

MODELAÇÃO NUMÉRICA À ESCALA DO PROTÓTIPO DE UM QUEBRA-MAR DE TALUDE COM O CÓDIGO SPHyCE

João P. A. Dias

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443912, jdias@lnec.pt

Eric L. Didier

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443446, edidier@lnec.pt

Diogo R. C. B. Neves

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443446, dneves@lnec.pt

Maria da Graça Neves

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443426, gneves@lnec.pt

RESUMO

O modelo numérico SPHyCE, baseado nas equações de Navier-Stokes na forma Lagrangiana e numa metodologia de tipo SPH - *Smoothed Particle Hydrodynamics*, tem sido desenvolvido no LNEC desde 2007. Este modelo, inspirado no código SPHysics (Monaghan, 1994), integra várias opções para aplicações específicas à engenharia costeira e foi objecto de numerosas análises de sensibilidades com vários parâmetros, estudos de convergência com a resolução e validações com dados de ensaios experimentais realizados nas instalações do LNEC. Estes estudos foram realizados à escala reduzida dos modelos físicos testados para validação do modelo numérico. No entanto, o modelo, na sua versão actual, não foi ainda aplicado à escala do protótipo.

No presente trabalho o modelo numérico SPHyCE é aplicado ao molhe Oeste do Porto de Albufeira, no Algarve. Esta primeira aplicação tem dois objectivos:

- Analisar o comportamento do modelo numérico quando aplicado a um quebra-mar à escala real;
- Aplicar uma metodologia de acoplamento entre o modelo de propagação Bouss-2D, utilizado para propagar a onda incidente do largo até às proximidades da estrutura, e o modelo SPHyCE.

Esta aplicação integra-se no projecto SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamics* para aplicações a estruturas costeiras – financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve, que realizou, durante o inverno 2012-2013, medições de campo no molhe Oeste do Porto de Albufeira.

A esta primeira aplicação à escala real do modelo SPHyCE, seguir-se-ão aplicações integrando os dados recolhidos durante as medições de campo, a fim de analisar o desempenho do modelo numérico.

Palavras-chave – Modelação numérica, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, efeito de escala, acoplamento, galgamento.

1 INTRODUÇÃO

Durante a fase de projecto de estruturas hidráulicas é frequente a realização de modelos à escala reduzida, de forma a validar e otimizar as soluções desenvolvidas. Contudo, existem limitações da modelação à escala do modelo, devido à incapacidade de reproduzir todos os fenómenos existentes à escala real (protótipo), surgindo efeitos de escala. Este efeito é normalmente pequeno, mas nem sempre desprezável.

Idealmente, para garantir as mesmas condições do escoamento no modelo e no protótipo, é necessário verificar a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Recorrendo a uma análise adimensional (Teorema dos π ou de Vaschy-Buckingham), para garantir semelhança hidráulica é necessário verificar a igualdade dos principais parâmetros adimensionais (Froude, Reynolds, Cauchy e Weber). Porém, dada a presença de diferentes comprimentos característicos, não é possível verificar a igualdade de todos os parâmetros adimensionais. No entanto, em escoamentos com superfície livre, os efeitos gravíticos são predominantes (Chanson, 2004). Assim, é utilizado o número de Froude, que caracteriza a relação entre as forças de inércia e as forças gravíticas para comparação do escoamento à escala do modelo e do protótipo.

Recorrendo à modelação numérica, é possível modelar o escoamento directamente à escala de protótipo. Todavia, a validação dos modelos numéricos é normalmente realizada utilizando dados de ensaios em modelo físico.

O modelo numérico SPHyCE, baseado nas equações de Navier-Stokes na forma Lagrangiana, é desenvolvido utilizando uma metodologia de tipo SPH - *Smoothed Particle Hydrodynamics*. O modelo, inspirado do código SPHysics (Gómez-Gesteira et al., 2008, 2010), integra várias opções para aplicações específicas à engenharia costeira e foi objecto de numerosas análises de sensibilidades com vários parâmetros, estudos de convergência com a resolução e validações com dados de ensaios da literatura e realizados propositadamente nas instalações do LNEC (Didier e Neves, 2009, 2012; Didier et al., 2012a, 2013a, 2013b; Neves et al., 2013). No entanto, o modelo, na sua versão atual, não foi ainda aplicado à escala do protótipo.

Neste trabalho analisa-se a interacção de uma onda incidente regular com uma estrutura costeira, o quebra-mar Oeste do porto de Albufeira, utilizando o modelo SPHyCE, quer à escala do modelo quer à escala do protótipo. A avaliação das diferenças dos resultados entre as duas escalas é feita através da análise da elevação de superfície livre, do espriamento (*run-up*) e do volume galgado obtidos, em ambas as escalas, para várias resoluções.

Esta aplicação integra-se no projecto SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo *Smoothed Particle Hydrodynamics* para aplicações a estruturas costeiras – financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve, que realizou, durante o inverno 2012-2013, medições de campo no molhe Oeste do Porto de Albufeira (Didier et al., 2011). No âmbito do projecto, aplica-se neste trabalho uma metodologia de acoplamento entre o modelo de propagação de ondas do largo até à costa, Bouss-2D (Nwogu e Demirbilek, 2001), e o modelo de interacção onda-estrutura, SPHyCE, à escala do protótipo, combinando assim as vantagens e características individuais da utilização de ambos os modelos, aumentando a precisão e a eficiência dos resultados.

2 MODELO NUMERICO

Os métodos SPH foram inicialmente desenvolvidos para problemas de astrofísica (Gingold e Monaghan, 1977) sendo mais tarde adaptados à hidrodinâmica (Monaghan, 1994). O método SPH baseia-se na formulação Lagrangiana das equações da Dinâmica dos Fluidos. Esta metodologia, na qual o fluido é considerado como constituído por volumes de água assimilados como partículas, não necessita de malha e permite modelar as trajectórias das partículas. Esta

particularidade permite modelar escoamentos complexos com superfície livre que envolvem a rebentação das ondas e o galgamento de estruturas.

2.1 Princípio Fundamental 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, que não necessita de malha. 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 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 específica da partícula b . A Figura 1 apresenta um esquema da região de aplicação do kernel e da forma do kernel nesta região.

As derivadas da função f são calculadas analiticamente, simplesmente derivando o kernel, o que constitui uma das vantagens do método SPH. 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 $2h$, com $h=0.92*2^{0.5} d_o$, onde d_o é a separação inicial das partículas. A função de interpolação é máxima no seu centro, dando assim uma contribuição predominante à partícula a .

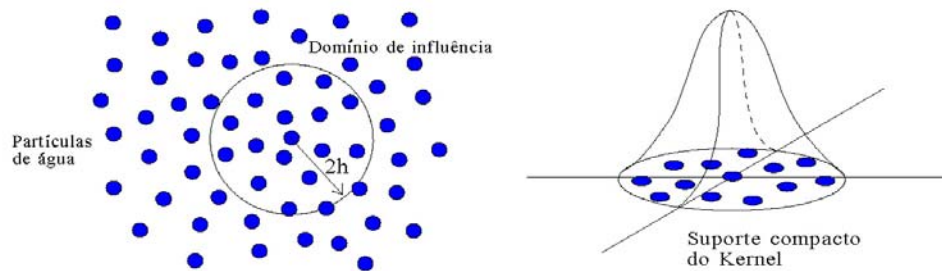


Figura 1 – Domínio de influência do kernel e esquema da variação típica do kernel na região de aplicação.

2.2 Equações bidimensionais

As equações bidimensionais de Navier-Stokes na forma Lagrangiana para um fluido viscoso escrevem-se:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \Pi + g \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\text{div}(v) \quad (4)$$

onde t é o tempo, Π representa os termos viscosos, $g=(0, -9.81) \text{ m.s}^{-2}$ é a aceleração da gravidade, v , P e ρ são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa específica.

Na formulação SPH *Standard* de Monaghan (1994), o fluido é considerado pouco compressível o que permite relacionar a pressão no fluido com a massa específica através da equação de estado (Batchelor, 1974) dada por:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \text{ com } B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \quad (5)$$

sendo $\gamma=7$, ρ_0 a massa específica de referência e c_0 a velocidade do som.

Finalmente, as trajectórias das partículas são calculadas de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{dr}{dt} = v \quad (6)$$

onde r é a posição da partícula.

2.3 Modelo numérico SPHyCE

O modelo numérico SPHyCE é baseado no SPPhysics code v1.4 (2009) e inspirado da formulação SPH proposta por Monaghan (1994). O modelo SPHyCE resulta de alterações e melhoramentos do modelo SPPhysics com vista à resolução de problemas de engenharia costeira envolvendo escoamentos complexos com superfície livre.

No código SPHyCE, é utilizado o kernel de interpolação *quadratic* (Johnson, 1996), por ter a particularidade de não ter ponto de inflexão na sua primeira e segunda derivada no intervalo de definição da função, e é definido pela função analítica dada por:

$$W(q, h) = \frac{3}{2\pi h^2} \left(\frac{q^2}{4} - q - 1 \right) \text{ para } 0 \leq q \leq 2, \quad (7)$$

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

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

$$\frac{Dv_a}{Dt} = \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (8)$$

onde v_a , P_a e ρ_a são, respectivamente, a velocidade, a pressão e a massa específica de uma partícula a , P_b , ρ_b e m_b são, respectivamente, a pressão, a massa específica e a massa de uma 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:

$$\nabla_a W_{ab} = \nabla_a W(r_a - r_b) = \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a} i + \frac{\partial W_{ab}}{\partial y_a} j \quad (9)$$

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 .

