

IV Simposio Marítimo Internacional
13-15 de junio 2001 – La Habana, Cuba

**“LOS CFD (COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS) EN EL DISEÑO DE BUQUES.
APORTACIONES DE LA E.T.S.I.N.(U.P.M.)”**

Luis Pérez Rojas¹
Antonio Souto²
Leo M. González Gutierrez³

¹ Dr. Ingeniero Naval. Director del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica. Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid. ESPAÑA.
email:lperezr@etsin.upm.es

² Ingeniero Naval. Departamento de Hidrodinámica Numérica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica. Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid. ESPAÑA. email:asouto@etsin.upm.es

³ Ingeniero Industrial del ICAI. Departamento de Hidrodinámica Numérica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica. Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid. ESPAÑA.
email:leo@etsin.upm.es

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 versa sobre la aplicación de los Cálculos de Mecánica de Fluidos mediante ordenador, los denominados CFD (Computational Fluid Dynamics), a la hidrodinámica del buque y en particular a la resistencia del buque al avance y a la optimización de sus formas.

Se presentan 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.

Una mención especial es la dedicada a la verificación y validación de estos desarrollos, a su calidad. Se incluyen finalmente algunos ejemplos de su utilización en la optimización de las formas de diversos buques poniendo de manifiesto que actualmente constituyen una herramienta de diseño de gran importancia para el ingeniero naval.

ABSTRACT

The use of Towing Tanks, through experimental tests with models, has been the only way to predict the flow behaviour and forces acting on a ship hull. Although the mathematical scheme of these problems were stated in the XVIII Century, it was not possible to solve it until the arrival of computers in the seventies.

This paper deals with the CFD (Computational Fluid Dynamics) applications to the ship hydrodynamics and, in particular, to the ship resistance and to the ship forms optimisation.

The developments in this field done in the Towing Tank of the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales of the Polytechnical University of Madrid are presented, not only in the potential flow assumption but with the consideration of viscosity also.

The verification and validation of the codes are specially mentioned, their quality. Finally, some examples of their use in the optimisation of different ship forms are included showing that these tools are nowadays a design tools of great importance to the naval architect.

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, 2, 3 y 4] 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 los Oficinas Técnicas como una herramienta más de diseño.

Este trabajo trata de abordar los desarrollos realizados en el Canal de Ensayos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid en el campo de los cálculos de mecánica de fluidos por ordenador tanto en el campo de flujos potenciales en donde no se tiene en cuenta la viscosidad y los resultados se asimilan a la componente de la resistencia por formación de olas como en el campo viscoso donde la consideración de la viscosidad y la presencia de la superficie libre proporcionaría la resistencia total al avance. En esta última faceta los avances conseguidos no permiten, por el momento, tal meta pero sí muestran unos resultados esperanzadores en ciertas aplicaciones hidrodinámicas.

Para asegurar una alta calidad en las soluciones proporcionadas por los CFD se requiere una cuantificación de la incertidumbre de los resultados. Esta incertidumbre se debe tanto a errores en el modelo (incertidumbre en la representación matemática de la realidad física) como a errores numéricos (incertidumbre en las soluciones numéricas de las ecuaciones matemáticas). Ejemplos de estas labores de verificación de la calidad de los desarrollos efectuados también se incluyen en el presente trabajo.

El uso de los CFD en el proyecto de un buque requiere del proyectista una nueva “filosofía de proyecto” cuando se está considerando la optimización de sus formas. Los proyectistas experimentados eran capaces de evaluar la influencia de modificaciones locales del casco en la resistencia al avance del buque pero no tenían medios para juzgar los efectos de estas modificaciones en base a una evaluación cuantitativa de los mismos. Normalmente eran magnitudes globales, como el coeficiente de resistencia total y la visualización de los trenes de ola dejados por el barco, los indicadores de un buen funcionamiento hidrodinámico del buque.

Las herramientas como los CFD permiten evaluar estas modificaciones en base a los resultados de los cálculos realizados; las variables calculadas son diferentes de las obtenidas en los ensayos experimentales y su significado físico debe considerarse con cuidado y,

generalmente, no en términos absolutos. Debido a la gran cantidad de resultados que se pueden obtener se debe hacer un gran esfuerzo para conseguir una exposición inteligible de las cantidades calculadas y en este campo la representación gráfica de datos es una ayuda fundamental para el mejor uso de las herramientas CFD. El mapa de la distribución del coeficiente de presiones C_p , de los vectores velocidad, la representación en tres dimensiones del tren de olas calculado y los perfiles de ola en el casco y en cortes longitudinales paralelos a crujía son los parámetros locales que se pueden utilizar para al evaluación de un casco “ensayado numéricamente”.

