



Modelação da Interação entre uma Onda e uma Estrutura de Protecção Costeira usando um Modelo Numérico SPH - Smoothed Particles Hydrodynamics *

Study of Wave Interaction with Coastal Structures using a SPH Numerical Model

Eric Didier @,¹, Maria da Graça Neves ¹

RESUMO

Na última década os métodos numéricos baseados na abordagem Lagrangiana, conhecidos genericamente como modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), foram objecto de um forte desenvolvimento, favorecido principalmente pela capacidade computacional dos meios de cálculo.

Um dos modelos SPH que se encontra actualmente em desenvolvimento é o modelo SPHysics, que permite modelar escoamentos com superfície livre. SPHysics é um modelo numérico bi e tri-dimensional, baseado num método Lagrangiano, que não necessita de malha e que resolve as equações da dinâmica dos fluidos (equações de Navier-Stokes) adequadamente escritas para a aplicação da técnica SPH. Este modelo tem vindo a ser utilizado e desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 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.

Apresenta-se, neste artigo, uma breve descrição do modelo e definem-se os valores de alguns parâmetros do modelo a utilizar em estudos de interacção onda-estrutura. Esses valores foram definidos com base no resultado de estudos anteriores de sensibilidade e validação do modelo realizados nos últimos anos no LNEC.

Para ilustrar a aplicação do modelo numérico SPHysics ao estudo da interacção de ondas com estruturas de protecção marginal impermeáveis, apresentam-se dois casos para os quais existem dados de ensaios experimentais. Estes dois exemplos permitem demonstrar as capacidades do modelo SPHysics na modelação de escoamentos complexos com superfície livre, 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 e o galgamento. Os resultados de caudal médio galgado obtidos com o modelo SPHysics apresentam boa concordância com os dados experimentais. Verificou-se que, para casos

@ - *corresponding author*: edidier@lnec.pt

1 - LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal. edidier@lnec.pt; gneves@lnec.pt

* - *Submissão* – 28 Abril 2010; *Avaliação* – 7 Julho 2010; *Recepção da versão revista* – 24 Julho 2010; *Disponibilização on-line* – 2 Dezembro 2010

onde o caudal galgado seja muito reduzido, que corresponde à condição mais difícil de ser modelada quer experimental quer numericamente, deve-se definir cuidadosamente a dimensão inicial máxima das partículas, de modo a obter resultados independentes da discretização mas no mínimo tempo de cálculo possível.

Por fim, o modelo SPHysics é utilizado para modelar a propagação de ondas regulares numa estrutura costeira que termina num deflector de ondas. Este caso, embora não possa ser validado por não se dispor de dados experimentais para tal, é relevante para a ilustração das potencialidades do modelo, dado a complexidade dos fenómenos envolvidos, especialmente das interações da onda deflectida com a onda incidente e reflectida. Os resultados da simulação apresentados permitem verificar que o modelo modela sem dificuldade e com realismo este tipo muito complexo de escoamento que inclui não só a rebentação da onda mas também da acção do deflector de ondas e a forte interacção que ocorre entre o jacto de água induzido pelo deflector e a própria onda na fase de *run-down*.

Finalmente apresenta-se um resumo das principais vantagens e limitações do modelo quando aplicado a estudos de interacção onda-estrutura e referem-se os desenvolvimentos futuros do modelo de forma a torná-lo numa ferramenta numérica eficiente e fiável para concepção, optimização e análise de estrutura marítimas.

Palavras-chave: Estruturas costeiras, modelos numéricos, método Lagrangiano, *Smoothed Particles Hydrodynamics*, galgamento, rebentação

ABSTRACT

In the last decade, the numerical methods based on the Lagrangian approach, known generically as SPH models (Smoothed Particle Hydrodynamics), have undertaken a strong development, fostered mainly by the increase in computational capacity.

One SPH model that is currently under development is the SPHysics model, which allows modeling free surface flows. SPHysics is a bi- and tri-dimensional numerical model, based on a Lagrangian method. The model is based on a mesh-free technique and solves the equations of fluid dynamics (Navier-Stokes equations) written in SPH form. This model has been used and developed at the National Civil Engineering Laboratory (LNEC), in order to verify its applicability to studies of wave-structure interaction, specifically for calculating wave overtopping, reflection and forces on structures.

This paper presents a brief description of the model and defines values of some model parameters to be used in studies of wave-structure interaction. These values were defined based on the results of previous sensitivity studies and on validation of the model carried out in recent years at LNEC.

To illustrate the application of the numerical model SPHysics to study the interaction of waves with impermeable coast protection structures, two case studies are presented for which there are experimental data. These two examples demonstrate the capabilities of SPHysics in modeling complex free surface flows, involving a set of phenomena that significantly change the characteristics of the wave, such as breaking and subsequent reflection on the structure and overtopping. The results of mean overtopping discharge obtained with SPHysics show good agreement with experimental data. For very low overtopping cases, more difficult to model both experimentally and numerically, the initial maximum particle size must be defined carefully in order to obtain results that are not affected by the adopted discretization whilst still keeping the required calculation time to a minimum.

Finally, SPHysics is used to model the propagation of regular waves towards a coastal structure with a wave recurve wall. Although experimental data are not available to validate this case, it is relevant to illustrate the potential of the model for the complex phenomena involved, especially the wave interactions with the incident and reflected waves. The presented simulation results show that SPHysics models, without difficulty and with realism, this type of very complex flow that includes the wave surf, the wave action on the recurve wall and the strong interaction between the jet induced by the recurve wall and the wave itself during the run-down.

Finally, a summary is presented of the main advantages and limitations of the model when applied to studies of wave-structure interaction. The paper ends with suggestions for future developments of the model in order to make it an efficient and reliable numerical tool for design, optimization and analysis of maritime structures.

Keywords: Coastal structures, numerical models, Lagrangian method, *Smoothed Particles Hydrodynamics*, wave overtopping, wave-breaking

1. INTRODUÇÃO

O projecto de concepção de obras marítimas baseia-se normalmente em fórmulas empíricas ou semi-empíricas, cuja forma assenta em considerações

de ordem física mas com constantes empíricas determinadas com base em ensaios experimentais. Assim, o limite de validade é reduzido já que são apenas válidas para a gama de valores desses ensaios.

Além disso, para alguns casos, não permitem obter uma estimativa com a precisão necessária. Actualmente, em casos práticos de engenharia e pela importância cada vez maior que se dá aos impactos destas estruturas, surgem geometrias mais originais, para as quais não existem formulações empíricas ou semi-empíricas aplicáveis. Assim, torna-se necessário obter mais informação proveniente quer de medições quer da modelação numérica ou física.

Os modelos físicos são utilizados essencialmente nas fases finais de projecto e são apenas estudados alguns casos seleccionados, já que este tipo de ensaios é caro e moroso e necessita de boas infra-estruturas, diversas técnicas de medição, além de experiência e conhecimento da parte de quem realiza os ensaios e analisa os resultados.

Nas últimas décadas o desenvolvimento dos meios computacionais permitiu obter soluções aproximadas das equações matemáticas que descrevem o escoamento permitindo simular cenários realistas de escoamento. Em muitos casos, a modelação numérica é mais rápida e mais barata que a modelação física e é muito flexível, podendo alterar-se facilmente a geometria de uma obra ou as condições de agitação, modificando apenas os ficheiros de entrada do modelo. Estes modelos permitem complementar os estudos em modelo físico e obter informações sobre o escoamento que seriam muito difícil ou mesmo impraticáveis de obter em modelo físico. Um modelo que permita determinar correctamente as características do escoamento ao redor e sobre a estrutura, permite ainda, com base nos resultados que dele se obtêm directamente, estabelecer parâmetros relacionados quer com a funcionalidade da estrutura (galgamentos, reflexão, etc.), quer relacionados com a sua estabilidade (acções sobre as peças do manto, problemas de erosão, etc.). No entanto, embora sendo uma ferramenta útil, no projecto final de estruturas costeiras, a verificação dos resultados com base em modelos físicos reduzidos continua a ser, em muitos casos, imprescindível.

No caso concreto da modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura marítima, ao longo das últimas décadas foram desenvolvidos modelos numéricos, com diferentes níveis de complexidade, aproveitando a evolução dos métodos numéricos. Estes modelos numéricos, que integram

a modelação da superfície livre, permitem descrever tão detalhadamente quanto possível a física do processo e, desta forma, prever as características essenciais do escoamento.

