

## **DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO *SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS* PARA APLICAÇÃO A ESTRUTURAS COSTEIRAS**

**Eric Didier**

*Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [edidier@lnec.pt](mailto:edidier@lnec.pt)  
MARETEC, Marine and Environmental Technology Center, IST, Lisboa, Portugal*

**Óscar Ferreira**

*CIMA, FCT, Universidade do Algarve  
Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, [oferreir@ualg.pt](mailto:oferreir@ualg.pt)*

**Ana Matias**

*CIMA, Universidade do Algarve  
Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, [ammatias@ualg.pt](mailto:ammatias@ualg.pt)*

**Maria Graça Neves**

*Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [gneves@lnec.pt](mailto:gneves@lnec.pt)*

**Maria Teresa Reis**

*Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [treis@lnec.pt](mailto:treis@lnec.pt)*

**André Pacheco**

*CIMA, Universidade do Algarve  
Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, [ampacheco@ualg.pt](mailto:ampacheco@ualg.pt)*

### **RESUMO**

Desde 2007, o modelo SPPhysics tem vindo a ser estudado, desenvolvido e utilizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o objectivo de verificar a sua aplicabilidade a estudos de interacção onda-estrutura. Para continuar o seu desenvolvimento, o modelo necessita de ser validado de forma a se dispor de uma ferramenta útil.

Para tal, iniciou-se recentemente o projecto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamic* para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve.

No artigo apresenta-se um resumo do estado actual do modelo, dos trabalhos a realizar para o tornar uma ferramenta útil para estudos de interacção onda-estrutura e ainda o programa de medições de campo a iniciar brevemente, com vista à validação do modelo, detalhando-se o equipamento a utilizar e o tipo de dados previstos.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos baseados no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) aplicados à engenharia costeira são bastante recentes. Estes modelos resolvem as equações Lagrangianas do escoamento para um elevado número de partículas que interagem entre si, o que permite modelar escoamentos com superfície livre sem impor condições de fronteira particulares nem realizar nenhum tratamento especial.

Desde 2007, o modelo SPHysics (Crespo, 2008, Crespo et al., 2008) tem vindo a ser estudado, desenvolvido e utilizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o objectivo de verificar a sua aplicabilidade a estudos de interacção onda-estrutura. Para continuar o seu desenvolvimento, o modelo necessita de ser testado e validado de forma a poder-se dispor de uma ferramenta útil para estudos de engenharia costeira.

Para tal, iniciou-se recentemente o projecto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamics* para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve, onde estão previstas as seguintes tarefas principais:

- Desenvolvimento do modelo numérico SPH baseado nas equações de quantidade de movimento nas suas formas Lagrangianas, com o objectivo de modelar a interacção entre ondas e estruturas porosas;
- Validação do modelo numérico SPH com resultados de medições em protótipo e de ensaios em modelo físico.

Para tal, serão realizadas campanhas de campo para medição do galgamento (corrente e caudal), pressão, espraiamento (*run-up*) e refluxo (*run-down*) no quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira. Estas medições permitirão validar o modelo à escala real e, juntamente com os dados de ensaios em modelo físico a escala reduzida, permitirão ainda uma análise de efeitos de escala.

Neste artigo apresenta-se um resumo do estado actual do modelo, dos trabalhos a realizar para o tornar uma ferramenta útil para estudos de interacção onda-estrutura, bem como uma síntese do programa de medições de campo a realizar, detalhando-se o equipamento a utilizar e a tipologia de dados a obter.

## 2. MÉTODO LAGRANGIANO E MODELO NUMÉRICO

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977) e foram aplicados mais tarde à hidrodinâmica (Monaghan, 1994). O fluido é considerado como constituído por volumes de água assimilados a partículas. O método SPH, que não necessita de malha, permite modelar as trajectórias das partículas do fluido que interagem segundo as equações de Navier-Stokes. Numericamente a interacção entre as partículas é assegurada por uma função de interpolação. As equações, escritas na forma Lagrangiana, resolvem assim o movimento individual de cada partícula a partir do movimento das partículas que estão à sua volta.

### 2.1. Método Lagrangiano

O princípio fundamental dos métodos SPH consiste em aproximar um escalar, uma função ou um tensor usando a teoria dos integrais de interpolação. 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  $r_a$  é dada por:

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

onde  $f_b$  é o valor da função  $f$  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  $(r_a-r_b)$ ,  $m_b$  é a massa e  $\rho_b$  a densidade da partícula  $b$ .

A função analítica  $f$  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  $2h$  (Figura 1), mais pequeno que a escala típica do problema. No entanto, o parâmetro  $h$  deve ser superior à separação inicial das partículas. Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão do suporte do kernel e cada uma destas partículas tem uma contribuição no kernel (Figura 1).

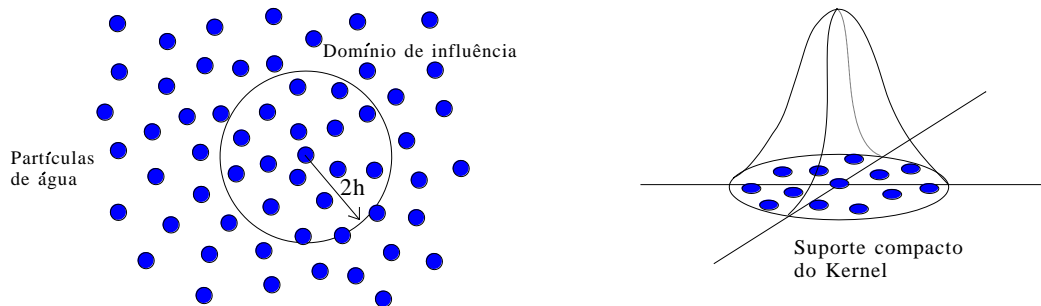


Figura 1. Suporte compacto do kernel e partículas que contribuem para a interpolação.

Existem diversos kernels na literatura, sendo a utilização de diferentes kernels análoga à utilização do esquema de discretização nos métodos Eulerianos do tipo volumes finitos ou diferenças finitas. Assim, a precisão do método SPH depende do tipo de kernel, função que deve verificar várias condições matemáticas (Liu, 2003).

