

Modelação de estruturas marítimas usando um modelo numérico Smoothed Particle Hydrodynamics

Eric Didier^{1,2}, Maria da Graça Neves¹

¹ Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

edidier@lnec.pt, gneves@lnec.pt

² MARETEC - Marine Environment and Technology Center, IST, Lisboa, Portugal

RESUMO:

Apresenta-se neste artigo um resumo dos principais desenvolvimentos realizados do modelo numérico SPHysics nos últimos 3 anos no LNEC com vista à aplicação deste modelo a estudos de engenharia costeira. Este modelo, baseado no método Smoothed particle hydrodynamics (SPH), é muito promissor na simulação de escoamentos complexos, como os que ocorrem na interação onda-estrutura e na rebentação, embora exija um elevado tempo de execução. O modelo tem sido validado para diferentes casos, dos quais se apresentam três, correspondentes a três tipos de estrutura impermeáveis, que permitem ilustrar a capacidade do modelo para reproduzir vários fenómenos, concretamente a propagação e rebentação de ondas e o galgamento. O artigo termina com a descrição dos desenvolvimentos futuros do modelo.

PALAVRAS CHAVE: SPH, ondas, rebentação, galgamento

ABSTRACT:

This paper presents a summary of the main developments in the numerical model SPHysics made in the past three years at LNEC, in order to improve it for coastal engineering applications. This model, based on the Smoothed particle hydrodynamics method (SPH), is very promising in simulating complex flows, such as those occurring in wave-structure interactions and wave-breaking, but requires a high computing CPU time. The model has been validated for different case studies. The paper presents three of them, corresponding to three types of impermeable structures that illustrate the model ability to reproduce different phenomena, namely the propagation and wave-breaking and overtopping. The paper ends with a description of future developments of the model.

KEYWORDS: SPH, waves, wave-breaking, overtopping

1. INTRODUÇÃO

A modelação numérica é uma ferramenta que ganhou maior relevância e aplicabilidade nos últimos anos, devido ao desenvolvimento dos métodos computacionais em mecânica dos fluidos. As equações que descrevem o escoamento são já conhecidas há bastante tempo mas, com a melhoria dos meios de cálculo, tornou-se mais fácil obter soluções aproximadas para estas equações e assim simular cenários de escoamento realistas em tempo útil. As grandes vantagens da modelação numérica prendem-se ao facto de ser mais rápida e mais barata que a modelação física e ser muito

flexível, permitindo alterar facilmente a geometria de uma obra ou as condições de agitação, alterando simplesmente os ficheiros de entrada do modelo. Estas características fazem com que a modelação numérica seja cada vez mais utilizada quer em complemento à modelação física, permitindo obter informação acerca do escoamento onde seria muito difícil ou mesmo impraticável obter em modelo físico, quer na fase de pré-projecto de obras marítimas.

No âmbito dos estudos de interacção onda-estrutura, onde se englobam os estudos de galgamento de estruturas marítimas, existem neste momento diferentes modelos numéricos, cada um com as suas vantagens e limitações. De entre os modelos existentes na literatura, podem-se destacar os três tipos de modelos distintos que se encontram actualmente em desenvolvimento ou validação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): o modelo AMAZON (Hu, 2000), baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas; o modelo COBRAS-UC (Lara et al., 2006), baseado nas equações de Reynolds; e o modelo SPHysics (Dalrymple et al., 2006), baseado num método Lagrangiano e no conceito “Smoothed Particle Hydrodynamics” (SPH). Os modelos AMAZON e COBRAS-UC foram já aplicados com bons resultados em estudos de interacção onda-estrutura, o primeiro especialmente ao estudo do galgamento de estruturas impermeáveis e o segundo a diferentes estudos de interacção de ondas com estruturas impermeáveis e porosas.

O modelo SPHysics tem vindo a ser desenvolvido e validado no LNEC desde Novembro de 2007 com o objectivo de verificar a sua aplicabilidade a estudos de interacção onda-estrutura, concretamente para o cálculo de galgamento, reflexão e forças em estruturas (Didier e Neves, 2008, 2009a, 2009b, 2009c, 2010). Este modelo, baseado no método Smoothed particle hydrodynamics (SPH), não necessita de malha e só entra no cálculo a parte do espaço ocupado pelo fluido. Assim, o método SPH apresenta uma grande potencialidade na simulação de escoamentos complexos, como os que ocorrem na interacção onda-estrutura e na rebentação, permitindo obter como resultados valores de diferentes grandezas, tais como o campo de velocidades e pressões, etc., embora exija um elevado tempo de execução.

Apresenta-se neste artigo um resumo dos principais desenvolvimentos realizados do modelo numérico SPHysics nos últimos 3 anos no LNEC com vista à aplicação deste modelo a estudos de engenharia costeira, concretamente a estudos de interacção de ondas com estruturas impermeáveis. Para tal, ilustram-se casos de modelação de diferentes tipos de estruturas, onde se verificam vários fenómenos intervenientes no processos de transformação da onda até atingir a estrutura e na sua interacção com a estrutura, concretamente na modelação da propagação e rebentação de ondas e do galgamento.

Assim, no ponto 2 descreve-se o modelo utilizado e os principais resultados dos estudos de sensibilidade realizados a vários parâmetros do modelo. No ponto 3 descreve-se um caso de estudo da modelação de um recife artificial para surf, que se centra na modelação da rebentação, comparando-se os resultados com dados de ensaios em modelo físico realizados no LNEC. No ponto 4 apresenta-se o estudo de três tipos diferentes de estruturas: uma estrutura de protecção marginal, um quebra-mar misto, e uma estrutura com deflector de ondas. As duas primeiras correspondem a casos para os quais existem dados de ensaios em modelo físico, que permitem validar o modelo e a última corresponde a um caso que, embora não existam dados de modelo físico para validação o modelo, permite ilustrar a sua capacidade na modelação dos fenómenos extremamente complexos que ocorrem na interacção da onda com o deflector de ondas.

Finalmente, o artigo termina no ponto 5, com a descrição dos futuros desenvolvimentos do modelo.

2. MODELO NUMÉRICO SPH

2.1. Princípio do método SPH

O princípio fundamental dos métodos SPH consiste em aproximar um escalar, uma função ou um tensor usando a teoria dos integrais de interpolação. 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. O seu valor deve ser superior à separação inicial das partículas.

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 ρ_b a densidade da partícula b .

O kernel de interpolação é uma função analítica que pode ser diferenciada sem necessitar de uma malha espacial. Numericamente, o kernel é uma função com um suporte compacto dentro duma região determinada por um raio de $2h$ (Figura 1), mais pequeno que a escala típica do problema. No entanto, o parâmetro h deve ser, tal como foi referido anteriormente, 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 para o kernel (Figura 1).

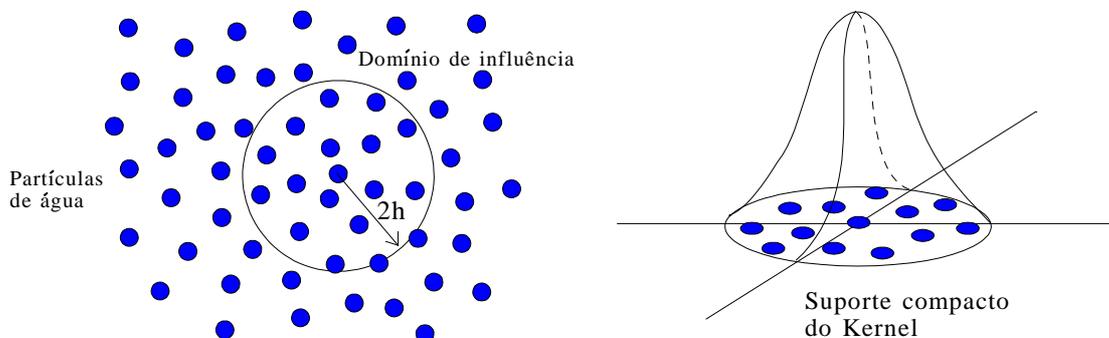


Figura 1. Domínio de influência do kernel, partículas que contribuem para a interpolação e suporte compacto do kernel.

