

## **METODO LAGRANGIANO PARA A MODELAÇÃO NUMÉRICA DA INTERACÇÃO ENTRE UMA ONDA E UMA ESTRUTURA COSTEIRA**

**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*

**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)*

### **RESUMO**

A análise da eficiência das estruturas costeiras em termos de galgamento, é classicamente realizada através de estudos em modelo físico. No entanto, a modelação numérica pode complementar estes estudos experimentais.

A aplicação de dois tipos de modelos numéricos na simulação do galgamento de estrutura costeiras impermeáveis, cada modelo com as suas vantagens e limitações, é analisada neste artigo: um modelo Eulariano, COBRAS-UC, e um modelo Lagrangiano, SPPhysics.

Os resultados de elevação de superfície livre e de caudal médio galgado obtido pelos dois modelos são comparados com dados de ensaios obtidos em modelo físico à escala 1:10, para o estudo do galgamento numa estrutura de protecção marginal impermeável.

## 1. INTRODUÇÃO

Grande parte das estruturas marítimas, têm como objectivo proteger uma determinada área da acção da agitação marítima e assim funcionar como obstáculo à propagação normal das ondas. Estas obras marítimas intervêm na protecção da linha de costa, dos abrigos em portos, etc. O conhecimento do comportamento hidrodinâmico destas estruturas de protecção costeira e portuária é necessário, quer para garantir a sua funcionalidade, quer a sua estabilidade.

A análise do comportamento hidráulico da estrutura é normalmente feita recorrendo a métodos semi-empíricos ou modelos físicos. Devido à melhoria dos meios de computação e ao desenvolvimento dos modelos numéricos, cada vez mais precisos, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se mais atractivo. Os modelos utilizados neste tipo de estudos devem permitir a modelação correcta dos vários fenómenos envolvidos no processo de interacção entre onda e estrutura costeira: empoamento, rebentação, escoamento em meios porosos e galgamento.

A modelação numérica dos escoamentos com superfície livre é classicamente realizada recorrendo a métodos numéricos baseados na abordagem Euleriana. Assim, para um determinado ponto do espaço obtem-se a evolução das grandezas principais, como a velocidade, a pressão e a elevação da superfície livre, em função do tempo. É o caso do modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006) que permite modelar os escoamentos com superfície livre usando um método de tipo VOF (Volume Of Fluid) (Hirt e Nichols, 1981).

A abordagem Lagrangiana difere da Euleriana, pois consiste no seguimento de partículas do fluido durante um determinado tempo, de forma a obter as suas trajectórias, velocidades, pressões, etc. em função da posição inicial e do tempo. Diferentes métodos e modelos, conhecidos genericamente como métodos/modelos SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), foram desenvolvidos tendo como base a abordagem Lagrangiana, cuja particularidade reside no facto de não necessitar de malha. Os modelos numéricos construídos recorrem a diferentes técnicas, como a de considerar o fluido incompressível ou quase incompressível.

Um destes modelos é o modelo numérico SPHysics (Dalrymple e Rogers, 2006, SPHysics Home Page, 2007), que resolve as equações SPH, obtidas a partir das equações da dinâmica dos fluidos (equações de Navier-Stokes), usando funções de interpolação de um conjunto de pontos. Esta função, definida como kernel, permite modelar a interacção entre as partículas. As equações assim obtidas, na forma Lagrangiana, resolvem o movimento individual de cada partícula a partir do movimento das partículas que se encontram numa zona próxima.

O modelo SPHysics apresenta-se como uma opção atractiva na modelação dos fenómenos costeiros (Didier e Neves, 2008), particularmente no que diz respeito à simulação do espraiamento, da rebentação e do galgamento, fenómenos complexos que ocorrem nos casos práticos de engenharia.

A aplicabilidade dos dois modelos numéricos, SPHysics, baseado num método Lagrangiano, e COBRAS-UC, baseado num método Euleriano, é aqui analisada através da modelação da propagação das ondas e do problema complexo de rebentação e galgamento que ocorre na interacção com uma estrutura costeira impermeável. A precisão dos dois modelos é analisada através da comparação dos resultados numéricos com dados experimentais obtidos em ensaios em canal de uma estrutura impermeável típica da costa Portuguesa a escala 1:10. Estes ensaios foram realizados no âmbito do projecto Composite Modelling of the Interactions between Beaches and Structures (CoMIBBs) project - HYDRALAB III European Project, para estudar a influência da escala dos modelos físicos nos resultados da modelação da propagação das ondas nas estruturas costeiras, particularmente quando a rebentação tem um papel importante (Fortes et al., 2008).

## 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  $(r_a-r_b)$ ,  $m_b$  a massa e  $\rho_b$  a densidade da partícula  $b$ .

