

Modelado físico y numérico de la interacción entre olas y objetos flotantes

J. LEDO-RODRÍGUEZ*¹, I. MARTINEZ-ESTÉVEZ¹, C. ALTOMARE²,
J. M. DOMÍNGUEZ¹, A. J. C. CRESPO¹, M. GÓMEZ-GESTEIRA¹

*jledo@alumnos.uvigo.es

¹*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Universidade de Vigo, Ourense*

²*Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*

RESUMEN

Este artículo se ha centrado en estudiar la interacción entre olas y objetos flotantes utilizando el modelado físico y el modelado numérico. En el caso del modelado físico se realizaron experimentos en el canal de oleaje nanoCIEM, que permite generar olas monocromáticas con un pistón. Como objeto flotante, se utilizó una esfera de dimensiones y masa conocidas que fue construida con una impresora 3D. Las simulaciones numéricas fueron realizadas con el código DualSPHysics, que es un modelo Lagrangiano de dinámica computacional de fluidos basado en el método de partículas *Smoothed Particles Hydrodynamics* (SPH). Se han realizado varios experimentos para tres condiciones de oleaje distintas. En primer lugar, se ha validado la generación, propagación y absorción de oleaje en el tanque numérico. Después, se ha colocado un objeto flotante libre en el tanque de olas y se han analizado sus desplazamientos longitudinales y verticales respecto a su posición inicial. Por último, se ha añadido al objeto flotante una línea de amarre conectada al fondo del tanque y se ha estudiado cómo se restringen sus desplazamientos respecto al caso anterior. La validación realizada ha demostrado que DualSPHysics es capaz de reproducir la interacción entre olas y objetos flotantes libres o amarrados.

Palabras Clave: modelado físico, nanoCIEM, modelado numérico, DualSPHysics, CFD, SPH, olas, boya.

1. Introducción

La interacción entre el oleaje y un objeto flotante es un problema complejo no lineal que se puede resolver utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional, CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Los métodos CFD tienen en cuenta las fuerzas viscosas y las características no lineales de la interacción entre las olas del mar y un objeto. Los códigos CFD se basan en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones se pueden resolver utilizando una aproximación

Euleriana (generalmente asociado al uso de una malla) o una aproximación Lagrangiana (usando métodos sin malla).

Algunos de los métodos numéricos para dinámica de fluidos más populares y utilizados están basados en mallas, como son los métodos de volúmenes finitos. Sin embargo, en algunos casos, estos métodos tienen dificultades para modelar geometrías complejas en movimiento o grandes deformaciones de la superficie libre. Un ejemplo de estos casos son las olas del mar impactando

con objetos flotantes donde el flujo de agua se separa y se reconstruye (las olas pueden romper, rebasar el objeto, etc.).

Este trabajo se centra en el análisis de la interacción entre olas y objetos flotantes utilizando tanto el modelado físico como el modelado numérico. Se han realizado varios experimentos en el canal de oleaje nanoCIEM del grupo EPhysLab de la Universidad de Vigo y simulaciones numéricas con el código DualSPHysics.

El modelado físico es una representación a escala, es decir, una maqueta del experimento real escalada respetando precisos criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Los ensayos en canales físicos suelen acarrear un coste y consumo de tiempo elevados y necesitan unas instalaciones adecuadas para cada ensayo. Además, hay que considerar los efectos de escala cuando se ensayan problemas a una escala diferente a la de la realidad.

El modelado numérico aplicado a la dinámica de fluidos, CFD, es el resultado de utilizar métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido. Durante las últimas décadas, el modelado numérico ha tenido una gran influencia en todos los campos de la ciencia. El gran desarrollo que han experimentado los equipos de cálculo en los últimos años permite realizar simulaciones complejas con gran precisión y en tiempos razonables. Además, el modelado numérico puede proporcionar información adicional que no es posible obtener con la observación experimental. Sin embargo, el modelado numérico no sustituye al modelado físico, ya que éste sigue siendo usado como solución de referencia para confirmar que los resultados numéricos obtenidos son válidos.

Una de las funciones más destacadas del modelado numérico tras su validación es reducir el número de pruebas experimentales ya que, algunos diseños, pueden descartarse directamente con los resultados numéricos. De este modo, se consigue reducir el número de ensayos físicos y ahorrar tiempo y dinero, por lo tanto, el modelado numérico complementa al modelado físico.

Tal y como se ha comentado anteriormente, los métodos numéricos para dinámica de fluidos más populares están basados en mallas, como son los métodos de volúmenes finitos. Sin embargo, en algunos casos, estos métodos tienen dificultades a la hora de modelar geometrías complejas en movimiento y grandes deformaciones de la superficie libre. Una de las mejores opciones para modelar la interacción entre olas y objetos flotantes es el método SPH (del inglés *Smoothed Particle Hydrodynamics*).

El método SPH es un modelo numérico Lagrangiano desarrollado durante la década de 1970 para resolver problemas de astrofísica y cosmología (Gingold y Monaghan, 1977; Lucy, 1977). En las últimas décadas, se ha utilizado con éxito para estudiar diferentes situaciones de la dinámica de fluidos, tales como la propagación del oleaje y la interacción entre olas y estructuras costeras u objetos flotantes (Gotoh y Khayyer, 2018; Luo et al., 2021).

El código DualSPHysics (Domínguez et al., 2022) es un software basado en el método SPH (Violeau, 2012) y desarrollado por el grupo EPhysLab de la Universidad de Vigo. DualSPHysics se ha desarrollado especialmente para simular problemas de la superficie libre de agua. Las investigaciones del grupo EPhysLab se centran, sobre todo, en la propagación del oleaje y la interacción entre olas y estructuras flotantes o fijas

tanto en 2D como en 3D (Crespo *et al.*, 2011; Altomare *et al.*, 2015; Domínguez *et al.*, 2019).

Para modelar el comportamiento de una boya flotante amarrada al fondo es necesario acoplar a DualSPHysics la librería MoorDyn, que resuelve la dinámica de un sistema de amarres.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la capacidad que tiene el software DualSPHysics para simular la propagación de olas regulares y su interacción con estructuras flotantes libres y amarradas al fondo en un entorno cercano a la costa.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelado físico

Los ensayos físicos se han llevado a cabo en el canal de oleaje de muy pequeña escala llamado nanoCIEM (Figura 1). Este canal fue construido por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de

Cataluña (UPC). Esto incluye también el sistema de generación de oleaje, a nivel de hardware y de software.

El nanoCIEM tiene una longitud total de 200 cm, con una sección útil de 20 cm de ancho y 35 cm de alto. Las paredes del tanque son de metacrilato transparente y tienen un espesor de 1 cm. La mínima y la máxima profundidad de agua permitidas son 12 y 15 cm, respectivamente. Para su funcionamiento, el nanoCIEM necesita una alimentación de corriente continua a 12 V y una conexión a un ordenador portátil para controlar el sistema de generación.

