

Validación del modelo SPH para problemas de ingeniería

S. FERREIRO CARBALLAL*, A.J.C. CRESPO, J.M. DOMÍNGUEZ, A. BARREIRO,
M. GÓMEZ-GESTEIRA

* *sferreirocarbballal@gmail.com*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo,
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) es un método numérico lagrangiano para la resolución de problemas de dinámica computacional de flúidos. DualSPHysics es un código SPH que permite el estudio de problemas reales de ingeniería. En este trabajo se valida este software con dos casos de estudio, comparando los datos numéricos con datos experimentales. El primer caso de validación tiene como objetivo demostrar la capacidad del modelo para propagar olas. El segundo caso de validación consiste en la rotura de una presa en donde se estudia la interacción entre el fluido y la estructura en el que está inicialmente encerrado.

Palabras Clave: SPH, Computación Dinámica de Fluidos, DualSPHysics.

1. Introducción

El modelado numérico se usa como una herramienta muy útil en el campo de la ingeniería y de la ciencia para resolver problemas complejos. La principal ventaja de usar estos métodos es la capacidad de simular cualquier escenario por muy complejo que éste sea sin la necesidad de construir costosos modelos físicos a escala. Además, la simulación numérica puede proporcionar datos físicos que pueden ser difícilmente, o incluso imposibles de medir en un modelo real. Es decir, el desarrollo y uso de este tipo de herramientas numéricas permite avanzar en diferentes campos de investigación más deprisa y a menores costes.

Existen dos aproximaciones para describir las ecuaciones físicas que

gobiernan estos métodos; la Euleriana y la Lagrangiana. Los métodos basados en una malla (elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos) son actualmente muy robustos, están bien desarrollados y han sido aplicados a un amplio abanico de aplicaciones en las que proporcionan resultados muy precisos. Estos métodos de malla son ideales para sistemas con dominios perfectamente delimitados y para simulaciones donde los contornos permanecen fijos. Sin embargo la creación de la malla puede resultar muy ineficiente si el sistema es complejo. En este trabajo nos centraremos en métodos sin malla, los cuales se usan tanto en mecánica de sólidos como en dinámica de fluidos. Históricamente, la dinámica de fluidos computacional se ha centrado en métodos que se basan en una malla. El uso de métodos lagrangianos ha

experimentado un gran crecimiento en la última década. En este trabajo se usan métodos sin malla en los que se sustituye la misma por un conjunto de nodos distribuidos de manera arbitraria. Se espera así que el modelo sea más flexible y versátil que los convencionales métodos basados de malla, especialmente para aplicaciones en las que se estudien geometrías muy complejas, grandes deformaciones, discontinuidades en el flujo del fluido y singularidades del material.

Una de las líneas de investigación del grupo EPhysLab de la Universidad de Vigo es la dinámica computacional de fluidos dentro de la cual se ha desarrollado el código SPH llamado SPPhysics (Gómez-Gesteira *et al.*, 2012a; Gómez-Gesteira *et al.*, 2012b) centrando su aplicación en la propagación de las olas y en su interacción con estructuras costeras. DualSPPhysics (www.dual.sphysics.org) es un código SPH basado en la formulación implementada en SPPhysics, el cual permite simular millones de partículas en un tiempo razonable, lo que hace posible el estudio de problemas reales de ingeniería. DualSPPhysics ha sido validado con datos experimentales mostrando fiabilidad, precisión y eficiencia (Crespo *et al.*, 2011) y se ha aplicado en problemas de ingeniería (Barreiro *et al.*, 2013 y Altomare *et al.*, 2014).

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la fiabilidad del modelado numérico con DualSPPhysics cuando se estudia la propagación de olas y su interacción con estructuras.

2. Método SPH

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) es un método numérico para la resolución de problemas de dinámica computacional. Se trata de un método Lagrangiano, es

decir la malla se sustituye por un conjunto de nodos distribuidos de manera arbitraria esperándose así que el modelo sea más flexible y versátil que los convencionales métodos basados de malla. En los últimos años se ha aplicado en numerosos campos de la dinámica de fluidos. En particular, reproduce fácilmente fenómenos de superficie libre en los que se estudien la rotura de olas, interacciones fluido-estructura y comportamientos no lineales de fluidos.

