

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DO GALGAMENTO DE UMA ESTRUTURA COSTEIRA IMPERMEÁVEL USANDO UM MODELO LAGRANGIANO

Eric Didier

Engº Mecânico, PhD, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 LISBOA

[edidier@lnec.pt](mailto:edidier@lnec.pt)

Maria da Graça Neves

Engª Civil, PhD, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 LISBOA

[gneves@lnec.pt](mailto:gneves@lnec.pt)

### RESUMO

A aplicação dos modelos Lagrangianos e em particular dos modelos baseados no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* – SPH, à modelação numérica de escoamentos com superfície livre é muito recente, pois os desenvolvimentos destes modelos numéricos decorreram na última década. Os primeiros estudos relacionados com a dinâmica de fluidos consistiram essencialmente em demonstrar a aplicabilidade do método SPH e a sua potencialidade para modelar deformações complexas da superfície livre. A aplicação do método de partículas à engenharia costeira iniciou-se ainda mais recentemente e apenas há dois anos no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC.

A modelação numérica da interacção entre ondas e estruturas costeiras é muito complexa devido aos diversos fenómenos que ocorrem: propagação e transformação da onda, rebentação da onda, reflexão na estrutura, interacção entre onda incidente e reflectida e, por fim, galgamento da estrutura. O galgamento é assim o último fenómeno do processo de interacção onda-estrutura, o que implica que é apenas possível obter resultados precisos do caudal médio galgado se todos os outros fenómenos forem correctamente modelados. Desta forma, o desempenho do modelo numérico deve estar avaliado e validado para cada fenómeno antes de ser utilizado em aplicações práticas de engenharia.

Neste artigo apresenta-se de forma breve o modelo numérico SPHysics, baseado no método SPH, as suas vantagens e limitações. Apresentam-se ainda alguns exemplos de aplicação deste modelo ao estudo da interacção entre ondas e estruturas marítimas que envolvem propagação das ondas, rebentação, espraçamento e galgamento.

**Palavras-chaves:** Modelo Lagrangiano, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, estrutura costeira, rebentação, galgamento.

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de protecção da linha de costa e de condições de abrigo em portos obriga frequentemente à construção de estruturas de protecção marítima cujo objectivo é o de funcionarem como obstáculo à propagação normal das ondas, criando assim áreas onde a agitação marítima é reduzida. O conhecimento do comportamento hidrodinâmico destas estruturas de protecção costeira e portuária é necessário para garantir quer 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 cada vez mais potentes e ao desenvolvimento de modelos numéricos, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se mais atractivo. Os modelos utilizados nestes estudos devem modelar correctamente todos os fenómenos envolvidos no processo, que é complexo e pode envolver diversos processos físicos, tais como o empolamento, a rebentação e o escoamento em meios porosos.

De entre os modelos existentes na literatura e utilizados no LNEC, podem-se destacar três tipos de modelos distintos, dois deles, de tipo Euleriano, já aplicados com bons resultados ao estudo de interacção onda-estrutura, AMAZON (Hu et al., 2000) e COBRAS-UC (Lara et al., 2006), e outro, de tipo Lagrangiano, em fase de desenvolvimento, SPPhysics (SPPhysics, Gómez-Gesteira e Dalrymple, 2004).

O modelo SPPhysics é baseado num método Lagrangiano onde o fluido é representado através de volumes fluidos, que correspondem conceptualmente a partículas que têm uma massa, uma densidade, uma pressão e uma velocidade definidas. O modelo SPPhysics é baseado no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) e permite modelar os escoamentos com superfície livre sem impor condições de fronteira particulares nem realizar nenhum tratamento especial. O método não necessita de malha e só entra no cálculo a parte do espaço ocupado pelo fluido (neste caso, a água). Assim, o método SPH apresenta uma grande potencialidade na simulação de escoamentos complexos, como a interacção onda-estrutura e a rebentação, permitindo obter como resultados valores de diferentes grandezas, tais como o campo de velocidades e pressões, etc., mas exige um elevado tempo de execução e alguns cuidados na determinação das condições limites e dos vários parâmetros do modelo.

As aplicações do modelo SPPhysics apresentadas nesta comunicação permitem ilustrar a modelação de distintos fenómenos (rebentação das ondas, de espraiamento, de *run-down* e *run-up* e de galgamento) que ocorrem na interacção entre uma onda e diversas estruturas marítimas: estrutura costeira impermeável, laje horizontal, estrutura deflectora de ondas e estrutura costeira porosa.

## 2 MODELO NUMÉRICO SP PHYSICS

### 2.1 Características

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977) e aplicados mais tarde à hidrodinâmica (Monaghan, 1994). Neste caso, o fluido é considerado como constituído por partículas, ou seja, por volumes de água. O método SPH, que não necessita de malha, permite modelar as trajectórias das partículas do fluido que interagem entre si segundo as

equações de Navier-Stokes. Numericamente a interacção entre as partículas é assegurada por uma função de interpolação ou kernel de interpolação. As equações, escritas na forma Lagrangiana, resolvem o movimento individual de cada partícula a partir do movimento das partículas que estão à sua volta. A abordagem Lagrangiana consiste no seguimento das partículas do fluido durante um determinado tempo, de forma a obter a sua trajectória, velocidade e pressão em função da posição inicial e do tempo. Difere por isso da abordagem Euleriana onde, para um determinado ponto do espaço, se obtém a velocidade e a pressão em função do tempo e que necessita de uma malha.

