

## II SIMPOSIO DE DISEÑO E INGENIERÍA NAVAL

### “EL FUTURO ENFOQUE DE LA HIDRODINÁMICA MARINA”

*Pérez Rojas, Luis (email: [luis.perezrojas@upm.es](mailto:luis.perezrojas@upm.es))  
Souto Iglesias, Antonio (email: [Antonio.souto@upm.es](mailto:Antonio.souto@upm.es))  
González Gutierrez, Leo M. (email: [leo.gonzalez@upm.es](mailto:leo.gonzalez@upm.es))  
Delorme, Louis (email: [louis.delorme@upm.es](mailto:louis.delorme@upm.es))  
E.T.S.I. Navales (Universidad Politécnica de Madrid)  
Catedrático responsable del Canal de Ensayos Hidrodinámicos  
Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid, España. ([www.etsin.upm.es](http://www.etsin.upm.es))  
Telef. 34 91 33671 54 fax: 34 91 5442149*

**RESUMEN:** La utilización de los “Canales” de Ensayos Hidrodinámicos, a través de la investigación experimental con modelos, ha sido desde hace tiempo el único medio de predicción del comportamiento del flujo y de las fuerzas que actúan sobre el buque. El planteamiento matemático de estos problemas, aunque iniciado en el siglo XVIII no pudo resolverse de un modo satisfactorio hasta la llegada de los ordenadores en los años setenta.

Este trabajo presenta inicialmente la aplicación de los Cálculos de Mecánica de Fluidos mediante Ordenador, los denominados CFD (Computational Fluid Dynamics), a la hidrodinámica del buque.

Se incluyen los desarrollos realizados en este campo por el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid, tanto en el supuesto de un flujo potencial como con la consideración de la viscosidad y las últimas aportaciones en los denominados SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics).

La utilización de los ordenadores y el desarrollo de estos CFD resolviendo problemas Hidrodinámicos permite plantearse la pregunta si estas nuevas herramientas cerraran los “Canales de Ensayo Hidrodinámico”

Dejando a un lado que la ciencia experimental nunca dejará de existir pues siempre existirán conocimientos cuya investigación requerirá un método experimental, se puede aventurar que los Canales de Ensayo no dejarán de existir, por lo menos a medio plazo. El trabajo trata también de justificar esta aseveración, mostrando los campos actuales de actuación de este tipo de instalaciones.

## **1.- INTRODUCCIÓN.**

La parte hidrodinámica de un buque constituye una parte primordial en su proyecto. Son unas determinadas formas las que harán posible que el buque navegue a una cierta velocidad contando con una determinada instalación propulsora. Su consumo por milla navegada será óptimo y la hélice no generará ni ruidos ni vibraciones perjudiciales. Durante muchos años, desde los tiempos de William Froude, han sido los canales de ensayos hidrodinámicos los encargados de contribuir al diseño de formas de mínima resistencia y óptimo comportamiento en la mar.

Sin embargo, desde la introducción del uso masivo de ordenadores en todo tipo de industria, una nueva herramienta ha surgido para optimizar hidrodinámicamente las formas de los buques. Son los denominados CFD, siglas de las palabras inglesas “Computational Fluid Dynamics”. En las referencias [1 y 2 ] pueden encontrarse las bases teóricas de esta herramienta matemática que ha abandonado la “academia” que constituyen las Universidades y los Centros de Investigación para adentrarse en las Oficinas Técnicas como una herramienta más de diseño.

En este trabajo se presentan las labores realizadas en los últimos años en el campo de los CFD en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Este panorama numérico parece aventurar el cierre de los tradicionales Canales de Ensayo. Sin embargo, el trabajo concluye con las nuevas líneas de actuación que este nuevo escenario posibilitan para los Centros de Experimentación.

## **2.- LOS DESARROLLOS CFD EN LA ETSIN.**

### **2.1.- Cálculos potenciales.**

La ETSIN, no ha quedado ajena a esta inquietud del mundo científico de la Hidrodinámica. Sus primeras actuaciones se inician en la participación de algunos de sus

miembros en las Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval [1] con trabajos sobre flujo potencial tratado con el método de paneles según técnicas basadas en los desarrollos del Profesor Louis Landweber.