O modelo de turbulência SPS (*Sub-Particle-Scale model*) (Gotoh et al., 2001) é o utilizado, evitando-se assim o recurso a parâmetros empíricos que são necessários no caso de se utilizar o modelo de viscosidade artificial proposto por Monaghan (1992), que além disso parece induzir uma difusão numérica importante. O modelo SPS inclui o termo de viscosidade clássico (Morris et al., 1997) e os efeitos ligados à turbulência são modelados através de um modelo de tipo LES (*Large Eddy Simulation*). Este modelo permite obter bons resultados para a propagação das ondas, rebentação, galgamento e forças em estruturas (Didier et al., 2012a, 2012b). A equação de conservação de massa na sua forma discreta é dada por:

A equação de conservação de massa na sua forma discreta é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (u_a - u_b) \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (10)$$

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

$$\frac{Dr_a}{Dt} = u_a \quad (11)$$

A partir da equação (5), a pressão pode ser calculada directamente a partir da massa específica:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (12)$$

A integração no tempo é realizada utilizando o algoritmo *predictor-corrector* (Monaghan, 1989) com o passo de tempo controlado automaticamente respeitando as condições de estabilidade definidas por Monaghan e Kos (1999).

As condições de fronteira não aparecem directamente no formalismo SPH. É utilizada uma condição de fronteira repulsiva que consiste em impor uma força de repulsão nas partículas que constituem a fronteira sólida do domínio computacional, assegurando assim a impermeabilidade das fronteiras 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 malha cartesiana rectangular. Inicialmente o fluido está em repouso: a velocidade das partículas é nula e a pressão é hidrostática.

O modelo numérico SPHyCE inclui algumas especificidades desenvolvidas para modelação dos fenómenos que ocorrem em estudos de engenharia costeira e que são detalhadas a seguir.

A análise de sensibilidade dos resultados ao parâmetro ϵ_{XSPH} da correcção XSPH (Monaghan, 1994) de movimento das partículas (eq. 11), demonstrou que aparecem instabilidades quando o valor clássico de 0.5 é utilizado (Didier e Neves, 2009). Assim, o valor $\epsilon_{XSPH}=0$ é sempre adoptado nas aplicações do modelo.

A cinemática dos escoamentos em modelos SPH é geralmente realista. Contudo, quando se utiliza o modelo pouco compressível, as partículas exibem variações de pressão elevadas. Estas instabilidades de pressão podem ser resolvidas corrigindo a função kernel e aplicando o filtro de Shepard (Panizzo, 2004). Recalcula-se, assim, o valor da massa específica para cada partícula, geralmente a cada 30 iterações no tempo, valor classicamente utilizado na literatura. No entanto, no modelo SPHyCE a re-normalização da massa específica é aplicada de forma parcial, geralmente nas imediações da estrutura costeira onde se pretende calcular a pressão e a força. Com esta abordagem, a pressão é estabilizada sem prejudicar a correcta propagação das ondas no canal (Didier et al., 2013a).

A geração das ondas é efectuada através de um batedor do tipo pistão utilizando um método de absorção activa das ondas reflectidas e de correcção da deriva da posição média do batedor. Esta técnica permite dispor de um canal semi-infinito (Didier e Neves, 2012).

O método SPH apresenta, tal como referido, um grande potencial na simulação de escoamentos complexos, como os que ocorrem na interacção onda-estrutura, na rebentação e no galgamento, embora exija um elevado tempo de execução. Com o objectivo de reduzir o tempo de cálculo do modelo numérico, foi implementada uma técnica de refinamento que consiste na divisão das partículas fluidas em 2, 3 ou 4 partículas ao longo do tempo de cálculo (Figura 2). Esta técnica permite executar o programa com uma resolução relativamente grosseira e com um tempo de CPU relativamente curto para modelar a parte transiente do escoamento, i.e., antes da estabilização da interacção entre a onda incidente e a reflectida. Após a estabilização, aplica-se a técnica de divisão das partículas fluidas em todo o domínio computacional, permitindo assim aumentar a resolução para obter resultados mais precisos. A técnica é evidentemente aplicada para estudos em canal de ondas semi-infinito, onde a parte relativa ao escoamento transiente não é relevante para a análise dos resultados (Neves et al., 2013).

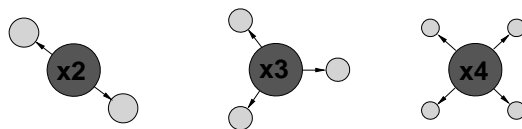


Figura 2 – Refinamento por divisão das partículas fluidas, em duas, três ou quatro partículas mais pequenas.

Na mesma perspectiva de reduzir o tempo de cálculo e de poder incluir no modelo SPHyCE os efeitos decorrentes da propagação da onda (geração de harmónicas), foi implementada uma metodologia de acoplamento entre um modelo de propagação do tipo RANS ou Boussinesq e o modelo SPHyCE. Esta técnica permite reduzir significativamente o domínio computacional SPH, em cerca de um comprimento de onda, incluindo todavia as alterações características da propagação de uma onda do largo até a costa (Didier et al., 2013b). A informação do modelo de propagação para o modelo SPH é transferida a partir da serie temporal da elevação de superfície livre obtida numa dada secção de acoplamento. A análise espectral permite obter o periodograma e determinar as amplitudes e fases de cada componente espectral relevante. Estes valores são utilizados para calcular o movimento do batedor do tipo pistão que gera a onda no canal SPH.

O modelo SPHyCE permite modelar os blocos das camadas exteriores de uma estrutura costeira porosa. A modelação directa destas camadas requer uma resolução suficientemente fina para uma correcta modelação do escoamento no interior deste meio poroso. A principal vantagem desta abordagem é a possibilidade de calcular as forças exercidas em cada bloco ao longo do tempo. Todavia, esta abordagem exige considerar as camadas subjacentes impermeáveis e implica que os blocos do manto exterior estejam assentes sobre uma fronteira impermeável. Os blocos são igualmente simplificados e têm uma forma rectangular (Didier et al., 2012b). A Figura 3 apresenta um exemplo de aplicação, onde duas camadas de blocos cúbicos constituem a camada exterior.

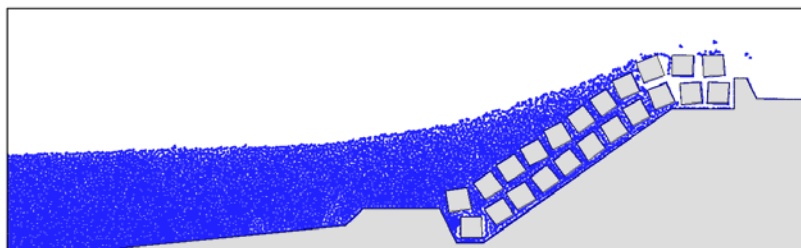


Figura 3 – Modelo da camada exterior de uma estrutura costeira.

3 MODELO NUMERICO BOUSS-2D

Bouss-2D é um modelo numérico que permite modelar a propagação e transformação das ondas nas zonas costeiras (Nwogu e Demirbilek, 2001). O modelo é baseado na forma clássica das equações de Boussinesq. Utiliza para a propagação das ondas em profundidade variável a formulação derivada por Peregrine (1967) para águas pouco profundas e a formulação de Nwogu (1993) para águas profundas. Finalmente Wei et al. (1995) considerou uma forma totalmente não linear das equações que permite modelar as ondas fortemente assimétricas em baixa profundidade. O modelo Bouss-2D permite assim modelar a maioria dos fenómenos hidrodinâmicos que ocorrem nas áreas costeiras: refração, difração, atrito do fundo, interação não linear entre ondas, rebentação e espraimento (*run-up*), interação corrente-onda, etc.

Numericamente, um método de integração no tempo (esquemas Crank-Nicholson / predictor-corrector) e o método das diferenças finitas são utilizados para resolver as equações de Boussinesq. A área de estudo é discretizada utilizando uma grelha rectangular na qual a elevação de superfície livre é definida nos nós da malha e as componentes horizontais da velocidade são definidas no meio de dois nós sucessivos (*staggered grid form*). As ondas são geradas nas fronteiras do domínio computacional e as praias de absorção localizam-se na periferia do domínio computacional, evitando a reflexão destas no interior do domínio de estudo.

A batimetria é facilmente integrada no modelo e pode ser modificada conforme os objectivos do estudo.

4 ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA NO MODELO SPHYCE

A análise do efeito de escala no modelo SPHYCE é realizada considerando uma estrutura costeira impermeável em duas escalas: escala do protótipo e escala do modelo (1:30).

O domínio computacional à escala do modelo é apresentado na Figura 4 e as características da onda incidente regular, à escala do modelo e do protótipo, são indicadas na Tabela 1.

A análise do efeito de escala é realizada em duas partes:

- Estudo da influência da resolução, i.e. do número de partículas: o número de partículas é o mesmo à escala do modelo e do protótipo no domínio computacional, mas o volume das partículas muda conforme a escala;
- Comparação entre os resultados obtidos à escala do modelo e do protótipo: elevação de superfície livre em duas sondas, G1 e G2, sendo G1 perto do bater e G2 no pé da estrutura, espraimento (*run-up*), nível de água no coroamento da estrutura (sonda G3) e galgamento. Os resultados são sistematicamente analisados à escala do modelo.