O kernel de interpolação *quadratic* (Johnson et al., 1996, Dalrymple e Rogers, 2006) utilizado nas simulações numéricas é definido pela função analítica dada por:

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

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

## 2.2. Modelo SPHysics

Um dos modelos SPH que se encontra actualmente em desenvolvimento é o modelo SPHysics, que permite modelar escoamentos com superfície livre. Este modelo resulta da colaboração de um grupo de investigadores das Universidades Johns Hopkins (EUA), de Vigo (Espanha), de Manchester (Reino Unido) e de Roma La Sapienza (Itália) (Crespo, 2008, Crespo et al., 2008). O modelo SPHysics é um modelo bi e tri-dimensional que permite modelar fenómenos complexos de deformação de superfície livre, como a rebentação, a reflexão, o *sloshing*, a penetração de um objecto no fluido, etc. É composto por dois programas: um programa de pré-processamento para determinar a posição das partículas da fronteira, as condições limites e a distribuição inicial das partículas fluidas e um segundo programa que permite resolver as equações discretizadas do problema em estudo.

O modelo numérico SPHysics, na sua versão 1.4 (SPHysics, 2009), é inspirado na formulação proposta por Monaghan, 1992 (formulação convencional).

A equação de conservação da quantidade de movimento num meio contínuo é dada por:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \Theta \quad (4)$$

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

Nas equações SPH, a equação discreta de conservação do momento é dada por:

$$\frac{Dv_a}{Dt} = \sum_b m_b \left( \frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} + g \quad (5)$$

onde  $v_a$ ,  $P_a$  e  $\rho_a$  são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a densidade de uma partícula  $a$ ,  $P_b$ ,  $\rho_b$  e  $m_b$  são, respectivamente, a pressão, a densidade 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:

$$\nabla_a W_{ab} = \nabla_a W(r_a - r_b) = \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a} i + \frac{\partial W_{ab}}{\partial y_a} j \quad (6)$$

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

No programa SPHysics, estão implementados três modelos para os termos viscosos  $\Pi_{ab}$ : viscosidade artificial (Monaghan, 1992), viscosidade laminar (Morris et al., 1997) e modelo de turbulência *Sub-Particle Scale* (Gotoh et al., 2001). Este último modelo é utilizado nas presentes simulações numéricas.

A equação de conservação de massa discreta é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (v_a - v_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (7)$$

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

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a \quad (8)$$

O fluido é considerado pouco compressível, o que permite relacionar a pressão no fluido com a densidade através da equação de estado (Batchelor, 1974) dada por:

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (9)$$

onde  $\gamma=7$  e  $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ , sendo  $\rho_0$  a densidade de referência e  $c_0$  a velocidade do som. Por razões de ordem numérica, é normalmente considerado no cálculo um valor de velocidade do som menor que o seu valor real, para poder aumentar o passo de tempo. Com esta técnica, a pressão no fluido é calculada através da equação de estado (9), tendo em conta que o fluido é pouco compressível, em vez de resolver uma equação de pressão de Poisson, onde o fluido seria considerado incompressível (Koshizuka et al., 1995, Shao e Lo, 2003). Com a hipótese de fluido pouco compressível, a variação de densidade é inferior a 1% (Dalrymple e Rogers, 2006).

Conhecendo o campo de pressões e as interações entre as partículas, é possível determinar o movimento das partículas, calculando as velocidades e as posições das mesmas ao longo do tempo.

O passo de tempo é controlado automaticamente, respeitando as condições de Courant (Monaghan e Kos, 1999).

Quanto às condições de fronteira, estas não aparecem de forma natural no formalismo SPH. As diferentes soluções empregues para evitar problemas de fronteira consistem na geração de uma série de partículas virtuais que caracterizem os limites do sistema (condição de fronteira dinâmica) ou na determinação de uma força de repulsão nas partículas da fronteira (condição de fronteira repulsiva). Esta última condição é utilizada nas simulações apresentadas nesta comunicação.

Quanto às condições iniciais, as partículas fluidas são colocadas numa determinada posição no espaço, que corresponde às coordenadas espaciais dos nós de uma determinada malha, em geral rectangular. Se se considerar inicialmente o fluido em repouso, a velocidade inicial das partículas é nula e a pressão associada é calculada em função da profundidade.

O método SPH apresenta um grande potencial na modelação de escoamentos onde ocorrem deformações importantes e complexas da superfície livre. Esta capacidade está ligada ao método numérico, que permite modelar a superfície livre sem impor condições de fronteira particulares ou realizar tratamentos especiais, e à modelação do movimento de corpos e da sua interacção com o fluido.

### 2.3. Modelo SPPhysics<sup>LNEC</sup> para modelação de interacção onda-estrutura costeira

O modelo actual utilizado no LNEC, SPPhysics<sup>LNEC</sup>, contém várias alterações que foram realizadas no modelo original SPPhysics e que se descrevem brevemente a seguir.

A análise de sensibilidade dos resultados com o parâmetro  $\varepsilon_{XSPH}$  da correcção XSPH (Monaghan, 1994) de movimento das partículas mostrou que aparecem instabilidades quando o valor por defeito, 0.5, é utilizado (Didier e Neves, 2009). As instabilidades desaparecem quando se utiliza um valor nulo para  $\varepsilon_{XSPH}$ . Este valor é sempre adoptado nas aplicações do modelo.

O modelo *Sub-Particle Scale* (Gotoh et al., 2001) permite obter resultados que apresentam melhor concordância com os ensaios em modelo físico (Didier e Neves, 2009, 2010, Didier et al., 2011a) que o modelo de viscosidade artificial e é assim utilizado nas várias aplicações do modelo. Foi verificado que o modelo de viscosidade artificial (Monaghan, 1992) induz difusão numérica e altera os resultados de elevação de superfície livre e de galgamento conforme o valor do parâmetro  $\alpha$  do modelo de viscosidade artificial.