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 internacional de investigadores das universidades Johns Hopkins (EUA), de Vigo (Espanha), de Manchester (Reino Unido) e de Roma La Sapienza (Itália) (SPHysics, Gómez-Gesteira e Dalrymple, 2004, Dalrymple e Rogers, 2006). O modelo vem sendo testado e melhorado ao longo dos últimos anos com o objectivo de modelar fenómenos complexos de deformação de superfície livre, como a rebentação, a interacção onda-estrutura, o *sloshing*, a penetração de um objecto no fluido, etc. O modelo SPHysics é um modelo bi e tri dimensional e é composto de dois programas: um programa de pré-processamento para determinar a posição das partículas fronteiras, as condições limites e a distribuição de partículas fluidas e um segundo programa computacional que permite resolver as equações discretizadas e o problema em estudo.

A interpolação é baseada na teoria dos integrais de interpolação que usam kernels de interpolação. Os kernels são funções analíticas que podem ser diferenciadas sem necessitar de uma malha espacial. O kernel permite relacionar as partículas entre elas e pode ser visto como a interacção entre partículas. 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, onde  $h$  é um valor definido pelo utilizador, função da distância inicial entre partículas. Assim, uma partícula está apenas em interacção com as partículas contidas na região definida pelo kernel e cada uma destas partículas tem uma contribuição para o 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 é muito dependente do tipo de kernel, função que deve verificar várias condições matemáticas (Liu, 2003).

O movimento das partículas é definido pela intensidade dos gradientes de pressão, onde a pressão das partículas é calculada a partir da densidade local e da equação de estado. No presente método SPH, usa-se a técnica de compressibilidade artificial, baseada na hipótese de fluido compressível. Assim, a pressão no fluido é modelada através de uma equação de estado, em vez de resolver uma equação de pressão de Poisson, onde o fluido é considerado quase 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 interacções entre as partículas, a equação de movimento permite determinar o movimento de cada partícula através do cálculo das velocidades e das posições das partículas ao longo do tempo.

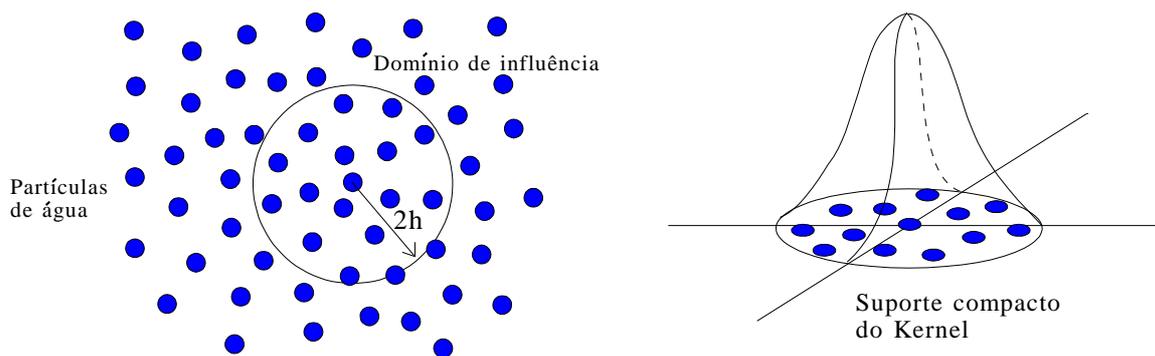


Figura 1 Domínio de influência do kernel e partículas utilizadas para a interpolação e suporte compacto do kernel

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

Do ponto de vista numérico, o método é perfeitamente adaptado à modelação dos escoamentos hidrodinâmicos, pois apenas a parte fluida relativa à água é modelada, ao contrário do que ocorre no caso dos métodos Eulerianos, onde a parte relativa ao ar deve também ser incluída na zona de cálculo.

Como resultados o modelo permite obter valores de pressão, velocidade, vorticidade, posição das partículas e da superfície livre, etc., no espaço e no tempo.

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 cartesiana regular. 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.

Quanto às condições de contorno, estas não aparecem de forma natural no formalismo SPH. Quando uma partícula se aproxima da fronteira sólida, nos somatórios apenas intervêm as partículas situadas no interior do meio fluido, sem qualquer tipo de interação proveniente do exterior. Esta contribuição pode gerar efeitos pouco realistas, já que, enquanto algumas variáveis, como a velocidade, decaem até zero quando se aproximam da fronteira, outras, tal como a densidade, não (Gómez-Gesteira e Dalrymple, 2004). As diferentes soluções empregues para evitar problemas de contorno consistem na geração de uma série de partículas virtuais que caracterizam os limites do sistema (condição de fronteira dinâmica) ou na determinação de uma força de repulsão nas partículas da fronteira (condição de fronteira repulsiva).

Detalhes sobre a teoria SPH e o modelo numérico SPHysics podem ser encontradas no *user guide* do modelo SPHysics (Gómez-Gesteira et al., 2009) e em Didier e Neves, 2008.

## 2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Como todos os modelos numéricos, o método SPH apresenta vantagens e limitações ligadas não só ao método numérico mas também à formulação das equações SPH.