Existem diversos kernels na literatura (Liu, 2003). Nas simulações numéricas realizadas no presente estudo foi utilizado o kernel de interpolação *quadratic* (Johnson et al., 1996) (Dalrymple e Rogers, 2006), por ter a particularidade de não ter ponto de inflexão na sua primeira e segunda derivada no intervalo de definição da função. Este kernel é definido pela função analítica dada por:

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

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

2.2. Modelo SPHysics

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977) (Lucy, 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 escritas no formalismo SPH, ou seja, escritas com base na teoria dos integrais de interpolação que usam kernels de interpolação, de acordo com a equação (1). A abordagem Lagrangiana do métodos SPH, que consiste no seguimento das partículas do fluido durante um determinado intervalo de tempo de forma a obter a sua trajectória, velocidade e pressão em função da posição inicial e do tempo, difere 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 de investigadores das universidades Johns Hopkins (EUA), de Vigo (Espanha), de Manchester (Reino Unido) e de Roma La Sapienza (Itália) (Crespo, 2008, Crespo et al., 2008) (SPHysics code v1.4, 2009). O modelo SPHysics é um modelo bi e tri dimensional que permite modelar fenómenos complexos de deformação de superfície livre, como a rebentação, a reflexão, o sloshing, a penetração de um objecto no fluido, etc. É composto por dois programas: um programa de pré-processamento para determinar a posição das partículas da fronteira, as condições limites e a distribuição inicial das partículas fluidas e um segundo programa computacional que permite resolver as equações discretizadas do problema em estudo.

O modelo numérico SPHysics é inspirado na formulação proposta por Monaghan (1992). Neste modelo, a técnica de compressibilidade artificial é utilizada. Assim, a pressão no fluido é modelada através de uma equação de estado (Batchelor, 1974), que relaciona a pressão no fluido com a densidade, ao invés de modelar através de uma equação de pressão de Poisson (Koshizuka et al., 1995, Shao e Lo, 2003). Com esta hipótese, a variação de densidade é inferior a 1% (Dalrymple e Rogers, 2006). Mais detalhes sobre as opções do modelo e as implementações numéricas podem ser encontradas no *User Guide* do modelo SPHysics (Gómez-Gesteira et al, 2009).

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, a densidade é definida a partir da equação discreta de continuidade e, a partir destas, é calculada a

posição das partículas. A pressão é calculada a partir da densidade, usando a equação de estado.

O passo de tempo é controlado automaticamente, respeitando as condições propostas por 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 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). Esta última condição é a 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 (pressão hidrostática). A Figura 2 apresenta um exemplo de distribuição inicial das partículas sólidas e fluidas.

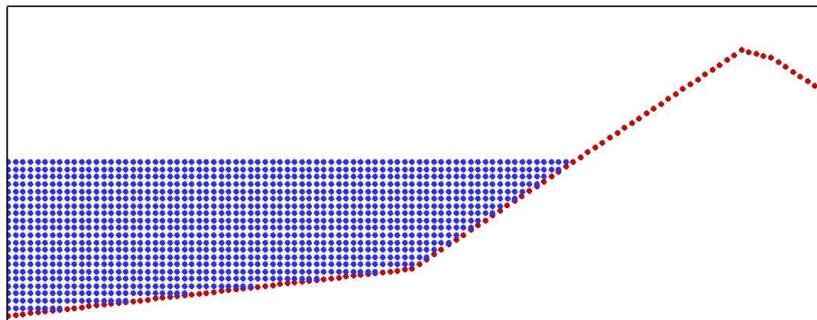


Figura 2. Domínio computacional com a posição das partículas sólidas da fronteira (vermelho) e a distribuição inicial das partículas fluidas (azul).

2.3. Adaptação do modelo SPHysics a estudos de interacção onda-estrutura

Na adaptação do modelo a estudos de interacção onda-estrutura, efectuaram-se estudos de sensibilidade aos parâmetros mais relevantes do modelo. Estes estudos permitiram definir quais os valores mais adequados desses parâmetros em aplicações de interacção onda-estrutura.

Neste ponto apresenta-se um resumo das análises de sensibilidade realizadas e dos principais resultados obtidos.

O caso de estudo é a interacção de ondas com uma estrutura de protecção marginal impermeável. O modelo SPHysics é aplicado ao caso ensaiado em modelo físico por Saville (Shao et al., 2006) onde as ondas se propagam sobre um talude de inclinação constante de 1:10 que termina numa estrutura de protecção com uma inclinação de 1:3. A profundidade ao pé da estrutura, d_s , é de 0.75m e a cota do coroamento da estrutura acima do nível de água em repouso, R_c , é de 0.5m. A Figura 3 apresenta um esquema do perfil do canal e da estrutura. Foram simuladas ondas regulares com um período $T=4.73s$ e uma altura de $H=1.0m$. A profundidade do canal é $h=3.0m$. Com estas características o comprimento da onda, L , é de 23.4m.

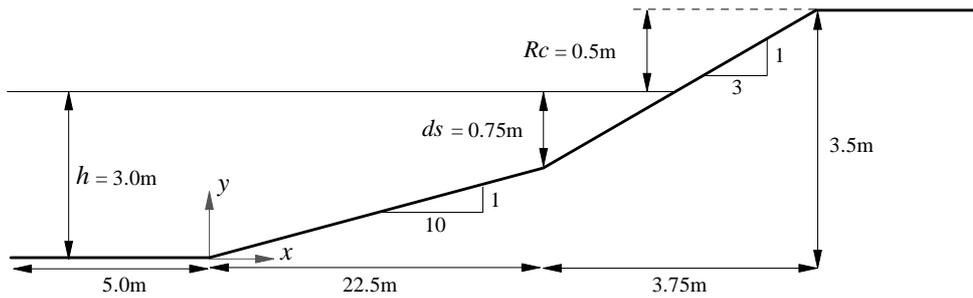


Figura 3. Representação esquemática do canal utilizado nos ensaios em modelo físico.

As simulações numéricas foram realizadas usando o kernel de interpolação *quadratic* por, tal como se referiu anteriormente, ter a particularidade de não ter ponto de inflexão na sua primeira e segunda derivada no intervalo de definição da função e o esquema de integração no tempo *predictor-corrector*.

Para a análise dos resultados das simulações numéricas, foram desenvolvidos vários programas de pós-tratamento que permitem obter as séries temporais de: elevação de superfície livre em posições determinadas pelo utilizador, pressão, perfis de velocidade, galgamento, *run-up*, etc.

