



SIMULAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BLOCOS ANTIFER NUM QUEBRAMAR DE TALUDES UTILIZANDO O CÓDIGO DUALSPHYSICS JUNTAMENTE COM O PROJECT CHRONO

Beatriz Queirós ⁽¹⁾⁽²⁾; Francisco Taveira-Pinto ⁽¹⁾⁽²⁾; Paulo Rosa-Santos ⁽¹⁾⁽²⁾; Alejandro Crespo ⁽³⁾

(1) FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, (2) CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental - Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal, (3) EphysLab, Universidade de Vigo, Ourense, Spain.
up201107922@edu.fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt, pjrsantos@fe.up.pt, alexbex@uvigo.es

Resumo

A evolução tecnológica e comercial dos portos marítimos, em particular em relação às estruturas de defesa, tem vindo a ser acompanhada pelo desenvolvimento das soluções construtivas adotadas e de aspetos relacionados com o seu dimensionamento, com o objetivo de atingir um melhor desempenho hidráulico – estrutural, uma maior estabilidade e um maior grau de proteção das zonas abrigadas. Tradicionalmente, a avaliação do comportamento hidráulico-estrutural de quebramares 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. O presente artigo visa contribuir para a validação da capacidade do código DualSPHysics simular as interações fluido-estrutura e entre diferentes corpos (e.g., blocos Antifer), através do *coupling* com outros modelos, tais como o Project Chrono. Para tal, foi feita a reprodução, experimental e numérica, da propagação e interação de ondas regulares com um talude onde foi colocada uma linha de blocos Antifer na sua zona ativa. Os resultados numéricos mostram que a elevação da superfície livre da água é bem simulada pelo modelo DualSPHysics, que está atualmente a ser usado para reproduzir os deslocamentos dos blocos Antifer observados nos testes experimentais já realizados.

Introdução

Os quebramares são as estruturas mais utilizadas para a proteção e criação de áreas protegidas da agitação marítima, em zonas portuárias. Estes funcionam como um obstáculo à propagação natural das ondas, criando espaços abrigados onde é possível realizar, de forma segura, as operações de acostagem, carga e descarga de bens e pessoas. Podem também servir de suporte para tecnologias de aproveitamento da energia das ondas, melhorando, desta forma, a sustentabilidade dos portos e das suas infraestruturas. A constante evolução, tecnológica e comercial, dos portos marítimos, em particular em relação às estruturas de defesa, tem vindo a ser acompanhada pelo desenvolvimento das soluções construtivas adotadas e de aspetos relacionados com o seu dimensionamento sendo o seu objetivo final um melhor desempenho hidráulico – estrutural, uma maior estabilidade e um maior grau de proteção das zonas abrigadas.

Os quebramares de taludes, são estruturas relativamente eficazes na dissipação da energia da agitação marítima incidente, mas estão frequentemente sujeitas a ações marítimas de grande magnitude e variabilidade, o que torna o processo de dimensionamento bastante complexo e desafiante, devido à complexidade dos fenómenos físicos envolvidos. O pré-dimensionamento é, muitas vezes, realizado de um modo semi – empírico, baseado em expressões deduzidas a partir de considerações teóricas simplificadas, com base em resultados de modelos físicos ou de modelos numéricos, e na experiência. Tradicionalmente, a avaliação do comportamento hidráulico – estrutural de um quebramar de taludes é efetuada com recurso a modelos físicos, pois estes permitem analisar fenómenos complexos de interação onda – estrutura, de uma forma tri – dimensional.

Contudo, nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos meios computacionais, tem havido uma evolução notável na aplicação de modelos numéricos avançados no estudo de fenómenos hidrodinâmicos complexos no domínio da engenharia costeira e portuária. Estes modelos, com apenas ligeiras simplificações na descrição dos fenómenos físicos mais relevantes, permitem a



simulação de problemas complexos, constituindo uma alternativa flexível e complementar aos modelos físicos, possibilitando a análise de uma extensa variedade de condições do ambiente marítimo, bem como a fácil alteração das características geométricas da estrutura.

Alguns métodos numéricos sem malha, como o *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), têm ganho alguma popularidade, sendo que alguns códigos, como o DualSPHysics, têm provado ser bastante úteis na reprodução de problemas que são não-lineares, com geometrias arbitrariamente complexas e em situações em que não é possível a aplicação de métodos com malha. No campo da engenharia costeira e portuária, o código DualSPHysics tem demonstrado ser uma ferramenta computacional robusta para a simulação de escoamentos com superfície-livre, interação entre sólidos, modelação de dano em quebra-mares, e interação entre fluido-estrutura (Domínguez *et al.*, 2021, Zhang *et al.*, 2018, Altomare *et al.*, 2014, Barreiro *et al.*, 2013). Para aumentar a fiabilidade e confiança no modelo é essencial, a par do seu desenvolvimento, validar os seus resultados recorrendo a dados experimentais confiáveis.

Assim, com o propósito de estudar a interação da agitação marítima incidente com a estrutura de um quebra-mar de taludes e, simultaneamente, avaliar as potencialidades de um modelo numérico CFD (*Computational Fluid Dynamics*) na aplicação a casos reais da engenharia costeira, como ferramenta complementar ou alternativa aos modelos físicos, o presente artigo apresenta a reprodução, numérica e experimental, da propagação e interação de ondas regulares com taludes, lisos e rugosos, sobre os quais se colocou uma única linha de blocos Antifers na zona ativa. Desta forma, é possível validar, utilizando resultados experimentais, a capacidade do DualSPHysics para simular, com rigor, as interações fluido-estrutura e entre diferentes corpos (*e.g.*, blocos Antifers), através do *coupling* com outros modelos, tais como o Project Chrono.

