

# Aplicação de um método Lagrangiano para a modelação de escoamento com superfície livre e de interacção onda-estrutura costeira

Eric Didier<sup>1,2</sup> e Maria Graça Neves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LNEC, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Av. do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

email: [edidier@lneec.pt](mailto:edidier@lneec.pt) <http://www.lneec.pt>

<sup>2</sup>MARETEC, IST, 10149-001, Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*Diferentes modelos e métodos foram desenvolvidos, tendo como base a abordagem Lagrangiana, e são geralmente conhecidos genericamente como modelos SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Neste artigo apresentam-se as potencialidades de um método Lagrangiano na modelação de escoamentos com superfície livre, o modelo SPHysics, através da sua aplicação a diferentes casos de interacção entre ondas e estruturas costeiras.*

---

**Palavras-chave:** CFD; Método Lagrangiano; Smoothed Particle Hydrodynamics; Estruturas Marítimas.

## 1 Introdução

A modelação numérica da interacção entre ondas e estruturas costeiras implica a utilização de modelos aplicáveis a escoamento com superfície livre. Ao longo das últimas décadas, numerosos modelos de propagação de ondas, com diferentes níveis de complexidade, foram desenvolvidos aproveitando a evolução dos métodos numéricos. Estes diferentes modelos apresentam vantagens e desvantagens que condicionam o seu domínio de aplicação. Os modelos não lineares integrados na vertical que resolvem as equações não lineares de Boussinesq, como o COULWAVE [1], permitem obter a deformação da superfície livre mas são limitados a declives suaves. Estes modelos podem modelar o run-up mas não o galgamento. Modelos de elementos de contorno não lineares, como o programa CANAL [2] que resolve as equações de Euler, permitem obter a deformação de superfície livre, o campo de velocidade e pressão sem ter limitação de topografia. No entanto, estes modelos não têm capacidade de modelar deformações complexas da superfície livre, como a rebentação das ondas. Modelos baseados nas equações de Navier-stokes, como o código FLUINCO [3], permitem modelar escoamentos com superfície livre através de uma condição cinemática aplicada à superfície livre que condiciona a deformação da malha dinâmica. Os campos de velocidade e pressão são obtidos em todo o domínio fluido e não existe limitação na geometria das fronteiras. No entanto, este tipo de modelo não permite modelar a rebentação das ondas. Os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes que incluem um método de captura de interface permitem também modelar escoamentos com superfície livre. O programa COBRAS-UC [4], em que o método de captura de superfície livre implementado é de tipo VoF (Volume of Fluid), permite não só modelar a propagação das ondas mas também fenómenos como a rebentação e o galgamento. A interacção entre ondas e estruturas costeiras pode ser assim directamente modelada. No entanto, podem aparecer dificuldades numéricas quando pequenos volumes de água são libertados, como pode ocorrer, por exemplo, no caso de rebentação ou de interacção com um obstáculo. O método VoF requer também tratamentos específicos para controlar a difusão da fracção de volume que permite determinar a posição da superfície livre.

Os diferentes modelos apresentados anteriormente são baseados na abordagem Euleriana, ou seja, apoiam-se num malha fixa ou dinâmica. Na última década os métodos numéricos baseados na abordagem Lagrangiana foram objecto de um desenvolvimento acelerado, principalmente favorecido pela capacidade computacional dos meios de cálculo.

A abordagem Lagrangiana difere da Euleriana principalmente pelas seguintes características: i) o fluido é considerado como um conjunto de partículas que interagem e não necessita de malha; ii) as trajectórias das partículas são modeladas; iii) as quantidades fundamentais, tais como velocidade, pressão, massa volúmica, etc. são transportadas pelas partículas.

Diferentes métodos e modelos, conhecidos genericamente como modelos SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), foram desenvolvidos tendo como base a abordagem Lagrangiana. Um destes modelos é o

modelo numérico SPHysics [5], que resolve as equações SPH obtidas a partir das equações da dinâmica dos fluidos usando funções de interpolação de um conjunto de pontos. Esta função de interpolação permite modelar a interação entre as partículas e 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. A abordagem Lagrangiana consiste então no seguimento das partículas do fluido ao longo do tempo, de forma a obter a sua trajectória, velocidade e pressão em função da posição da partícula ao longo do tempo. O método difere assim da abordagem Euleriana onde, para um determinado ponto do espaço, se obtém a velocidade e a pressão em função do tempo.