2.3.1. Análise de sensibilidade ao modelo de viscosidade

O modelo de viscosidade artificial (Monaghan, 1992) é bastante utilizado no método SPH, pois permite estabilizar o processo numérico na modelação de escoamentos com superfície livre. Neste modelo, aparece um parâmetro empírico, α , que é necessário para a estabilidade do modelo mas introduz difusão numérica. O estudo de sensibilidade ao valor do parâmetro α , no caso da propagação das ondas (Didier e Neves, 2009b), onde se variou α entre 0.01 e 0.1, mostrou que a altura de superfície livre se reduz quando o parâmetro α aumenta, mostrando que este valor deve ser o mais baixo possível.

Outro modelo de viscosidade que pode ser utilizado é o modelo de viscosidade SPS (*Sub-Particle Scale*) (Gotoh et al., 2001) (Rogers e Dalrymple, 2004), baseado numa formulação de tipo LES (*Large Eddy Simulation*). A Tabela 1 apresenta uma comparação do caudal médio galgado obtido com o modelo de viscosidade artificial com três valores diferentes do parâmetro α , o obtido com o modelo de viscosidade SPS, e os resultados de ensaios físicos de Saville (Shao et al., 2006). Apresenta ainda o valor do erro de cada modelo relativo aos ensaios. Verifica-se que a concordância entre os resultados obtidos com o modelo de viscosidade artificial e os dados experimentais melhora quando o parâmetro α diminui, tal como se tinha anteriormente referido que ocorria para a altura de onda. O caudal médio galgado obtido com o valor mais pequeno deste parâmetro, $\alpha=0.01$, é muito similar ao obtido com o modelo SPS, com o qual se obtêm resultados muito semelhantes aos dos ensaios em modelo físico e que apresenta a vantagem de não requerer a introdução de um parâmetro empírico.

Conclui-se assim que o modelo de viscosidade SPS deve ser o utilizado na modelação de interacção onda-estrutura com o modelo SPHysics.

Tabela 1. Influência do modelo de viscosidade para o cálculo do caudal médio galgado adimensional.

Modelo		Caudal médio galgado adimensional	Erro (%)
Viscosidade artificial	0.1	48.14	27.1
	0.05	54.51	17.4
	0.01	59.43	10.0
SPS		61.21	7.3
Saville		66.00	-

2.3.2 Análise de sensibilidade ao parâmetro XSPH

Nos modelos SPH baseados na formulação de Monaghan (1992), é clássico usar a correção XSPH de Monaghan (1994), que garante que as partículas na vizinhança de uma dada partícula se movem com velocidades próximas, evitando que partículas com velocidades diferentes ocupem aproximadamente a mesma posição. O valor comumente utilizado para o parâmetro ϵ da correção XSPH é de 0.5 (valor por defeito) e é este também o valor usado no modelo SPHysics (SPHysics code v1.4, 2009). No entanto, uma análise de sensibilidade dos resultados do SPHysics ao parâmetro ϵ , efectuada no âmbito da modelação da propagação e rebentação das ondas (Didier e Neves, 2009b), mostrou que aparecem instabilidades numéricas ao longo do tempo quando é utilizado o valor por defeito, $\epsilon=0.5$. As instabilidades, que se traduzem por acumulações locais de partículas que atravessam as fronteiras sólidas, desaparecem quando a correção XSPH é anulada, ou seja, quando o parâmetro ϵ é nulo. A Figura 4, onde se apresenta a posição das partículas para o mesmo instante para $\epsilon=0.5$ e $\epsilon=0.0$, ilustra o referido. Assim, no modelo SPHysics utilizado no LNEC, a correção XSPH não é utilizada para modelar a propagação de ondas.

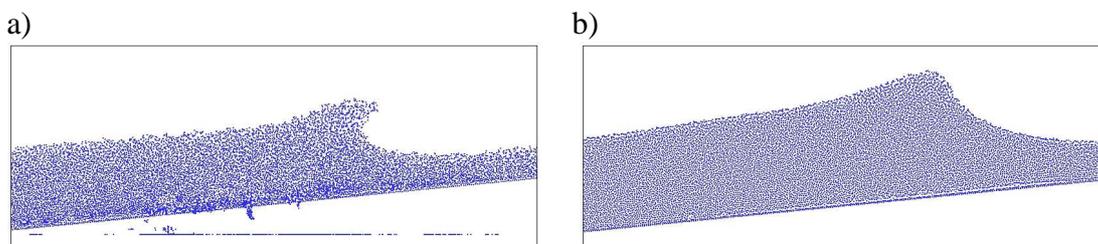


Figura 4. Influência do parâmetro ϵ da correção XSPH de Monaghan: $\epsilon=0.5$ (esquerda) e $\epsilon=0$ (direita).

2.3.3. Análise de convergência com a discretização inicial

A distância inicial entre partículas, do , (equivalente a uma discretização), pode influenciar os resultados, especialmente no que se refere aos valores de caudal médio galgado. Para estudar o efeito da discretização, efectuou-se uma comparação entre o caudal médio galgado obtido com diversas distâncias iniciais entre partículas, do , e o dos resultados experimentais, Tabela 2 (Didier e Neves, 2009b). Para $do=0.05m$, o erro relativo à medição experimental é de 6% e reduz-se para 3.3% quando $do=0.04m$, ou seja, para estes valores de do obtém-se uma boa concordância com os resultados experimentais. Embora este erro se reduza para 2.2% quando $do=0.02m$, o tempo de cálculo aumenta consideravelmente, pois reduzir por um factor 2 a distância inicial entre partículas implica multiplicar por 4 o número de partículas. É de salientar que a

distância inicial entre partículas deve estar adaptada à intensidade do galgamento e à precisão dos resultados que se pretende obter.

Tabela 2. Convergência do caudal médio galgado com a distância inicial *do* entre partículas.

	<i>do</i> (m)	Caudal médio galgado	Erro (%)
SPHysics	0.150	45.40	31.2
	0.100	59.68	9.6
	0.075	61.79	6.4
	0.060	63.90	3.2
	0.050	62.02	6.0
	0.040	68.16	3.3
	0.020	64.53	2.2
Saville		66.00	-

3. PROPAGAÇÃO E REBENTAÇÃO SOBRE UM RECIFE ARTIFICIAL

Os recifes artificiais para surf são estruturas submersas que têm como objectivo melhorar as condições de surf, promovendo um determinado tipo de rebentação, podendo ainda, em alguns casos, servir como estruturas de protecção costeira e proporcionar um habitat protegido para as espécies marinhas.

Recentemente, realizou-se no LNEC um estudo em canal para estabelecer uma relação entre a estrutura do recife (material de construção, declive e dimensões) e as características de rebentação da onda, analisando-se em particular a influência da geometria do recife no tipo de rebentação, parâmetro muito relevante para o surf. Nestes ensaios foram obtidos registos da variação da superfície livre ao longo do canal, assim como vídeos e fotografias, para verificação das características da rebentação (Ten Voorde e tal., 2009).

O caso apresentado a seguir corresponde a esses ensaios, que foram realizados no canal de maiores dimensões do LNEC, com 3.0m de largura, 73.0m de comprimento e 2.0m de altura. A geometria corresponde a uma plataforma horizontal de 18.2 m de profundidade seguida de uma rampa com um declive de 1:50 com um comprimento de 24.2m até ao pé do recife artificial de declive 1:10. A profundidade junto ao baterdor é de 0.75m e de 0.08m em cima da plataforma horizontal do recife. A Figura 5 apresenta um esquema do canal e do recife. As ondas aqui simuladas são regulares com um período $T=2.52s$ e uma altura $H=0.15m$, a que corresponde um comprimento de onda, L , de cerca de 5.5m.