Modelação numérica com recurso ao DualSPHysics

A modelação de sistemas naturais consiste na procura de soluções analíticas para as equações que definem o sistema (ou modelo matemático). 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 da forma analítica. Desta forma, 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, mais concretamente dos quebra-mares, tradicionalmente, o seu dimensionamento baseia-se 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 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 fluidos, denominado *dinâmica dos fluidos computacional* (CFD), que estuda o comportamento dos fluidos utilizando modelação numérica. Esta relevância decorre da capacidade de atualmente os computadores executarem milhares de milhões de operações matemáticas por segundo. Isto permite a simulação de sistemas muito complexos e cenários realistas em pouco tempo, utilizando 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. 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 em redor e a interação com a estrutura, permite também saber, com base nos resultados, outros parâmetros relacionados com a funcionalidade da estrutura (galgamentos, reflexões) ou com a sua estabilidade (ações sobre o manto resistente, problemas de erosão).

Contudo, apesar da precisão dos modelos numéricos, estes não podem substituir a construção de modelos reduzidos, principalmente no caso das estruturas costeiras, em que a verificação dos resultados se faz com base em modelos físicos. No entanto, os modelos numéricos podem levar a uma importante poupança ao reduzirem significativamente o número de testes experimentais executados, pois estes são habitualmente dispendiosos, requerem tempo, boas infraestruturas, experiência e conhecimento específico por parte de quem realiza e analisa os resultados (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 anteriormente, ao caso concreto da interação entre a agitação marítima e uma estrutura (Didier e Neves, 2010), para o qual, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos modelos numéricos, com diferentes graus de complexidade.

Esses modelos numéricos, que incluem a modelação da superfície livre, permitem descrever, de uma forma rigorosa, os processos físicos e prever as características fundamentais do escoamento. Por conseguinte, para a descrição do movimento do fluido, 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 fluido. Assim, seguindo o movimento das partículas durante um determinado tempo, obtém-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, baseado em malhas, é ideal para sistemas onde o domínio está perfeitamente definido e para simulações onde as fronteiras permanecem fixas. Contudo, a criação de uma malha pode não ser muito eficiente se o sistema for complexo. Assim sendo, 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, uma vez que podem ser aplicados a problemas que são 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 agora disponíveis, o *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) é, possivelmente, o mais popular e tem vindo a atingir o nível exigido de estabilidade e maturidade para ser utilizado como ferramenta de apoio à engenharia (Altomare *et al.*, 2014). Este é um método Lagrangiano sem malha, originalmente desenvolvido por astrofísicos durante os anos setenta (Gingold e Monaghan, 1977) e que tem vindo a demonstrar ser uma ferramenta numérica bastante versátil, podendo ser aplicado em áreas desde a mecânica dos sólidos à dinâmica dos fluidos. O desenvolvimento significativo desta ferramenta resulta das contribuições teóricas contínuas (Monaghan, 1992, Violeau, 2012, Monaghan, 2005, Gomez-Gesteira *et al.*, 2010, Liu e Liu, 2003), aliadas a melhorias computacionais. Atualmente é largamente utilizado para uma extensa gama de aplicações no campo do CFD (Crespo *et al.*, 2015). Dentro da área da dinâmica dos fluidos, o SPH é um modelo particularmente adequado para descrever uma variedade de escoamentos em superfície livre e para modelar os fenómenos complexos de deformação da 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).

Alguns códigos SPH têm-se tornado uma parte integrante do potencial de modelação numérica de laboratórios de investigação e desenvolvimento industrial e instituições académicas (Violeau e Rogers (2016)). Apesar do sucesso do SPH na resolução de uma grande variedade de problemas, este método é considerado ainda em desenvolvimento em comparação com outros esquemas Eulerianos clássicos com malha e apresenta, por isso, ainda algumas limitações. Algumas dessas limitações incluem: a falta de uma teoria consistente em relação à fundamentação matemática do método, e consequentemente falta de provas completas de convergência e estabilidade; a dificuldade em definir as condições fronteira, dada a natureza “*meshless*” do método; a padronização das técnicas; o elevado custo computacional, podendo dificultar a resolução de problemas reais.

A capacidade de realizar cálculos envolvendo milhões de partículas num tempo razoável é essencial para realizar simulações que tenham relevância para a indústria. Este problema pode ser parcialmente resolvido através da utilização de técnicas de aceleração de hardware, nomeadamente a utilização de unidades de placas gráficas (GPU) (Dominguez *et al.*, 2021). O código open-source DualSPHysics, projeto colaborativo entre a Universidade de Vigo, a University of Manchester, a Universidade de Lisboa, a Università de Parma, o Flanders Hydraulics Research, a Universitat Politècnica de Catalunya, e o NewJersey Institute of Technology, tem vindo a ser desenvolvido precisamente com o propósito de explorar o poder computacional das GPUs modernas e permitir a simulação de problemas reais da engenharia utilizando um computador standard. O nome deriva do facto de ser capaz de correr tanto em unidades de processamento central (CPU), utilizando a abordagem de memória partilhada OpenMP, como em GPUs.

Método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*)

O *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) é um modelo bi e tri – dimensional, baseado num método Lagrangiano, que não requer uma malha. Nesta técnica, o fluido contínuo é discretizado num conjunto de partículas, e quando se utiliza este modelo em simulações da dinâmica de fluidos, as equações discretas de Navier – Stokes são localmente integradas para cada uma das 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 posição, velocidade, densidade e pressão, são calculadas como uma interpolação dos valores das 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 das partículas vizinhas de uma partícula se altera a cada instante, pois as partículas vizinhas são aquelas que se encontram dentro de uma determinada área de influência da partícula em movimento (Crespo *et al.*, 2015). 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 1. 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).

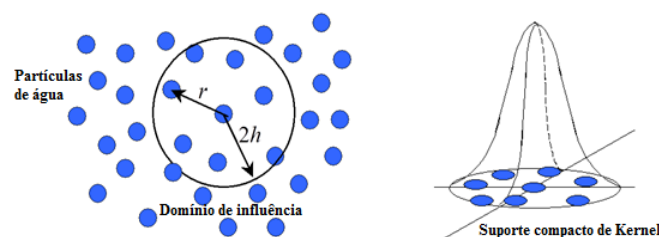


Figura 1. Domínio de influência do *Kernel* (esquerda) e partículas que contribuem para a interpolação e suporte compacto do *Kernel* (direita).



