

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA INTEGRADA PARA SIMULAR INTERAÇÕES ONDA-ESTRUTURA-ESTRUTURA

Moisés Brito

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

moises.brito@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Esta comunicação apresenta uma ferramenta integrada, designada de *DualSPHysics-Chrono*, recentemente desenvolvida para o apoio a projetos de estruturas marítimas, tais como dispositivos de aproveitamento de energia das ondas. Esta ferramenta baseia-se no acoplamento do código *DualSPHysics* e da biblioteca do *Project Chrono*, onde o *DualSPHysics* calcula a interação da onda com a estrutura (interação onda-estrutura) e o *Project Chrono* calcula a interação da estrutura com os diversos corpos rígidos que interagem entre si através de contatos e restrições mecânicas (interação estrutura-estrutura).

A validação da *DualSPHysics-Chrono* foi feita através da comparação dos resultados numéricos com dados de ensaios experimentais em modelo físico reduzido de um *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC). As séries temporais da elevação da superfície livre, rotação e velocidade angular do OWSC obtidos numericamente apresentam boa concordância com os dados experimentais, mostrando que *DualSPHysics-Chrono* pode ser uma ferramenta importante no apoio a projetos de obras marítimas onde existem interações onda-estrutura-estrutura.

Palavras-chave: *DualSPHysics-Chrono*; modelação numérica; *Smoothed Particle Hydrodynamics*; interações onda-estrutura-estrutura.

1. Introdução

A interação da onda com uma estrutura marítima e a interação dessa estrutura com os contatos e as restrições mecânicas dos sistemas de acoplamento é normalmente designada por interações onda-estrutura-estrutura. Estas interações caracterizam-se por um conjunto de fenómenos físicos bastante complexos e são comuns em diversos dispositivos costeiros, como por exemplo: dispositivos de aproveitamento de energia das ondas, cais flutuantes, estruturas de aquacultura, etc. Estes dispositivos costeiros são geralmente compostos por diversos corpos rígidos que interagem entre si através de contatos e restrições mecânicas complexas. Não obstante, na literatura, os referidos dispositivos são normalmente simulados utilizando modelos numéricos simplificados, isto

é, não resolvendo explicitamente os contatos e as restrições mecânicas (Falcão, 2010; Schmitt *et al.*, 2016). Estas simplificações podem levar a imprecisões importantes da resposta dinâmica dos dispositivos e das características do escoamento (Falcão, 2010). Portanto, é necessário desenvolver ferramentas que permitam simular com precisão estas interações onda-estrutura-estrutura. Assim, desenvolveu-se recentemente uma ferramenta integrada, designada de *DualSPHysics-Chrono*, que permite simular interações onda-estrutura-estrutura (Brito *et al.*, 2016, 2017a; Canelas *et al.*, 2017). Esta ferramenta baseia-se no acoplamento do código *DualSPHysics* e da biblioteca do *Project Chrono*, onde o *DualSPHysics* calcula a interação da onda com a estrutura (interação onda-estrutura) e o *Project Chrono* calcula a interação da estrutura com os diversos corpos rígidos que interagem entre si através de contatos e restrições mecânicas (interação estrutura-estrutura).

O código *DualSPHysics* baseia-se no método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) para resolver as equações que gerem a dinâmica dos fluidos. Este método segue uma abordagem Lagrangiana, onde o fluido é considerado como sendo um conjunto de partículas (Monaghan, 1992). As trajetórias e as velocidades das partículas do fluido em função da sua posição inicial e do tempo são dadas pelo seguimento de cada partícula durante um determinado período de tempo. Portanto, neste método para descrever a dinâmica dos fluidos não é necessário uma malha de cálculo (Lucy, 1977; Gingold e Monaghan, 1977). O movimento individual de cada partícula é obtido a partir do movimento das partículas que estão à sua volta (partículas vizinhas). Numericamente as interações entre as partículas são asseguradas por um kernel de interpolação (Monaghan, 1992). Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão do suporte do kernel e cada uma destas partículas tem apenas uma contribuição no kernel.

O código *DualSPHysics* vem sendo validado e melhorado ao longo dos últimos anos com o objetivo de modelar fenómenos complexos, como escoamentos com grandes deformações da superfície livre, evoluções topológicas complexas, rebentação e interação onda-estrutura (Crespo *et al.*, 2015). No entanto, na sua versão atual o *DualSPHysics* não permite simular as interações fluido-estrutura-estrutura (Brito *et al.*, 2016). Para ultrapassar esta limitação foi desenvolvida a *DualSPHysics-Chrono* que é aqui apresentada, que acopla o código *DualSPHysics* e a biblioteca do *Project Chrono* (Brito *et al.*, 2016, 2017a; Canelas *et al.*, 2017). A biblioteca do *Project Chrono* utilizada na *DualSPHysics-Chrono* permite simular explicitamente os mecanismos envolvendo praticamente todos os tipos de geometrias, contatos e restrições mecânicas, como por exemplo: dispositivos compostos por diversos corpos rígidos e/ou flexíveis, colisões, adesões, acoplamentos, articulações, motores, graus de liberdade arbitrários (Tasora *et al.*, 2016).

Neste artigo, a validação da aplicabilidade da *DualSPHysics-Chrono* é feita através da comparação dos resultados numéricos com dados de ensaios experimentais em modelo físico reduzido de um *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC). O OWSC usado é composto essencialmente por uma

placa oscilante e um sistema de extração de energia (PTO – *power take-off*) à escala 1:10. A placa oscilante encontra-se articulada num eixo horizontal junto ao fundo do canal, oscilando sobre a ação das ondas. O PTO é composto basicamente por um pistão hidráulico que alimenta um sistema hidráulico fechado.

Este artigo encontra-se estruturado da seguinte forma. No capítulo 2 descreve-se a implementação numérica da *DualSPHysics-Chrono*, o código DualSPHysics, o princípio do método SPH e o *Project Chrono*. No capítulo 3 apresenta-se a validação da *DualSPHysics-Chrono*. Uma vez validada, a exploração do potencial da *DualSPHysics-Chrono* é apresentada no capítulo 4. Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se as principais conclusões.

2. DualSPHysics-Chrono

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma do acoplamento do código *DualSPHysics* e da biblioteca do *Project Chrono* (Brito *et al.* 2016, 2017a; Canelas *et al.* 2017).