El canal de oleaje tiene tres partes básicas: i) la zona de generación situada en un extremo del tanque y que contiene el sistema de generación de oleaje, ii) la zona de disipación situada en el extremo opuesto a la zona de generación y que está llena de virutas de plástico retenidas por una rejilla, iii) la zona de ensayos que se encuentra entre las dos anteriores y es donde tiene lugar la interacción entre las olas y los objetos flotantes.



Fig. 1. Canal de olas nanoCIEM.

El tanque tiene un sensor de ultrasonidos de pequeño formato que se puede mover a lo largo del canal. El sensor es el modelo XX918A3F1M12 de la empresa Schneider Electric, con un rango máximo de 50 cm y un tiempo de respuesta de 25 ms. Su finalidad es medir la variación de la superficie libre. Para ello, el sensor suministra al software de generación una señal de voltaje (0-10 V)

proporcional a la distancia entre él y la superficie libre de agua.

La generación de olas se lleva a cabo mediante una pala del tipo pistón, que está situada en uno de los extremos del tanque. El movimiento del pistón lo realiza un actuador lineal con una carrera máxima de 10 cm y una velocidad de respuesta de 1.6 m/s. Para controlar el

movimiento del pistón se utiliza un software instalado en un ordenador portátil que se conecta al tanque mediante USB. El software instalado en el portátil permite configurar la carrera del pistón o *stroke* (S_0) (llamado amplitud en la interfaz del software) y el período de movimiento del pistón (T) para la generación de oleaje regular. S_0 puede tener un valor comprendido entre 0.3 y 10 cm en función del período seleccionado y T puede tener un valor comprendido entre 0.3 y 2 s en función del valor de S_0 seleccionado.

Como se puede ver en la Figura 2, el software del nanoCIEM muestra en pantalla las gráficas de la variación temporal del movimiento del pistón (*Pala* en cm) y de la variación temporal de la superficie libre en la posición del sensor acústico (*Nivel* en cm). También muestra en la esquina superior derecha de la gráfica inferior el valor del nivel de profundidad en todo momento.

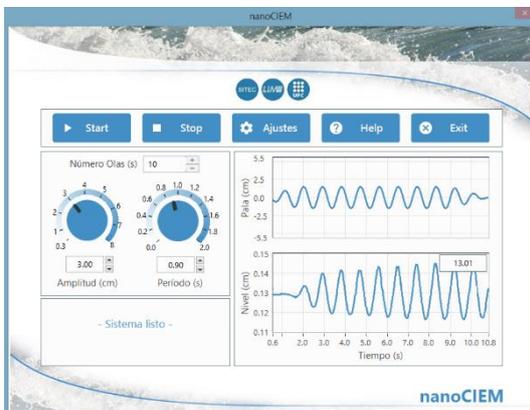


Fig. 2. Software para el manejo del nanoCIEM.

El objeto flotante (Figura 3) utilizado en los experimentos es una boya esférica. Tiene un radio de 3.0795 cm, una masa de 60.78 g y una densidad de 505 kg/m³, que es aproximadamente la mitad que la del agua, por lo tanto, con el agua en reposo, la boya se encontrará semisumergida.



Fig. 3. Boya flotante utilizada en los ensayos físicos.

La boya se ha diseñado con SolidWorks, que es un software CAD (del inglés *Computer Aided Design*). La densidad de la boya se ha calculado teniendo en cuenta el material utilizado (PETG o poliéster de glicol de densidad 1270 kg/m³), y el radio interno y externo de la boya, ya que es una esfera hueca. Sabiendo estos datos, se han calculado tanto la masa como el volumen de la boya y, por lo tanto, su densidad. Cabe destacar que la distancia entre el radio interno y el radio externo debe ser lo suficientemente grande para que la boya no sufra deformaciones y para que sea impermeable. Para el cálculo de la densidad no se ha tenido en cuenta una pequeña argolla que tiene la boya, ya que debido a su pequeño tamaño no tiene un efecto significativo en el valor final de la densidad. La finalidad de la argolla es la de poder amarrar la boya con una cuerda.

Una vez obtenido el diseño definitivo de la boya en SolidWorks, se ha guardado como un archivo STL y se ha cargado en el software Ultimaker Cura, donde se ajustaron varios parámetros de impresión y se pudo ver una vista previa de dicha pieza 3D capa a capa, la cantidad de material necesario para su impresión y el tiempo de impresión. Después, se ha generado un código G, que es el lenguaje de programación más usado en máquinas que trabajan por control numérico computarizado (CNC), que se ha guardado en una tarjeta micro SD. El siguiente paso ha sido introducir

la tarjeta micro SD en la impresora 3D Anet ET4 X y ajustar algunos parámetros como la temperatura de extrusión y la temperatura de la cama, que dependen del material utilizado (PETG).

Por último, los movimientos de la boya en el tanque experimental han sido analizados en el software Kinovea para obtener su desplazamiento longitudinal (*surge* en inglés) y vertical (*heave* en inglés), con el objetivo de poder comparar los datos experimentales con los resultados del modelo numérico utilizado en este trabajo.

2.2. Modelado numérico

Para el modelado numérico se utiliza el código DualSPHysics, que es un modelo Lagrangiano sin malla basado en el método SPH. El método SPH discretiza el dominio en un conjunto de nodos o partículas. Las propiedades físicas de cada partícula (posición, velocidad, densidad y presión) se obtienen por interpolación local de las propiedades de las partículas circundantes. Las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven en cada par de interacción entre partículas. La teoría de SPH implementada en DualSPHysics se detalla a continuación:

El método SPH está basado en la teoría de los interpolandos integrales, cuyo principio básico es aproximar cualquier función $A(\mathbf{r})$ por:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (1)$$

siendo \mathbf{r} el vector de posición de una partícula y W la función *kernel*, que depende de la distancia entre partículas y del radio de interacción h , que es la distancia de interacción entre partículas en un dominio cerrado Ω .

La aproximación integral anterior se puede reescribir en notación discreta por medio del siguiente sumatorio:

$$A_i = \sum_{j=1}^N A_j W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (2)$$

donde el sumatorio se lleva a cabo sobre las partículas vecinas j de la partícula de interés i que se encuentran en el radio de interacción del *kernel*. Además, el volumen de una partícula se expresa como su masa (m_j) dividida por su densidad (ρ_j).

2.2.1. Función Kernel

Para pasar de un dominio continuo, como un fluido, a un dominio discreto, partículas, se utiliza la función *kernel*. El *kernel* es una función que interpola los valores de cualquier propiedad del fluido en función del valor de las partículas vecinas que se encuentran dentro del radio de interacción (h).