As leis de conservação da dinâmica dos fluidos são 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:

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

em que W representa a função de interpolação *Kernel* e pode assumir diversas formas, sendo que o *Kernel quintic Wendland*, com um suporte compacto de raio $2h$, é aplicado neste estudo. O comprimento característico (h) é definido como função da distância inicial entre partículas, d_p , utilizada para criar a condição inicial. 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 incluídas na região de suporte compacto, definido como *smoothing length* (h) (Crespo *et al.*, 2015),

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

em que Δv_b representa o volume de uma partícula vizinha (b). Se $\Delta v_b = m_b/\rho_b$, com m e ρ sendo a massa e a massa volúmica da partícula (b), respetivamente, então fica:

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

Equações da dinâmica dos fluidos no formalismo SPH

Sendo a a partícula onde as quantidades físicas vão ser calculadas e b as partículas vizinhas, o sistema de equações de Navier-Stokes (momentum e equações da continuidade) podem ser escritas, na sua forma discreta e aplicando a formulação SPH, como:

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{p_b + p_a}{\rho_b \cdot \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad [4]$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} + D \quad [5]$$

$$D = 2\delta hc \sum_b (\rho_b - \rho_a) \frac{r_{ab} \nabla_a W_{ab}}{r_{ab}^2} \frac{m_b}{\rho_b} \quad [6]$$

em que W_{ab} é a função *Kernel*, t é o tempo, r é a posição, v é a velocidade, p é a pressão, ρ é a massa volúmica, m é a massa, c é a velocidade do som numérica e g é a aceleração da gravidade. A viscosidade artificial (Π_{ab}) proposta por Monaghan (1992) vai ser utilizada no presente estudo. Também o *Density Diffusion Term* (DDT) proposto por Fourtakas *et al.* (2019), vai ser aplicado nas simulações a executar, considerando $\delta = 0.1$.

No código DualSPHysics, o fluido é tratado como fracamente compressível, como é o caso da água, sendo que a massa de cada partícula permanece constante e apenas a sua densidade sofre oscilações. Assim sendo, uma equação de estado é utilizada para calcular a pressão do fluido como função da massa volúmica, em vez de resolver a uma equação de pressão de *Poisson*, onde o fluido é considerado incompressível. Na realidade, por razões de ordem



numérica, utiliza-se no modelo a técnica de compressibilidade artificial, isto é, a compressibilidade é ajustada de maneira que a velocidade do som possa ser artificialmente reduzida. Este ajuste é efetuado com o intuito de manter c_0 com um valor suficientemente baixo para permitir que o modelo corra com um time step razoável. Contudo, o valor da velocidade do som deve também manter-se 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. Portanto, é necessário garantir que c_0 seja pelo menos dez vezes superior à velocidade máxima do fluido.

Assim, o sistema de equações apresentado anteriormente, é fechado pela equação de estado de Tait's:

$$P = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad [7]$$

em que $\gamma = 7$ e ρ_0 corresponde à massa volúmica de referência.

Conhecendo o campo de pressões e as interações entre as partículas, é possível determinar o movimento das partículas, calculando as velocidades e as posições das mesmas ao longo do tempo. Na implementação numérica do modelo, a integração das equações da quantidade de movimento (v_a), massa volúmica (ρ_a) e posição (r_a), no tempo pode ser feita recorrendo a um algoritmo denominado Symplectic (Leimkuhler e Patrick, 1996). Este último algoritmo é quase de segunda ordem e utiliza um passo preditor – corretor (Didier *et al.*, 2011, Crespo *et al.*, 2015).

Condições fronteira

A implementação das condições fronteira não surge de forma natural no método SPH. Existem diversas técnicas descritas na literatura, tais como: partículas fantasma, condições de fronteira dinâmica, funções repulsivas, entre outras. A condição de contorno dinâmico (*Dynamic Boundary Condition*, DBC) (Crespo *et al.*, 2007) foi inicialmente implementada no DualSPHysics. Neste método, objetos sólidos, tais como o canal de ondas, o batedor, objetos flutuantes, etc., são discretizados por um conjunto de partículas fronteira que satisfazem as mesmas equações que as partículas fluidas, mas que não se movimentam de acordo com as forças nelas exercidas. 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 que está a ser exercida sobre a partícula fluida, devido ao termo da pressão na equação da quantidade de movimento (Zhang *et al.*, 2018, Silva, 2019). Devido à sua capacidade para discretizar geometrias complexas tri-dimensionais num conjunto de partículas fronteira, a DBC foi aplicada com sucesso em alguns problemas de engenharia costeira, como apresentado no estudo do espraiamento num quebramar de blocos artificiais (Altomare *et al.*, 2014, Zhang *et al.*, 2018). Contudo, esta técnica apresenta algumas limitações, tal como uma dissipação excessiva que resulta em a formação de intervalos não físicos entre a fronteira e as partículas fluidas. Para diminuir esses espaçamentos e aumentar a precisão da pressão medida nas partículas da fronteira, é aplicada a condição de fronteira dinâmica modificada (modified - *Dynamic Boundary Conditions*, mDBC). As partículas fronteiras utilizadas na mDBC são dispostas da mesma forma que na original DBC, mas a fronteira de interface localiza-se a uma dada distância da camada mais interior de partículas (definida como $dp/2$ para geometrias simples). A fronteira de interface é representada pela linha sólida preta apresentada na Figura 2. Para cada partícula fronteira, um nó fantasma (cruz vermelha na Figura 2) é criado no domínio fluido. Este nó fantasma é projetado de acordo com um vetor normal da fronteira que aponta para o domínio fluido (setas na Figura 2). Para a parte plana da fronteira, o nó fantasma é espelhado através da fronteira de interface segundo a direção normal, apontando em direção ao fluido. Para partículas fronteiras localizadas nos cantos, a normal é definida como a direção entre a partícula fronteira e o canto, de maneira que o nó fantasma seja espelhado no domínio fluido através do ponto desse canto. As propriedades do fluido são calculadas nesses nós fantasma, através de uma aproximação SPH proposta por Liu e Liu (2006) e, por fim, essas

propriedades são espelhadas, de novo, para as partículas fronteira. Mais detalhes sobre esta condição fronteira podem ser encontrados em English *et al.* (2021).

