

# Estudio y Validación de Seakeeping de una Embarcación Mediante Código de CFD Abierto

## **Gonzalo Tampier Brockhaus\***

Dr.-Ing., Ing. Naval, Profesor Auxiliar

[gonzalo.tampier@uach.cl](mailto:gonzalo.tampier@uach.cl)

+56-63-221036

y

## **Marcos Salas Inzunza\***

PhD, MSc, Ing. Naval, Profesor Asociado

[msalas@uach.cl](mailto:msalas@uach.cl)

+56-63-221839

\* Instituto de Ciencias Navales y Marítimas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Universidad Austral de Chile. General Lagos 2086, Valdivia, Chile.

### **Resumen:**

El trabajo muestra el estudio del comportamiento en olas regulares del modelo DTMB 5415 (DTMB Combatant), embarcación ampliamente utilizada para la validación tanto de ensayos experimentales como de cálculos de CFD (engl. *Computational Fluid Dynamics*). Para este fin, se han realizado cálculos transientes de la embarcación en olas regulares utilizando un código de CFD de código abierto (OpenFOAM), para el que se ha implementado un modelo de 6 grados de libertad para simular adecuadamente los movimientos de la embarcación en olas. En el trabajo se presentarán brevemente las características del software utilizado y se discutirá acerca de las ventajas que presenta un programa de código abierto para el cálculo de las características hidrodinámicas de una embarcación.

Los resultados obtenidos son comparados y validados con resultados experimentales. En el trabajo aquí presentado se consideran distintos mallados y se estudia el efecto de los modelos numéricos. Finalmente, se hacen conclusiones acerca de la aplicabilidad de este procedimiento dentro del proceso de diseño de una embarcación.

## 1.- Introducción

El estudio del comportamiento en el mar de una embarcación (engl. *Seakeeping*) juega un rol fundamental para su posterior operación, aspecto que es frecuentemente subestimado durante el proceso de diseño, en especial en etapas tempranas de éste (diseño preliminar). Debido a lo intensivo y costoso de una campaña experimental (en canal de pruebas) en esta fase, se considera conveniente el uso de métodos computacionales para este fin.

Tradicionalmente, los métodos más utilizados en este campo han sido los que utilizan la teoría de fajas (engl. *strip theory*) y los métodos potenciales de panel (más específicamente *frequency-domain seakeeping panel methods*). Estos métodos permiten, debido a su rapidez y simpleza, realizar grandes cantidades de cálculos y se han convertido en valiosas herramientas de diseño a lo largo de varias décadas. No obstante, existen ciertas problemáticas para las que las simplificaciones producto de linearizaciones, consideraciones numéricas o modelos físicos utilizados hagan a estos métodos insuficientes. Dentro de esta problemática, los fenómenos no lineales como slamming, resistencia adicional en olas, movimientos de gran amplitud, entre otros, no pueden ser modelados con la calidad requerida para ciertos procesos. Para la resistencia adicional en olas, por ejemplo, ninguno de los métodos ampliamente difundidos para teoría de fajas tiene la precisión suficiente para comparar distintos bulbos de proa en una misma embarcación [17]. Considerando la creciente importancia de la resistencia adicional en olas debido a las futuras normativas que aplicará la OMI en materia de emisiones de gases de embarcaciones, la correcta predicción de esta será un aspecto fundamental en el futuro.

Como un paso lógico en la mejora de los métodos antes mencionados, se han desarrollado algunos códigos de panel transientes para aplicaciones de seakeeping, que consideran una parte de los efectos no lineales antes descritos. No obstante, los elevados costos, la poca disponibilidad y los elevados recursos computacionales relacionados a esta metodología hacen que se conviertan en herramientas poco masificadas y prácticamente utilizadas únicamente con fines de investigación o desarrollo.

Los métodos de CFD viscoso (específicamente RANSE) han sufrido un gran avance en las últimas décadas no sólo en el área naval, y se convierten en una

alternativa interesante para solucionar problemas complejos de seakeeping como los que se mencionaron. Debido a la gran disponibilidad de modelos numéricos, soluciones comerciales establecidas y, más recientemente, la aparición del código de CFD libre y abierto “OpenFOAM” (FOAM: **F**ield **O**peration **A**nd **M**anipulation), el desarrollo de éstos es considerablemente más rápido que el de aplicaciones adjudicadas únicamente al ámbito de la hidrodinámica naval. Además, la permanente optimización de los códigos y la casi ilimitada posibilidad de paralelización hacen que la ventaja en los tiempos de cálculo respecto a los métodos de panel se relativice, considerando además, para el caso específico de OpenFOAM, la ausencia de costos de licencia por nodo de cálculo. Estos últimos se consideran generalmente como la limitante para códigos de CFD comerciales, aunque últimamente algunos desarrolladores de este tipo de software han abierto posibilidades que virtualmente solucionan este inconveniente (p.ej. *on-demand licensing*, *cloud computing*, entre otros).

Debido a la naturaleza no estacionaria de los fenómenos de seakeeping, la simulación de éstos por medio de CFD es compleja. No obstante, a diferencia del cálculo en aguas tranquilas, las fuerzas hidrostáticas son las más significativas, permitiendo un tratamiento menos detallado de los fenómenos viscosos a favor de una disminución del tiempo computacional.

En la presente investigación se presenta un código de CFD desarrollado a partir de implementaciones abiertas proporcionadas por el paquete OpenFOAM, demostrándose la aplicabilidad de éste para simulaciones de seakeeping. Para este fin se validaron distintas disciplinas de la hidrodinámica naval, asegurando así que cada fenómeno esté siendo modelado correctamente. Estas simulaciones comienzan por cálculos en aguas tranquilas (de resistencia al avance), pasando por simulaciones en olas, sin movimientos (para su posterior validación con datos experimentales) y finalizando con simulaciones en olas de proa con dos grados de libertad (heave y pitch). Para este fin se utilizó el modelo DTMB5415 (DTMB Combatant), que será descrito en detalle más adelante. Los resultados obtenidos en cada una de estas fases han sido validados con diversos datos experimentales obtenidos de la literatura, validándose exitosamente cada uno de ellos. Finalmente, se discutirá acerca de los beneficios de aplicar esta metodología y de los desafíos pendientes.

## 2.- Dinámica de Fluidos Computacional

### 2.1.- Generalidades acerca de la Metodología

El CFD (engl. *Computational Fluid Dynamics*) en el ámbito de la hidrodinámica naval se ha convertido en una importante herramienta para evaluar diseños, mejorar características hidrodinámicas y resolver problemas de flujos locales. El enorme avance de estos métodos en las últimas décadas es innegable, y es de esperar que esta herramienta siga ganando cada vez más importancia en el futuro. Estos métodos computacionales resuelven problemas generales de la dinámica de fluidos por medio de la solución numérica de las ecuaciones básicas de los fenómenos físicos involucrados, entre las que se destaca la aplicación de una modelación simplificada de los fenómenos de turbulencia por medio de la utilización de las ecuaciones de Reynolds (RANSE – *Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations*) y un modelo de turbulencia asociado. Dentro de éstos modelos de turbulencia, por mencionar algunos de ellos, destacan los modelos k- $\epsilon$ , k- $\omega$  y k- $\omega$ -SST. En el caso de la hidrodinámica naval, se necesitan ecuaciones adicionales para el modelamiento de la superficie libre, destacando el método de los Volúmenes de Fluid (engl. *Volume of Fluid, VoF*), que ha sido utilizado en la implementación que se presentará. Los detalles de estos métodos están descritos ampliamente en la literatura (p.ej. Ferziger & Peric [4]).