As principais vantagens da técnica SPH, ligadas à sua natureza Lagrangiana, são as seguintes:

- É fácil manter a conservação da massa, pois a massa está directamente ligada às partículas.
- O método, devido à sua formulação, não necessita de uma malha, o que permite considerar geometrias muito complexas, evitando a geração da malha que é sempre uma parte delicada dos métodos Eulerianos.
- A precisão da solução é essencialmente dependente do tipo de Kernel (equivalente a um esquema da discretização nos métodos Eulerianos). Assim, a implementação de um novo Kernel necessita apenas de verificar as propriedades matemáticas da função analítica.
- Os gradientes são directamente obtidos a partir da derivação do Kernel. Não há necessidade duma malha para definir os gradientes.
- É fácil incluir fronteiras e objectos móveis e deformáveis. Por exemplo, uma parede fixa é constituída por partículas fixas, um batedor do tipo pistão é representado por partículas animadas da mesma velocidade de translação.
- O tempo de cálculo é unicamente dedicado à parte onde está localizado o meio a modelar.
- O método Lagrangiano permite modelar deformações extremamente complexas da superfície livre, como a rebentação numa praia ou a interacção onda-estrutura, sem necessitar de condições de fronteiras especiais. O modelo permite ainda simular a penetração dum objecto no fluido ou o deslizamento duma massa sólida numa albufeira.

As desvantagens mais importantes do método SPH são:

- Os gradientes de primeira ordem são razoavelmente bem estimados, mas os gradientes de ordens superiores podem ser estimados de maneira incorrecta em função do tipo de Kernel. A função analítica deve verificar propriedades matemática particulares.
- As condições de fronteiras são normalmente difíceis de implementar. Um problema típico é a penetração das partículas fluidas nos contornos sólidos.
- As regiões de baixa densidade de partículas do Kernel induzem resoluções baixas.
- A dimensão do domínio de cálculo deve ser reduzida. Na sua formulação teórica, o modelo SPH permite resolver os problemas da hidrodinâmica marítima. No entanto, o modelo não é apropriado para modelar a propagação das ondas em domínios de grandes dimensões pois o tempo de cálculo torna-se totalmente proibitivo. Assim, o modelo SPH destina-se às modelações de fenómenos locais, como a rebentação das ondas numa praia ou a interacção de ondas com uma estrutura.
- A pressão é derivada duma equação de estado para fluidos pouco compressíveis. É uma opção clássica em dinâmica dos fluidos computacional que induz limitações ao nível do passo de tempo de cálculo e instabilidade do campo de pressão.
- O passo de tempo é muito pequeno (por causa da hipótese de fluido compressível) o que leva a tempos de cálculo elevados.

A estabilidade do método numérico é ao mesmo tempo uma vantagem e uma desvantagem. A robustez do método pode-se tornar uma desvantagem dado que, obtendo uma solução não física, esta pode passar despercebida.

### 3 GALGAMENTO DE UMA ESTRUTURA COSTEIRA IMPERMEAVEL

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

Para validar o modelo SPH e analisar a sua sensibilidade a vários parâmetros numéricos, como por exemplo o número de partículas, apresenta-se neste ponto a aplicação do modelo ao estudo do galgamento de uma estrutura costeira impermeável. 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., 2006), para ondas regulares e varias alturas de onda, períodos e profundidades de água.

Das diferentes configurações ensaiadas por Saville, apenas quatro foram 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. Nas simulações numéricas 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,  $d=3.0m$ . Com estas características o comprimento da onda,  $L$ , é de 23.4m.

Tabela 1 Características geométricas da estrutura

	$d_s$ (m)	$R_c$ (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

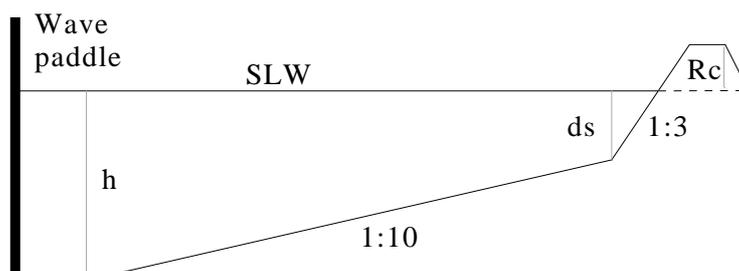


Figura 2 Perfil do fundo e da estrutura costeira e notações

Os resultados numéricos são comparados com os dados experimentais de Saville (Shao et al., 2006) e os resultados numéricos de Kobayashi e Wurjanto, 1989, Hu et al., 2000, e Shao et al., 2006. 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 por 5390 partículas.

O estudo de convergência com o número de partículas foi realizado para a configuração 1. A distância inicial,  $d_x$ , entre partículas varia de 0.15m até 0.03m, o que corresponde a um número de partículas entre 2509 e 56287 respectivamente.

As figuras 3 e 4 apresentam, para a configuração 1, respectivamente, o volume galgado ao longo do tempo e o caudal médio galgado adimensional,  $Q/(H(gH)^{1/2})$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $H$  a altura da onda e  $Q$  o caudal médio galgado. Observa-se que a evolução ao longo do tempo do volume galgado apresenta a mesma tendência para as diferentes discretizações. No entanto, para valores de  $d_x$  grandes (pequeno número de partículas), o caudal médio galgado é subestimado, 30% inferior aos valores determinadas para  $d_x$  pequenos (grande número de partículas). Observa-se também uma convergência do caudal médio galgado com o aumento do número de partículas. Para  $d_x$  inferior ou igual a 0.06m, os resultados são pouco diferentes, com um erro relativo inferior a 6%.