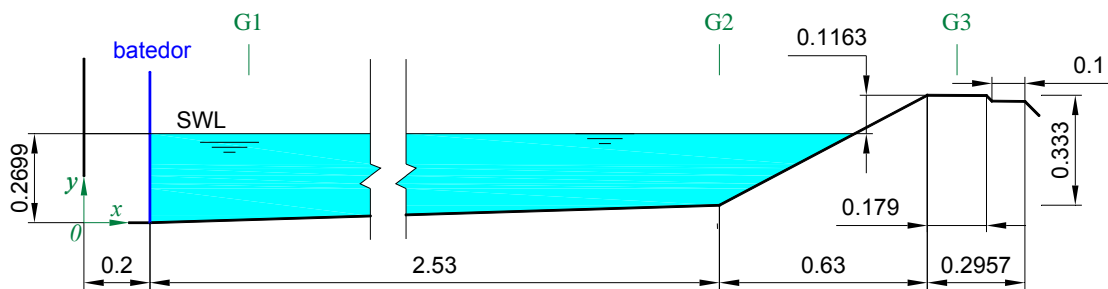


Figura 4 – Dimensões características da batimetria no modelo SPHyCE à escala 1:30 e posição das sondas da elevação de superfície livre (G1 e G2) e da sonda do nível de água no coroamento (G3).

Tabela 1 – Características de onda à escala do modelo e do protótipo.

	T (s)	H (m)	d (m)	L (m)	Amplitude baterdor (m)
Modelo	2.19	0.083	0.27	3.431	0.084
Protótipo	12.00	2.50	8.02	102.90	2.52

A avaliação do efeito de escala no modelo SPHyCE é efectuada comparando os resultados obtidos para a resolução mais fina, com 225206 partículas, em ambos os casos.

4.1 Influência da resolução no modelo e no protótipo

De forma a descrever correctamente a propagação das ondas e todos os fenómenos não lineares envolvidos, como a rebentação e o galgamento, é necessário avaliar a dependência dos resultados com a resolução, i.e. com o número de partículas. Contudo, uma resolução mais fina, que envolve mais partículas, conduz a um maior tempo de cálculo.

Assim, de forma a avaliar a sensibilidade da resolução à escala do modelo e à escala do protótipo, foram consideradas as três resoluções descritas na Tabela 2. A resolução 2 é constituída por quatro vezes mais partículas que a resolução 1 e a resolução 3 tem o dobro das partículas da resolução 2. As três resoluções são utilizadas à escala do modelo e do protótipo e o volume das partículas é calculado para cada resolução e escala.

Tabela 2 – Resolução e número de partículas para o modelo e protótipo.

Caso	Nº partículas	Resolução por:		
		H	D	L
Resolução 1	28 879	17	55	699
Resolução 2	112 603	34	110	1 398
Resolução 3	225 206	48	157	1 995

Na Figura 5 e 6 apresenta-se a série temporal da elevação de superfície livre na sonda G1 e G2, próxima do baterdor e no pé da estrutura, respectivamente, para a escala do modelo e do protótipo, com os valores apresentados à escala do modelo. Observa-se que não há praticamente influência da resolução na geração e propagação da onda, o que garante que a onda que chega ao quebra-mar é semelhante. As ligeiras diferenças que se podem observar

ao nível da sonda G2, quer na escala do modelo quer do protótipo, não são significativas. É interessante verificar que se obtém o mesmo comportamento para ambas as escalas.

Na Figura 7 encontra-se a comparação da série temporal do espraçamento (*run-up*) para a escala do modelo e protótipo. Os resultados seguem praticamente o mesmo andamento com o aumento do número de partículas, à exceção dos instantes iniciais, correspondente às duas primeiras ondas, e à parte transiente do escoamento. Contudo o *run-up* previsto é similar para ambas as escalas. O intervalo de tempo de *run-up* máximo, correspondente à cota do coroamento e que indica que há galgamento, aumenta ligeiramente com o refinamento.

A Figura 8 apresenta a série temporal do nível de água no coroamento da estrutura, h , na sonda G3. Podem-se verificar algumas diferenças mais significativas que nos resultados anteriores. Adicionalmente, observam-se também diferenças entre os valores de h à escala do modelo e do protótipo. Contudo, o andamento é semelhante para ambas as escalas.

A Figura 9 apresenta a série temporal do volume galgado. Observa-se uma diferença importante entre a Resolução 1 e as Resoluções 2 e 3, em ambas as escalas. Adicionalmente, à escala do protótipo, verifica-se uma diferença do volume galgado entre a Resolução 2 e 3 por comparação com a escala do modelo. As diferenças apontadas para o nível de água acima do coroamento, h , confirmam-se ao nível do volume galgado e são amplificadas.

Conclui-se, assim, que a Resolução 1 é demasiado grosseira para a avaliação do volume galgado neste tipo de estruturas. As outras duas resoluções apresentam resultados relativamente semelhantes.

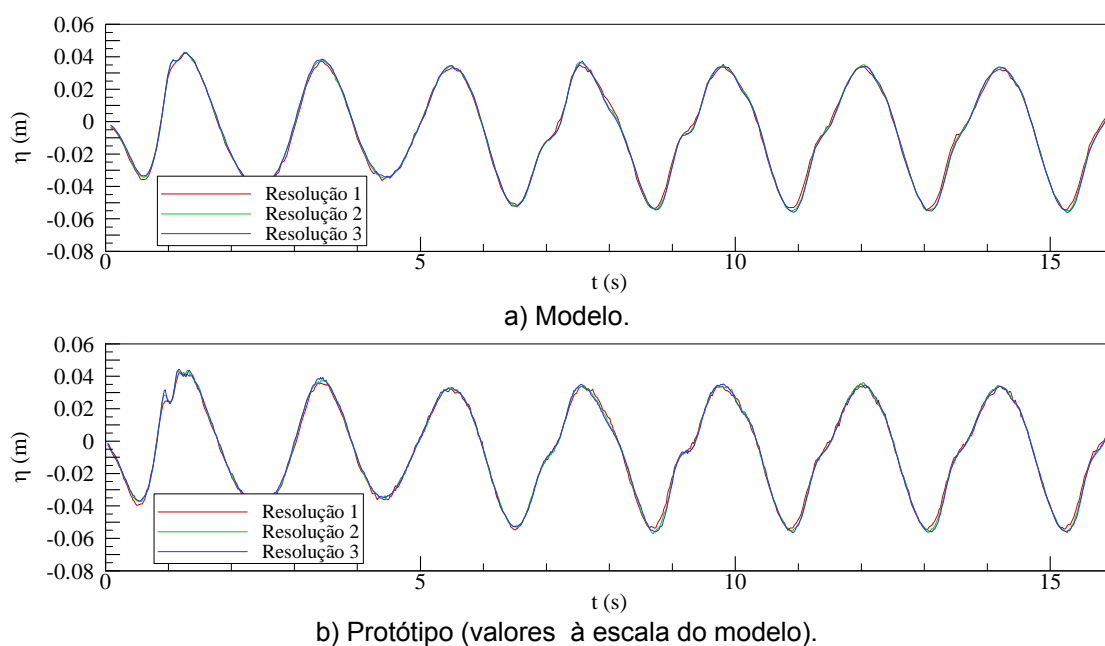
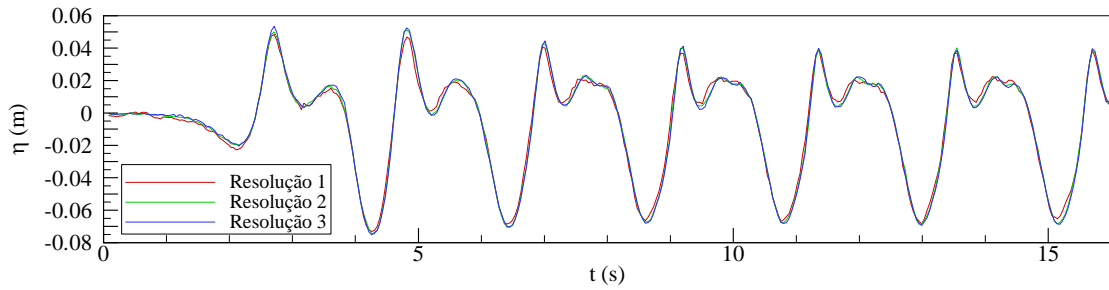
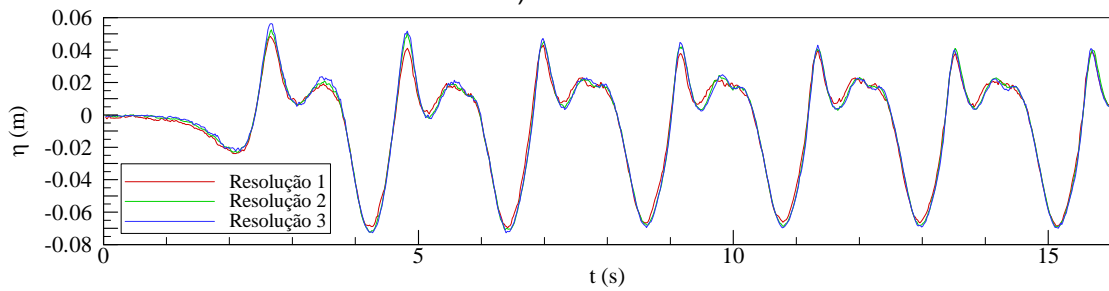


Figura 5 – Comparação da série temporal da elevação de superfície livre na sonda G1 entre as três resoluções.

