APLICAÇÃO DO SPH AO ESTUDO DA INTERAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA COM OBRAS PORTUÁRIAS. O CASO DO PORTO DE LEIXÕES Application of SPH to Study the Interaction of Sea Waves with Harbor Structures. The Port of Leixões Case Study

BEATRIZ QUEIRÓS (1), FRANCISCO TAVEIRA-PINTO (2), PAULO ROSA-SANTOS (3), HUGO LOPES (4) e ALEJANDRO CRESPO (5)

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec11294@fe.up.pt ⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt ⁽³⁾ Professor Auxiliar Convidado, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjrsantos@fe.up.pt ⁽⁴⁾ Doutor, Direção de Obras e Equipamentos, Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo,

Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, Portugal, hugo.lopes@apdl.pt

⁽⁵⁾ Doutor, Universidade de Vigo, Espanha, EPHYSLAB Environmental Physics Laboratory, Edifício de Física Campus As Lagoas s/n, 32004 Ourense, Espanha, alexbexe@gmail.com

Resumo

A evolução tecnológica e comercial dos portos tem vindo a ser acompanhada pelo desenvolvimento dos quebramares, quer ao nível das soluções construtivas adotadas, quer ao nível do seu dimensionamento, com o objetivo último de atingir um melhor desempenho hidráulico – estrutural, uma maior estabilidade e um maior grau de proteção das zonas abrigadas.

O quebramar de taludes é a solução construtiva mais utilizada em zonas portuárias, funcionando como um obstáculo à propagação natural das ondas. É uma solução de fácil execução, manutenção e eficaz na dissipação da energia das ondas. O processo de dimensionamento deste tipo de estruturas é bastante complexo, dadas as ações de grande magnitude e variabilidade a que estão sujeitas. Tradicionalmente, a avaliação do comportamento hidráulico-estrutural de um quebramar de taludes é efetuada com recurso a modelos físicos. Contudo, nas últimas décadas, tem havido uma evolução notável na aplicação de modelos numéricos avançados ao estudo de fenómenos hidrodinâmicos complexos no domínio da engenharia costeira e portuária. Estes modelos, com apenas ligeiras simplificações na descrição dos fenómenos físicos relevantes, permitem a simulação de problemas complexos, constituindo uma alternativa flexível aos modelos físicos, e possibilitam a análise de uma extensa variedade de condições do ambiente marítimo, bem como a fácil alteração das caraterísticas geométricas da estrutura.

Neste artigo aplicou-se o código numérico de SPH DualSPHysics para reproduzir e estudar a interação da agitação marítima com um quebramar de taludes real – o quebramar norte do Porto de Leixões, Portugal.

Palavras-chave: Quebramar de taludes, quebramar norte de Leixões, modelação numérica, DualSPHysics, Smoothed-particle hydrodynamics.

Abstract

The technological and commercial evolution observed in maritime ports is being followed by the development of breakwaters, both in terms of the constructive solutions adopted or in the design methodologies, being the final purpose a better hydraulic and structural performance of the structures as well as a higher protection and stability level of the sheltered zones.

Rubble mound breakwaters are nowadays the most frequent solution, at an international level, both for their effectiveness in wave energy dissipation and for their easy maintenance and construction. Since breakwaters are subjected to high magnitude actions, the design process is rather complex. Traditionally, the assessment of the hydraulic and structural behaviour of rubble mound breakwaters was made using physical models. However, in recent decades, there was a remarkable evolution in the application of advanced numerical models to an extensive range of complex hydrodynamic phenomena in the field of coastal and port engineering. Those numerical models, with only a few simplifications in the simulation of the problem physics, may be nowadays a flexible alternative to the physical models by allowing the easy modification of the structure's geometry and its testing for a wide variety of maritime environmental conditions.

In the paper, the DualSPHysics SPH numerical code is applied to reproduce and analyse the interaction of sea waves with a real rubble-mound breakwater – the Port of Leixões Northern breakwater, Portugal.

Keywords: Rubble mound breakwater, Leixões Northern breakwater, numerical modelling, DualSPHysics, Smoothed-particle hydrodynamics.

1. Introdução

Os quebramares são estruturas utilizadas para a proteção e criação de áreas protegidas da agitação marítima em zonas portuárias, funcionando como um obstáculo à propagação natural das ondas, criando áreas abrigadas onde seja possível realizar, de forma segura, as operações de acostagem, carga e descarga de bens e pessoas.

O desenvolvimento dessas estruturas tem acompanhado a constante evolução tecnológica e comercial dos portos, quer ao nível das soluções construtivas adotadas, quer ao nível do dimensionamento, sendo o objetivo final desse trabalho conseguir um melhor desempenho hidráulico – estrutural do quebramar, uma maior estabilidade e um maior grau de proteção das zonas abrigadas.

Atualmente, uma das soluções construtivas mais utilizada internacionalmente é o quebramar de taludes, tanto pela sua eficácia na dissipação da energia das ondas, como pela sua facilidade de construção e de manutenção. Porém, o seu dimensionamento é um processo complexo, devido ao tipo de ações do ambiente marítimo a que está sujeito, de grande magnitude e variabilidade. Este dimensionamento é, muitas vezes, realizado de um modo semi – empírico, baseado em expressões deduzidas a partir de considerações teóricas simplificadas, em resultados de trabalhos envolvendo o uso de modelação física ou numérica, bem como na experiência do projetista.

Tradicionalmente, a avaliação do comportamento hidráulico – estrutural de um quebramar de taludes é efetuada com recurso a estudos em modelo físico, que permitem a análise de fenómenos complexos de interação onda – estrutura, de uma forma tri – dimensional. Contudo, nas últimas décadas, os modelos numéricos têm tido uma evolução significativa e sido aplicados no estudo de fenómenos complexos na área da engenharia costeira e portuária.

Assim, com o propósito de estudar a interação da agitação marítima incidente com a estrutura de um quebramar de taludes (*i.e.*, analisar fenómenos tais como o espraiamento, o galgamento e a reflexão das ondas) e, simultaneamente, avaliar as potencialidades de um modelo CFD de *Smoothedparticle Hydrodynamics* aplicado a casos reais de engenharia costeira, como alternativa ou complemento aos estudos em modelo físico, aplicou-se o código numérico DualSPHysics (Crespo *et al.*, 2016) a uma secção corrente do quebramar norte do Porto de Leixões.

2. Modelação Numérica: DualSPHysics

A natureza é um sistema complexo que pode ser modelado. A sua modelação consiste na procura de soluções analíticas para as equações que definem o sistema. Uma vez validadas as equações, o comportamento do sistema pode ser previsto ajustando alguns parâmetros e impondo um conjunto de condições iniciais. A modelação numérica procura resolver estas equações de uma forma numérica, em vez de forma analítica. Assim, é possível simular processos complexos do mundo real através de algoritmos que utilizam números e simples regras matemáticas. Nestas circunstâncias, a simulação numérica demonstra ser uma ferramenta poderosa que permite a compreensão do comportamento de sistemas complexos, permitindo também prever a sua evolução com base em condições iniciais (Domínguez 2014).