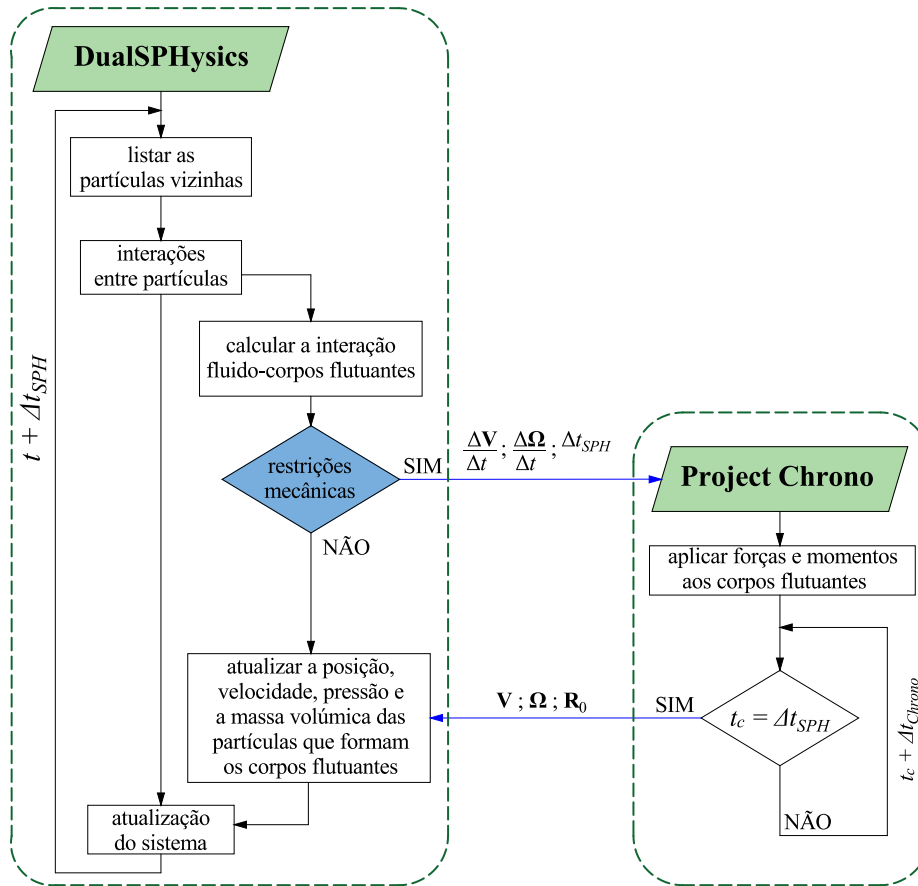


Figura 1. Fluxograma do acoplamento do código *DualSPHysics* e da biblioteca do *Project Chrono*.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1 as interações fluido-estrutura-estrutura são calculadas basicamente em três etapas. Na primeira etapa, para o passo de tempo, Δt_{SPH} , *DualSPHysics* calcula as interações entre as partículas. A resultante das forças do fluido sobre o corpo flutuante é calculada somando as contribuições da interação de cada partícula de fluido que envolvem o corpo. Na segunda etapa, a velocidade linear e angular resultante das interações entre as partículas é transferido para o *Project Chrono*. Durante este passo de tempo o *Project Chrono* calcula o movimento do corpo flutuante considerando as restrições mecânicas do sistema. Na terceira etapa, o código *DualSPHysics* atualiza a posição das partículas que formam o corpo flutuante. Por fim, o *DualSPHysics* atualiza todas as variáveis do sistema (posição, velocidade, massa volúmica e pressão de todas as partículas de fluido) para o novo passo de tempo.

2.1 *DualSPHysics*

O código *DualSPHysics* baseia-se no método SPH para resolver as equações que gerem a dinâmica dos fluidos. No *DualSPHysics* as quantidades físicas (posição, velocidade, massa volúmica) de cada partícula são calculadas através da interpolação com as partículas vizinhas. Matematicamente, a contribuição de cada partícula é ponderada de acordo com a distância entre as partículas e o kernel de interpolação (Crespo *et al.*, 2015). Portanto só as partículas que estão dentro da zona de suporte do kernel têm contribuição nas quantidades físicas de uma dada partícula.

2.1.1 Método SPH

O princípio fundamental do método SPH consiste em aproximar qualquer função F por um integral de interpolação:

$$F(\mathbf{r}) = \int F(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}' \quad (1)$$

onde W é o kernel de interpolação, \mathbf{r} é o vetor posição, \mathbf{r}' é o vetor posição onde a função F é definida. Na literatura o parâmetro h é denominada de *smoothing length* e controla a dimensão do domínio de influência do kernel de interpolação (Monaghan, 1992; Crespo *et al.*, 2015).

Numericamente, a função F pode ser escrita na sua forma discreta, onde o integral de interpolação é aproximado por um somatório. A aproximação de F para uma partícula a é feita para todas as partículas que estão dentro da zona de suporte do kernel:

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b)W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)\Delta V_b \quad (2)$$

onde ΔV_b é o volume das partículas vizinhas b . Considerando que $V_b = m_b/\rho_b$, onde m_b é a massa e ρ_b é a massa volúmica da partícula b , a Equação (2) pode ser escrita da seguinte forma:

$$F(\mathbf{r}_a) \approx \sum_b F(\mathbf{r}_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (3)$$

Nas Equações (2) e (3) o índice a refere-se a uma partícula individual e o índice b refere-se as partículas vizinhas (partículas que estão dentro da zona de suporte do kernel). A eficiência do método SPH depende fortemente do tipo de kernel de interpolação usado (Crespo *et al.*, 2015).

2.1.2 Kernels de interpolação

No método SPH o kernel de interpolação é definido como uma função analítica que pode ser derivada sem necessitar de uma discretização espacial que varia com a distância entre as partículas (Monaghan, 1992). Numericamente, o kernel é uma função com um suporte compacto dentro duma região determinada por um raio de $2h$, normalmente muito mais pequeno que a escala típica do problema (Didier e Neves, 2010; Crespo *et al.*, 2015). O h deve ser superior à separação inicial das partículas. Assim, uma partícula está apenas em interação com as partículas contidas no domínio de influência definido pela dimensão do suporte do kernel e cada uma destas partículas tem apenas uma contribuição no kernel.

Os kernels são normalmente expressos em função da distância adimensional entre as partículas, $q = r/h$, onde $r = |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b|$ é a distância entre duas partículas. No *DualSPHysics* encontra-se atualmente implementado dois tipos de kernels: Cubic-Spline e Quintic (Crespo *et al.*, 2015). O kernel Cubic-Spline é dado por:

$$W(r, h) \approx \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 < q \leq 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (4)$$

onde $\alpha_D = 10/(7\pi h^2)$ para simulação bidimensional e $\alpha_D = 1/(\pi h^3)$ para tridimensional.

O kernel Quintic é dado por:

$$W(r, h) \approx \alpha_D \begin{cases} \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) & 0 \leq q \leq 2 \\ 0 & q > 2 \end{cases} \quad (5)$$

onde $\alpha_D = 7/(4\pi h^2)$ para simulação bidimensional e $\alpha_D = 21/(16\pi h^3)$ para tridimensional.