Para la aplicación que se presenta, la discretización de las ecuaciones se realiza por medio del método de los volúmenes finitos (*Finite Volume Method, FVM*), donde se utilizan las ecuaciones en su forma integral para un conjunto de volúmenes de control (celdas) obtenido a partir de la discretización de la geometría a estudiar (dominio computacional).

Para el cálculo de las características hidrodinámicas de una embarcación se requiere de especial cuidado en los modelos a utilizar y en las características del dominio computacional. Para el último se elige normalmente un canal de dimensiones apropiadas en el que se ubica la embarcación a estudiar, debiendo éstas dimensiones ser suficientes para evitar fenómenos no deseados como bloqueo de sección, reflexiones de olas u otros. Además, un cuidadoso mallado es esencial para evitar errores numéricos, conseguir la mejor calidad posible y ahorrar tiempo computacional. Diversas recomendaciones de esta índole se pueden encontrar en MARNET-CFD [1].

## 2.2.- Código de CFD abierto “OpenFOAM”

En el día de hoy existe una gran cantidad de herramientas de CFD para su uso en el área de la hidrodinámica naval. No obstante, existen diversas áreas con un alto grado de especialización donde la programación por parte del usuario (engl. *user programming*) se hace necesaria. Los códigos de CFD comerciales permiten una cierta flexibilidad en este aspecto, pero la imposibilidad de acceder al código fuente dificulta en ciertas ocasiones el desarrollo de aplicaciones especializadas. El código de CFD “OpenFOAM” [15] consiste en un paquete de librerías C++ diseñado para implementar soluciones de CFD con un alto grado de especialización, que son requeridas especialmente en el área de la investigación y el desarrollo. Las librerías del paquete “OpenFOAM” incluyen, entre otros, componentes para el manejo y desarrollo de mallas, para la solución de sistemas de ecuaciones lineales, operadores de discretización y distintos modelos físicos. Estas componentes son a su vez utilizadas por distintos solvers que provee el paquete, que se encargan de resolver problemas específicos de la mecánica de fluidos. De este modo, la implementación de nuevos modelos físicos se facilita enormemente, reutilizando las librerías generales que provee OpenFOAM. Una especial característica de OpenFOAM para facilitar esto es la de imitar la forma de las ecuaciones diferenciales parciales en el código a implementar. Para una descripción más detallada de las características más relevantes de OpenFOAM, se recomienda el artículo de Jasak [10].

## 3.- Modelo de 6 grados de libertad “TUB-sixDOF-FOAM”

En la presente investigación se ha utilizado el conjunto de librerías C++ OpenFOAM para implementar el solver de CFD `TUBsixDOFFoam` (Technical University of Berlin **Six Degrees of Freedom OpenFOAM** solver). Este solver, a su vez, está basado en el solver libre `shipFoam` [2], al que se le agregaron múltiples módulos, mejoras y ciertas correcciones. El resultado de esta implementación es un solver multifase de volúmenes finitos que permite el movimiento de cuerpos rígidos en seis grados de libertad (6 DoF) por medio de una rutina de deformación de malla. La característica multifase del solver es lograda mediante el método de los volúmenes de fluido (engl. *Volume of Fluid, VoF*) y los movimientos

de cuerpo rígido mediante la solución explícita de las ecuaciones de movimiento. El solver `TUBsixDoFFoam` está basado a su vez en otros solvers, implementados para flujos laminares, lo que tiene como consecuencia que no existan modelos de turbulencia disponibles para realizar los cálculos que consideren el movimiento de un cuerpo rígido. En otras palabras, los esfuerzos tangenciales en flujos turbulentos deben ser corregidos empíricamente. Debido a que las principales fuerzas para la predicción de movimientos en olas son fuerzas de presión, el aspecto antes mencionado no representa una desventaja significativa para los casos de aplicación en olas que se presentarán. Para los casos de aplicación en aguas tranquilas (sin movimiento de cuerpo rígido), este inconveniente no existe. Versiones más recientes de las librerías para cuerpos rígidos de OpenFOAM permiten la consideración de modelos de turbulencia, lo que permitiría la fácil implementación de éstos en una futura versión del solver aquí presentado.

### 3.1.- Sistema Coordinado

Se definirán dos sistemas coordenados: el sistema coordenado de la embarcación (*Ship Coordinate System*, **SCS**) y un sistema coordenado híbrido (*Hybrid Coordinate System*, **HCS**), concebido para los cálculos numéricos. El **SCS** tiene su origen en la intersección del plano de la sección maestra, el plano de crujía y el plano de la línea base, con  $x$  positivo hacia proa,  $y$  positivo a babor y  $z$  positivo hacia arriba. El **HCS** tiene su origen en el centro de masa de la embarcación. En condición de flotación de diseño, los ejes del **HCS** indican en las mismas direcciones que el **SCS**, y mantienen esta orientación independiente de los movimientos de la embarcación. La transformación del **SCS** al **HCS** tiene la forma:

$$\begin{pmatrix} x^h \\ y^h \\ z^h \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} x - x_g \\ y - y_g \\ z - z_g \end{pmatrix}$$

con  $(x_g, y_g, z_g)$  representando al centro de masa en el **SCS** y  $\mathbf{T}$  la matriz de transformación de acuerdo a la norma DIN 9300. Los tres movimientos de translación de la embarcación (surge:  $\eta_1$ , sway:  $\eta_2$ , heave:  $\eta_3$ ) y los tres de rotación (roll:  $\eta_4$ , pitch:  $\eta_5$ , yaw:  $\eta_6$ ) se han definido por medio del vector  $\vec{\eta} = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6)$ . Las velocidades y aceleraciones de estos movimientos se definirán por medio de los vectores  $\vec{\dot{\eta}}$  y  $\vec{\ddot{\eta}}$ , respectivamente.

### 3.2.- Ecuaciones de Movimiento de la Embarcación

La ecuación de movimiento a resolver está definida en el sistema de coordenadas híbridas (HCS) y se presenta aquí para movimientos de translación y rotación separadamente. Para los movimientos de translación:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = m \cdot \begin{pmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{\eta}_3 \end{pmatrix}$$

y para los movimientos de rotación:

$$\begin{pmatrix} F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{I}^h \cdot \overrightarrow{\omega}^h)$$

con:

$$\overrightarrow{\omega}^h = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta_5 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\eta}_4 \\ \dot{\eta}_5 \\ \dot{\eta}_6 \end{pmatrix}$$

$\vec{F} = (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6)^T$  representa la fuerza resultante, que es obtenida directamente de la solución de las ecuaciones RANS por medio de integración de fuerzas sobre la superficie mojada, a la que se le agrega la fuerza correspondiente al peso de la embarcación en sentido vertical. Debido al uso de un sistema de coordenadas híbrido, el tensor de inercia  $\mathbf{I}$  de la embarcación debe ser convertido a coordenadas híbridas, obteniéndose un tensor  $\mathbf{I}^h$  en dicho sistema. Una explicación detallada de este aspecto se puede encontrar en Tampier [17].

Para el caso aquí discutido, en que se considerarán solamente olas de frente y se permitirán los movimientos de heave y pitch solamente, las ecuaciones de movimiento se simplifican aún más, tomando la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_3 &= \frac{F_3}{m} \\ \ddot{\eta}_5 &= \frac{F_5}{I_{55}} \end{aligned}$$

Estas ecuaciones son resueltas por medio del método explícito de Euler o alternativamente por el método de Runge-Kutta, de los que se obtienen los vectores de movimiento  $\vec{\eta}$  y de velocidad  $\vec{\dot{\eta}}$ . En base a éstos, la malla es modificada por un solver automático de modificación de malla, en primera instancia para las translaciones y luego para las rotaciones. Este solver resuelve una ecuación simplificada

de movimiento de malla similar a la ecuación de Laplace, a la que se le incluye un término de difusividad. La ecuación toma la siguiente forma:

$$\nabla \cdot (k \nabla \mathbf{q}) = 0$$

donde  $\mathbf{q}$  representa la velocidad de deformación de la malla y  $k$  la variable de difusividad. Esta difusividad controla el grado de deformación de la malla en función de la distancia al cuerpo rígido que ocasiona la deformación y es controlada por el usuario.