No caso específico das obras marítimas, e mais concretamente dos quebramares, o dimensionamento baseiase, tradicionalmente, em relações empíricas ou semi--empíricas, com parâmetros determinados a partir de ensaios experimentais. Consequentemente, o limite de validade destas fórmulas é reduzido, uma vez que está restringido à gama de valores ensaiados. Além disto, entrando no domínio dos casos reais, têm surgido geometrias cada vez mais complexas com o intuito de responder melhor às solicitações do ambiente marítimo. Para estas geometrias não existem formulações empíricas, semi – empíricas ou analíticas que descrevam o problema.

Assim, torna-se muitas vezes necessário recorrer à modelação física ou numérica para conseguir resolver os problemas práticos de engenharia (Altomare *et al.*, 2014; Didier e Neves, 2010).

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos meios computacionais, a modelação numérica tem ganho uma maior relevância, existindo até um ramo da mecânica dos fluídos, denominado dinâmica dos fluídos computacional (CFD), que estuda o comportamento dos fluídos utilizando modelação numérica. Esta relevância decorre da capacidade dos computadores atuais executarem milhares de milhões de operações matemáticas por segundo. Isto possibilita a simulação de sistemas muito complexos e cenários realistas em pouco tempo, usando simples operações matemáticas. Desta forma, a modelação numérica apresenta-se como uma alternativa relativamente rápida e barata, mas também muito flexível, na medida em que permite alterar facilmente a geometria de uma estrutura ou as condições de agitação a que é submetida.

Esta técnica é também capaz de fornecer parâmetros físicos complementares que podem ser difíceis, ou mesmo impossíveis, de medir no modelo físico, pois um modelo que permita determinar, de forma quase exata, as características do escoamento, na proximidade e aquando da sua interação com a estrutura, permite também saber, com base nos resultados, outros parâmetros relacionados com a função da estrutura (*e.g.*, galgamentos, reflexões) ou com a sua estabilidade (*e.g.*, ações sobre o manto resistente, problemas de erosão).

Contudo, apesar da precisão atual dos modelos numéricos, estes não podem ainda substituir a construção de modelos à escala, principalmente no caso das estruturas costeiras, em que a verificação dos resultados se faz com base em resultados de modelos físicos e em dados de protótipo. Porém, os modelos numéricos podem levar a uma importante poupança ao reduzir de forma significativa o número de testes experimentais executados, pois estes são habitualmente caros, requerem tempo, boas infraestruturas, experiência e conhecimento por parte de quem os realiza e analisa os resultados experimentais obtidos (Didier e Neves, 2010; Domínguez, 2014). Em suma, numa grande parte dos casos, a modelação numérica apresenta-se como um excelente complemento da modelação física. Uma dessas situações corresponde, como foi referido, ao caso concreto da interação entre a agitação marítima e uma estrutura marítima (Didier e Neves, 2010), para o qual foram já desenvolvidos, nas últimas décadas, modelos numéricos, com diferentes graus de complexidade, acompanhando a evolução dos métodos numéricos. Estes modelos numéricos, que incluem a modelação da superfície livre da água, permitem descrever de forma rigorosa a física envolvida no processo e prever as caraterísticas principais do escoamento. Assim, para a descrição do movimento do fluído existem duas abordagens numéricas possíveis:

- a Euleriana, que resolve as equações em nós fixos pertencentes a uma malha e deste modo, para um determinado ponto do espaço, obtém-se a velocidade e a pressão em função do tempo;
- a Lagrangiana, que não utiliza uma malha, fixa ou dinâmica, e a posição onde as equações são resolvidas acompanha o movimento do fluído. Assim, seguindo o movimento das partículas durante um determinado tempo, obtêm-se a sua trajetória, velocidade e pressão, em função da posição inicial e do tempo.

Os métodos baseados na utilização de malhas (elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos) são atualmente muito robustos, bem desenvolvidos e têm sido aplicados a uma vasta gama de situações, proporcionando um conjunto de resultados muito precisos. Daqui é possível concluir que este tipo de método é ideal para sistemas onde o domínio está perfeitamente definido e para simulações onde as fronteiras permanecem fixas. Contudo, a criação e utilização de malhas pode não ser muito eficiente se o sistema for complexo.

Assim, têm surgido muitos métodos sem malha, como o *Particle Finite Element Method* (PFEM) ou o *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), que têm ganho alguma popularidade ao longo dos últimos anos, pois podem ser aplicados a problemas que são altamente não-lineares, em geometrias arbitrariamente complexas e em situações em que não é possível a aplicação de métodos com malhas.

Dentro dos métodos sem malha disponíveis, o SPH é, possivelmente, o mais popular e atingiu o nível de maturidade exigido para ser utilizado como ferramenta de apoio a problemas reais de engenharia (Altomare *et al.*, 2014). Este é um método Langrangiano sem malha, originalmente desenvolvido por astrofísicos durante os anos setenta (Gingold e Monaghan, 1977) e que tem vindo a ser aplicado em diferentes áreas, incluindo a mecânica dos sólidos e a dinâmica dos fluídos. É, atualmente, amplamente utilizado para uma extensa gama de aplicações no domínio dos CFDs (Crespo *et al.*, 2015).

No domínio da dinâmica dos fluídos, o SPH é um método particularmente adequado para descrever uma variedade de escoamentos em superfície livre e modelar os fenómenos complexos de deformação dessa superfície livre, tais como a rebentação, a interação onda – estrutura, a propagação das ondas sobre uma praia e a rotura de barragens (Crespo *et al.*, 2015).

Contudo, a grande desvantagem desta técnica é o elevado custo computacional. Mesmo um curto período de tempo de simulação real requer um longo tempo de execução quando o cálculo é realizado numa única unidade de processamento central, devido ao grande número de iterações realizadas para cada partícula, a cada intervalo de tempo. Isto tem dificultado o desenvolvimento do SPH e a sua utilização para a resolução de problemas reais, pois a capacidade de realizar cálculos envolvendo milhões de partículas num tempo razoável é essencial para realizar simulações com relevância para a indústria. Contudo, isto só é possível se forem empregues técnicas de aceleração de *hardware* (Domínguez, 2014).

2.1. Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH

O *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) é um método bi e tridimensional, que não requer uma malha. Nesta técnica, o fluido contínuo é discretizado num conjunto de partículas, Figura 1, sendo as equações discretas de Navier-Stokes localmente integradas para cada uma dessas partículas, de acordo com as propriedades físicas das partículas vizinhas. Ou seja, cada uma das partículas é um ponto nodal para o qual quantidades físicas, como a posição, a velocidade, a densidade e a pressão são calculadas pela interpolação dos valores relativos às partículas vizinhas.