El código de la ETSIN calcula el flujo potencial con superficie libre alrededor de un buque mediante el método de las fuentes de Rankine con una variante más general del método propuesto por Dawson[3]. La generalización consiste en poder panelizar arbitrariamente la superficie libre, sin necesidad de basarse en líneas de corriente del problema sin superficie libre. Otra generalización realizada es que se pueden hacer cálculos en buques con popa de espejo, cuyo tratamiento es sustancialmente diferente al de un buque con popa convencional.

En una primera aproximación, el problema no considera la superficie libre. Para que ésta se mantenga plana, se refleja la obra viva en sí misma constituyendo un modelo doble, de tal modo que la superficie libre se convierta en plano de simetría y así no se deforme. El flujo así calculado se utiliza como base considerando posteriormente la superficie libre. Se linealiza la condición dinámica, que es básicamente la ecuación de Bernouilli, que no es lineal en la velocidad, tomando como base de dicha linealización el primer flujo calculado, el modelo doble. La condición de radiación se impone de modo numérico, a través del uso de operadores “up-wind”, de modo similar a Dawson[3].

Inicialmente, el código sólo consideraba el cálculo de cascos simétricos. Sin embargo, continuos desarrollos han ampliado el campo de aplicación con cascos no simétricos, utilización de geometrías multicasco y la consideración de las aguas someras. El siguiente paso ha sido implementar el cálculo de la sustentación y resistencia inducida en los diversos apéndices del buque. Esta última consideración alcanza un papel preponderante en el diseño de yates, donde la quilla y el timón introducen unas nuevas fuerzas que son muy importantes para definir el comportamiento de un velero.

## 2.2.- Cálculos viscosos.

A pesar de la utilidad de los cálculos potenciales, basada en que la variación de la resistencia al avance es sensible a las formas del buque a través de la componente por formación de olas, la realidad es que la viscosidad es totalmente necesaria si se quiere analizar el problema en toda su extensión. El coste de introducir la viscosidad es alto y nos lleva a considerar las ecuaciones con toda su complejidad, aunque la riqueza de soluciones de los fenómenos a resolver es grande. Datos tan importantes como la resistencia por fricción y fenómenos tan característicos como la formación de vórtices sólo se pueden obtener mediante modelos que tengan en cuenta los efectos viscosos.

Recordemos que las ecuaciones que resuelven el problema del caso viscosos en Mecánica de Fluidos no son otras que la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento o ecuaciones de Navier-Stokes. En el caso de que los fluidos con los que se esté trabajando sean incompresibles y newtonianos (agua y aire), estas expresiones para cada fluido toman la forma adimensionalizada:

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0$$
$$\frac{DV_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i^2} + f_i$$

donde  $Re$  es el número de Reynolds resultado de la adimensionalización que aparece exclusivamente cuando consideramos fenómenos viscosos,  $p$  la presión,  $V$  la velocidad y  $f$  el campo de fuerzas másicas.

Son tres las herramientas fundamentales utilizadas en el desarrollo llevado a cabo en el CEHINAV. Las ecuaciones diferenciales a resolver son discretizadas temporalmente mediante el Método de las Características proporcionando un eficaz manejo de la derivada sustancial, esta visión del fluido tiene mucho que ver con la perspectiva Lagrangiana que se tiene en la Cinemática de Fluidos, de manera que se trata de integrar las ecuaciones de movimiento a lo largo de las trayectorias en las que se mueven las partículas. Tras ello se escribe la formulación variacional del problema así obtenido, se aplica el método de Galerkin y el método de los elementos finitos. El método numérico propuesto consiste en transformar el

problema de Navier-Stokes en un problema de Stokes solucionando este último mediante el Método del Gradiente Conjugado, esto no es otra cosa que llevar el problema de Stokes a un esquema iterativo mediante el cual finalmente se consigue que el campo de velocidades sea adivergente en todos los puntos. Por otro lado el siempre problemático tratamiento de la superficie libre es realizado por el método de la función de nivel (“level set method”), que no es otra cosa que un transporte puro de las propiedades físicas del fluido consideradas en el problema: densidad y viscosidad. Estos desarrollos pueden verse en [4].