Actualmente existem diferentes tipos de modelos para estudos de interacção entre ondas e estruturas, que se encontram em diferentes etapas de desenvolvimento, cada um deles com as suas vantagens e campos de aplicação. Os modelos não lineares integrados na vertical que resolvem as equações não lineares de Boussinesq, como o COULWAVE (Lynett & Liu, 2004) ou o FUNWAVE (Kirby *et al.*, 1998, Chen *et al.*, 2000), permitem obter a deformação da superfície livre mas são limitados a declives suaves e são integrados na vertical. Estes modelos podem modelar o espraiamento mas não o galgamento (ou apenas recorrendo a modelos de rebentação que devem ser calibrados). Modelos não lineares, como o programa CANAL (Clément, 1996) que resolve as equações de Euler usando um método de elementos de fronteira (BEM – *Boundary Element Method*), permitem obter a deformação de superfície livre, o campo de velocidades e pressão sem ter limitações de geometria das fronteiras. No entanto, estes modelos não têm capacidade de modelar deformações complexas da superfície livre, como a que ocorre na rebentação das ondas, nem o galgamento de estruturas marítimas. Modelos baseados nas equações de Navier-stokes, como o código FLUINCO (Teixeira, 2001), 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 nem o galgamento de estruturas. Os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes, que incluem um método de captura de interface, permitem também modelar escoamentos com superfície livre (Didier, 2007, Neves *et al.*, 2008). O programa COBRAS-UC (Lara *et al.*, 2006), em que o método de captura de superfície livre implementado é de tipo VOF (*Volume of Fluid*) (Hirt & Nichols, 1981), 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 numa malha fixa ou dinâmica. Na última década os métodos numéricos baseados na abordagem Lagrangiana, conhecidos genericamente como modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), foram objecto de um forte desenvolvimento, favorecido principalmente pela capacidade computacional dos meios de cálculo.

Os métodos SPH foram utilizados inicialmente em astrofísica (Gingold & Monaghan, 1977, Lucy, 1977) e aplicados mais tarde à hidrodinâmica (Monaghan, 1994, 2005). 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 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.

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) (Crespo, 2008, Crespo *et al.*, 2008).

O modelo numérico SPHysics, na sua versão 1.4 (Gómez-Gesteira *et al.*, 2009), é inspirado da formulação proposta por Monaghan (1992) e 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.

Desde Novembro de 2007, o modelo SPHysics tem vindo a ser estudado, utilizado e desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 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 & Neves, 2008, Didier & Neves, 2009a, Didier & Neves, 2010).

A aplicabilidade do modelo numérico SPHysics a estudos de engenharia costeira é analisada no presente artigo através da modelação da propagação das ondas e da rebentação e do galgamento que ocorrem na interacção entre estas ondas e uma estrutura costeira impermeável.

São apresentados dois casos de estudo para os quais existem dados experimentais. O primeiro caso corresponde ao galgamento de uma estrutura costeira impermeável de declive 1:3. Os resultados do volume médio galgado são comparados com outros resultados numéricos e com dados de ensaios em modelo físico obtidos por Saville (Kobayashi & Wurjanto, 1989, Shao *et al.*, 2006). O segundo caso corresponde ao galgamento de uma estrutura impermeável típica da costa Portuguesa de declive 2:3. Neste caso, a precisão dos resultados do modelo é avaliada pela comparação dos resultados numéricos com dados experimentais obtidos em ensaios em canal, realizados no âmbito do projecto *Composite Modelling of the Interactions between Beaches and Structures* (CoMIBBs) - HYDRALAB III European Project (Fortes *et al.*, 2008). Trata-se de um caso de estudo 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 e o galgamento.

Por fim, o modelo SPHysics é utilizado para modelar a propagação de ondas regulares numa estrutura costeira que termina num deflector de ondas. Este caso, embora não se disponha de dados

experimentais para a sua validação, é relevante para a ilustração das potencialidades do modelo, dado a complexidade dos fenómenos envolvidos, especialmente das interações da onda deflectida com a onda incidente e reflectida.

2. MODELO NUMÉRICO SPHysics

SPHysics é um modelo numérico bi e tri-dimensional, baseado num método Lagrangiano, que não necessita de malha e que resolve as equações da dinâmica dos fluidos (equações de Navier-Stokes) adequadamente escritas para a aplicação da técnica SPH (Monaghan, 1994), de ora avante designadas por equações SPH. Apresentam-se de seguida o método SPH, o kernel de interpolação utilizado para escrever as equações no formalismo SPH, as respectivas equações discretas e a implementação numérica do modelo.

2.1 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.

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 massa volúmica da partícula b .

As derivadas da função f são calculadas analiticamente, simplesmente derivando o kernel, o que constitui uma das vantagens do método SPH.

2.2 Kernel de interpolação

O kernel de interpolação é uma função analítica que pode ser diferenciada sem necessitar de uma malha espacial e que varia com a distância. 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).

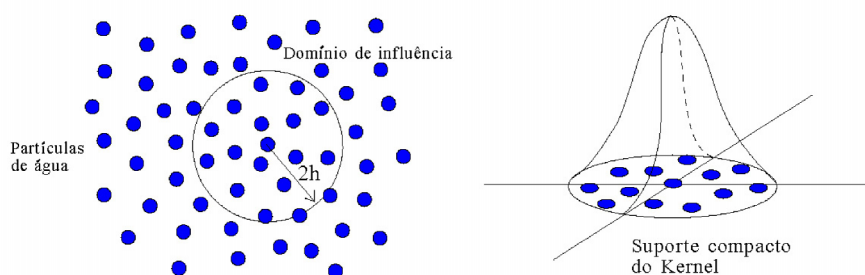


Figura 1 Domínio de influência do kernel, partículas que contribuem para a interpolação e suporte compacto do kernel.

Figure 1 Influence domain of the kernel, particles used for the interpolation and a typical kernel function.

Existem diversos kernels na literatura, sendo a sua utilização 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 kernel de interpolação *quadratic* (Johnson *et al.*, 1996, Dalrymple & Rogers, 2006), utilizado para todas as simulações numéricas realizadas no presente estudo, é definido pela seguinte função analítica:

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

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

Este kernel não tem ponto de inflexão na sua derivada no intervalo de definição da função.

2.3 Equações da dinâmica dos fluidos

Nas equações SPH, a equação discreta de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{Dv_a}{Dt} = \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \cdot \nabla_a W_{ab} + g \quad (4)$$

onde t é o tempo, $g = (0, 0, -9.81)$ m.s⁻² é a aceleração da gravidade, v_a , P_a e ρ_a são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa volúmica de uma dada partícula a , P_b , ρ_b e m_b são, respectivamente, a pressão, a massa volúmica e a massa de uma dada partícula b contida no suporte compacto do kernel, W_{ab} é um kernel de interpolação e Π_{ab} é o termo de viscosidade.

Finalmente, $\nabla_a W_{ab}$ é dado por:

$$\nabla_a W_{ab} = \nabla_a W(r_a - r_b) = \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a} i + \frac{\partial W_{ab}}{\partial y_a} j \quad (5)$$

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, foram implementados três modelos para os termos viscosos Π_{ab} :

viscosidade artificial (Monaghan, 1992), viscosidade laminar (Morris *et al.*, 1997) e viscosidade laminar associada ao modelo de turbulência SPS – *Sub-Particle Scale* (Gotoh *et al.*, 2001, Rogers & Dalrymple, 2004). Este último modelo é o utilizado nas presentes simulações numéricas, pois inclui não só um modelo de viscosidade mas também os efeitos ligados à turbulência através de um modelo derivado dos modelos do tipo LES (*Large Eddy Simulation*). Foi verificado também que o modelo de viscosidade artificial, relativamente utilizado nas simulações em SPH, introduz uma difusão numérica importante, alterando significativamente a altura das ondas: a amplitude das ondas diminui quando o parâmetro do modelo de viscosidade artificial aumenta (Didier & Neves, 2009b).

A equação de conservação de massa discreta no formalismo SPH é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (u_a - u_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (6)$$

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

$$\frac{dr_a}{dt} = u_a + \varepsilon \sum_b m_b \frac{v_{ab}}{\rho_{ab}} W_{ab} \quad (7)$$

onde $v_{ab} = v_a - v_b$ e $\bar{\rho}_{ab} = (\rho_a - \rho_b) / 2$. O último termo da equação, incluindo o parâmetro ε , corresponde à correcção 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 tipicamente utilizado do parâmetro ε é de 0.5 (valor por defeito) e é este também o valor usado no programa SPHysics (SPHysics code v1.4, 2009). No entanto, uma análise de sensibilidade do programa SPHysics a este parâmetro, efectuada no âmbito da modelação da propagação e rebentação das ondas (Didier & Neves, 2009b), mostrou que aparecem instabilidades numéricas ao longo do tempo quando é utilizado o valor por defeito do parâmetro ε . As instabilidades, que se traduzem por acumulações locais de partículas que atravessam as fronteiras sólidas,

desaparecem quando a correcção XSPH de Monaghan é anulada, ou seja quando o parâmetro ε é nulo.