Os resultados obtidos para as menores densidades de partículas concordam bem com os resultados experimentais de Saville, que determina um caudal médio galgado adimensional de 65. Para a discretização mais fina,  $d_x=0.03m$ , o erro do caudal médio galgado em relação aos resultados experimentais é da ordem de 3%, bastante inferior aos erros obtidos por outros autores e outros programas numéricos (Kobayashi e Wurjanto, 1989, Hu et al., 2000, e Shao et al., 2006), que variam entre 20% e 60%.

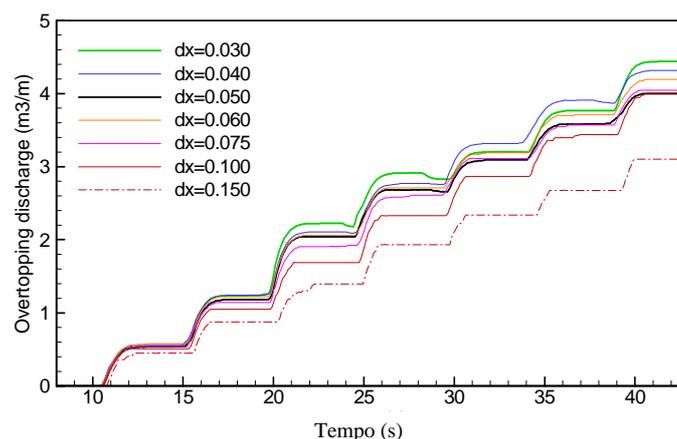


Figura 3 Volume galgado ao longo do tempo para a configuração 1.

O caudal médio galgado adimensional é apresentado na figura 5 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 relativo aos dados experimentais é inferior a 7%, enquanto que para o caso 2 o erro atinge 20%. No entanto este erro 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., 2006, 40% e 60% para os modelos de Kobayashi e Wurjanto, 1989, e Hu et al., 2000, respectivamente.

Detalhes sobre o estudo de sensibilidade do modelo SPHysics em função de outros parâmetros podem se encontrar em Didier e Neves, 2009a, 2009b, 2009c.