La Figura 4 muestra el dominio de influencia de la función *kernel* (W). Las partículas que se encuentran a una distancia menor que kh , en nuestro caso, $2h$, son las que interactúan con la partícula de interés. La función *kernel* tiene forma de Campana de Gauss, por lo que la contribución de las partículas cercanas será mucho mayor que las partículas que se encuentran más alejadas de la partícula de interés.

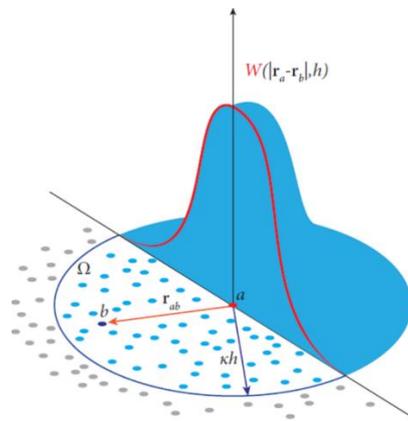


Fig. 4. Esquema del dominio de influencia de la función Kernel.

2.2.2. Ecuaciones fundamentales

La ecuación de continuidad (o conservación de la masa) de Navier-Stokes para un dominio continuo es:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

donde ρ es la densidad, t es el tiempo y \mathbf{v} la velocidad del fluido.

Utilizando la función *kernel* para pasar de un dominio continuo a un dominio discreto, la ecuación anterior se reescribe como:

$$\left(\frac{d\rho}{dt}\right)_i = \sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \nabla_i W_{ij} \quad (4)$$

La ecuación de conservación del momento de Navier-Stokes para un dominio continuo es:

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v}\right) = -\nabla p + \nabla f_{viscosas} + \mathbf{f}_{ext} \quad (5)$$

donde ahora p es la presión.

Utilizando la función *kernel*, se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$\left(\frac{d\mathbf{v}}{dt}\right)_i = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij}\right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g} \quad (6)$$

siendo Π_{ij} el término de la viscosidad y \mathbf{g} la aceleración de la gravedad.

La viscosidad Π_{ij} tiene un papel importante en la simulación del movimiento del fluido, ya que representa la fricción interna entre las moléculas del fluido, es decir, la resistencia del fluido al flujo. La manera más simple de representar el término de la viscosidad es con la viscosidad artificial de Monaghan (1992), siendo esta la formulación utilizada en las simulaciones de este trabajo. Su uso es común en SPH debido a su simplicidad y resulta adecuada para modelar la generación, propagación e interacción de olas con estructuras costeras obteniendo buenos resultados (Altomare *et al.*, 2017).

2.2.3. Ecuación de estado

La ecuación de estado se usa para relacionar la densidad y la presión. Esta ecuación ha sido desarrollada por Monaghan y Kos (1999) y Batchelor (1974).

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

Siendo ρ_0 la densidad de referencia y b un factor que depende de la densidad de referencia, de la velocidad del sonido y del índice politrópico (γ). En aplicaciones marítimas el índice politrópico es igual a 7, por lo que pequeñas variaciones en la densidad provocarán un cambio considerable en la presión, siendo un fluido débilmente compresible.

Según Monaghan (1994), la compresibilidad se ajusta en el modelo para que la velocidad del sonido pueda reducirse artificialmente, lo que establece un valor razonable para el tamaño del paso de tiempo. Sin embargo, este ajuste obliga a que la velocidad del sonido sea al menos 10 veces mayor que la velocidad máxima del fluido, manteniendo las variaciones de densidad en un margen inferior al 1%. Esto es necesario porque si se utilizase la velocidad del sonido real, se necesitaría un paso de tiempo muy pequeño para asegurar la convergencia de la solución numérica, lo que aumentaría significativamente el tiempo de cálculo. Debido a esto, se define el factor b en la Ecuación 7 como:

$$b = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \quad (8)$$

siendo c_0 la velocidad del sonido cuando la densidad es igual a $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$.

2.2.4. Condiciones de contorno

El objetivo principal de las condiciones de contorno es contener el fluido y modelar los elementos sólidos con los

que debe interactuar el fluido sin atravesarlos. Por otro lado, también completan el soporte del *kernel* de las partículas de fluido próximas al límite, porque en estos casos la función *kernel* no sería una función normalizada y proporcionaría resultados incorrectos.

Las Condiciones de Contorno Dinámicas (DBC), cuya descripción completa se encuentra en Crespo et al. (2007), es un método en el que las partículas de contorno se rigen por las mismas ecuaciones que las partículas de fluido, con la diferencia de que no se mueven de acuerdo a las fuerzas ejercidas sobre ellas, si no que permanecen fijas en su posición (contorno fijo) o se mueven según un movimiento pre-impuesto (pistón, flap, compuerta...). Cuando una partícula de fluido se aproxima a una partícula de contorno y su distancia es menor que la distancia de interacción entre las partículas, la densidad de las partículas de contorno aumenta y provoca un aumento de la presión. Debido a esto, se origina una fuerza de repulsión sobre las partículas de fluido, que suele ser excesiva y genera un hueco entre el fluido y el contorno.

Para solucionar los problemas de las DBC se desarrollaron las DBC modificadas (mDBC), descritas en English et al. (2022) y que se han usado en este trabajo. En este caso, las partículas de contorno se colocan de la misma manera que en las DBC, con la interfaz limítrofe situada a medio espacio entre las partículas de fluido y de frontera. Para cada partícula contorno se proyecta un nodo fantasma en el fluido respecto a la interfaz limítrofe usando un método semejante al de Marrone et al. (2011). Para una superficie plana, el nodo fantasma se refleja a través de la interfaz limítrofe en la dirección de la normal que apunta al fluido. Las propiedades del fluido se calculan en este nodo fantasma a través de una suma

SPH corregida de las partículas de fluido circundantes.

Este método para hallar la densidad de las partículas contorno, proporciona campos de presión y densidad más suaves en la frontera y reduce considerablemente la brecha entre el contorno y el fluido, que es uno de los principales problemas de las DBC. Las partículas de frontera obtienen las propiedades del fluido extrapolando los valores calculados en el nodo fantasma de una manera similar a la utilizada para las fronteras abiertas en Tafuni et al. (2018).

2.2.5. Objetos flotantes

Los objetos flotantes en SPH son objetos rígidos que se mueven libremente en función del fluido que los rodea. Para simular el movimiento de un objeto flotante hay que tener en cuenta su interacción con las partículas del fluido y las fuerzas que estas ejercen sobre él y luego añadirle la fuerza de su peso. Suponiendo que el objeto flotante es un cuerpo rígido, la fuerza neta sobre cada partícula se calcula sumando las contribuciones de cada partícula de fluido según la función *kernel*. La descripción detallada de los objetos flotantes en DualSPHysics está en Canelas et al. (2015).