Os modelos Lagrangianos são aplicados em varias áreas, desde a astronomia até à hidrodinâmica. No âmbito de uma linha de investigação e desenvolvimento no Núcleo de Portos e Estrutura Marítimas do LNEC, o modelo SPHysics é utilizado na modelação de propagação das ondas e de interação entre ondas e estruturas costeiras [6]. A formulação SPH é efectivamente uma alternativa muito atractiva para modelar os escoamentos complexos que se desenvolvem nesta configuração.

O modelo Lagrangiano SPHysics é analisado comparando resultados numéricos com dados experimentais obtidos em ensaios em modelo físico de estruturas impermeáveis onde aparecem fenómenos complexos fortemente não lineares, como o espraçamento na estrutura, a rebentação da onda e o galgamento.

## 2 Método e modelo numérico Lagrangiano

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica por Gingold e Monaghan em 1977 [7] e foram aplicados mais tarde à hidrodinâmica por Monaghan, em 1994 [8]. 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 interação 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  $b$ .

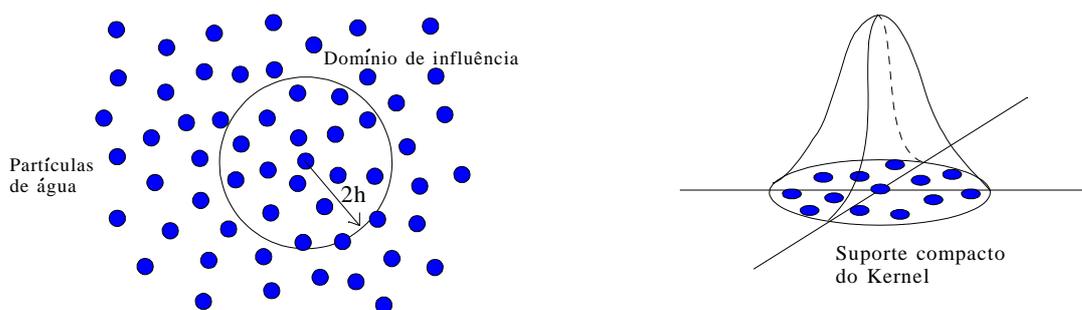


Fig.1. Suporte compacto do kernel e partículas que contribuem para a interpolação.

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 interacção 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 [9].

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 Equações da dinâmica dos fluidos

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, são implementados três modelos para os termos viscosos  $\Pi_{ab}$ : viscosidade artificial [10], viscosidade laminar [11] e modelo de turbulência *Sub-Particle Scale*, desenvolvido por Gotoh et al. [12]. 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 pouco compressível o que permite relacionar a pressão no fluido com a densidade a traves a equação de estado [13] 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. [14], Shao e Lo [15]). Com a hipótese de fluido pouco compressível, a variação de densidade é inferior a 1%, como foi mostrado por Dalrymple e Rogers [16].

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, descrito por Monaghan [17], 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 deslocação das partículas no caso da modelação da propagação das ondas, como foi mostrado por Didier e Neves [18]. 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 propostas por Monaghan e Kos [19].

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.

### 3 Validação do modelo SPH

A modelação numérica do galgamento de uma estrutura costeira é um problema de elevada complexidade por causa dos fenómenos complexos que ocorrem durante este evento: propagação e transformação da onda na região junto à costa, rebentação, espraiamento, reflexão, interacção entre onda incidente e onda reflectida e galgamento.

O galgamento de uma estrutura costeira impermeável é modelado numericamente para validar o modelo SPH. Os resultados do volume médio galgado obtidos com o modelo SPHysics são comparados com outros resultados numéricos e com dados experimentais. Os ensaios em modelo físico foram colectados por Saville (de Shao et al. [20]), para ondas regulares e varias alturas, períodos e profundidade de água.

Das diferentes configurações ensaiadas, quatro são modeladas no presente estudo de validação. As características geométricas principais são apresentadas na Tabela 1. A Figura 2 apresenta o perfil do canal e as notações utilizadas. O declive do fundo é de 1:10 e o da estrutura é de 1:3. Apenas são alterados os valores da profundidade ao pé da estrutura,  $d_s$ , e da cota do coroamento da estrutura acima do nível de água em repouso,  $R_c$ . As características da onda são iguais para as quatro configurações: período da onda  $T=4.73s$ , altura da onda  $H=1.0m$  e profundidade do canal de  $d=3.0m$ . Com estas características o comprimento da onda,  $L$ , é de 23.4m.