A cada time step, novas quantidades físicas são calculadas para cada partícula e elas movem-se de acordo com os valores atualizados. Isto significa que o conjunto de partículas vizinhas de uma dada partícula se altera a cada instante, dado que as partículas vizinhas são aquelas que se encontram dentro de uma determinada área de influência da partícula em movimento (Crespo *et al.*, 2015).



Figura 1. Discretização de um fluido contínuo.

A influência que as partículas vizinhas têm no movimento de uma partícula é ponderada de acordo com a distância entre as partículas. Para tal, existe uma função, denominada Kernel (W), que mede essa contribuição dependendo da distância inter – partículas. Esta distância é definida através de um comprimento característico ou *smoothing length* (h), que limita a área de influência da função Kernel e, por conseguinte, a área a partir da qual a contribuição de outras partículas pode ser negligenciada, Figura 2.



Figura 2. Domínio de influência do Kernel (esquerda), partículas que contribuem para a interpolação e suporte compacto do Kernel (direita).

Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão de suporte do Kernel e cada uma das partículas tem uma contribuição no Kernel (Crespo *et al.,* 2015).

As leis de conservação da dinâmica dos fluidos são aqui transformadas da sua forma diferencial parcial para uma forma mais ajustada a uma simulação baseada em partículas, utilizando equações integrais, com base em funções de interpolação, tais como a função Kernel, que dão uma estimativa dos valores num ponto específico. Assim sendo, é possível afirmar que os princípios matemáticos do SPH são baseados em integrais de interpolação, e, por conseguinte, qualquer função *F* pode ser calculada pelo integral de aproximação:

$$F(r) = \int F(r')W(r - r', h)dr'$$
[1]

em que W corresponde à função de interpolação Kernel e pode assumir diversas formas, sendo as mais comuns a *cubic* ou a *quintic* (Crespo *et al.,* 2015). As variáveis $r \in h$ são apresentadas na Figura 2.

A *smoothing* Kernel deve apresentar várias propriedades (Liu, 2003; Monaghan, 1992), tais como a positividade dentro de uma zona de interação definida, um suporte compacto, normalização, diminuição monotónica com a distância e diferenciabilidade. Para uma descrição mais completa do modelo, pode recorrer-se a Monaghan (2005) e Violeau (2012).

A função F(r) na Equação [1] pode ser aproximada por uma forma discreta, não contínua, baseada num conjunto de partículas. Neste caso, a função é interpolada numa partícula (a), onde é realizado um somatório incluindo todas as partículas que caem dentro da região de suporte compacto, definido como *smoothing length* (h).

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) W(r_a - r_b, h) \Delta v_b$$
[2]

onde Δv_b é o volume de uma partícula vizinha (b). Se $\Delta v_b = m_b/\rho_b$, com *m* e ρ sendo a massa e a densidade da partícula (b), respetivamente, fica:

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b) W(r_a - r_b, h) \frac{m_b}{\rho_b}.$$
[3]

2.1.1. Equações de Navier - Stokes segundo a formulação SPH

Equação da conservação da quantidade de movimento A equação de conservação da quantidade de movimento

pode ser expressa no seu formato de derivada parcial:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \boldsymbol{\Gamma}$$
^[4]

em que Γ representa o termo viscoso e g a aceleração da gravidade (Crespo *et al.*, 2015).

O regime de viscosidade artificial, proposto por Monaghan (1992), é um método comum dentro da simulação de fluídos utilizando o SPH, devido sobretudo à sua simplicidade. Aplicando este método, a equação [4] pode ser discretizada, passando a ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \prod ab\right) \nabla_a W_{ab} + g$$
^[5]

sendo *v* a velocidade, *P* a pressão, ρ a massa volúmica, *m* a massa, *g* a aceleração gravitacional e W_{ab} a função Kernel que depende da distância entre as partículas (a) e (b). $\prod ab$ é o termo da viscosidade artificial proposto por (Monaghan, 1992):

$$\prod ab = \{ \frac{\frac{-\alpha c_{ab}\mu_{ab}}{\rho_{ab}}}{0} v_{ab}r_{ab} < 0 \\ 0 v_{ab}r_{ab} > 0$$
 [6]

 $\operatorname{com} \mu_{ab} = (h \, v_{ab} \cdot r_{ab})/(r_{ab}^2 + \eta^2)$, onde $r_{ab} = r_a - r_b$, $v_{ab} = v_a - v_b$, sendo $r_a e v_a$ a posição e a velocidade da partícula a; $\overline{c_{ab}} = 0.5(c_a + c_b)$ é a velocidade média do som, $\overline{\rho_{ab}} = 0.5(\rho_a + \rho_b)$ a densidade média e $\eta^2 = 0.01 h^2$. Para α deve ser usado um valor que previna instabilidades e oscilações. Esta equação de conservação da quantidade de movimento é utilizada para determinar a aceleração da partícula (a), como resultado da sua interação com as partículas vizinhas (partículas b) (Crespo *et al.*, 2015).

Equação de conservação da massa

Durante a modelação com o SPH de um fluido fracamente compressível, como é o caso da água, a massa de cada partícula permanece constante e apenas a sua densidade sofre oscilações. Estas mudanças de massa volúmica podem ser calculadas através da resolução da equação da conservação da massa (equação de continuidade), na forma SPH (Crespo et al., 2015):

$$\frac{a\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} + \nabla_a W_{ab} \tag{7}$$

Equação de estado

No modelo numérico DualSPHysics utiliza-se a técnica de compressibilidade artificial. Segundo Monaghan (1994), o fluido definido no modelo é tratado como sendo fracamente compressível, sendo que a compressibilidade é ajustada de maneira a que a velocidade do som possa ser artificialmente reduzida. Segundo Didier e Neves (2010), este ajuste é feito com o intuito de manter a velocidade do som com um valor suficientemente baixo para permitir que o modelo corra com um *time step* razoável.

Contudo, esse valor deve também ser suficientemente alto, de maneira a que as flutuações devidas à massa volúmica se mantenham menores que 1% e, por conseguinte, esta abordagem não se afaste muito de uma abordagem incompressível. Assim, é necessário garantir que c_0 seja pelo menos dez vezes superior à velocidade máxima do fluido. Portanto, em vez de se resolver uma equação de pressão de *Poisson*, onde o fluido é considerado incompressível, a pressão é calculada através de uma equação de estado, com base na densidade das partículas:

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

onde $\gamma = 7$, $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$, $\rho_0 = 1000$ kg.m⁻³ é a massa volúmica de referência e $c_0 = c(\rho_0) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}$ é a velocidade do som correspondente à densidade de referência.