2.2.6 Acoplamiento con MoorDyn

Este trabajo modela el comportamiento de una boya flotante amarrada al fondo del tanque para limitar su movimiento. Los grados de libertad afectados son: el desplazamiento longitudinal (*surge*), el vertical (*heave*) y la rotación de cabeceo (*pitch*). El amarre ejerce una fuerza adicional sobre la boya que debe ser simulada de manera precisa para reproducir numéricamente su movimiento en el experimento. Esta nueva fuerza adicional se resuelve en

DualSPHysics utilizando la librería externa MoorDyn.

MoorDyn es un código abierto y gratuito que resuelve la dinámica de un sistema de amarres y ha sido desarrollado para poder ser acoplado con otros modelos. MoorDyn resuelve las líneas de amarre como masas puntuales unidas por modelos lineales de amortiguación para modelar la elasticidad en la dirección axial del amarre. La amortiguación hidrodinámica y la masa añadida se caracterizan mediante la ecuación de Morrison aplicada a cada masa puntual. Además, también resuelve la fricción de los amarres con el fondo y permite unir varias líneas de amarre y conectar varias estructuras flotantes.

MoorDyn ha demostrado, con una formulación muy simple, que es computacionalmente eficiente y preciso para simular objetos flotantes con amarres en condiciones de oleaje regular (Domínguez *et al.*, 2019).

2.2.7. Generación de oleaje

El generador de oleaje en DualSPHysics puede ser del tipo pistón o del tipo *flap*, y permite generar tanto olas regulares como irregulares. La teoría implementada en DualSPHysics para la generación de oleaje está basada en Madsen (1971), que desarrolló una teoría simple de generación de olas de segundo orden de Stokes que no cambian su forma al propagarse. La descripción completa del método de generación de olas implementado en DualSPHysics está en Altomare *et al.* (2017). El código admite también series temporales externas para el desplazamiento del sistema de generación numérico.

2.2.8. Generación de condición inicial

La condición inicial de un caso de simulación en DualSPHysics se crea con

la herramienta de pre-procesado llamada GenCase. Este programa discretiza la geometría del contorno y el fluido en partículas SPH.

Como se mencionó anteriormente, SPH es un método sin malla, pero para definir la posición inicial de las partículas sí se utiliza una malla. Sin embargo, una vez creadas las partículas, estas se moverán libremente por el dominio según las ecuaciones de SPH.

GenCase utiliza una malla tridimensional con una distancia entre nodos constante denominada dp (distancia inicial entre partículas), de forma que sólo se crean partículas en los nodos que se corresponden con la geometría a discretizar en partículas. Este método permite utilizar geometrías con cualquier resolución, aunque la precisión del resultado dependerá de la resolución empleada. La Figura 5 muestra la representación en partículas de la boya empleada en el modelado numérico con diferentes resoluciones. Al disminuir la distancia entre partículas, aumenta el número de partículas obteniendo un resultado más parecido al modelo físico.

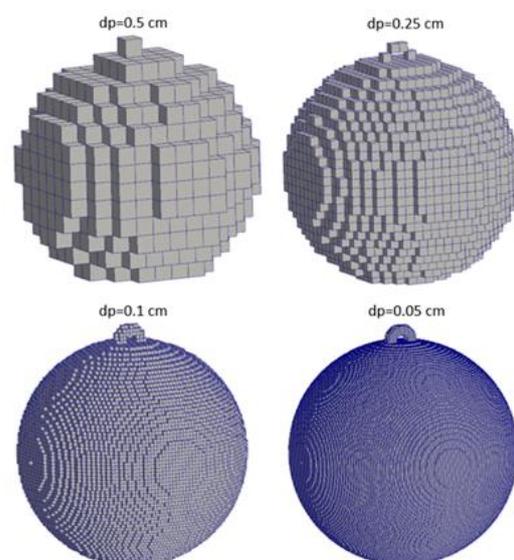


Fig. 5. Discretización de la boya utilizando diferentes resoluciones (las partículas se representan con cubos para mejorar la visualización).

3. Resultados

Los experimentos que se han realizado son: i) validación del tanque numérico, ii) validación de generación y propagación de olas regulares sin objetos flotantes, iii) validación de propagación de olas regulares con objetos flotantes libres, iv) validación de propagación de olas regulares con objetos flotantes amarrados.

3.1. Generación y absorción numérica de olas

Para comprobar que el oleaje se genera, propaga y absorbe de forma correcta en nuestro tanque numérico se reproduce una ola regular de período $T=0.9$ s, carrera del pistón $S_0=3$ cm, altura de ola $H=2.67$ cm y longitud de onda $\lambda=90.65$ cm, con diferentes resoluciones. La resolución está definida por la distancia inicial entre partículas. Altomare *et al.* (2017) recomiendan usar una resolución en la que haya 8-10 partículas por altura de ola, ya que con esos valores se obtiene una buena precisión con unos tiempos de cálculo razonables. Los valores de dp utilizados en este caso han sido de 0.01 m, 0.005 m y 0.002 m.

La Figura 6 muestra un esquema del tanque numérico utilizado en DualSPHysics para el caso de objetos flotantes con amarres, que es el caso más complejo. Tiene un pistón en uno de sus extremos, que es el encargado de generar el oleaje, y una playa de disipación con una pendiente (α) de 1:15.68 en el otro extremo, cuya finalidad es absorber el oleaje para evitar que se produzcan olas reflejadas.

Para validar la generación y propagación del oleaje se utilizará el mismo tanque sin la boya ni el amarre. En este caso el tanque tiene una naturaleza bidimensional, ya que la interacción de las partículas fluidas con las partículas de las paredes laterales del tanque no altera su propagación, lo que supone un gran ahorro de tiempo computacional sin prácticamente afectar a los resultados. En esta primera validación se comparan resultados numéricos con la solución teórica y las variables analizadas, que han sido la superficie libre de agua (η) y la velocidad orbital (horizontal y vertical) a 103.5 cm del pistón y 5 cm por debajo de la superficie libre inicial (WG en la Figura 6).