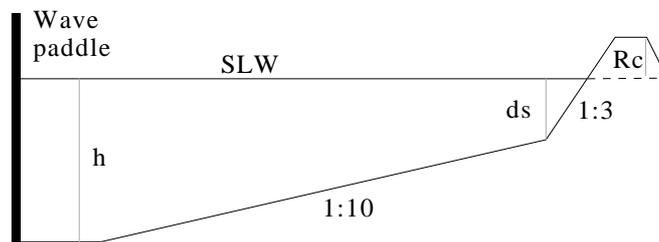
Um estudo de convergência com a densidade das partículas, realizado por Didier e Neves [18], revelou que uma densidade de partículas inicial, que corresponde a uma distância de 0.05m entre partículas, é suficiente para obter resultados praticamente independentes da densidade inicial de partículas. O modelo de turbulência SPS é utilizado assim como o kernel *quadratic*. O passo de tempo médio é de  $1.3 \cdot 10^{-4}s$  e a simulação é realizada para 100.0s. Na configuração 1, com uma distância inicial entre as partículas de 0.05m, o domínio é constituído de 20618 partículas, sendo as fronteiras constituídas por 863 partículas sólidas.

**Tabela 1.** Características geométricas da estrutura.

	$ds$ (m)	$Rc$ (m)	Número de partículas
Configuração 1	0.75	0.5	20618
Configuração 2	0.75	1.0	20658
Configuração 3	1.50	0.5	18113
Configuração 4	1.50	1.0	18143

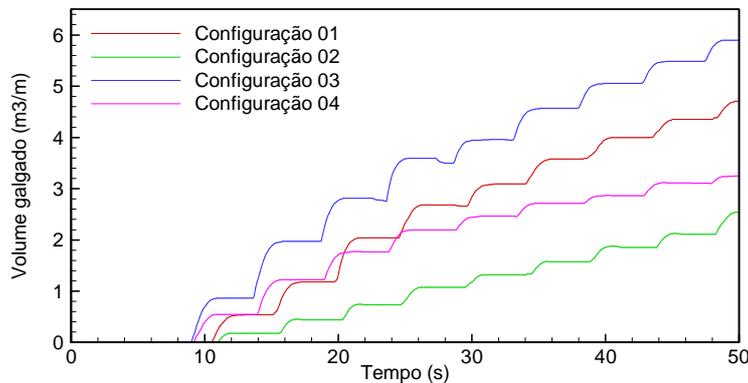
O batedor pistão situado à esquerda do canal é animado de um movimento harmónico com uma amplitude de 0.624m e permite gerar uma onda regular. O batedor não permite absorver as ondas reflectidas pela estrutura.

Para calcular o volume galgado sobre a estrutura, uma sonda é colocada no início do seu coroamento. O cálculo do volume galgado é fácil, pois a cada partícula é associado um volume e uma massa volúmica. O galgamento médio é estimado entre a segunda e sexta onda quando a interação entre a onda e a estrutura é relativamente periódica e antes da re-reflexão da onda no batedor se tornar excessiva.



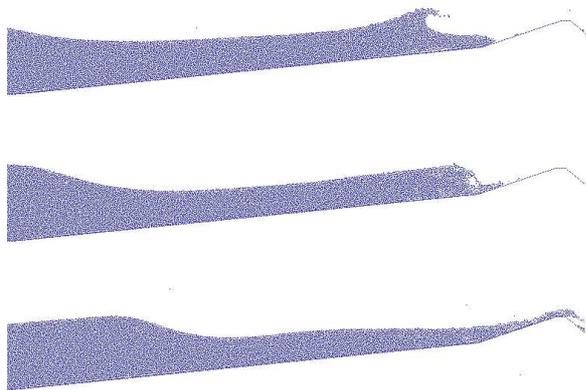
**Fig.2.** Perfil do fundo e da estrutura costeira e notações.