Foram recentemente realizados ensaios em modelo físico de um quebra-mar vertical impermeável com o objectivo de validar o modelo SPPhysics<sup>LNEC</sup> (Didier et al., 2011a). A análise preliminar da comparação dos resultados numéricos e experimentais mostrou que a re-normalização da massa específica é absolutamente necessária para estabilizar a pressão. É um problema inerente à formulação convencional SPH, baseada na formulação de Monaghan de 1992. No entanto, a re-normalização da massa específica induz uma difusão numérica e uma redução da elevação de superfície livre. Com estes resultados, optou-se por aplicar a re-normalização apenas nas imediações da estrutura, onde se pretende calcular a pressão e a força. Com esta abordagem, a propagação das ondas no canal não sofre difusão numérica e a pressão nas imediações da estrutura é estabilizada, sem prejudicar a correcta propagação das ondas (Didier et al., 2011a, 2011b).

Na implementação numérica do modelo é utilizado o esquema numérico predictor-corrector (Monaghan, 1989), para a integração no tempo. A velocidade das partículas é calculada usando a equação discreta de conservação do momento (equação 5), a densidade é definida a partir da equação discreta de continuidade (equação 7) e a posição das partículas é calculada usando a equação (8), sem a correcção XSPH de Monaghan que instabiliza o processo de deslocação das partículas no caso da modelação da propagação das ondas (Didier e Neves, 2009), como foi referido anteriormente. A pressão é calculada a partir da densidade, usando a equação de estado (equação 9).

Finalmente, o modelo foi validado para várias configurações de estruturas costeiras, estando os resultados numéricos de galgamento e de elevação de superfície livre em boa concordância com os dados experimentais (Didier e Neves, 2009, 2010, Didier et al., 2011a, 2011b).

No modelo actual, a geração das ondas é efectuada através de um batedor do tipo pistão flexível ou rígido. A primeira técnica permite impor um perfil de velocidade não uniforme às partículas fluidas, similar ao perfil de velocidade de uma onda sinusoidal. A distância de adaptação da onda à profundidade é assim reduzida, o que permite limitar a extensão do domínio computacional. A segunda técnica permite reproduzir exactamente o movimento de um batedor do tipo pistão utilizado em canal nos ensaios em modelo físico. É indispensável, para poder validar o modelo SPH, utilizar condições limites similares às condições dos ensaios.

Um programa de pós-tratamento dos resultados do modelo permite obter a elevação de superfície livre em qualquer secção do canal, a deformação da superfície livre ao longo do tempo, a pressão em pontos da estrutura e a força. Um tratamento especial é realizado para definir as grandezas características envolvidas no galgamento da estrutura: elevação de superfície livre sobre o coroamento da estrutura, determinação da velocidade máxima da água galgada ao longo do tempo, tal como o volume galgado e o caudal instantâneo e médio galgado.

#### **2.4. Desenvolvimentos futuros do modelo SPHysics<sup>LNEC</sup>**

Com o objectivo de utilizar o modelo SPH para aplicações de engenharia costeira, é necessário alterar o modelo actual. Há particularmente cinco pontos principais a considerar, que se enumeram a seguir.

O Modelo actual é baseado na formulação convencional SPH, baseada na formulação de Monaghan, 1992, como foi referido anteriormente. No entanto, esta formulação produz instabilidade ao nível da pressão. Para reduzir estas instabilidades, é necessário re-normalizar regularmente, ao longo da simulação, a massa específica a partir da qual a pressão é calculada. Estas instabilidades parecem ser eliminadas quando se utiliza uma formulação baseada no *sol/ver* de Riemann (Vila, 1999). Um dos objectivos do projecto SPACE é analisar o desempenho da formulação baseada no *sol/ver* de Riemann comparativamente com o modelo baseado na formulação convencional e verificar a sua aplicabilidade na propagação das ondas e na interacção entre ondas e estruturas costeiras.

Actualmente, o batedor funciona apenas como gerador de onda. Assim, as ondas reflectidas por uma estrutura situada na extremidade de um canal chegam ao batedor e são re-reflectidas no canal, perturbando significativamente a onda incidente na estrutura e limitando assim o tempo de simulação e de aquisição. O batedor deve ser reformulado para poder funcionar simultaneamente na geração / absorção dinâmica de ondas.

Com o objectivo de modelar estruturas costeiras reais, surge a necessidade de se considerar a porosidade do manto, quer de enrocamento, quer de blocos artificiais. Uma opção consiste em modelar o meio poroso considerando a porosidade do meio. No entanto, se esta metodologia permite representar o escoamento médio no meio poroso, não permite calcular as forças nos blocos. Assim, a próxima versão do modelo SPH será desenvolvida para modelar directamente os blocos do manto e o escoamento será simulado fora e dentro do manto (i.e. entre os blocos que constituam o manto) com o objectivo de calcular as forças que actuam nos blocos ao longo do tempo. Esta informação é importante para o estudo da estabilidade da estrutura.

A modelação de estruturas costeiras, em particular dos blocos que constituem o manto, implica utilizar uma resolução fina, ou seja partículas pequenas. Como o tempo de cálculo aumenta fortemente com o número de partículas, a paralelização do programa de cálculo torna-se absolutamente necessária para poder aplicar o modelo SPH a casos reais com tempo CPU razoável.

Finalmente o modelo SPH poroso será validado, quer com dados recolhidos em campanhas de campo, quer com dados de ensaios em modelo físico que reproduzam o caso de estudo (ver capítulo 3).

### 3. CASO DE ESTUDO

Dos vários locais disponíveis para a realização das campanhas de campo, foi escolhido o quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, devido à facilidade de acesso e ao regime de agitação marítima a que está sujeito.

As obras de construção do porto tiveram início em 1999, tendo terminado em 2002. Desde o final da construção das obras de protecção da bacia portuária que estas foram integradas no programa de Observação Sistemática de Obras Marítimas (OSOM) realizado pelo LNEC (2008).

O porto é protegido por duas obras marítimas em talude, que são designadas por quebra-mar Nascente e quebra-mar Poente (Figura 2).



Figura 2. Quebra-mares Nascente e Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

O quebra-mar Nascente é a principal obra de defesa contra a agitação do quadrante SE e tem cerca de 250m de comprimento. Apresenta no troço do seu enraizamento um alinhamento rectilíneo aproximadamente orientado N-S, inflectido depois para SSW-NNE na zona mais próxima da cabeça.