La utilidad de estas herramientas es demostrada a través de algunos ejemplos de optimización de las formas de proa de diversos buques. La limitación a esta zona del barco es debida al uso de cálculos potenciales.

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 [1,2] con trabajos sobre flujo potencial tratado con el método de paneles según técnicas basadas en los desarrollos del Profesor Louis Lansweber[5].

El código potencial desarrollado en la ETSIN se basa en el método de paneles con superficie libre que fue introducido inicialmente por Dawson [6]. El método de paneles se puede aplicar a cualquier problema de dinámica de fluidos gobernado por la ecuación de Laplace y constituye el flujo más sencillo pero con sentido físico, el flujo potencial de un fluido incompresible y sin viscosidad.

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[6]. 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[6].

Actualmente se está trabajando en un método que resuelva el problema con las condiciones de contorno no lineales. Para ello se están ensayando diferentes aproximaciones y diferentes formas de imponer la condición de radiación. Dentro de este contexto de cálculos

numéricos, una nueva línea de trabajo con la que se están obteniendo buenos resultados es la del estudio de la propagación de las olas en fondos poco profundos, dado que está empezando a ser condición de proyecto el que las olas de ciertos barcos rápidos no superen unas determinadas magnitudes en su paso por ríos o, a la entrada de los puertos. Es el fenómeno del “wave-washing”.

Los programas tienen la mayor parte de su código escrito en lenguaje C. Para cálculos importantes, se ha compilado el programa para LINUX, y se ejecutan en un PC con procesador Pentium de última generación. En cuanto al preproceso y al postproceso, aunque inicialmente se desarrollaron códigos propios de mallado y visualización gráfica de resultados, se ha considerado oportuno el recurrir a un código comercial, usando pequeños interfaces para comunicar este programa con el módulo de cálculo. El programa elegido ha sido el GID, desarrollado por el CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña.

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 este desarrollo. 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.

3. LA VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS.

Anteriormente se ha comentado la importancia de 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.

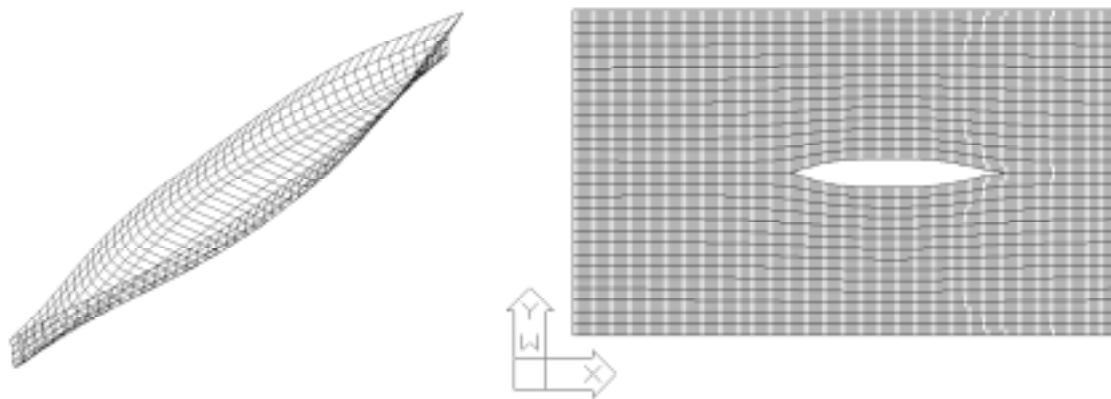


Figura 3.1. Mallado del casco y superficie libre de un buque de la S60.

Recientemente, en colaboración con el Centro Internacional de Métodos Numéricos de la Universidad Politécnica de Cataluña (CIMNE), el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo y la Empresa IZAR de Construcciones Navales, S.A. se ha llevado a cabo un ambicioso plan de validación y puesta a punto de cálculos numéricos, ensayando diversas carenas y contrastando los resultados experimentales no sólo con los desarrollos numéricos de la ETSIN sino también con otros códigos existentes en la comunidad internacional hidrodinámica.