El método SPH se basa en la teoría de los interpolados integrales. El principio fundamental es aproximar cualquier función $A(\mathbf{r})$ por:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (1.1)$$

donde \mathbf{r} es el vector de posición; W es la función de peso o kernel; h es la distancia de interacción llamada distancia de suavizado que controla el dominio de Ω (Figura 1).

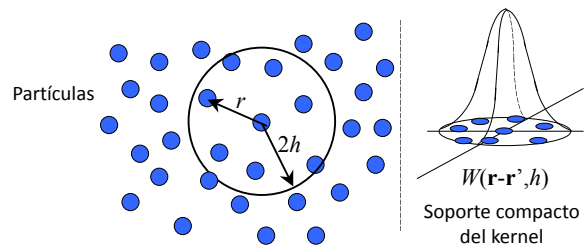


Fig. 1. Esquema del dominio de influencia y soporte compacto del kernel.

La aproximación 1.1, en notación discreta, lleva a la siguiente aproximación de la función en la posición de la partícula a:

$$A_a = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (1.2)$$

donde el sumatorio se realiza sobre las partículas vecinas b que se encuentran en la región de soporte compacto de la función kernel. La masa y la densidad de las partículas vecinas se denotan

como m_b y ρ_b respectivamente y $W_{ab}=W(r_a-r_b,h)$ es la función de peso o kernel.

De este modo, en el formalismo SPH pasamos de la notación continua (1.1) a la notación discreta (1.2), es decir, pasamos de integrales a sumatorios. Por lo tanto, SPH discretiza el fluido como un conjunto de puntos o nodos llamados partículas.

En SPH se resuelven las integrales de las ecuaciones de la dinámica de fluidos en cada punto en el formalismo discreto, calculando los valores de las variables físicas representativas (velocidad, posición, densidad y presión) para una partícula como interpolación de los valores de las partículas más próximas. Las principales ecuaciones que se resuelven en cada par de interacción entre partículas son la ecuación de momento (para calcular la tasa de variación temporal de la velocidad o aceleración) y la ecuación de continuidad (para calcular la tasa de variación temporal de la densidad).

Para representar el paso de un medio continuo, como lo es un fluido, a un medio discreto, partículas, se emplea la función kernel. Esta función tiene un soporte compacto dentro de una región que viene determinada por una distancia mucho más pequeña que la escala característica del problema. Esta distancia, definida por el kernel, es la distancia de interacción de las partículas. El valor de h debería ser mayor que la distancia inicial de separación entre partículas dp .

La formulación básica del método SPH se describe en detalle en los artículos de Monaghan (1992), Liu (2003) y Monaghan (2005).

3. Propagación del oleaje

El primer caso de validación tiene como objetivo demostrar la capacidad del

modelo para generar y propagar olas. Las elevaciones del agua, medidas en diferentes posiciones de un tanque de olas experimental, se compararán con los valores de la simulación numérica. De este modo, con el modelo DualSPHysics simulamos un tanque numérico con las mismas dimensiones, generamos las mismas olas y medimos la elevación del agua en las mismas localizaciones que en el tanque físico.

El experimento se realizó en el canal de oleaje a escala llamado CIEMito que forma parte de las infraestructuras experimentales del CIEMLAB dentro del Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Investigadores del grupo EPhysLab llevaron a cabo diferentes ensayos en este canal y entre ellos se encuentra el utilizado para esta primera validación.

El experimento consistió en la generación de olas regulares (0.07m de altura y 1s de periodo) y la propagación de las mismas a lo largo de un tanque. La elección de la longitud del tanque (5.15m), el periodo de las olas generadas (1s) y la duración del experimento (10s) se ha elegido para evitar problemas de reflexión cuando las olas alcanzan el final del tanque.

Durante el experimento se tomaron medidas de la elevación del agua (η) usando medidores situados a 0.38m (WG1), a 1.83m (WG2) y a 3.12m (WG3) del pistón. Las dimensiones del caso y los puntos de medida se pueden observar en la Figura 2.

El experimento tiene una naturaleza completamente bidimensional por lo que la simulación con DualSPHysics se realiza en un tanque numérico 2D. Se han llevado a cabo tres simulaciones que difieren en su resolución, esto es, en el número de partículas, que como ya se explicó depende de la separación inicial entre ellas cuando se genera el caso.