O quebra-mar Poente é a principal defesa do porto contra a agitação marítima proveniente do quadrante SW. Desenvolve-se numa extensão de cerca de 275m e tem estruturalmente 5 perfis-tipo.

A campanha de campo prevista será realizada na secção do quebra-mar Poente, apresentada na Figura 3. Nesta secção do quebra-mar, o talude exterior apresenta um declive de 3:2 e desenvolve-se entre a cota +7.0m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5m. É protegido por enrocamentos de 90 a 120kN dispostos em duas camadas, tendo como filtros duas camadas de enrocamentos de 10 a 30kN. O talude interior, inclinado a 3:2, desenvolve-se entre a cota +6.5m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5m. É igualmente protegido por enrocamentos de 90 a 120kN entre o coroamento e o ZH e por enrocamento de 10 a 30kN entre o ZH e uma cota que dista do fundo natural 0.5m. A fundação de ambos os taludes processa-se sobre um tapete de TOT com 0.5m de espessura. Quer a berma de coroamento exterior (à cota +7.0m (ZH)), quer a berma de coroamento interior (à cota +6.5m (ZH)), têm

cerca de 5.4m de largura. Na zona central do coroamento desenvolve-se um passadiço de betão com 3.0m de largura, coroamento à cota +6.5m (ZH) e fundação à cota +4.0m (ZH). A Figura 4 apresenta o perfil do quebra-mar em questão.

Pode-se salientar a extrema arrumação dos blocos do manto resistente, aspecto que nem sempre é muito recomendado em obras marítimas, nomeadamente em troços bastante expostos à acção da agitação marítima, como é caso do quebra-mar Poente.

O local de realização da campanha de campo foi determinado considerando o forte galgamento que já foi registado no quebra-mar Poente (Figura 5) e a incidência das ondas de quadrante SW.

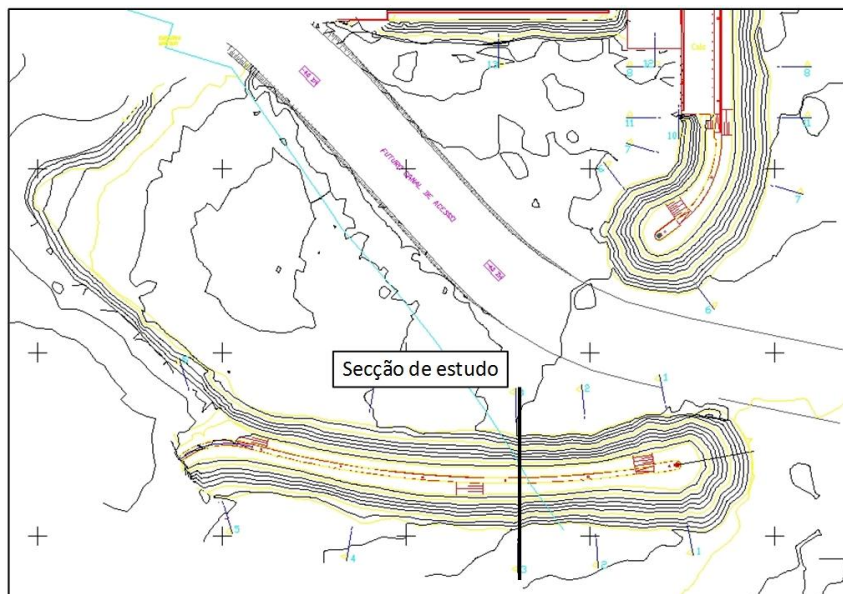


Figura 3. Planta do porto de pesca e dos dois quebra-mares, Nascente e Poente. A secção de estudo para a campanha de campo está indicada no quebra-mar Poente.

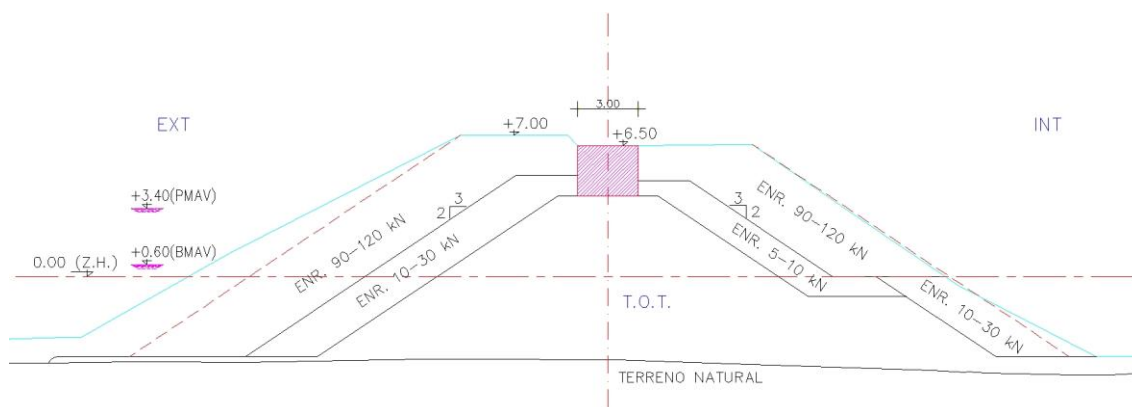


Figura 4. Perfil do quebra-mar Poente na secção da campanha de campo (telas finais).





Figura 5. Espriamento / galgamento no quebra-mar Poente (4-7 de Dezembro de 2006 e 26 de Outubro de 2009).

#### 4. CAMPANHAS DE CAMPO

##### 4.1. Campanhas

Tal como referido anteriormente, as campanhas de campo decorrerão no quebra-mar Poente do Porto de pesca de Albufeira (Figura 6A). A área de estudo está sujeita a um regime mesotidal com amplitude de maré entre os 1.3 e 2.8 m, respectivamente para marés mortas e vivas, com níveis máximos anuais atingidos da ordem dos +3.8m (ZH). A agitação dominante é de W-SW (71% do ano), enquanto as ondas de Levante (E-SE) possuem cerca de 27% da ocorrência anual. A altura significativa ( $H_s$ ) média anual é da ordem de 1.0m, com um período de pico médio anual de 8.2s (Costa et al., 2001). As tempestades ( $H_s > 3.0m$ ) mais importantes são de SW, existindo anualmente tempestades com  $H_s$  de 4.0m e com período acima dos 10.0s (Costa et al., 2001).