É necessário ainda uma última equação, a equação de estado (Batchelor, 1974), que relaciona a pressão no fluido com a massa volúmica e é dada por:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (8)$$

onde $\gamma=7$ e $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$, sendo ρ_0 a massa volúmica de referência e c_0 a velocidade do som. Esta equação subentende que o fluido é compressível. Por razões de ordem numérica, o valor de c_0 deve ser suficientemente alto para reduzir as flutuações devidas à massa volúmica e suficientemente baixo para permitir que o modelo corra com um passo de cálculo razoável. Assim, é normalmente considerado no cálculo um valor de velocidade do som consideravelmente menor do que o seu valor real. No modelo SPHysics usa-se a técnica de compressibilidade artificial. Assim, em vez de se resolver uma equação de pressão de Poisson, onde o fluido é considerado incompressível (Koshizuka *et al.*, 1995, Shao & Lo, 2003), a pressão no fluido é calculada através de uma equação de estado (equação 8). Com esta hipótese, a variação de massa volúmica é inferior a 1% (Dalrymple & Rogers, 2006).

2.4 Implementação numérica

Na implementação numérica do modelo, é utilizado o esquema numérico *predictor-corrector*, descrito por Monaghan (1989), para a integração no tempo. O passo de tempo é controlado automaticamente, respeitando as condições propostas por Monaghan & Kos (1999) e depende da condição de Courant, dos termos de difusão viscosa e dos esforços.

A velocidade das partículas é calculada usando a equação discreta de conservação da quantidade de movimento (equação 4), a massa volúmica é definida a partir da equação discreta de continuidade (equação 6) e a posição das partículas é calculada usando a equação 7, sem a correcção XSPH de Monaghan, como foi referido anteriormente. A pressão é calculada a partir da massa volúmica, usando a equação

de estado (equação 8).

Para melhorar a eficiência computacional, o domínio de cálculo é dividido em elementos quadrados de $2b$ de lado, onde b é o *smoothing length* (Monaghan & Latanzio, 1985). Assim, para uma partícula contida num elemento, apenas são consideradas as interacções com as partículas dos elementos vizinhos (8 para o caso bidimensional). A elaboração da lista de conexão entre estes elementos permite reduzir o tempo dedicado à procura das partículas em interacção, o que resulta numa redução considerável do tempo de cálculo.

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 interacção proveniente do exterior. Esta contribuição pode gerar efeitos pouco realistas (Gómez-Gesteira *et al.*, 2004). 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 a utilizada nas presentes simulações de propagação de ondas e emprega o mínimo de partículas sólidas necessárias para definir a condição de fronteira sólida do domínio computacional.

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 e 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 (pressão hidrostática). A Figura 2 apresenta uma vista esquemática de um exemplo de distribuição inicial das partículas sólidas e fluidas. Mais detalhes da implementação numérica do modelo podem encontrar-se no Manual do programa SPHysics (Gómez-Gesteira *et al.*, 2009) e em Gómez-Gesteira *et al.* (2010) e Rogers *et al.* (2010).

A geração de ondas é realizada através um batedor flexível que permite impor às partículas um perfil de velocidade variável com a profundidade de acordo com o perfil de velocidade vertical de uma onda

regular, considerando a teoria linear das ondas. No entanto, na sua versão actual, o batedor não permite absorver dinamicamente as ondas reflectidas.

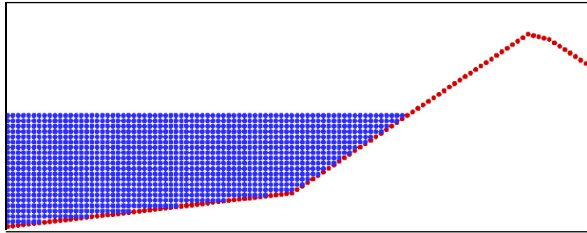


Figura 2 Domínio computacional com a posição das partículas sólidas da fronteira (vermelho) e a distribuição inicial das partículas fluidas (azul).

Figure 2 Computational domain and initial position of solid boundary particles (red) and fluid particles (blue).

3. MODELAÇÃO DA INTERACÇÃO DAS ONDAS COM ESTRUTURAS COSTEIRAS IMPERMEÁVEIS

A modelação numérica da interacção de ondas com estruturas costeiras é um problema de elevada complexidade por causa dos fenómenos complexos, turbulentos e não lineares que ocorrem durante este evento: propagação e transformação da onda na região junto à costa, rebentação, espraçamento, reflexão, interacção entre onda incidente e onda reflectida, formação de estruturas coerentes turbulentas geradas pela rebentação das ondas e galgamento.

A fim de demonstrar as capacidades do modelo SPHysics na modelação de escoamentos complexos com superfície livre, particularmente no que diz respeito a rebentação das ondas e ao galgamento de estrutura, são aqui apresentados os resultados da modelação de dois casos de estruturas de protecção marginal impermeáveis com declives diferentes e para os quais existem dados de ensaios experimentais.

Por fim, apresenta-se um caso de aplicação do modelo SPHysics a uma estrutura de protecção marginal com deflector de ondas.

3.1 Estrutura marginal impermeável com declive 1:3

A estrutura costeira impermeável aqui modelada numericamente para validar o modelo SPHysics, corresponde ao caso ensaiado em modelo físico por

Saville (Kobayashi & Wurjanto, 1989, Shao *et al.*, 2006) em que as ondas se propagam sobre um talude de inclinação constante (1:10) que termina numa estrutura de protecção com uma inclinação de 1:3. Foram modelados quatro dos casos ensaiados, que diferem entre si nos valores da profundidade ao pé da estrutura, d_s , e na cota do coroamento da estrutura acima do nível de água em repouso, R_c . A Figura 3 apresenta o perfil do canal e as notações utilizadas e a Tabela 1 apresenta as respectivas características geométricas das quatro configurações e o número de partículas utilizadas para cada uma. As características das ondas regulares modeladas para as quatro configurações correspondem a um período da onda $T=4.73s$ com uma altura da onda $H=1.0m$. A profundidade do canal é $b=3.0m$. Com estas características o comprimento da onda, L , é de 23.4m.

O estudo de convergência com a densidade inicial de partículas, realizado por Didier & Neves (2009b) para a configuração 1, revelou que uma densidade inicial de partículas correspondente a uma distância de 0.05m entre partículas é suficiente, nesta configuração, para obter resultados praticamente independentes da densidade inicial de partículas. Assim, para esta densidade inicial de partículas, o domínio de cálculo da configuração 1 é constituído de 20618 partículas (ver Tabela 1), sendo as fronteiras constituídas por 863 partículas sólidas. Para as outras três configurações, foi considerado o mesmo critério de densidade inicial de partículas, com distância de 0.05m entre as partículas, embora este valor se possa vir a revelar insuficiente no caso do galgamento ser menor (como se verifica mais adiante para a configuração 2).

O modelo de turbulência utilizado foi o SPS e o kernel o *quadratic*. O passo de tempo médio, dt , foi de $1.3 \times 10^{-4}s$ e a simulação foi realizada para 50.0s.

O batedor situado à esquerda do canal é animado de um movimento harmónico com uma amplitude de 0.624m e permite gerar uma onda regular de 1.0m de altura.

Para calcular o volume galgado sobre a estrutura, foi colocada uma sonda numérica no início do seu coroamento. O volume galgado é fácil de calcular, pois a cada partícula é associado um volume e uma massa volúmica. A contagem do número de partículas permite assim obter o volume galgado ao longo do

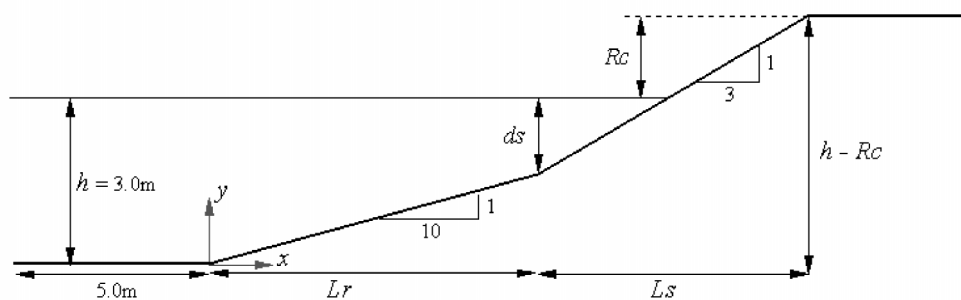


Figura 3 Perfil do fundo e da estrutura costeira e notações.

Figure 3 Bottom and structure profile and notation.

Tabela 1 Características geométricas das quatro configurações modeladas.

Table 1 Geometric characteristics of the four configurations tested.