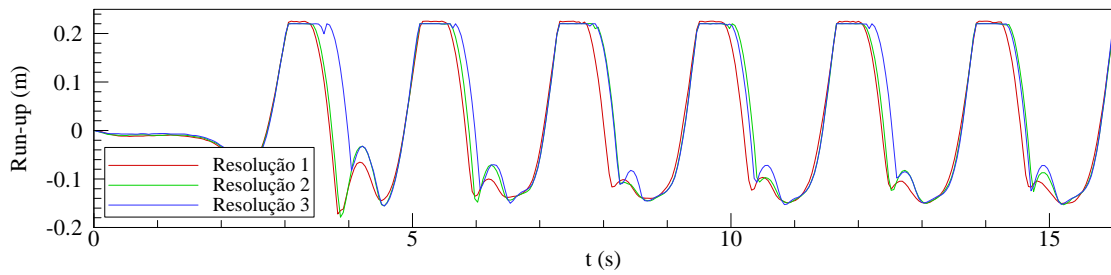


a) Modelo.

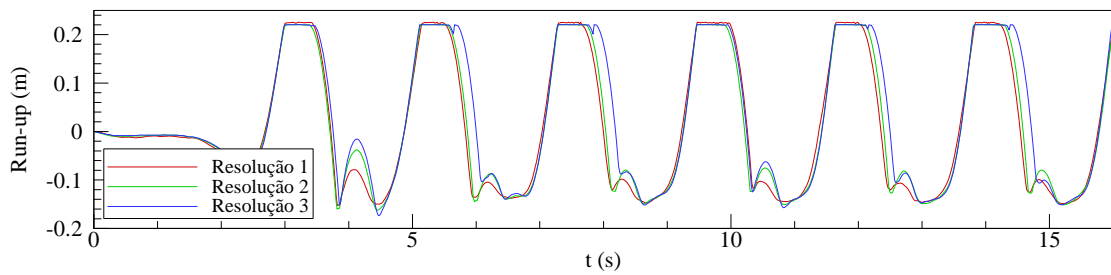


b) Protótipo (valores à escala do modelo).

Figura 6 – Comparação da série temporal da elevação de superfície livre na sonda G2 entre as três resoluções.

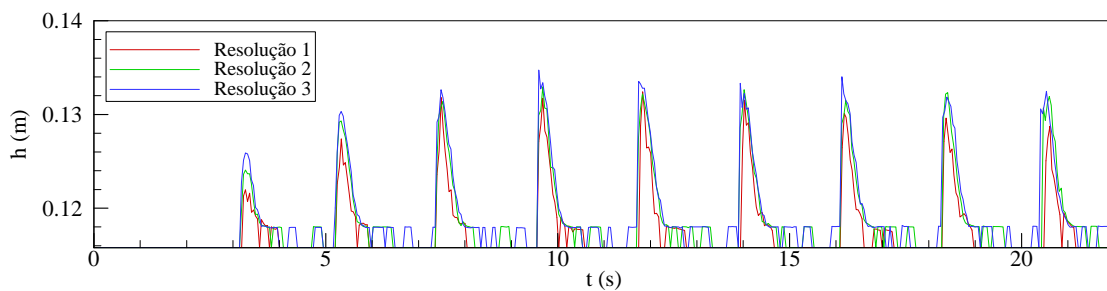


a) Modelo.

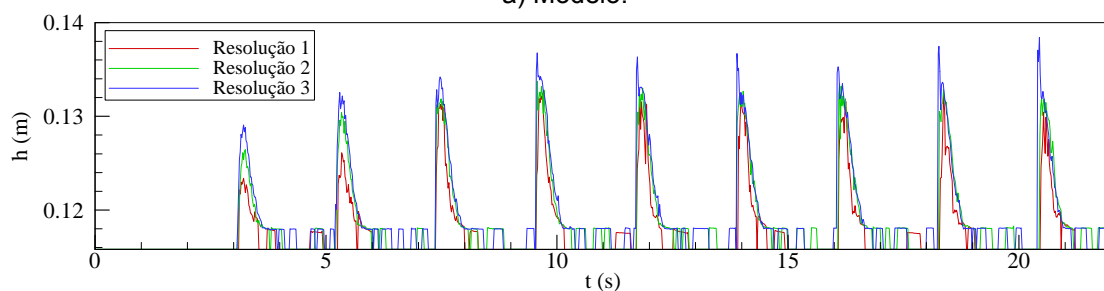


b) Protótipo (valores à escala do modelo).

Figura 7 – Comparação da série temporal do *run-up* entre as três resoluções.

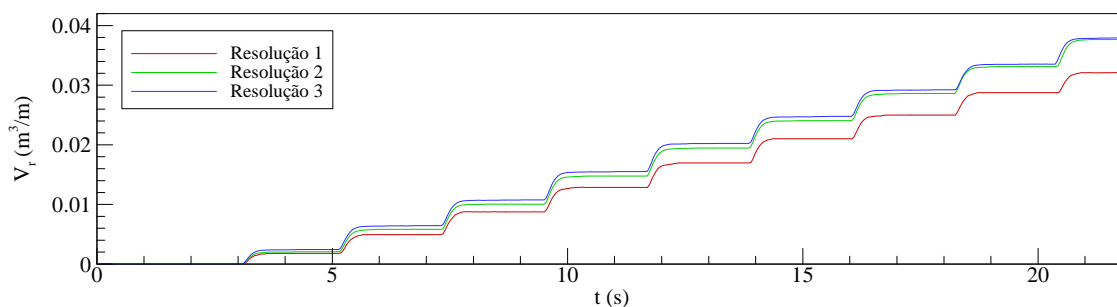


a) Modelo.

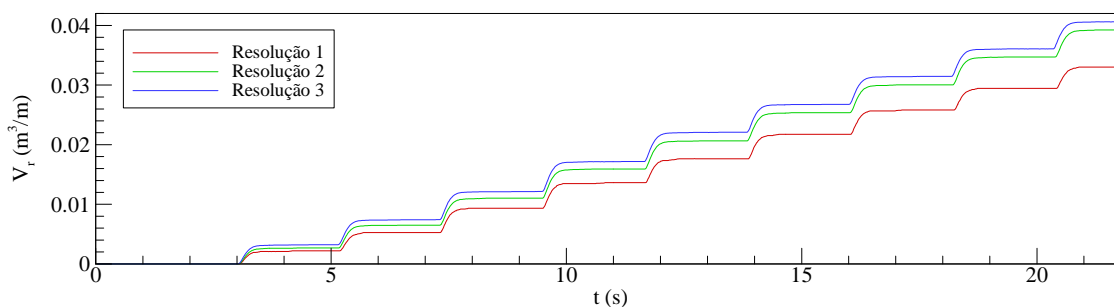


b) Protótipo (valores à escala do modelo).

Figura 8 – Comparação da série temporal do nível de água no coroamento da estrutura.



a) Modelo.



b) Protótipo (valores à escala do modelo).

Figura 9 – Comparação da série temporal do volume galgado entre as três resoluções.

Nas Tabelas 3 e 4 é apresentada a comparação do volume galgado por onda para as três resoluções à escala do modelo e do protótipo, respetivamente. Na primeira onda, observa-se em ambas as situações, um galgamento maior. Esta diferença pode ser devida à onda dispersiva inicial ser sensível à resolução. Depois da parte transiente do escoamento, ou seja, quando a interação entre a onda incidente e a reflectida pela estrutura é relativamente periódica, o erro relativo à Resolução 3 (mais fina) tende, em geral, a diminuir para ambas as escalas com o aumento do número de partículas. Para obter uma tendência geral, calculou-se

o erro relativo médio como a média do erro relativo das ondas W4 até W10. A parte transiente não é considerada pois o que interessa é o escoamento periódico estacionário. O erro relativo médio é de 12% e 14% para a Resolução 1 à escala do modelo e do protótipo, e 2% para a Resolução 2 para ambas as resoluções.

Conclui-se que é necessário verificar a análise da convergência dos resultados com a resolução não só ao nível da convergência da superfície livre, mas também ao nível de outros parâmetros para os quais se possa notar uma maior sensibilidade com a resolução, como é o caso do galgamento.

Tabela 3 – Comparação do volume galgado por onda entre as diferentes resoluções do modelo.

Onda	Volume galgado por onda (m ³ /m)			Erro relativo à Resolução 3 (%)	
	Resolução 1	Resolução 2	Resolução 3	Resolução 1	Resolução 2
W2	1.806×10 ⁻³	2.060×10 ⁻³	2.435×10 ⁻³	25.84	15.42
W3	3.129×10 ⁻³	3.768×10 ⁻³	3.999×10 ⁻³	21.77	5.80
W4	3.830×10 ⁻³	4.226×10 ⁻³	4.336×10 ⁻³	11.66	2.54
W5	4.095×10 ⁻³	4.730×10 ⁻³	4.739×10 ⁻³	13.58	0.76
W6	4.095×10 ⁻³	4.716×10 ⁻³	4.738×10 ⁻³	13.58	0.47
W7	4.049×10 ⁻³	4.576×10 ⁻³	4.508×10 ⁻³	10.20	1.50
W8	3.998×10 ⁻³	4.553×10 ⁻³	4.484×10 ⁻³	10.83	1.54
W9	3.737×10 ⁻³	4.528×10 ⁻³	4.297×10 ⁻³	13.04	5.37
W10	3.348×10 ⁻³	4.534×10 ⁻³	4.393×10 ⁻³	23.77	3.22

Tabela 4 – Comparação do volume galgado por onda entre as diferentes resoluções do protótipo (valores à escala do modelo).

