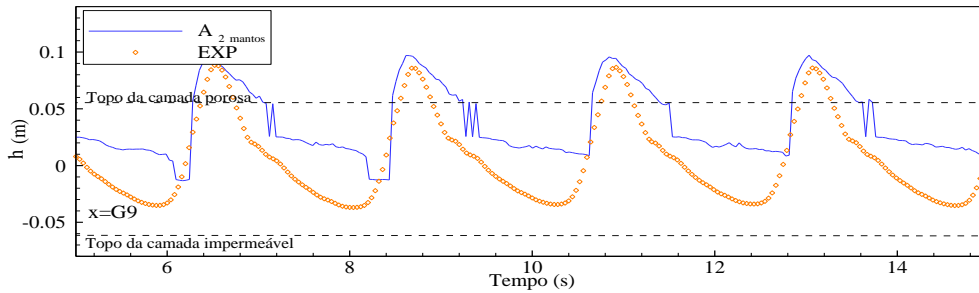


Figura 29 – Estrutura A<sub>2</sub> mantos - Nível de água na sonda G9 e dados experimentais

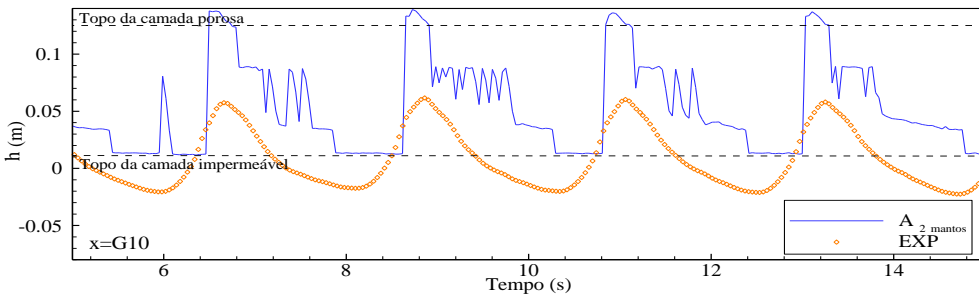


Figura 30 – Estrutura A<sub>2</sub> mantos - Nível de água na sonda G10 e dados experimentais



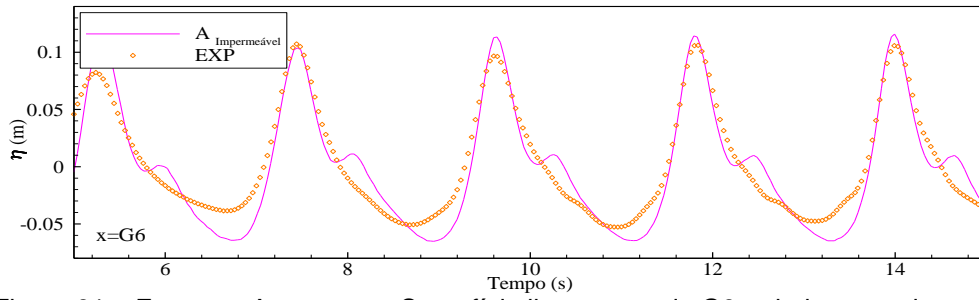


Figura 31 – Estrutura A impermeável – Superfície livre na sonda G6 e dados experimentais

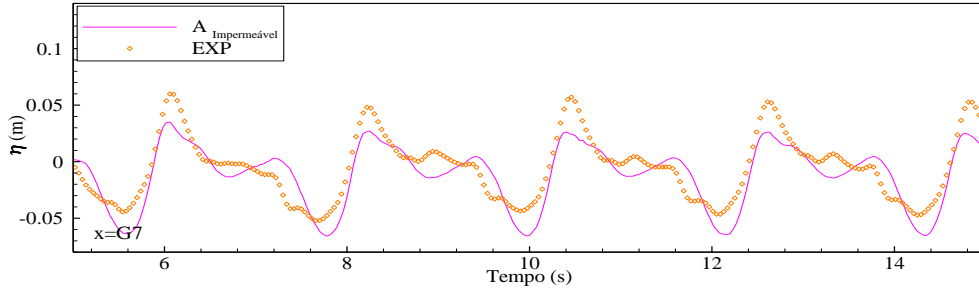


Figura 32 – Estrutura A impermeável – Superfície livre na sonda G7 e dados experimentais