Caso	ds (m)	Rc (m)	Lr (m)	Ls (m)	Número de Partículas
Configuração 1	0.75	0.50	22.50	3.75	20618
Configuração 2	0.75	1.00	22.50	5.25	20658
Configuração 3	1.50	0.50	15.00	6.00	18113
Configuração 4	1.50	1.00	15.00	7.50	18143

tempo. O galgamento médio é estimado através do volume galgado entre a segunda e sexta onda que atingem a estrutura, isto é, quando a interação entre a onda e a estrutura é relativamente periódica e antes da re-reflexão da onda no bater se tornar excessiva.

A Figura 4 apresenta a evolução do volume galgado ao longo do tempo para as configurações 1 a 4. Como é de esperar, o volume galgado diminui quando a altura do coroamento da estrutura, Rc , 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, ds no volume galgado. Esta profundidade determina o comprimento do declive da estrutura 1:3, o que se traduz por um acentuar do declive do fundo nas proximidades da estrutura. Assim, para um mesmo Rc , o galgamento aumenta com o aumento de ds . Além disto, 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.

A Tabela 2 apresenta o caudal médio galgado adimensional, μ , definido pela relação $Q/(H(gH)^{1/2})$, onde

g é a gravidade, H a altura da onda e Q o caudal médio galgado. Note-se que o coeficiente de variação, σ/μ , onde σ é o desvio padrão médio adimensional por onda, é da ordem de 20%, excepto para a configuração 2 onde é aproximadamente 10%.

Nas configurações 1 e 2 a rebentação é do tipo mergulhante: a crista da onda “dobra-se” e rebenta sobre a estrutura (Figura 5). Nas configurações 3 e 4, a rebentação é do tipo rebentação de fundo: a crista não chega a rebentar mas espraia-se sobre o talude (Figura 6). Como a rebentação de fundo é mais energética que a mergulhante, o galgamento associado é maior, como se observa na Figura 4.

Os resultados do caudal médio galgado obtidos com o modelo SPHysics são comparados com os dados experimentais de Saville (Kobayashi & Wurjanto, 1989, Shao *et al.*, 2006) e com os resultados numéricos de Kobayashi & Wurjanto (1989), Hu *et al.* (2000) e Shao *et al.* (2006). Os dois primeiros autores, Kobayashi & Wurjanto (1989) e Hu *et al.* (2000), utilizam um modelo não linear de águas pouco profundas integrado na vertical. O último autor utiliza um modelo SPH baseado

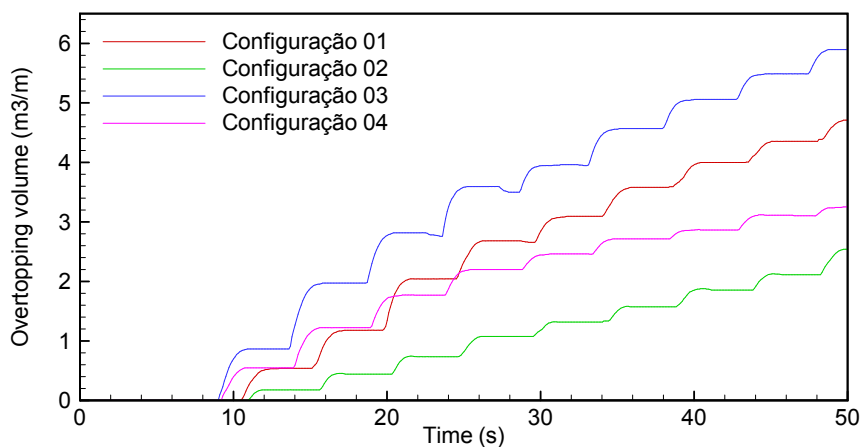


Figura 4 Volume galgado ao longo do tempo para as quatro configurações.

Figure 4 Overtopping volume versus time for the four configurations.

Tabela 2 Caudal médio galgado adimensional, μ , e respectivos desvio padrão, σ , e coeficiente de variação, σ/μ .

Table 2 Dimensionless mean overtopping discharge, μ , standard deviations, σ , and coefficients of variation, σ/μ .

Caso	μ	σ	σ/μ (%)
Configuração 1	61.20	12.30	20.1
Configuração 2	28.80	2.80	9.7
Configuração 3	66.20	13.20	19.9
Configuração 4	38.00	9.40	24.7

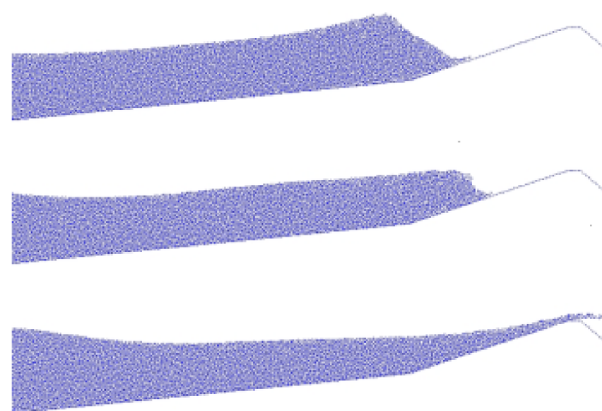


Figura 6 Rebentação de fundo: configuração 3 e 4.

Figure 6 Collapsing waves: configuration 3 and 4.

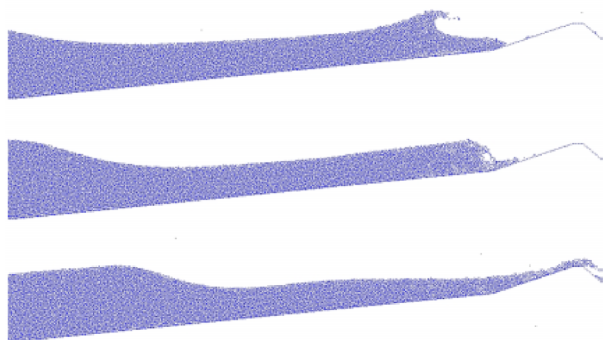


Figura 5 Rebentação mergulhante: configuração 1 e 2.

Figure 5 Plunging waves: configuration 1 and 2.

na formulação incompressível com uma densidade inicial de partículas correspondente a uma distância de 0.1m entre partículas, duas vezes superior à distância entre partículas utilizada nas presentes simulações numéricas. O domínio computacional utilizado tem as mesmas características geométricas que o do presente estudo e é constituído por 5390 partículas.

O caudal médio galgado adimensional obtido para as quatro configurações é apresentado na Figura 7. Os resultados obtidos com o modelo SPHysics apresentam boa concordância com os dados experimentais de Saville para qualquer das configurações simuladas. Para as configurações 1, 3 e 4, o erro relativo aos dados experimentais é inferior a

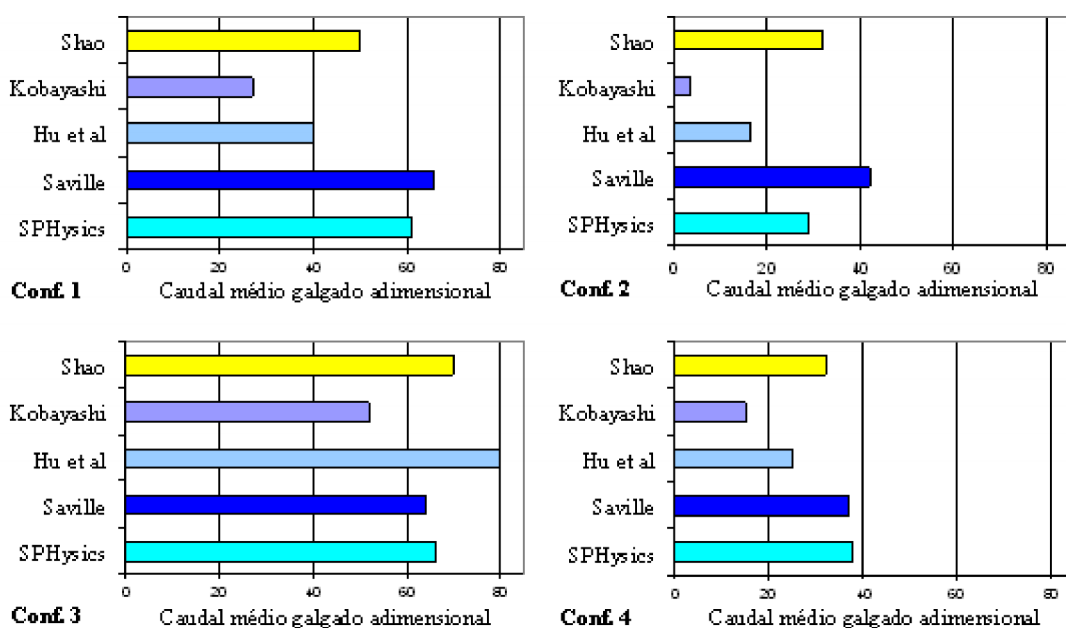


Figura 7 Caudal médio galgado adimensional para as quatro configurações.