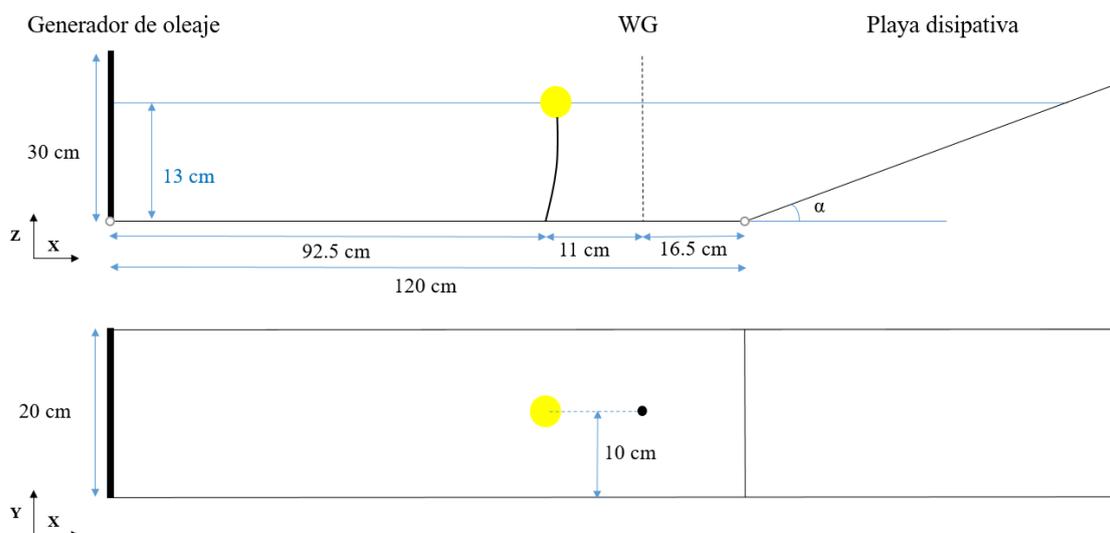


Fig. 6. Esquema del tanque numérico para test con la boya flotante amarrada al fondo.

La variación temporal de la superficie libre y la velocidad orbital en un punto se puede obtener gracias a la teoría de Stokes de segundo orden. En la Figura 7 se muestra una comparación de los valores teóricos con los resultados numéricos para las tres resoluciones. Puede observarse que para un dp de 0.01 m la velocidad orbital vertical tiene grandes fluctuaciones. Además, tanto los valores de la velocidad orbital horizontal, como la elevación de la superficie libre, distan bastante de los valores teóricos. Por esta razón, se puede concluir que los resultados con este dp no son precisos. En cambio, los resultados numéricos para un dp de 0.002 m y 0.005 m muestran una buena correspondencia con los resultados teóricos, siendo mejores para el dp menor, que equivale a una mayor resolución (mayor número de partículas). Atendiendo a los resultados obtenidos, las demás simulaciones numéricas utilizan un dp de 0.002 m. Los resultados con esta resolución confirman la correcta generación y propagación de oleaje en nuestro tanque numérico con DualSPHysics.

Por otra parte, para validar la capacidad de absorción del oleaje de la playa disipativa del tanque numérico, se utiliza el método de Healy (Eagleson y Dean, 1966), con el que se obtiene el coeficiente de reflexión, K_R , cuyo valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$K_R = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (9)$$

siendo H_{max} la altura máxima y H_{min} la altura mínima.

En este caso K_R es inferior al 4.5%, por lo que la reflexión será mínima y prácticamente no afectará a las olas incidentes, lo que significa que las olas se propagan de forma correcta y no existe reflexión al final del tanque numérico.

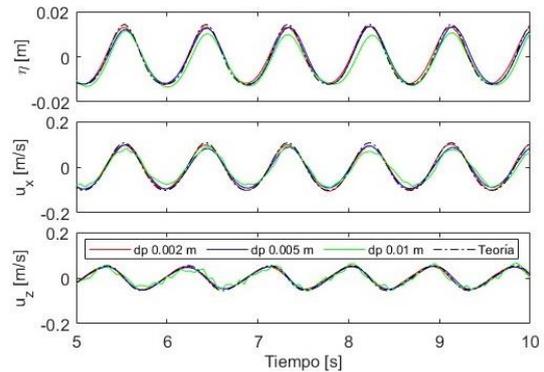


Fig. 7. Series temporales teóricas y numéricas (2D) de la elevación de la superficie libre y velocidades orbitales ($T=0.9$ s, $H=2.67$ cm).

La Tabla 1 incluye el número de partículas y el tiempo de ejecución para cada resolución requerido para simular 12 segundos de tiempo físico usando una tarjeta gráfica Nvidia GeForce RTX 2080 Ti. A menor distancia inicial entre partículas (dp), mayor número de partículas y mayor tiempo de cálculo.

dp [m]	Partículas	Tiempo de cálculo (min)
0.010	4,209	2.27
0.005	13,736	5.11
0.002	75,335	14.27

TABLA 1. Número de partículas y tiempo de ejecución según la resolución utilizada.

Una vez validado nuestro tanque numérico en 2D, se confirma la misma precisión de los resultados en simulaciones 3D, ya que las siguientes simulaciones con objetos flotantes tienen una naturaleza tridimensional. La comparación entre los resultados numéricos en 3D y la teoría es realmente buena tanto para la variación temporal de la superficie libre como para la velocidad orbital. El coeficiente de reflexión, K_R , aumenta ligeramente hasta un 6.65% pero sigue siendo un valor muy bajo. En el caso 3D para simular 12 s de tiempo físico en la misma tarjeta gráfica, el tiempo de cálculo ha sido de 1,892.31 minutos (31.53 h). Este elevado tiempo de ejecución se debe a la gran cantidad de partículas simuladas (6,833,500).

3.2. Propagación de olas regulares

Los primeros test donde se comparan datos experimentales con datos del modelo numérico tienen como objetivo validar la generación y propagación para tres condiciones de oleaje distintas (Tabla 2). Las olas A y B tienen la misma carrera del pistón y las olas B y C tienen el mismo período.

Ola	Stroke S_0 [m]	Período T [s]	Altura H [m]	Longitud de onda λ [m]
A	0.0035	0.7	0.0422	0.6503
B	0.0035	0.9	0.0311	0.9065
C	0.0030	0.9	0.0267	0.9065

TABLA 2. Condiciones de oleaje estudiadas.

La Figura 8 representa las tres condiciones de oleaje en el ábaco de Le Méhauté. Las tres olas se encuentran en la zona de profundidad intermedia, las olas B y C se encuentran dentro de la teoría de Stokes de segundo orden y la ola A pertenece a la teoría de Stokes de tercer orden, pero debido a su proximidad a la teoría de segundo orden se puede aproximar por esta última teoría, ya que las diferencias serán mínimas.

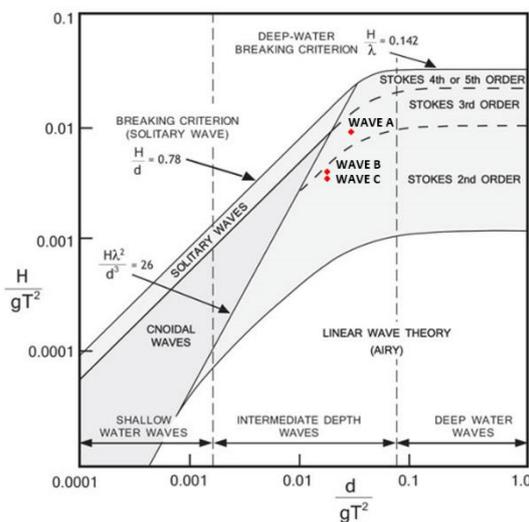


Fig. 8. Condiciones de oleaje estudiadas representadas en el ábaco de Le Méhauté (2013).