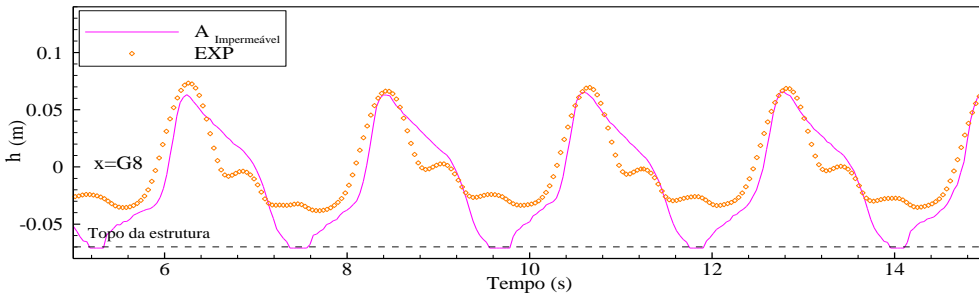


Figura 33 – Estrutura A impermeável - Nível de água na sonda G8 e dados experimentais

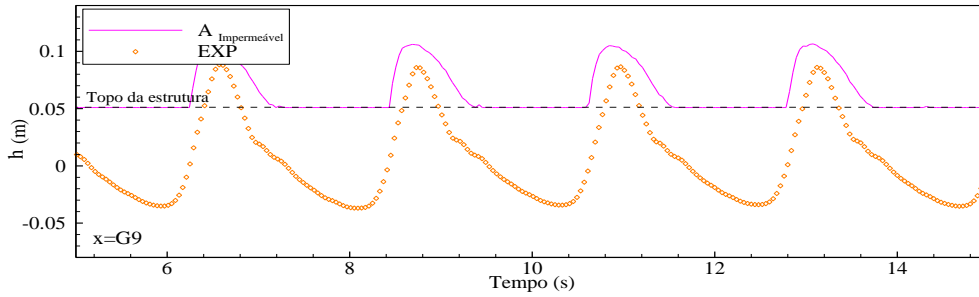


Figura 34 – Estrutura A impermeável - Nível de água na sonda G9 e dados experimentais

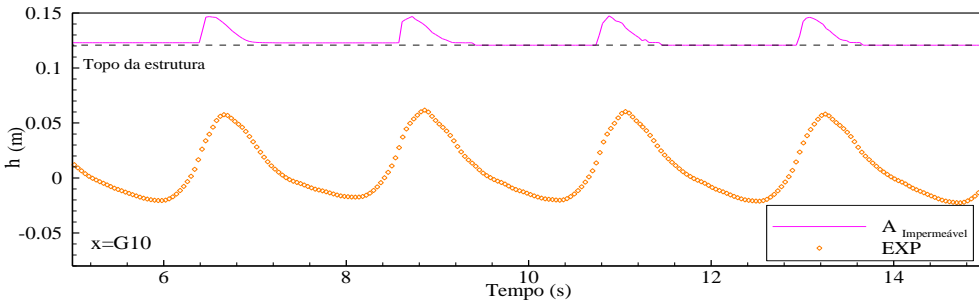


Figura 35 – Estrutura A impermeável - Nível de água na sonda G10 e dados experimentais

#### 4.2.2 GALGAMENTO

Nesta secção mostram-se os resultados do volume galgado para as simulações com as diferentes geometrias simuladas com o modelo SPHyCE (Figura 36 e Figura 37). Como referido, nos ensaios experimentais não se verificou galgamento da estrutura; contudo o nível de água atingiu o topo da estrutura, o que indica uma situação muito próxima da ocorrência de galgamento. A Tabela 4 mostra a média do volume galgado por onda obtido a partir das últimas 4 ondas para os 5 casos e o erro médio tendo como referência o caso de menor galgamento (mais próximo dos resultados experimentais).

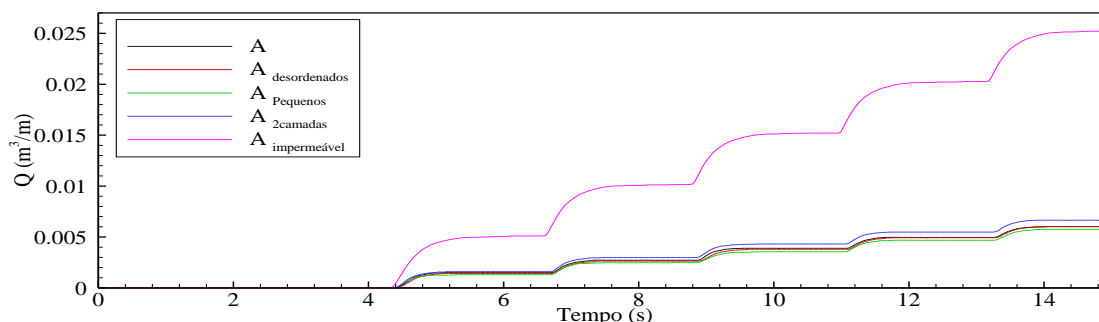


Figura 36 – Volume galgado para as configurações com camadas porosas e de estrutura impermeável