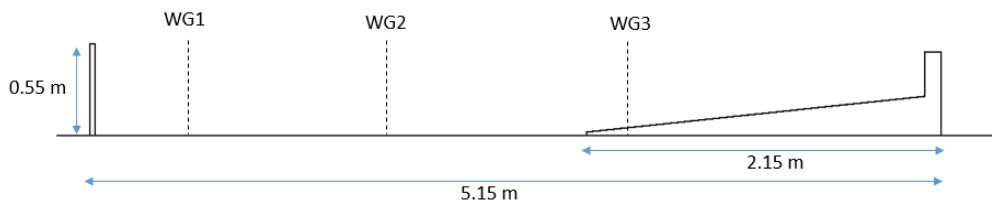


Fig.2. Configuración inicial del experimento en el canal CIEMito

En la Tabla 1 se pueden ver los diferentes valores del número de partículas (np), de la separación inicial entre partículas (dp) y los tiempos de cálculo que llevaron cada una de las simulaciones.

	dp	np	runtime
Test1.1	0.01	13,371	11.1 min
Test1.2	0.005	52,706	48.0 min
Test1.3	0.0025	208,926	230.5 min

TABLA 1. Diferentes resoluciones y tiempos de ejecución con DualSPHysics para el caso de propagación de oleaje.

En la Figura 3 se muestran diferentes instantes de la simulación numérica del

Test1.3 usando el modelo DualSPHysics.

Para realizar la medida de elevación del agua se analizan un conjunto de puntos en la vertical que se quiere estudiar y se calcula en ellos el valor de la masa, interpolando la masa de las partículas fluidas vecinas. La elevación máxima de agua se identifica con el punto cuya masa interpolada sea mayor que la masa de referencia (la cual se estima como la mitad de la masa correspondiente a una partícula). Las elevaciones del agua (η) experimentales y numéricas para las tres sondas se representan en la Figura 4.

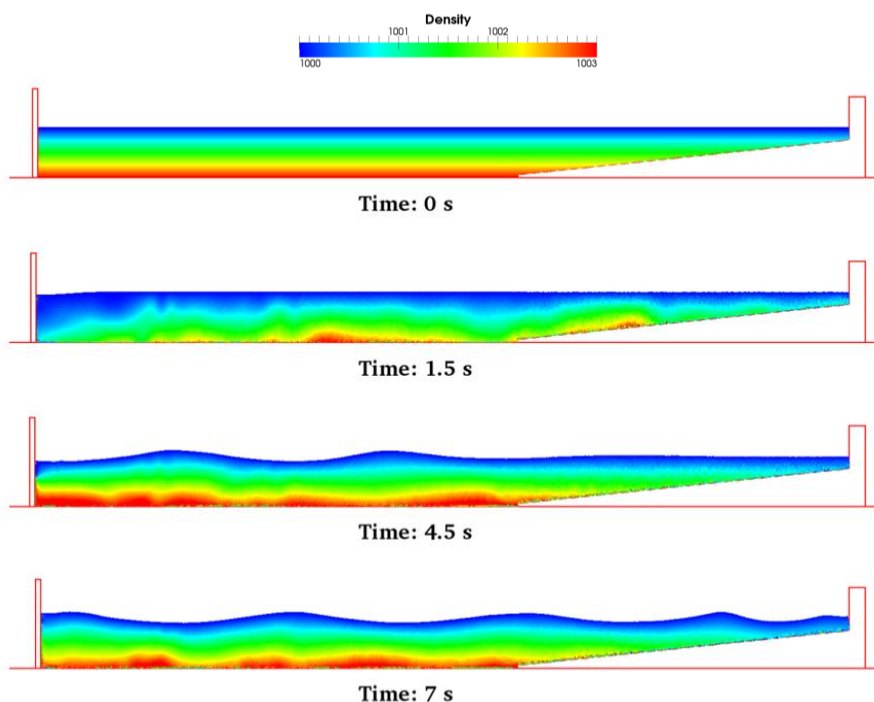


Fig. 3. Diferentes instantes de la simulación del Test1.3 con DualSPHysics. El color de las partículas representa los valores de densidad.

Los resultados obtenidos con DualSPHysics concuerdan con los datos experimentales (Figura 4). En los tres puntos de medida se obtiene una mayor

convergencia entre los datos numéricos y experimentales cuanto mayor es la resolución (dp menor). Por otro lado, para posiciones más cercanas al pistón

(WG1) los resultados numéricos se asemejan a los experimentales mucho más que para posiciones más alejadas (WG3). Es decir, el rango de aplicación de DualSPHysics para propagar oleaje ha de ser tenido en cuenta y este modelo numérico debe aplicarse siempre sólo para propagar olas en las proximidades de la costa.