2.1.2. Implementação numérica

Time Step

Na implementação numérica do modelo, as equações de quantidade de movimento (v_a), densidade (ρ_a) e posição (r_a) podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{dv_a}{dt} = F_a \tag{9}$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \tag{10}$$

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a \tag{[11]}$$

A integração dessas equações no tempo pode ser realizada recorrendo a algoritmos bem mais complexos do que pelo método explícito de Euler. É possível utilizar um esquema computacionalmente simples, denominado Verlet ou um esquema numericamente mais estável, mas computacionalmente mais intenso, designado por método Symplectic de duas fases. Este último algoritmo é quase de segunda ordem e utiliza um passo predictor - corrector. Isto significa que, quando se calcula o novo valor no instante seguinte $(t + \Delta t)$, calculam-se primeiro valores intermédios $(t + \Delta t/2)$, que vão ser utilizados para corrigir o valor final $(t + \Delta t)$. Por outro lado, o dt é variável e depende, a cada instante das forças das partículas, das forças viscosas e da condição CFL (Courant - Friedrich - Levy) (Crespo et al., 2015).

Condições fronteira

No DualSPHysics, o contorno é descrito por um conjunto de partículas que é considerado distinto do conjunto de partículas do fluido. Atualmente, o modelo permite usar as seguintes funcionalidades: fronteiras sólidas impermeáveis ou fronteiras abertas periodicamente. Oferece, igualmente, métodos que permitem as partículas da fronteira moveremse, de acordo com funções de esforço fixadas (Domínguez, 2014).

Condição de contorno dinâmico

A condição de contorno dinâmico (DBC - Dynamic Boundary Condition) é o método padrão, fornecido pelo DualSPHysics (Crespo et al., 2007). Este método considera as partículas limite que satisfazem as mesmas equações que as partículas de fluido, contudo, elas não se movem de acordo com as forças nelas exercidas. Pelo contrário, elas mantêm-se fixas na sua posição ou movem-se de acordo com uma função de movimento imposta/atribuída (i.e., os objetos movem-se como comportas ou pistões) (Domínguez, 2014). Quando uma partícula de fluido se aproxima do contorno e a distância entre as partículas do contorno e as partículas fluidas se torna menor do que duas vezes o smoothing length (h), a densidade das partículas contorno afetadas aumenta, resultando num aumento da pressão. Por sua vez, isto resulta numa força repulsiva exercida sobre a partícula fluida, devido ao termo da pressão na equação da quantidade de movimento (Domínguez, 2014). Ou seja, aplica-se a condição de fronteira repulsiva, que corresponde a uma das soluções para combater o efeito pouco realista da aproximação entre as partículas e as fronteiras sólidas - nos somatórios só intervém as partículas situadas no interior do meio fluido (Didier e Neves, 2010). A estabilidade deste método assenta em adotar um time step convenientemente curto, para lidar com as maiores velocidades de todas as partículas de fluido que se encontram em interação com as partículas do contorno. Portanto, é preciso ter atenção na escolha do método de cálculo do time step variável.

2.2. Modelo DualSPHysics

O SPHysics consistia num modelo SPH, com código – fonte aberto à comunidade, desenvolvido pelos investigadores da Universidade Johns Hopkins (US), da Universidade de Vigo (Espanha), da Universidade de Manchester (UK) e da Universidade de Roma, La Sapienza. O código era válido para diferentes problemas de rebentação das ondas, rotura de barragens, interação entre as ondas e estruturas costeiras, entre outros. Porém, embora o código SPHysics permitisse a modelação de problemas com elevada resolução espacial, o principal problema, para a sua aplicação a problemas reais de engenharia, era o seu elevado custo computacional. Consequentemente, o SPHysics raramente era aplicado a grandes domínios. Assim, tornou-se imprescindível recorrer à aceleração de *hardware* e à computação paralela para tornar os códigos como o SPHysics mais úteis e versáteis.

Assim, o pacote DualSPHysics inclui não só os arquivos de origem do executável SPH, mas também várias ferramentas avançadas de pré-processamento, para criar geometrias mais complexas, e de pós-processamento para analisar mais facilmente os resultados numéricos. Qualquer geometria complexa pode ser carregada a partir de arquivos de vários formatos (por exemplo, *.cad, *.3ds, *.STL, *.ply, *.dwg, *.DXF, *.shp, *.IGS, *.vtk, *.csv) e depois convertida em partículas SPH. Por exemplo, um arquivo CAD é convertido em partículas que representam o limite a partir de uma triangulação da superfície do objeto, seguindo-se depois a aplicação de um algoritmo de enchimento.

As ferramentas de pós-processamento permitem o cálculo das grandezas de interesse tais como, vorticidade em planos diferentes, as forças exercidas sobre objetos, alturas de onda máximas ou traçar apenas as diferentes quantidades físicas das partículas (Crespo *et al.*, 2015). A Figura 3 apresenta o esquema de funcionamento do programa, com exemplos representativos dos ficheiros de entrada e de saída dos executáveis (Crespo *et al.*, 2016).



Figura 3. Esquema de funcionamento do DualSPHysics (adaptado de Crespo *et al.*, 2016).

3. Caso de Estudo: Prolongamento do Quebramar Norte do Porto de Leixões

Os objetivos estratégicos do Porto de Leixões correspondem a planear e desenvolver o espaço portuário de acordo com as perspetivas de crescimento de negócio, nomeadamente através da implantação de novos cais e terraplenos. No entanto, o crescimento do porto acarreta um conjunto de implicações tanto ao nível do controlo da agitação marítima no interior do porto, como nas condições de operacionalidade e segurança. Ou seja, a reformulação das estruturas de proteção, tais como os quebramares, torna-se indispensável para garantir as boas condições de funcionamento do porto. No caso de Leixões, a resolução deste problema passa por prolongar o quebramar norte. Dada a sua relevância e especificidades próprias, esta solução tem vindo a ser objeto de diversos estudos, parte deles realizados pelo Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IHRH-FEUP).

Veloso-Gomes *et al.* (2013) propuseram um conjunto de soluções para o prolongamento do quebramar norte de Leixões.

Estas soluções preliminares, em fase de pré--dimensionamento, deveriam posteriormente ser validadas e otimizadas através de estudos em modelo físico, a uma escala reduzida. Porém, ao longo dos anos, têm vindo a ser desenvolvidas alternativas complementares à modelação física, nomeadamente a modelação numérica. Esta última apresenta-se como uma solução relativamente rápida, barata e flexível, na medida em que permite alterar facilmente a geometria de uma estrutura ou as condições de agitação marítima a que é submetida. Além disso, permite analisar um conjunto extenso de parâmetros relacionados com a funcionalidade da estrutura e com a sua estabilidade, obtendo-se resultados como os caudais de galgamento, os coeficientes de reflexão, as forças exercidas na estrutura, entre outros.

Assim, recorreu-se ao modelo numérico DualSPHysics para a realização da modelação, bidimensional e tridimensional, de uma das soluções propostas para a secção corrente do prolongamento do quebramar norte do Porto de Leixões. Este caso, embora não possa ser validado, por não se dispor à data de dados experimentais para tal, é relevante para a ilustração das potencialidades do modelo numérico, dada a complexidade dos fenómenos envolvidos na interação entre a onda e a estrutura, tais como as reflexões, o espraiamento, os galgamentos e as forças na risberma.