2.1.3 Equações da dinâmica dos fluidos

O modelo da viscosidade artificial proposto por Monaghan (1992) é o modelo mais usado para descrever os termos viscosos da equação de conservação da quantidade de movimento (Crespo *et*

al., 2015; Crespo *et al.*, 2017). A partir deste modelo a equação de conservação da quantidade de movimento na formulação do SPH é dada por:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) + \mathbf{g} \quad (6)$$

onde \mathbf{v}_a , P_a e ρ_a são, respetivamente, o vetor velocidade, a pressão e a massa volúmica da partícula a , t é o tempo, \mathbf{g} é o vetor aceleração da gravidade, P_b , ρ_b e m_b são, respetivamente, a pressão, a massa volúmica e a massa de uma dada partícula b contida no suporte compacto do kernel e Π_{ab} é o termo de viscosidade, dado por:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) < 0 \\ 0 & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

sendo

$$\mu_{ab} = \frac{h(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)}{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)^2 + \eta^2} \quad (8)$$

onde $\eta^2 = 0.01h^2$ é coeficiente que não permite a divergência numérica quando a distância entre as partículas tende para zero, $\bar{c}_{ab} = (c_a + c_b)/2$ é a média da velocidade do som, $\bar{\rho}_{ab} = (\rho_a + \rho_b)/2$ é a média da massa volúmica das partículas a e b , e α é o coeficiente da dissipação viscosa. O valor $\alpha = 0.01$ tem-se mostrado adequado para o estudo da propagação de ondas em canais (Altomare *et al.*, 2015; Crespo *et al.*, 2017).

Na formulação do SPH, a equação de conservação da massa é dada por:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \nabla_a W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (9)$$

No *DualSPHysics* o fluido é tratado como fracamente compressível (*weakly compressible* SPH). Portanto, a equação de estado que relaciona a pressão no fluido com a massa volúmica é dada por:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (10)$$

onde $\gamma = 7$ é a constante politrópica, $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ é a massa volúmica de referência da água e a constante $B = c^2 \rho_0 / \gamma$, onde c é a velocidade do som na água calculada para a massa volúmica de referência.

2.1.4 Condições de fronteira

As fronteiras sólidas são definidas por um conjunto de partículas semelhantes as partículas do fluido. A condição de fronteira dinâmica (DBC – *dynamic boundary condition*) utiliza as mesmas condições

que as partículas de fluido. No entanto, estas partículas de fronteira não se deslocam sobre a ação das forças das partículas de fluido, permanecendo fixas na posição inicial ou deslocando-se de acordo com o deslocamento imposto (como, por exemplo, o movimento do batedor de onda). Quando uma partícula de fluido se aproxima da fronteira e a distância entre estas se torna muito pequena, isto é, inferior a h , a massa volúmica da partícula da fronteira aumenta, resultando num aumento da pressão. Este fenómeno provoca uma força repulsiva exercida na partícula do fluido devido ao termo de pressão na equação de conservação da quantidade de movimento (Equação (6)). Portanto, a estabilidade das simulações depende do passo de tempo definido. Normalmente um pequeno passo de tempo pode permitir maiores velocidades das partículas. A validação da DBC mostrou boa concordância comparativamente a outras abordagens existentes. Adicionalmente, a DBC tem-se mostrado adequada para a simulação de escoamento com geometrias complexas (Altomare *et al.*, 2015).

2.1.5 Interação fluido-corpos flutuantes

No *DualSPHysics* considera-se que todos os corpos flutuantes são rígidos, portanto a força líquida é calculada pela soma das contribuições de todas as partículas envolventes do corpo flutuante de acordo com a dimensão do domínio de influência e o tipo de kernel de interpolação. Cada partícula de fronteira k experimenta a seguinte força por unidade de massa:

$$\mathbf{f}_k = \sum_{a \in FL} \mathbf{f}_{ka} \quad (11)$$

onde FL refere-se as partículas de fluido e \mathbf{f}_{ka} é o vetor força por unidade de massa exercida pela partícula de fluido a sobre a partícula de fronteira k , dada por:

$$m_k \mathbf{f}_k = -m_a \mathbf{f}_{ka} \quad (12)$$

O movimento de um corpo flutuante é calculado considerando as seguintes equações para o movimento do corpo rígido:

$$M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \sum_{a \in FR} -m_k \mathbf{f}_k \quad (13)$$

e

$$I \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} = \sum_{a \in FR} -m_k (\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_0) \times \mathbf{f}_k \quad (14)$$

onde FR refere-se as partículas de fronteira, M é a massa, I é o momento de inércia, \mathbf{V} é o vetor velocidade linear, $\boldsymbol{\Omega}$ é o vetor velocidade angular e \mathbf{R}_0 é vetor posição do centro de massa do corpo flutuante. Cada partícula de fronteira do corpo flutuante experimenta a seguinte velocidade:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_0) \quad (15)$$

O movimento do corpo flutuante é dado pela integração da Equação (15) no tempo. Os resultados apresentados por Monaghan (2005) mostram que esta técnica permite a conservação da massa no sistema.

2.1.6 Esquemas de discretização temporal

A utilização de esquemas de discretização temporal é dependente da condição de Courant-Friedrich-Levy (CFL). A partir desta condição o passo de tempo variável é calculado da seguinte forma:

$$\Delta t = 0.3 \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (16)$$

sendo

$$\Delta t_f = \min \left(\sqrt{h/|\mathbf{f}_a|} \right) \quad (17)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \left(\frac{\sqrt{h/|\mathbf{f}_a|}}{c_s + \max_b \left| \frac{h(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b)(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)}{(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)^2 + \eta^2} \right|} \right) \quad (18)$$

onde Δt_f é o passo de tempo calculado a partir do módulo do vetor força por unidade de massa, $|\mathbf{f}_a|$, Δt_{cv} é o passo de tempo que controla a condição de CFL e c_s é uma constante que varia entre 0.1 e 0.3. Como as quantidades físicas (velocidade, massa volúmica, posição) alteram em cada passo de tempo devido às forças calculadas durante as interações entre as partículas. Torna-se, assim, necessário utilizar esquemas de discretização temporal que permitam calcular as novas quantidades físicas para o passo de tempo seguinte.