Debido al uso de una metodología explícita en el solver, se ha agregado una iteración externa adicional para cada *time step*. De esta manera, se compara la fuerza resultante de la iteración externa actual con la de la última iteración externa, repitiéndola hasta alcanzar la convergencia deseada. Para cada *time step*, la fuerza resultante de la primera iteración externa es obtenida por medio de una extrapolación amortiguada por medio de un factor  $r$  de la siguiente manera:

$$F_{t,Guess} = (1 - r)F_{t-1} + rF_{t-2} + (1 - r) \frac{F_{t-1} - F_{t-2}}{dt_{t-1}} dt_t$$

Los subíndices  $t$ ,  $t-1$  y  $t-2$  representan los tres últimos *time steps* de la simulación, respectivamente. El factor de amortiguamiento  $r$  es variado automáticamente en función de la calidad de la convergencia de las iteraciones. Este método tiene una gran estabilidad en situaciones en que ocurren cambios súbitos en las fuerzas resultantes, como en el caso de un golpe de mar por slamming.

## 4.- Caso de estudio y validación: DTMB Combatant

### 4.1.- Generalidades

La calidad de los resultados obtenidos mediante CFD juega un rol central para la aplicación de estos métodos dentro del proceso de diseño de una embarcación. Dentro del proceso de aseguramiento de la calidad en CFD, se requiere de:

- Un proceso de validación para cada tipo de problemática que se pretenda resolver con el solver en cuestión.
- Un estudio de la aplicabilidad de los métodos numéricos utilizados, sus fortalezas y debilidades.

- Una estrategia de discretización de la geometría acorde a las características de los modelos numéricos utilizados y respetando estándares de calidad establecidos por entidades reconocidas.

Dentro de este esquema, se puede mencionar la iniciativa MARNET-CFD [1] y la labor de la ITTC (International Towing Tank Conference), que apuntan a establecer ciertas exigencias y una metodología de aseguramiento de la calidad por medio de análisis de incerteza y guías de buenas prácticas.

Considerando que el solver aquí presentado es una implementación reciente, se consideró conveniente realizar una serie de cálculos de validación para asegurar la calidad del mismo, utilizando diversos métodos numéricos y distintos niveles de refinamiento de malla.

El aspecto de mayor interés, y para el que se implementó el solver aquí presentado, es el cálculo de seakeeping. De manera previa a los cálculos de validación, se simuló una serie de olas regulares en un canal bidimensional, con el fin de estudiar distintos modelos numéricos y su efecto sobre la calidad de los flujos simulados y en especial de las olas obtenidas [17]. Los resultados obtenidos fueron comparados con la función analítica utilizada para crear dichas olas en la simulación (en el caso aquí presentado se trata de olas de Stokes de segundo orden), y que se define para la altura de ola  $\zeta$ :

$$\zeta(t) = \zeta_A \cdot \cos(kx - \omega_e t) + 0.5 \zeta_A^2 \cdot \cos(2(kx - \omega_e t))$$

con la amplitud de ola  $\zeta_A$ , el número de ola  $k$  y la frecuencia angular de encuentro  $\omega_e$ . La fracción de volumen  $\gamma$  (0 para aire y 1 para agua) y la velocidad de las partículas de agua en la ola están definidas a su vez de la siguiente forma:

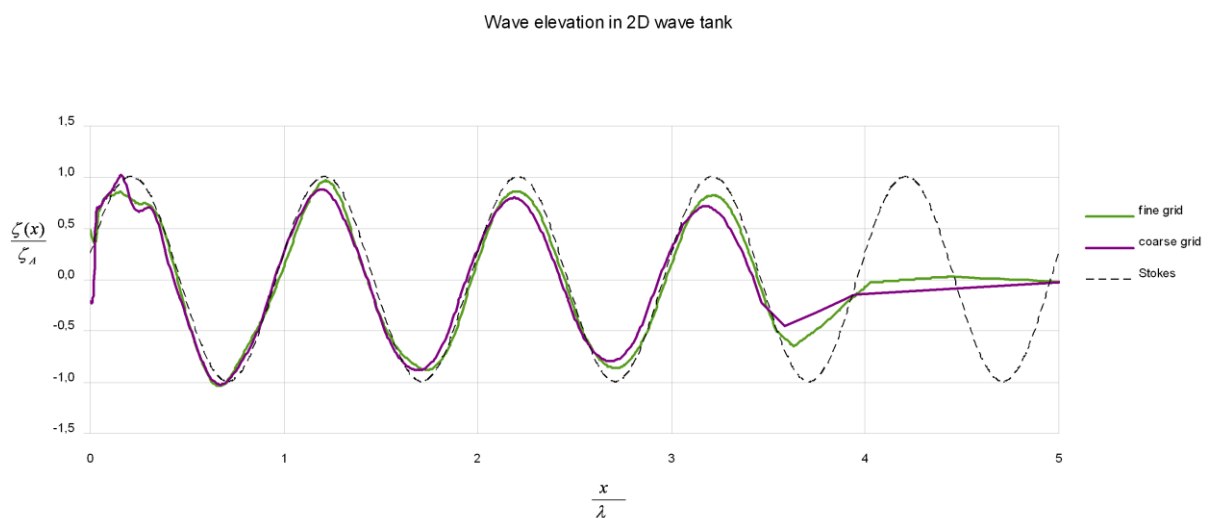
$$\begin{aligned} \gamma(z, t) &= \begin{cases} 1 & \forall z \leq \zeta(t) \\ 0 & \forall z > \zeta(t) \end{cases} \\ u(z, t) &= \begin{cases} V_A + \zeta_A \cdot \omega \cdot e^{kx} \cdot \cos(kx - \omega_e t) & \forall z \leq \zeta(t) \\ V_A & \forall z > \zeta(t) \end{cases} \\ w(z, t) &= \begin{cases} \zeta_A \cdot \omega \cdot e^{kx} \cdot \sin(kx - \omega_e t) & \forall z \leq \zeta(t) \\ 0 & \forall z > \zeta(t) \end{cases} \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la figura 1 para los dos niveles de refinamiento de malla mencionados. Se puede observar una buena concordancia entre la ola definida analíticamente y la obtenida del CFD. Como es conocido para el método VoF, se produce un cierto amortiguamiento de la ola a lo largo del canal simulado. La caída súbita de la amplitud en la zona final es debida a

un amortiguamiento artificial, utilizado para evitar reflexiones de ola en la simulación, siendo de interés únicamente las olas de la zona de encuentro con la embarcación (segunda y tercera cresta).

Después de la ejecución de este paso, se validó exhaustivamente el paquete OpenFOAM con una embarcación cuyas características hidrodinámicas han sido medidas con gran precisión por distintos canales de pruebas y que ha sido sometida a diversas simulaciones computacionales por distintos actores. Esta condición llevó a la elección del *DTMB surface combatant* del David Taylor Model Basin (DTMB), conocido también como modelo DTMB5415, para el que se realizó una extensa validación en aguas tranquilas y en olas.