Últimamente se ha introducido el uso de un programa comercial, el ANSYS-CFX que es un código CFD de amplio espectro de aplicación. En las últimas versiones se han incluido diversas mejoras (tratamiento de la superficie libre) que facilitan su utilización en el campo naval, como puede comprobarse en varias publicaciones recientes. Una de las grandes ventajas de este programa es la versatilidad y capacidad de adecuación al usuario mediante la posibilidad de programación de funciones por parte del propio usuario.

Aun cuando el usuario final pueda crear funciones propias para adecuar el código a sus necesidades, el código CFX pone a su disposición multitud de opciones entre las que es posible elegir. Por ejemplo, hay disponibles más de 16 modelos de turbulencia, entre los que se incluyen los más comunes, como  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , SMC, DES y LES. Sin embargo, es de especial interés la inclusión del modelo “Shear Stress Transport” (SST) que, con requerimientos computacionales similares al modelo  $k-\varepsilon$ , es mucho más preciso, en especial en casos en los que existe separación del fluido.

Ya dentro de la aplicación a la ingeniería naval, CFX presenta otras cualidades importantes. Para el cálculo de la superficie libre utiliza un modelo “Volume of Fluid” (VOF). Este modelo es homogéneo, lo que implica que ambos fluidos (agua y aire) comparten un campo común de velocidades, presión y turbulencia. Esta manera de abordar el problema acelera la obtención de resultados, si bien en casos en los que es necesario estudiar problemas de spray u otros en los que existe separación de la fase líquida es posible aplicar otro modelo, no homogéneo. El modelo de fracciones de volumen por fase garantiza la estabilidad del

cálculo y sus características anti-difusivas permiten obtener resultados más exactos. Para terminar con el tratamiento de la superficie libre, es también importante mencionar que CFX dispone de un sistema de refinamiento automático de malla, lo que permite aumentar aún más la precisión con la que la superficie libre es obtenida.

Por desgracia, al ser el CFX un programa no específico para resolver casos de hidrodinámica naval, los aspectos fundamentales para este campo, como la representación de la superficie libre no están tan bien rematados como sería deseable. En particular, ha sido necesario dedicar un gran esfuerzo para conseguir obtener resultados adecuados en cuanto a la posición de la superficie libre.

### **2.3.- Métodos SPH**

Las siglas SPH resumen el nombre inglés de Smoothed Particle Hydrodynamics y hacen referencia al método numérico que describió por primera vez L.B.Lucy en 1977[5]. Dicho método se presentó como una aproximación de Monte Carlo para la resolución de problemas de dinámica de gases en astrofísica. Posteriormente, otros autores como Gingold, Benz o Monaghan, por citar a algunos de los más notables, se encargaron de desarrollar este método, fundamentalmente para aplicaciones a problemas del campo de la astrofísica.

En 1992 Monaghan [6] propuso una extensión del método para su aplicación a problemas de líquidos con superficie libre, lo que permitía la aplicación de este método a problemas de interés para la Ingeniería.

En esencia, el método de SPH utiliza una aproximación lagrangiana a la mecánica de fluidos en la medida en que sigue la evolución de las distintas variables ligándolas a las partículas del fluido más que asociándolas a una posición fija en el espacio. Es precisamente esta característica la que dota de más fuerza a este método, puesto que de este modo se evitan muchos de los problemas asociados a las aproximaciones eulerianas más comunes. Concretamente en su aplicación a problemas con superficie libre, como lo es el fenómeno de *sloshing*, el enfoque lagrangiano elimina el problema de las distorsiones que se originan en la superficie libre, las cuales son difíciles de tratar con una malla ordenada de puntos.