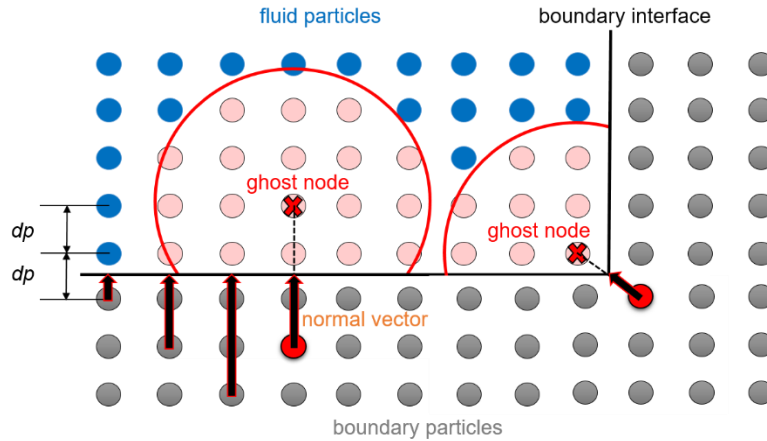


Figura 2. Projeção dos nós fantasmas no domínio fluido, de acordo com o vetor normal, para superfícies lisas e cantos.

Corpos rígidos, tais como os blocos Antifer, são discretizados como um conjunto de partículas onde a técnica mDBC é aplicada e o seu movimento pode ser obtido através da resolução das equações básicas da dinâmica dos corpos rígidos, onde a força resultante de cada partícula flutuante é calculada primeiro como a soma da contribuição de todas as partículas fluidas circundantes (Canelas *et al.*, 2018).

Geração de ondas e sistema ativo de absorção (AWAS)

No DualSPHysics, as ondas são geradas através da imposição de movimento a uma fronteira sólida com o propósito de reproduzir o movimento de um batedor, do tipo pistão, normalmente utilizado em instalações experimentais. As teorias de geração de primeira e de segunda ordem estão implementadas no código, sendo que para a geração de ondas regulares, a altura de onda, o período de onda e a profundidade de água são os parâmetros chave.

Para poder validar um modelo SPH é indispensável utilizar condições fronteira similares às que foram aplicadas nos testes experimentais. Assim sendo, a técnica de absorção ativa de ondas (AWAS), utilizada nas instalações experimentais para reduzir efeitos de re-reflexão indesejados, ao absorver as ondas que são refletidas no batedor do tipo pistão, pode também ser simulada no código (Altomare *et al.*, 2017).

Coupling com o Project Chrono

O Project Chrono é um *software open-source*, escrito maioritariamente em C++, e que é utilizado para simular a dinâmica de grandes sistemas de corpos articulados, interações fluido-sólido, a dinâmica de deformação de corpos, assim como diversas interações sólido-sólido. O acoplamento entre os dois softwares permite um resultado final que tem em atenção não só às interações entre partículas fluidas e sólidas, como também às interações entre partículas sólidas.

O procedimento do DualSPHysics divide-se em três etapas, executadas a cada *time step*, dt : em primeiro lugar as partículas vizinhas são listadas, seguido da resolução das forças exercidas nas partículas sólidas pelo fluido, e, por último, as variáveis do sistema são atualizadas. Durante a etapa em que decorre a interação entre partículas, o DualSPHysics executa um processamento das forças exercidas no objeto flutuante, seguido do cálculo das acelerações linear e angular, aplicadas no centro de massa do objeto. Essa informação é transferida para a biblioteca do Project Chrono e, durante esse *time step*, é calculado o movimento do objeto (posição final e

velocidades), de acordo com as restrições mecânicas impostas inicialmente, assim como a nova posição do centro de gravidade. Finalmente, são transferidos os dados para o DualSPHysics e os valores das velocidades, linear e angular, são atualizados, de acordo com a informação recebida do Projeto Chrono (Canelas *et al.*, 2018).

Caso de estudo e modelação física

Os ensaios em modelo físico foram realizados num canal construído no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA), do Departamento de Engenharia Civil da FEUP. Este canal tem um comprimento total de 12.0 m, com uma largura útil de 0.80 m e uma altura de 1.20 m. Está equipado com um batedor do tipo pistão, dispondo de um sistema de absorção ativa de ondas refletidas (AWASYS – Active Wave Absorption System). O modelo ensaiado, construído à escala geométrica de 1/40, é constituído por um talude (placa de acrílico com duas camadas de tinta para conferir a rugosidade pretendida), com um declive de 1:2, e uma única linha de 14 blocos Antifer, espaçados de, aproximadamente, 1 mm entre si. Os blocos foram instalados na zona ativa do talude, a uma distância, medida na vertical, de aproximadamente 0.45 m em relação ao fundo do canal. O pé do talude situa-se a 9.95 m a sotamar da posição média do batedor, sobre um fundo horizontal. As dimensões da secção transversal do modelo encontram-se definidas na Figura 3. A profundidade de água foi fixada, aproximadamente, em 0.50 m.

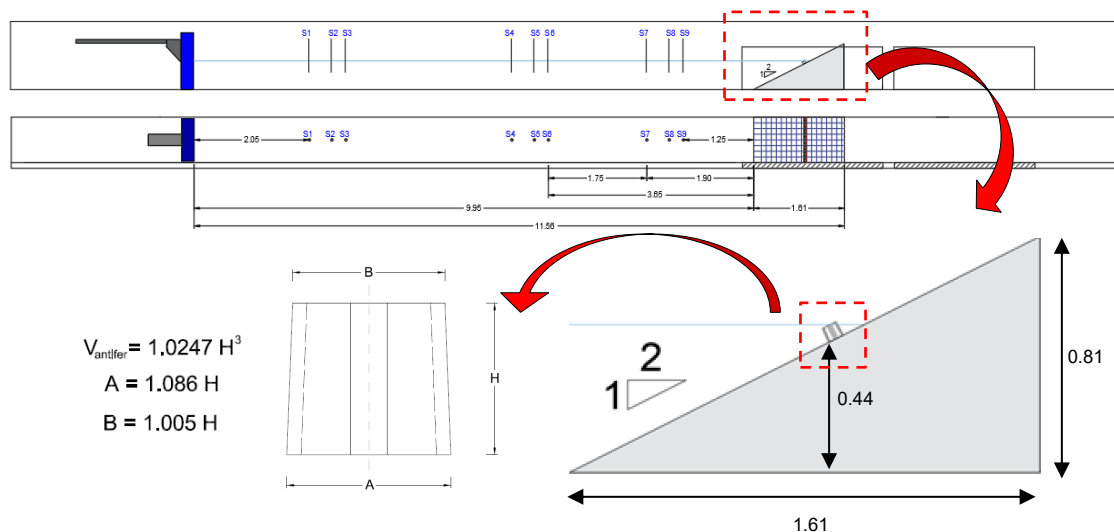


Figura 3. Corte longitudinal e planta do canal e respetivas dimensões.