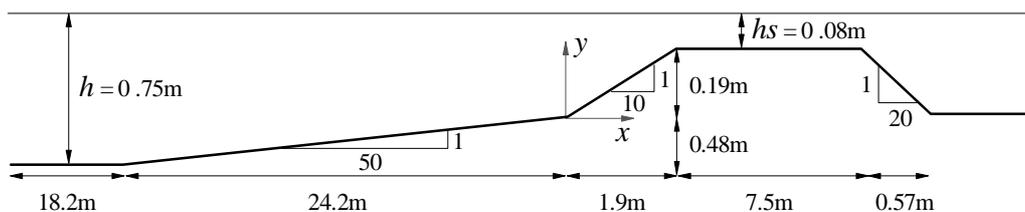


Figura 5. Representação esquemática do canal e do recife.

A discretização adoptada no presente caso corresponde a uma distância inicial entre as partículas de 0.01m. O domínio computacional é assim constituído de 81761 partículas.

O modelo de viscosidade utilizado é o SPS, o kernel é o *quadratic* e o esquema de integração no tempo é o esquema *predictor-corrector*. A simulação numérica foi realizada por um tempo total de 50s, com um passo de tempo médio de 6.3×10^{-4} s.

O domínio de cálculo é formado, à esquerda, por um batedor de tipo pistão flexível sem absorção dinâmica de reflexão, que permite gerar uma onda sinusoidal com o perfil de velocidade adequado, variável com a profundidade. Este modo de geração permite modelar uma onda mais similar à onda dos ensaios e que se adapta rapidamente ao fundo. As dimensões adoptadas no modelo numérico são idênticas as dimensões do modelo físico, excepto a plataforma horizontal, que tinha um comprimento de 18.2m nos ensaios em modelo físico e tem 1.0m no modelo numérico.

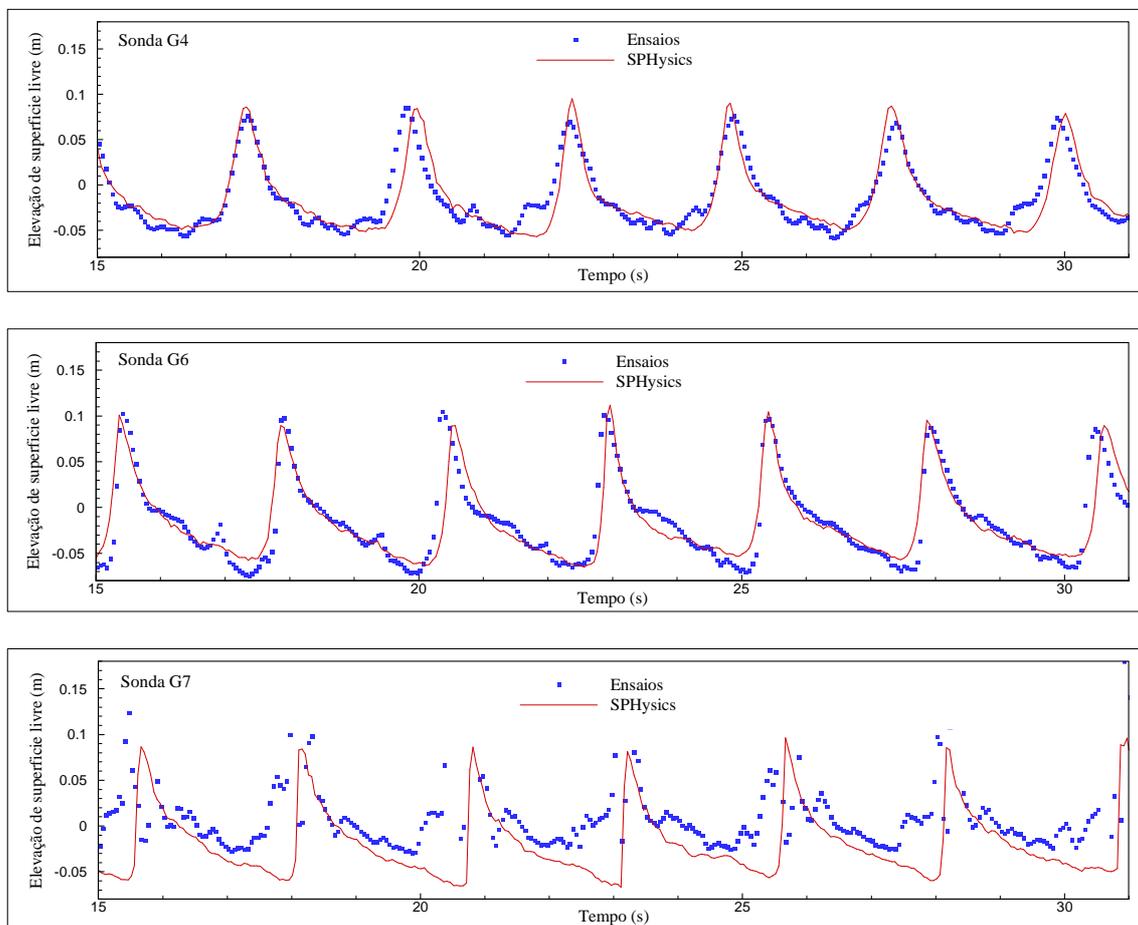


Figura 6. Elevação de superfície livre obtida com o modelo SPHysics e com o modelo físico nas sondas G4 (0.0m), G6 (1.1m) e G7 (1.6m).

A Figura 6 apresenta a série temporal da elevação da superfície livre para as sondas localizadas a uma distância de 0.0m (G4), 1.1m (G6) e 1.6m (G7) do início do recife calculada com o modelo SPHysics e resultante das medições obtidas em modelo físico. Observa-se uma boa concordância geral entre os resultados numéricos e os ensaios, especialmente no que se refere ao período da onda. As maiores diferenças ocorrem na sonda mais próxima da rebentação (G7), onde a amplitude da harmónica principal é

bem modelada, mas as diferenças de amplitude e fase das harmónicas de ordem inferior vão-se acentuando com a propagação. Esta diferença pode ser devida à diferença na posição e na forma da geração de ondas.

4. INTERACÇÃO DE ONDAS COM ESTRUTURAS MARITIMAS

4.1 Galgamento sobre uma estrutura de protecção marginal

A estrutura costeira impermeável modelada corresponde a um caso ensaiado em modelo físico no LNEC e consiste na propagação de ondas sobre uma praia de inclinação constante de 1:20, que termina numa estrutura de protecção marginal impermeável com um declive 2:3 (Fortes et al., 2008). Estes ensaios fazem parte de um conjunto de ensaios físicos que foram realizados no âmbito do projecto Composite Modelling of the Interactions between Beaches and Structures (CoMIBBs) - HYDRALAB III, para estudar a influência da escala dos ensaios em modelo físico nos resultados da modelação da propagação das ondas em estruturas costeiras, particularmente quando a rebentação tem um papel importante. 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, onde intervêm um conjunto de fenómenos que alteram significativamente as características da onda, tais como a rebentação e posterior reflexão na estrutura.

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. A geometria corresponde a 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 marginal impermeável de declive 2:3 (Figura 7). A profundidade junto ao baterdor é de 1.15 m e junto à estrutura é de 0.216m. O coroamento está localizado a 1.684m do fundo, ou seja, $R_c=0.534$ m. As ondas são regulares com um período $T=3.79$ s e uma altura $H=0.40$ m, a que corresponde um comprimento de onda, L , de cerca de 12.0m.