A Figura 3 apresenta a evolução do volume galgado ao longo do tempo. Como é de esperar, o volume galgado diminui quando a altura do coroamento da estrutura aumenta. Assim o volume galgado nas configurações 1 e 3 é superior ao volume galgado nas configurações 2 e 4. Observa-se também que existe uma influência da profundidade ao pé da estrutura. Esta profundidade determina o comprimento do declive da estrutura, o que se traduz por um acentuar do declive do fundo nas proximidades da estrutura. Assim, para um mesmo  $Rc$ , o galgamento aumenta quando a profundidade ao pé da estrutura,  $ds$ , aumenta. A intensidade do galgamento está ligada à energia da onda, ou seja, o galgamento aumenta quando a energia da onda nas proximidades da estrutura aumenta. Nas configurações 1 e 2 a rebentação é do tipo mergulhante, com a crista da onda a dobrar-se e rebentando sobre a estrutura (Figura 4), enquanto que, nas configurações 3 e 4, a rebentação é do tipo rebentação de fundo, onde a crista não chega a rebentar mas a frente da mesma espraia-se sobre o talude (Figura 5). A rebentação de fundo é mais energética que a rebentação mergulhante e o galgamento associado é maior, como se observa na Figura 3.

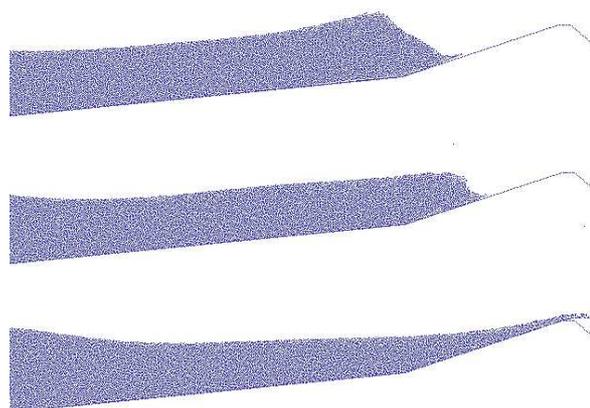


**Fig.3.** Volume galgado ao longo do tempo para as quatro configurações.

Os resultados numéricos são comparados com os dados experimentais de Saville (de Shao et al. [20]) e os resultados numéricos de Kobayashi e Wurjanto [21], Hu et al. [22] and Shao et al. [20]. O último autor utiliza um modelo SPH baseado na formulação incompressível com uma densidade de partículas correspondente a uma distância de 0.1m entre as partículas. O domínio computacional utilizado tem as mesmas características geométricas que o do presente estudo e é constituído de 5390 partículas.