As características do modelo físico testado foram definidas com o propósito de tornar viável a sua reprodução em modelo numérico. Os blocos Antifer apresentam $H=0.052$ m, $A=0.056$ m e $V=0.140\text{m}^3$ (Figura 3. Corte longitudinal e planta do canal e respetivas dimensões.) e pesam, aproximadamente, 365gr cada ($\rho=2600$ kg/m³). Foram instaladas no canal 9 sondas de níveis hidrodinâmicos do tipo resistivo (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 e S9) distanciadas do modelo de 7.90m, 7.50m, 7.25m, 4.30m, 3.90m, 3.65m, 1.90m, 1.50m e 1.25m, respetivamente. Os dados experimentais foram adquiridos com uma frequência de 40Hz e as ondas incidentes e refletidas foram separadas utilizando o método de Mansard e Funke (1980), que utiliza, simultaneamente, os registos da elevação da superfície livre da água medidos em 3 sondas alinhadas. Os ensaios realizados contemplaram ondas regulares com alturas de onda, H , compreendidas entre 0.0375 e 0.100 m, com período de onda mínimo, T , de 0.93s e período máximo de 1.518s. Contudo, no presente trabalho, a validação do modelo numérico é baseada unicamente nos ensaios realizados com as seguintes condições de onda: $H=0.0375$ m e $T=0.93$ s,

$H=0.075\text{m}$ e $T=1.315\text{s}$. Para cada condição de onda, foram realizados 3 testes, sendo que para cada um deles foi feito o registo fotográfico, bem como videográfico, das posições inicial e final dos blocos Antifer (Figura 4). No final de cada teste, os blocos foram reinstalados na sua posição inicial. A câmara fotográfica foi mantida sempre na mesma posição, ortogonal ao talude. A distorção foi corrigida com recurso ao software *Lightroom*. Por fim, de modo a efetuar a análise quantitativa do movimento dos blocos Antifer, recorreu-se a um *software open-source* denominado ImageJ, distribuído pela Fiji, com o qual foi possível, considerando um ponto fixo, medir o deslocamento inicial, e posteriormente, final de cada bloco.

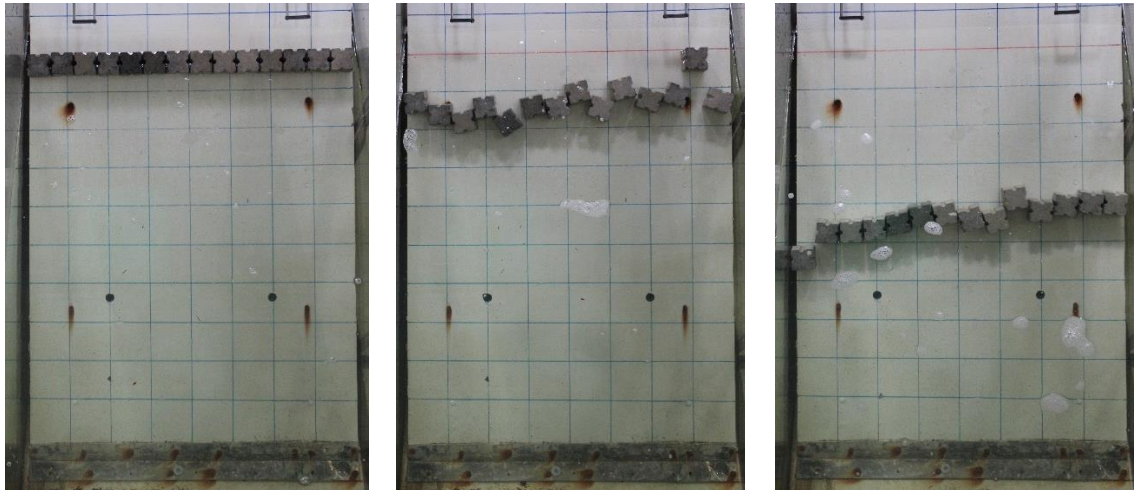


Figura 4. Registos fotográficos do instante inicial (esquerda) e dos instantes finais para as duas alturas de onda consideradas: $H=0.0375\text{ m}$ (centro) e $H=0.075\text{m}$ (direita)