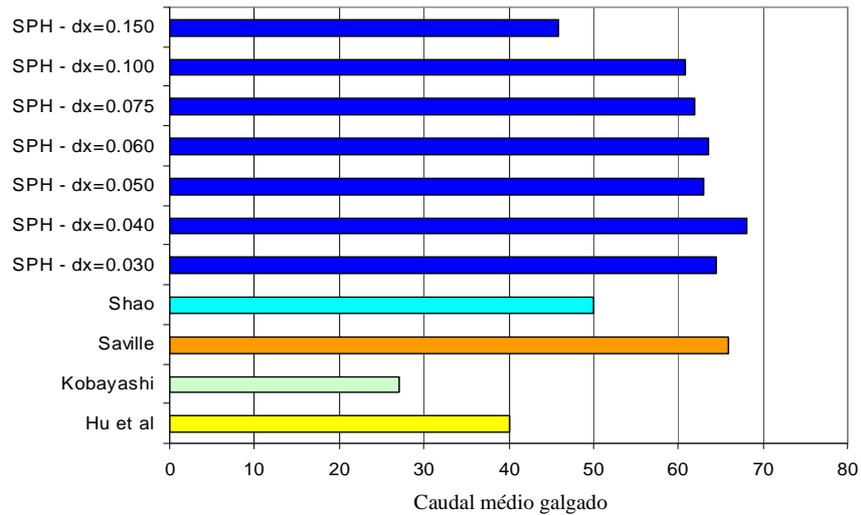


Figura 4 Caudal médio galgado adimensional para a configuração 1

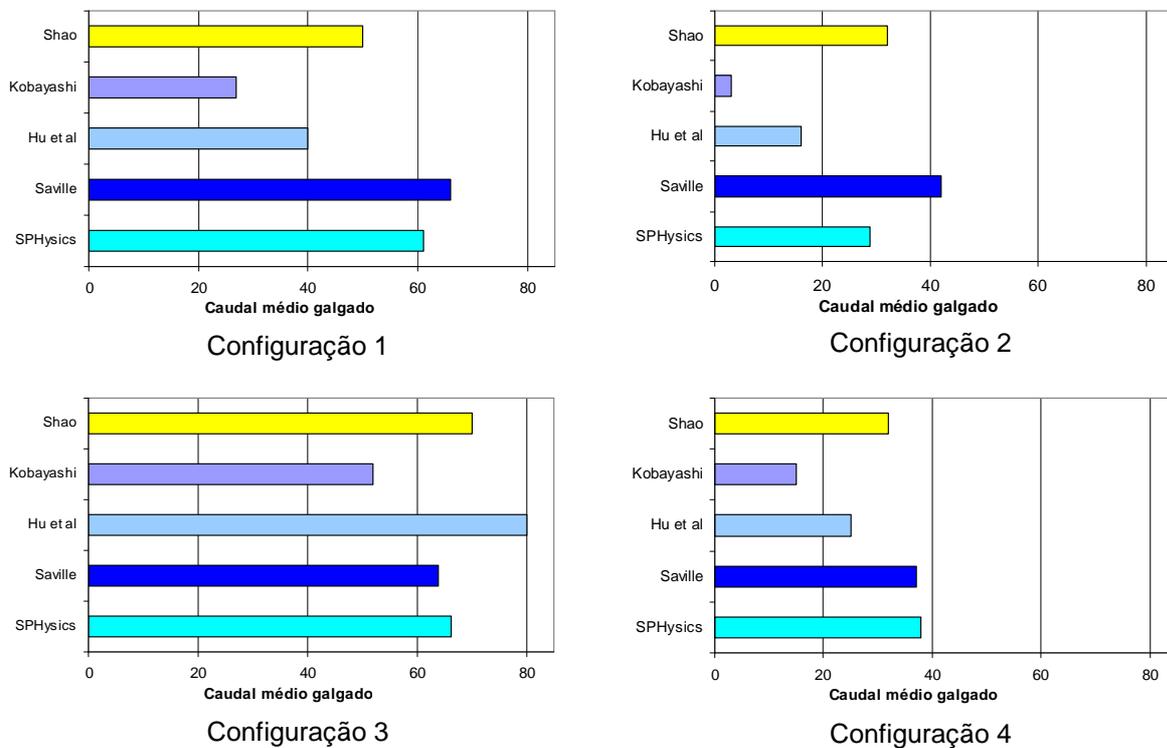


Figura 5 Caudal médio galgado adimensional para as quatro configurações

#### 4 PRESSÕES NUMA LAJE HORIZONTAL

Para reduzir a reflexão no interior de bacias portuárias numa fronteira que seja de parede vertical, uma das soluções possíveis é a de introduzir uma estrutura porosa em talude junto á parede vertical, rematada superiormente por uma laje horizontal, que serve de suporte ao atraque de navios. Neste caso, a laje terá de ser projectada para resistir às pressões devidas às ondas, que são normalmente caracterizadas por apresentarem picos de pressão.

O caso modelado é o seguinte: estrutura em talude, composta por um manto de enrocamento e um núcleo de TOT, coberta superiormente por uma laje horizontal. Pretende-se verificar se a solução é efectiva em termos de redução de reflexão e obter informação sobre as pressões induzidas pelas ondas na laje. As dimensões da estrutura são as que se apresentam na figura 6 e correspondem a medidas que teriam num modelo físico construído considerando a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1:35. O manto exterior, de 2.0 m de largura e declive 3:4, é composto por enrocamento de 10 a 30 KN.

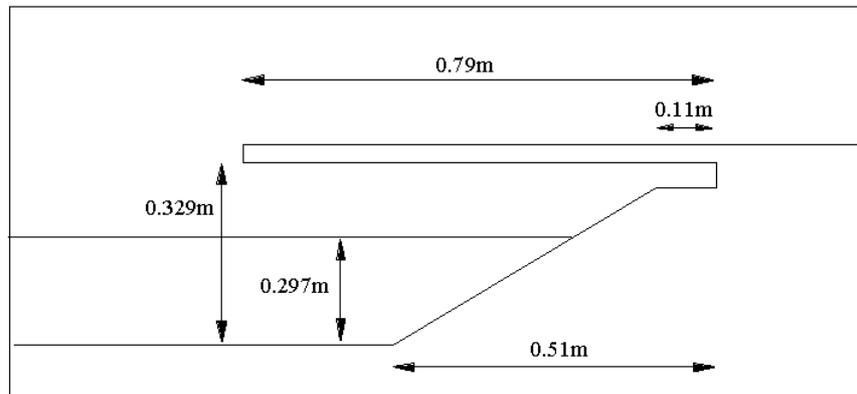


Figura 6 Estrutura em talude coberta superiormente por uma laje horizontal

Nas simulações numéricas o talude foi considerado impermeável. À escala do modelo, a profundidade é de 0.257m (correspondente ao nível médio de maré), o período da onda é de 2.37s e foram consideradas duas alturas de onda, 0.09m e 0.11m. Os resultados são comparados com os do programa COBRAS-UC, que utiliza uma técnica VoF (Lara et al., 2006).

Com base nos cálculos efectuados com o modelo SPHysics, é possível calcular o coeficiente de reflexão, KR, e as pressões máximas na laje, Pmax, em metros de coluna de água (mca). Os resultados são apresentados na tabela 2. Verifica-se que os dois modelos dão resultados semelhantes e coerentes, verificando-se assim a aplicabilidade do modelo SPHysics a este tipo de estudos.

Tabela 2 Comparação do coeficiente de reflexão e da pressão máxima na laje

	H(m)	SPHysics	COBRAS-UC
KR	0.09	0.63	0.70
	0.11	0.72	0.66
Pmax (mca)	0.09	0.09	0.10
	0.11	0.10	0.10

A figura 7 apresenta a superfície livre em diferentes instantes de tempo, permitindo observar a interacção da onda com a laje e com a estrutura em talude através da posição das partículas nos diferentes instantes de tempo. Observam-se alguns fenómenos, como o *run-up* e o *run-down* no talude impermeável, a interacção entre a crista da onda incidente e a extremidade da laje que resulta num pequeno galgamento em cima da laje, e a interacção entre a onda e a parte inferior da laje que se traduz por um impacto da onda e um pico de pressão. Detalhes sobre este estudo podem ser encontrados em Neves e Didier, 2009.