En la Figura 9 se muestran las series temporales de la superficie libre a 103.5 cm del pistón generador. Los resultados numéricos y teóricos para las tres condiciones de oleaje son prácticamente idénticos. Los resultados numéricos son muy parecidos a los datos experimentales, aunque existen algunas pequeñas desviaciones en estos últimos debidas a pequeñas vibraciones que afectan a la sensibilidad del sensor acústico del experimento.

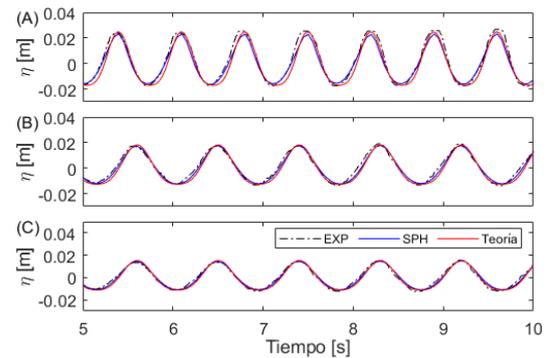


Fig. 9. Series temporales experimentales, numéricas y teóricas de la elevación de la superficie libre de las tres olas (A, B y C).

3.3. Interacción de olas regulares con objetos flotantes libres

Se realizó el mismo ensayo para las tres condiciones de oleaje seleccionadas anteriormente (Tabla 2). El experimento consiste en colocar un objeto flotante y medir su desplazamiento horizontal (*surge*) y su desplazamiento vertical (*heave*) respecto a su posición inicial con el agua en reposo.

Las simulaciones numéricas de este experimento han sido realizadas en el tanque numérico mostrado en la Figura 6 sin el cabo que amarra la boya al fondo del tanque. Como se puede observar la boya se ha colocado prácticamente a una longitud de onda (λ) del pistón para las olas B y C y casi a 1.5λ para la ola A, con lo que la ola se habrá formado correctamente cuando llegue al objeto flotante.

Para la ola A los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 10. En cuanto al desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales son prácticamente iguales para la ventana temporal de 2 a 8 segundos. A partir del segundo 8, el desplazamiento experimental disminuye debido a la reflexión que existe en el tanque experimental, ya que la zona de amortiguamiento de la parte final del nanoCIEM no está optimizada para un amplio rango de períodos y puede generar cierta reflexión, también por la falta de un sistema de absorción activa. En cuanto al desplazamiento vertical, la amplitud de los resultados experimentales y numéricos se mantiene constante, pero hay una ligera diferencia entre ellos.

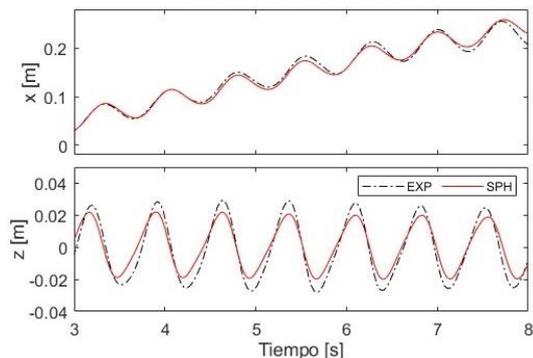


Fig. 10. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola A ($T=0.7$ s, $H=4.22$ cm).

Los resultados numéricos y experimentales del movimiento de la boya para la ola B se muestran en la Figura 11. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales son muy parecidos desde el segundo 3 hasta el 6, momento en el que la boya durante el experimento avanzó menos debido a que empieza a afectar la reflexión del final del tanque físico. En cuanto al desplazamiento vertical, la amplitud de los resultados numéricos se mantiene constante pero la de los resultados experimentales crece con el paso del tiempo.

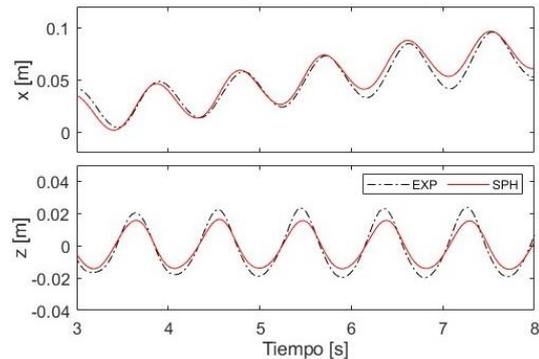


Fig. 11. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola B ($T=0.9$ s, $H=3.11$ cm).

Para la ola C los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 12. Se observa una mayor diferencia entre el desplazamiento longitudinal numérico y experimental. Del segundo 3 al segundo 6 el desplazamiento es prácticamente el mismo, pero a partir de este momento la boya experimental avanza menos que la boya numérica, ya que la reflexión en el tanque experimental no es tan eficiente como la implementada en la simulación numérica. En cuanto al desplazamiento vertical, igual que sucede en el caso anterior, la amplitud de los resultados numéricos se mantiene constante pero la de los resultados experimentales crece con el paso del tiempo.

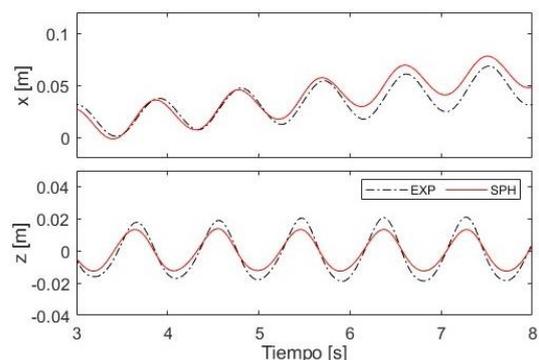


Fig. 12. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola C ($T=0.9$ s, $H=2.67$ cm).

Para las tres condiciones de oleaje se puede apreciar que los resultados numéricos y experimentales son muy similares para el desplazamiento

longitudinal. Las comparaciones del desplazamiento vertical son las que presentan una mayor discrepancia. Esto puede ser debido a que la boya genera una componente transversal de la velocidad de las partículas fluidas que provoca reflexión con las paredes laterales del tanque. En el caso del tanque numérico esto se ha solucionado con una zona de amortiguamiento lateral a lo largo de las dos paredes laterales, pero en el tanque experimental no se ha podido solucionar. Para ello, tendría que utilizarse otro tanque experimental donde la distancia entre sus paredes laterales sea lo suficientemente grande para reducir la reflexión lateral y su influencia en el movimiento de la boya. Esta reflexión lateral afecta al campo de velocidades tras la boya y, por lo tanto, a las olas que llegan a la zona de amortiguación al final del tanque, por lo que la eficiencia de la zona de absorción de energía del tanque experimental funciona peor.