Onda	Volume galgado por onda (m ³ /m)			Erro relativo à Resolução 3 (%)	
	Resolução 1	Resolução 2	Resolução 3	Resolução 1	Resolução 2
W2	2.191×10 ⁻³	2.679×10 ⁻³	3.216×10 ⁻³	31.87	16.71
W3	3.082×10 ⁻³	3.824×10 ⁻³	4.188×10 ⁻³	26.40	8.70
W4	4.069×10 ⁻³	4.526×10 ⁻³	4.731×10 ⁻³	13.98	4.33
W5	4.287×10 ⁻³	4.890×10 ⁻³	5.039×10 ⁻³	14.91	2.96
W6	3.998×10 ⁻³	4.728×10 ⁻³	4.907×10 ⁻³	18.52	3.65
W7	4.120×10 ⁻³	4.734×10 ⁻³	4.676×10 ⁻³	11.90	1.24
W8	4.072×10 ⁻³	4.654×10 ⁻³	4.707×10 ⁻³	13.50	1.12
W9	3.611×10 ⁻³	4.676×10 ⁻³	4.590×10 ⁻³	21.33	1.88
W10	3.589×10 ⁻³	4.545×10 ⁻³	4.544×10 ⁻³	21.01	0.03

4.2 Efeito de escala

Após a análise da sensibilidade dos resultados com a resolução, apresenta-se nesta secção, a comparação da superfície livre, *run-up* e galgamento entre modelo e protótipo para a Resolução 3, com o objectivo de avaliar a sensibilidade do modelo numérico SPHyCE com a escala.

Na Figura 10 apresenta-se a série temporal da elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2. Observa-se que a elevação de superfície livre segue o mesmo andamento para ambas as escalas, apesar de, nos instantes iniciais, haver uma ligeira diferença, provavelmente devido à dispersão da onda incidente gerada no início do movimento do batedor.

Da Figura 11 e Figura 12, que apresentam o *run-up* e o nível de água no coroamento, respectivamente, verifica-se algumas diferenças entre os resultados à escala do modelo e do protótipo. Particularmente, a altura da lâmina de água acima do coroamento é maior à escala do protótipo que no modelo. No entanto, o andamento é muito semelhante.

Na Figura 13 apresenta-se o volume galgado ao longo do tempo. O volume galgado estimado à escala do protótipo é maior que à escala do modelo, sendo superior em cerca de 6% no protótipo ao fim de 10 ondas. No entanto, esta diferença pode estar ligada ao galgamento das 2-3 primeiras ondas da parte transiente. Por isso, é mais correcto analisar o volume galgado por onda em vez do volume galgado acumulado.

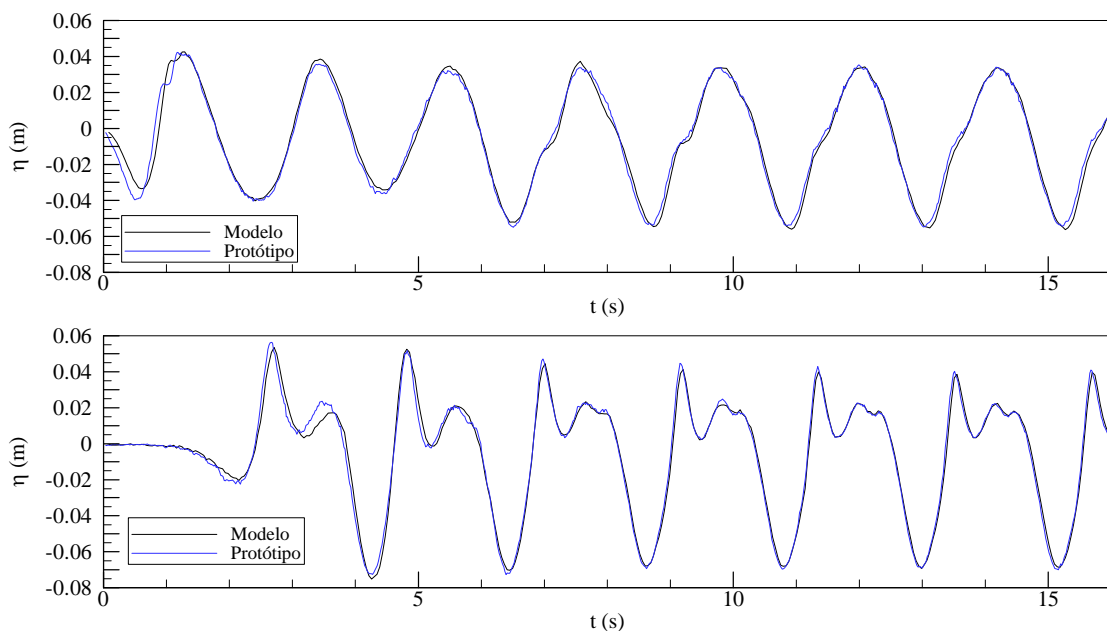


Figura 10 – Comparação da série temporal da elevação de superfície livre na sonda G1 e G2 entre modelo e protótipo (valores à escala do modelo), para a Resolução 3.

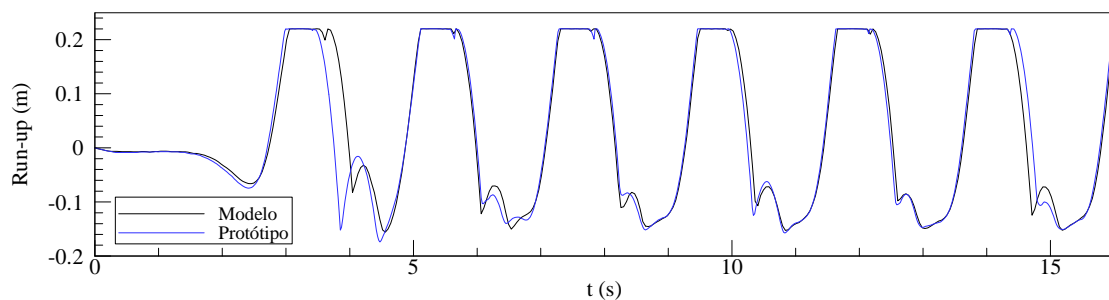


Figura 11 – Comparação da série temporal do *run-up* entre modelo e protótipo (valores à escala do modelo), para a Resolução 3.

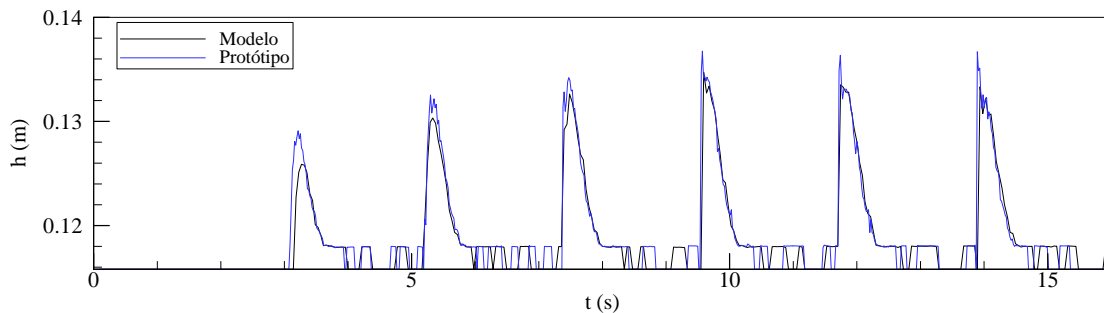


Figura 12 – Comparação da série temporal do nível de água acima do coroamento entre modelo e protótipo (valores à escala do modelo), para a Resolução 3.

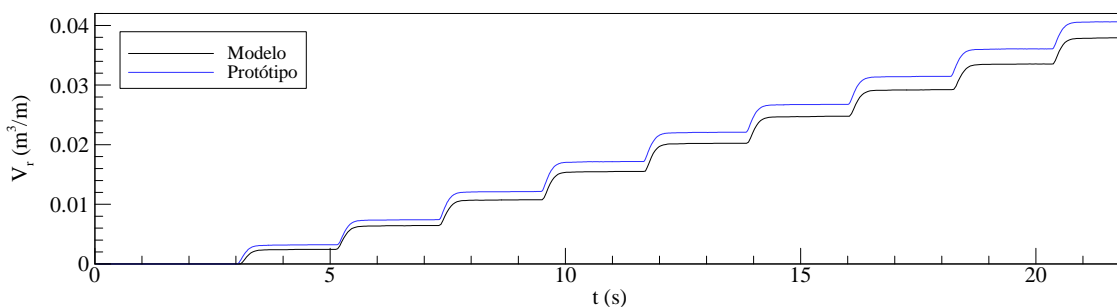


Figura 13 – Comparação da série temporal do volume galgado entre modelo e protótipo (valores à escala do modelo), para a Resolução 3.