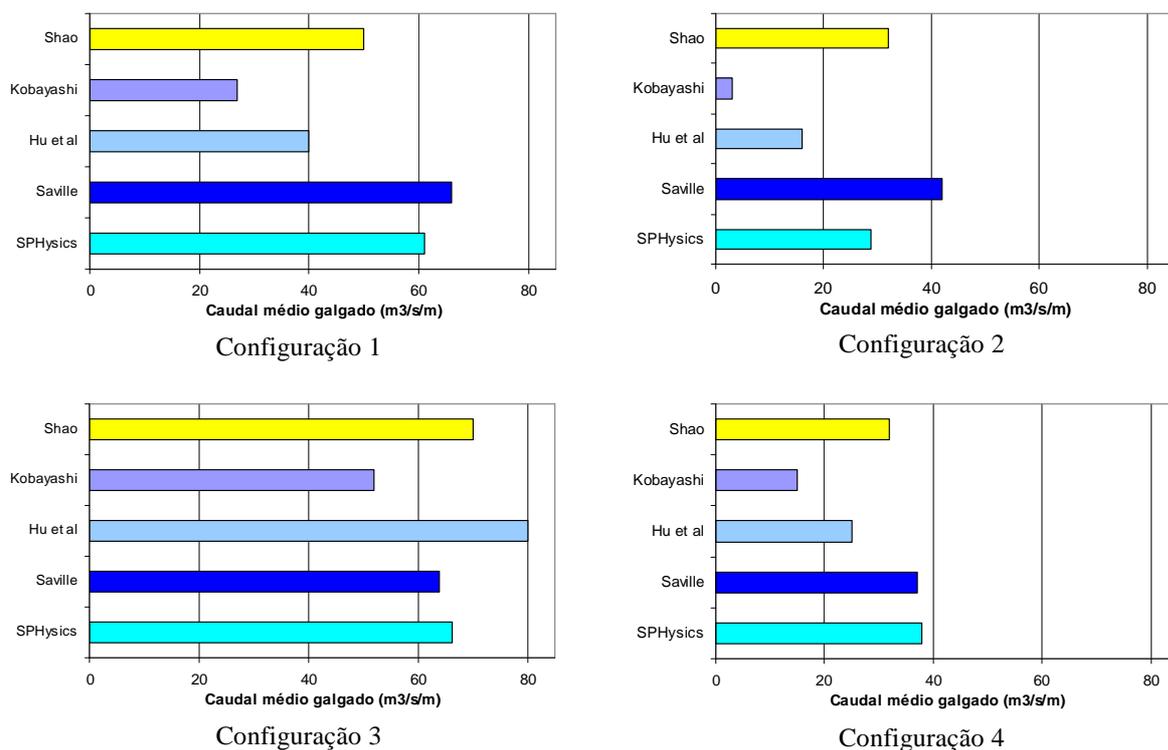


**Fig.4.** Rebentação mergulhante.



**Fig.5.** Rebentação de fundo.

O caudal médio galgado adimensional,  $Q/(H(gH)^{1/2})$ , onde  $g$  é a gravidade,  $H$  a altura da onda e  $Q$  o caudal médio galgado, é apresentado na Figura 6, para as quatro configurações. Os resultados obtidos com o modelo SPHysics apresentam boa concordância com os dados experimentais de Saville para as diferentes configurações. Para as configurações 1, 3 e 4, o erro, comparando com os dados experimentais, é inferior a 7%, mas para o caso 2 o erro atinge 20%. Para a configuração 1, por exemplo, o erro na estimação do volume médio galgado é de 7% para o modelo SPHysics, 24% para o modelo SPH de Shao et al. [20], 40% e 60% para os modelos de Kobayashi e Wurjanto [21] e Hu et al. [22], respectivamente.



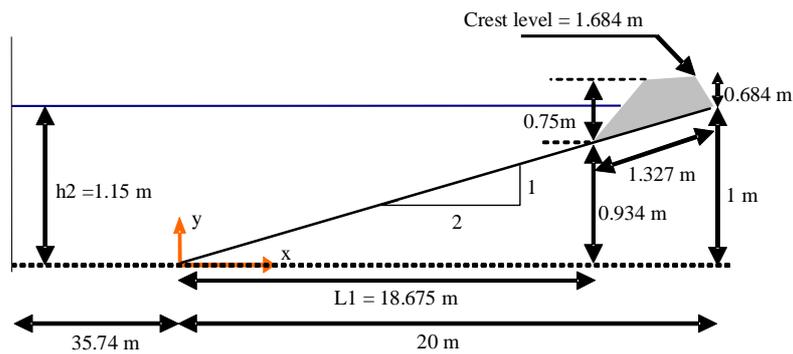
**Fig.6.** Caudal médio galgado adimensional para as quatro configurações.

#### 4 Modelação de uma estrutura costeira típica da costa Portuguesa

Foram realizados no LNEC ensaios em canal da propagação de ondas sobre uma praia de inclinação constante de 1:20, que termina numa estrutura de protecção marginal [23]. 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. Numerosos ensaios foram realizados em dois canais do LNEC. O caso apresentado a seguir corresponde aos ensaios realizados no canal de maiores dimensões do LNEC, com 3.0m de largura, 73.0m de comprimento e 2.0m de altura. Os resultados constam das séries de elevação da superfície livre em várias secções do canal, da pressão sobre a estrutura e do 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 10.0 m de profundidade seguida de uma rampa com um declive de 1:20 com um comprimento de 18.675m até ao pé da estrutura. É de salientar que nos ensaios em modelo físico esta plataforma tem um comprimento de 35.74m. No final da rampa, é colocada a estrutura marginal impermeável, de declive 2:3 (Figura 7). A profundidade junto à estrutura é de 0.216m. A onda é regular com um período  $T=3.79s$  e uma altura  $H=0.40m$ , a que corresponde um comprimento de onda,  $L$ , de cerca de 12.0m.