Las mediciones realizadas en el IIHR [8] (Iowa Institute of Hydraulic Research) para el modelo DTMB 5512 (un modelo geosim de 3,05m de eslora del antes mencionado modelo 5415, que tiene una eslora de 5,72m) fueron utilizadas en el “CFD Workshop Tokyo 2005” [7] y han sido utilizadas en el trabajo aquí presentado. El modelo DTMB5415 fue también utilizado en el *CFD Workshop Gothenburg 2000* [11][12] permitiendo, además, una comparación de la calidad de los resultados con los de los participantes de dichos workshops, que en su mayoría representan a instituciones de gran nivel en el área del CFD y con códigos establecidos a nivel mundial para aplicaciones marinas.



**Fig. 1. Elevaciones de ola para diferentes niveles de refinamiento de malla (grueso, con 7280 celdas y fino, con 29120)**

## 4.2. El modelo DTMB5415

Como se mencionó anteriormente, el modelo DTMB5415 ha sido sometido a diversos experimentos en distintos canales de pruebas, lo que lo convierte en un candidato idóneo para la validación de un código de CFD. Debido a lo mismo, la ITTC (International Towing Tank Conference) recomienda explícitamente el uso de esta geometría para procesos de validación [9]. Las características principales y una vista lateral del modelo DTMB5512 se pueden encontrar en la tabla 1 y la figura 2, respectivamente.

## 4.3. Mallado y Condiciones de Contorno

El mallado ha sido realizado con la aplicación automatizada de OpenFOAM `snappyHexMesh`, un generador de mallas hexaédricas no estructuradas. Una breve descripción general de este mallador para aplicaciones navales se puede encontrar en Tampier [17], Anexo A.

El caso estudiado consideró cuatro distintos niveles de refinamiento: una malla para tests preliminares de aprox. 80.000 celdas (80k), una malla gruesa de aprox. 200.000 celdas (200k), una malla media de aprox. 500.000 celdas (500k) y una malla fina de dos millones (2M) de celdas, las que se observan en las figuras 3 a 6.

Descripción	Símbolo	Prototipo	Modelo
Factor de escala	$\lambda$	-	46,59
Eslora entre perpendiculares	$L_{PP} (m)$	142	3,048
Eslora de la línea de agua	$L_{WL} (m)$	142	3,048
Manga	$B (m)$	18,9	0,406
Calado	$T (m)$	6,16	0,132
Densidad del agua	$\rho (t/m^3)$	1,025	1,000
Desplazamiento	$\Delta (t)$	8636	0,08332
Volumen sumergido	$\nabla (m^3)$	8425,4	0,08332
Superficie mojada	$S_W (m^2)$	2949,5	1,359
Relación Eslora-Manga	$L_{PP}/B$		7,53
Relación Manga-Calado	$B/T$		3,091
Coeficiente de Bloque	$C_B$		0,506
Coeficiente prismático	$C_P$		0,613

Tabla 1. Características principales del modelo DTMB5512



Fig. 2. Vista lateral del modelo DTMB5415(5512). Fuente: Hino [3]

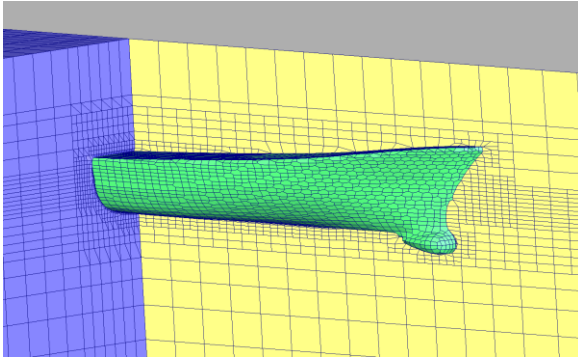


Fig. 3. Malla de aprox. 80.000 celdas

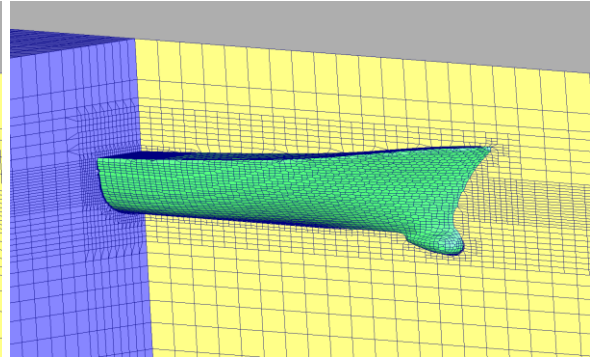


Fig. 4. Malla de aprox. 200.000 celdas

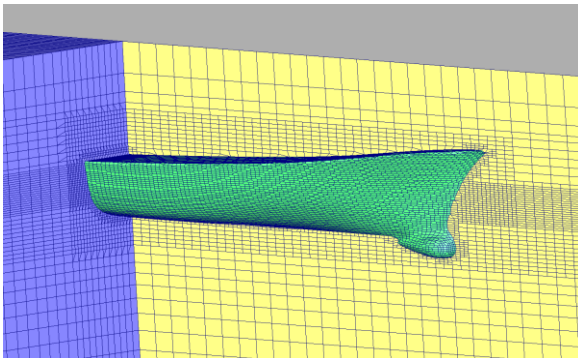


Fig. 5. Malla de aprox. 500.000 celdas

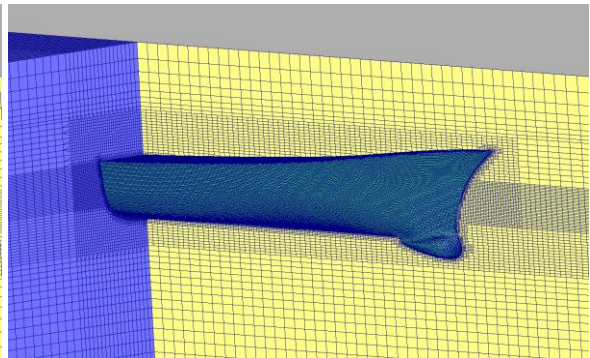


Fig. 6. Malla de aprox. 2.000.000 celdas

Las condiciones de contorno utilizadas para la velocidad, presión y la fracción de fase se especifican en la tabla 2. Especial atención se requiere para la zona del Inlet (entrada), para la que se ha definido una condición especial que modela la entrada de una ola regular de la longitud y amplitud deseada. El paquete OpenFOAM ofrece una condición de contorno fácilmente programable llamada *groovyBC*, que ha sido utilizada en este caso, modelándose la ola definida anteriormente en la sección 4.1.

Región	Identificador	Velocidad	Fracc. de fase	Presión
		U	gamma	pd
Inlet	minx	groovyBC	groovyBC	zero gradient
Outlet	maxX	zero gradient	zero gradient	zero gradient
Plano simetría	minY	symmetry	symmetry	symmetry
Pared lateral	maxY	slip wall	zero gradient	zero gradient
Fondo	minZ	slip wall	zero gradient	zero gradient
Pared superior	maxZ	zero gradient	zero gradient	fixed value (0)
Embarcación	ship	moving wall	zero gradient	zero gradient

Tabla 2. Condiciones de contorno utilizadas.