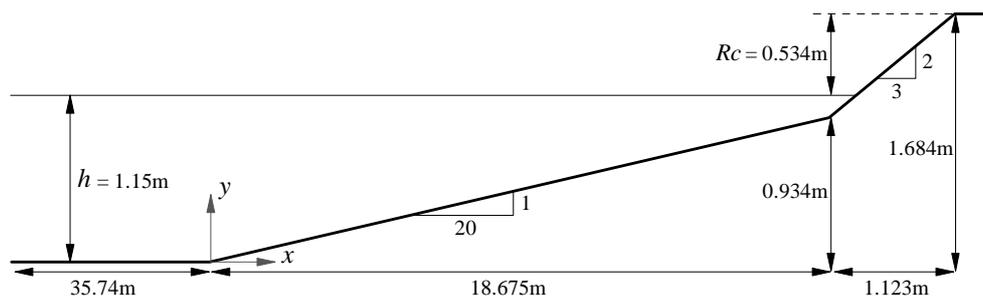


Figura 7. Representação esquemática do canal utilizado nos ensaios em modelo físico.

O domínio de cálculo é formado, à esquerda, por um baterdor de tipo pistão flexível sem absorção dinâmica de reflexão, que permite gerar uma onda sinusoidal com o perfil de velocidade adequado, variável com a profundidade. Este modo de geração permite modelar uma onda mais similar à onda dos ensaios e que se adapta rapidamente ao fundo. As dimensões adoptadas no modelo numérico são idênticas às dimensões do modelo físico, excepto a plataforma horizontal, que tinha um comprimento de 35.74m nos ensaios em modelo físico e tem 10.0m no modelo numérico. No entanto, foi

verificado que a onda gerada no modelo físico e no modelo numérico, apresentam, no início da rampa, uma altura e uma deformação de superfície similares (Didier e Neves, 2010).

A discretização adotada no presente caso corresponde a uma distância inicial entre as partículas de 0.1292m, ou seja, um volume de $1.67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ por partícula. O domínio computacional é assim constituído de 148629 partículas. A convergência dos resultados de elevação de superfície livre e do caudal médio galgado para esta discretização foi anteriormente verificada (Didier e Neves, 2010).

O modelo de viscosidade utilizado é o SPS, o kernel é o *quadratic* e o esquema de integração no tempo é o esquema *predictor-corrector*. A simulação numérica foi realizada por um tempo total de 60s, com um passo de tempo médio de $5.5 \times 10^{-4} \text{ s}$. O tempo CPU por período de onda é da ordem de 22 horas num computador PC Intel Core2 Duo E8500 3.16GHz.

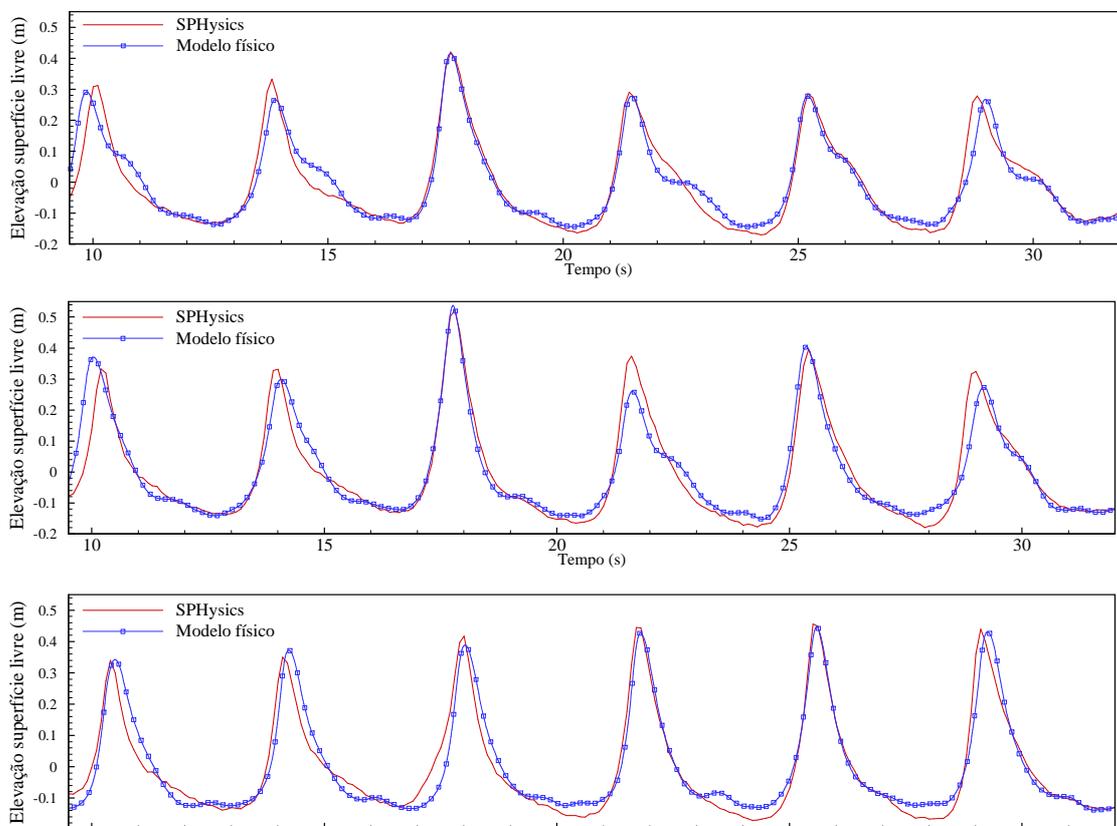


Figura 8. Elevação de superfície livre obtida com o modelo SPHysics e com o modelo físico nas sondas localizadas em $x=10.0\text{m}$, 10.5m e 11.0m (do pé da rampa).

A Figura 8 mostra a série temporal da elevação de superfície livre para as sondas localizadas a uma distância de 10.0m, 10.5m e 11.0m do início da rampa calculados com o modelo SPHysics e resultantes das medições obtidas em modelo físico. Observa-se uma boa concordância geral entre os resultados numéricos e os ensaios. Em particular, o período de onda é correctamente modelado, assim como a alteração de altura da onda durante a propagação ao longo da rampa de declive 1:20 (quando a profundidade diminui). As diferenças que existem na altura de onda, em vários instantes, são provavelmente ligadas à diferença de fases entre a frequência principal e as harmónicas que aparecem durante a propagação e à transformação da onda com a

diminuição da profundidade, tal como ocorria para o caso do recife (ver ponto 3). No entanto, a altura da onda é, em média, semelhante nos resultados de SPHysics e nos ensaios.

O caudal médio galgado por metro linear de estrutura é calculado através do volume galgado entre a segunda e sétima onda que atingem a estrutura, antes da re-reflecção das ondas no bateror. Esta escolha deve-se ao facto de que o modelo SPH não permite modelar muitas ondas devido ao tempo de cálculo, que se torna rapidamente proibitivo, e ao facto de o bateror utilizado não permitir absorver dinamicamente as ondas reflectidas pela estrutura, o que pode induzir uma alteração da intensidade do galgamento.