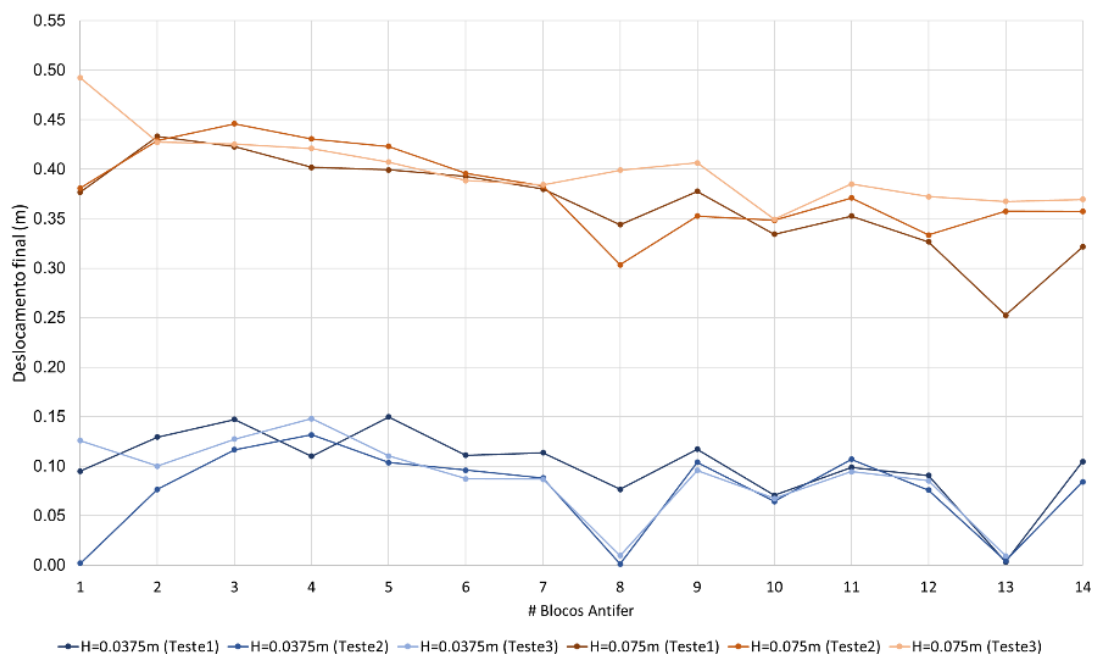


Figura 5. Deslocamentos totais de cada um dos blocos, para as duas condições de onda testadas e considerando três testes por onda.

Na Figura 5 apresentam-se os deslocamentos totais obtidos para cada um dos blocos, para duas condições de onda atrás referidas, considerando a realização de três testes por onda. Como seria de esperar, há alguma variabilidade nos resultados obtidos para cada bloco, mas a gama de valores obtidos para cada teste está bem identificada. Aliás, considerando a altura de onda $H=0.0375$ m, os deslocamentos totais, para o teste 1 variam entre 3mm e 0.15m; para o teste 2 variam entre 1mm e 0.13m; e para o teste 3 variam entre 9mm e 0.15m. Para a altura de onda $H=0.075$ m, os deslocamentos totais, para o teste 1 variam entre 0.25m e 0.44m; para o teste 2 variam entre 0.30m e 0.45m; e para o teste 3 variam entre 0.35m e 0.50m.

Modelação numérica com recurso ao DualSPHysics

A validação do modelo numérico baseia-se nos ensaios descritos na secção anterior. O Código DualSPHysics foi utilizado para modelar, tridimensionalmente, a propagação e a interação das ondas regulares com um talude liso sobre o qual foi colocada uma linha de 14 blocos Antifer. Para tornar a simulação computacionalmente exequível, optou-se por reduzir o comprimento do tanque de ondas e, conseqüentemente, o domínio de simulação. Considerou-se um tanque numérico com 7m de comprimento, 0.8m de largura e 1.2m de altura e colocou-se o baterador a 2.5 m de distância do modelo (pé do talude). O nível inicial de água considerado foi de 0.5055. Na Figura 6 apresenta-se a representação tridimensional do domínio numérico.

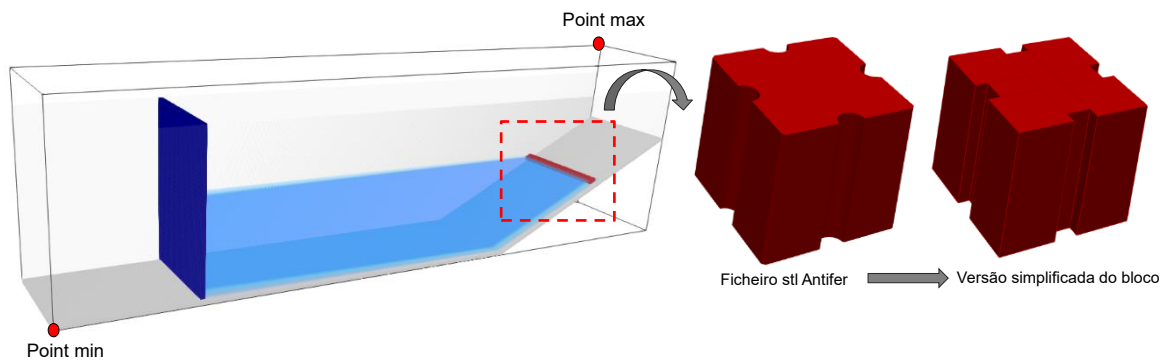


Figura 6. Representação tridimensional do domínio numérico.

Na implantação numérica ativaram-se as seguintes condições: condição fronteira mDBC em todo o domínio (English *et al.*, 2021) e deteção de colisões utilizando o projeto Chrono. Para ativar a deteção das colisões entre blocos e entre os blocos e o talude, foi necessário definir o coeficiente de atrito dinâmico, nomeadamente, 0.65 e 0.79 para as interações referidas.

Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros utilizados nas simulações numéricas. Cada simulação apresenta um total de, aproximadamente, 12 milhões de partículas. Isto significa que simulações de 30s (tempo real), demoram cerca de 4 a 5 dias a correr, mesmo considerando a utilização de uma boa placa gráfica (NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti).



Tabela 1. Parâmetros utilizados nas simulações numéricas.

Parâmetro numérico	Parâmetro Utilizado
d_p (m)	0.005
$2h$ (m)	0.026
Boundary	mDBC
StepAlgorithm	Symplectic
Kernel	Wendland
ViscoTreatment / Visco / ViscoBoundFactor	Artificial / 0.01 / 0
DensityDT	Fourtakas(full)
TimeMax (s)	30
TimeOut (s)	0.1

Validação das condições de onda

Considerando que o bateror numérico se encontra a 2.5m de distância do modelo, é necessário ajustar, para cada altura de onda a simular, os parâmetros associados ao pistão (H, T, ramp e startAWAS). Apesar das ondas geradas serem regulares e de segunda, o que permite a aplicação das teorias da geração automática implementadas no código, é também necessário garantir que as primeiras ondas geradas no modelo traduzem o arranque implementado nos ensaios experimentais, visto que as primeiras ondas a atingir o modelo, apesar de não estarem completamente desenvolvidas, também provocaram o deslocamento dos blocos. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as séries temporais de elevação da superfície livre da água registadas na sonda S7, obtidos com a reprodução bidimensional do modelo numérico (Figura 7) e com as medições nos ensaios em modelo físico, para as alturas de onda $H=0.0375$ m ($T=0.93$ s) e $H=0.075$ m ($T=1.315$ s). A elevação da superfície livre é relativamente bem simulada pelo modelo numérico e apresenta uma boa concordância com os dados experimentais. Com isto confirma-se que os valores adotados para a altura de onda no modelo numérico, o número de períodos de arranque (ramp) e o instante para o arranque do sistema ativo de absorção numéricos (startAWAS) foram bem definidos ao problema a resolver. Contudo, nos dois casos apresentados existem pequenas diferenças na amplitude da onda, possivelmente devido à reprodução numérica das reflexões, não correspondendo às reflexões ocorridas no modelo experimental.