No código *DualSPHysics* encontram-se atualmente implementados dois tipos de esquemas de discretização temporal: Verlet e Symplectic. Para simplificar a representação dos esquemas Verlet e Symplectic, considera-se que a equação da quantidade de movimento (Equação (6)), da conservação da massa (Equação (9)) e a variação da posição das partículas são escritas da seguinte forma, respetivamente:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \mathbf{F}_a \quad (19)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = D_a \quad (20)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \quad (21)$$

No esquema Verlet o cálculo das quantidades físicas encontra-se dividido em duas partes (Crespo *et al.*, 2015). Esta técnica permite reduzir o custo computacional quando comparado com outros esquemas de discretização temporal. Na primeira parte o esquema Verlet calcula as quantidades físicas de acordo com as seguintes equações:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^{n-1} + 2\Delta t \mathbf{F}_a^n \quad (22)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^{n-1} + 2\Delta t D_a^n \quad (23)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \Delta t \mathbf{v}_a^n + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{F}_a^n \quad (24)$$

onde $\Delta t = t/n$ é o passo de tempo e n é o tempo de cálculo. Na segunda parte do esquema Verlet, em cada determinado passo de tempo (normalmente 50 passos de tempo) as quantidades físicas são calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^n + 2\Delta t \mathbf{F}_a^n \quad (25)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^n + 2\Delta t D_a^n \quad (26)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \Delta t \mathbf{v}_a^n + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{F}_a^n \quad (27)$$

Esta segunda parte do esquema Verlet, i. e. Equações (25), (26) e (27), permite limitar a divergência dos valores integrados no tempo das Equações (22), (23) e (24), uma vez que estas equações não se encontram acopladas. Nos casos em que é mais difícil garantir a estabilidade numérica recomenda-se diminuir o número de passos para a aplicação da segunda parte. Neste contexto, os valores inferiores a 10 passos de tempo podem indicar que o esquema Verlet não seja adequado para determinar a dinâmica das partículas, portanto o esquema Symplectic pode constituir uma boa alternativa (Crespo *et al.*, 2015).

O esquema Symplectic implementado no *DualSPHysics* baseia-se num algoritmo de previsão-correção de segunda ordem. Durante a fase de previsão os valores da massa volúmica e da posição são estimados num passo de tempo intermédio:

$$\rho_a^{n+\frac{1}{2}} = \rho_a^n + \frac{\Delta t}{2} D_a^n \quad (28)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{r}_a^n + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^n \quad (29)$$

Durante a fase de correção a aceleração ($d\mathbf{v}_a^{n+1/2}/dt$) é usada para calcular a velocidade corrigida, e, portanto, a velocidade e a posição das partículas no final de cada passo de tempo são dadas, respetivamente, por:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{F}_a^{n+\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{v}_a^{n+1} \quad (31)$$

Finalmente, o valor corrigido da massa volúmica, $d\rho_a^{n+1/2}/dt = D_a^{n+1}$, é calculada usando o valor atualizado da velocidade ($\mathbf{v}_a^{n+1/2}$) e da posição ($\mathbf{r}_a^{n+1/2}$).

2.2 Project Chrono

O *Project Chrono* é uma plataforma independente de simulação multi-física implementado em C++. A sua biblioteca permite simular mecanismos envolvendo praticamente todos os tipos de geometrias, contatos e restrições mecânicas, com por exemplo: dispositivos compostos por diversos corpos rígidos e/ou flexíveis, com colisões, adesões, acoplamentos, articulações, motores, graus de liberdade arbitrários (Tasora *et al.*, 2016).

2.2.1 Simulação multi-física

No *Project Chrono* a dinâmica de corpos rígidos para uma posição generalizada \mathbf{r}^n e velocidade \mathbf{v}^n , tem uma solução numérica no tempo $t^{n+1} = t^n + \lambda$ dada resolvendo as seguintes equações, usando as condições de complementaridade e equilíbrio:

$$\mathbf{M}(\mathbf{v}^{n+1} - \mathbf{v}^n) \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \lambda \mathbf{f} + \sum_{i \in A(\mathbf{r}^n, \delta)} (\gamma_{i,l} \mathbf{D}_{i,l} + \gamma_{i,u} \mathbf{D}_{i,u} + \gamma_{i,w} \mathbf{D}_{i,w}) \quad (32)$$

sendo

$$i \in A(\mathbf{r}^n, \delta): 0 \leq \frac{1}{\lambda} \phi_i(\mathbf{r}^n) + \mathbf{D}_{i,l}^T \mathbf{v}^{n+1} \perp \gamma_l^i \geq 0 \quad (33)$$

$$(\gamma_{i,u}, \gamma_{i,w}) = \operatorname{argmin}_{\sqrt{y^2+z^2} \leq \mu_i \gamma_{i,l}} \mathbf{v}^T (y \mathbf{D}_{i,u} + z \mathbf{D}_{i,w}) \quad (34)$$

onde $\gamma_{i,s}$ representa a restrição associado ao contacto i : $\gamma_{i,s} = \lambda \hat{\gamma}_{i,s}$ para $s = l, u, w$ e \mathbf{f} são os vetores força que atuam sobre o sistema, com exceção da força de atrito. O termo $\frac{1}{\lambda} \phi_i(\mathbf{r}^n)$ garante a estabilidade do sistema por eliminar qualquer penetração dos corpos rígidos num passo de tempo (Tasora *et al.*, 2016).

A partir da solução das Equações (32), (33) e (34), a posição de um corpo rígido é dada por:

$$\mathbf{r}^{n+1} = \mathbf{r}^n + \lambda \mathbf{L}(\mathbf{r}^n) \mathbf{v}^{n+1} \quad (35)$$

onde $\mathbf{L}(\mathbf{r})$ é a matriz de transformação da velocidade em derivada generalizada da posição.

3. Validação da *DualSPHysics-Chrono*

A validação da *DualSPHysics-Chrono* é feita através da comparação dos resultados numéricos com os dados de ensaios experimentais em modelo físico reduzido do OWSC à escala 1:10, especialmente desenhado para esta validação. Estes ensaios foram realizados no canal de ondas do Instituto de Mecânica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay. Este canal tem aproximadamente 60 m de comprimento, 1.5 m de largura e 1.8 m de profundidade e encontra-se equipado com um batedor de onda do tipo pistão (Figura 2). Este batedor é controlado pelo sistema de absorção dinâmica de ondas refletidas *AwaSys* (Andersen e Frigaard, 2014). O canal encontra-se equipado com quatro sondas (WP1, WP2, WP3 e WP4) do tipo capacitivo para medir a elevação da superfície livre, sendo três fixadas a montante e uma a jusante do OWSC (Figura 2). A posição das sondas a montante do OWSC foi determinada de acordo com o critério proposto por Mansard e Funke (1980) de forma a permitir a separação da agitação medida em agitação incidente e refletida.

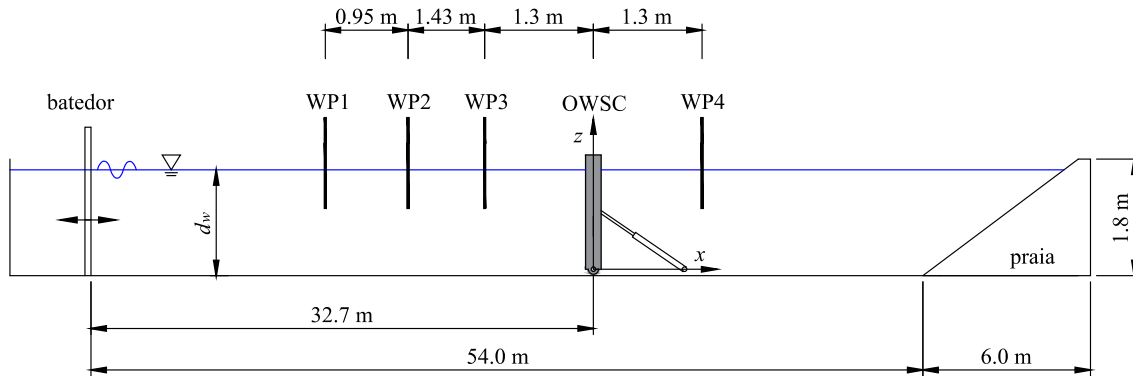


Figura 2. Representação esquemática do perfil do canal.