Son numerosas las publicaciones recientes relacionadas con el desarrollo y validación de la SPH dado que ha despertado un gran interés en diversos campos. Las aplicaciones publicadas para el SPH van desde simulaciones cosmológicas hasta incursiones en el campo de la animación cinematográfica pasando por procesos de solidificación de metales, simulación de sólidos sometidos a grandes deformaciones, problemas de impactos y, por supuesto, problemas de fluidos con superficie libre [7][8]. Los artículos sobre este tema tratan en general de los resultados obtenidos, aunque algunos informan de algunas dificultades que constituyen en realidad los verdaderos frentes abiertos en la investigación de este método. En concreto, los problemas de transporte para algunas cantidades y su relación con el modelo de viscosidad artificial que se ha utilizado, o inestabilidades en la simulación de sólidos. Algunas tesis recientes también prestan gran atención al problema de la modelización de las fronteras.

### **3. LA VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS.**

Los resultados numéricos anteriores tiene que validarse para acreditar su credibilidad. Es decir, se debe cuantificar la incertidumbre de los resultados proporcionados por los CFD a través de analizar tanto los errores del modelo como numéricos. Los procedimientos para cuantificar estos errores pueden agruparse convenientemente en: documentación, verificación y validación. La documentación recoge una detallada presentación de las ecuaciones matemáticas y los métodos numéricos utilizados. La minimización de los errores numéricos a través de estudios de convergencia y orden de exactitud constituyen la base de la verificación, mientras que la validación es la determinación de la verdadera magnitud del error cometido a través de la comparación de los resultados con datos experimentales suficientemente contrastados (“benchmark data”).

En la figura 3.1 se incluye un mallado de un buque de la Serie 60, tanto del casco como de la superficie libre, y en la figura 3.2 los resultados de la convergencia del coeficiente de resistencia por formación de olas  $C_{wx}$  en función del número de paneles de la superficie libre para dos números de Froude diferentes.

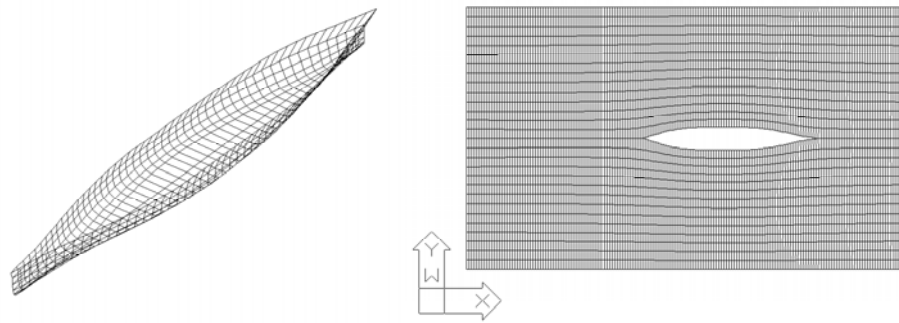


Figura 3.1. Mallado del casco y superficie libre de un buque de la S60.

En la figuras 3.3. y 3.4 se incluyen los resultados correspondientes a un buque de la Serie 60 con los cortes de ola sobre la carena y a una distancia 0,5665B de crujía.