3.1. Simulação numérica

3.1.1. Dados de entrada: perfil da secção corrente e caraterísticas da agitação marítima

As condições de agitação marítima a simular são descritas, principalmente, pela altura da onda, H, pelo período de onda, T e pela profundidade de água, d. Estes parâmetros da onda constituem o conjunto de fatores que influenciam a resposta hidráulica do quebramar, mais especificamente o espraiamento, os galgamentos, a transmissão das ondas e a reflexão de ondas.

Para além destes parâmetros, podem ser definidos um conjunto extenso de fatores relacionados com a geometria da secção transversal (inclinação dos taludes, cota de coroamento) e com os elementos do manto resistente (peso e tamanho dos blocos, espessura do manto resistente, posicionamento dos blocos no manto resistente, porosidade e permeabilidade do manto e das subcamadas), que também influenciam o modo de resposta da estrutura (Van der Meer, 1992).

Como o objetivo era modelar uma das hipóteses propostas por Veloso-Gomes *et al.* (2013) para o prolongamento do quebramar norte de Leixões e avaliar a sua resposta hidráulica, foi essencial definir, em primeiro lugar, as características da estrutura a avaliar e um conjunto de ondas (regulares) a testar (H e T).

Na Figura 4 encontra-se representada a solução final adotada, estando as suas características principais descritas no Quadro 1. Após estabelecidos os parâmetros geométricos da secção do quebramar a analisar, foram então definidas as condições de agitação marítima, nomeadamente a altura e o período de onda, e a profundidade de água.

Assim, para estudar a resposta da estrutura para diferentes condições de agitação marítima, foram realizadas um total de 18 simulações, considerando ondas regulares, com uma direção de propagação perpendicular ao alinhamento do quebramar. Os testes experimentais foram realizados para uma profundidade de água, *d*, de 24 m, considerando uma amplitude de maré de 4 m (situação crítica de preia – mar) e mantendo-se constantes as caraterísticas geométricas da secção do quebramar norte (Quadro 1).



Figura 4. Solução final, com inclinação do talude exterior de 1V:2H.

Quadro 1. Características da secção corrente do quebramar.

Características		
Fundos	Cotas a -18 m ZHL junto à futura cabeça do quebramar Batimétricas quase perpendiculares à diretriz do prolongamento	
Cota de fundação	-20 m ZHL	
Cota de coroamento	+12,5 m ZHL	
Cota da plataforma de circulação	+7,20 m ZHL	
Largura da plataforma	13,0 m	
Inclinação do talude anterior	1V:2H	
Inclinação do talude posterior	1V:1,5 H	
•	Blocos cúbicos ou blocos Antifer;	
Tipo e peso de blocos	Blocos de betão com densidade de 24 kN/m³, em 2 camadas (W > 750 kN)	
Porosidade do manto	P=55%	
resistente	Nr=0,108 blocos / m ²	
Dimensão característica dos blocos	<i>e_a</i> =3,51 m	
Altura de onda de projeto	<i>H_s</i> =12 m	

Foram consideradas 7 alturas de onda e 6 períodos de onda distintos, cuja combinação (H, T) deu origem às hipóteses apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Alturas e períodos de onda testados com o modelo DualSPHysics para o caso bidimensional.

Teste	H (m)	T (s)
1	5	12
2	6	12
3	6	13
4	6	15
5	6	18
6	6	20
7	7	16
8	8	12
9	8	13
10	8	15
11	8	20
12	10	12
13	10	13
14	10	15
15	10	20
16	12	12
18	16	15

Estas hipóteses resultaram do compromisso entre os valores de alturas e períodos de onda medidos na bóia ondógrafo de Leixões e o tipo de ondas que o modelo DualSPHysics é capaz de gerar atualmente – 1.ª e 2.ª ordem. Porém, nem todas as ondas escolhidas são bem descritas pela teoria de Stokes de 2.ª ordem. No entanto, é importante realçar que esta decisão foi consciente, tendo como objetivo final aferir o funcionamento do modelo para ondas de 3ª ordem, cnoidais e solitárias. Para além dessas 18 simulações 2D (secção transversal), foram realizadas 4 simulações para duas situações 3D. As condições de agitação simuladas foram as correspondentes aos testes 2 e 4 (Quadro 2), para dois casos 3D distintos:

- Manto resistente impermeável e liso (smooth);
- Manto resistente com uma porosidade de 55%.

3.1.2. Simplificações adotadas

Antes de se definir o domínio a simular e de se executar o modelo numérico é importante apresentar algumas das suas limitações, bem como hipóteses simplificativas adotadas.

O tempo de execução do modelo é muito sensível a três parâmetros: número de partículas a simular, características do *hardware* utilizado e tempo de simulação. Relativamente ao número de partículas, este é definido pela distância entre partículas, *dp*, sendo que, para um mesmo caso, quanto maior o parâmetro *dp*, menor é o número de partículas e, portanto, menor é a precisão dos resultados obtidos.

Normalmente, considera-se que o programa produz bons resultados caso se adote a seguinte relação dp = H/10. Porém, o número máximo de partículas que o programa pode simular está limitado pela memória do dispositivo utilizado.

A CPU (Unidade de Processamento Central) tem um espaço em memória grande, mas o cálculo por parte da CPU é bastante lento, aumentando o tempo de execução do caso de estudo.

A GPU (Unidade de Processamento Gráfico) é mais rápida, mas como o espaço em memória é limitado, a sua aplicação define o número máximo de partículas a usar. Por exemplo, a placa gráfica utilizada neste caso de estudo, uma *GTX Titan*, permite simular um número máximo de 15 a 20 milhões de partículas. No entanto, o tempo de execução dos cálculos, utilizando uma GPU, é muito menor. O problema é que nem todos os computadores estão equipados com este tipo de componentes.

Em suma, é possível simular um grande número de partículas, mas quanto maior este número, maior será o tempo de execução do modelo, o que retirará a sua utilidade prática para problemas de engenharia costeira e portuária. Portanto, é necessário encontrar um compromisso entre o número de partículas a simular, com o rigor necessário, e o tempo que o *hardware* demora a executar os cálculos (tempo de computação).

O tempo de simulação, *TimeMax*, deve ser definido com base no mesmo princípio que o parâmetro anterior: o valor não deve ser muito elevado, para garantir que o tempo de execução do modelo também não é muito elevado. Neste estudo, tempos de simulação da ordem dos 200 s e com um *TimeOut* (intervalo de tempo entre a saída de ficheiros) da ordem dos 0,1 s produziram resultados satisfatórios.

Por exemplo, um caso com cerca de 70 000 partículas, um *TimeMax* de 200s e um *TimeOut* de 0,1 s, leva a um tempo de execução próximo dos 45 minutos, pois é necessário gerar 2000 ficheiros diferentes. Caso se simulasse o mesmo caso durante 2000 s (\simeq 34 minutos, tempo de simulação comum em ensaios laboratoriais), o tempo de execução seria cerca de 10 vezes maior.