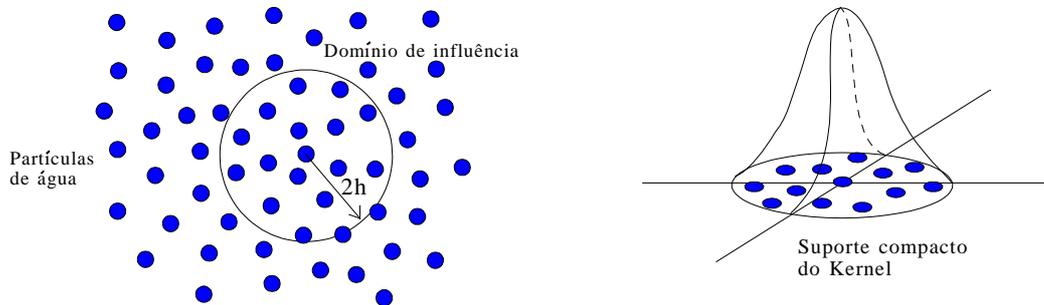


Figura 1. Suporte compacto do kernel e partículas que contribuem para a interpolação.

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).

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

O kernel de interpolação *quadratic*, 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

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,  $g = (0, 0, -9.81)$  m.s<sup>-2</sup> 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, são implementados três modelos para os termos viscosos  $\Pi_{ab}$ : viscosidade artificial (Monaghan, 1992), viscosidade laminar (Morri 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:

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

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

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

O fluido é considerado compressível o que permite relacionar a pressão no fluido com a densidade a través a 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 quase incompressível, 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 quase incompressível, 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.

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 correção XSPH de Monaghan que instabiliza o processo de deslocamento das partículas no caso da modelação da propagação das ondas (Didier e Neves, 2009a). A pressão é calculada a partir da densidade, usando a equação de estado (equação 9).

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

Quanto às condições de contorno, estas não aparecem de forma natural no formalismo SPH. As diferentes soluções empregues para evitar problemas de contorno 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. Parâmetros do modelo SPHysics para propagação das ondas

Um estudo preliminar de sensibilidade e de convergência dos resultados do modelo SPHysics (Didier e Neves, 2009a, 2009b) permitiu analisar:

- A convergência dos resultados do modelo SPHysics com a densidade de partículas inicial. Esta análise foi realizada para a propagação de uma onda de altura 1.0m e um período de 4.73s, o que corresponde a um comprimento de onda de 23.4m para uma profundidade de 3.0m. A análise do galgamento, parâmetro muito sensível a discretização (transformação e rebentação da onda), mostrou que a convergência e obtida para uma distância inicial das partículas de 0.05m, o que corresponde a 20 partículas para altura da onda, 470 partículas para o comprimento de onda e 60 partículas para a profundidade do canal. No entanto, estes resultados devem ser adaptados conforme o problema a tratar.
- A sensibilidade dos resultados com o parâmetro  $\epsilon_{XSPH}$  da correção XSPH de Monaghan de movimento das partículas. Esta análise mostrou que instabilidades aparecem quando o valor por defeito, 0.5, é utilizado. As instabilidades desaparecem quando se utiliza um valor pequeno para  $\epsilon_{XSPH}$  ou um valor nulo (valor adoptado no presente estudo).
- A sensibilidade dos resultados com o modelo de viscosidade artificial (Monaghan, 1992). Este modelo introduz difusão numérica e altera os resultados de galgamento conforme o valor do parâmetro  $\alpha$  do modelo de viscosidade artificial. O modelo *Sub-Particle Scale* (Gotoh et al. , 2001) permite obter resultados que apresentam melhor concordância com os ensaios em modelo físico e é assim utilizado nas presentes simulações.

Finalmente, o modelo foi validado, para várias configurações de estruturas costeiras, estando os resultados numéricos de galgamento em boa concordância com os dados experimentais.

### **3. MODELO EULERIANO**

O modelo COBRAS-UC é baseado no modelo RIPLLE, originalmente desenvolvido pela NASA, e modificado na Universidade de Cornell, dando origem ao modelo COBRAS (COReLL BReaking waves And Structures), especificamente para tratar dos fenómenos da rebentação e ter em conta as estruturas porosas. Finalmente o modelo foi melhorado na Universidade de Cantábria no que respeita à optimização de cálculo e aos sistemas de entrada e saída do modelo, dando origem ao modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006).

COBRAS-UC é um modelo numérico bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência,  $k-\epsilon$ , tridimensional. Este modelo de turbulência permite ter em conta as características de escoamento que ocorrem no processo de rebentação e no escoamento através de meios porosos.

O modelo incorpora um método de captura da superfície livre do tipo Volume of Fluid (VOF) (Hirt e Nichols, 1981). Desta forma, a superfície livre pode comportar-se de maneira arbitrária, o que permite que existam zonas desconexas, formação de gotas, etc. Os métodos utilizados para resolver as equações são os métodos interactivos de diferenças finitas, melhorando assim a precisão dos resultados.

Para a execução de um caso, é gerada uma malha formada por elementos rectangulares, cuja dimensão pode variar de forma não linear, podendo formar uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho dos elementos que o compõe e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O modelo permite obter informação completa de pressão, vorticidade, viscosidade turbulenta, velocidades horizontais e verticais, posição da superfície livre, conservação de massa, volume galgado, etc., e foi já validado em diferentes casos de engenharia costeira com bons resultados ao simular o escoamento em estruturas porosas (Lara et al., 2006).