O OWSC usado é composto basicamente por uma placa oscilante e um sistema PTO, conforme mostra a Figura 3. A placa oscilante tem geometria retangular com 1.31 m de largura, 0.84 m de altura e 0.17 m de espessura e é composta por tubos de PVC e perfis de aço (Figura 3a). O sistema PTO é composto basicamente por um pistão hidráulico que alimenta um sistema hidráulico fechado. O OWSC encontra-se equipado com um codificador incremental e um sensor de pressão. O codificador incremental permite medir a posição da placa oscilante e o sensor de pressão permite medir a pressão no pistão hidráulico.

Inicialmente, para caracterizar a dinâmica do sistema PTO, os ensaios foram realizados no canal sem água, onde a placa oscilante foi excitada com uma força externa aplicada na extremidade superior da placa oscilante (Brito *et al.*, 2017b). Estes ensaios permitiram desenvolver e implementar

as características dinâmicas do PTO no *Project Chrono*. Posteriormente, para estudar a hidrodinâmica do OWSC, os ensaios foram realizados para a profundidade água no canal, $d_w = 0.825$ m, período de onda, $T = 3.5$ s e altura de onda, $H = 0.25$ m. Os dados experimentais foram obtidos com uma frequência de 100 Hz durante 5 min.

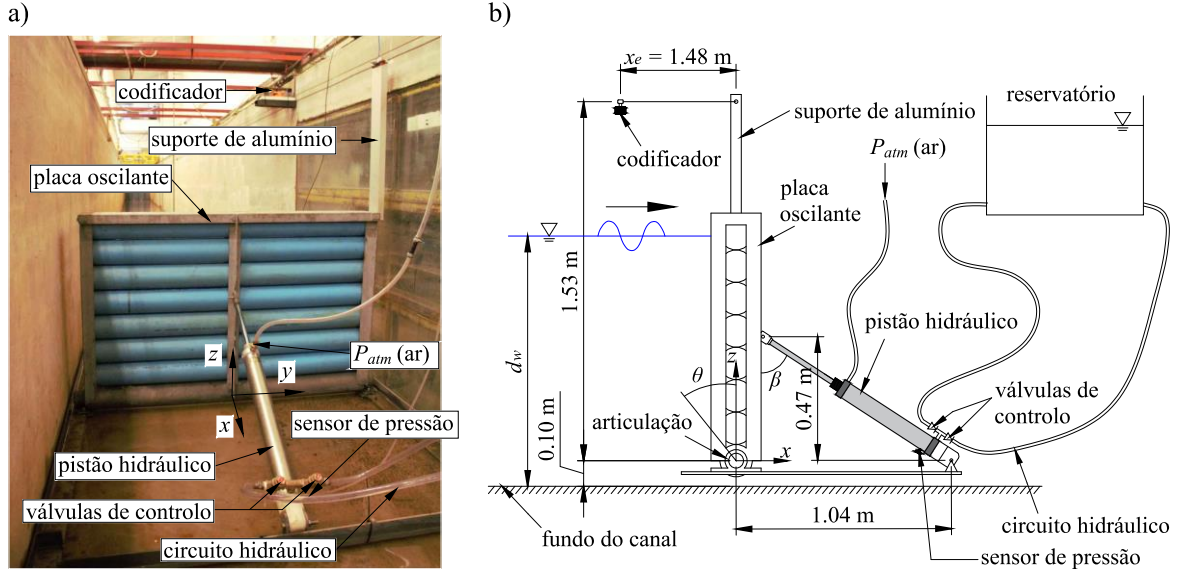


Figura 3. Instalação experimental: a) fotografia do OWSC no canal; b) representação esquemática do OWSC.

A restrição dinâmica da placa oscilante implementada no *Project Chrono* tem em conta as características dinâmicas do PTO desenvolvidas com base no modelo físico do pistão hidráulico, onde o módulo da força do PTO, F_{PTO} , é dado por:

$$F_{PTO} = F_A + F_P \quad (36)$$

onde F_A é a força de atrito entre o êmbolo e corpo do pistão hidráulico e F_P é a força de pressão no circuito hidráulico. A força de atrito é calculada pelo modelo modificado de LuGre (Yanada *et al.*, 2008; Tran *et al.*, 2012):

$$F_A = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \ddot{z} \quad (37)$$

onde σ_0 é o coeficiente dinâmico da rigidez das borrachas, σ_1 é o coeficiente dinâmico do atrito seco das borrachas e σ_2 é o coeficiente estático do atrito viscoso e z é a deformação média das borrachas do êmbolo, dada por:

$$\dot{z} = \dot{x} - \frac{\dot{x}}{G_s} z \quad (38)$$

onde \dot{x} é a velocidade linear do êmbolo relativamente ao corpo do pistão hidráulico e G_s é o coeficiente de Stribeck definido em função de \dot{x} de acordo com a metodologia apresentada em Yanada *et al.* (2008) e Tran *et al.* (2012). A força de pressão é calculada considerando o efeito da perda de carga e a inércia do fluido no circuito hidráulico por:

$$F_p = (K_p \dot{x}^2 + I_p \ddot{x})A \quad (39)$$

onde \ddot{x} é a aceleração linear do êmbolo relativamente ao pistão, A é a área da secção transversal do pistão, K_p é o coeficiente da perda de carga e I_p é coeficiente da inércia do fluido no circuito hidráulico fechado (Falcão, 2007, Brito *et al.* 2017b). Mais detalhes sobre as características dinâmicas do sistema PTO podem ser consultados em Brito *et al.* (2017b).

Na Figura 4 apresentam-se as séries temporais da velocidade angular imposta na placa oscilante e a comparação entre os resultados numérico e experimental da força do PTO.