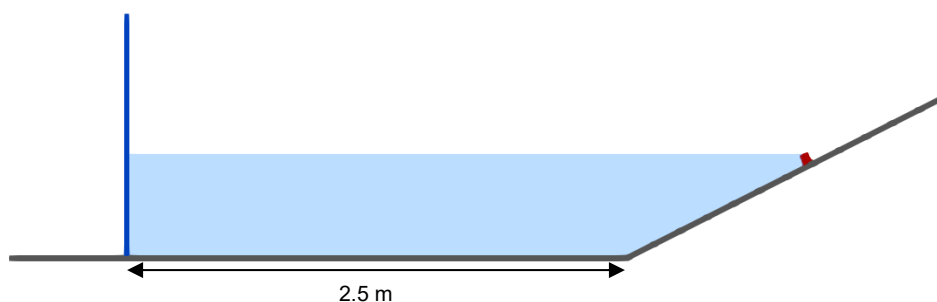


Figura 7. Representação bidimensional do domínio numérico.

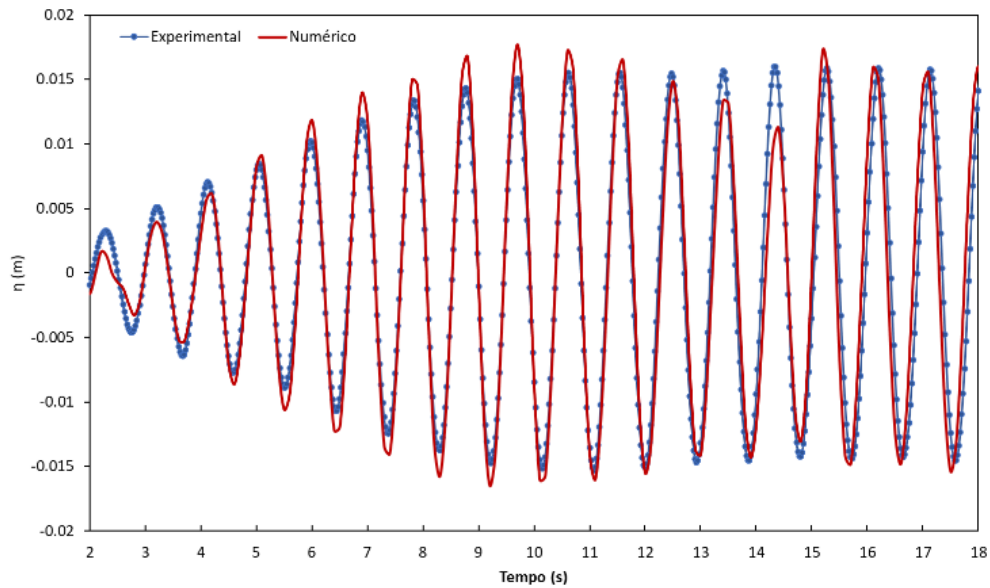


Figura 8. Elevação da superfície livre da componente de onda incidente na sonda S7, $T=0.93s$, $H_{exp}=0.0375m$, $H_{num}=0.035m$, $d=0.5055m$, $ramp=11$ e $startAWAS=14s$.

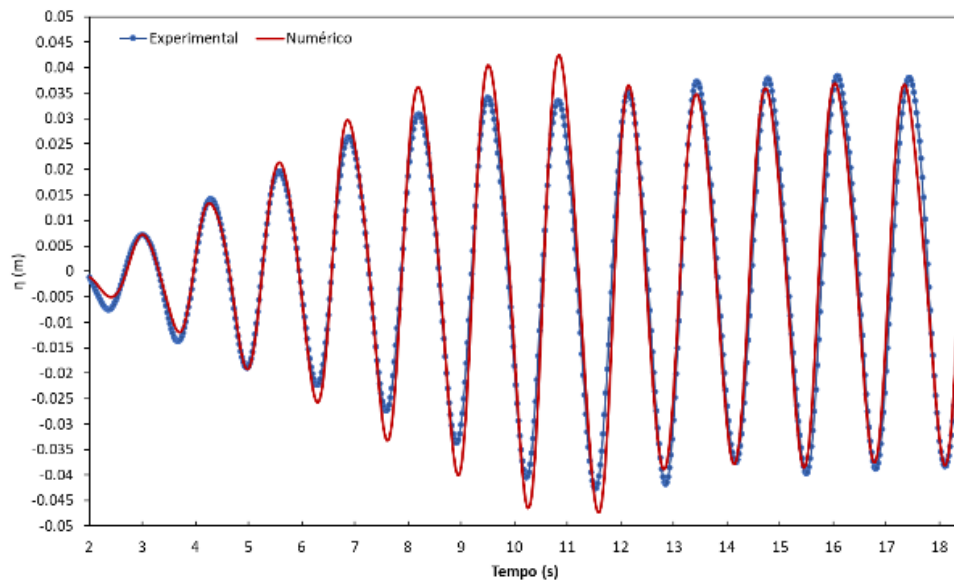


Figura 9. Elevação da superfície livre da componente de onda incidente na sonda S7, $T=1.315s$, $H_{exp}=H_{num}=0.075m$, $d=0.5055m$, $ramp=9$ e $startAWAS=11.835s$.