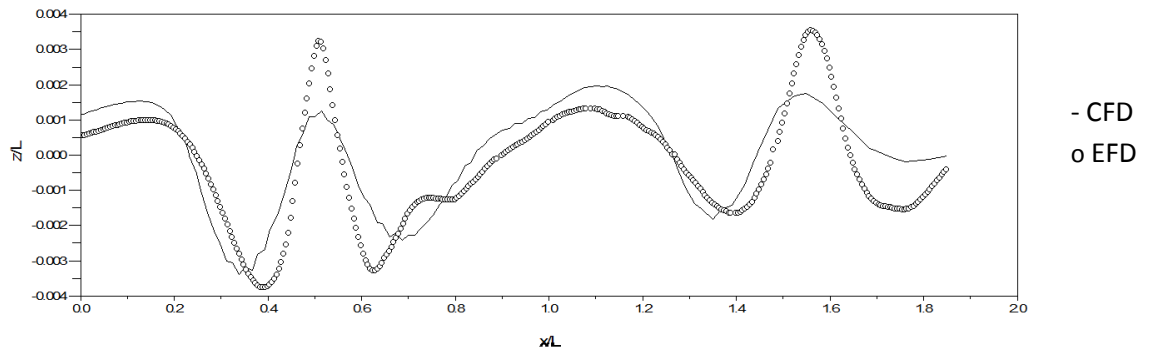
## 4.2.- Cálculos en Aguas Tranquilas

Dentro del proceso de validación del código, se realizó en primera instancia un cálculo estacionario en flujo turbulento sin superficie libre (considerando la línea de flotación como plano de simetría) utilizando el modelo de turbulencia  $k-\omega$ -SST [14]. A pesar de no existir datos experimentales para esta simulación, ésta permite complementar los resultados con superficie libre en aguas tranquilas y así identificar con exactitud ciertas componentes de la resistencia al avance, específicamente de la resistencia por presión viscosa  $c_{PV}$  y la por olas  $c_W$ .

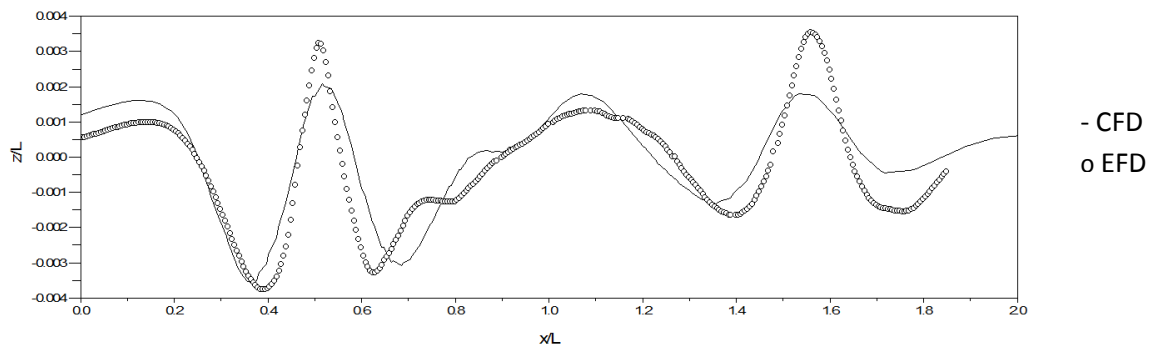
Las simulaciones con superficie libre representan el caso de validación 1.2 del *Tokyo CFD Workshop* [3], considerando el trimado y calado dinámico mencionado allí. Los resultados de resistencia al avance obtenidos por medio de estas simulaciones se muestran en la tabla Tabla 3 para los distintos niveles de refinamiento de malla, observándose una buena calidad en los resultados de la malla más fina. En la figura 7 se observa un corte de la elevación de ola obtenida por el CFD comparada con las elevaciones medidas en el canal de pruebas del IIHR [7]. En la figura 8 se observa el campo de elevación de olas, comparado con el mismo set de datos experimentales antes mencionado. En ambas figuras se observa la mejor calidad de los resultados de las mallas más finas. Si los resultados obtenidos son comparados con los tres mejores resultados presentados por los participantes del *Gothenburg CFD Workshop 2000* [11], se les puede situar entre ellos. Para los propósitos de esta investigación, avocada a la simulación en olas, la calidad de los resultados en aguas tranquilas cumple con el nivel requerido y confirma la aplicabilidad del método presentado para la simulación hidrodinámica en aguas tranquilas.

	80k	200k	500k	2M	EFD
$C_F$	2,53E-03	2,61E-03	2,86E-03	3,11E-03	2,89E-03
$e(\%)$	-12,38%	-9,77%	-0,88%	7,70%	
$C_P$	3,12E-03	2,65E-03	1,88E-03	1,35E-03	1,35E-03
$e(\%)$	130,65%	95,83%	39,13%	-0,11%	
$C_T$	5,65E-03	5,25E-03	4,74E-03	4,46E-03	4,24E-03
$e(\%)$	33,27%	23,93%	11,89%	5,21%	

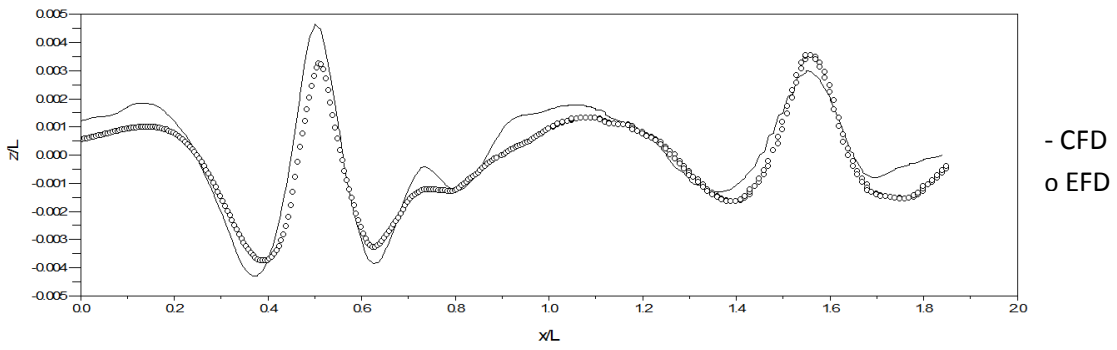
**Tabla 3. Resultados de resistencia al avance obtenidos del CFD para distintos niveles de refinamiento de malla y comparación con resultados experimentales.**