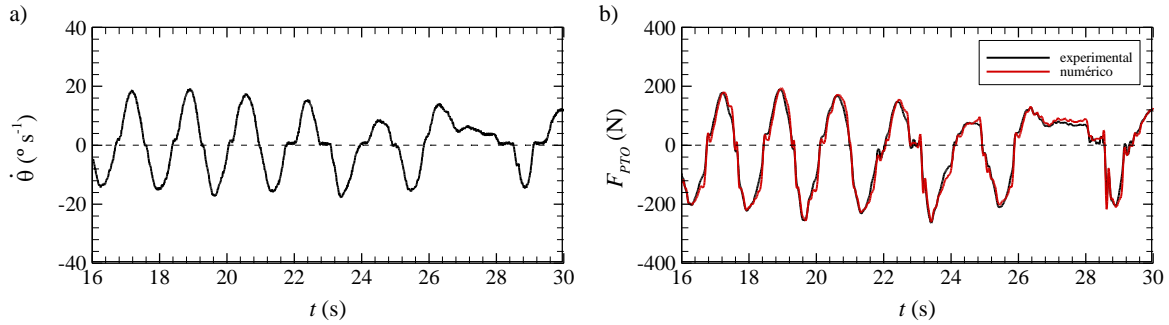


Figura 4. Série temporal: a) velocidade angular imposta na placa oscilante; b) comparação entre os resultados numérico e experimental da força do PTO.

Verifica-se, na Figura 4b, uma boa concordância entre os resultados numérico e experimental, com erro relativo médio inferior a 2%. Portanto, conclui-se que as características dinâmicas do PTO desenvolvidas com base no modelo físico do pistão hidráulico permitem simular com precisão o sistema PTO. É de realçar que os resultados apresentam boa concordância uma vez que a velocidade angular imposta numericamente é igual a obtida experimentalmente (Figura 4a).

Na Figura 5 apresentam-se as séries temporais da elevação da superfície livre na sonda WP1, rotação e velocidade angular da placa oscilante. Nota-se que existe uma pequena diferença entre os resultados numéricos e os dados experimentais, com um erro relativo médio inferior a 7%. Verifica-se que a elevação da superfície livre, obtida numericamente, segue a mesma evolução temporal da obtida experimentalmente, existindo, porém, diferenças em termos de amplitude de onda, sendo a amplitude obtida numericamente inferior à obtida experimentalmente (Figura 5a). Esta subestimação da elevação da superfície livre pode ser causada pela dissipação de energia excessiva

do método SPH, devido ao efeito da viscosidade artificial dada pela Equação (6). A diferença torna-se mais evidente para as sondas mais próxima da placa oscilante, onde o escoamento é muito mais complexo devido à interação onda-OWSC e à reflexão que produz ondas no sentido oposto às ondas incidentes. Nesta região notou-se que os fenómenos não lineares são mais pronunciados. A subestimação da elevação da superfície livre causa, por sua vez, uma menor rotação da placa oscilante (Figura 5b). No entanto, apesar destes fatores, a *DualSPHysics-Chrono* consegue ainda seguir razoavelmente a rotação da placa oscilante. Observa-se também, experimentalmente, um amortecimento da velocidade angular da placa oscilante quando a cava da onda passa pelo OWSC. Este fenómeno é também reproduzido pela *DualSPHysics-Chrono*.

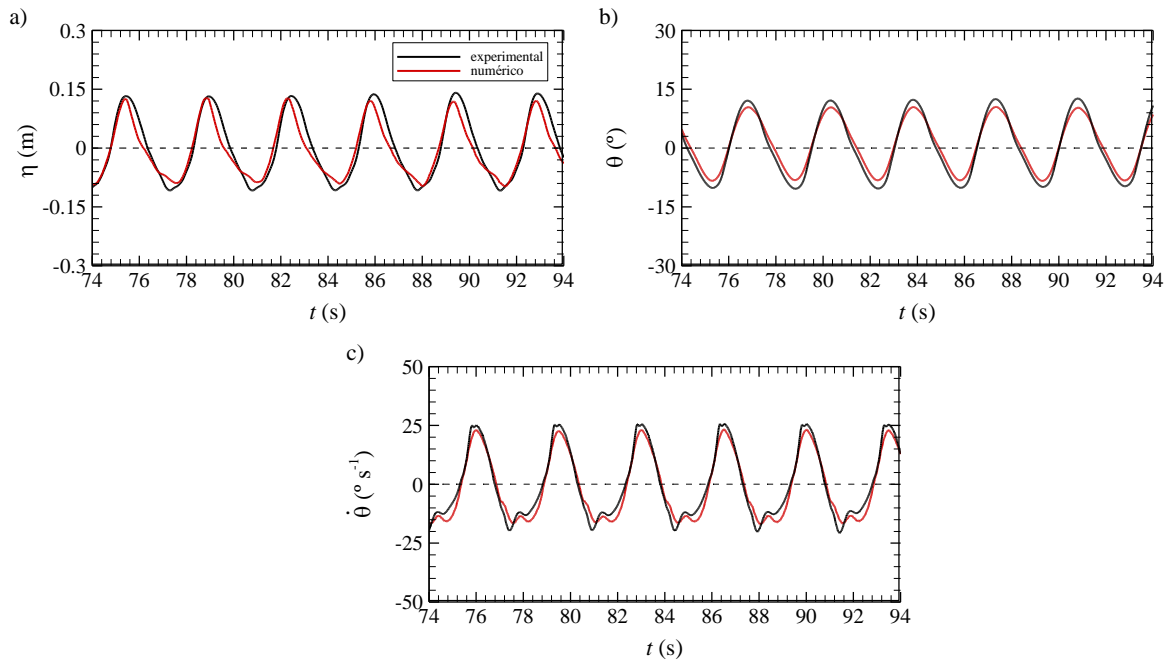


Figura 5. Série temporal: a) elevação da superfície livre na primeira sonda WP1; b) rotação da placa oscilante; c) velocidade angular da placa oscilante.

Conclui-se que, de modo geral, os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os dados experimentais, com um erro relativo médio inferior a 7%. Portanto, a *DualSPHysics-Chrono* pode ser uma ferramenta importante no apoio a projetos de obras marítimas onde existem interações onda-estrutura-estrutura.

4. Exploração do potencial da *DualSPHysics-Chrono*

Uma vez validada, a *DualSPHysics-Chrono* é aplicada a diferentes tipos de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas. Para ilustrar as capacidades desta ferramenta, apresenta-se

neste ponto exemplos da sua aplicação ao estudo de três dispositivos diferentes: OWSC, Wavestar e Turbina de maré.

4.1 OWSC

O OWSC aqui apresentado corresponde ao estudo realizado por Brito *et al.* 2017a. A placa oscilante encontra-se articulada num eixo horizontal junto ao fundo do canal, oscilando sobre a ação das ondas. O sistema PTO é modelado como um momento resistente no eixo de rotação da placa oscilante. Na Figura 6 apresenta-se o campo de velocidade da componente longitudinal, V , na proximidade do OWSC para diferentes instantes. Nota-se que o campo de velocidade apresenta efeitos não lineares, com enormes gradientes de velocidade na direção vertical e horizontal. Estes gradientes são fortemente dependentes da posição angular, θ , do OWSC. Portanto os modelos lineares até agora utilizados podem não ser adequados para a caracterização hidrodinâmica dos OWSCs, confirmando a utilidade da *DualSPHysics-Chrono*, que permite ter em conta estes efeitos.