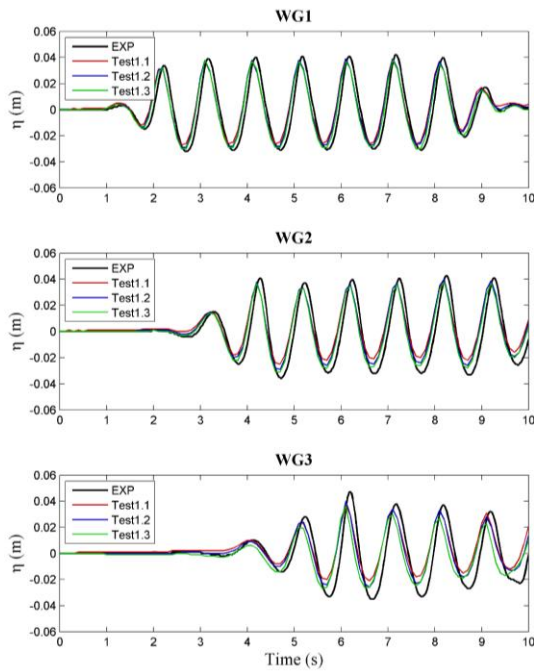


Fig.4. Comparación de la elevación del agua experimental y numérica calculada con DualSPHysics en WG1, WG2 y WG3.

4. Rotura de presa

El segundo caso de validación consiste en la rotura de una presa en donde se estudia la interacción entre el fluido y la estructura en el que está inicialmente encerrado. El experimento que se va a reproducir con el modelo DualSPHysics es el descrito en el trabajo de Fraccarollo & Toro (1995).

En ese experimento se estudió el comportamiento de un fluido confinado en un tanque. El agua ocupa un volumen de 2m x 1m y 0.6m de alto. En mitad de la pared frontal del tanque se encuentra una compuerta (de 0.4m de

extensión) que se levanta hacia arriba para liberar el fluido.

La Figura 5 muestra las dimensiones del experimento, de la compuerta y las posiciones en las que se midieron las elevaciones de agua. En total son seis puntos de medida; dos puntos interiores en donde se encuentra inicialmente confinado el fluido; dos puntos en la posición de la compuerta y dos en el dominio libre por el que discurrirá el agua una vez liberada.

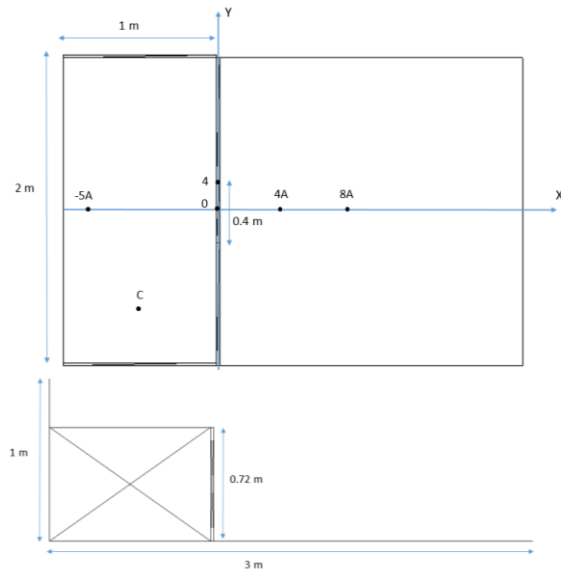


Fig. 5. Configuración inicial del experimento en Fraccarollo & Toro (1995).

Las posiciones de los puntos de medida se encuentran resumidas en la Tabla 2. Las coordenadas X,Y se corresponden con las direcciones X,Y representadas en la Fig. 5.

Posición	-5A	C	0	4	4A	8A
X (m)	0.18	0.51	1	1	1.32	1.72
Y (m)	1	0.35	1	1.16	1	1

TABLA 2. Posiciones de los puntos de medida en el caso de rotura de presas.

El tiempo de simulación de este experimento es de 10s, transcurrido el cual toda el agua del tanque se vacía puesto que no existen paredes laterales. Una vez más, modificando la distancia entre partículas (dp), variamos el número de partículas (np) en la simulación (Tabla 3). Éste sí es un caso

tridimensional y puede observarse como el número de partículas aumenta al disminuir dp . Del mismo modo, se puede ver como el tiempo de cálculo se incrementa drásticamente con mayores resoluciones.