A distância entre o pistão (*i.e.*, a fronteira de geração) e a estrutura deverá ser no mínimo de 1 comprimento de onda e não deverá exceder, regra geral, 2 a 3 comprimentos de onda. Este critério garante que as ondas geradas chegam bem formadas à estrutura em estudo e, ao mesmo tempo, que o domínio não é excessivamente extenso.

O cálculo do comprimento de onda, *L*, e da celeridade, *c*, foi realizado tendo em conta a Teoria de Airy:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} tanh(\frac{2\pi d}{L})$$
[12]

$$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \tanh(\frac{2\pi d}{L})$$
[13]

em que *L* representa o comprimento de onda, *g* a aceleração da gravidade, *T* o período de onda e *d* a profundidade de água. Isto significa que para o caso das ondas de $3.^{a}$ ordem, cnoidais e solitárias foram desprezados os termos corretivos relativos aos efeitos não lineares.

No presente caso de estudo admitiu-se que a inclinação dos fundos era nula (i=0 m/m). Nas simulações 3D considerou--se um caso impermeável e outro caso em que se teve em conta a porosidade do manto resistente e se desprezou a das subcamadas do quebramar norte. Contudo, dependendo do propósito final da simulação, a influência destas camadas poder ser contabilizada como uma propriedade do SPH. Pelo contrário, no caso 2D, dada a extensão do domínio, não houve a preocupação de simular a interação entre as ondas e os blocos do manto resistente, tendo o talude da estrutura sido tratado como liso.

3.1.3. Definição das constantes

Depois de tecidas algumas considerações sobre o modelo DualSPHysics, é importante referir os valores adotados para uma das suas constantes mais relevantes: o *coefh*, que é um coeficiente utilizado no cálculo do *smoothing length* (Figura 5). A equação [14] refere-se ao cálculo de *h* para um caso tridimensional. Tipicamente, *coefh* assume um valor igual a 1. Contudo, caso se deseje simular melhor a propagação da onda, deve adotar-se para esta constante o valor de 1,2 ou 1,5.

$$h = coefh \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = coefh \sqrt{3} dp$$
 [14]



Figura 5. Esquema representativo do comprimento característico (bidimensional).

Assim, adotaram-se valores distintos de *coefh* no caso 2D e 3D, permanecendo iguais em todas as simulações de cada um desses casos. Nos casos 2D adotou-se o valor de 1,5 para o *coefh*, de forma a garantir uma boa propagação da onda.

O comprimento característico, h, aumenta com o *coefh* (h=0,64 m). Desta forma, ocorre um aumento da área de influência da função *Kernel*, havendo uma propagação do movimento mais uniforme. No caso 3D adotou-se por defeito o valor de 1,0.

3.1.4. Definição da geometria do caso de estudo

Tal como as constantes, os dados referentes à geometria do sistema (partículas contorno e partículas fluidas) também permaneceram inalteradas em todas as simulações executadas. Em primeiro lugar, gerou-se o domínio onde as partículas foram criadas definindo-se a distância entre partículas, *dp*. O número total de partículas do domínio é alterado quando se modifica o parâmetro *dp*. Seguidamente, através das funcionalidades *pointmin* e *pointmax* definem-se as dimensões do domínio onde as partículas podem ser criadas, Figura 6. É importante salientar dois aspetos:

- as partículas são criadas, apenas, dentro desse domínio. Uma vez criadas as partículas, as dimensões do domínio de simulação vão ser recalculadas, começando a partir das posições mínimas e máximas das partículas criadas;
- para se gerar uma configuração 2D, impõem-se os mesmos valores ao longo da direção y.



Figura 6. Representação das dimensões do domínio.

Da análise da Figura 6, é importante salientar os seguintes aspetos:

- O *dp* foi determinado com base na relação *H*/10, e uma vez que a menor altura de onda é igual a 5 m, adotou-se um valor ligeiramente menor (0.30), garantindo assim, um maior rigor dos resultados.
- Os pontos mínimos e máximos do domínio foram definidos com base nos seguintes fatores:
 - Altura total da estrutura, medida desde a fundação até à cota de coroamento – 32.5 m;
 - Distância mínima entre o pistão e a estrutura (1 comprimento de onda);
- Para se gerar uma configuração bidimensional, impôs-se o mesmo valor ao longo da direção y (y=0).

Seguidamente, criaram-se as partículas do contorno, nomeadamente:

- o pistão, utilizando o comando *drawbox*;
- as paredes do tanque, utilizando drawprism;
- a secção do prolongamento do quebramar de taludes, utilizando um ficheiro *AutoCad*.

Por fim, geraram-se as partículas de água com recurso ao comando *fillbox*. Após executado o *GenCase*, as geometrias criadas foram visualizadas no *Paraview* (Figura 7).



Figura 7. Geometria do caso de estudo (ParaView).

3.1.5. Definição do movimento do pistão e dos parâmetros

As variáveis de entrada *waveheight value* e *waveperiod value* para produção do movimento do pistão variaram de acordo com a simulação em curso.No presente caso de estudo, para a situação bidimensional, adotou-se um *TimeMax* de 200 s e um *TimeOut* de 0,1 s. Para o caso tridimensional, dada o aumento da quantidade de partículas no domínio, para que o programa fosse executado em tempo útil, optou-se por adotar um tempo de simulação, *TimeMax*, de 50 s (correspondente a, mais ou menos, 2 ondas por simulação) e um *TimeOut* de 0,1.

3.2. Resultados

Neste trabalho foram simulados 18 casos 2D e 4 casos 3D, ambos com ondas regulares, usando uma GPU GTX Titan, cujo espaço em memória é limitado, permitindo simular um número máximo de 15 a 20 milhões de partículas. Assim, nos casos 2D, o número de partículas inicial foi de 67 965. Para um tempo de simulação de 200 s (~ 3,33 min), o tempo de execução do DualSPHysics variou entre 35 e 50 min para os diferentes testes efetuados. Nos casos 3D, o número de partículas inicial foi de 8 209 972 no caso do talude liso e impermeável, e de 8 491 154 no caso em que se considerou um manto resistente constituído por blocos modificados Antifer. O tempo de simulação adotado, TimeMax, foi de 50 s (por exemplo, menos de 1 min) e o DualSPHysics demorou aproximadamente 5 dias a executar cada um dos casos. Portanto, pode concluir-se que, com uma GPU corrente, este modelo é sobretudo útil para a simulação 2D de pequenos domínios, pois a um domínio com 10 vezes mais partículas, corresponde um tempo de execução 100 vezes maior.

Posteriormente, através da utilização do código *measuretool*, foram calculadas várias quantidades físicas, nomeadamente a velocidade das partículas fluidas e a elevação da superfície livre. Esta última variável foi medida tal como num modelo físico, através de sondas distribuídas por todo o domínio, tendo os resultados sido utilizados na análise de alguns fenómenos de interação onda – estrutura, como é o caso do espraiamento e da reflexão das ondas.