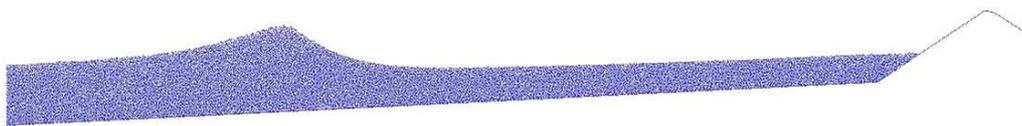
A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios físicos e os resultados numericos. É apresentado o caudal médio galgado obtido no modelo fisico para cinco repetições do mesmo ensaio, assim como o caudal médio galgado mínimo e máximo, a média do caudal médio galgado, μ , o seu desvio padrão, σ , e o coeficiente σ / μ . Verifica-se uma muito boa concordância entre o caudal médio galgado obtido com o modelo SPHysics e a média do caudal médio galgado obtido em modelo fisico. A diferença é de apenas 2.8%.

Tabela 3. Comparação do caudal médio galgado obtido com o modelo fisico e com o modelo SPHysics.

	Ensaio										SPHysics	
	1	2	3	4	5	Min	Max	μ	σ	σ / μ (%)	μ	Erro (%)
Caudal $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$	1.15	1.06	1.24	1.01	0.89	0.89	1.24	1.07	0.14	12.8	1.10	2.8

Finalmente, a Figura 9 apresenta a posição das partículas para vários instantes de tempo e ilustra os diferentes fenómenos que ocorrem no presente caso de interacção entre uma onda regular e uma estrutura costeira impermeável. É possível identificar os seguintes fenómenos: propagação da onda (9a), *run-up* (9b), *run-down*, reflexão e rebentação da onda (9c), galgamento da estrutura (9d) e *splash* intenso resultando da interacção entre a onda incidente e reflectida (9e).

a)



b)

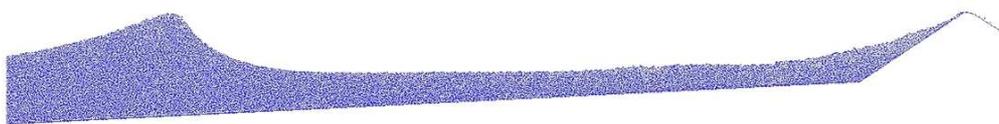




Figura 9. Posição das partículas na proximidade da estrutura marítima em vários instantes.

4.2. Forças na parede vertical de um quebra-mar misto

De entre os vários tipos de estruturas de protecção costeira, o mais utilizada em Portugal é o quebra-mar de taludes. Este tipo de estrutura tem a grande vantagem de ser de fácil construção e manutenção e relativamente eficiente na dissipação de energia das ondas. Outro tipo de quebra-mar, muito utilizado em costas de fundos com grande inclinação, como é o caso da costa da Madeira, é o quebra-mar vertical, formado por uma parede vertical, impermeável, onde a onda é reflectida para o largo. Quando comparados com os quebra-mares de talude tradicionais, os quebra-mares verticais permitem uma economia substancial de material com importantes consequências económicas e ambientais. No entanto, têm como desvantagens, entre outras, o facto de sofrerem ruína abrupta e o de, sendo também o seu paramento interior muito reflector, não contribuírem para o amortecimento da agitação residual dentro da bacia abrigada.

O quebra-mar misto é uma estrutura constituída por um prisma de enrocamento que se estende desde o fundo até uma certa cota, sobre a qual é assente uma parede vertical. O seu funcionamento é, até determinada altura de onda, análogo ao quebra-mar de parede vertical. Para alturas superiores, ao provocar a rebentação, funciona em parte como quebra-mar de talude e em parte como quebra-mar vertical. Agrega assim as vantagens (e alguns dos inconvenientes) dos dois tipos de estrutura. Um exemplo de uma estrutura deste tipo em Portugal, é o molhe leste do porto de Peniche.

Wang et al. (2006) realizou ensaios em modelo físico para uma estrutura deste tipo. O modelo SPHysics é aplicado a este caso. A força que se exerce na parede vertical do quebra-mar misto é calculada e comparada com os dados dos ensaios em modelo físico.

O domínio simulado é constituído por um batedor de tipo pistão flexível, situado numa zona horizontal de 4m de comprimento e com uma profundidade de 0.325m, seguida de uma curta rampa de 0.525m com um declive de 1:3 e de uma plataforma horizontal de 0.7m onde está localizado o quebra-mar misto. O coroamento da estrutura encontra-se 0.21m acima da superfície livre em repouso (Figura 10).

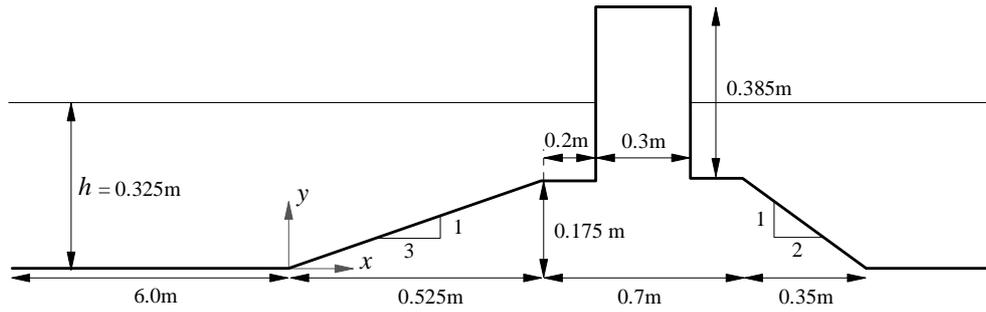


Figura 10. Representação esquemática da estrutura deflectora de onda.

No modelo numérico são utilizados o kernel *quadratic*, o esquema numérico de integração no tempo *predictor-corrector* e o modelo de viscosidade SPS. A distância inicial entre partículas é de 0.005m e o domínio de cálculo é constituído de 51829 partículas.

A Figura 11 apresenta, para vários instantes ao longo de um período, a posição das partículas para o caso de uma onda sinusoidal de período $T=1.3s$ e de altura $H=0.17m$, a que corresponde um comprimento de onda de cerca de 2.0m. Na Figura observa-se como o modelo consegue reproduzir uma sequência de vários fenómenos que ocorrem na interacção entre a onda incidente e o quebra-mar misto: a onda incidente interage com a onda reflectida pela estrutura e a altura de água ao pé da estrutura atinge o seu mínimo (11a) (11b); a onda rebenta um pouco antes chegar à estrutura (11c); a onda, depois do impacto inicial com a estrutura, sobe a parede vertical (11d) e uma lâmina de água, produzida pelo impacto, galga o coroamento do quebra-mar (11e); o jacto de água, sob o efeito da gravidade, entra em contacto com a superfície livre ao pé da estrutura (11f).

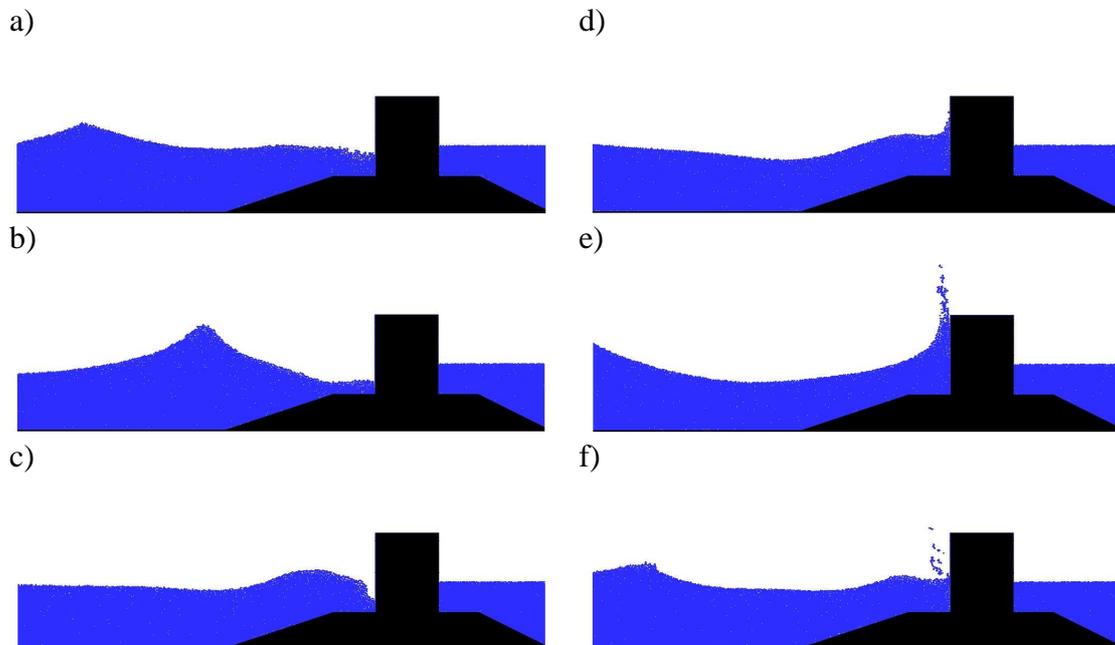


Figura 11. Posição das partículas na interacção entre uma onda sinusoidal e uma estrutura de tipo quebra-mar misto num período de tempo.

A Figura 12 apresenta a força horizontal induzida na parede vertical do quebra-mar ao longo do tempo. Os resultados numéricos são comparados com os dados obtidos em modelo físico (Wang et al., 2006). Verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os ensaios: os picos de força são correctamente simulados pelo modelo numérico, apesar das intensidades ficarem, de maneira geral, subestimadas. No entanto, a força máxima não foi correctamente reproduzida pelo modelo numérico já que o passo de tempo utilizado não é suficiente para detectar este máximo, como se pode observar na Figura 12. Já para a seguinte onda (em 4.67s), verifica-se que a intensidade da força apresenta uma muito boa concordância com os dados dos ensaios.

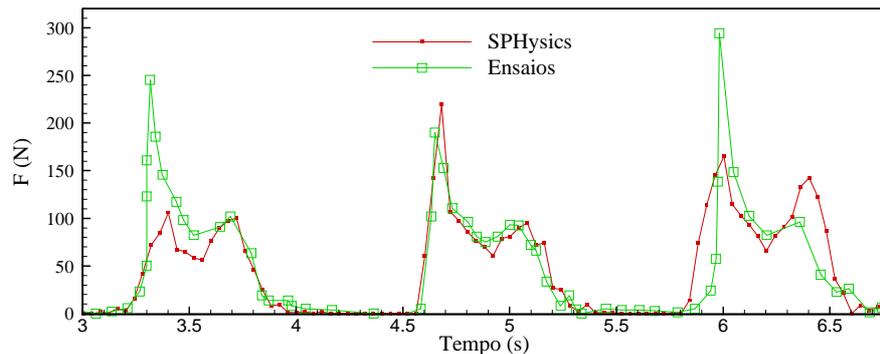


Figura 12. Força horizontal na parede vertical do quebra-mar misto obtida com o modelo SPHysics e com o modelo físico.

4.3. Estrutura com deflector de onda

A estrutura com deflector de ondas corresponde a uma solução frequentemente utilizada em estruturas costeiras para reduzir o galgamento. Neste caso, a interacção entre onda e estrutura dá-se frequentemente de forma violenta, onde o jacto de retorno na estrutura e a rebentação são os dois fenómenos dominantes. Este caso permite ilustrar as potencialidades do modelo para casos de interacção onda-estrutura de elevada complexidade.

O domínio simulado é constituído por um batedor de tipo pistão, situado numa zona horizontal de 27m de comprimento e com uma profundidade de 6m localizada à esquerda, seguida de uma rampa de 21m com um declive de 1:3. No final da rampa, na extremidade direita do domínio computacional, que se encontra 1m acima da superfície livre em repouso, é colocada uma estrutura costeira com um deflector de ondas de 1m de altura e de forma semicircular (Figura 13).

No modelo numérico são utilizados o kernel *quadratic*, o esquema numérico de integração no tempo *predictor-corrector* e o modelo de viscosidade SPS. A distância inicial entre partículas é de 0.06m e o domínio de cálculo é constituído de 59191 partículas.

A Figura 14 apresenta, para vários instantes ao longo de um período, a posição das partículas para o caso de uma onda sinusoidal de período $T=5.2s$ e de altura $H=3.5m$, a que corresponde um comprimento de onda de cerca de 34m.

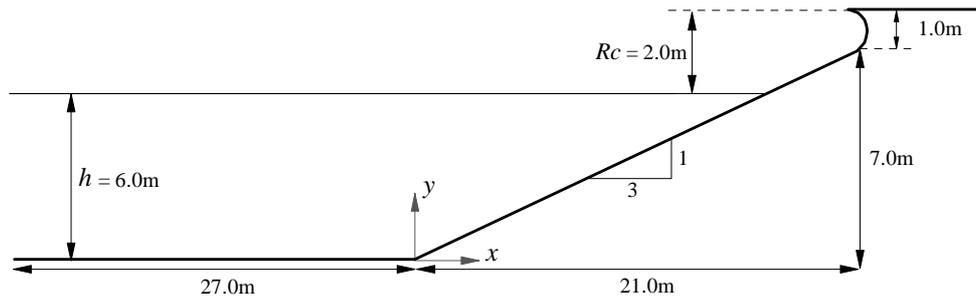


Figura 13. Representação esquemática da estrutura com deflector de onda.

Na Figura observa-se como o modelo consegue reproduzir uma sequência de vários fenómenos que ocorrem na interacção entre a onda incidente e a onda reflectida pela estrutura deflectora de onda: a onda interage com uma lâmina de água que desce o plano inclinado (*run-down*) (14a) e rebenta sobre o plano inclinado (14b); a lâmina de água produzida pelo impacto da rebentação sobe o declive (*run-up*) (14c) e o impacto da lâmina com o deflector semicircular de onda gera um jacto de água intenso na direcção oposta à propagação da onda (14d); este jacto de água, sob o efeito da gravidade, entra em contacto violento com a superfície livre, intensificando o *run-down* e gerando jactos locais de água (14e) e (14f).

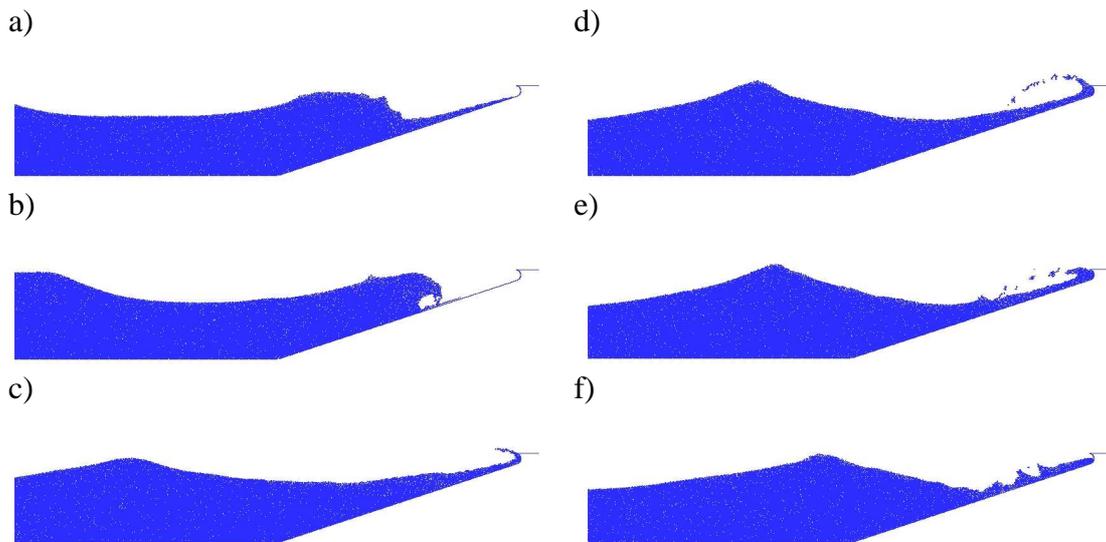


Figura 14. Posição das partículas na interacção entre uma onda sinusoidal e uma estrutura com deflector de ondas num periodo de tempo.

5. DESENVOLVIMENTO FUTURO

A modelação numérica recorrendo a um modelo SPH aqui apresentada relevou que o modelo é uma ferramenta promissora em estudos de interacção entre onda e estrutura marítima. A comparação dos resultados numéricos com dados de ensaios em canal (2D) para estruturas impermeáveis mostrou a capacidade do programa para modelar os fenómenos que intervêm no galgamento de estruturas e para prever o caudal médio galgado e as forças em estruturas.

A extensão do modelo actual a estruturas porosas é a continuação lógica do trabalho realizado e permitirá dispor de um modelo de interacção onda-estrutura capaz, em particular, de efectuar a previsão do galgamento de estrutura reais, onde a porosidade dos mantos joga um papel determinante.

Assim, na continuação do trabalho anterior, prevê-se a necessidade de efectuar diferentes melhoramentos no modelo, dos quais se destacam: o acoplamento com um programa de propagação, a simulação de interacção com estruturas porosas e a introdução da absorção dinâmica de reflexão no batedor numérico utilizado para gerar a agitação no domínio.

O acoplamento entre um programa de propagação de onda e o SPPhysics irá permitir aumentar o domínio de cálculo, já que, devido ao esforço computacional deste programa, o seu domínio de simulação é necessariamente pequeno e deve-se restringir à zona onde os fenómenos de interacção onda-estrutura ocorrem. Pretende-se acoplar este modelo com um modelo de propagação da agitação desde o largo até à estrutura galgada, de forma a modelar correctamente uma zona mais ampla sem introduzir grandes aumentos de tempo de cálculo. A posição da secção de acoplamento e os dados a transferir do modelo de propagação para o modelo SPPhysics devem ser definidos criteriosamente. Este desenvolvimento permitirá assim estender de forma eficiente a aplicação do modelo SPH a casos de estruturas reais.

Com a metodologia de acoplamento que se pretende desenvolver, é também necessário incluir no modelo actual um método de absorção dinâmica das ondas na fronteira de geração de ondas. Este desenvolvimento é indispensável para obter resultados fiáveis (séries temporais de elevação de superfície livre, galgamento, etc...) num intervalo de tempo suficiente para análise.

Dado que a grande maioria das estruturas marítimas são constituídas por mantos porosos (enrocamento ou blocos artificiais), a introdução dos meios porosos no modelo numérico permitirá simular a interacção de ondas com qualquer tipo de estrutura. Prevê-se que se utilizem duas opções de modelação para o escoamento no meio poroso:

- Modelação do meio poroso simulado como partículas individuais, recorrendo a um modelo de porosidade.
- Modelação directa do meio poroso como um todo, considerando uma porosidade característica do meio. Esta metodologia é válida para meios porosos constituídos de blocos artificiais, tal como tetrapodes ou accropodes, onde a porosidade é da ordem de 40% a 50%, compatível com as capacidades do modelo numérico.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

Batchelor G.K., 1974. Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, UK.

Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Dalrymple R.A., 2008. Modeling dam break behavior over a wet bed by a SPH technique. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 134(6), 313-320.

Crespo A.J.C., 2008. Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPPhysics to free-surface hydrodynamics. Tese de doutorado, Universidade de Vigo, Espanha.

Dalrymple R.A., Rogers B.D., 2006. Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3), 141-147.

Didier E., Neves M.G., 2008. Estudo da interacção onda-estrutura utilizando um modelo numérico Lagrangiano. *Revista Recursos Hídricos*, 29(2), 15-26.

Didier E., Neves M.G., 2009a. Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 496-500.

Didier E., Neves M.G., 2009b. Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure. *Proc. 4th International SPHERIC workshop*, 357-364, Nantes, França.

Didier E., Neves M.G., 2009c. Metodo Lagrangiano para modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura costeira. *Proc. Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal-Madeira, Portugal.

Didier E., Neves M.G., 2010. A Lagrangian Smoothed Particles Hydrodynamics – SPH – method for modelling waves-coastal structure interaction. *Proc. CFD2010 ECCOMAS*, Lisboa, Portugal.

Fortes C.J., Neves M.G., Santos J.A., Capitão R., Palha A., Lemos R., Pinheiro L., Sousa I., 2008. 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*, Lisboa, Portugal.

Gingold R.A., Monaghan J.J., 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375-389.

Gómez-Gesteira M., Rogers B.D., Dalrymple R.A., Crespo A.J.C., Narayanaswamy, 2009. User Guide for the SPPhysics Code v1.4. <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>

Gotoh H., Shibahara T., Sakai T., 2001. Sub-particle-scale turbulence model for the MPS method-Lagrangian flow model for hydraulic engineering. *Computational Fluid Dynamics Journal*, 9(4), 339-347.

Hu K., Mingham C.G., Causon D.M., 2000. Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using non-linear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 41, 433-465.

Johnson G., Stryk R., Beissel S., 1996. SPH for high velocity impact calculations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, 347-373.

Koshizuka S., Tamako H., Oka Y., 1995. A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation. *Computational Fluid Dynamics Journal*, 4(1), 29-46.

Lara J.L., Garcia N., Losada I.J., 2006. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53(5-6) 395-417.

Liu G.R., Mesh free methods. Moving beyond the finite element method. CRC press, 2003.

Lucy L.B., 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astron. J.*, 82(12), 1013-1024.

Monaghan J.J., 1989. On the problem of penetration in particle methods. *Journal Computational Physics*, 82, 1-15.

Monaghan J.J., 1992. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543-574.

Monaghan J.J., 1994. Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110, 399-406.

Monaghan J.J., Kos A., 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 125, 145-154.

Rogers B.D., Dalrymple R.A., 2004. SPH modeling of breaking waves. *Proc. 29th Int. Conference on Coastal Engineering*, World Scientific Press, 415-427.

Shao S.D., Lo E.Y.M., 2003. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface. *Adv. Water Resour.*, 26(7), 787-800.

Shao S.D., Ji C., Graham D.I., Reeve D.E., James P.W., Chadwick A.J., 2006. Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model. *Coastal Engineering*, 53, 723-735.

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

Ten Voorde M., Neves M.G., Antunes-Carmo J., 2009. Physical study of “breaker types” over an artificial reef. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 569-573.

Wang Y.Z., Chen N.N., Chi L.H., 2006. Numerical simulation on joint motion processes of various modes of caisson breakwater under wave excitation. *Comm. Num. Meth. Engng.*, 22, 535-545.