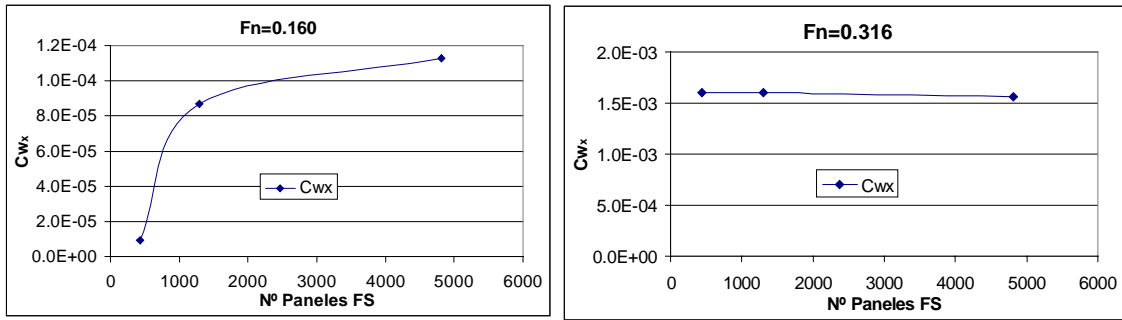


Figura 3.2. C_w versus mallado

En la figuras 3.3. y 3.4 se incluyen estos 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. La figura 3.5 presenta el corte en crujía de un petrolero de flota.

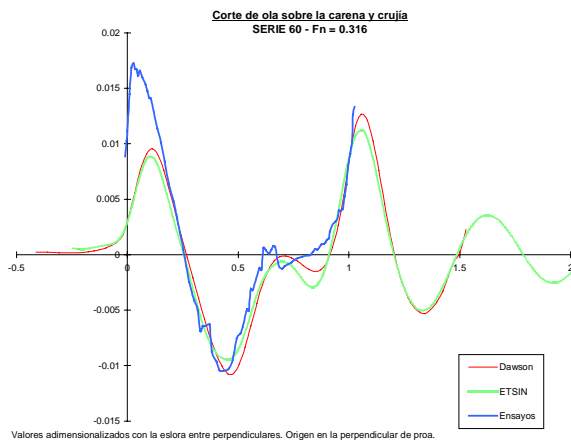


Figura 3.3

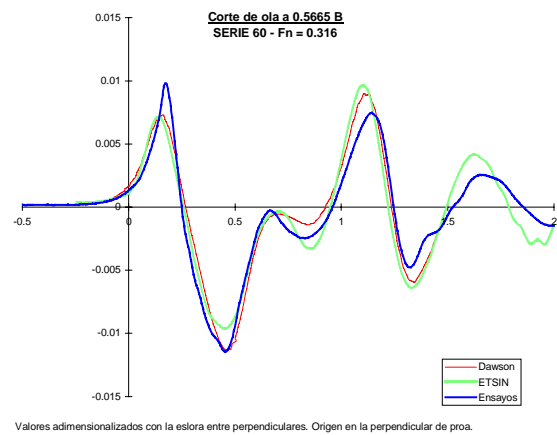


Figura 3.4

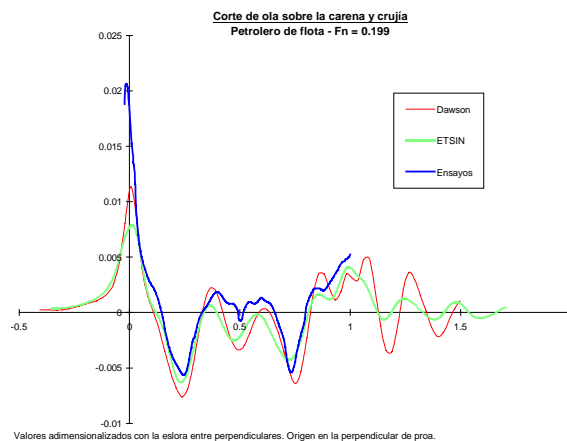


Figura 3.5

Por lo que respecta a los desarrollos viscosos, a continuación se incluye la validación 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°. Las medidas experimentales que han valido de referencia para

esta simulación han sido llevadas a cabo por Duncan y publicadas en [7]. Para estas medidas se empleó un canal de 24 m de longitud y se sumergió un perfil de 20.3 cm de cuerda una profundidad de 21 cm. Aprovechando la geometría del hidrofoil se consideró que posee una dimensión mucho mayor que las otras dos y por lo tanto cabría pensar en una simulación bidimensional. Se emplearon distintas mallas para el cálculo pero la que mejores resultados dio fue una de 124748 nodos que proporcionó el siguiente perfil de ola:

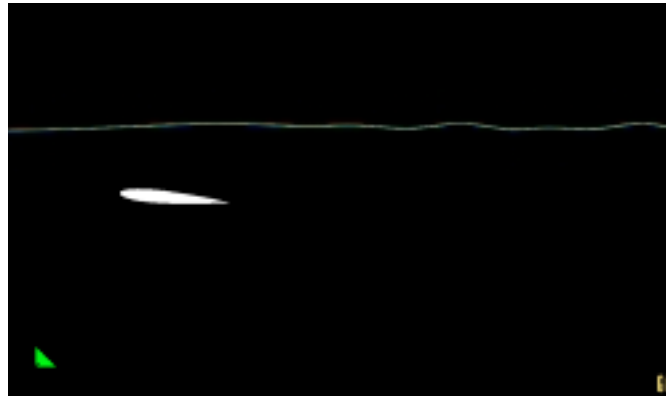


Figura 3.6

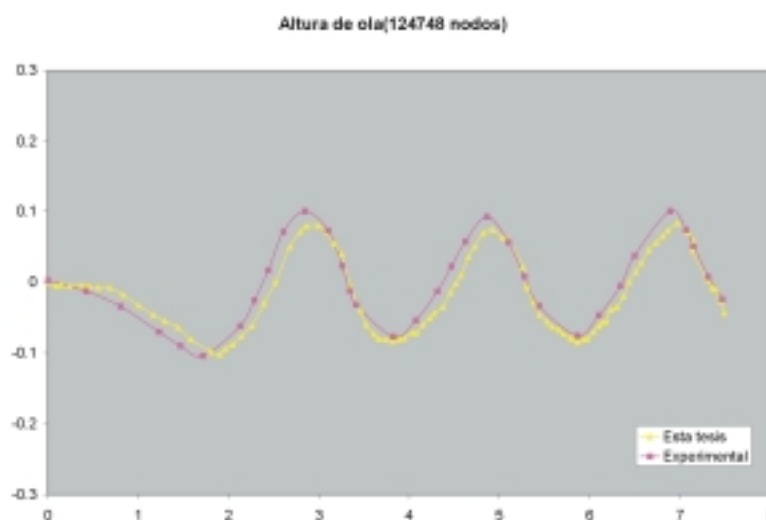


Figura 3.7

Como se puede observar en la figura anterior los resultados computacionales están próximos a las medidas experimentales lo cual proporciona mucha confianza en el CFD elaborado y anima a seguir avanzando en geometrías tridimensionales para un futuro próximo.

4.- OPTIMIZACIÓN DE FORMAS DE BUQUES.

Las herramientas potenciales han alcanzado un grado de madurez que permite su uso para la optimización de formas de proa de buques.

La figura 4.1 presenta dos alternativas de las formas de proa de un buque RO-RO de 112,20 m de eslora entre perpendiculares. La distribución de presiones en ambas proas se presenta en las figuras 4.2 y 4.3 en donde se puede apreciar una distribución más suave de las

presiones en el bulbo 2 y con un valor absoluto menor. Ensayadas estas dos formas en el Canal de la ETSIN se obtuvo una reducción de la resistencia de un 11%.

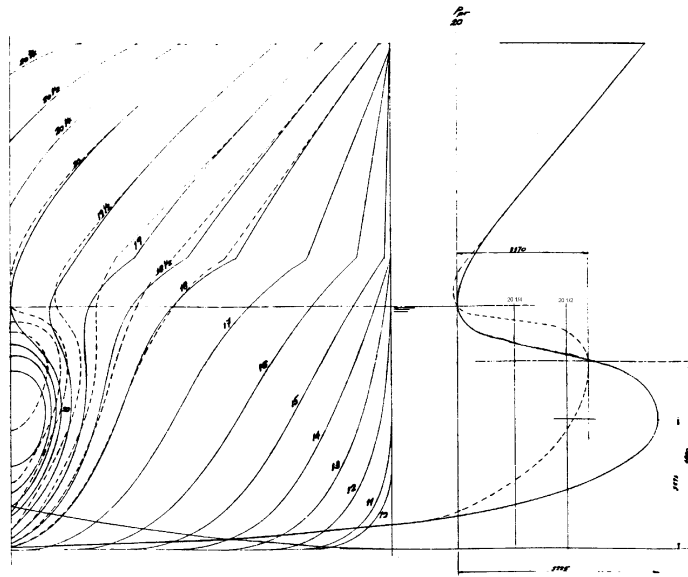


Figura 4.1. Proas de un buque RoRo.