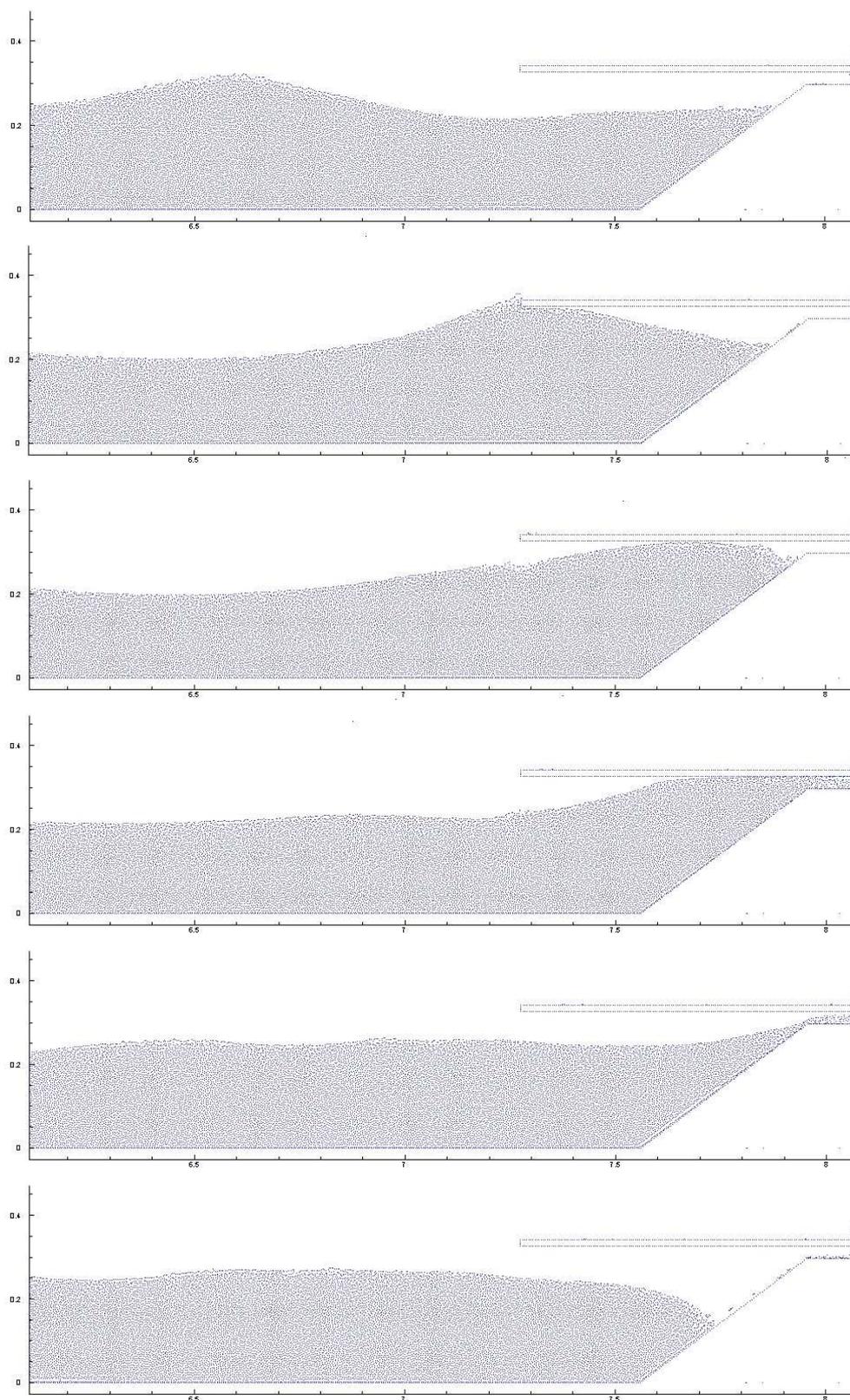


Figura 7 Posição das partículas ao longo do tempo durante um período

## 5 INTERACÇÃO DE ONDAS COM UMA ESTRUTURA DEFLECTORA

As estruturas com deflector de ondas são tipicamente utilizadas para a protecção das infra-estruturas costeiras. O projecto destas estruturas é complexo e de facto não existem fórmulas empíricas adaptadas à concepção deste tipo de obras marítimas. A interacção entre onda e estrutura dá-se de forma violenta e pode levar à destruição da obra: o jacto de retorno na estrutura e a rebentação são os dois fenómenos dominantes.

Os modelos físicos permitem estimar a eficácia da estrutura projectada, mas a modelação numérica pode permitir a sua optimização de forma mais económica. De um ponto de vista numérico, o método SPH, por não se apoiar numa malha como os métodos mais tradicionais baseadas nas diferenças finitas ou volumes finitos, é perfeitamente adequado à modelação da interacção entre as ondas e este tipo de estruturas.

Apresenta-se neste ponto a modelação da interacção de ondas com uma estrutura deflectora. O domínio de simulação é constituído por um batedor de tipo pistão, situado numa zona horizontal com uma profundidade de 6 m localizada à esquerda, seguida de uma rampa de 21 m com um declive de 1:3. No final da rampa, na extremidade direita do domínio, que se encontra 1 m acima da superfície livre em repouso, é colocada uma estrutura costeira com um deflector de ondas de 1 m de altura e com uma forma semicircular.