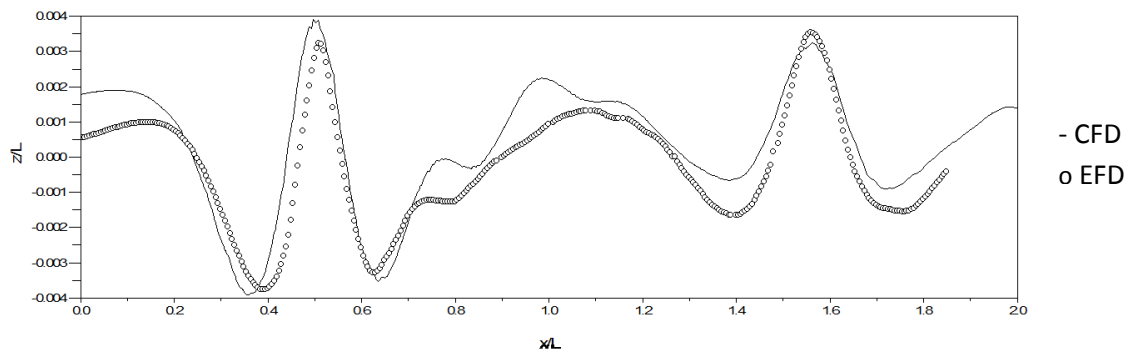
(a) 80k



(b) 200k



(c) 500k



(d) 2M

Fig. 7. (a-d) Elevación de ola en el corte  $y/L=0,172$  para CFD y experimentos

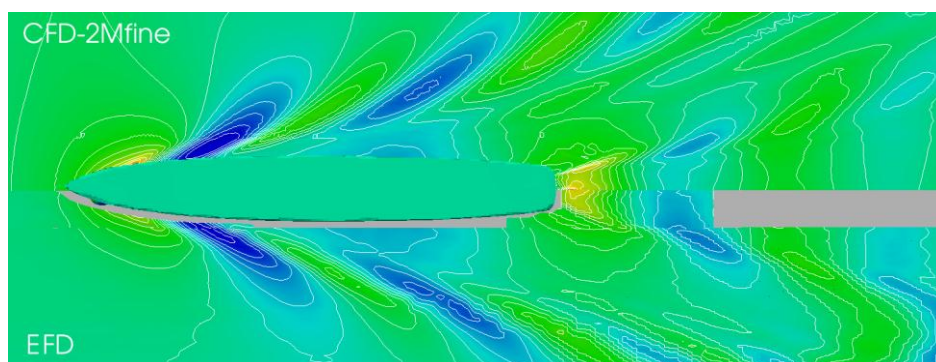
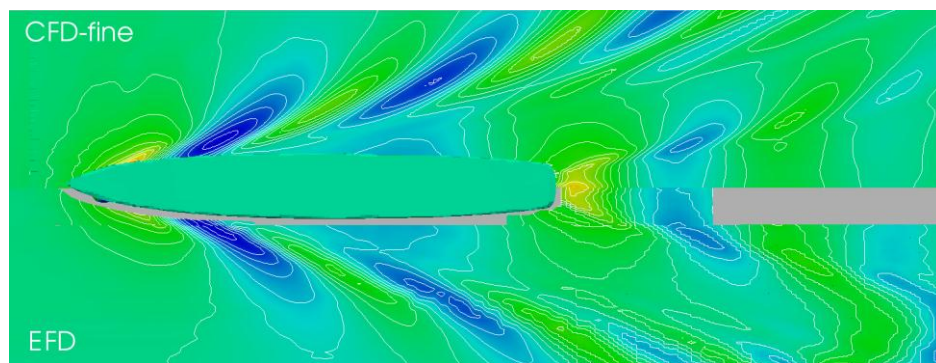
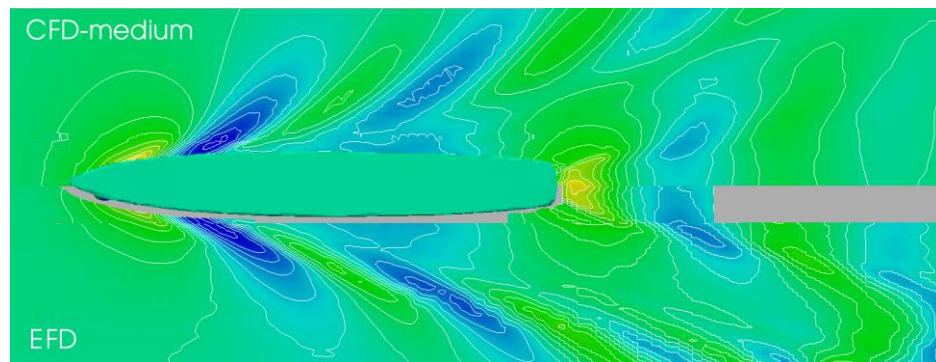
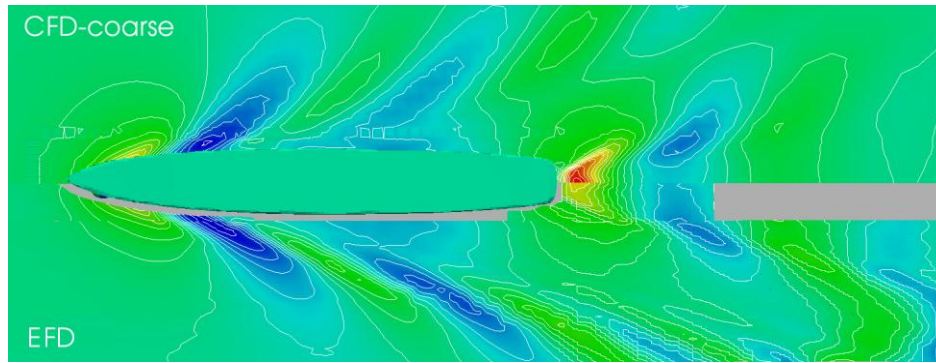
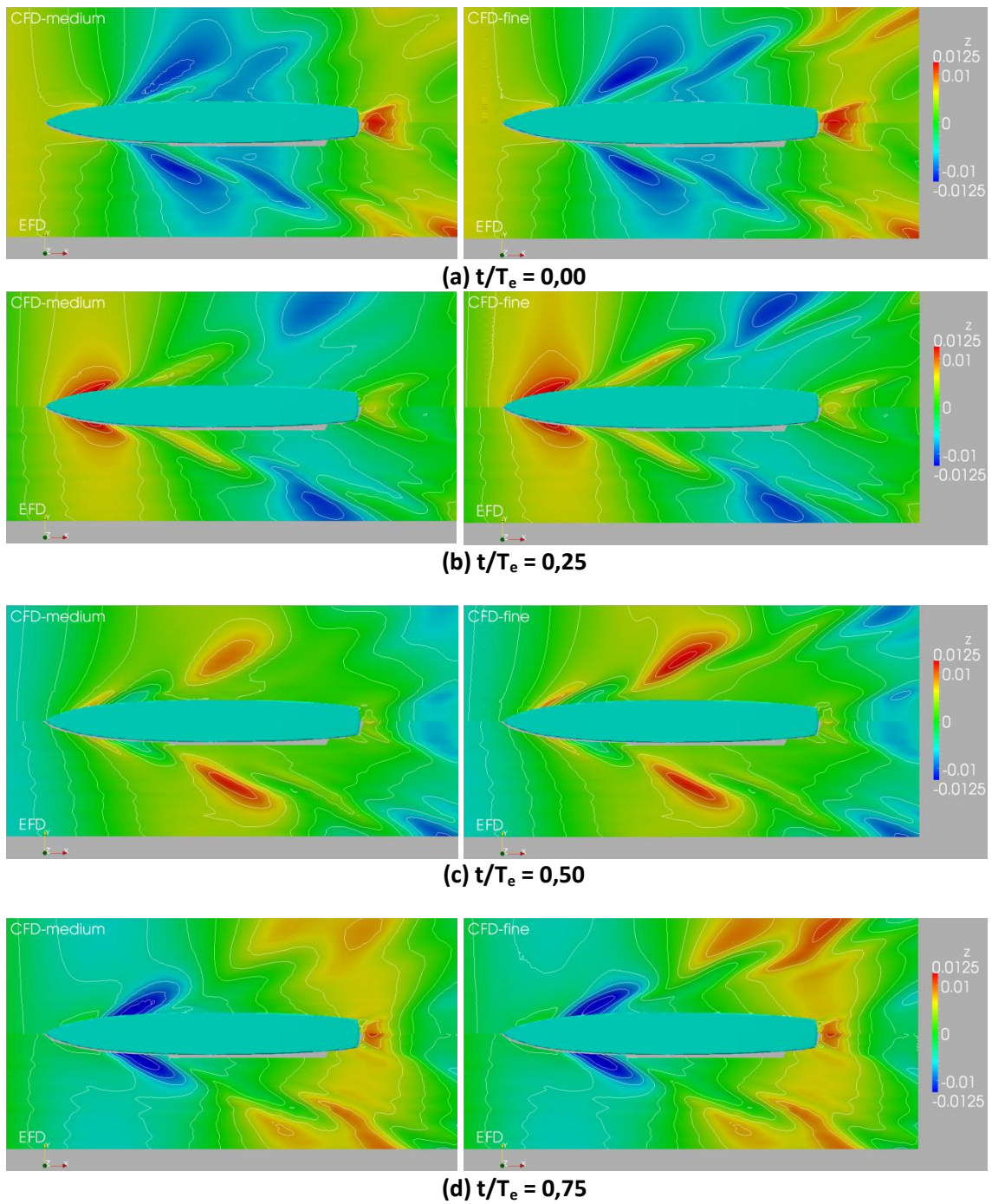