Los resultados de este apartado muestran la capacidad de DualSPHysics para simular objetos flotantes libres bajo condiciones de oleaje regular.

3.4. Interacción de olas regulares con objetos flotantes amarrados

Este experimento consiste en simular objetos flotantes amarrados al fondo del tanque, lo que afectará y limitará su movimiento. La simulación de objetos flotantes con amarres utiliza la librería MoorDyn acoplada a DualSPHysics para calcular y aplicar la tensión ejercida por el amarre. En este caso no tenemos datos experimentales de la tensión de amarres, ya que el tanque experimental nanoCIEM no dispone de ningún sensor que permita medirla. Por lo tanto, se comparan los mismos datos numéricos y experimentales que en el caso sin amarres: desplazamiento horizontal (*surge*) y desplazamiento vertical

(*heave*) de la boya. Además, se mostrarán las tensiones producidas en el amarre únicamente para las simulaciones numéricas.

La Figura 6 muestra la configuración del tanque numérico empleado para este caso. El amarre de la boya al fondo del tanque está situado a 92.5 cm del pistón, siendo esta distancia mayor de una longitud de onda para las tres configuraciones de oleaje (Tabla 2).

La Tabla 3 contiene los principales parámetros de configuración de la línea de amarre, una cuerda de nylon en el experimento físico, para su simulación numérica con MoorDyn.

Parámetro	Valor
Longitud	0.075 m
Densidad longitudinal	0.00077 kg/m
Diámetro	0.002 m
Módulo de elasticidad	1.59×10^9 N

TABLA 3. Propiedades de la línea de amarre utilizadas en el modelado numérico.

En la Figura 13, se muestran 5 instantes de la simulación de DualSPHysics que representan un período completo. El color del fluido muestra la velocidad longitudinal de las partículas fluidas y la posición de la superficie libre para las condiciones de oleaje correspondientes a la ola C. Se ha añadido una línea negra de referencia para comparar en cada instante la posición de la boya respecto al instante inicial (8.10 s). En el segundo instante (8.36 s) se observa la mayor distancia respecto a la línea negra de referencia. Mientras que en el instante final (9.0 s) la posición de la boya casi no se ha desplazado de la posición de referencia. La boya nunca se aleja mucho de su posición inicial debido al amarre y mantiene un movimiento oscilatorio, como muestran las siguientes gráficas de desplazamiento longitudinal (*surge*).

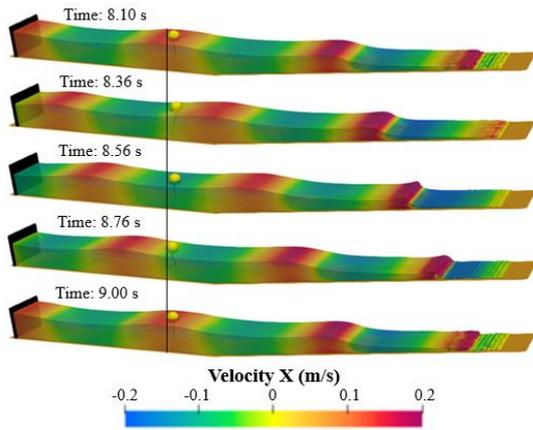


Fig. 13. Diferentes instantes de la simulación con DualSPHysics de la ola C ($T=0.9$ s, $H=2.67$ cm).

Para la ola A los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 14. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos son muy parecidos a los experimentales, siendo la amplitud de los resultados numéricos un poco menor. Las oscilaciones son constantes en ambos casos, lo que refleja el efecto del amarre. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos presentan una muy buena correspondencia con los experimentales durante toda la simulación.

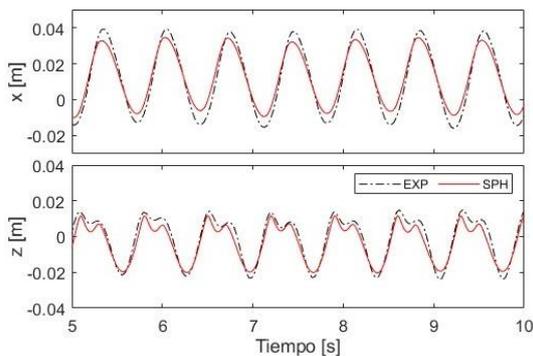


Fig. 14. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola A ($T=0.7$ s, $H=4.22$ cm).

Los resultados numéricos y experimentales del movimiento de la boya para la ola B se muestran en la Figura 15. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales muestran una ligera diferencia, del segundo 5.5 al segundo 7

los resultados numéricos se aproximan más a las crestas de los resultados experimentales y del segundo 7.5 al segundo 9 se aproximan más a los valles de los resultados experimentales. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos se ajustan muy bien con los experimentales en todo el dominio temporal.

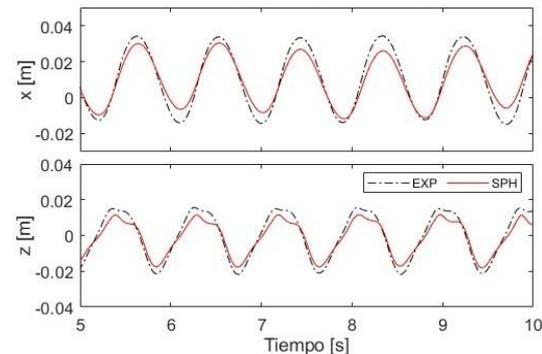


Fig. 15. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola B ($T=0.9$ s, $H=3.11$ cm).

Para la ola C los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 16. El desplazamiento longitudinal muestra un buen ajuste entre resultados numéricos y experimentales. La amplitud del desplazamiento experimental se mantiene constante desde los 5 hasta los 10 segundos. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos y experimentales coinciden durante toda la simulación.

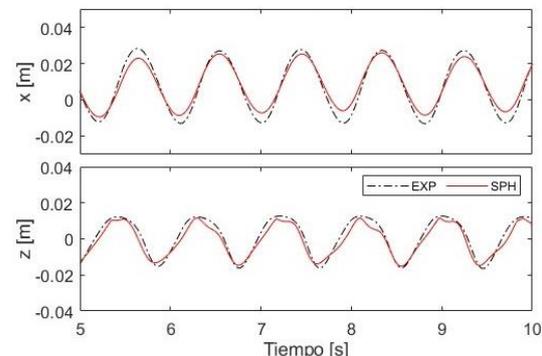


Fig. 16. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola C ($T=0.9$ s, $H=2.67$ cm).

La principal diferencia entre el comportamiento de la boya libre y amarrada al fondo del canal se da en el desplazamiento longitudinal. La boya amarrada no puede desplazarse más de 4 cm desde su posición original, pasando a tener un movimiento oscilatorio. La boya avanza y retrocede con la acción del oleaje, pero en la medida que lo permite la longitud de la línea de amarre. El amarre también afecta al desplazamiento vertical al reducir significativamente su amplitud.