### **4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ENSAIOS FÍSICOS À ESCALA 1:10**

Nesta secção são apresentados os ensaios em canal, à escala 1:10, e são definidas as características das ondas testadas. As características da aplicação dos dois modelos numéricos, SPHysics e COBRAS-UC, são brevemente descritas. Uma análise de sensibilidade do modelo SPHysics com a densidade inicial de partículas é também realizada. Finalmente os resultados numéricos dos dois modelos são comparados com os dos ensaios em modelo físico.

#### **4.1. Modelo físico**

Foram realizados recentemente, no LNEC, ensaios, em canal, da propagação de ondas sobre uma praia de inclinação constante (1:20), que termina numa estrutura de protecção marginal. Foram simuladas diferentes condições de agitação, com diferentes alturas de onda e níveis de água, e diferentes escalas do modelo (Fortes et al., 2008). Os resultados constam das séries de elevação da superfície livre, pressões sobre a estrutura e galgamento. Tratam-se de ensaios de grande complexidade, uma vez que ao longo do domínio intervêm um conjunto de fenómenos que alteram significativamente as características da onda, tais como a rebentação e posterior reflexão na estrutura.

O caso aqui simulado corresponde à geometria dos ensaios acima referidos e consta de uma plataforma horizontal de 10m de profundidade seguida de uma rampa com um declive de 1:20. No final da rampa, é colocada a estrutura marginal, de declive 2:3. A profundidade do canal é de 1.15m. A profundidade junto à estrutura é de 0.216m. A Figura 2 apresenta um esquema do canal utilizado nos ensaios em modelo físico para escala 1:10. É gerada uma onda regular de período  $T=3.79s$  e de altura  $H=0.40m$ , o que corresponde a um comprimento de onda de cerca de 12.05m para uma profundidade de 1.15m.

A repetição dos ensaios permitiu definir o intervalo de variação do caudal médio galgado, muito sensível às condições iniciais e à onda incidente: mínimo de  $0.885 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , máximo de  $1.240 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , media dos ensaios  $1.070 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

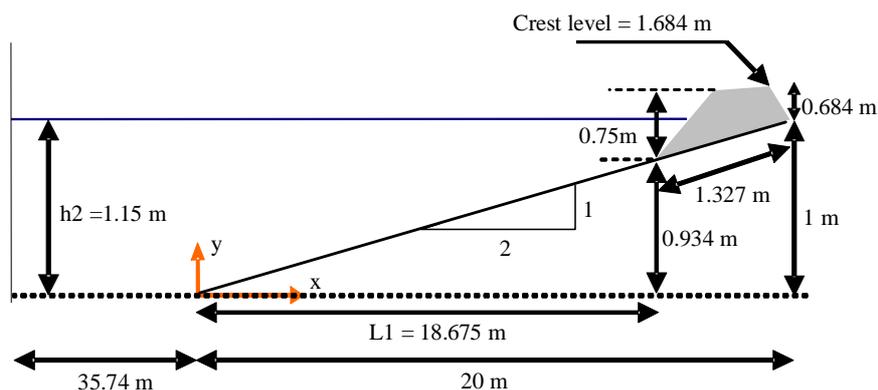


Figura 2. Esquema do canal utilizado nos ensaios em modelo físico para escala 1:10.

#### 4.2. Aplicação do modelo SPHysics

As características geométricas da estrutura e do canal utilizadas na aplicação do modelo SPHysics são similares às dos ensaios em modelo físico. O domínio computacional tem um comprimento de 31.2m.

A simulação do escoamento foi realizada para diferentes valores de densidade inicial de partículas, como indicado na Tabela 1. Esta densidade é homogénea no domínio de cálculo: as partículas são inicialmente distribuídas conforme uma grelha cartesiana regular (Figura 3).

Tabela 3. Características do domínio computacional.

Distância inicial Entre partículas, do (m)	Número de partículas na vertical	Número de partículas	Número de partículas por comprimento de onda
$d_{o1}=0.02875$	40	30078	420
$d_{o2}=0.02500$	46	39560	482
$d_{o3}=0.01949$	59	64453	618
$d_{o4}=0.01534$	75	103514	785
$d_{o5}=0.01353$	85	132620	890

A geração das ondas é efectuada através um batedor pistão flexível. Esta técnica permite impôr 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.

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 e a pressão na estrutura. Um tratamento especial é realizado para definir as grandezas características envolvidas no galgamento da estrutura: sonda de 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.

Para o caso  $d_{o2}$ , o tempo de cálculo para um tempo igual ao período da onda é de 3h15mn num computador com processador Intel 2,34 GHz e 2 GB de RAM.

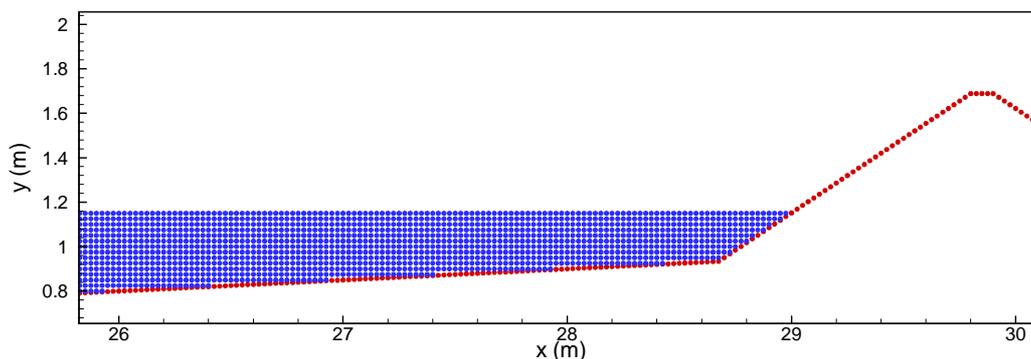


Figura 3. Distribuição inicial das partículas sólidas da fronteira e das partículas fluidas para o caso  $d_o=0.02875$ .