En la Figura 6 se muestran diferentes instantes de la simulación numérica del Test2.4 usando el modelo DualSPHysics.

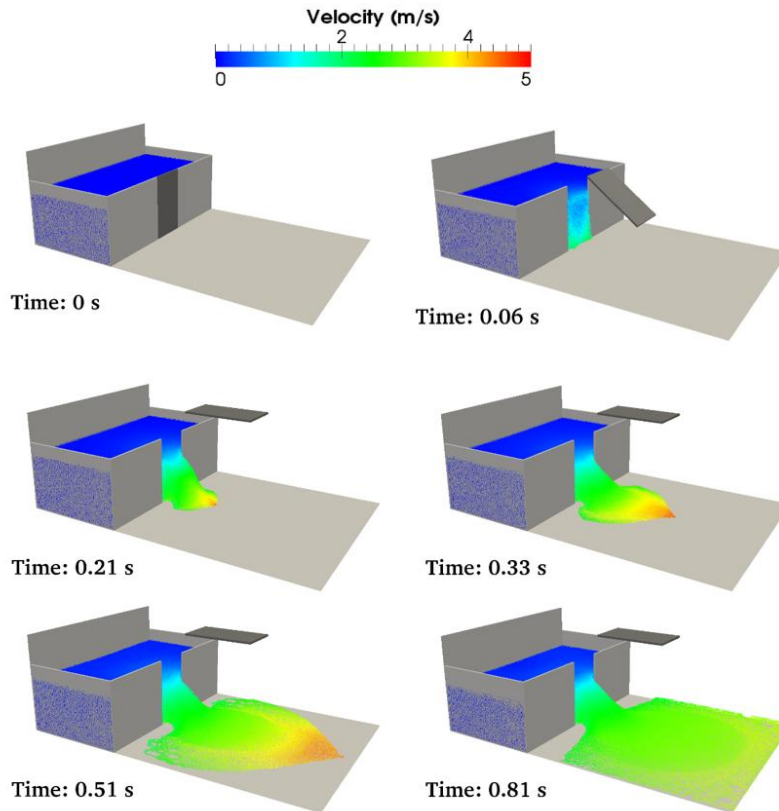


Fig. 6. Diferentes instantes de la simulación del Test2.4 con DualSPHysics. El color de las partículas representa los valores de velocidad.

A continuación se comparan los datos experimentales con los numéricos. En la Figura 7 se representan los valores de la elevación del agua a lo largo del tiempo en los seis puntos de medida (Tabla 2). Se compara el valor experimental con los valores numéricos obtenidos para las tres resoluciones.

Para los puntos situados dentro de la estructura (-5A y C), la altura del fluido decrece con el tiempo una vez que se levanta la compuerta ya que el agua fluye hacia la parte exterior.

	dp	np	Runtime (h)
Test2.1	0.03	53,869	0.24
Test2.2	0.02	171,919	0.80
Test2.3	0.01	1,288,296	10.44
Test2.4	0.0075	2,986,535	31.70

TABLA 3. Diferentes resoluciones y tiempos de ejecución con DualSPHysics para el caso de rotura de presas.

En los puntos 0 y 4, situados en el centro y extremo de la posición inicial de la compuerta, la elevación del agua disminuye inicialmente al abrirse ésta, y, a continuación, se observa un repunte ascendente para luego continuar decreciendo. Este repunte se debe a que el fluido confinado tras la puerta, una vez que ésta se ha abierto completamente, adquiere una mayor velocidad de vaciado. En la simulación numérica se registra el mismo comportamiento.

Analizando el comportamiento del fluido en los puntos situados en el exterior de la mini-presa (4A y 8A), se observa una ausencia inicial de agua hasta que el fluido alcanza estas posiciones. Después de un ascenso repentino inicial, la elevación desciende según se libera el agua confinada en la estructura y se vacía todo el fluido del experimento ya que no existen paredes laterales. Éste descenso está más marcado en el punto exterior más cercano al hueco que deja la compuerta abierta (4A) puesto que la altura del

fluido es mayor que en el punto más alejado (8A) donde el nivel es más continuo durante los primeros 10s.