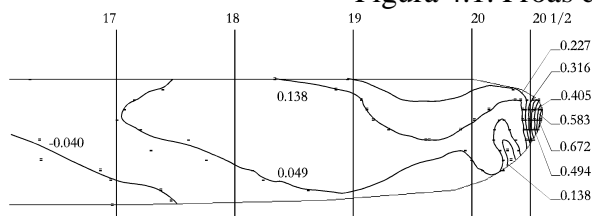


Figura 4.2 : Bulbo 1

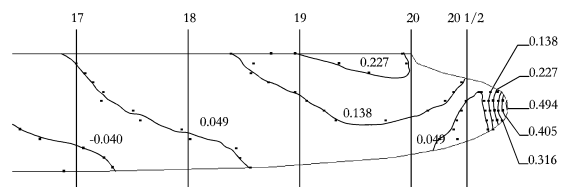


Figura 4.3: Bulbo 2..

La figura 4.4 representa las formas iniciales de un buque atunero de 66 m de eslora entre perpendiculares y la figura 4.5 una modificación de la proa, con un alargamiento de 10,42 m y la inclusión de un nuevo bulbo. En la figura 4.6 tenemos el mapa de presiones correspondiente a ambas formas. Se aprecia la disminución de gradientes en la segunda forma, lo que es indicativo de un mejor comportamiento en lo que se refiere a la formación de olas.