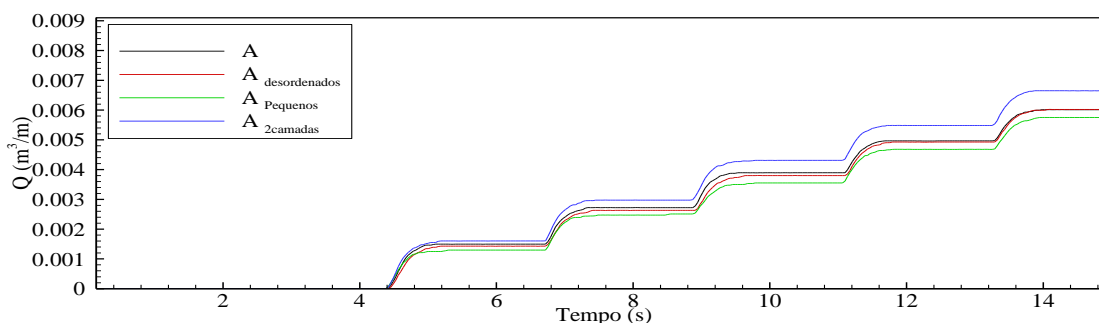


Figura 37 – Volume galgado para as quatro configurações com camadas porosas

Tabela 5 - Média do volume galgado por onda e erro médio tendo como referência o  $A_{\text{pequenos}}$

Caso	Volume galgado por onda ( $\text{m}^3/\text{m}$ )	Erro médio (%) $E(Q)$
<b>A</b>	0.00120	7.96
<b>A desordenados</b>	0.00115	3.12
<b>A pequenos</b>	0.00111	-
<b>A 2 mantos</b>	0.00126	13.25
<b>A impermeável</b>	0.00503	351.68

Como se verifica pelos resultados apresentados, a simulação representada por um manto com duas camadas de blocos pequenos ( $A_{\text{pequenos}}$ ) é a que apresenta um galgamento menor, ou seja, mais próximo dos resultados experimentais. Naturalmente a configuração que representa um quebra-mar impermeável é a que apresenta um galgamento maior, com uma variação de 351.68% relativamente à solução de menor galgamento. Em média, o volume galgado obtido para o quebra-mar impermeável e para o poroso corresponde a um número de partículas de 1550 e 340, respectivamente. A diferença de galgamento entre a configuração  $A_{\text{pequenos}}$  e  $A_{\text{2 mantos}}$ , por exemplo, embora apresente um erro de 13.25%, é bastante reduzida,

visto representar, em média, apenas 45 partículas por onda. O facto de considerar dois mantos, cada um com duas camadas porosas, em vez de um manto e de considerar blocos maiores ou mais pequenos não tem uma influência significativa no galgamento.

## 5 CONCLUSÕES

Neste artigo estudou-se a aplicação do modelo numérico SPHyCE, desenvolvido no LNEC, para a simulação da interacção onda-estrutura, considerando uma estrutura composta por um meio poroso. Os resultados foram comparados com ensaios experimentais bidimensionais, à escala 1:30, de uma secção do quebra-mar Oeste do porto de Albufeira.

Foi realizado um estudo de convergência dos resultados com a resolução do domínio computacional considerando uma estrutura porosa, que demonstrou a importância da resolução no meio poroso.

Foram testadas, no modelo SPHyCE, 4 configurações diferentes para o modelo das camadas porosas, com um ou dois mantos, cada um com duas camadas porosas e uma configuração de quebra-mar totalmente impermeável.

Os melhores resultados, comparativamente com os dados experimentais, para a elevação da superfície livre e nível de água foram naturalmente os das simulações com camadas porosas. Em termos de galgamento, a configuração de camada porosa que melhor se aproximou dos dados experimentais foi a do quebra-mar modelado por um manto poroso com duas camadas de blocos pequenos. Esta configuração favorece o escoamento de água no meio poroso na direcção vertical, entre a parte exterior do meio poroso e o interior do talude, ou seja, entre as camadas porosas.