Para a avaliação do espraiamento foram colocadas sondas de 2 em 2 m ao longo do talude de barlamar do quebramar e para avaliação das reflexões foram colocadas sondas de 5 em 5 m, iniciando-se a sua colocação a 20 m de distância do pistão e terminando a 20 m do pé do talude da estrutura.

Através do *Measurebox* foi possível contabilizar o número de partículas fluidas que galgaram a estrutura em cada uma das simulações. Desta forma, reuniram-se todos os dados possíveis para se poder analisar a influência dos parâmetros característicos da onda nos fenómenos de interação ondaestrutura e comparar os valores obtidos através do modelo com alguns dos resultados apresentados na literatura.

3.2.1. Espraiamento

Em primeiro lugar, antes de qualquer análise, é importante realçar que a correta análise do espraiamento, R_u , implica a existência de um talude indefinido.

Porém, no caso de um quebramar, o talude é interrompido ao atingir o coroamento da estrutura, o que significa que para cotas de espraiamento superiores à cota de coroamento da estrutura, esta é galgada e a onda não chega a atingir o máximo espraiamento (Figura 8). Portanto, para uma correta análise dos resultados obtidos, é importante estar ciente de que a cota da superfície livre da água registada na sonda colocada no extremo direito do talude, não corresponde ao valor do espraiamento, mas sim à cota máxima atingida pela onda, que deve ser analisada em relação ao nível médio da água.



Figura 8. Espraiamento (superior) versus cota máxima atingida pela superfície da água (inferior).

Assim, tendo em conta a definição de espraiamento acima exposta e a comparação efetuada entre o valor da máxima variação da superfície livre em relação ao nível médio da água, para as três primeiras ondas de cada uma das simulações, considerando o talude impermeável e liso, e os espraiamentos relativos, em função do número de Iribarren, obtidos no modelo numérico e os valores teóricos, obtidos através das equações propostas por Losada e Giménez-Curto (1980), é possível concluir que:

- Para a mesma altura de onda, o número de Iribarren é tanto maior, quanto maior o período de onda. Desta forma, o espraiamento é tanto maior, quanto maior o número de Iribarren, ξ;
- Os valores obtidos para o espraiamento relativo através do modelo são sempre menores que os valores teóricos correspondentes. Esta diferença deriva do facto dos valores teóricos serem obtidos para taludes indefinidos. Caso as ondas tivessem uma altura menor, a cota de espraiamento seria inferior à cota do coroamento, e a correspondência entre os valores do modelo numérico e os teóricos seria melhor;
- Os casos tridimensionais apresentam valores idênticos aos correspondentes casos bidimensionais.

- · Como era expectável, o valor do espraiamento relativo para o caso do talude liso e impermeável ($R_u/H = 1,99$) é idêntico ao valor para o caso bidimensional (R_u/H) = 1,96), também considerado como liso.
- O espraiamento para o caso em que o manto resistente tem P=55% é, logicamente, menor, porque a energia da onda passa a ser dissipada, também, por percolação no interior do manto. Comparativamente ao valor teórico, este assume valores maiores.

3.2.2. Coeficiente de reflexão

Os coeficientes de reflexão podem ser estimados através de uma simples relação entre a altura de onda refletida e a altura de onda incidente. Assim, na Figura 9, apresentam-se os coeficientes de reflexão obtidos com base nos resultados do modelo, em comparação com os resultados obtidos por três fórmulas empíricas, de três autores distintos, em função do número de Iribarren. Nesta análise é importante ter em atenção que a expressão de van der Meer assume uma P=0,4 para quebramares de taludes com um manto resistente e subcamadas.

Da comparação entre os diversos resultados obtidos, é possível retirar as seguintes conclusões:

- A reflexão intensifica-se com o aumento da altura de onda e do período de onda;
- A formulação de Battjes (1974) é a que claramente apresenta os maiores valores para os coeficientes de reflexão;
- Apesar da aparente irregularidade dos valores obtidos através do modelo numérico, os valores apresentados encontram-se no intervalo comum para estruturas de taludes com blocos artificiais, ou seja, entre os 20% e os 40%. Além disso, estes valores estão relativamente próximos das soluções apresentadas por van der Meer (1992) e de Seelig & Ahrens (1995).

Isto significa, que o DualSPHysics pode ser uma ferramenta útil e eficaz na identificação e caracterização dos fenómenos de reflexão.

3.2.3. Galgamento

A análise dos galgamentos é de extrema importância na avaliação do desempenho - estrutural de um quebramar. Este fenómeno é influenciado pelos parâmetros da onda e pela geometria da estrutura, nomeadamente a sua cota de coroamento.

Existem diversos métodos para a medição dos volumes de galgamento e para o cálculo dos caudais de galgamento. Normalmente, nos estudos em modelo físico, são colocados recipientes sobre a plataforma da superestrutura, que retém o volume de água que galga a estrutura.

No final do ensaio, a medição desse volume de água permite calcular o caudal médio de galgamento. Porém, mais recentemente, têm surgido outras técnicas para a medição dos volumes de galgamento produzidos por cada onda, individualmente, nomeadamente, a utilização de células de pesagem de alta precisão, instaladas no reservatório colocado a sotamar do coroamento da estrutura, que pesam, de forma contínua, o volume acumulado de água que galgou a estrutura.

No presente caso, os galgamentos foram calculados através da ferramenta MeasureBox, cujos outputs correspondem ao número de partículas que passam para o interior de uma caixa virtual, a cada instante. Para se obter o caudal é necessário aplicar os seguintes métodos:

Caso bidimensional – Q (m³/s/m)

$$Q = \frac{n^{2} de partículas \times dp \times dp}{At}$$
[14]

Caso tridimensional - Q (m3/s)

Λt

$$Q = \frac{n^{\circ} de \ partículas \times dp \times dp \times dp}{\Delta t}$$
[15]

Muitas vezes o problema reside em definir o Δt a utilizar. Assim, no presente caso, optou-se por realizar uma análise onda a onda, prática comum nos principais laboratórios europeus. Isto significa que $\Delta t = T$. No final, o caudal a utilizar corresponde a uma média dos caudais calculados para as *n* ondas estudadas.

No caso de estudo apenas foram contabilizadas a segunda e a terceira ondas no cálculo do caudal de galgamento, pois só a partir da segunda onda (inclusive) se obtém ondas com características idênticas às pretendidas.

Porém, como se pretendia fazer uma análise meramente qualitativa, considerou-se suficiente a validação dos resultados obtidos com as estimativas obtidas com outros métodos numéricos, ou em testes em modelo físico reduzido.

Assim, recorreu-se à ferramenta NN_OVERTOPPING2, desenvolvida pela Delft Hydraulics, no âmbito do projeto europeu CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures).



Figura 9. Comparação entre os coeficientes de reflexão obtidos através do programa e de valores teóricos.