Figure 7 Dimensionless mean overtopping discharge for the four configurations.

7%. Para a configuração 2, para a qual o caudal médio galgado é o mais pequeno e a rebentação é mergulhante, o erro atinge 20%, o que se pode dever ao facto do galgamento ser mais sensível à discretização inicial, ou seja, à dimensão das partículas, quando o volume médio galgado é reduzido. Neste caso deve ser considerada uma discretização mais fina, o que implica, em futuras aplicações do modelo SPH, definir cuidadosamente a dimensão inicial máxima das partículas, de modo a obter resultados independentes da discretização mas no mínimo tempo de cálculo possível.

Comparando os resultados dos diferentes modelos numéricos com os dos dados experimentais 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) e de 40% e 60% para os modelos de Kobayashi & Wurjanto (1989) e Hu *et al.* (2000), respectivamente. O modelo SPHysics apresenta, assim, um bom desempenho na estimação do caudal médio galgado, como se comprova ao comparar com os resultados dos outros modelos numéricos.

3.2 Estrutura marginal impermeável com declive 2:3

A estrutura costeira impermeável aqui modelada numericamente para validar o modelo SPHysics, corresponde ao 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 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 propagação das ondas em estruturas costeiras, particularmente quando a rebentação tem um papel importante. O caso utilizado neste estudo e 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 Figura 8 apresenta a estrutura utilizada nos ensaios em modelo físico e mostra ainda um instante em que ocorre galgamento da estrutura. 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



Figura 8 Modelo da estrutura e aspecto do galgamento.
 Figure 8 Model structure and aspect of wave overtopping.

fenómenos que alteram significativamente as características da onda, tais como a rebentação e posterior reflexão na estrutura.

A geometria do caso aqui simulado corresponde a uma plataforma horizontal de 35.74 m de comprimento 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 9). A profundidade junto ao baterdor a profundidade é de 1.15 m e junto à estrutura é de 0.216m. O coroamento está localizado a 1.684m do fundo, ou seja, $R_c=0.534m$. As ondas são regulares com um período $T=3.79s$ e uma altura $H=0.40m$, a que corresponde um comprimento de onda, L_s , de cerca de 12.0m.

O domínio de cálculo é formado, à esquerda, por um baterdor 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. É de salientar que, embora nos ensaios em modelo físico a plataforma horizontal tem um comprimento de 35.74m e no modelo numérico é de 10.0m, 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 & Neves, 2010).

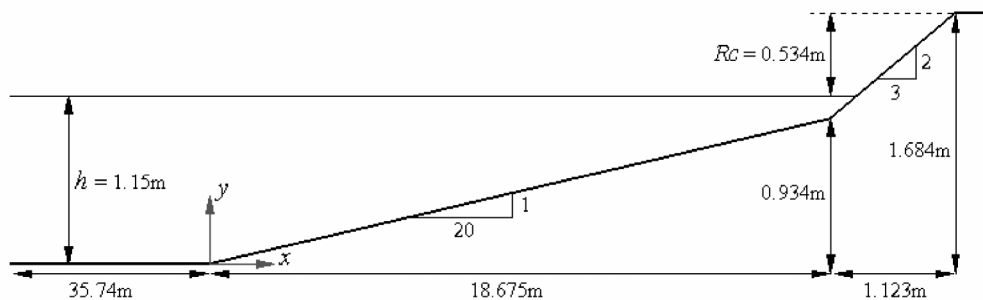


Figura 9 Representação esquemática do canal utilizado nos ensaios em modelo físico e respectivas coordenadas.

Figure 9 Schematic representation of the physical model cross-section and coordinate system.

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

O modelo de turbulência utilizado é o SPS, o kernel é o *quadratic* e o esquema de integração no tempo é o esquema *predictor-corrector*, tal como no caso apresentado na secção 2.3. A simulação numérica foi realizada por um tempo total de 60.0s, com um passo de tempo médio, dt , de 5.5×10^{-4} s.

A Figura 11 mostra a série temporal da elevação de superfície livre, h , para as sondas localizados a uma distância de 9.5m, 10.0m, 10.5m e 11.0m do início da rampa calculadas com o modelo SPHysics e resultantes das medições obtidas em modelo físico. Os resultados são apresentados até 31s, que corresponde ao tempo para o qual o efeito da re-reflexão no bateror começa a fazer-se sentir nas séries temporais.

Observa-se uma boa concordância geral entre os resultados numéricos e os ensaios. 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

Tabelas 3 e 4 apresentam uma comparação entre os resultados numéricos e os experimentais da altura e do período da onda. Na tabela 3 são apresentados os erros obtidos numericamente na altura, EH , e no período de onda, ET , para cada uma das quatro sondas e para 6 ondas consecutivas. Como se pode observar, para a altura de onda o erro varia entre 0.2 e 33.5% e para o período entre 0.2 e 6.7%. No entanto, os erros médios são apenas da ordem dos 3% e 8% respectivamente, para o período e para a altura de onda, tal como se pode observar na Tabelas 4. Nesta tabela, apresenta-se ainda o desvio padrão obtido, que foi de 2% e 8% para a altura de onda e o período respectivamente.

As diferenças que se observam em alguns instantes na altura de onda estão provavelmente relacionadas com as diferenças de amplitude que existem, quer na frequência principal, quer nas harmónicas. Na Tabela 5 apresentam-se as amplitudes da frequência principal ($a^{(0)}$) e das três primeiras harmónicas ($a^{(1)}$ a $a^{(3)}$) obtidas nos ensaios e com o modelo e o respectivo erro. Como se pode observar, os maiores erros ocorrem para a terceira harmónica ($a^{(3)}$), a de menor amplitude, excepto para a sonda colocada em $x=10.5$ m, onde o maior erro ocorre para a primeira harmónica ($a^{(1)}$). No entanto, a altura da onda é, em média, semelhante nos resultados de SPHysics e nos ensaios, tal como se observa na análise da Tabela 4.

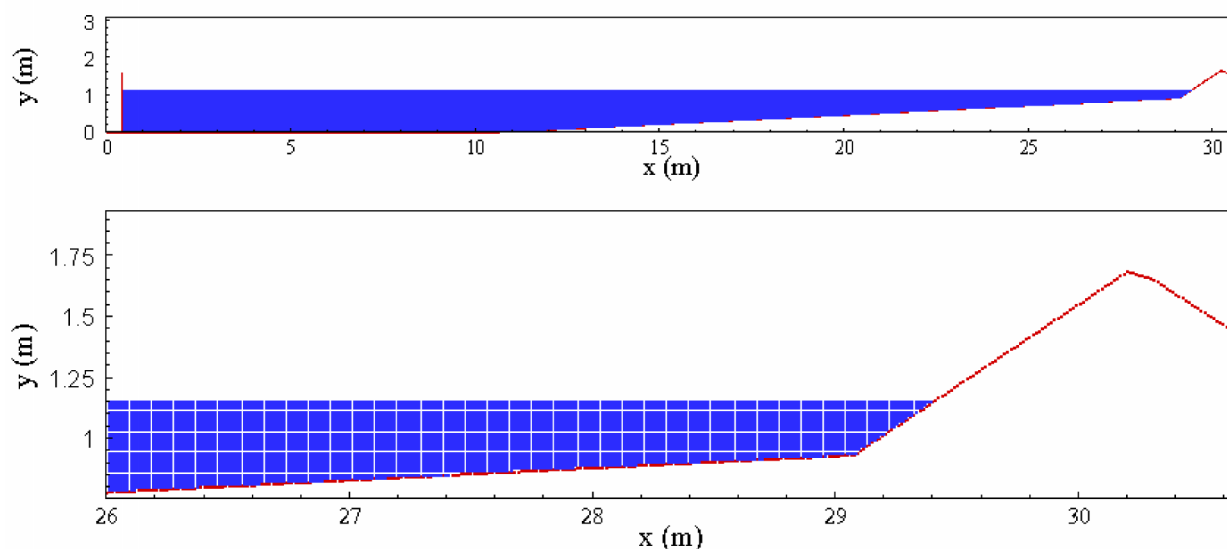


Figura 10 Domínio computacional e detalhes da discretização nas proximidades da estrutura costeira.

Figure 10 Full computational domain and detail of the initial position of the particles near to the coastal structure.