Neste trabalho foram realizadas análises dos resultados do modelo e comparações com os dados experimentais, possibilitando a validação do modelo numérico e a análise de sensibilidade dos resultados com a distribuição e configuração dos blocos do manto poroso.

Foi também aplicada a mais recente funcionalidade do modelo, que permite a divisão das partículas sólidas da fronteira e previne o atravessamento das partículas fluidas nas fronteiras sólidas, estabilizando o escoamento nas proximidades destas fronteiras e entre os blocos das camadas porosas.

O presente estudo permitiu verificar que a definição de camadas porosas com blocos individualizados no SPHyCE é uma opção interessante e fundamental para os estudos de interacção de ondas com estruturas porosas. As características da onda consideradas no presente estudo correspondem a um caso de galgamento pequeno, para o qual o modelo numérico SPHyCE atinge o seu limite de desempenho. Futuramente está prevista a simulação de ondas de altura maior e, conseqüentemente, com galgamentos maiores, para criar condições mais compatíveis com as capacidades do modelo SPHyCE.

## 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.

## BIBLIOGRAFIA

- Batchelor G.K., 1974, *Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, UK.
- Didier E., Neves M.G., 2009, Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure, *4th International SPHERIC workshop*, pp. 357-364, Nantes, França.

- Didier E., Neves M.G., 2012, A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics. *IJOPE - International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 22(3), pp. 193-199.
- Didier E., Neves D.C.B., Martins R., Neves M.G., 2012a, Modelling of an impermeable breakwater: comparison between SPH numerical model and physical model, *RETERM*, Vol. 11(1-2), pp. 68-76.
- Didier E., Neves M.G., Reis M.T., 2012b, Determinação do caudal galgado numa estrutura porosa utilizando um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics. Proc. *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, Portugal, pp. 127-130.
- Didier E., Martins R., Neves M.G., 2013a, Numerical and experimental modeling of regular wave interacting with a composite breakwater. *International Journal of Offshore and Polar Engineering - IJOPE*, Vol. 23(1), pp. 46-54.
- Didier E., Neves D.R.C.B, Teixeira P.R.F., Neves M.G., Soares H., Viegas M., 2013b, 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.
- Gingold R.A., Monaghan J.J., 1977, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375-389.
- Gotoh H., Shibahara T., Sakai T., 2001. Sub-particle-scale turbulence model for the MPS method-Lagrangian flow model for hydraulic engineering. *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol. 9(4), pp. 339-347.
- Johnson G., Stryk R., Beissel S., 1996, SPH for high velocity impact calculations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, 347-373.
- Monaghan J.J., 1989, On the problem of penetration in particle methods, *Journal Computational Physics*, Vol. 82, pp. 1-15.
- 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.
- Monaghan J.J., Kos A., 1999, Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 125, pp. 145-154.
- Morris J.P., Fox P.J., Shu Y., 1997, Modeling lower Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of Computational Physics*, Vol. 136, pp. 214-226.
- Neves, D.R.C.B.; Didier, E.; Reis, M.T.; Neves M.G. (2012). "Overtopping of a porous structure using a Smoothed Particle Hydrodynamics Numerical Model". Coastlab12, Ghent, Belgium
- Neves D.R.C.B, Didier E., Teixeira P.R.F, Neves M.G., 2013, Resolution refinement technique in a smoothed particle hydrodynamics numerical flume for coastal engineering applications, Proc. *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering V, MARINE 2013*, Hamburg, Deutschland, pp. 388-399.
- Nwogu O., 2001, Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 119(6), pp. 618-638.
- Nwogu O., Z. Demirbilek, 2001, Bouss-2D: A Boussineq wave model for coastal regions and harbors, Report1, Theoretical background and user's manual, U.S. Army Corps of Engineers.
- Panizzo A., 2004, Physical and Numerical Modelling of Sub-aerial Landslide Generated Waves, *PhD thesis*, Università degli Studi di L'Aquila.

Peregrine D.H., 1967, Long waves on a beach, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 27, pp. 815-827.

SPHysics code v1.4, 2009, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>.

Wei G., Kirby J.T., Grill S.T., Subramanya R., 1995, A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part 1, highly nonlinear unsteady waves, journal of Fluid Mechanics, Vol. 294, pp. 71-92.