Esta ferramenta é um modelo computacional, baseado nas redes neuronais, para a previsão do caudal médio de galgamento por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, *q*, e de outros parâmetros estatísticos, indicativos da incerteza associada à previsão (Bravo, 2012; Reis *et al.*, 2014). Nas Figuras 10 (casos 2D) e 11 (casos 3D) são comparados os caudais médios de galgamento obtidos com o DualSPHysics e com a ferramenta NN_OVERTOPPING2, sendo possível concluir o seguinte:

- Os maiores caudais médios de galgamento ocorrem para as maiores alturas de onda, tanto para o modelo de SPH como para a ferramenta NN_OVERTOPPING2;
- Para alturas de onda menores (5 e 6 m) os resultados do DualSPHysics são mais próximos dos da ferramenta NN_OVERTOPPING2 e inferiores a 1 m³/s/m;
- Para uma mesma altura de onda (H=8m), quanto maior o período, maior o caudal de galgamento;
- Os valores excessivos do caudal de galgamento obtidos com o *DualSPHysics* e a sua grande variabilidade, de onda para onda, podem ser o resultado de:
 - a) Valor adotado para a constante *coefl*. A adoção do valor 1,5 conduz a uma melhor propagação da onda, mas também cria uma maior distância entre as partículas contorno e as partículas de fluido, que resulta numa notória falta de rigor na interação onda estrutura. Por outro lado, os eventos de galgamento passam a ocorrer esporadicamente, mas quando ocorrem os valores obtidos são mais elevados;
 - b) A consideração do manto resistente como sendo impermeável e liso, hipótese simplificativa adotada para o caso 2D, tem repercussões ao nível dos galgamentos;
 - c) Para ondas de maior período, os coeficientes de reflexão são maiores e os fenómenos de reflexão e re-reflexão também são superiores, sendo muitas vezes responsáveis por acréscimos na altura da onda incidente;
 - d) O programa não está preparado para gerar ondas do tipo cnoidal e ondas de 3ª ordem, logo é natural que os resultados para este tipo de ondas não sejam tão satisfatórios.
- Relativamente aos caudais para as simulações 3D, tal como nos casos 2D, os valores obtidos com o modelo DualSPHysics são superiores aos obtidos através da outra ferramenta numérica, caso se considere o talude impermeável e liso.



Figura 10. Caudal médio de galgamento: modelo numérico SPH versus NN_OVERTOPPING2 (casos bidimensionais).



Figura 11. Caudal médio de galgamento: modelo numérico SPH versus NN_OVERTOPPING2 (casos tridimensionais).

3.2.4. Forças

O modelo numérico *DualSPHysics* permite ainda a avaliação das forças exercidas, por exemplo, em muros-cortina ou em risbermas. No presente caso de estudo, foram avaliadas as forças exercidas na risberma do quebramar, o que permitiu concluir que:

- As ondas de menor período exercem forças mais uniformes. Pelo contrário, uma onda de período igual a 20 s apresenta uma certa irregularidade na forma como solicita a risberma, que pode ser justificada pelo tipo de rebentação que ocorre na interação "onda – estrutura.
- Existe uma certa concordância entre a variação da elevação da superfície livre da água e a força que se faz sentir na risberma.

4. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Através deste estudo concluiu-se que o *DualSPHysics* é uma ferramenta numérica muito intuitiva, mas a sua capacidade de aplicação a casos reais da engenharia está dependente da memória e capacidade de cálculo do dispositivo usado para a execução dos programas (os computadores correntemente utilizados não estão preparados para executar o modelo em tempo útil), do tempo de simulação adotado e do número de partículas a considerar na simulação.

Assim, é necessário encontrar um equilíbrio entre estes 3 parâmetros, de modo a reduzir o tempo de execução, reduzir o custo computacional e garantir que a aplicação do modelo a casos reais é viável. Pelo que foi exposto, o *DualSPHysics* é, fundamentalmente, adequado para pequenos domínios e para curtos períodos de simulação, sendo difícil a sua aplicação a domínios 3D muito extensos, como é o caso da cabeça de um quebramar, que exige um grande número de partículas.

Em trabalhos futuros será conveniente utilizar a ferramenta AWAS (sistema de absorção ativo), para absorção ativa das reflexões por parte do pistão. Esta constitui uma forma de reduzir drasticamente os problemas associados à ocorrência de re-reflexões e aumentar o tempo útil de análise.

Referências

Altomare, C., Crespo, A., Rogers, B., Domínguez, J., Gironella, X. e Gómez-Gesteira, M. (2014). Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics. Computers & Structures. 130: 34-45.

- BATTJES, J.A. (1974). Surf Similarity. *Coastal Engineering Proceedings*, n. 14, ISSN 2156-1028. doi:10.9753/icce.v14.%p.
- Bravo, A. (2012). Comparação de duas ferramentas de cálculo do galgamento baseadas na análise de redes neuronais. Dissertação de Mestrado Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Crespo, A., Domínguez, J., Gómez-Gesteira, M. Barreiro, A., Rogers, B., Longshaw, S. e Canelas, R. (2016). *User Guide for DualSPHysics code. SPHysics project*, v4. 0 edition.
- Crespo, A., Rogers, B., Gómez-Gesteira, Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., M., Barreiro, A. e García-Feal.
 O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).
 Computer Physics Communications. 187: 204-216.
- Didier, E. e Neves, M. (2010). Modelação da Interacção entre uma Onda e uma Estrutura de Protecção Costeira usando um Modelo Numérico SPH - Smoothed Particles Hydrodynamics. Revista da Gestão Costeira Integrada. 10:4. 435-455.
- Domínguez, J. (2014). *DualSPHysics: Towards High Performance Computing using SPH technique*. Tese de doutoramento. Universidade de Vigo.
- Gincold, R. e Monaghan J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly notices of the royal astronomical society. 181:3. 375-389.
- Liu, G. (2003). Mesh Free Methods: Moving beyond the Finite Element Method. 2003:16. 937-938. ISBN 9781420082098. CRC Press.
- Losada, M. e Giménez-Curto, L. (1980). Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. Coastal Engineering. 4: 187-206.

- 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. 110:2. 399-406.
- Monaghan, J. J. (2005). *Smoothed particle hydrodynamics*. Reports on progress in physics. 68:8. 1703.
- Reis, M., Santos, J., Capitão, R., Neves, D. e Fortes, C. J. (2014). Avaliação da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis no posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto de Sines. Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança. Nº 21. ISSN: 1647-7723.
- Seelig. P. e Ahrens, J. (1995). Wave reflection and energy dissipation by coastal structures. Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures (Kobayashi and Demirbiliek, eds.) ASCE, 28-51.
- Van der Meer, J. (1992). Conceptual design of rubble mound breakwaters. Hydraulic Engineering Reports. Design and Reliability of Coastal Structures, short course during the 23rd ICCE in Venice.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Avilez-Valente, P., Rosa-SANTOS, P. e Lopes, H. (2013.) Projeto de criação de um novo terminal para contentores no porto de Leixões [Relatório]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Violeau, D. (2012). Fluid Mechanics and the SPH method: theory and applications. Oxford University Press. ISBN: 9780199655526.