A estrutura de engenharia em causa possui cota de coroamento relativamente baixa (Figura 4) estando por isso sujeita a galgamentos frequentes durante o Inverno, em toda a sua extensão. Desta forma, a parte central (mais exposta) do quebra-mar é um local ideal para a execução de campanhas de campo para medição de parâmetros de galgamento sobre

estruturas. A orientação do quebra-mar é Este-Oeste virada a Sul, o que permite um adequado grau de exposição à direcção de ondas de tempestade mais frequente (W-SW).

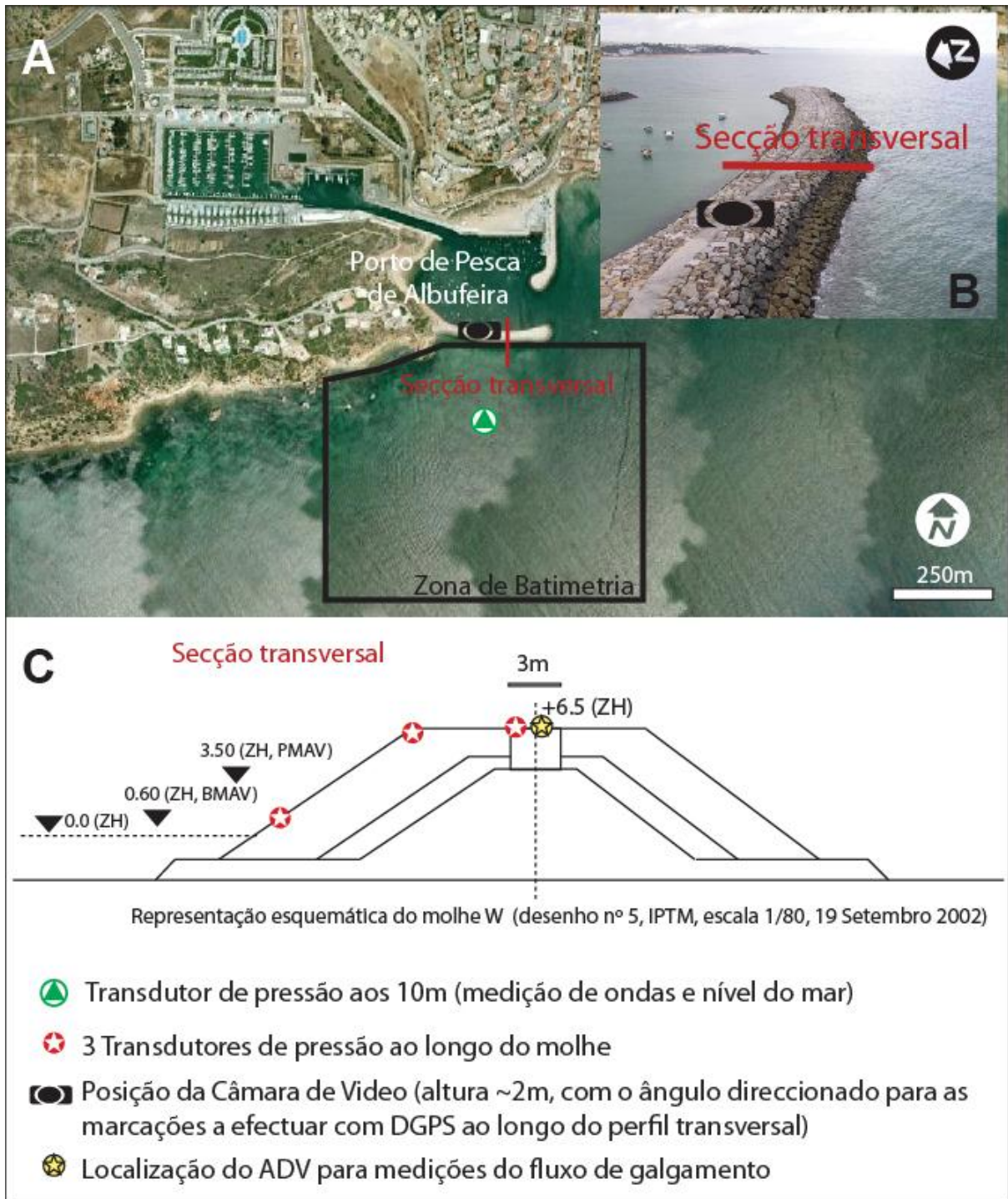


Figura 6. (A) Imagem da área do Porto de Pesca de Albufeira (adaptada do Google Earth, 2006) com indicação da zona onde serão realizados os trabalhos de batimetria, localização da câmara de vídeo e transdutor de pressão aos ~10m de profundidade; (B) Quebra-mar Poente do Porto de Albufeira onde decorrerão as campanhas de campo com indicação da secção a estudar; (C) Representação esquemática da secção do quebra-mar e posicionamento dos equipamentos (PTs e ADV).

As datas de realização das campanhas de campo serão planeadas em função dos cálculos preliminares de galgamento (capítulo 4.2 deste artigo), a partir dos quais se define para que condições se prevê maior probabilidade de ocorrência de galgamentos do quebra-mar. Tendo estes elementos como base e sabendo-se da previsão de maré e agitação para os 5 dias seguintes (através das previsões do Instituto Hidrográfico e do Instituto de Meteorologia), verifica-se para que dias os limites expectáveis de galgamento são alcançáveis procedendo-se à campanha de obtenção de dados. Tentar-se-ão efectuar campanhas de campo para várias condições de maré e agitação, para abarcar situações em que ocorram marés vivas equinociais com menor altura de onda e outras com maior altura de onda e menor amplitude de maré. As campanhas de galgamento serão repetidas ao longo do Inverno 2011/2012 até se considerar existir um número de dados significativo para validação do modelo numérico SPHysics<sup>LNEC</sup>.

Anteriormente à realização das campanhas de colheita de dados de galgamento será efectuado o levantamento batimétrico da área adjacente ao quebra-mar, até profundidades da ordem dos 15-20m (Figura 6B).