A figura 8 apresenta, para vários instantes de simulação, a posição das partículas de água simuladas com o modelo para o caso de uma onda sinusoidal de período  $T=5.2$  s e de altura  $H=3.5$  m, a que corresponde um comprimento de onda de cerca de 34 m.



Figura 8 Posição das partículas ao longo do tempo durante um período



Figura 8 Posição das partículas ao longo do tempo durante um período (continuação)

## 6 INTERACÇÃO DE ONDAS COM UMA ESTRUTURA COSTEIRA POROSA

A grande parte das estruturas costeiras são porosas e a sua simulação com o programa SPHysics implica alterações no programa de forma a permitir a sua aplicação a estes casos de engenharia. Nesta perspectiva, apresenta-se neste artigo a modelação do caso de uma estrutura porosa de enrocamento simulada por duas camadas de blocos circulares (bidimensionalmente), com uma porosidade do manto de 45%.

Para ilustrar os resultados obtidos, na figura 9 apresenta-se a evolução da posição das partículas ao longo de um período. Observa-se que o comportamento do escoamento é o espectável, ocorrendo galgamento da estrutura seguido de *run-down*. As partículas fluidas, dentro do meio poroso, escoam mais lentamente que no exterior do manto. Foi ainda verificado que o caudal médio galgado, para a estrutura porosa, é inferior ao obtido considerando a estrutura impermeável (resultado não apresentado aqui) como seria de esperar. No entanto, os presentes desenvolvimentos são muito recentes e necessitam ainda de uma análise de resultados mais rigorosa, comparando-se, por exemplo, os resultados numéricos com dados obtidos em modelo físico de forma a validar a aplicação do modelo a estruturas costeiras porosas.

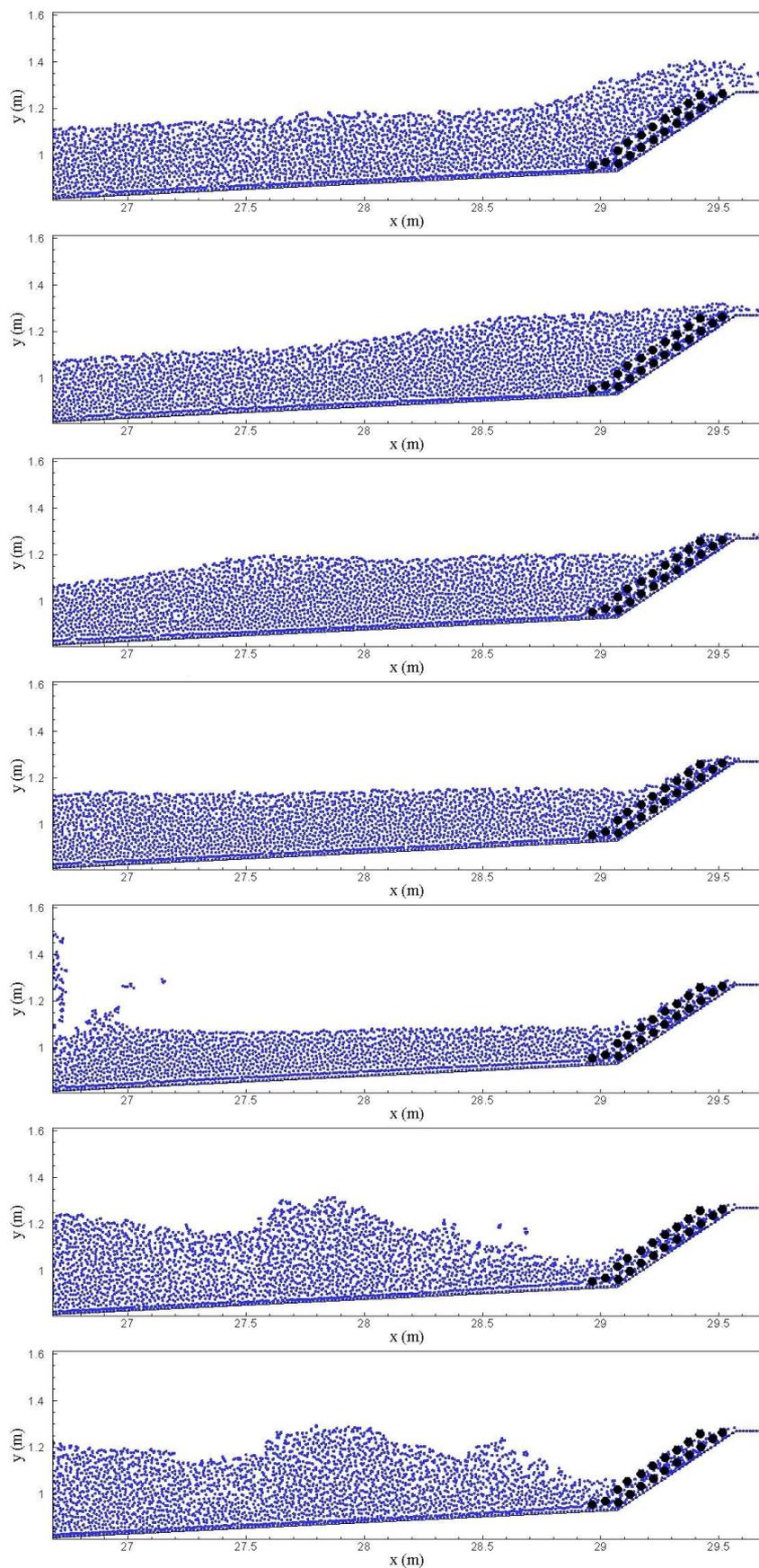


Figura 9 Interação onda-estrutura porosa: posição das partículas ao longo do tempo

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em estudos de interacção entre onda e estrutura, tais como os estudos de galgamentos em obras marítimas, pretende-se que os modelos numéricos representem tão correctamente quanto possível os vários fenómenos físicos que ocorrem: rebentação, reflexão, galgamento, efeitos não lineares, etc. No entanto, quanto mais completo é o modelo, maior é o esforço computacional. Este é o caso do modelo que se apresenta neste artigo, o modelo SPHysics, que permite modelar fenómenos complexos mas que requer tempos de cálculos elevados.