Considerações finais e trabalho futuro

O trabalho de investigação em curso tem como objetivo a validação da capacidade do código DualSPHysics quantificar o movimento de uma linha de blocos Antifer colocados sobre um talude liso, sujeitos a ondas regulares, de segunda ordem.

Neste artigo foram descritos os ensaios experimentais já realizados, de forma a obter resultados fiáveis para o desenvolvimento e a validação do modelo numérico. Os resultados apresentados mostram que a elevação da superfície livre da água é relativamente bem simulada pelo modelo



DualSPHysics. No entanto, apesar da boa concordância com os resultados experimentais, foram observadas pequenas diferenças na amplitude da onda, possivelmente devido à reprodução das reflexões. Estes aspetos continuarão a ser investigados no futuro.

Relativamente aos resultados experimentais, pretende-se, futuramente, agilizar o processo de pós-processamento da imagem com recurso ao plugin *Trainable Weka Segmentation* (TWS) incluído no pacote do software Fiji. Com o TWS é possível treinar o software para reconhecer e isolar os Antifers do fundo da imagem e, posteriormente, com recurso a outro *plugin*, denominado *Analyze Particles*, é possível delinear o bloco e definir os parâmetros a ele associados (área, perímetro e centro) (Vieira *et al.*, 2021). No final das simulações numéricas, e considerando os resultados experimentais obtidos, será possível comparar ambos os resultados e assim validar a capacidade do DualSPHysics para reproduzir e quantificar o movimento dos blocos Antifer quando sujeitos a ondas regulares. Desta forma, comprovar-se-á a utilidade desta ferramenta nos estudos de engenharia costeira.

Referências Bibliográficas

- Altomare, C., Crespo, A., Rogers, B., Dominguez, J., Gironella, X., e Gómez-Gesteira, M. (2014) – "Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics." *Computers & Structures* 130:34-45.
- Altomare, C., Domínguez, J., Crespo, A., González-Cao, J., Suzuki, T., Gómez-Gesteira, M., e Troch, P. (2017) – "Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model." *Coastal Engineering* 127:37-54.
- Barreiro, A., Crespo, A., Domínguez, J., e Gómez-Gesteira, M. (2013) – "Smoothed particle hydrodynamics for coastal engineering problems." *Computers & Structures* 120:96-106.
- Canelas, R., Brito, M., Feal, O., Domínguez, J., e Crespo, A. (2018) – "Extending DualSPHysics with a Differential Variational Inequality: modeling fluid-mechanism interaction." *Applied Ocean Research* 76:88-97.
- Crespo, A., Domínguez, J., Rogers, B., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., 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.
- Crespo, A., Gómez-Gesteira, M., e Dalrymple, R. (2007) – "Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods." *Computers, materials and continua* 5 (3):173-184.
- Didier, E., Ferreira, O., Matias, A., Neves, M. G., Reis, M. T., e Pacheco, A. (2011) – "Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics para aplicação a estruturas costeiras." *Proceedings of 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*:30.
- Didier, E., e Neves, M. (2010) – "Modelação da Interação entre uma Onda e uma Estrutura de Protecção Costeira usando um Modelo Numérico SPH-Smoothed Particles Hydrodynamics." *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management* 10 (4):435-455.
- Domínguez, J. (2014) – "DualSPHysics: towards high performance computing using SPH technique." Física aplicada.
- Domínguez, J., Fourtakas, G., Altomare, C., Canelas, R., Tafuni, A., García-Feal, O., Martínez-Estévez, I., Mokos, A., Vacondio, R., e Crespo, A. (2021) – "DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems." *Computational Particle Mechanics*:1-29.
- Domínguez, José Manuel (2014) – "PhD Thesis DualSPHysics: Towards High Performance Computing using SPH technique."



- English, A., Domínguez, J., Vacondio, R., Crespo, A., Stansby, P., Lind, S., Chiapponi, L., e Gómez-Gesteira, M. (2021) – "Modified dynamic boundary conditions (mDBC) for general-purpose smoothed particle hydrodynamics (SPH): application to tank sloshing, dam break and fish pass problems." *Computational Particle Mechanics*. doi: 10.1007/s40571-021-00403-3.
- Fourtakas, G., Dominguez, J., Vacondio, R., e Rogers, B. (2019) – "Local uniform stencil (LUST) boundary condition for arbitrary 3-D boundaries in parallel smoothed particle hydrodynamics (SPH) models." *Computers & Fluids* 190:346-361.
- Gingold, Robert A, e Monaghan, Joseph J. (1977) – "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars." *Monthly notices of the royal astronomical society* 181 (3):375-389.
- Gomez-Gesteira, M., Rogers, B. D., Violeau, D., Grassa, J., e Crespo, A. (2010) – "Foreword: SPH for free-surface flows." *Journal of Hydraulic Research* 48 (sup1):3-5.
- Leimkuhler, B., e Patrick, G. (1996) – "A symplectic integrator for Riemannian manifolds." *Journal of Nonlinear Science* 6 (4):367-384.
- Liu, G., e Liu, M. (2003) – "Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method." World scientific.
- Liu, M., e Liu, G. (2006) – "Restoring particle consistency in smoothed particle hydrodynamics." *Applied numerical mathematics* 56 (1):19-36.
- Mansard, E., e Funke, E. (1980) – "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method." In *Coastal Engineering 1980*, 154-172.
- Monaghan, J. (1992) – "Smoothed particle hydrodynamics." *Annual review of astronomy and astrophysics* 30 (1):543-574.
- Monaghan, J. (2005) – "Smoothed particle hydrodynamics." *Reports on progress in physics* 68 (8):1703.
- Silva, T. (2019) – "Estudo numérico de um conversor hiperbárico de energia das ondas."
- Violeau, D. (2012) – "Fluid mechanics and the SPH method: theory and applications." Oxford University Press.
- Violeau, D., e Rogers, B. (2016) – "Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: past, present and future." *Journal of Hydraulic Research* 54 (1):1-26.
- Zhang, F., Crespo, A., Altomare, C., Domínguez, J., Marzeddu, A., Shang, S., e Gómez-Gesteira, M. (2018) – "DualSPHysics: a numerical tool to simulate real breakwaters." *Journal of Hydrodynamics* 30 (1):95-105.