En todos los casos se puede observar como con una mayor resolución de la simulación (mayor número de partículas) los resultados son más cercanos a los experimentales, siendo el test2.4 el que proporciona la mejor validación. Los peores resultados se registran para el punto 8A por ser éste el más alejado y en el cual la resolución tiene mayor relevancia para medir con precisión la elevación del agua.

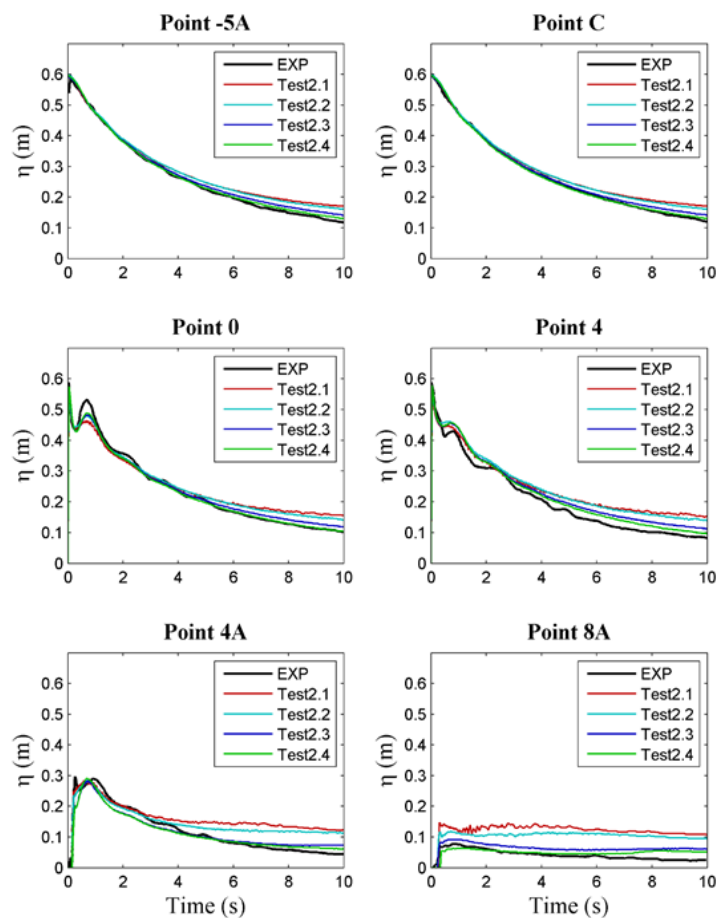


Fig.7. Comparación de la elevación del agua experimental (Fraccarollo & Toro, 1995) y numérica calculada con DualSPHysics.

4. Conclusiones

El modelo numérico DualSPHysics ha mostrado ser preciso en el estudio de la propagación de olas y su interacción con estructuras costeras.

En los dos casos de validación se han comparado los datos experimentales relativos a elevaciones de agua con datos numéricos y la buena concordancia entre ellos permite demostrar que el software es una

herramienta fiable para reproducir estos dos fenómenos. Además se ha

Referencias

- Altomare, C., Crespo, A.J.C., Rogers, B.D., Domínguez, J.M., Gironella, X., Gómez-Gesteira, M. (2014). Numerical modelling of armour block sea breakwater with Smoothed Particle Hydrodynamics. *Computers and Structures*, 130: 34-45.
- Barreiro, A., Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Gómez-Gesteira, M. (2013). Smoothed Particle Hydrodynamics for coastal engineering problems. *Computers and Structures*, 120(15): 96-106.
- Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Barreiro, A., Gómez-Gesteira, M. & Rogers, B.D., (2011). GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods. *PLoS ONE*, 6(6), e20685.
- Fraccarollo, L., Toro, E.F. (1995). Experimental and numerical assessment of the shallow water model for 2D dam-break type problems. *J. Hydr. Res.*, 33: 843-864.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Crespo, A.J.C., Dalrymple, R.A., Narayanaswamy, M., Domínguez, J.M. (2012). SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 1: Theory and Formulations. *Computers & Geosciences*, 48: 289-299.
- Gómez-Gesteira, M., Crespo, A.J.C., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Domínguez, J.M., Barreiro, A. (2012). SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 2: Efficiency and test cases. *Computers & Geosciences*, 48: 300-307
- Liu, G. R. (2003). *Mesh Free methods: Moving beyond the infinite element method*. CRC Press.
- Monaghan, J. J. (1992). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Rev. Astron. Appl.*, 30:543-574.
- Monaghan, J. J. (2005). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*, 68:1703-1759.