Fig. 8. Elevación de olas de los cálculos de CFD (mitad superior de cada imagen) vs. mediciones experimentales (EFD, mitad inferior de cada imagen)

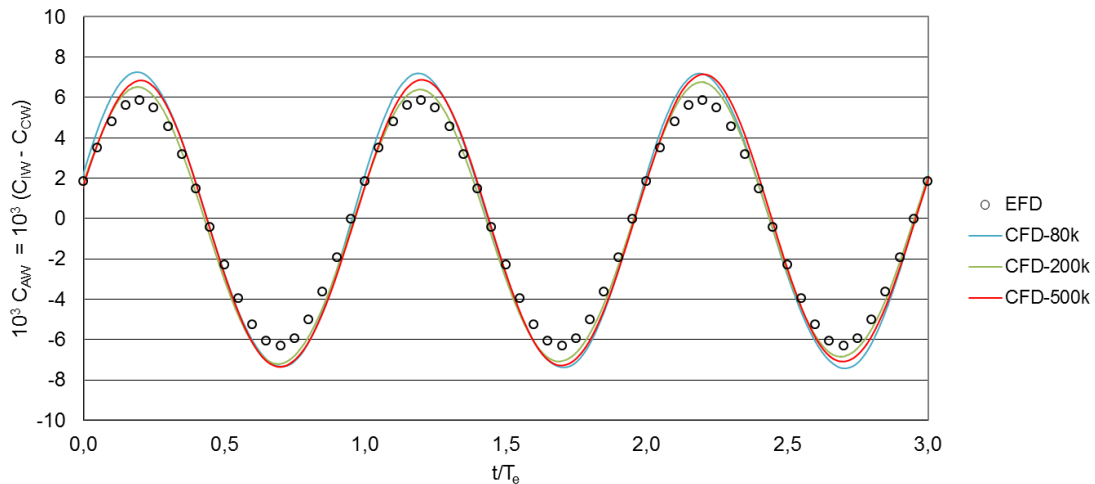
### 4.3.- Comportamiento en Olas

El caso de validación de difracción en olas (caso de validación No. 4 Tokyo CFD Workshop 2005 [3]) considera a la embarcación sin apéndices en olas de proa (relación largo de ola-eslora  $\lambda_W/L_{PP} = 1,50$  y pendiente de ola  $A_k = 2\pi\zeta_A/\lambda_W = 0,025$ ) y sin movimientos. Se realizaron cálculos para las tres mallas de menor refinamiento (80k, 200k y 500k celdas) y se compararon con los resultados experimentales publicados por el IHR [4] [5]. La figura 9 (a-d) muestra las elevaciones transientes de ola para los instantes  $t/T_e = 0,00; 0,25; 0,50; 0,75$  de los resultados obtenidos con las mallas de 200k y 500k (en la mitad superior de cada imagen) comparadas con los datos experimentales mencionados. Estos resultados (en especial la malla más fina) muestran una muy buena concordancia con los datos experimentales (que pueden ser visualizados en la mitad inferior de cada una de las imágenes). En la figura 10 se compara el historial de fuerzas de los cálculos numéricos con las fuerzas medidas experimentalmente. La fuerza obtenida, independiente del grado de refinamiento de la malla, es sobreestimada ligeramente, de manera prácticamente independiente al nivel de refinamiento. Debido a que el rol de las fuerzas hidrostáticas es considerablemente mayor al que juegan éstas en aguas tranquilas, los resultados logran una buena calidad, incluso las mallas de menor cantidad de celdas. Al igual que para la resistencia en aguas tranquilas, los resultados son parecidos a los obtenidos por los participantes del CFD Workshop en 2005 (ver p.ej. Cura et al. [3]). Al igual que para el caso anterior, se demuestra aquí la aplicabilidad y la calidad de los resultados obtenidos mediante el método para la simulación en olas.

El objetivo principal de este estudio es la simulación numérica y la consiguiente validación de los movimientos y fuerzas una embarcación en olas, para lo que se realizaron los cálculos pertinentes. Los datos experimentales para realizar dicha validación provienen también del IHR [13], entregándose información para los movimientos de heave y pitch y para la resistencia total en olas. Estos datos fueron utilizados en el reciente *CFD Workshop Gothenburg 2010* para la comparación de los códigos participantes. Las características de la ola considerada en los experimentos son iguales a las descritas en el caso anterior (sin movimientos). En las figuras 11 y 12 se observan los historiales de movimientos de heave y



**Fig. 9.** Elevaciones de la superficie libre de la embarcación en olas, sin movimientos. Comparación de los resultados experimentales (mitad inferior) y de CFD (mitad superior). Resultados para malla de 200k (izquierda) y de 500k (derecha)



**Fig. 10. Historial de resistencia adicional en olas de CFD y comparación con resultados experimentales**

pitch, respectivamente, obtenidos del CFD y comparados con los datos experimentales. Para ambos movimientos se observa concordancia con las mediciones experimentales en cuanto a amplitud, fase y pendiente. Únicamente para la amplitud de pitch esta concordancia no es tan elevada, no obstante, se la considera como plenamente aceptable. La resistencia en olas, que es un ítem de difícil predicción en la teoría de fajas o los métodos lineales en general, fue modelada exitosamente con el método presentado. En la figura 13 se observa el historial de resistencia en olas comparado con los datos experimentales, observándose una excelente concordancia entre éstos. De este modo, se demuestra exitosamente la aplicabilidad del método aquí presentado para la simulación del comportamiento de embarcaciones en olas de proa utilizando un modelo de seis grados de libertad. Estas simulaciones, realizadas con mallas consideradas como demasiado gruesas para el cálculo de la resistencia al avance mediante CFD, demuestran ser perfectamente plausibles de utilizar para simulaciones en olas.