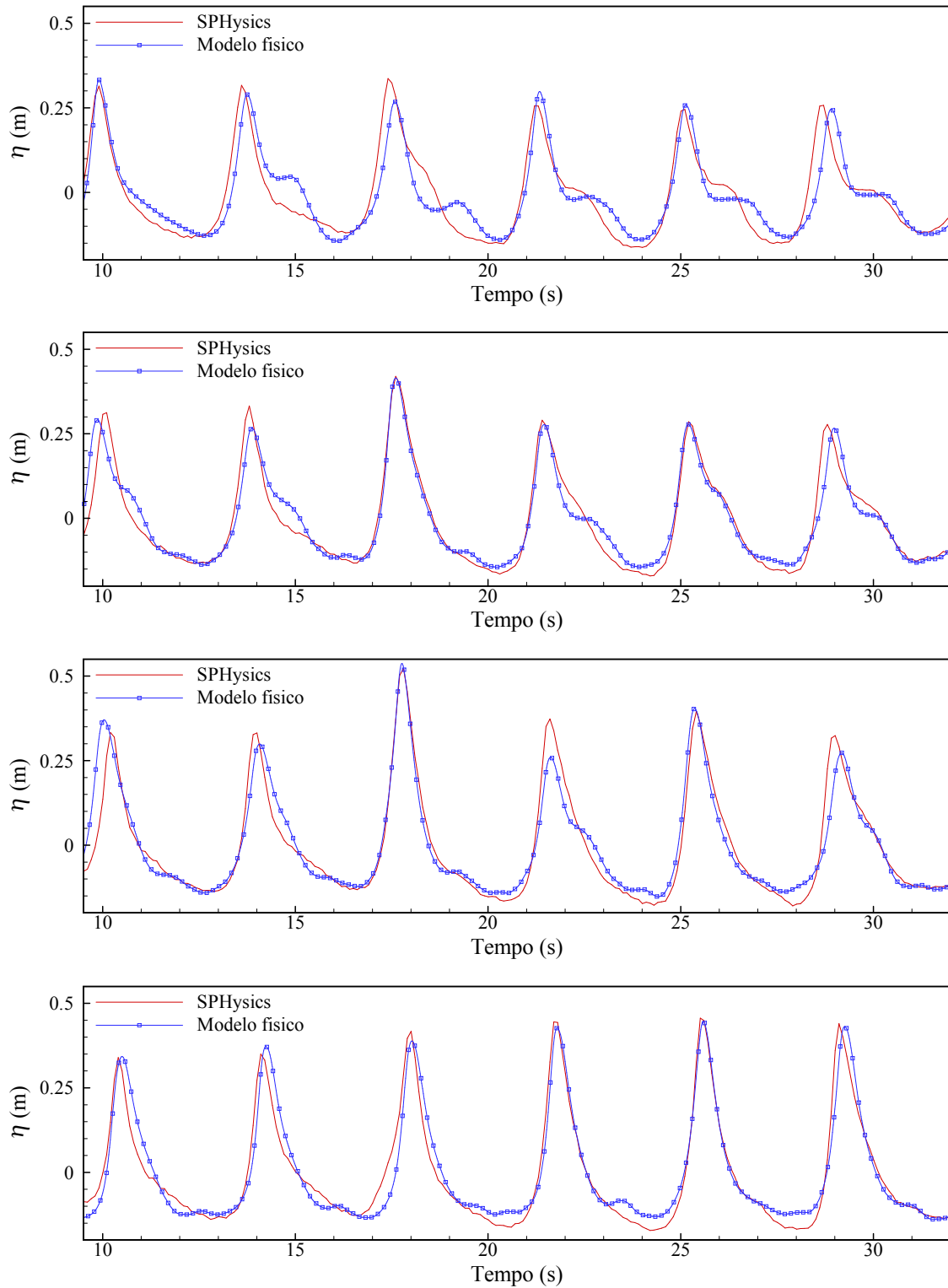


Figura 11 Elevação de superfície livre obtida com o modelo SPHysics e com o modelo físico nas sondas localizadas em $x=9.5m, 10.0m, 10.5m$ e $11.0m$.

Figure 11 Free surface elevation obtained with SPHysics and experimental data for $x=9.5m, 10.0m, 10.5m$ and $11.0m$.

Tabela 3 Diferenças entre o período e a altura de onda experimental e numérico para as quatro sondas e 6 ondas.

Table 3 Analysis of wave period and wave height (experimental and numerical) for the four gauges and 6 waves.

Erro	Sonda	Onda 1	Onda 2	Onda 3	Onda 4	Onda 5	Onda 6
<i>EH</i>	$x=9.5\text{m}$	2.4%	0.5%	19.3%	4.4%	1.4%	1.8%
	$x=10.0\text{m}$	4.0%	19.6%	4.3%	9.0%	7.4%	1.5%
	$x=10.5\text{m}$	8.4%	10.0%	1.1%	33.5%	5.5%	11.8%
	$x=11.0\text{m}$	2.3%	5.9%	12.8%	10.4%	9.1%	0.2%
<i>ET</i>	$x=9.5\text{m}$	1.5%	0.2%	2.0%	1.1%	5.1%	4.1%
	$x=10.0\text{m}$	6.6%	0.9%	0.6%	1.5%	3.3%	5.8%
	$x=10.5\text{m}$	6.7%	1.3%	1.6%	3.1%	4.7%	6.4%
	$x=11.0\text{m}$	0.3%	5.2%	5.9%	2.4%	1.6%	2.5%

Tabela 4 Diferenças entre o período e a altura de onda experimental e numérico e respectivo erro médio e desvio padrão.

Table 4 Analysis of wave period and wave height (experimental and numerical).

	Erro médio	Desvio padrão
<i>H</i>	7.78	7.71
<i>T</i>	3.11	2.17

Tabela 5 Amplitude da frequência principal e das primeiras harmónicas (experimental e numérico) nas quatro sondas.

Table 5 Wave amplitude for the main frequency and first harmonics (experimental and numerical) for the four gauges.

x (m)	Experimental				Numérico				Erro (%)			
	$a^{(0)}$ (m)	$a^{(1)}$ (m)	$a^{(2)}$ (m)	$a^{(3)}$ (m)	$a^{(0)}$ (m)	$a^{(1)}$ (m)	$a^{(2)}$ (m)	$a^{(3)}$ (m)	$Ea^{(0)}$	$Ea^{(1)}$	$Ea^{(2)}$	$Ea^{(3)}$
9.5	0.127	0.076	0.046	0.026	0.148	0.065	0.042	0.019	16.8	15.2	9.5	24.7
10.0	0.158	0.066	0.041	0.025	0.169	0.072	0.040	0.021	7.6	9.6	1.8	15.9
10.5	0.178	0.011	0.043	0.026	0.187	0.014	0.046	0.024	5.5	22.9	7.5	6.1
11.0	0.186	0.106	0.052	0.032	0.188	0.097	0.051	0.027	0.9	8.2	1.9	14.9

Tabela 6 Comparação do caudal médio galgado obtido com o modelo físico e com o modelo SPHysics.

Tabela 6 Mean overtopping discharge obtained for the physical model tests and with SPHysics.

	Ensaio					SPHysics						
	1	2	3	4	5	Min	Max	μ	σ	σ/μ (%)	μ	Erro (%)
Caudal $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$	1.2	1.1	1.2	1	0.9	0.89	1.24	1.1	0.1	12.8	1.10	2.8

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-reflexão das ondas no batedor. 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 dinamicamente as ondas reflectidas pela estrutura, o que pode induzir uma alteração significativa na intensidade do galgamento.

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados de caudal médio galgado obtidos nos ensaios em modelo físico e os resultados numéricos. É apresentado o caudal médio galgado obtido no modelo físico para cinco repetições do mesmo ensaio, assim como os respectivos valores mínimo e máximo, médio, μ , desvio padrão, σ , e coeficiente de variação, 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 físico, com um erro de apenas 2.8%.

Finalmente, a Figura 12 apresenta a posição das partículas para vários instantes de simulação 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 (a), *run-up* (b), *run-down*, reflexão e rebentação da onda (c), galgamento da estrutura (d) e *splash* intenso resultando da interacção entre a onda incidente e reflectida (e).

3.3 Estrutura costeira com deflector de ondas

A estrutura com deflector de ondas aqui modelada corresponde a uma estrutura frequentemente utilizada em infra-estruturas costeiras. A interacção entre onda e estrutura dá-se de forma violenta, onde o jacto de retorno no deflector 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 de simulação é constituído por um batedor, situado numa zona horizontal com uma profundidade de 6.0m localizada à esquerda, seguida de uma rampa de 21.0m com um declive de 1:3. No final da rampa, na extremidade direita do domínio, que se encontra 1.0m acima da superfície livre em repouso, é colocada uma estrutura costeira com um deflector de ondas de 1.0m de altura e de forma semicircular. A Figura 13 apresenta a representação esquemática do canal e do deflector de onda.