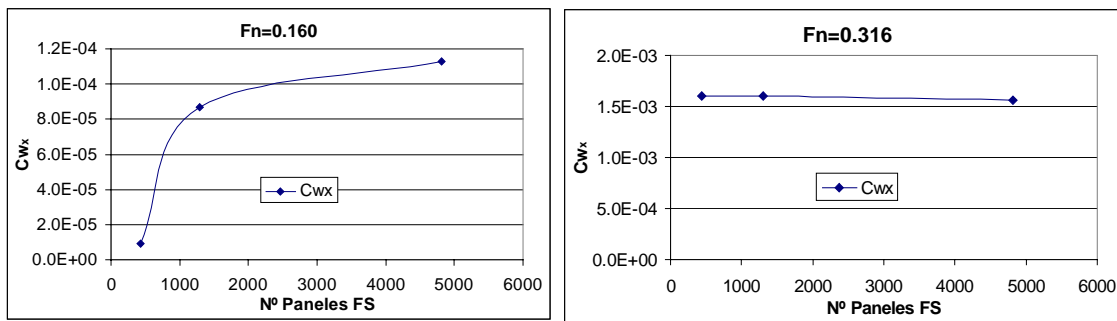


Figura 3.2.  $C_w$  versus mallado

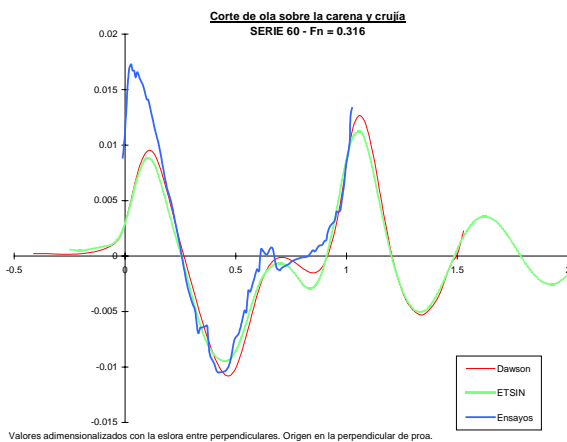


Figura 3.3

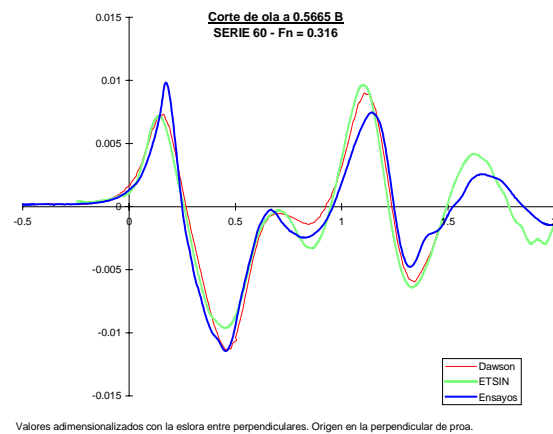


Figura 3.4



Por lo que respecta a los desarrollos viscosos, a continuación se incluye la validación (figura 3.5) de la ola generada por un hidrofoil que avanza sumergido en agua en régimen subcrítico. Las formas del hidrofoil vienen dadas por un perfil NACA 0012 y el experimento se realiza con un ángulo de inclinación de  $5^\circ$ . Las medidas experimentales que han valido de referencia para esta simulación han sido llevadas a cabo por Duncan. Se emplearon distintas mallas para el cálculo pero la que mejores resultados dio fue una de 124748 nodos que proporcionando el siguiente perfil de ola. La figura 3.6 recoge la validación de los trabajos realizados en SPH, relativo a tanques estabilizadores pasivos, en donde se representa el momento ejercido por el agua en el interior del tanque en función de la frecuencia..

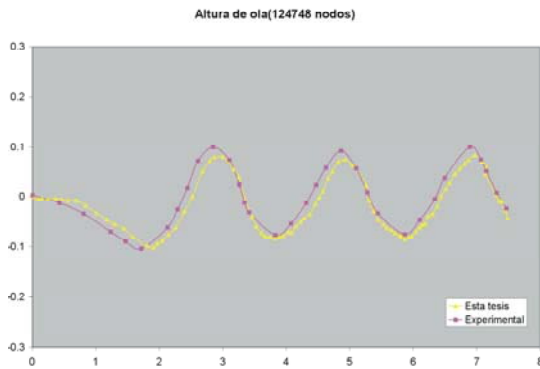


Figura 3.5

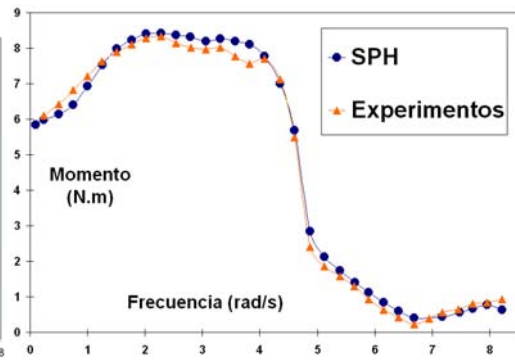


Figura 3.6

La figura 3.8 presenta los últimos trabajos de validación llevados a cabo con el programa ANSYS-CFX relativo a la estela de un buque pesquero ensayado experimentalmente en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (figura 3.7).