Na Tabela 5 apresenta-se o volume galgado por onda para o modelo e protótipo e o erro relativo entre ambos. Verifica-se uma diferença importante para a primeira onda, correspondente à parte transiente do escoamento, que não é o ponto de interesse deste artigo e que pode ser devida ao efeito dispersivo da primeira onda. Quando se considera o volume galgado associado às ondas W4 até W10, correspondendo ao escoamento periódico estabelecido, o valor médio do erro relativo do volume galgado por onda é de cerca de 5% entre o modelo e o protótipo, sendo o volume galgado por onda estimado à escala do protótipo maior que o do modelo.

Tabela 5 – Comparação do volume galgado por onda entre modelo e protótipo (valores à escala do modelo) para a Resolução 3.

Onda	Volume galgado por onda (m ³ /m)		Erro relativo entre modelo e protótipo (%)
	Modelo	Protótipo	
W2	2.435×10^{-3}	3.216×10^{-3}	24.29
W3	3.999×10^{-3}	4.188×10^{-3}	4.50
W4	4.336×10^{-3}	4.731×10^{-3}	8.35
W5	4.739×10^{-3}	5.039×10^{-3}	5.95
W6	4.738×10^{-3}	4.907×10^{-3}	3.44
W7	4.508×10^{-3}	4.676×10^{-3}	3.59
W8	4.484×10^{-3}	4.707×10^{-3}	4.74
W9	4.297×10^{-3}	4.590×10^{-3}	6.37
W10	4.393×10^{-3}	4.544×10^{-3}	3.33

5 MODELAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA REGULAR DO LARGO ATÉ UM QUEBRA-MAR DE TALUDE À ESCALA DE PROTOTIPO

A modelação numérica da propagação de uma onda regular desde o largo até ao molhe oeste do Porto de Albufeira no Algarve com o modelo Bouss-2D, tem como objectivo verificar a aplicabilidade da metodologia de acoplamento entre este modelo de propagação e o modelo SPHyCE, à escala real. A esta primeira aplicação do modelo SPHyCE à escala real, seguir-se-ão aplicações integrando os dados recolhidos durante as medições de campo realizadas pela Universidade do Algarve durante o Inverno 2012-2013.



Figura 14 – Molhe oeste do Porto de Albufeira no Algarve, Portugal.

A secção de estudo localiza-se aproximadamente a meio do quebra-mar, como indicado na Figura 15. A secção característica do quebra-mar está também indicada na Figura 15. O declive do talude é de 24° , a profundidade no pé da estrutura é de -3.0m (ZH) e a altura do coroamento é $+7.0\text{m}$ (ZH).

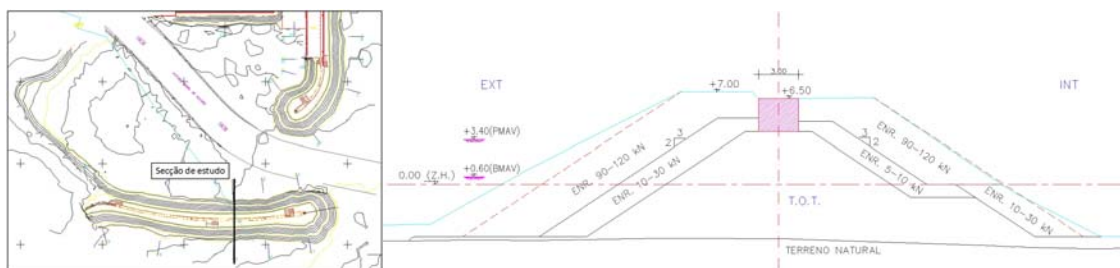


Figura 15 – Planta do Porto de Albufeira: Posição e perfil da secção de estudo.

Para a presente aplicação, considerou-se uma onda incidente regular de 2.0m de altura e período de 12.0s , com um nível de maré de $+3.5\text{m}$ (ZH).

A propagação das ondas é realizada com o modelo Bouss-2D. A batimetria utilizada, Figura 16, é a medida em frente ao quebra-mar, até 663m de distância do pé do talude do quebra-mar. A profundidade máxima na fronteira de entrada deste domínio (fronteira Sul) é de 11.2m abaixo do zero hidrográfico. Para obter a elevação de superfície livre da onda incidente nas proximidades do quebra-mar, na sonda Ga, situada a 75.9m do quebra-mar (Figura 16), sem o efeito da reflexão das ondas na fronteira (para aplicar a metodologia de acoplamento), considera-se o domínio sem a estrutura, tal como apresentado na Figura 16. De forma a evitar a reflexão, o domínio de cálculo é prolongado do lado Norte. Assim, o domínio de cálculo tem uma dimensão de $618\text{m} \times 1092\text{m}$ e a discretização é efectuada através de uma malha regular constituída por elementos quadrados de 2.0m de largura.

Na Figura 17 apresenta-se a elevação de superfície livre no instante de tempo correspondente ao fim da geração de 40 ondas. Observa-se que a altura máxima de elevação de superfície

livre é de +3.9 m e a mínima de -1.5m. Verifica-se também que a rebentação ocorre após a estrutura, o que permite realizar o acoplamento na sonda Ga. Nota-se ainda que a incidência da onda na estrutura é quase perpendicular a esta, configuração mais adequada para assegurar um acoplamento mais preciso.

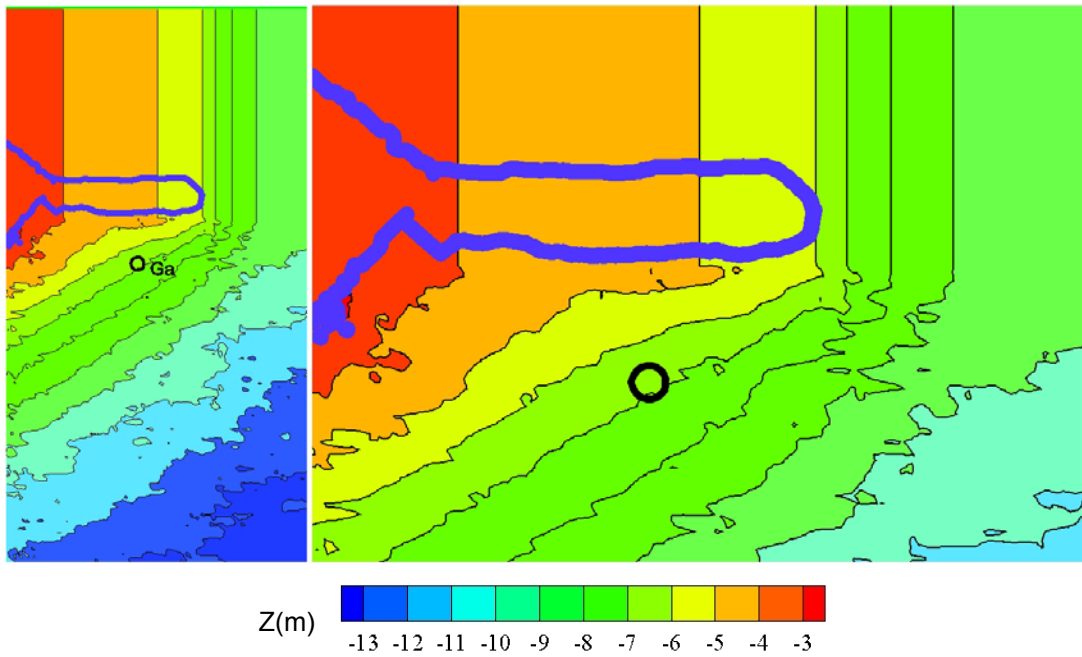


Figura 16 – Batimetria: Domínio completo (esquerda) e pormenor junto ao quebra-mar (direita). O círculo indica a posição da sonda Ga, utilizada para o acoplamento, e a linha azul a posição do quebra-mar.

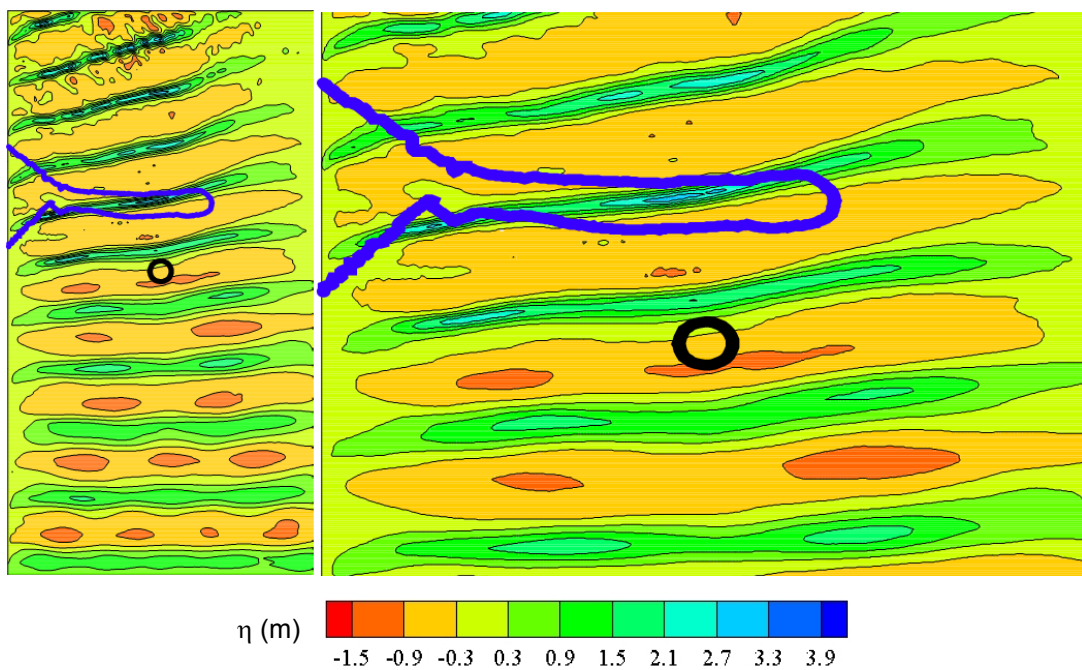


Figura 17 – Elevação de superfície livre: Domínio completo (esquerda) e pormenor junto ao quebra-mar (direita). A linha azul indica a posição do quebra-mar.