Durante as campanhas serão obtidos dados de elevação do nível do mar (ondas e nível de água) a cerca de 10m de profundidade (Figura 6B), na base da estrutura (próximo da rebentação) e no coroamento da estrutura (área de galgamento, Figura 6C). Estes dados serão obtidos com transdutores de pressão (PT) colocados junto ao fundo. Serão adquiridos dados de perfil de corrente de galgamento no topo da estrutura, através da montagem de um Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Complementarmente será colocada uma câmara vídeo numa estrutura fixa no topo do quebra-mar para a medição da velocidade da frente de galgamento entre marcas colocadas transversalmente ao quebra-mar. As marcas serão georeferenciadas com recurso a um GPS diferencial (DGPS). Obter-se-ão, assim, dados de elevação e de velocidade de fluxo de galgamento sobre a estrutura, que permitirão inferir o caudal de galgamento.

Para a caracterização das ondas que geram o galgamento serão comparados os dados provenientes de dois métodos: (1) dados de onda (não direccionais) adquiridos a cerca de 10m de profundidade (PT colocado na base do quebra-mar, no âmbito deste trabalho); (2) propagação para a zona costeira de dados de agitação medidos ao largo. Para este segundo método será efectuado um levantamento batimétrico da área adjacente ao quebra-mar até profundidades da ordem dos 15-20m. Será usado o modelo de propagação SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Booji et al, 1999), que será forçado na sua fronteira ao largo pelos dados de agitação direccionais do modelo Wavewatch III (Instituto Hidrográfico).

#### **4.2. Cálculos preliminares de galgamento**

Tendo em conta as condições locais de batimetria, nível de maré e agitação marítima e ainda as características do perfil da secção de estudo do quebra-mar Poente do Porto de Albufeira, foram realizados cálculos preliminares dos caudais médios de galgamento com o intuito de melhor definir as condições para as quais se deverão realizar as campanhas de campo.

Estes cálculos foram efectuados recorrendo a três metodologias distintas aplicáveis ao tipo de estrutura em análise:

- o método proposto no antigo manual dos galgamentos do Reino Unido (Besley, 1999) baseado na formulação empírica de Owen (1980); e
- os dois métodos propostos no actual manual dos galgamentos (Pullen et al., 2007):
  - formulações empíricas, cujos cálculos são realizados on-line ([http://www.overtopping-manual.com/calculation\\_empirical.html](http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html));
  - ferramenta NN\_OVERTOPPING2, baseada na análise de 700 redes neuronais.

A fórmula de Owen para estruturas em talude permeável pode representar-se da seguinte forma:

$$q = T_m g H_s A \exp \left[ -B \frac{A_c}{\gamma_f T_m \sqrt{g H_s}} \right] \quad (10)$$

onde  $q$  é o caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura medido no topo do talude,  $H_s$  é a altura significativa das ondas incidentes medidas no pé do talude,  $T_m$  é o período médio de zero ascendente,  $A_c$  é a altura do coroamento acima do nível de repouso,  $\gamma_f$  é um factor de redução do galgamento por efeito da rugosidade / permeabilidade do talude,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $A$  e  $B$  são coeficientes empíricos. Para considerar a redução em  $q$  devido à presença de uma berma permeável de coroamento, Besley (1999) propõe a utilização de um factor de redução,  $C_r$ , tal que  $C_r = 3.06 \exp(-1.5 G_c/H_s)$ , onde  $G_c$  é a largura da berma de coroamento.

As metodologias propostas no actual manual dos galgamentos (Pullen et al., 2007) e as ferramentas computacionais correspondentes foram desenvolvidas no âmbito do projecto Europeu CLASH (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping*) e encontram-se disponíveis on-line ([http://www.overtopping-manual.com/calculation\\_tool.html](http://www.overtopping-manual.com/calculation_tool.html)).

As formulações empíricas para quebra-mares de talude são (Pullen et al., 2007):

$$\text{Cálculos determinísticos: } q = 0.2 \cdot \exp \left( -2.3 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right) \cdot \sqrt{g H_{m0}^3} \quad (11)$$

$$\text{Cálculos probabilísticos: } q = 0.2 \cdot \exp \left( -2.6 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right) \cdot \sqrt{g H_{m0}^3} \quad (12)$$

em que  $H_{m0}$  é a altura de onda significativa em frente à estrutura calculada com o momento de ordem zero do espectro ( $m_0$ ) e  $R_c$  é a altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso. Para considerar a redução em  $q$  devido à presença de uma berma permeável de coroamento, Pullen et al. (2007) adopta o mesmo factor de redução que Besley (1999). Ao contrário da fórmula de Owen, estas duas expressões não têm em conta o período da onda. Note-se que, tal como referido em Pullen et al. (2007), para dimensionamento determinístico de novas estruturas ou para verificação da segurança de estruturas já existentes, devem ser utilizados resultados determinísticos, enquanto que para comparação com medições efectuadas ou para prever medições em laboratório ou no protótipo (como é o caso neste trabalho), devem ser utilizados cálculos probabilísticos.

A NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) baseia-se em cerca de 8400 combinações de *input-output* provenientes de ensaios em modelo físico realizados em vários laboratórios da Europa, América e Japão para diversas características da onda e diferentes tipos de estruturas, tais como quebra-mares de talude e quebra-mares verticais (Steendam et al., 2004). Usa 15 parâmetros de entrada, que incluem informação sobre a onda e a geometria da estrutura, e calcula os valores do caudal médio de galgamentos por metro linear de estrutura,  $q$ , os intervalos de confiança associados e o caudal esperado no protótipo,  $q'$ , i.e. o valor de  $q$  corrigido para ter em linha de conta alguns efeitos de escala e de modelo.