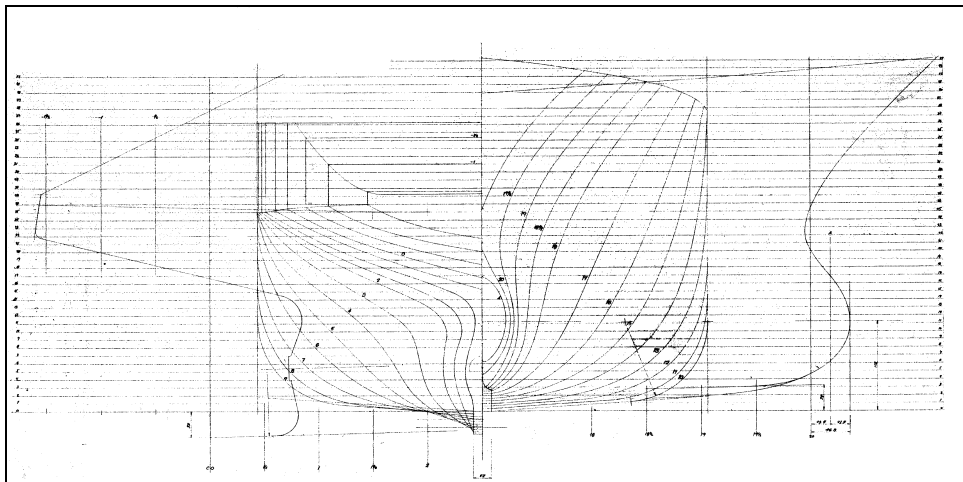


Figura 4.4.- Formas iniciales. Atunero Lpp=66m

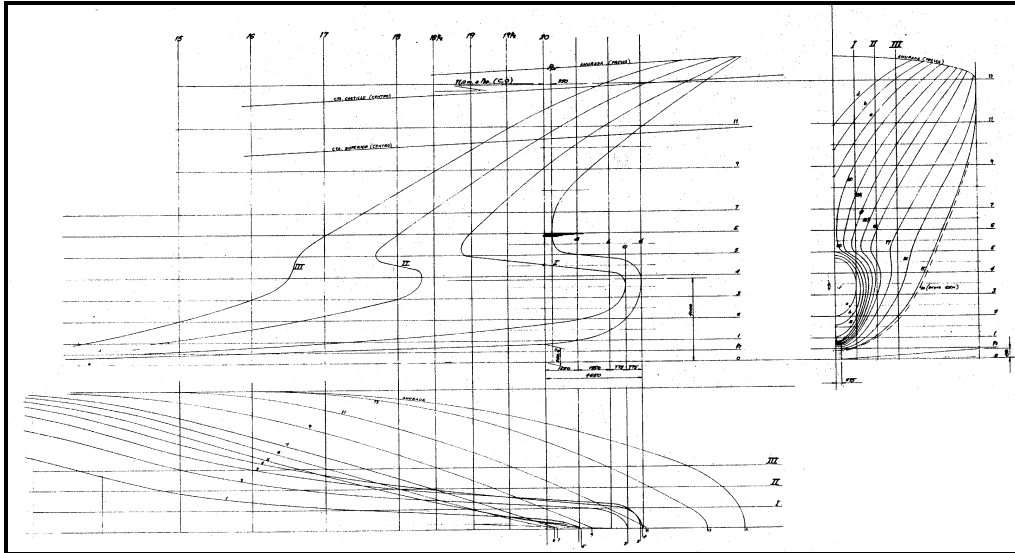


Figura 4.5.- Formas modificadas. Atunero de $L_{pp}= 76,42$ m.

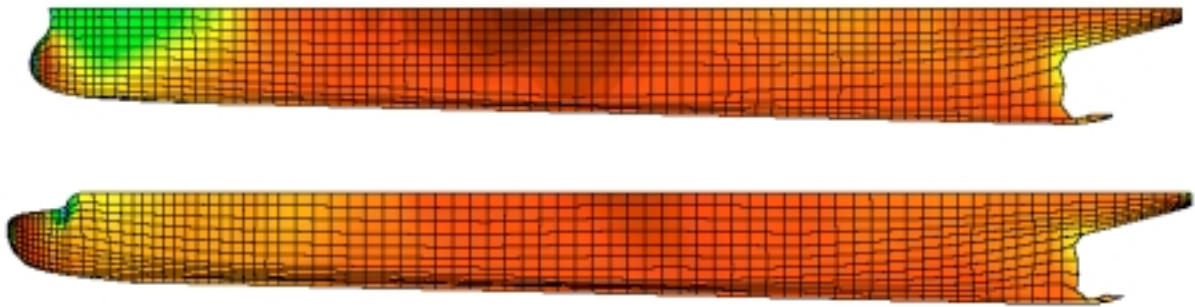


Figura 4.6.- Mapa de presiones de las formas originales y modificadas del atunero.

Los ensayos realizados pusieron de manifiesto una reducción cuantitativa de la potencia de remolque del 25% para una velocidad de 16 nudos.

5.- CONCLUSIONES.

De lo expuesto en los párrafos anteriores se pueden extraer las siguientes consideraciones:

- Los CFD se han convertido en una herramienta de diseño “madura” en lo relativo a los desarrollos potenciales que permiten la optimización de las formas de proa de buques de forma cualitativa complementando la actual labor de los “canales” experimentales.
- Los desarrollos en este campo realizados por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid han alcanzado un cierto nivel de confianza una vez sometidos a procesos de validación con ensayos experimentales y numéricos.

- Los desarrollos viscosos, a pesar de los logros conseguidos, presentan un campo abierto de mejora para conseguir una herramienta eficaz y segura de diseño y que encierre el mismo nivel de incertidumbre que los actuales ensayos hidrodinámicos.

AGRADECIMIENTOS.

Cualquier trabajo experimental o de desarrollo es fruto de un grupo de investigadores. El trabajo presentado aquí no es una excepción, un grupo numeroso de profesores e investigadores ha participado en él sin olvidar a los alumnos que en los últimos años se han sentido atraídos por la hidrodinámica y que han creado en el “canal” un lugar no sólo de trabajo sino también de amistad y formación. A todos ellos, cuya lista no permitiría cumplir los requisitos de extensión del trabajo, muchas gracias.

BIBLIOGRAFÍA.

[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] Pérez Rojas, L. y Moreno, M., “El Flujo Potencial en Cuerpos de Revolución equivalentes a Formas de Buques”. XV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Junio 1977, Palma de Mallorca. Publicado en Ingeniería Naval, Mayo 1978.

[3] García Espinosa, J., Souto Iglesias, A. y Pérez Rojas, L., “Sobre los ‘CFD’. Una Herramienta de Diseño en Buques de Crucero y Pasaje”. XXXIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. A bordo del buque “DON JUAN”. Noviembre 1998.

[4] 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

[5] Landweber, L y Macagno, M., “Irrotational Flow About Ship Forms”. Report nº 123. Iowa institute Hydraulic Research. Diciembre 1969.

[6] Dawson, C.W.; “A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems” Proc. 2nd. Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, 1977 Berkeley, pp 30-38.

[7] J.H. Duncan ,”The breaking and non breaking wave resistance of a two dimensional hydrofoil “.Journal of Fluid Mechanics, 126,507-520 1983.