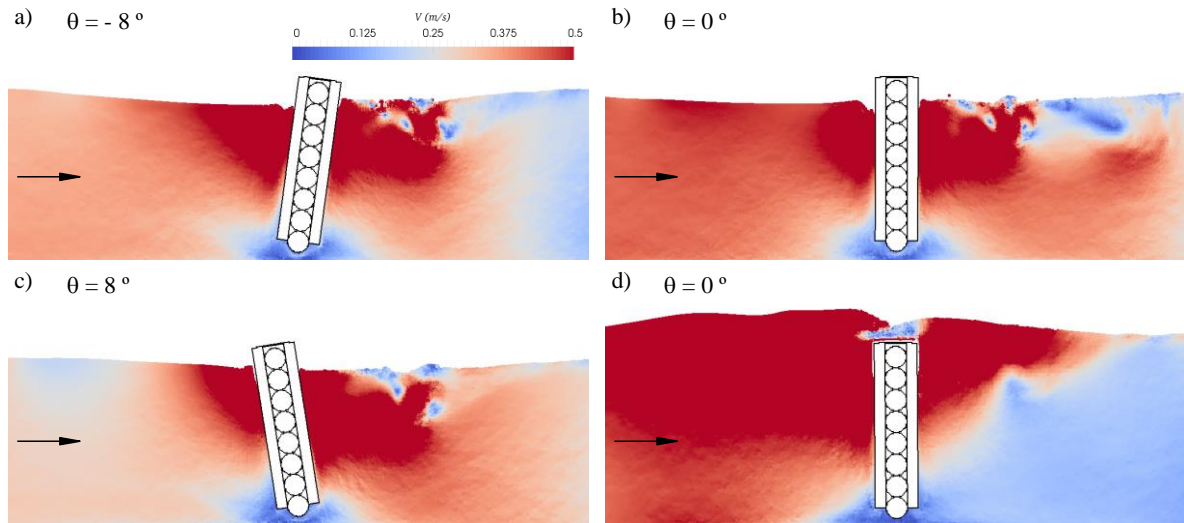


Figura 6. Campo de velocidade para diferente instante de tempo na zona próximo ao OWSC obtido com a *DualSPHysics-Chrono*.

4.2 Wavestar

O dispositivo Wavestar é composto por um conjunto de flutuadores semi-submersos em linha, ligados através de braços mecânicos à uma estrutura de suporte fixa. O sistema PTO encontra-se acoplado entre o braço mecânico e a estrutura de suporte. O Wavestar aqui apresentado corresponde ao estudo realizado por Canelas *et al.* 2017. Devido à disposição dos flutuadores, um Wavestar suficientemente longo poderia gerar energia continuamente para um grande espectro de ondas. Portanto a preocupação fundamental de projeto de Wavestar é a perda de eficiência devido

aos efeitos de sombra nos flutuadores. Este fenómeno é fortemente não linear e, portanto, a *DualSPHysics-Chrono* pode ser importante no apoio a projetos de Wavestar. Na Figura 7 apresenta-se a elevação da superfície na zona adjacente ao Wavestar obtida com a aplicação da *DualSPHysics-Chrono*.

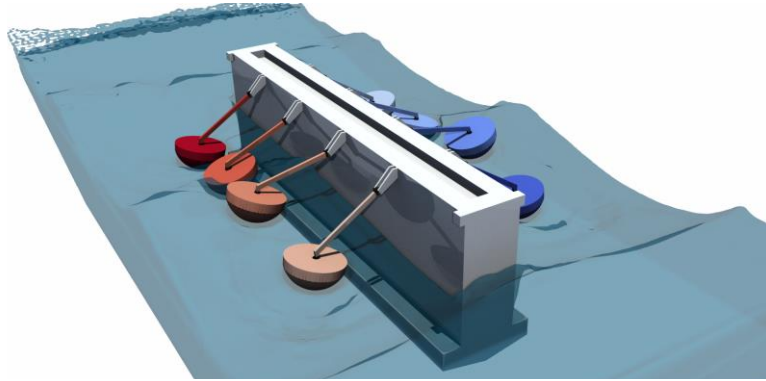


Figura 7. Simulação do Wavestar com a *DualSPHysics-Chrono*.

As séries temporais da força, F_f , e do momento, M_f , nos flutuadores obtidos com a aplicação da *DualSPHysics-Chrono* são apresentadas na Figura 8. Como era expectável, o flutuador 1 (o flutuador que se encontra mais afastado da praia) sofre maior força e momento do que os flutuadores 2, 3 e 4. As amplitudes nos outros flutuadores são menores devido aos efeitos de sombra. O momento nos flutuadores é provocado pela mudança do ângulo dos flutuadores relativamente aos braços mecânicos. Esta rotação dos flutuadores é causada pela perturbação da propagação da onda na zona adjacente ao Wavestar provocada pela estrutura de suporte.

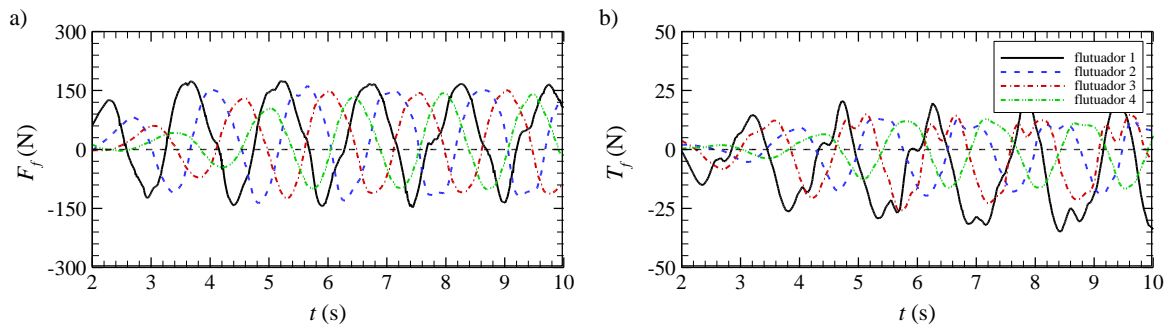


Figura 8. Série temporal: a) força nos flutuadores 1 a 4; b) momento nos flutuadores 1 a 4.

4.3 Turbina de maré

A Turbina de maré aqui simulada corresponde ao estudo realizado por Canelas *et al.* 2017. Esta turbina é composta por três pás, um rotor com controlador passivo e um estator ligado à uma

estrutura de suporte vertical, fixa ao fundo do canal, conforme se mostra na Figura 9. A dinâmica das pás é muito lenta e a direção da turbina é controlada pelo controlador passivo, otimizando assim o alinhamento com o sentido das correntes. Na Figura 9 apresentam-se as linhas de corrente obtidas pela aplicação da *DualSPHysics-Chrono*. Estas linhas de corrente foram obtidas para 15 s de escoamento. Como se pode verificar, conforme previsto, esta ferramenta permite simular o estrangulamento das linhas de corrente nas zonas próximas à turbina, com um maior estrangulamento no intradorso relativamente ao extradorso das pás. Esta diferença no estrangulamento das linhas de corrente provoca diferenças de pressões que gera uma força de sustentação responsável pela rotação do rotor.