A Figura 18 apresenta a série temporal da elevação de superfície livre na sonda Ga, a partir da qual se determina, utilizando uma análise de harmônicas, a altura e a fase das frequências relevantes. A Tabela 6 indica os valores resultantes da análise espectral, o comprimento de onda e a amplitude do batedor do modelo SPHyCE relativo a cada harmônica relevante, conforme a profundidade na sonda Ga.

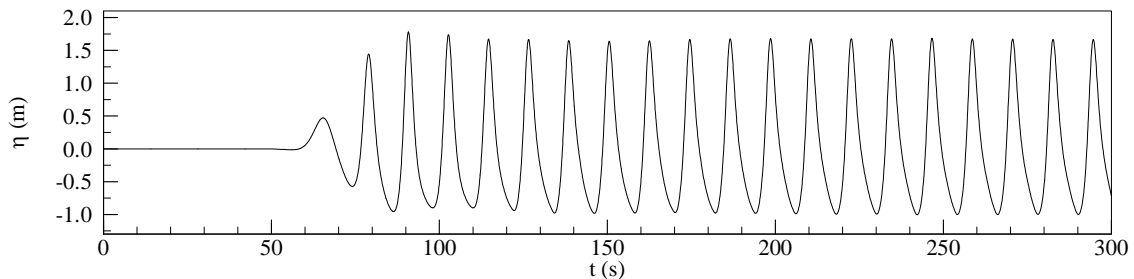


Figura 18 – Série temporal da elevação de superfície livre na sonda Ga.

Tabela 6 – Altura e fase das principais frequências determinadas por análise espectral da serie temporal da elevação de superfície livre na sonda Ga, comprimento de onda (L) e amplitude do batedor (Ab) correspondente, para a profundidade na sonda.

T (s)	H (m)	Fase (°)	L (m)	Ab (m)
12.0	1.26	0.282	105.2	2.480
6.0	0.44	5.90	46.2	0.389
4.0	0.15	4.93	24.4	0.085

Na presente aplicação, o domínio computacional no modelo SPHyCE tem 75.9m entre o batedor, na posição inicial de repouso, e o pé do talude. A profundidade ao nível do batedor, correspondente à profundidade na sonda Ga no modelo Bouss-2D, é de 8.02m.

As duas camadas de blocos do manto secundário, diretamente sobre o núcleo de T.O.T., são também consideradas na definição da geometria. As duas camadas do manto exterior são modeladas com blocos de 1.75x0.70m e as duas camadas do manto secundário com blocos mais pequenos, de 1.00x0.51m. A porosidade de ambas as camadas de blocos é de 42%.

A resolução adoptada nesta aplicação do modelo SPHyCE tem 135683 partículas, o que corresponde a uma distância inicial entre partículas de 0.074m, i.e. o volume das partículas é de 0.0054m³/m. A Figura 19 apresenta uma vista do domínio computacional nas proximidades do quebra-mar com a posição dos respectivos blocos das camadas modeladas.

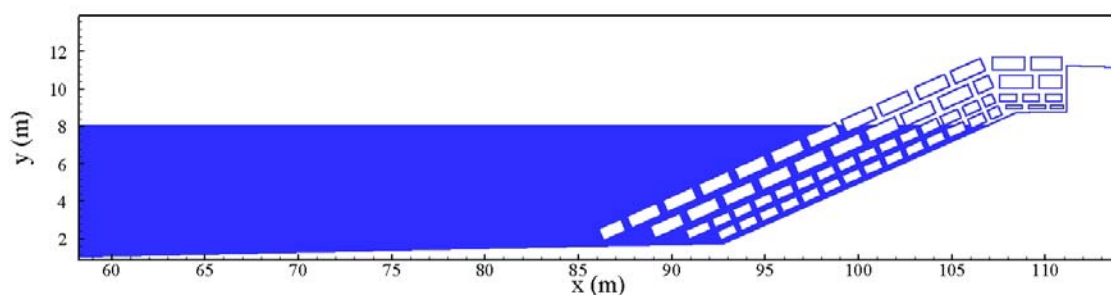


Figura 19 – Domínio computacional perto do quebra-mar de talude e distribuição dos blocos nas camadas modeladas.

Para as características da onda simulada não se verifica galgamento, embora utilizando a ferramenta de rede neuronal, NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005), se preveja um caudal médio galgado de 0.77 l/s/m, para condições semelhantes. No entanto, este caudal é relativamente pequeno, atingindo o valor mínimo passível de ser previsto pelo modelo.

A Figura 20 apresenta a série temporal no pé do talude. A Figura 21 apresenta as séries temporais da elevação de superfície livre no baterdor, teórica, medida e reflectida, e a posição do baterdor em torno da sua posição inicial. Pode-se verificar a eficiência da absorção dinâmica e a periodicidade da interação entre a onda incidente e a onda reflectida pela estrutura, que se traduz por uma elevação de superfície livre periódica regular no pé de talude e num movimento periódico regular do baterdor.

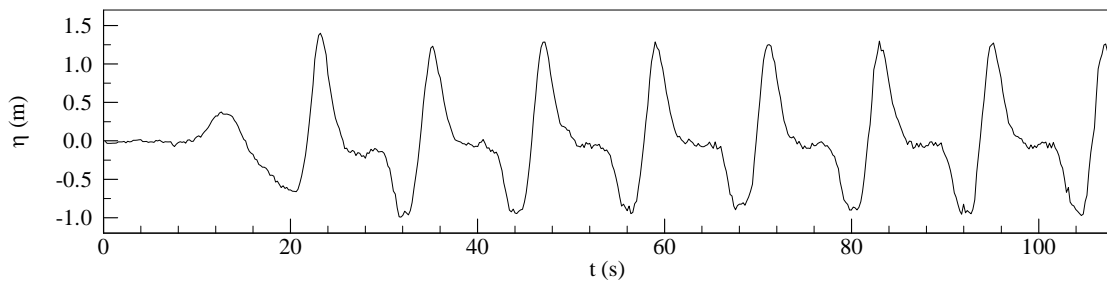
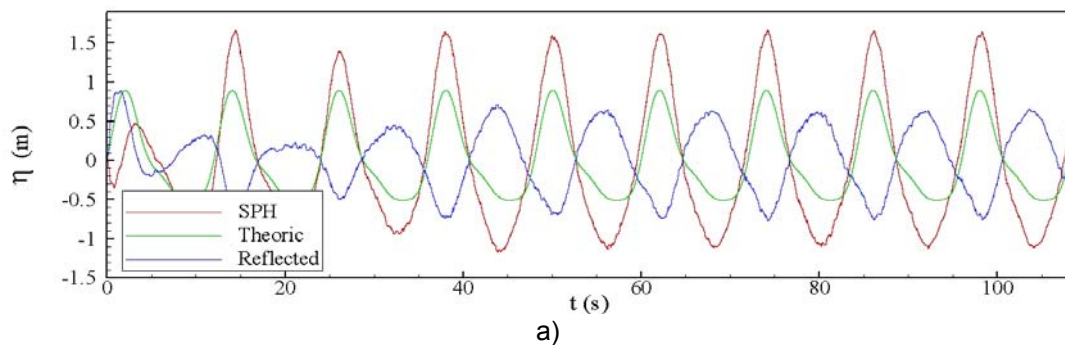
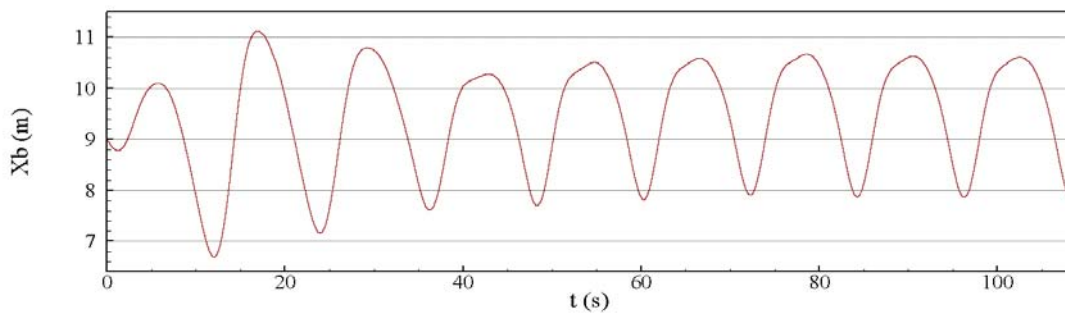


Figura 20 – Série temporal da elevação de superfície livre na sonda Ga.



a)



b)

Figura 21 – Série temporal: a) elevação de superfície livre teórica, no baterdor (SPH) e reflectida (diferença das duas séries anteriores); b) posição do baterdor em relação à posição inicial.