Por último, en la Figura 17 se puede ver la variación temporal de las tensiones registradas en el punto de amarre para las simulaciones numéricas de las tres condiciones de oleaje.

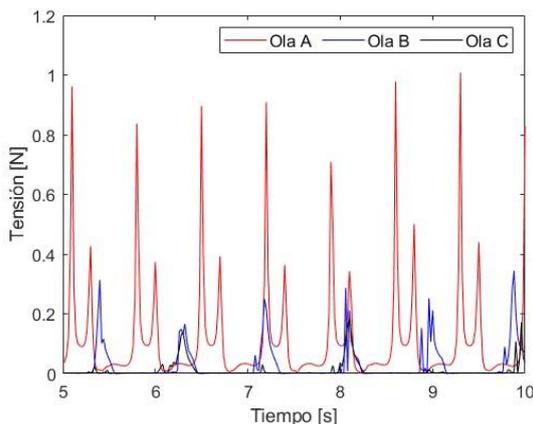


Fig. 17. Tensiones medidas en la línea de amarre para las tres condiciones de oleaje.

Las tensiones de la ola A tienen unos picos máximos alrededor de 1 N seguidos de otro menor de 0.5 N que se repiten de forma periódica con la llegada de las olas. Las tensiones para la ola B son menores y muestran picos de tensión periódicos con valores próximos a 0.35 N. Para la ola C, la variación de la tensión sigue siendo periódica pero los valores ya son mucho más bajos, siendo menores a 0.2 N. Por lo tanto, los valores máximos de las tensiones en la línea de amarre aumentan con la altura de la ola (H). Además, también se puede ver como los picos de tensión para las olas B y C coinciden en los mismos instantes,

por lo que se puede afirmar que la tensión máxima depende del período de la ola.

Estos resultados muestran la capacidad de DualSPHysics y MoorDyn para simular objetos flotantes amarrados bajo condiciones de oleaje regular.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra que el método numérico SPH es una alternativa viable a los métodos basados en mallas para simular un objeto flotante bajo condiciones de oleaje regular. Se ha demostrado que DualSPHysics es capaz de generar, propagar y absorber las olas, y de reproducir la interacción entre estas olas y un objeto flotante libre o amarrado. Además, también es posible reproducir el comportamiento de las líneas de amarre con el acoplamiento de DualSPHysics con la librería MoorDyn.

Para el experimento con la boya libre, sus desplazamientos longitudinales numéricos y experimentales son muy similares. Sin embargo, existen ciertas discrepancias en el desplazamiento vertical debido a la reflexión lateral y en la parte final del tanque experimental. Es decir, el sistema de reflexión pasiva instalado en el nanoCIEM presenta una eficacia que varía según la condición de oleaje, posiblemente debido a la longitud fija del mismo sistema de absorción no optimizada para un rango amplio de periodos. Esto puede tener consecuencias sobre la respuesta de objetos flotantes bajo la acción del oleaje.

En el experimento con la boya atada al fondo del tanque, los desplazamientos longitudinales y verticales son muy parecidos comparando experimentos y simulaciones. En este caso, la línea de amarre limita el movimiento de la boya y esto provoca que la componente

transversal, perpendicular a la dirección de propagación, de la velocidad del fluido sea menor, lo que hace que la reflexión lateral sea más pequeña e influya menos.

Además, se ha demostrado que aumentando la resolución en las simulaciones numéricas se obtienen unos resultados más precisos, muy próximos a los datos experimentales.

En cuanto a los problemas surgidos, la reflexión tanto longitudinal como lateral es una limitación del tanque experimental que en las simulaciones numéricas se puede solucionar fácilmente gracias a las zonas de amortiguamiento. También hay que comentar las limitaciones del modelado numérico en simulaciones 3D, ya que para tener una resolución aceptable en 3D se requiere simular varios millones de partículas y los tiempos de ejecución se vuelven bastante elevados.

Referencias

- 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.
- Altomare C., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., González-Cao J., Suzuki T., Gómez-Gesteira M., Troch P. 2017. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering*, 127, 37-54.
- Batchelor G.K. 1974. *Introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press.
- Canelas R.B., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Ferreira R.M. 2015. A Smooth Particle Hydrodynamics discretization for the modelling of free surface flows and rigid body dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 78, 581-593.
- Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Dalrymple R.A. 2007. Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods. *CMC: Computers, Materials, & Continua*, 5(3), 173-184.
- 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.
- Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Hall M., Altomare C., Wu M., Stratigaki V., Troch P., Cappelletti L., Gómez-Gesteira M. 2019. SPH simulation of floating structures with moorings. *Coastal Engineering*, 153, 103560.
- Domínguez J.M., Fourtakas G., Altomare C., Canelas R.B., Tafuni A., García-Feal O., Martínez-Estévez I., Mokos A., Vacondio R., Crespo A.J.C., Rogers B.D., Stansby P.K., Gómez-Gesteira M. 2022. DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867-895.
- Eagleson P., Dean R. 1966. *Small Amplitude Wave Theory*. McGraw-Hill, New York.
- English A., Domínguez J.M., Vacondio R., Crespo A.J.C., Stansby P.K., Lind S.J., Chiapponi L., Gómez-Gesteira M. 2022. 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*, 9(5), 911-925.
- Gingold R., Monaghan J. 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of*

- the Royal Astronomical Society, 181 (3), 375-389.
- Gotoh H., Khayyer A. 2018. On the state-of-the-art of particle methods for coastal and ocean engineering. *Coastal Engineering Journal*, 60, 79-103.
- Le Méhauté, B. 2013. An introduction to hydrodynamics and water waves. Springer Science & Business Media.
- Lucy L. 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82, 1013-1024.
- Luo M., Khayyer A., Lin P. 2021. Particle methods in ocean and coastal engineering. *Applied Ocean Research*, 114, 102734.
- Madsen O.S. 1971. On the generation of long waves. *Journal of Geophysical Research*, 76, 8672-8683.
- Marrone S., Antuono M.A.G.D., Colagrossi A., Colicchio G., Le Touzé D., Graziani G. 2011. δ -SPH model for simulating violent impact flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(13-16), 1526-1542.
- Monaghan J. 1992. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543- 574.
- Monaghan J. 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110(2), 399-406.
- Monaghan J., Kos A. 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125, 145-154.
- Tafuni A., Domínguez J.M., Vacondio R., Crespo, A.J.C. 2018. A versatile algorithm for the treatment of open boundary conditions in Smoothed particle hydrodynamics GPU models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 342, 604-624.
- Violeau, D. 2012. Fluid mechanics and the SPH method: theory and applications. Oxford University Press.