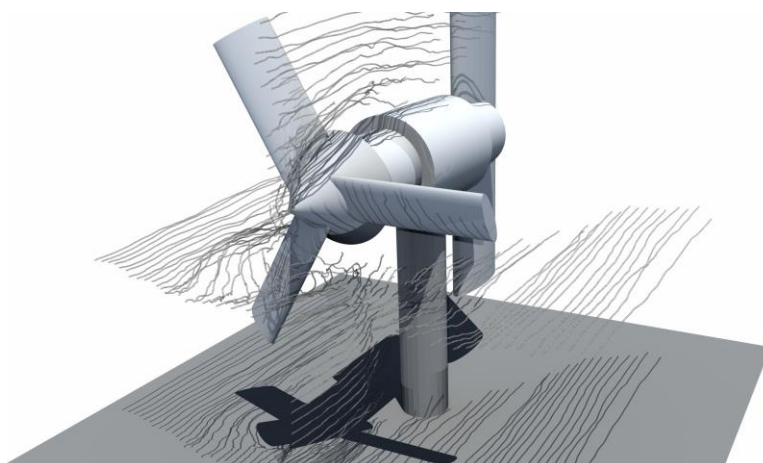


Figura 9. Simulação da Turbina de maré com a *DualSPHysics-Chrono*.

5. Conclusões

Nesta comunicação é apresentada uma Ferramenta Integrada, designada de *DualSPHysics-Chrono*, recentemente desenvolvida para o apoio a projetos de estruturas marítimas, tais como dispositivos de aproveitamento de energia das ondas. Esta ferramenta baseia-se no acoplamento do código *DualSPHysics* e da biblioteca do *Project Chrono*, onde o *DualSPHysics* calcula a interação da onda com a estrutura (interação onda-estrutura) e o *Project Chrono* calcula a interação da estrutura com os diversos corpos rígidos que interagem entre si através de contatos e restrições mecânicas (interação estrutura-estrutura).

A validação da aplicabilidade da *DualSPHysics-Chrono* foi feita através da comparação dos resultados numéricos com dados de ensaios experimentais em modelo físico reduzido de um OWSC especialmente efetuados para esta validação. Os resultados numéricos da elevação da superfície

livre, rotação e velocidade angular do OWSC obtidos numericamente apresentam boa concordância com os dados experimentais, com um erro relativo médio inferior a 7%.

Para ilustrar a aplicabilidade da *DualSPHysics-Chrono* a estudos de outras obras marítimas onde existem interações onda-estrutura-estrutura, foi apresentada a sua aplicação a três dispositivos diferentes de aproveitamento de energia das ondas: um OWSC, um Wavestar e uma Turbina de maré. Os resultados numéricos permitem caracterizar praticamente todos os parâmetros do projeto, como por exemplo, campos de velocidade, linhas de corrente, elevações da superfície livre, forças e momentos que atuam nos dispositivos, simulando os importantes efeitos não lineares e confirmando que a *DualSPHysics-Chrono* pode ser uma ferramenta importante no apoio a projetos deste tipo de obras marítimas.

Agradecimentos

O autor agradece à FCT o financiamento da bolsa PD/BD/705970/2014 e aos orientadores Rui M. L. Ferreira, Maria G. Neves e Luis Teixeira.

Referências

Altomare C., Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Gómez-Gesteira M., Suzuki T., Verwaest T. 2015. "Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures", *Coastal Engineering*, 96:1-12.

Andersen T. L., Frigaard P. 2014. "Wave Generation in Physical Models: Technical documentation for AwaSys 6", Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.

Brito M., Canelas R. B., Ferreira R. M. L., García-Feal O., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Neves M. G. 2016. "Coupling between DualSPHysics and Chrono-Engine: towards large scale HPC multiphysics simulations", 11th SPHERIC Workshop, Munich, Germany.

Brito M., Canelas R. B., Ferreira R. M. L., García-Feal O., Domínguez J. M., Crespo A. J. C., Teixeira L., Neves M. G. 2017a. "Application, modelling and validation of an OWSC using DualSPHysics", 12th International SPHERIC Workshop, Ourense, Spain.

Brito M., Teixeira L., Canelas R. B., Ferreira R. M. L., Neves M. G. 2017b. "Experimental and numerical studies of dynamic behaviours of a hydraulic power take-off cylinder using spectral representation method", *Journal of Tribology*.

Canelas R. B., Brito M., Ferreira R. M. L., Feal O. G., Domínguez J. M., Crespo A. J. C. 2017. "Dualsphysics, applications of a HPC multiphysics simulation framework", 12th International SPHERIC Workshop, Ourense, Spain.

- Crespo A. J. C., Altomare C., Domínguez J. M., González-Cao J., Gómez-Gesteira M. 2017. "Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with Smoothed Particle Hydrodynamics", *Coastal Engineering*, 126:11-26.
- Crespo A. J. C., Domínguez J. M., Rogers B. D., Gómez-Gesteira M., Longshaw S., Canelas R., Vacondio R., Barreiro A., García-Feal O. 2015. "DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)", *Computer Physics Communications*, 187:204-216.
- Didier E., Neves M. G. 2010. "Modelação da Interação 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.
- Falcão A. F. O. 2010. "Wave energy utilization: A review of the technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:899-918.
- Falcão, A. F. O. 2007. "Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator", *Ocean Engineering*, 34(14-15): 2021-2032.
- Gingold, R. A., Monaghan, J. J. 1977. Smoothed Particle Hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181:375-389.
- Lucy, L. B. 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82, 1013-1024.
- Mansard E., Funke E. 1980. "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", *Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 154-173.
- Monaghan J. J. 1992. "Smoothed Particle Hydrodynamics", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30:543-574.
- Monaghan J. J. 2005. "Smoothed particle hydrodynamics", *Reports on Progress in Physics*, 68:1703-1759.
- Schmitt P., Asmuth H., Elsaesser B. 2016. "Optimising power take-off of an oscillating wave surge converter using high fidelity numerical simulations", *International Journal of Marine Energy*, 16:196-208.
- Tasora A., Serban R., Mazhar H., Pazouki A., Melanz D., Fleischmann J., Taylor M., Sugiyama H., Negrut D. 2016. "Chrono: An Open Source Multi-physics Dynamics Engine", *Springer International Publishing, Lecture Notes in Computer Science*, 19-49.
- Tran, X. B., Hafizah, N., Yanada, H. 2012. "Modeling of dynamic friction behaviors of hydraulic cylinders", *Mechatronics*, 22(1):65-75.

Yanada, H., Sekikawa, Y. 2008. "Modeling of dynamic behaviors of friction", *Mechatronics*, 18(7): 330-339.