A Figura 22 ilustra a posição das partículas para 4 instantes. É possível observar o escoamento nas quatro camadas de blocos, com a posição das partículas dentro e fora do meio poroso. Verifica-se que o *run-up*, isto é, o nível sobre a camada exterior, atinge a altura da cota do passadiço de betão (+6.5m) na zona porosa. Todavia, não ocorre galgamento, já que a massa de água é dissipada na zona porosa antes de atingir o passadiço de betão.

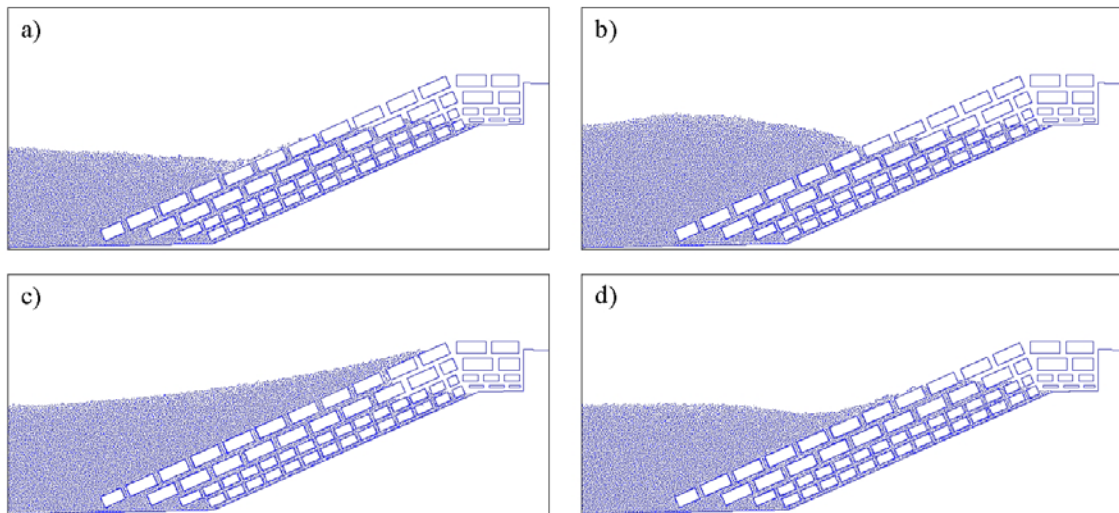


Figura 22 – Posição das partículas no instante de tempo: a) 67.59s; b) 71.20s; c) 73.44s e d) 77.22s.

6 CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo a modelação da interacção de uma onda incidente regular com uma estrutura costeira, o quebra-mar Oeste do porto de Albufeira, utilizando o modelo numérico SPHyCE, baseado no conceito de *Smoothed Particle Hydrodynamics*, com dois objectivos:

- Analisar o desempenho do modelo SPHyCE à escala do protótipo;
- Analisar a metodologia de acoplamento entre o modelo de propagação de ondas Bouss-2D e o modelo SPHyCE, para validar futuras aplicações deste modelo ao estudo da interacção de ondas com o quebra-mar Oeste do porto de Albufeira no âmbito do projecto SPACE.

O modelo SPHyCE foi aplicado considerando três resoluções, i.e. número de partículas, quer à escala do protótipo quer à escala do modelo, para avaliar a influência do efeito de escala. Da análise dos resultados, comparados à escala do modelo, concluiu-se que se deve verificar a convergência da superfície livre, mas também de outros parâmetros, tal como o galgamento, parâmetro com maior sensibilidade relativamente à resolução. Comparando os resultados numéricos de ambas as escalas, verificou-se que o valor médio do erro relativo entre o volume galgado por onda é de cerca de 5%, sendo maior à escala do protótipo.

Com o objectivo de no futuro aplicar o modelo SPHyCE a casos de projetos reais, foi validado um método de acoplamento entre o modelo de propagação de onda, Bouss-2D, e o modelo de interacção onda-estrutura, SPHyCE. Esta ferramenta integrada permite assim estudar zonas relativamente grandes, do largo até às estruturas costeiras, utilizando dois modelos numéricos, cada um deles sendo dedicado à modelação de uma zona específica, em função das suas características, com o intuito de reduzir o tempo computacional e garantir a maior precisão dos resultados. Apresentou-se a primeira aplicação desta metodologia ao quebra-mar Oeste do porto de Albufeira, para um nível de maré de +3.5m (ZH), e uma onda regular incidente de período 12.0s e de altura ao largo de 2.0m. Com a ferramenta integrada não se verificou ocorrência de galgamento, embora com a rede neuronal NN_OVERTOPPING2, o caudal médio galgado previsto seja de 0.77 l/s/m, que é um valor pequeno.

A ferramenta integrada à escala do protótipo será validada exhaustivamente com dados de medições de campos do quebra-mar Oeste do porto de Albufeira, obtidos durante o inverno 2012-2013.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através do projecto SPACE “A Smoothed particle Hydrodynamic model development and validation for coastal engineering applications”, PTDC/ECM/114109/2009. O segundo autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento da bolsa SFRH/BPD/37901/2007.

8 BIBLIOGRAFIA

- Batchelor G.K., 1974, *Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, UK.
- Chanson H., 2004, *The hydraulics of open channel flow: an introduction*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2nd edition, Oxford.
- Coeveld E.M., Van Gent M.R.A., Pozueta B., 2005, *Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2*, CLASH WP8 – Report.
- Didier E., Neves M.G., 2009, Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure, *Proc. 4th International SPHERIC workshop*, pp. 357-364, Nantes, França.
- Didier E., Ferreira O., Matias A., Neves M.G., Reis M.T., Pacheco A., 2011, Desenvolvimento e avaliação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics para aplicação a estruturas costeiras, *Proc. 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Porto, Portugal.
- Didier E., Neves M.G., 2012, A semi-infinite numerical wave flume using Smoothed Particle Hydrodynamics, *IJOPE - International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 22(3), pp. 193-199.
- Didier E., Neves D.C.B., Martins R., Neves M.G., 2012a, Modelling of an impermeable breakwater: comparison between SPH numerical model and physical model, *RETERM*, Vol. 11(1-2), pp. 68-76.
- Didier E., Neves M.G., Reis M.T., 2012b, Determinação do caudal galgado numa estrutura porosa utilizando um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics, *Proc. 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, Portugal, pp. 127-130.
- Didier E., Martins R., Neves M.G., 2013a, Numerical and experimental modeling of regular wave interacting with a composite breakwater, *International Journal of Offshore and Polar Engineering - IJOPE*, Vol. 23(1), pp. 46-54.
- Didier E., Neves D.R.C.B., Teixeira P.R.F., Neves M.G., Soares H., Viegas M., 2013b, Coupling of FLUINCO mesh-based and SPH mesh-free numerical codes for the modelling of wave overtopping over a porous breakwater, *Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 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*, Vol. 181, pp. 375-389.
- Gómez-Gesteira M., Rogers B.D., Dalrymple R.A., Crespo A.J.C., Narayanaswamy M., 2008, User Guide for the SPHysics Code v1.4, Manchester, UK.
- 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*, Vol. 48 Extra Issue, pp. 6-27
- 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*, Vol. 9(4), pp. 339-347.

- Johnson G., Stryk R., Beissel S., 1996, SPH for high velocity impact calculations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, 347-373.
- Monaghan J.J., 1989, On the problem of penetration in particle methods, *Journal Computational Physics*, Vol. 82, pp. 1-15.
- Monaghan J.J., 1992, Smoothed Particle Hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 30, pp. 543-574.
- Monaghan J.J., 1994, Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pp. 399-406.
- Monaghan J.J., Kos A., 1999, Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 125, pp. 145-154.
- Morris J.P., Fox P.J., Shu Y., 1997, Modeling lower Reynolds number incompressible flows using SPH, *Journal of Computational Physics*, Vol. 136, pp. 214-226.
- Neves D.R.C.B, Didier E., Teixeira P.R.F, Neves M.G., 2013, Resolution refinement technique in a smoothed particle hydrodynamics numerical flume for coastal engineering applications, Proc. *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering V, MARINE 2013*, Hamburg, Deutschland, pp. 388-399.
- Nwogu O., 2001, Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 119(6), pp. 618-638.
- Nwogu O., Z. Demirbilek, 2001, Bouss-2D: A Boussinesq wave model for coastal regions and harbors, Report1, Theoretical background and user's manual, U.S. Army Corps of Engineers.
- Panizzo A., 2004, Physical and Numerical Modelling of Sub-aerial Landslide Generated Waves, *PhD thesis*, Universita degli Studi di L'Aquila.
- Peregrine D.H., 1967, Long waves on a beach, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 815-827.
- SPHysics code v1.4, 2009, <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>.
- Wei G., Kirby J.T., Grill S.T., Subramanya R., 1995, A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part 1, highly nonlinear unsteady waves, *journal of Fluid Mechanics*, Vol. 294, pp. 71-92.