Na Tabela 1 apresentam-se as condições de nível de maré e de agitação marítima consideradas nos cálculos preliminares realizados, bem como os valores do galgamento obtido. Consideraram-se quatro níveis de maré: +2.0m (ZH), +2.5m (ZH), +3.0m (ZH) e +3.5m (ZH), em que +2.0m (ZH) e +3.5m (ZH) correspondem aproximadamente ao nível médio (NM) e à preia-mar de águas vivas (PMAV) em Albufeira, respectivamente, de acordo com a Tabela de Marés de 2011 do Instituto Hidrográfico. Na Tabela 1,  $h$  representa a profundidade no pé da estrutura, tendo sido calculada considerando que, na secção de estudo, o pé do talude da estrutura se encontra posicionado sobre a batimétrica -3.1m (ZH);  $T_p$  é o período de pico do espectro considerado para a agitação marítima e  $T_{m-1,0}$  é o período médio em frente à estrutura obtido por análise espectral a partir dos momentos  $m_0$  e  $m_{-1}$ . Os cálculos foram realizados considerando a agitação com uma incidência normal à estrutura. Como resultados a Tabela 1 apresenta o caudal médio galgado,  $q$ , em l/s/m, obtido quer com as fórmulas empíricas, quer

considerando a NN\_OVERTOPPING2. Para a NN\_OVERTOPPING2, apresenta ainda  $q'$  e os quantis  $q_{2.5\%}$  e  $q_{97.5\%}$ , que correspondem ao intervalo de confiança de 95%, que permite avaliar a incerteza dos resultados.

Note-se que um dos parâmetros mais importantes na determinação do galgamento através das metodologias acima referidas é o factor de redução do galgamento por efeito da rugosidade / permeabilidade do talude,  $\gamma_f$ . Pullen et al. (2007) sugere valores para  $\gamma_f$  de 0.40 para estruturas com duas camadas de enrocamento, colocado de forma desarrumada, sobre um núcleo permeável. No quebra-mar Poente do Porto de Albufeira o enrocamento apresenta uma colocação arrumada (Figura 5), o que aumenta o espriamento e o galgamento. Assim, os resultados apresentados na Tabela 1 foram obtidos adoptando-se um valor de  $\gamma_f$  de 0.5.

Tabela 1. Caudal médio galgado no quebra-mar Poente do Porto de Albufeira.

| Nível (m ZH) | h (m) | $T_p$ (s) | $T_{m-1,0}$ (s) | $H_{m0}$ (m) | Galgamento (l/s/m) |  |                 |       |                   |                    |
|--------------|-------|-----------|-----------------|--------------|--------------------|--|-----------------|-------|-------------------|--------------------|
|              |       |           |                 |              | Fórmulas Empíricas |  | NN_OVERTOPPING2 |       |                   |                    |
|              |       |           |                 |              | q (Besley, 1999)   | q Probabilístico (Pullen et al., 2007) | q               | q'    | q <sub>2.5%</sub> | q <sub>97.5%</sub> |
| 2.0          | 5.1   | 8.0       | 7.3             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | -               | -     | -                 | -                  |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.05               | 0.00                                   | 0.01            | 0.12  | 0.00              | 0.10               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 1.08               | 0.20                                   | 0.17            | 0.49  | 0.05              | 0.64               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 6.36               | 4.65                                   | 1.25            | 1.55  | 0.40              | 4.27               |
|              |       | 10.0      | 9.1             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.00            | 0.04  | 0.00              | 0.37               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.22               | 0.00                                   | 0.03            | 0.20  | 0.00              | 0.29               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 4.05               | 0.20                                   | 0.46            | 0.83  | 0.12              | 1.51               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 20.60              | 4.65                                   | 3.51            | 3.62  | 1.26              | 10.54              |
| 2.5          | 5.6   | 8.0       | 7.3             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.00            | 0.04  | 0.00              | 0.28               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.09               | 0.00                                   | 0.03            | 0.18  | 0.00              | 0.21               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 1.87               | 0.48                                   | 0.36            | 0.72  | 0.12              | 1.16               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 10.24              | 8.92                                   | 2.40            | 2.59  | 0.76              | 7.71               |
|              |       | 10.0      | 9.1             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.01            | 0.08  | 0.00              | 0.65               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.38               | 0.00                                   | 0.07            | 0.31  | 0.01              | 0.53               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 6.29               | 0.48                                   | 0.90            | 1.25  | 0.25              | 2.76               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 30.17              | 8.92                                   | 6.44            | 6.46  | 2.25              | 17.70              |
| 3.0          | 6.1   | 8.0       | 7.3             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.01            | 0.08  | 0.00              | 0.46               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.18               | 0.01                                   | 0.07            | 0.30  | 0.01              | 0.48               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 3.24               | 1.15                                   | 0.83            | 1.18  | 0.28              | 2.34               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 16.48              | 17.08                                  | 4.96            | 5.01  | 1.63              | 15.50              |
|              |       | 10.0      | 9.1             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.02            | 0.14  | 0.00              | 1.10               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.66               | 0.01                                   | 0.16            | 0.47  | 0.02              | 1.18               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 9.76               | 1.15                                   | 1.88            | 2.12  | 0.61              | 5.87               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 44.17              | 17.08                                  | 12.43           | 12.43 | 4.05              | 36.37              |
| 3.5          | 6.6   | 8.0       | 7.3             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.02            | 0.14  | 0.00              | 1.07               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 0.35               | 0.02                                   | 0.19            | 0.51  | 0.03              | 1.11               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 5.61               | 2.74                                   | 2.14            | 2.35  | 0.77              | 5.96               |
|              |       |           |                 | 4.0          | 26.55              | 32.72                                  | 11.01           | 11.01 | 3.43              | 34.85              |
|              |       | 10.0      | 9.1             | 1.0          | 0.00               | 0.00                                   | 0.04            | 0.23  | 0.00              | 2.32               |
|              |       |           |                 | 2.0          | 1.13               | 0.02                                   | 0.40            | 0.77  | 0.06              | 2.62               |
|              |       |           |                 | 3.0          | 15.16              | 2.74                                   | 4.36            | 4.43  | 1.38              | 15.39              |
|              |       |           |                 | 4.0          | 64.66              | 32.72                                  | 25.33           | 25.33 | 7.89              | 76.02              |

Como se pode observar, para níveis de maré acima de +3.0m (ZH) e agitação marítima superior ou igual a 3.0m, o caudal médio galgado já é significativo. Possivelmente, haverá algum galgamento se a agitação for acima de 2.0m, mas poderá não ser suficiente para se conseguirem fazer medições. Para níveis de maré inferiores a +3.0m (ZH), só condições de agitação muito extremas causam galgamento significativo.