### 4.3. Aplicação do modelo COBRAS-UC

Na aplicação do modelo, as características geométricas da estrutura e do canal foram reproduzidas com as dimensões e características com que foram simuladas no modelo físico (Figura 4).

O domínio de cálculo utilizado foi de 35.5 m de comprimento com uma altura de 2.3 m, estando a superfície livre em repouso a 1.15m.

A malha de cálculo utilizada tem um número total de células de 1452x179. A discretização foi de  $\Delta x=2$  cm e  $\Delta y=1$  cm na zona de máximo detalhe, que corresponde à zona da estrutura (de 23.5m até ao final; ver Figura 5) e uma malha variável na zona próxima da zona de geração.



Figura 4. Malha de cálculo utilizada pelo programa COBRAS-UC.

A geração de ondas foi simulada na fronteira de entrada (fronteira esquerda da malha), onde foram introduzidos os valores da superfície livre e das duas componentes da velocidade ao longo do tempo, podendo considerar-se o caso de um batedor com absorção activa de reflexão ou sem ela.

Neste canal numérico foram colocadas sondas nas mesmas posições que no canal experimental para se poderem fazer comparações das séries temporais obtidas. Foram ainda colocadas mais duas sondas adicionais: uma na zona de geração, que permite controlar a série gerada pelo batedor, e outra na zona do molhe, para o cálculo do volume galgado. Os valores do caudal médio obtidos e da superfície livre medida em diferentes pontos foram comparados com os resultados dos ensaios em modelo físico.

O tempo de simulação foi de 80s. Os casos foram simulados num computador com processador Intel 2,34 GHz e 2 GB de RAM e os tempos de execução médios foram de aproximadamente 24 minutos para cada segundo de simulação.

### 4.4. Sensibilidade dos resultados do modelo SPHysics à densidade inicial das partículas

Apresenta-se aqui a análise de sensibilidade do modelo SPHysics à densidade inicial de partículas, ou seja a análise de convergência, para

- a elevação de superfície livre quando a onda se propaga na zona do canal de profundidade constante,
- a elevação de superfície livre quando a onda se transforma ao longo da rampa,
- o volume galgado ao longo do tempo,
- o caudal médio galgado.

A Figura 5 apresenta a elevação da superfície livre ao pé da rampa,  $x=0.0\text{m}$ , e em duas sondas localizadas na rampa,  $x=7.5\text{m}$  e  $12.0\text{m}$ . Observa-se que a elevação de superfície livre é pouco dependente da discretização, no que diz respeito a propagação da onda, mesmo em águas de profundidade intermédia. A elevação de superfície livre é mais reduzida apenas para a densidade inicial de partículas mais grosseira,  $d_{o2}=0.02875$ . No entanto, enquanto a onda se propaga e se transforma ao longo da rampa, a elevação de superfície livre apresenta diferenças em função da discretização. Assim, a convergência observa-se apenas para as densidades de partículas as mais finas, ou seja,  $d_{o2}=0.01533$  e  $d_{o2}=0.01353$ .