O modelo numérico SPHysics, um método Lagrangiano baseado no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), é aqui aplicado à modelação da interacção onda-estrutura costeira. Assim, apresentam-se de forma sucinta as suas principais características, assim que as suas vantagens e limitações para o estudo dos fenómenos de interacção onda-estrutura.

Para ilustrar as capacidades do modelo, apresentam-se alguns exemplos de aplicação do modelo ao estudo do galgamento de estruturas impermeáveis e porosas, da interacção de ondas com estruturas deflectoras de ondas e com uma estrutura portuária constituída por um manto de enrocamento e um núcleo de TOT, coberta superiormente por uma laje horizontal. Estes exemplos, que englobam uma vasta gama de estruturas costeiras, permitiram verificar que o modelo é capaz de simular os principais fenómenos que ocorrem na interacção entre ondas e estruturas costeiras. A sensibilidade do modelo com a discretização, ou seja, com o número de partículas, foi também analisada, mostrando-se a necessidade de usar um número de partículas que seja suficiente para obter resultados consistentes e independentes da discretização, tal como acontece nos modelos numéricos baseados no conceito Euleriano, onde a convergência dos resultados é obtida com o refinamento sistemático da malha.

Os desenvolvimentos actuais do modelo tem como objectivo modelar estruturas porosas e acoplar o modelo SPHysics com um modelo de propagação das ondas de forma a permitir simular domínios de cálculo de maior dimensão.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FCT para o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007.

## BIBLIOGRAFIA

- DALRYMPLE, R.A.; ROGERS, B.D. - "Numerical modeling of water waves with the SPH method". *Coastal Engineering*, **53**, 2-3, 2006, pp. 141-147.
- DIDIER, E.; NEVES, M.G. - "Estudo da interacção onda-estrutura utilizando um modelo numérico Lagrangiano". *Revista Recursos Hídricos*, **29**, 2, 2008, pp. 15-26.
- DIDIER, E.; NEVES, M.G. - "Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure". *Proceeding 4th International SPHERIC Workshop*, Nantes (France), 2009a, pp. 357-364.
- DIDIER, E.; NEVES, M.G. - "Aplicação de um método Lagrangiano para a modelação de escoamento com superfície livre e de interacção onda-estrutura costeira". *Proceeding III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia*, Bragança Portugal), 2009b.
- DIDIER, E.; NEVES, M.G. - "Metodo Lagrangiano para modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura costeira". *Proceeding Jornadas Portuguesas de Engenharia*

- Costeira e Portuária, Funchal-Madeira (Portugal), 2009c.
- GINGOLD, R.A.; MONAGHAN, J.J. - "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **181**, 1977, pp. 375-389.
- GÓMEZ-GESTEIRA, M.; DALRYMPLE, R.A. - "Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure". *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **130**, 2, 2004, pp. 63-69.
- GÓMEZ-GESTEIRA, M.; ROGERS, B.D.; DALRYMPLE, R.A.; CRESPO, A.J.C.; NARAYANASWAMY, M. - "User guide for the SPHysics code v1.4", [http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics.](http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics), 2009.
- HU, K.; MINGHAM, C.G.; CAUSON, D.M. - "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures by solving NLSW equations". *Coastal Engineering*, **41**, 4, 2000, pp. 433-465.
- KOBAYASHI, N.; WURJANTO, A. - "Wave overtopping on coastal structures. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, **115**, 1989, pp. 235-251.
- KOSHIZUKA, S.; TAMAKO, H.; OKA, Y. - "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation". *Computational Fluid Dynamics Journal*, **4**, 1, 1995, pp. 29-46.
- LARA, J.L.; GARCIA, N.; LOSADA, I.J. - "RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures". *Coastal Engineering*, **53**, 5-6, 2006, pp. 395-417.
- LIU, G.R. - "Mesh free methods. Moving beyond the finite element method". CRC press, 2003.
- MONAGHAN, J.J. - "Simulating free surface flows with SPH". *Journal of Computational Physics*, **110**, 1994, pp. 399-406.
- NEVES, M.G.; DIDIER, E. - "Aplicação de modelos numéricos ao cálculo de pressões numa laje. *Proceeding Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal-Madeira (Portugal), 2009.
- SHAO, S.D.; LO, E.Y.M. - "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface". *Adv. Water Resour.*, **26**, 7, 2003, pp. 787-800.
- SHAO, S.D.; JI, C.; GRAHAM, D.I.; REEVE, D.E.; JAMES, P.W.; CHADWICK, A.J. - "Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model". *Coastal Engineering*, **53**, 2006, pp. 723-735.
- SPHysics code v1.4, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>