Assim, poderão programar-se as campanhas de campo para situações em que o nível de maré de +3.0m (ZH) seja excedido pelo menos durante 30-60 minutos e as previsões de  $H_s$  sejam superiores a 2.5m, para garantir a existência de galgamento e uma quantidade significativa de dados.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos baseados no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) aplicados à engenharia costeira são bastante recentes. Um exemplo de um modelo deste tipo é o modelo

SPHysics<sup>LNEC</sup>, que começou a ser desenvolvido no LNEC em 2007, em colaboração com o Grupo europeu SPHERIC.

No decurso destes anos foram detectadas várias lacunas no modelo que se pretende colmatar a fim de que este modelo possa ser uma ferramenta útil no estudo da interacção onda-estrutura. Adicionalmente, pretende-se ampliar o trabalho de validação que tem sido realizado e estendê-lo a casos onde existam dados de campo, para que esta validação não seja afectada por possíveis erros de escala dos modelos físicos que serviram de base à sua verificação.

Para alcançar este objectivo, iniciou-se em Janeiro do corrente ano o projecto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamic* para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve.

Neste artigo apresentou-se o modelo SPHysics<sup>LNEC</sup> e descreveu-se o trabalho realizado até ao momento no âmbito do projecto SPACE, que se pode dividir em duas partes principais: desenvolvimento do modelo numérico e preparação da campanha de campo a realizar para obtenção de dados de campo fiáveis para a validação do modelo. Os dados de campo, juntamente com ensaios em modelo físico a realizar para condições similares, permitirão quantificar e corrigir os efeitos de escala e validar o modelo. Finalmente, estes dados permitiram a análise de efeito de escala através da comparação entre todos os resultados obtidos: dados de campo, ensaios em modelo físico (à escala) e resultados do modelo numérico (obtidos para diferentes escalas).

Os resultados finais esperados são o desenvolvimento do modelo e de uma interface amigável com o utilizador, da sua verificação e validação com dados de ensaios em modelo físico e obtidos em protótipo (campo), tornando-o uma ferramenta útil para estudos de engenharia costeira.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- A.J.C. Crespo, *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*, 158 p., Dissertação de doutoramento, Universidade de Vigo, Vigo, Espanha, 2008.
- A.J.C. Crespo, M. Gómez-Gesteira and R.A. Dalrymple, Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(6), 313-320, 2008.
- R.A. Gingold, J.J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375-389, 1977.
- J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110, pp 399-406, 1994.
- G.R. Liu, *Mesh free methods. Moving beyond the finite element method*. CRC press, 2003.
- G. Johnson, R. Stryk, S. Beissel, SPH for high velocity impact calculations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, 347-373, 1996.
- R.A. Dalrymple, B.D. Rogers, Numerical modeling of water waves with the SPH method, *Coastal Engineering*, 53(2-3), 141-147, 2006.
- SPHysics code v1.4, 2009. <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>
- J.J. Monaghan, Smoothed Particles Hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543-574, 1992.

- J.P. Morris, P.J. Fox, Y. Shu, Modeling lower Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of Computational Physics*, 136, 214-226, 1997.
- H. Gotoh, T. Shibahara, T. Sakai, Sub-particle-scale turbulence model for the MPS method-Lagrangian flow model for hydraulic engineering, *Computational Fluid Dynamics Journal*, 9(4), 339-347, 2001.
- G.K. Batchelor, *Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, UK, 1974.
- S. Koshizuka, H. Tamako, Y. Oka, A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Computational Fluid Dynamics Journal*, 4(1), 29-46, 1995.
- S.D. Shao, E.Y.M. Lo, Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface, *Adv. Water Resour.*, 26(7), 787-800, 2003.
- J.J. Monaghan, A. Kos, Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125, 145-154, 1999.
- E. Didier, M.G. Neves, Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure, *Proc. 4<sup>th</sup> International SPHERIC workshop*, 357-364, Nantes, França, 2009.
- E. Didier, M.G. Neves, Study of wave interaction with coastal structures using a SPH numerical model, *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(4), 435-455, 2010.
- E. Didier, R. Martins, M.G. Neves, J.R.G. Vasco, Interaction between wave and coastal structure: validation of two Lagrangian numerical models with experimental results, *Proc. MARINE 2011*, Lisboa, Portugal, 2011a.
- E. Didier, R. Martins, M.G. Neves, Validação e aplicação de um modelo numérico SPH para o cálculo de forças num quebra-mar vertical, *Proc. 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN, Porto, Portugal, 2011b.
- J.J. Monaghan, On the problem of penetration in particle methods, *Journal Computational Physics*, 82, 1-15, 1989.
- J.-P. Vila, On particle weighted methods and Smooth Particle Hydrodynamics, *Math. Models Meth. Appl. Sci.*, 9(2), 161-209, 1999.
- LNEC, Observação sistemática de obras marítimas, Obras de protecção do Porto de Albufeira, Resultados da campanha de observação visual efectuada em 2007, Relatório 173/2008-NPE, 2008.
- M. Costa, R. Silva, J. Vitorino, Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *Proc. 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN, 2001.
- N. Booij, R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research*, 104, C4, 7649-7666, 1999.
- P. Besley, *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*, 130p., Environment Agency, R&D Technical Report W178, Bristol, Reino Unido (ISBN: 1-85705-069-X), 1999.
- M.W. Owen, *Design of Sea Walls Allowing for Wave Overtopping*, Report EX 924, Hydraulics Research, Wallingford, Reino Unido, 1980.
- T. Pullen, N.W.H. Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schuttrumpf, J.W. Van der Meer, *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*, Environment Agency, UK, Expertise Network Waterkeren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, Agosto, 2007.
- E.M. Coeveld, M.R.A. Van Gent, B. Pozueta, *Manual Neural Network: NN\_OVERTOPPING 2*, CLASH WP8 – Report, 2005.
- G.J. Steendam, J.W. Van der Meer, H. Verhaeghe, P. Besley, L. Franco, M.R.A. Van Gent, The international database on wave overtopping, *Proc. 29th ICCE*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapura, 2005, 4301-4313, 2004.