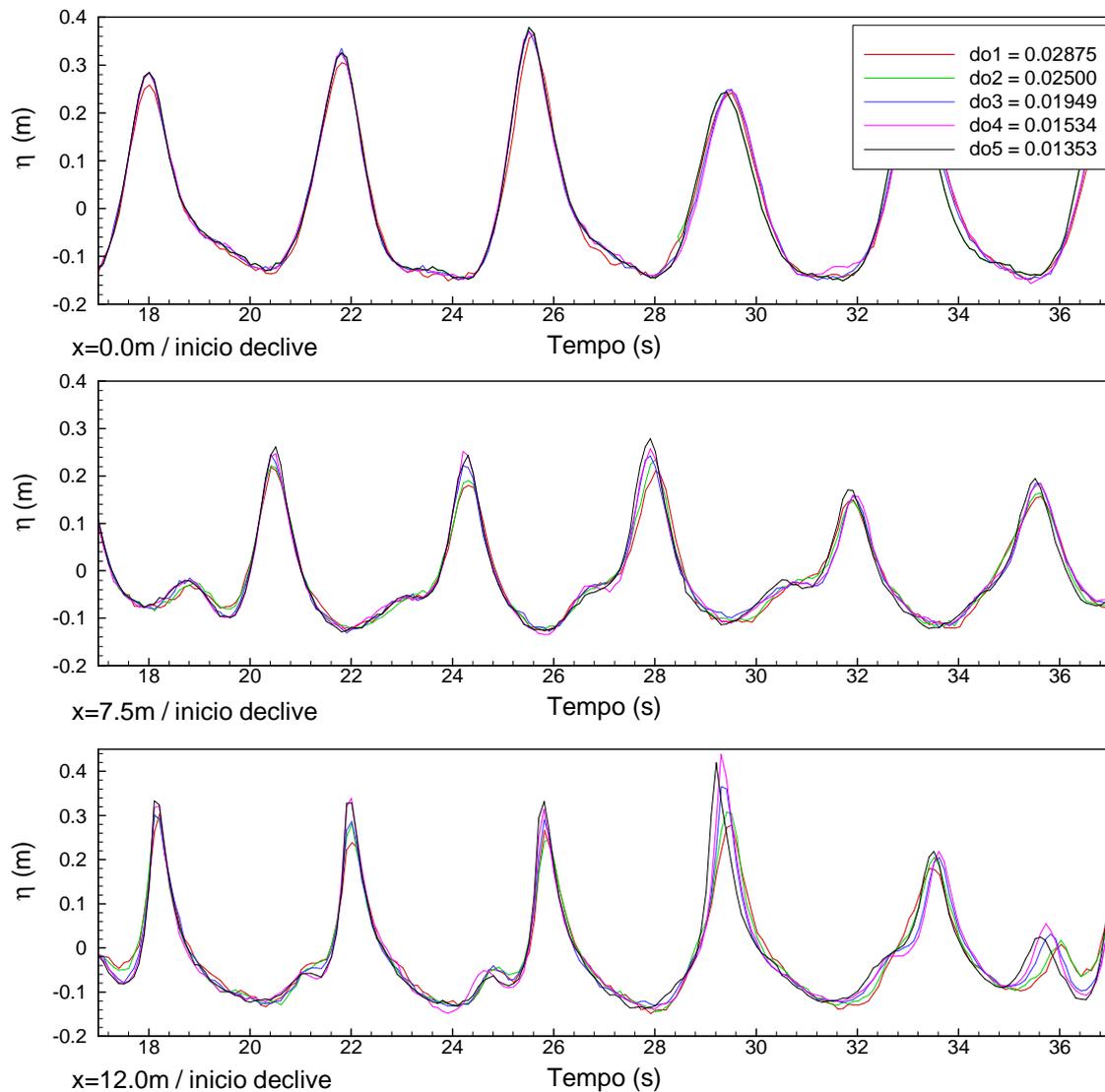


Figura 5. Elevação da superfície livre em três sondas para as diferentes densidade inicial de partículas, entre os instantes 17s e 37s.

Na Figura 6 apresenta-se o volume galgado ao longo do tempo para as diferentes discretizações. Existe uma dispersão importante dos resultados, o que é inevitável, pois o galgamento é um fenómeno muito sensível às condições iniciais, ou seja, à forma da onda incidente, à sua transformação ao longo da rampa e também à rebentação. Uma interacção muito forte existe também entre a onda incidente e a onda reflectida pela estrutura, o que torna os fenómenos de interacção ainda mais complexos. Os volumes galgados calculados podem ter valores muito diferentes conforme o nível de discretização: mais de 200% de diferença entre o caso  $d_{o2}=0.02500$  e  $d_{o3}=0.01949$ . No entanto, pode-se distinguir uma tendência de convergência entre os resultados com o refinamento da densidade inicial das partículas. A evolução do volume galgado, ao longo do tempo, para os dois casos,  $d_{o4}=0.01534$  e  $d_{o5}=0.01353$ , que correspondem a discretização mais fina, é, de forma global, muito similar.

A determinação do volume galgado está também fortemente ligado à discretização, pois este volume é calculo contabilizando as partículas fluidas que passam em cima do coroamento da estrutura. A distribuição regular inicial das partículas implica que estas tenham o mesmo volume, sendo assim o volume ao longo do tempo definido pelo número de partículas que galgam a estrutura. No entanto, o volume de uma partícula fluida varia de  $8.27 \times 10^{-4}$  a  $1.83 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$  (em 2D), conforme a densidade inicial das partículas utilizada no presente estudo, ou seja com um rácio de 4.5. A rebentação e o galgamento são também muito sensíveis ao volume associado às partículas. A forma da rebentação pode ser alterada: a rebentação mergulhante pode degenerar em espraiamento sem rebentação na estrutura, por exemplo. O galgamento pode ser significativamente alterado, largamente sub ou sobrestimado ou eventualmente desaparecer.