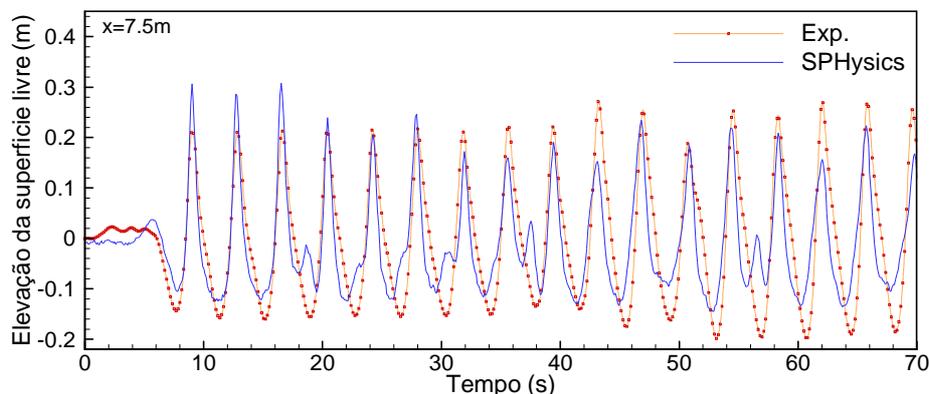
**Fig.7.** Secção do canal utilizado nos ensaios em modelo físico e respectivas dimensões.

O domínio computacional é constituído de 62000 partículas com uma distância inicial entre partículas de 0.02m. O modelo de turbulência SPS é utilizado assim como o kernel *quadratic*.

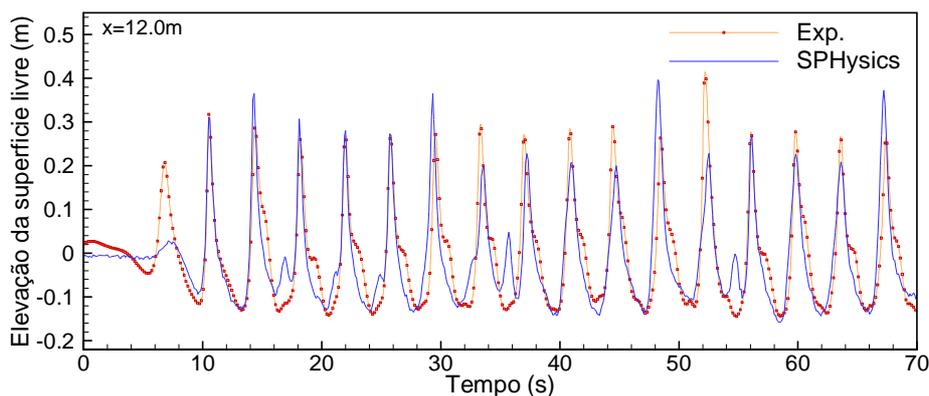
Para a simulação com o modelo SPHysics, foi considerado um batedor de tipo pistão flexível sem absorção dinâmica de reflexão, situado à esquerda do domínio computacional. O batedor flexível permite impôr um perfil de velocidade horizontal da onda. Este modo de geração permite modelar uma onda mais similar à onda dos ensaios e que se adapta rapidamente ao fundo. Caso a onda fosse gerada através de um batedor pistão, a distância necessária para a onda se adaptar ao fundo seria maior.

A simulação numérica foi realizada por um tempo total de 70s, com um passo de tempo médio de  $10^{-4}s$ .

As Figuras 8 e 9 apresentam a série temporal da elevação de superfície livre nas sondas localizadas a 7.5m e 12.0m do início do declive. Observa-se uma boa concordância geral entre os resultados numéricos e as medições dos ensaios.

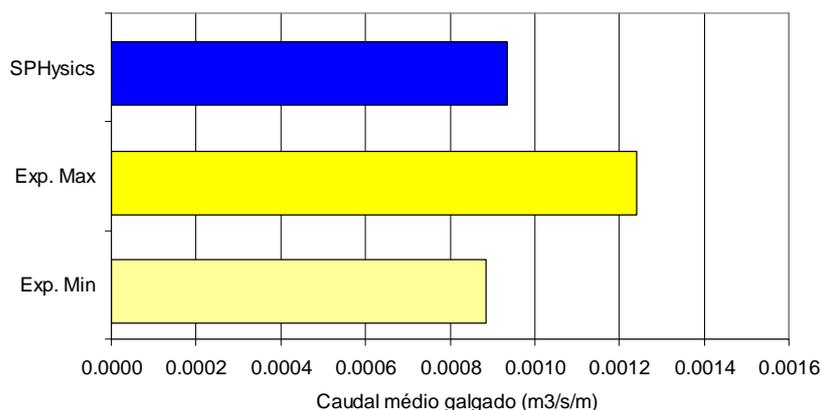


**Fig.8.** Elevação de superfície livre a 7.5m do início do declive: comparação entre resultados numéricos e experimentais.