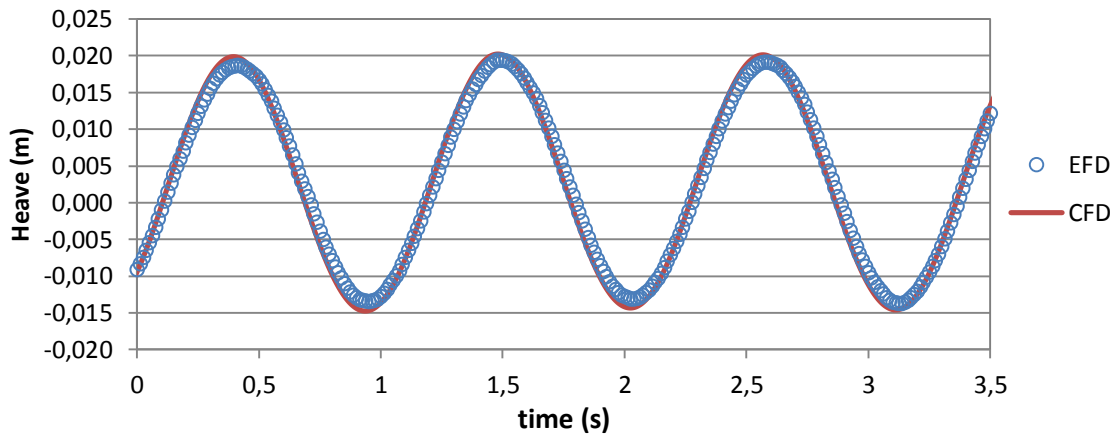


Fig. 11. Historial de movimientos de heave de Experimentos (EFD) y CFD

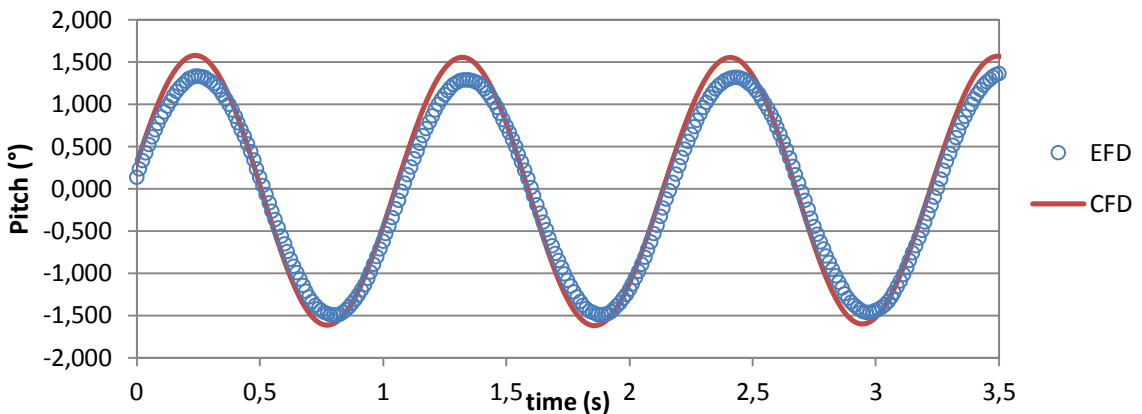


Fig. 12. Historial de movimientos de pitch de Experimentos (EFD) y CFD

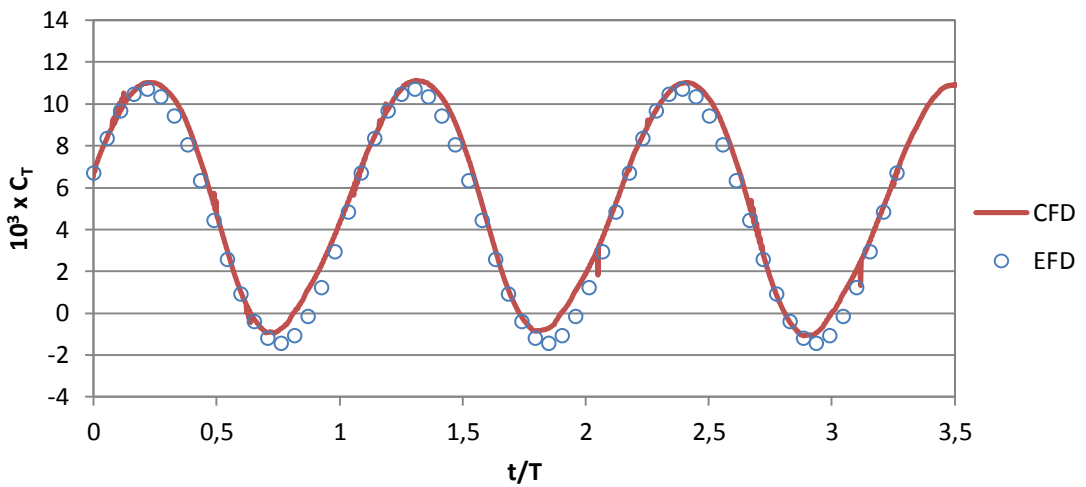


Fig. 13. Historial de resistencia total en olas de CFD y comparación con resultados experimentales (EFD)

## 5.- Conclusiones

El presente estudio muestra la implementación y validación de un código de CFD abierto para simulaciones de resistencia al avance y seakeeping. Se discutieron las ventajas de este tipo de código y la aplicabilidad de éstos en el área de la hidrodinámica naval. Considerando que las técnicas de CFD están bien establecidas en el cálculo de la resistencia al avance en aguas tranquilas, la metodología aquí presentada permite simular el comportamiento de la embarcación en olas con considerables ventajas respecto a las metodologías más difundidas. A pesar de que los recursos computacionales necesarios son sensiblemente más altos que los requeridos por métodos lineales, el rápido avance de las técnicas numéricas, del hardware y la prácticamente ilimitada posibilidad de paralelización hacen de esta metodología una alternativa interesante y prometedora. El hecho de requerirse una menor fineza de mallado que para el cálculo de resistencia con CFD (observación hecha también por Schmode [16]) hace que el mallado juegue un rol menos crítico de lo que lo es tradicionalmente para cálculos en aguas tranquilas.

En especial para el cálculo de la resistencia al avance en olas, donde los métodos tradicionales presentan múltiples desventajas, el método aquí presentado entrega resultados de alta calidad. Considerando la importancia que este aspecto tendrá en el futuro para la flota mundial, el uso de este tipo de herramientas será recomendable.

En lo referente al caso de aplicación aquí expuesto, se demuestra la importancia del proceso de validación en general y de la del código aquí presentado en particular. Este tipo de validaciones hacen imperiosa una gran cantidad de información experimental con un alto estándar de calidad, siendo en consecuencia éste un rol fundamental a cumplir por este tipo de instalaciones en el futuro.

## 6.- Referencias

- [1] Atkins Consultants: “MARNET-CFD – Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics”, **2003**
- [2] Couwenberg, M.: *shipFoam contribution*. CFD-online form. <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/57774-hydrostatic-pressure-gravity-2.html>. Última visita: agosto 2009.
- [3] Cura Hochbaum, A.; Pierzynski, M.: “Flow Simulation for a Combatant in Head Waves”. *Proceedings of the CFD Workshop Tokyo 2005*, **2005**
- [4] Ferziger, J.; Peric, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, **2002**
- [5] Gui, L.; Longo, L.; Metcalf, B.; Shao, J.; Stern, F.: Forces, Moments and Wave Pattern for Surface Combatant in Regular Head Waves – Part 1: Measurement Systems and Uncertainty Analysis. *Experiments in Fluids* 31, no. 6, pp. 674-680, **2001**
- [6] Gui, L.; Longo, L.; Metcalf, B.; Shao, J.; Stern, F.: Forces, Moments and Wave Pattern for Surface Combatant in Regular Head Waves – Part 2: Measurement Results and Discussions. *Experiments in Fluids* 32, no. 1, pp. 27-36 **2002**
- [7] Hino, T. (ed): *NMRI Report 2005: Proceedings of the CFD Workshop Tokyo 2005*. **2005**
- [8] *IIHR – Hydrosience and Engineering website – experimental validation data*. <http://www.iihr.uiowa.edu/~shiphydro/efd.htm> - Última visita: 07-07-2010
- [9] ITTC: *Report of the Resistance and Flow Comittee* (21th ITTC). Trondheim, **1996**
- [10] Jasak, H.: “OpenFOAM: OpenSource CFD in Research and Industry”. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* Vol. 1, No. 2, pág. 89-94, **2009**
- [11] Larsson, L.; Stern, F.; Bertram, V. (editors): *Gothenburg 2000 – A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics*. **2000**
- [12] Larsson, L.; Stern, F.; Bertram, V.: “Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop”. *Journal of Ship Research* 47, págs. 63-81, **2003**

- [13] Longo, J.; Shao, J.; Irvine, M.; Stern, F.: "Phase-Averaged PIV for the Nominal Wake of a Surface Ship in Regular Head Waves," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 129, pp. 524-540, **2007**
- [14] Menter, F.: "Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows", *AIAA Paper* 93-2906, **1993**
- [15] *OpenFOAM User Manual*. <http://www.openfoam.com> (última visita: 01-07-2011)
- [16] Schmode, D.; Bertram, V.; Tenzer, M.: "Simulating Ship Motions and Loads using OpenFOAM". *STG Conference "CFD in Ship Design"*, Hamburg, **2009**
- [17] Tampier, G.: *Hydrodynamic Design of Ship Bulbous Bows Considering Seaway and Operational Conditions*. Tesis doctoral, Technische Universität Berlin. **2010**