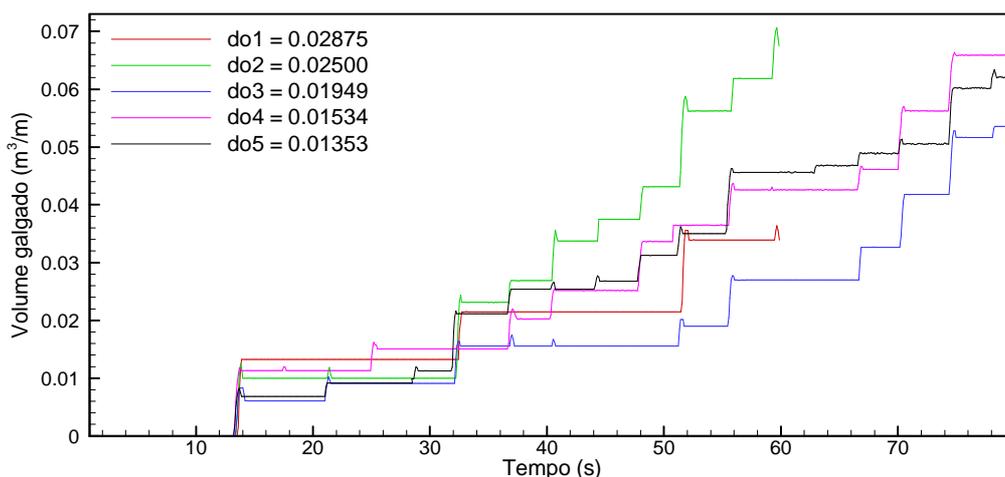


Figura 6. Volume galgado para as diferentes densidades iniciais de partículas.

Como já foi referido anteriormente, é difícil encontrar uma convergência franca no que diz respeito ao volume galgado ao longo do tempo. A mesma tendência observa-se na Figura 7 para o caudal médio galgado. Os resultados obtidos para as diferentes discretizações são ainda comparados com os resultados dos ensaios em modelo físico. Os dados experimentais são apresentados considerando o caudal médio galgado mínimo e máximo das várias repetições do mesmo ensaio. Para as discretizações grosseiras, o caudal médio galgado é muito pequeno, caso  $d_{o1}=0.02875$ , ou muito grande, caso  $d_{o2}=0.02500$ . Isto deve-se a que os volumes associados às partículas são demasiado grandes para modelar correctamente as interacções entre partículas fluidas (rebentação) e partículas sólidas da estrutura (galgamento). No entanto, observa-se uma tendência de convergência com a densidade inicial de partículas, tendência que deverá ser confirmada considerando discretizações ainda mais finas que a do caso  $d_{o5}=0.01353$ . O caudal médio galgado, calculado entre a terceira e sétima onda (antes de se dar re-reflecção das ondas no batedor), apresenta uma boa concordância com as medições em modelo físico, pois encontra-se no intervalo definido pelos ensaios.

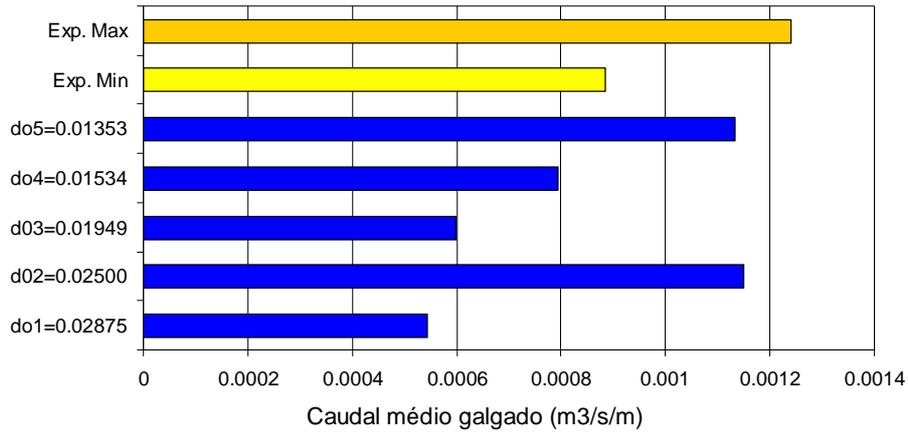


Figura 7. Comparação do caudal médio galgado para as diferentes densidades iniciais de partículas com os resultados dos ensaios em modelo físico. Escala 1:10.

#### 4.5. Comparação dos resultados dos modelos SPHysics e COBRAS-UC com os ensaios

Comparam-se aqui os resultados numéricos obtidos pelo modelo SPHysics, para a discretização mais fina  $d_{o5}=0.01353$ , e pelo modelo COBRAS-UC com os dados de ensaios em modelo físico a escala 1:10 (Fortes et al., 2008).

Na Figura 8 apresenta-se a elevação da superfície livre em duas sondas localizadas a 7.5m e a 12.0m do pé da rampa. Observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os ensaios, embora, para a sonda a 7.5m, no caso do modelo COBRAS-UC, as cristas das ondas apresentarem um valor superior às obtidas com o modelo SPHysics e às medidas nos ensaios. Para a sonda a 12.0m, as diferenças entre os dois modelos e os ensaios não são tão significativas.