**Fig.9.** Elevação de superfície livre a 12.0m do início do declive: comparação entre resultados numéricos e experimentais.

A Figura 10 apresenta o galgamento médio, ou seja o caudal médio galgado sobre a estrutura, por metro linear de estrutura, e compara os resultados numéricos com os dados experimentais. O modelo SPH não permite modelar muitas ondas devido ao tempo de cálculo, que se torna rapidamente proibitivo, e ao facto de o batedor utilizado não permitir absorver as ondas reflectidas pela estrutura, o que pode induzir a uma alteração da intensidade do galgamento. O galgamento médio é assim calculado entre a segunda e a sétima onda. Para o caso considerado, os ensaios em modelo físico foram repetidos seis vezes, o que permite definir um intervalo de confiança para o valor do galgamento. Como se pode verificar os resultados numéricos e experimentais são similares e a estimativa numérica do caudal médio galgado está incluída no intervalo de confiança definido experimentalmente.

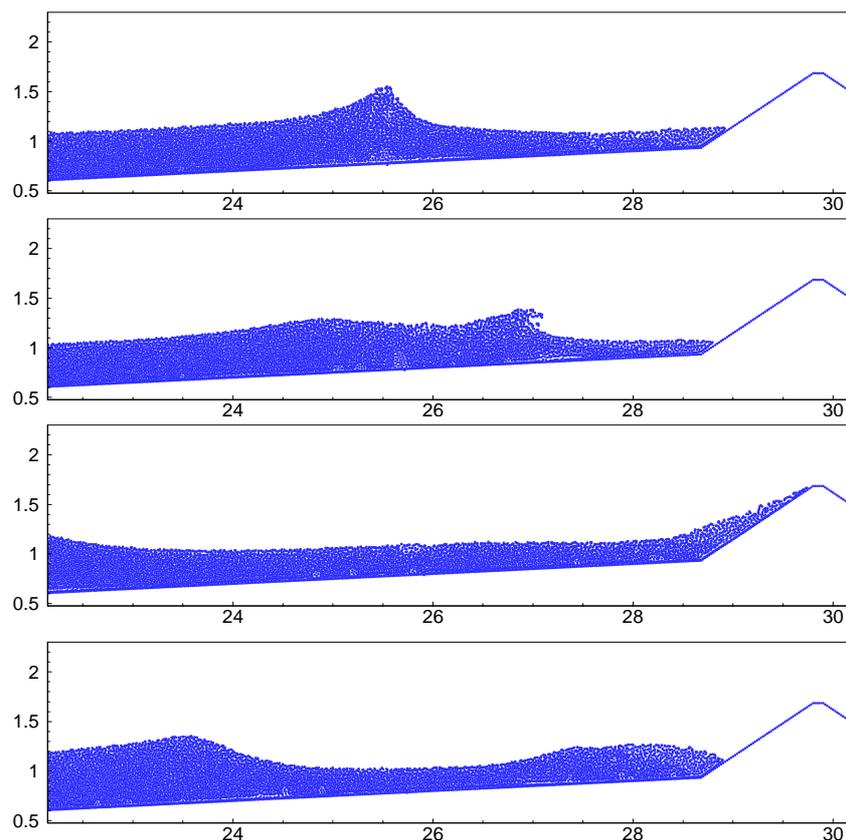


**Fig.10.** caudal médio galgado: comparação entre o resultado numérico e os dados experimentais.

Na Figura 11 apresentam-se, para quatro instantes, a posição das partículas na proximidade da estrutura costeira. Observa-se a capacidade do método SPH para modelar fenómenos muito complexos que ocorrem na interacção entre uma onda e uma estrutura, como o espriamento, a interacção entre onda incidente e reflectida pela estrutura e o galgamento.