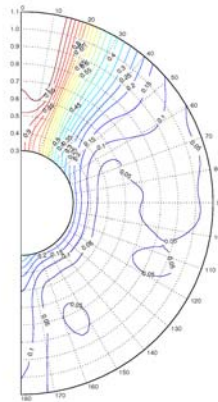


Fig. 3.7

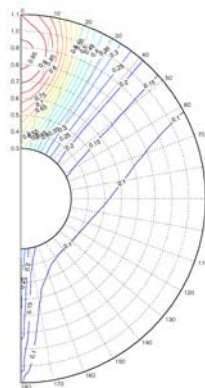


Fig. 3.8

#### **4.- EL FUTURO DE LOS CANALES DE ENSAYOS**

Todo lo anterior hace pensar que los Canales de Ensayo tradicionales tienen los días contados. Nada más lejos de la realidad. Se ha visto que en el papel de la validación de los CFD presentan una actuación fundamental abriendo nuevos campos anteriormente no cultivados por los Canales tradicionales que además los hace incorporar nuevas técnicas de medida más complicadas y con un riguroso cálculo de incertidumbres.

Esta incorporación de nuevos elementos de medida lleva a abordar nuevos problemas para conocer la física de ciertos fenómenos como la separación de los flujos o la turbulencia. Un hecho constatado es que en los últimos años no se han cerrado instalaciones de este tipo sino más bien se han abierto como el centro en Val de Reuil (Francia) o las mejoras introducidas en las instalaciones de MARIN (Países Bajos).

#### **5.- CONCLUSIONES.**

Todo lo anterior ha puesto de manifiesto que muchas de las respuestas dadas por los Canales de Ensayo tradicionales para los problemas hidrodinámicos de los buques pueden ser contestados hoy en día por los cálculos numéricos, los CFD, que ya han abandonado la Academia para adentrarse en los “Oficinas técnicas”.

No obstante, los Canales de Ensayo ocupan un papel primordial en la validación de estos cálculos abriendo nuevas vías de experimentación en base a una nueva competitividad que bien encauzada siempre es positiva.

Todo ello, nos lleva a asegurar que por lo menos en los años venideros las instalaciones experimentales convivirán con los cálculos numéricos en un fructífero maridaje.

## REFERENCIAS:

- [1] Pérez Rojas, L y Moreno, M., “Algunas Consideraciones sobre el Cálculo del Flujo Irrotacional alrededor del Buque”, XIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Canarias, 1976. Publicado en Ingeniería Naval, Marzo 1977 y como Informe nº 57 del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de El Pardo.
- [2] Bermejo, R.; Pérez Rojas, L.; Sánchez, J.M.; Souto, A. y Zamora, R., “Sobre una línea de investigación en hidrodinámica numérica”, Revista “Ingeniería Naval” nº 691, Febrero 1993
- [3] Dawson, C.W.; “A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems” Proc. 2<sup>nd</sup>. Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, 1977 Berkeley, pp 30-38.
- [4] González Gutierrez, Leo M., “Integración de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de los elementos finitos y el método de las características . Aplicaciones a casos con superficie libre”. Tesis doctoral. E.T.S.I. Navales, Madrid. 2001.
- [5] Lucy, L.B., “A numerical approach to the testing of the fission hypothesis”, The Astronomic Journal Vol 28, No 12, 1977.
- [6] Monaghan, J.J., “Simulating free surface flows with SPH“, ASME Symposium on Computational Methods in Fluid Dynamics, Lake Tahoe, 1994
- [7] Souto, A., Laiz, I., Abril, S., Abad, R., “Passive stabilizer tanks dimensioning using SPH simulations. Fourth International Conference on Marine Technology”, Szczecin, Poland, 2001
- [8] Souto Iglesias, A., Pérez Rojas, L., Zamora Rodríguez, R., “Simulation of anti-roll tanks and sloshing type problems with smoothed particle hydrodynamics”, Ocean Engineering, Volume 31, Issues 8-9, June 2004, Pages 1169-1192