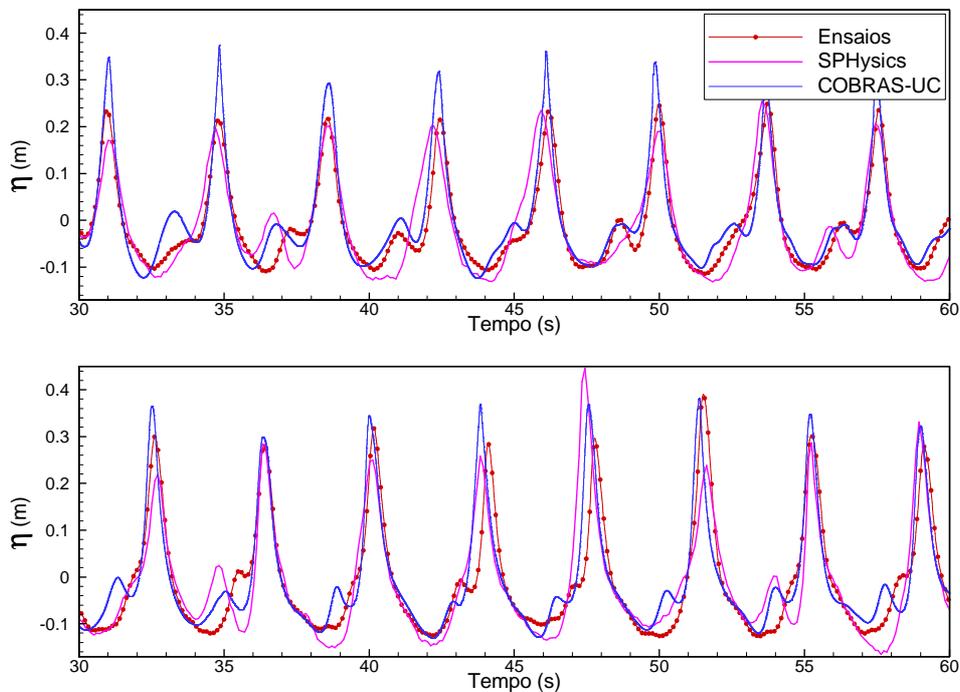


Figura 8. Elevação da superfície livre nas sondas posicionadas a 7.5m e 12.0m do pé da rampa: Comparação dos modelos SPHysics e COBRAS-UC com os ensaios.

Na figura 9 apresenta-se o volume galgado obtido pelos modelos SPHysics e COBRAS-UC ao longo do tempo, no intervalo de tempo de 0s a 45s. Embora o volume galgado ao longo do tempo evolua de forma diferente, observa-se uma tendência similar.

O caudal médio galgado é calculado entre a terceira e sétima onda (antes da re-reflecção das ondas no bater). Na figura 10 observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos dos dois modelos e os ensaios. Os caudais médios galgados calculados numericamente encontram-se no intervalo definido pelos ensaios.

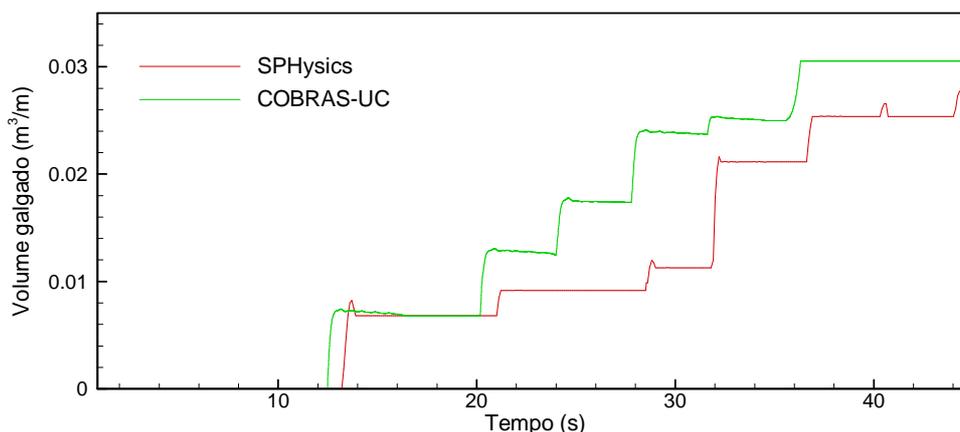


Figura 9. Comparação do volume galgado obtido com SPHysics e COBRAS-UC.

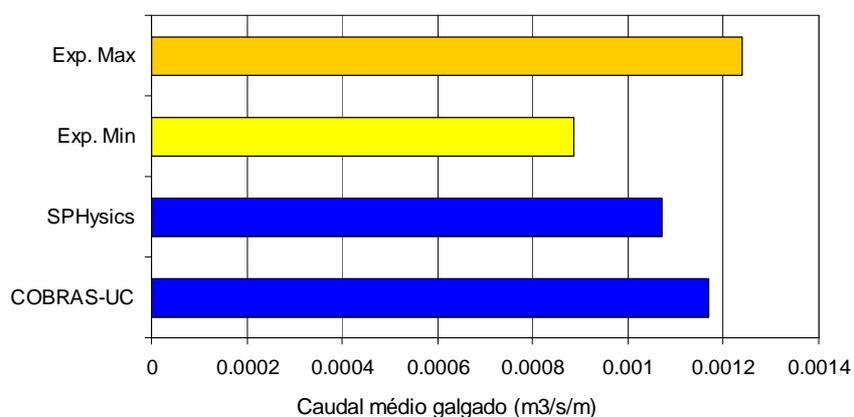


Figura 10. Comparação do caudal médio galgado obtido com SPHysics e COBRAS-UC com o mínimo e máximo dos ensaios em modelo físico à escala 1:10.

#### 4. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

A modelação do galgamento de estruturas costeiras é classicamente realizada por ensaios físicos em modelo reduzido. No entanto os modelos numéricos aparecem actualmente como um complemento à modelação física.