## 5 Conclusões

Os modelos numéricos baseados no método SPH apresentam-se como uma opção muito atractiva para modelar a interacção entre ondas e estruturas costeiras, particularmente no que diz respeito ao espriamento, à rebentação da onda e ao galgamento, fenómenos que ocorrem nas aplicações práticas de engenharia costeira. Para estudos locais de interacção ondas-estrutura, como é o caso das estruturas costeiras, o método SPH é atractivo pois o modelo aplica-se de forma muito natural. A modelação numérica pode apresentar-se também como um complemento atractivo à modelação física.



**Fig.11.** Posição das partículas na proximidade da estrutura costeira a diferentes instantes.

Neste artigo, o modelo numérico SPHysics é utilizado no estudo da interacção entre ondas e estruturas costeiras impermeáveis. A validação do modelo foi comprovada considerando quatro configurações de estruturas costeiras e comparando o galgamento médio sobre a estrutura calculado numericamente e obtido em modelo físico. O erro dos resultados numéricos, comparando com o experimental, é inferior a 7% para três configurações e apenas uma configuração apresenta um erro de 20%. Considerando a complexidade dos diferentes fenómenos envolvidos no galgamento, resultante não só da própria propagação e transformação da onda, mas também da rebentação e da interacção entre a onda incidente e reflectida pela estrutura, estes resultados são muito satisfatórios. Os resultados dos outros programas numéricos aplicados ao mesmo caso, baseados na formulação Euleriana, apresentam erros superiores aos encontrados com o modelo SPH.

O modelo numérico foi ainda utilizado para modelar a propagação de onda e a sua interacção com uma estrutura costeira impermeável, típica da costa Portuguesa, para a qual existem resultados de ensaios em modelo físico. Os resultados da elevação de superfície livre e do galgamento apresentam uma muito boa concordância com as medições experimentais.

Os diferentes resultados apresentados mostram que o modelo SPH é uma ferramenta promissora que poderá ser utilizada em aplicações práticas de engenharia costeira no futuro.

### 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.

### Referências

1. P. Lynett e PL-F Liu, Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package, 2004.
2. A.H. Clément, Coupling of two absorbing boundary conditions for 2D time-domain simulations of free surface gravity waves, *J. Comp. Physics*, 126 139-151, 1996.

3. P.R.F. Teixeira, Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos. Porto Alegre. Tese de doutorado, PPGEC-UFRGS, 2001.
4. J.L. Lara, N. Garcia, I.J. Losada, RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, *Coastal Engineering*, 53(5-6) 395-417, 2006.
5. University of Manchester. SPHYSICS Home Page. <wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/SPHYSICS\_Home\_Page>, 2007.
6. E. Didier, M.G. Neves, Estudo da interação onda-estrutura utilizando um modelo numérico Lagrangiano. *Revista Recursos Hídricos*, 29(2) 15-26, 2008.
7. 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.
8. J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, 110 399-406, 1994.
9. G.R. Liu, *Mesh free methods. Moving beyond the finite element method*. CRC press, 2003.
10. J.J. Monaghan, Smoothed Particles Hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30 543-574, 1992.
11. J.P. Morris, P.J. Fox, Y. Shu, Modeling lower Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of Computational Physics*, 136 214-226, 1997.
12. 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.
13. G.K. Batchelor, *Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, UK, 1974.
14. 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.
15. 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.
16. R.A. Dalrymple, B.D. Rogers, Numerical modeling of water waves with the SPH method, *Coastal Engineering*, 53(2-3) 141-147, 2006.
17. J.J. Monaghan, On the problem of penetration in particle methods, *Journal Computational Physics*, 82 1-15, 1989.
18. 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*, Nantes, França, 2009.
19. J.J. Monaghan, A. Kos, Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 125 145-154, 1999.
20. S.D. Shao, C. Ji, D.I. Graham, D.E. Reeve, P.W. James, A.J. Chadwick, Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model, *Coastal Engineering*, 53 723-735, 2006.
21. N. Kobayashi, A. Wurjanto, Wave overtopping on coastal structures, *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 115 235-251, 1989.
22. K. Hu, C.G. Mingham, D.M. Causon, Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using non-linear shallow water equations, *Coastal Engineering*, 41 433-465, 2000.
23. 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*.