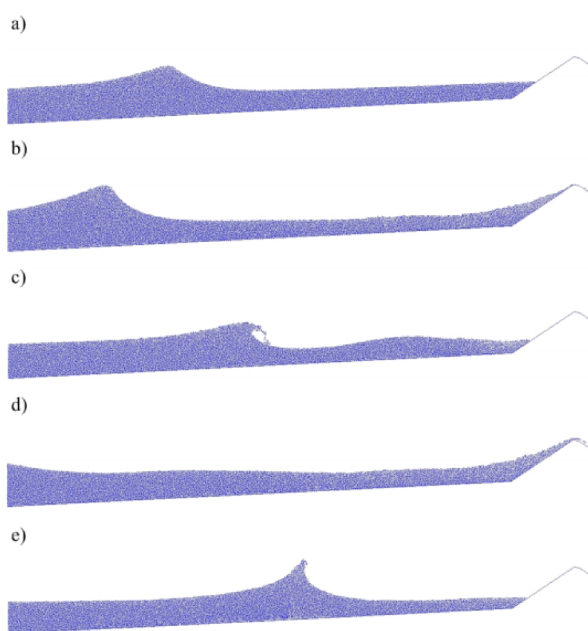


Figura 12 Posição das partículas em vários instantes na proximidade da estrutura.

Figure 12 Particle positions in different simulation time near the structure.

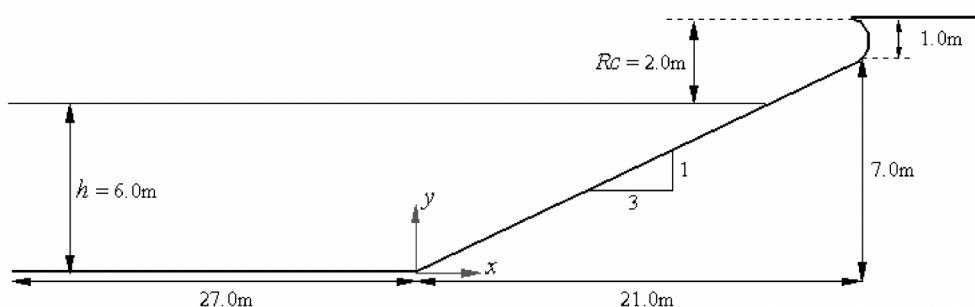


Figura 13 Representação esquemática do canal e do deflector de onda.

Figure 13 Schematic representation of the arc-crown wall.

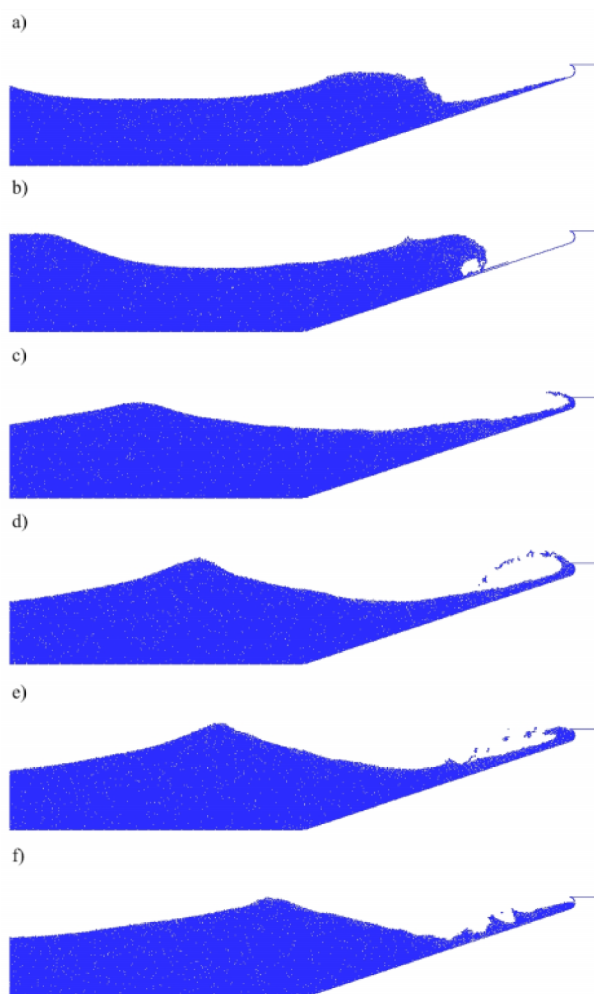


Figura 14 Posição das partículas na interação entre uma onda sinusoidal e uma estrutura com deflector de ondas num período de tempo.

Figure 14 Particle positions in the interaction between a sinusoidal wave and a arc-crown wall in one period of time.

A discretização adoptada no presente caso corresponde a uma distância inicial entre as partículas de 0.06m. O domínio computacional é assim constituído de 59191 partículas.

No modelo numérico são utilizados o kernel *quadratic*, o esquema numérico de integração no tempo *predictor-corrector* e o modelo de viscosidade SPS, tal como nos casos apresentados nas secções anteriores.

A simulação numérica foi realizada por um tempo total de 35.0s, com um passo de tempo médio, Δt , de 1.1×10^{-4} s.

A Figura 14 apresenta, para vários instantes ao longo de um período, a posição das partículas de água 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 34.0m.

Na Figura 14 observa-se como o modelo consegue reproduzir uma sequência de vários fenómenos que ocorrem na interação entre a onda incidente e a onda reflectida pela estrutura deflector de onda: a onda interage com uma lâmina de água que desce o plano inclinado (*run-down*) (a) e rebenta sobre o plano inclinado (b); a lâmina de água produzida pelo impacto da rebentação sobe o declive (*run-up*) (c) e o impacto da lâmina com o deflector semicircular de ondas gera um jacto de água intenso na direcção oposta à propagação da onda (d); 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 (e) e (f).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como todos os modelos numéricos, os baseados no método SPH apresentam 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, já que a geração da malha é sempre uma parte delicada dos métodos Eulerianos.
- Os gradientes são obtidos directamente a partir da derivação do kernel. Não há necessidade de uma malha para definir os gradientes.
- É fácil incluir fronteiras e objectos móveis e deformáveis. Por exemplo, uma parede fixa é constituída de partículas fixas, um batedor do tipo pistão é representado por partículas animadas da mesma velocidade de translação.
- 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. Não é o caso dos métodos de seguimento de superfície livre onde a superfície livre é uma fronteira do domínio computacional que necessita condições especiais nem dos métodos de captura de superfície livre baseados na técnica VOF que necessitam a introdução de uma equação de transporte para a fracção de volume (escalar que indica os respectivos fluidos, água e ar)

- Permite ainda simular a penetração dum objecto no fluido como o deslizamento dum massa sólida na albufera de uma barragem.
- O método não necessita de calibração quando são utilizados os modelos de viscosidade laminar (Morris *et al.*, 1997) ou de viscosidade laminar em conjunto com o modelo de turbulência de *Sub-Particles Scale* (derivado dos modelos de Large Eddy Simulation) (Gotoh *et al.*, 2001, Rogers & Dalrymple, 2004).

As limitações ou dificuldades mais importantes da técnica SPH são expostas a seguir:

- As condições de fronteira são normalmente difíceis de implementar. Um problema típico é a penetração das partículas fluidas nos contornos sólidos.
- As regiões de baixa densidade de partículas induzem resoluções baixas. Para conservar uma melhor resolução, o suporte do kernel pode ser adaptado automaticamente, conservando um número de partículas constante, mas esta operação contribui para um aumento do tempo de cálculo.
- A dimensão do domínio de cálculo que pode ser modelada é reduzida. Na sua formulação teórica, o método SPH permite resolver os problemas típicos 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 a modelações de fenómenos locais tais como a rebentação das ondas numa praia ou a interacção entre uma onda e uma estrutura.

Tabela 7 Tempo de CPU por período de onda para os três casos de estruturas marítimas apresentadas (3.1 a 3.3).

Table 7 CPU time per wave period for the three numerical simulations of coastal structures presented before (3.1 to 3.3).

Caso	T (s)	d_0 (m)	Tempo de CPU (h)	Δt (s)	Número de partículas
3.1	4.73	0.05	0.7	1.30×10^{-4}	20658
3.2	3.79	0.01292	22	5.50×10^{-5}	1448629
3.3	5.20	0.06	2.8	1.25×10^{-4}	59191

- A pressão é derivada dum equação de estado para fluidos quase incompressíveis. É uma opção clássica em dinâmica dos fluidos computacional que induz limitações ao nível do passo de tempo de cálculo.
- O passo de tempo necessário, que deve ser muito pequeno (devido à hipótese de fluido compressível e à formulação numérica explícita), leva a que o tempo de cálculo aumente rapidamente com o aumento do número de partículas. A título de exemplo, apresenta-se na Tabela 7, o tempo de CPU necessário para simular um período de onda para os casos apresentadas anteriormente nos pontos 3.1 a 3.3 num computador Intel Core2 Duo E8500 3.16GHz.