Os modelos Eulerianos, como o modelo COBRAS-UC que utiliza um método VOF para a modelação da superfície livre, permitem modelar escoamentos complexos que envolvem rebentação e galgamento de estruturas costeiras. Recentemente, os modelos Lagrangianos, como o modelo SPHysics, conheceram um desenvolvimento acelerado e as aplicações a escoamentos com superfície livre são muito recentes. Os modelos SPH apresentam uma opção muito atractiva para modelação de fenómenos complexos com superfície livre, como a rebentação e o galgamento de estruturas, pois não necessitam de malha.

O estudo de convergência do modelo SPPhysics com a densidade inicial de partículas mostrou que a modelação da transformação das ondas e, especialmente, o galgamento (que depende fortemente da onda incidente e da rebentação da onda) é muito sensível à discretização. É assim difícil encontrar uma convergência franca no que diz respeito ao volume galgado ao longo do tempo e ao caudal médio galgado. No entanto, observa-se uma tendência de convergência com a densidade inicial de partículas, tendência que deverá ser confirmada considerando discretizações mais finas.

Os resultados dos modelos numéricos SPPhysics e COBRAS-UC foram comparados com os resultados dos ensaios em canal à escala 1:10. A elevação de superfície livre apresenta uma boa concordância com os ensaios, embora, no caso do modelo COBRAS-UC, as cristas das ondas apresentem um valor superior às obtidas com o modelo SPPhysics e às medidas. O caudal médio galgado, calculado entre a terceira e sétima onda (antes da re-reflecção das ondas no batedor), é bem estimado pelos dois modelos pois encontra-se no intervalo definido pelos ensaios.

Resumindo, os dois modelos numéricos, que apresentam, cada um, vantagens e limitações, permitiram obter resultados de elevação de superfície livre e caudal médio galgado similares aos ensaios em modelo físico. No entanto, é necessário efectuar um estudo numérico de sensibilidade do modelo COBRAS-UC às dimensões da malha, no que diz respeito ao galgamento, particularmente no presente caso em que os volumes galgados são muito pequenos. O modelo SPPhysics apresenta-se também como uma opção atractiva para modelação de escoamentos com superfície livre. No entanto, a sensibilidade do modelo a vários parâmetros devem ser ainda analisados. A convergência dos resultados deve também ser confirmada considerando densidades iniciais de partículas mais finas que às utilizadas na presente comunicação. O modelo actual permite apenas considerar estruturas impermeáveis. Os desenvolvimentos futuros consistem na implementação de estruturas porosas, o acoplamento com um programa de propagação de ondas e a absorção dinâmica das ondas reflectidas pela estrutura.

A aplicação dos modelos SPPhysics e COBRAS-UC a estruturas costeiras à escala do protótipo faz também parte dos objectivos dos presentes projectos de desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FCT o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007. Os autores agradecem ao Projecto de Investigação Programada do LNEC, "Comportamento de Estruturas Marítimas" e a permissão dada para a utilização dos dados experimentais obtidos no âmbito do projecto HYDRALAB III, projecto inserido no Research Infrastructures Program of FP6, Contracto N. 022441. Os autores agradecem ainda ao Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantábria) a permissão para a utilização do modelo COBRAS-UC.

## REFERENCIAS

- J.L. Lara, N. Garcia, I.J. Losada, RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, *Coastal Engineering*, 53(5-6), pp 395-417, 2006.
- C.W. Hirt and B.D. Nichols, Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39, pp 201-225, 1981.
- R.A. Dalrymple, B.D. Rogers, Numerical modeling of water waves with the SPH method, *Coastal Engineering*, 53(2-3), pp 141-147, 2006.
- University of Manchester. SPHYSICS Home Page. <[wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/SPHYSICS\\_Home\\_Page](http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/SPHYSICS_Home_Page)>, 2007.
- E. Didier, M.G. Neves, Estudo da interacção onda-estrutura utilizando um modelo numérico Lagrangiano. *Revista Recursos Hidricos*, 29(2), pp 15-26, 2008.

- C.J. Fortes, M.G. Neves, J.A. Santos, R. Capitão, A. Palha, R. Lemos, L. Pinheiro, I. Sousa, A methodology for the analysis of physical model scale effects on the simulation of wave propagation up to wave breaking. Preliminary physical model results, *Proc. OMAE2008*.
- R.A. Gingold, J.J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, pp 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.
- J.J. Monaghan, Smoothed Particles Hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, pp 543-574, 1992.
- J.P. Morris, P.J. Fox, Y. Shu, Modeling lower Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of Computational Physics*, 136, pp 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), pp 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), pp 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), pp 787-800, 2003.
- J.J. Monaghan, On the problem of penetration in particle methods, *Journal Computational Physics*, 82, pp 1-15, 1989.
- 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*, pp 357-364, Nantes, França, 2009a.
- J.J. Monaghan, A. Kos, Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 125, pp 145-154, 1999.
- E. Didier, M.G. Neves, Aplicação de um método Lagrangiano para a modelação de escoamento com superfície livre e de interação onda-estrutura costeira, *Proc. MEFTE*, Bragança, Portugal, 2009b.