Como se pode observar na Tabela 7, o tempo de cálculo torna-se muito elevado quando se aumenta consideravelmente o número de partículas. No entanto, a precisão dos resultados mostra que o modelo é uma ferramenta promissora para estudos de interacção onda-estrutura.

6. CONCLUSÕES

No presente artigo é apresentado um modelo numérico, SPHysics, baseado num método Lagrangiano e no conceito *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). São apresentadas as principais características do método SPH, o Kernel de interpolação, as equações no formalismo SPH e ainda o modelo numérico SPHysics.

Para verificar e validar a aplicabilidade do modelo a estudos de engenharia costeira, foi realizado um importante trabalho de estudo de convergência e de análise de sensibilidade do modelo aos vários parâmetros, tais como a dimensão das partículas, o modelo de viscosidade utilizado, as correcções XSPH. Para ilustrar o trabalho realizado até ao momento, o presente artigo apresenta duas aplicações do modelo SPHysics, no âmbito do estudo da interacção entre ondas e estruturas costeiras impermeáveis. Nestas aplicações, o modelo SPHysics revelou a capacidade de modelar fenómenos complexos, tais como a rebentação, a reflexão, a interacção entre onda incidente e reflectida, e mais particularmente, o galgamento. A modelação deste último fenómeno é

especialmente difícil pois depende da correcta modelação de todos os outros fenómenos que ocorrem até ao galgamento da estrutura. A comparação dos resultados numéricos obtidos com o modelo SPHysics com dados de vários ensaios em modelo físico, quer de elevação de superfície livre, quer de caudal médio galgado, mostrou que o modelo permite obter resultados consistentes e em concordância com os dos ensaios.

Apresenta-se ainda a modelação de uma estrutura costeira com deflector de onda. Para este caso, embora não se disponha de dados experimentais para avaliar a qualidade dos resultados numéricos, verificou-se que o modelo SPHysics permite modelar, sem dificuldade e com realismo, o escoamento muito complexo que inclui não só a rebentação da onda mas também da acção do deflector de ondas e a forte interacção que ocorre entre o jacto de água induzido pelo deflector e a própria onda na fase de *run-down*.

Embora se tenha demonstrado a potencialidade e aplicabilidade do modelo SPHysics em casos de estudo de engenharia costeira com o objectivo de se dispor no futuro dum ferramenta numérica potente para concepção, optimização e análise de estruturas marítimas, é ainda necessário implementar numerosos desenvolvimentos ao modelo que incluem, entre outros, o acoplamento entre o modelo SPHysics e um modelo de propagação de ondas, a modelação de meios porosos e a paralelização do código para reduzir o tempo CPU de cálculo.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FCT o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007. Os autores agradecem ainda ao Projecto de Investigação Programada do LNEC, “Comportamento de Estruturas Marítimas” e ao projecto HYDRALAB III, projecto inserido no Research Infrastructures Program of FP6, Contracto N. 022441, pela permissão dada para a utilização dos dados experimentais.

BIBLIOGRAFIA

- Batchelor, G.K. (1974) – *An Introduction to Fluid Dynamics*. 635 p., Cambridge University Press, UK. ISBN-13:9780521663960.
- Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Kennedy, B.A. & Chawla, A. (2000) - Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126(1):48–56, ASTM - American Society of Civil Engineering. ISSN: 0733-950X Disponível em <http://users.coastal.ufl.edu/~kennedy/eoc6934/boussinesq/papers/part2.pdf>.
- Clément, A.H. (1996) - Coupling of two absorbing boundary conditions for 2D time-domain simulations of free surface gravity waves. *Journal of Computational Physics*, 126:139-151. <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.1996.0126>
- Crespo, A.J.C. (2008) - *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*. 158p., Dissertação de doutoramento, Universidade de Vigo, Vigo, Espanha.
- 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. http://dx.doi.org/10.1061/_ASCE_0733-950X_2008_134_6_313
- Dalrymple, R.A. & Rogers, B.D. (2006) - Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2-3):141-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.004>
- Didier, E. (2007) – Simulação numérica de escoamentos com superfície livre. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 11(3):3-18. ISSN: 1137-2729
- Didier, E. & Neves, M.G. (2008) - Estudo da interação onda-estrutura utilizando um modelo numérico Lagrangiano. *Revista Recursos Hídricos*, 29(2):15-26, Lisboa, Portugal. ISSN: 0870-1741.
- 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. Disponível em http://e-geo.fcsh.unl.pt/ICS2009/_docs/ICS2009_Volume_I/496.500_E.Didier_ICS2009.pdf
- Didier, E. & Neves, M.G. (2009b) - Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure. *Proceedings 4th International SPHERIC workshop*, 357-364, Nantes, França.
- Didier, E. & Neves, M.G. (2010) - A Lagrangian Smoothed Particles Hydrodynamics – SPH method for modelling waves-coastal structure interaction. *Proceedings CFD2010 ECCOMAS*, CD-Rom, Lisboa, Portugal. Disponível em http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/ECCOMAS-CFD2010/papers/01627.pdf
- 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. *Proceedings OMAE2008*, 4:571-578, Estoril, Portugal. ISBN: 0791838218.
- 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. ISSN: 1365-2966
- Gómez-Gesteira, M., Dalrymple, R. A., Crespo, A.J.C. & Cerqueiro D. (2004) - Uso de la técnica SPH para el estudio de la interacción entre olas y estructuras. *Ingeniería del Agua*, 11(2): 147-170. ISSN: 1134-2196.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Crespo, A.J.C. & Narayanaswamy, M. (2009) - *User Guide for the SPHysics Code v1.4*. <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A. & Crespo, A.J.C. (2010) - State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research*, 48 Extra Issue: 6–27. <http://dx.doi.org/10.3826/jhr.2010.0012>
- 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.
- Hirt, C.W. & Nichols, B.D. (1981) - Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1):201-225. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00040-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00040-5)

- Johnson, G., Stryk, R. & Beissel, S. (1996) - SPH for high velocity impact calculations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139(1-4):347-373. [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01089-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01089-4)
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. B. & Dalrymple, R. A. (1998) - *FUNWAVE 1.0 – Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual*. 80p., Research Report No.CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, DE, U.S.A. Disponível em: <http://chinacat.coastal.udel.edu/papers/cacr-98-06.ps>
- Kobayashi, N. & Wurjanto A. (1989) - Wave overtopping on coastal structures. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 115(2):235-251, ASTM - American Society of Civil Engineering. ISSN: 0733-950X
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.11.003>
- Liu, G.R. (2003) - *Mesh free methods. Moving beyond the finite element method*. 685 p., CRC press, Danvers, MA, USA. (ISBN 0-8493-1238-8).
- Lucy, L.B. (1977) - A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82(12):1013-1024. <http://dx.doi.org/10.1086/112164>
- Lynett, P. & Liu, P.L.-F. (2004) – *Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations*. COULWAVE Code Manual. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package. 179 p., Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A. https://ceprofs.civil.tamu.edu/plynett/COULWAVE/COULWAVE_manual.pdf
- Monaghan, J.J. & Latanzio, J.C. (1985) - A refined method for astrophysical problems. *Astronomy and Astrophysics*, 149(1):135-143. ISSN: 0004-6361.
- Monaghan, J.J. (1989) - On the problem of penetration in particle methods. *Journal Computational Physics*, 82:1-15. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(89\)90032-6](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(89)90032-6)
- 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. <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.1994.1034>
- Monaghan, J.J. & Kos, A. (1999) - Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 125(3):145-154. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1999\)125:3\(145\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:3(145))
- Monaghan, J.J. (2005) - Smoothed particle hydrodynamics, *Reports on Progress in Physics*, 68:1703–1759. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>
- Morris, J.P., Fox, P.J. & Zhu, Y. (1997) - Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. *Journal of Computational Physics*, 136:214-226. <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.1997.5776>
- Neves, M.G., Reis M.T., Losada, I. & Hu, K. (2008) - Wave overtopping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 134(4):226-236, ASTM - American Society of Civil Engineering. ISSN: 0733-950X
- Rogers, B.D. & Dalrymple, R.A. (2004) - SPH modeling of breaking waves. *Proceedings 29th Int. Conference on Coastal Engineering*, 415-427, World Scientific Press, Lisboa, Portugal.
- Rogers, B.D., Dalrymple, R.A. & Stansby, P.K. (2010) Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH. *Journal of Hydraulic Research*, 48 Extra Issue:135–141. <http://dx.doi.org/10.3826/jhr.2010.0013>
- Shao, S.D. & Edmond, Y.M.L. (2003) - Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface. *Advances in Water Resources*, 26(7):787-800. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00030-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00030-7)
- 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(9):723-735. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.02.005>
- Teixeira, P.R.F. (2001) - *Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos*. 237p., Dissertação de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil