

# **La calidad en el software. Validación de “CFD” (Computational Fluid Dynamics).**

Luis Pérez Rojas, Dr. Ing. Naval, Ms.S.<sup>1</sup>  
Juan Miguel Sánchez Sánchez, Dr. Ing. Naval<sup>1</sup>  
Ricardo Zamora Rodríguez, Dr. Ing. Naval<sup>1</sup>  
Rodolfo Bermejo, Dr. Ing Naval, Ph.D.<sup>2</sup>  
Antonio Souto Iglesias, Ing. Naval<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (UPM)  
Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 Madrid, España.  
<sup>2</sup>Facultad de Matemáticas (UCM)  
Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España.

## **RESUMEN**

El concepto de calidad alcanza evidentemente a los sistemas informáticos y en particular a los “programas de ordenador”. En este trabajo después de comentar los criterios de calidad de la “materia gris” de la informática a través de las Normas ISO, se aborda la problemática de la validación de los programas de ordenador de mecánica de fluidos encaminados a la optimización hidrodinámica de las formas de buques.

Esta validación debe entenderse como la demostración de que el programa de ordenador representa adecuadamente la realidad física. La comparación con resultados experimentales se presenta como el camino más razonable para esta demostración.

Los desarrollos de “CFD” últimamente llevados a cabo por el equipo investigador del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S.I. Navales son sometidos a las consideraciones apuntadas anteriormente de validación y calidad.

## **PALABRAS CLAVE**

Calidad, software, hidrodinámica, Normas ISO, validación, canales de ensayo.

## **ABSTRACT**

The concept of quality is applicable to computer systems and, in particular, to their software. This paper, after setting a quality criteria as a consequence of the ISO Standards, faces the problem of validating the computer fluid dynamic codes designed to optimize the ship hull forms.

This validation based on the comparison with experimental results, can be considered a very reasonable way of measuring the robustness of the numerical method.

The latest developments carried out by the research team of the Towing Tank Model Basin of the E.T.S. Ingenieros Navales are evaluated under the previously referred to validation of quality criteria.

## **KEY WORDS**

Quality, software, hydrodynamics, ISO Standards, validation, towing tanks

## **1.- INTRODUCCIÓN**

El Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia define la **calidad** como la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie. Y siguiendo con la misma fuente, “cosa” es todo lo que tiene entidad, ya sea corporal o espiritual, natural o artificial, real o abstracta. Es evidente que un programa de ordenador (software) es susceptible de calidad.

Un programa de ordenador tiene cuerpo en forma de unas instrucciones escritas sobre un cierto soporte, es artificial porque ha sido creado por el hombre y es real porque tiene una existencia independiente de la mente que en un principio lo definió y programó.

Pero aunque esté claro este concepto de calidad en un programa de ordenador es evidente que el problema que se plantea es el de definir una serie de propiedades que nos permitan el graduar y comparar unos programas con otros, o simplemente, que un determinado “programa” alcance un cierto nivel resolviendo un problema o una necesidad a su usuario.

Unas características mínimas de un producto de software están definidas por la Organización Internacional de Estándares (ISO) en su norma 9126{ISO 1991}

pretendiendo sentar unas bases mínimas que permitan un desarrollo posterior y describir la calidad de los productos lógicos que constituyen los programas de ordenador.

Aunque dentro de la palabra inglesa software se incluye todo tipo de programas, procedimientos, reglas y cualquier otra documentación relativa a la operatividad de un ordenador nos vamos a centrar en los programas que tratan de resolver algún problema relativo a la mecánica de fluidos y en particular en aquellos que utilizan el agua como fluido.

Con este trabajo se pretende analizar la calidad de los programas de ordenador, en particular de los dedicados a resolver problemas de hidrodinámica en el ámbito de la Ingeniería Naval.

Después de analizar las características de calidad a la luz de la mencionada norma ISO 9126 y de conocer el alcance de los denominados CFD (Cálculos de dinámica de fluidos computarizada) se aplican una serie de consideraciones sobre verificación y validación a un “programa” desarrollado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales para determinar la resistencia al avance de un buque.

Esta línea de investigación se inició hace algunos años{Bermejo 1993a, 1993b} en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la ETSIN de forma paralela a la investigación experimental.

## **2.- LA CALIDAD DEL SOFTWARE. LAS NORMAS ISO.**

Las Normas ISO 9000 son uno de los frutos de la Organización Internacional de Estándares. Localizada en Ginebra, ISO es un consorcio que agrupa virtualmente a todos los países industrializados del orbe, desde Albania hasta Zimbabwe. Su misión es desarrollar estándares industriales que faciliten el comercio internacional

Las Normas ISO 9000 no son un estándar para un producto sino el estándar para un sistema de calidad. No se aplica a un servicio o un producto sino al proceso que lo genera. Están pensadas y diseñadas para que se puedan aplicar a cualquier producto o servicio fruto de cualquier proceso realizado en cualquier parte del mundo.

Para alcanzar este objetivo tan genérico, dichas normas evitan, en la medida de lo posible, métodos específicos que sean obligatorios, prácticas y técnicas. Procuran proporcionar principios, metas y objetivos que se pueden aunar en un único lema, el mismo que guía a cualquier hombre de negocios: satisfacer las expectativas y requerimientos del consumidor.

Este objetivo se trata de alcanzar mediante la aplicación a cualquier actividad susceptible de calidad de un ciclo sin fin: **planear, controlar y documentar**.

- Toda actividad debe ser **planeada** de forma que sus metas y la autoridad y responsabilidad sobre ella queden perfectamente definidas y entendidas.
- Toda actividad debe estar **controlada** de forma que se cumplan a todos los niveles los requerimientos específicos, que se puedan prever los problemas y que las acciones correctoras estén programadas y se pueden llevar a cabo.
- Toda actividad debe estar **documentada** de forma que permita entender los objetivos de calidad y los métodos correspondientes, la interacción dentro de la propia institución, la retroalimentación de la programación inicial y servir de objetiva evidencia de las actuaciones del sistema de calidad para aquellos que lo soliciten como pueden ser el cliente o los asesores de terceras partes.

Como vemos, este marco es amplio y un poco abstracto, difícil de aplicar al mundo de por sí poco concreto del “software”, la parte lógica de la informática. En este campo es de aplicación la norma 9126 dedicada a los programas de ordenador definiendo las características de calidad de los mismos.

Estas características son las siguientes:

Funcionalidad: Los programas deben proporcionar la información utilizando parámetros y nomenclatura compatible con las prácticas establecidas en el sector industrial de que se trate.

Fiabilidad: Los programas deben realizar sus cálculos dentro de unos márgenes de confianza y alcanzar unos determinados niveles de precisión.

Facilidad de uso (usability): Esta característica evalúa la capacidad para que su lógica sea entendida por el usuario así como el aprendizaje de las operaciones de entrada y salida de datos y de control.

Eficiencia: La eficiencia de un programa de ordenador se debe medir no sólo en el tiempo de CPU sino en la consideración de los recursos empleados tanto materiales como humanos.

Mantenimiento: Esta característica trata de reflejar la corta vida operativa de un programa de ordenador y que su actualización es fundamental para el usuario así como su adecuación a un cambio de entorno o necesidad.

Movilidad (portability): Un programa de ordenador debe ser instalado en un amplio abanico de entornos y con la posibilidad de transferirlo de uno a otro.

### **3.- Los “CFD”, concepto y campos de aplicación.**

El resolver un problema de mecánica de fluidos mediante aproximaciones matemáticas con la ayuda del ordenador constituye la base de los denominados CFD, siglas de la expresión inglesa “Computational Fluid Dynamics”, cuya traducción podría ser la de Dinámica de Fluidos Computarizada, recordando que la Real Academia de la Lengua acepta el verbo computarizar.

#### ***3.1.- Algo de historia sobre los CFD.***

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.

No obstante, la introducción de análisis matemáticos ha cuestionado la necesidad y prioridad de los ensayos realizados con modelos.

Aunque los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernoulli y Euler establecieron las ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos, de hecho, su utilización para aplicaciones en ingeniería fue escasa debido a la complejidad de su estructura y falta de recursos numéricos en aquel momento.

En el siglo XIX fueron Navier y Stokes los que establecieron las ecuaciones fundamentales que describen un flujo real en fluidos viscosos. De igual manera seguía ocurriendo que, exceptuando unos pocos casos sencillos para los que podían encontrarse soluciones analíticas, la mayor parte de las veces las ecuaciones no pueden resolverse en los casos de interés práctico.

Prandtl desarrolló, a comienzos del siglo XX, la teoría de la capa límite como una simplificación de la solución de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de la capa límite constituyeron el primer medio de análisis de un flujo no sólo en casos de interés académico, sino en situaciones de interés técnico, con las limitaciones impuestas por los medios existentes en su día.

De todas formas, el concepto de capa límite presenta restricciones que limitan su rango de aplicación. En los casos en que existen fenómenos de turbulencias y separación

de capa límite es casi obligatorio utilizar las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

La consideración del flujo alrededor de un buque como potencial, permitió a Michell{1898} hace casi un siglo el presentar una solución analítica de la resistencia por formación de olas en un buque fino e iniciar el interés de los científicos en hidrodinámica en los métodos numéricos.

Hacia 1970, con el desarrollo de ordenadores de gran potencia, las técnicas de resolución numérica pudieron ponerse en práctica.

Desde entonces el desarrollo de algoritmos para la solución no estacionaria de las ecuaciones de Navier-Stokes y la solución para un valor medio (RANSE: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) han avanzado considerablemente. Métodos numéricos como diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos se han utilizado con buenos resultados.

Todo ello ha dado lugar a la aparición de una nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Mecánica de Fluidos Computarizada” (CFD) que se encuentra en fase de desarrollo permanente.

Con todos ello se establece un campo de investigación “paralelo” al utilizado en los Canales de Ensayo pero mediante modelos matemáticos.

### ***3.2- Los campos hidrodinámicos de los CFD.***

En la actualidad son diversas las parcelas hidrodinámicas que dan cabida a los cálculos mediante CFD, si bien es cierto que el campo de la aeronáutica fue el pionero en este tipo de cálculos.

La razón de lo anterior la debemos encontrar en el tipo de fluido, aire en lugar de agua, y en la no existencia de la interfase aire-agua con la formación de olas que ello conlleva.

La diferencia de fluido hace resaltar la presencia de la viscosidad y de ahí que los aspectos hidrodinámicos que mejor pueden ser abordados por los CFD sean aquellos

problemas en donde los efectos viscosos sean pequeños, como pueden ser: la predicción de los movimientos del buque, la componente de la resistencia debida a la formación de olas y la acción del propulsor.

En el campo de la **resistencia al avance** se han realizado importantes contribuciones en la descripción puramente teórica del flujo alrededor del buque. Sin embargo, el más potente ordenador actual no puede generar una aproximación en donde se tengan en cuenta simultáneamente los efectos de la superficie libre y la viscosidad en toda su extensión.

En los desarrollos de los CFD en este campo de la resistencia se han seguido dos aproximaciones diferentes: aquella que se basa en la teoría potencial, que asume el fluido como no viscoso pero tiene en cuenta la superficie libre y aquella otra que aborda el problema viscoso no considerando la superficie libre.

En el primero de los casos tenemos todas las variantes del conocido método de Dawson{1977} que si bien los valores absolutos que se obtienen deben considerarse con sumo cuidado, sí es extremadamente útil para el diseño de detalles del casco y para comparación entre dos distintas configuraciones.

La descripción numérica del flujo en el caso viscoso presenta más dificultades que el caso potencial con superficie libre, debido a las dificultades de la resolución de la ecuación no lineal de Navier-Stokes.

Tampoco se puede silenciar los trabajos que algunos autores están llevando a cabo para solucionar dicha ecuación en presencia de la superficie libre, siendo la mayor dificultad en estos casos la modelización de la turbulencia.

Por lo que se refiere a las **características del propulsor** y debido a que con un número reducido de parámetros se puede definir la geometría del mismo, numerosos programas de ordenador, basados en la teoría de las superficies sustentadoras en tres dimensiones, existen en el mercado y proporcionan una excelente ayuda en el diseño y análisis de los propulsores.

La predicción del **comportamiento del buque en la mar** puede ser actualmente realizado con suficiente confianza por medios teóricos basándose en la teoría de rebanadas. Debido a que estos cálculos pueden realizarse con un moderado esfuerzo de ordenador son muy útiles en las primeras fases del diseño. También se han desarrollado

en los últimos años cálculos tridimensionales de difracción-radiación basados en la teoría potencial.

También el campo de la **maniobrabilidad** ha sido cultivado por los programas de ordenador, si bien su aplicación es bastante limitada debido a los complejos fenómenos de flujo que aparecen como el flujo cruzado y el desprendimiento de vórtices. En cualquier caso, la mejor aproximación para estudiar el comportamiento de buques por lo que respecta a la maniobrabilidad es a través de simulaciones en el dominio del tiempo.

No obstante este amplio abanico de posibilidades de utilización de los CFD en la hidrodinámica del buque, la utilización más tradicional y la que ocupa el mayor tiempo de los científicos de este campo es la dedicada a la determinación de la resistencia al avance que posibilite la optimización de las formas obteniéndose un buque de mínima resistencia.

### ***3.3.- El método desarrollado en la ETSIN.***

El código desarrollado en la ETSIN se basa en el método de paneles con superficie libre que fue introducido inicialmente por Dawson {1977}.

El método de los 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.

Es un hecho conocido, que se puede formular este problema mediante una ecuación integral lineal extendida a sus contornos, eliminando la necesidad de un mallado tridimensional del dominio estudiado y permitiendo que esta formulación proporcione soluciones del flujo potencial alrededor de configuraciones arbitrarias. Su conformidad con el flujo real, combinado con su generalidad geométrica, ha hecho que los métodos numéricos del cálculo del flujo potencial sean una herramienta importante en muchos campos de la hidrodinámica del buque como se ha comentado anteriormente.

En un principio, los investigadores calificaron a estos métodos como métodos de singularidades de superficie en contraposición a las antiguas aproximaciones de las técnicas de singularidades internas. Sin embargo, la discretización de la superficie del cuerpo considerado en pequeños cuadriláteros condujeron a la denominación de método de paneles y esta acepción ha sido aceptada en la comunidad de la mecánica de fluidos.



Algunas veces, el método se le denomina como método de los elementos de contorno debido a que una aproximación similar se puede usar en otros problemas de la física gobernados por ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales.

Mientras que el problema estacionario de la sustentación en tres dimensiones ha recibido una gran atención en el campo de la aerodinámica, es la consideración de la superficie libre la que alcanza una mayor preponderancia en el mundo de la arquitectura naval. El problema de la interacción buque-superficie libre ha sido atacado de forma positiva mediante el método de paneles a pesar de la considerable complicación causada por la presencia de la interfase aire-agua.

Como menciona Hess {1964}, en la denominada superficie libre, la presión en el agua debe ser constante y constituye una condición de contorno, normalmente en el plano que representa la situación de la superficie libre sin perturbar. Existe también la condición de radiación que gobierna la dirección de las olas en el infinito.

Para el caso de un buque de superficie navegando a velocidad constante en un mar sin oleaje se utilizan las denominadas fuentes de Rankine y se paneliza tanto la obra viva del buque como la mar en las proximidades del buque. La condición de la superficie libre se tiene que aplicar de modo que las olas generadas no se propaguen aguas arriba del buque (condición de radiación).

El código de la ETSIN calcula el flujo con superficie libre alrededor de un buque mediante el método de las fuentes de Rankine de la forma propuesta por Dawson. Ha sido desarrollado por el equipo de hidrodinámica numérica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. El procesador gráfico de nuestra plataforma informática permite la visualización del perfil de ola y de las distribuciones de presión y velocidad alrededor del buque. Las rutinas gráficas utilizadas son OPEN GL.

La malla que se ha utilizado para discretizar la carena, se ha construido aproximando por “splines” cúbicos las líneas de agua y distribuyendo regularmente sobre éstos, los vértices de los paneles que forman dicha malla.

En una primera aproximación, el problema no considera la superficie libre (método de Hess-Smith). Con esta estimación grosera se definen las líneas de corriente en la superficie libre que permite una panelización de la misma. Ultimamente, este paso de panelizar la superficie libre por líneas de corriente, se ha sustituido por uno mucho más rápido que consiste en hacer generación elíptica de mallado para la superficie libre. En un nuevo paso, se calcula una nueva distribución de singularidades en el casco y en la porción de superficie libre considerada. En la superficie libre se utilizó un operador clásico de cuatro puntos excepto en una zonas muy precisas donde se utilizan otros

esquemas numéricos con el fin de asegurar el adecuado amortiguamiento. Los cálculos se realizan en un HP 735/135 con 80 Mbytes RAM a 135 Mhz.

#### **4.- LA VALIDACIÓN DE CFD.**

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). En {Pérez Rojas 1996} se resume el objetivo de un análisis de validación en asegurar una alta calidad de las soluciones a través de la estimación de la incertidumbre (“uncertainty”).

Los errores en el modelo son debidos por ejemplo a los inadecuados modelos de turbulencia en el enfoque viscoso o a las condiciones de contorno. Entre las fuentes de errores numéricos podemos señalar: la transformación del sistema de coordenadas, la discretización, el acoplamiento velocidad-presión, la disipación artificial, los procesos iterativos y de mallado no convergentes, aproximaciones geométricas y los redondeos del ordenador.

Los procedimientos para cuantificar estos errores pueden agruparse convenientemente en: documentación, verificación y validación {Dolphin 1997}. 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”).

Se requieren estas tres facetas: documentación, verificación y validación, para identificar errores en el modelo y reducirlos a través de una mejora en la representación física del problema o en la representación matemática. No conviene olvidar que la aplicación rigurosa de estos procedimientos permitirá aumentar la confianza en las soluciones proporcionadas por los CFD, pasando de las aulas universitarias y Centros de Investigación a las Oficinas Técnicas.

Como vemos, la validación de CFD pasa por la contrastación de los resultados con “bases de datos”, principalmente de carácter experimental pero que también pueden incluir valores obtenidos mediante cálculos numéricos suficientemente contrastados.

En {Lin 1993} se mencionan los siguientes “datos” susceptibles de utilizarse en la validación de CFD:

- Los correspondiente a la estela nominal, medida con tubos de Pitot de cinco agujeros, en el buque tanque de 200.000 TPM “RYUKO-MARU”. Estos ensayos también fueron efectuados en dos geosims de 30 m. y 7 m. lo cual representa una muy buena fuente de información sobre el efecto de escala.
- El Ensayo de Hamburgo (Hamburgo Test Case) correspondiente a un buque contenedor de 153.7 m. de eslora. Los datos corresponden al buque real y al modelo tanto en canal de ensayos como en túnel de viento.
- Los datos del Programa SUBOFF, realizados por Huang en 1992 sobre cuerpos submarinos con distintos apéndices y que incluye un cuidadoso análisis de errores. Estos ensayos no tienen en cuenta la superficie libre. {Huang 1992}
- Las completas medidas realizadas por el grupo de Toda y Stern en la Universidad de Iowa referentes al buque de la Serie 60.
- Los estudios de Devenport y Simpson sobre el flujo en la unión de cuerpos con apéndices incluyendo el análisis de errores con un margen de confianza del 95%. {Devenport 1988}.

En marzo de 1994, se celebró en Tokyo un “workshop” sobre CFD, organizado en el mismo espíritu de los celebrados en 1980 y 1990 dedicados, el primero a la capa límite y el segundo al flujo viscoso. El objetivo primario del celebrado en Tokyo era el de evaluar el estado del arte en el flujo viscoso con superficie libre, sin embargo también se estudiaron los cálculos de flujo potencial con superficie libre. La validación de los resultados en el caso potencial se realizaron con los datos del buque de la Serie 60 de Toda y Stern {12}. Se eligieron dos números de Froude específicos 0.16 y 0.316 de forma que se recogieran los fenómenos de baja velocidad y los correspondientes a un número de Froude alto.

Considerando que ésta es la última referencia aceptada en el mundo hidrodinámico de los CFD a nivel mundial, utilizaremos estos datos para validar el programa de cálculo desarrollado en la ETSIN. En el siguiente apartado se presenta esta validación.

## **5.- VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DE CFD DESARROLLADO EN LA ETSIN.**

Como ya se ha indicado el programa desarrollado en la ETSIN para la determinación de la resistencia al avance ha sido validado con los resultados del buque de la serie 60 con un coeficiente de bloque de 0.60 {Todd 1963}. Las formas de este buque se presentan en la figura 1.

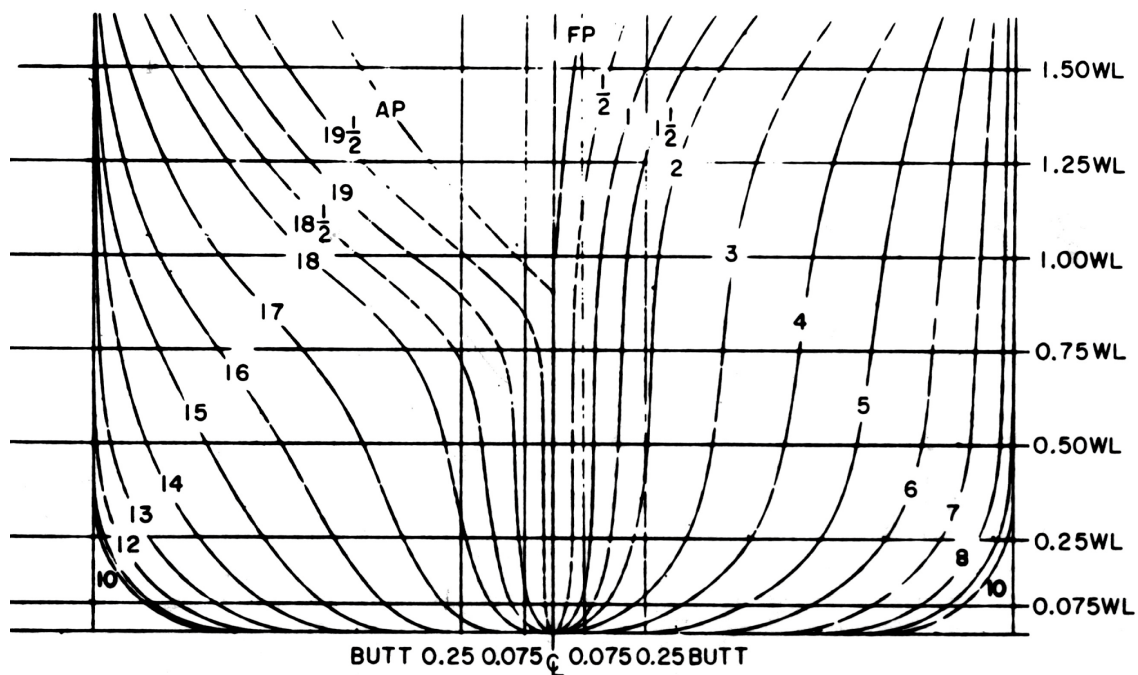


Fig.1 Caja de cuadernas. Buque SERIE-60.

Para proceder a la **verificación** del programa se estudió su convergencia con tres tipos de mallado. La figura 2 recoge el “mallado grueso” con 252 paneles sobre el casco y 434 en la superficie libre. El “mallado medio” con 588 paneles en el casco y 1296 en la superficie libre se presenta en la figura 3. La figura 4 corresponde al “mallado fino” en donde se mantiene el número de paneles del casco, 588 y se incrementan en la superficie libre hasta 4816.

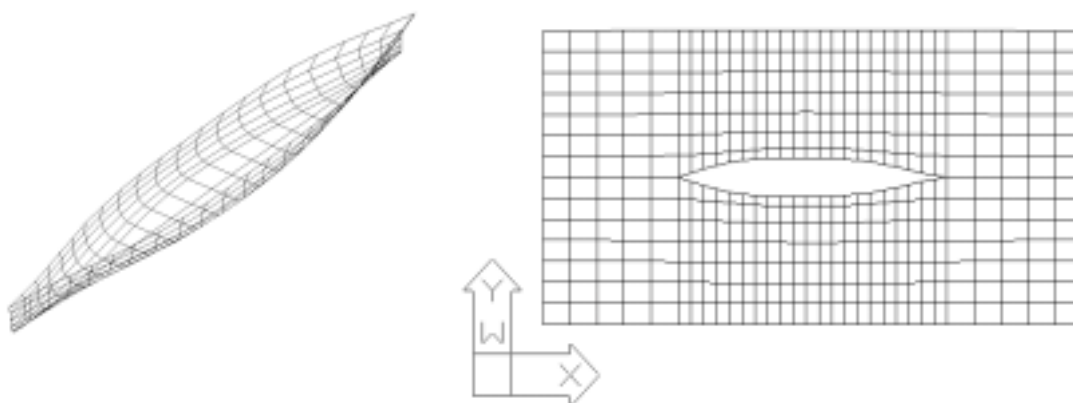


Fig.2 “Mallado grueso”.

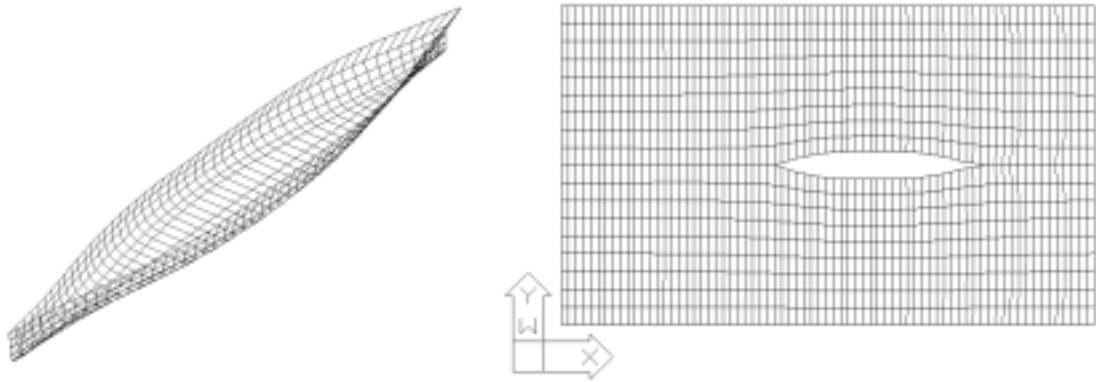


Fig.3 "Mallado medio".

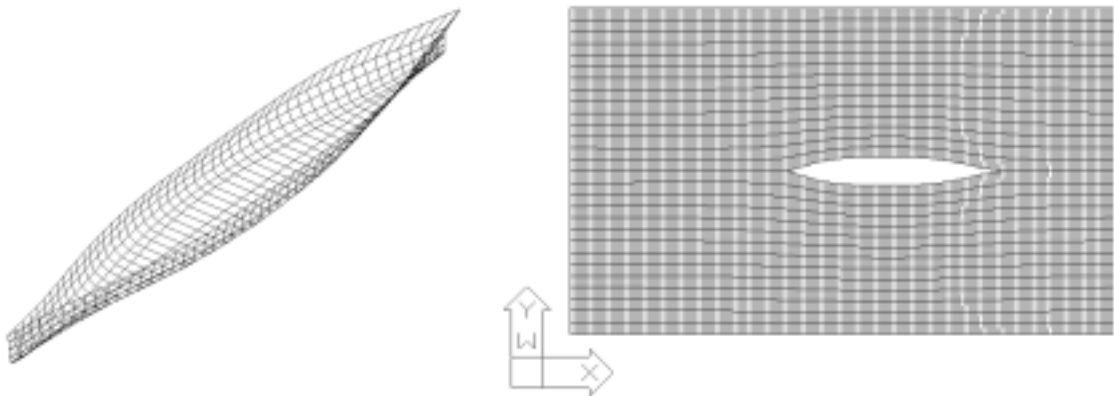


Fig.4 "Mallado fino".

La figura 5 presenta los resultados del coeficiente adimensional de la resistencia por formación de olas  $C_w$  para los números de Froude 0.16 y 0.316 respectivamente en función de los paneles en la superficie libre. De los resultados obtenidos se deduce que para el número de Froude bajo, la influencia del mallado es sensible; si bien, esta influencia no influye para el número de Froude 0.316.

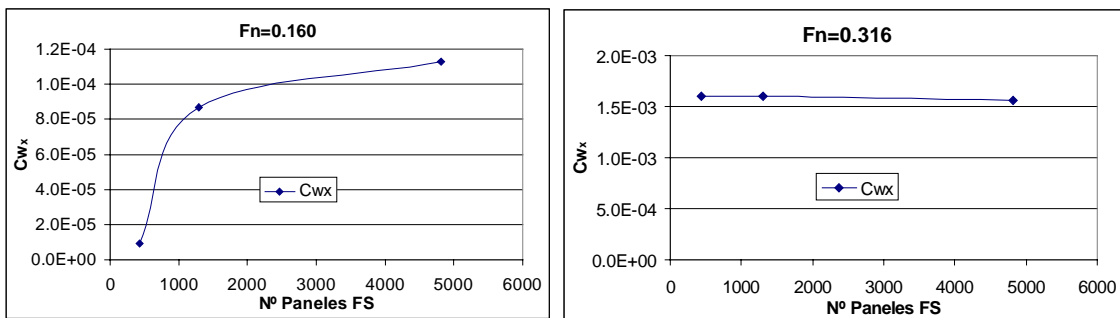
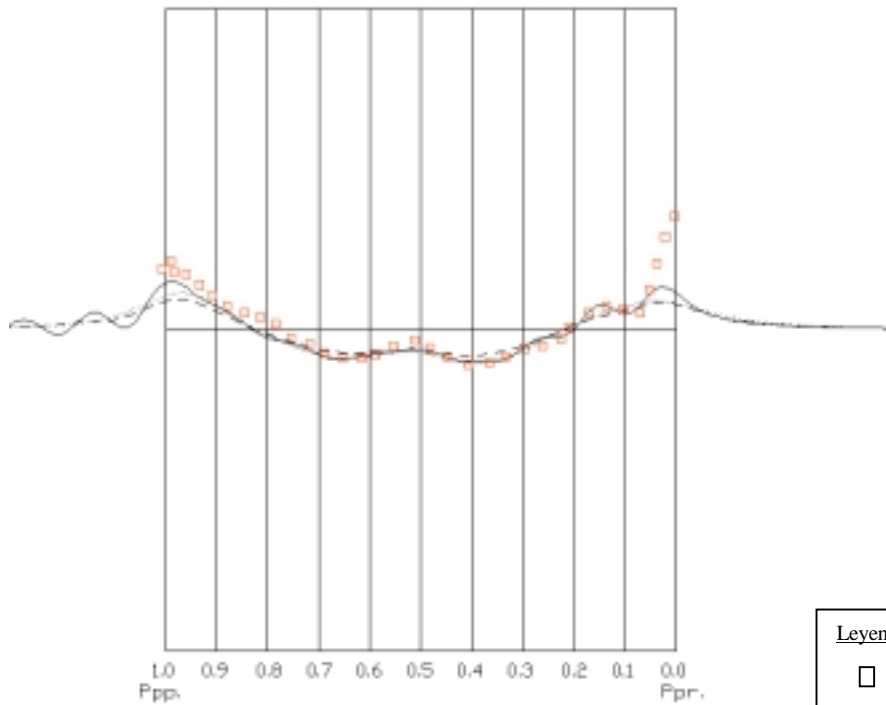


Fig.5  $C_w$  versus mallado.

Los perfiles de altura de ola para estos dos números de Froude se incluyen en la figura 6. En general, existe un comportamiento superior para el “mallado fino”, sobre todo para el número de Froude de 0.316 y para los extremos de proa y popa donde la altura de ola es más sensible.

$Fn=0.160$ .



$Fn=0.316$ .

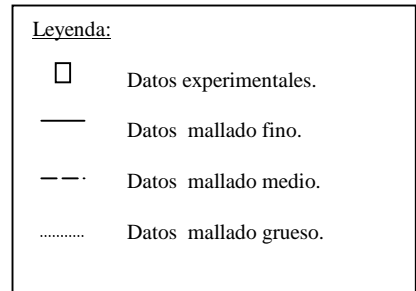
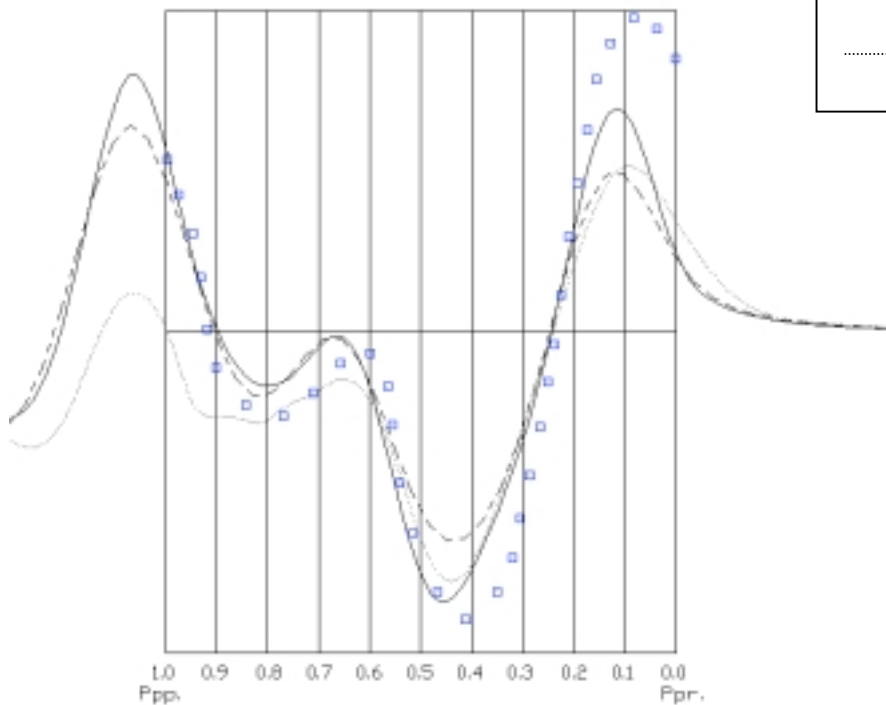


Fig.6 Perfiles de ola. Efecto del mallado.

De todo lo anterior deducimos la sensibilidad de los resultados al mallado utilizado, no obstante, se considera que el “mallado fino” proporciona unos resultados suficientemente aceptables y le consideraremos como el adecuado para utilizar en nuestra validación.

En cuanto a la **validación**, en la figura 7 se representa el valor del  $C_w$  para una gama de velocidades de números de Froude comprendidos entre 0.15 y 0.35, incluyendo los valores experimentales de Toda{1991} y los numéricos debidos a Bruzzone{1994}. La figura 8 recoge los perfiles de ola para los números de Froude 0.160 y 0.316, considerando los resultados experimentales y los de Bruzzone.

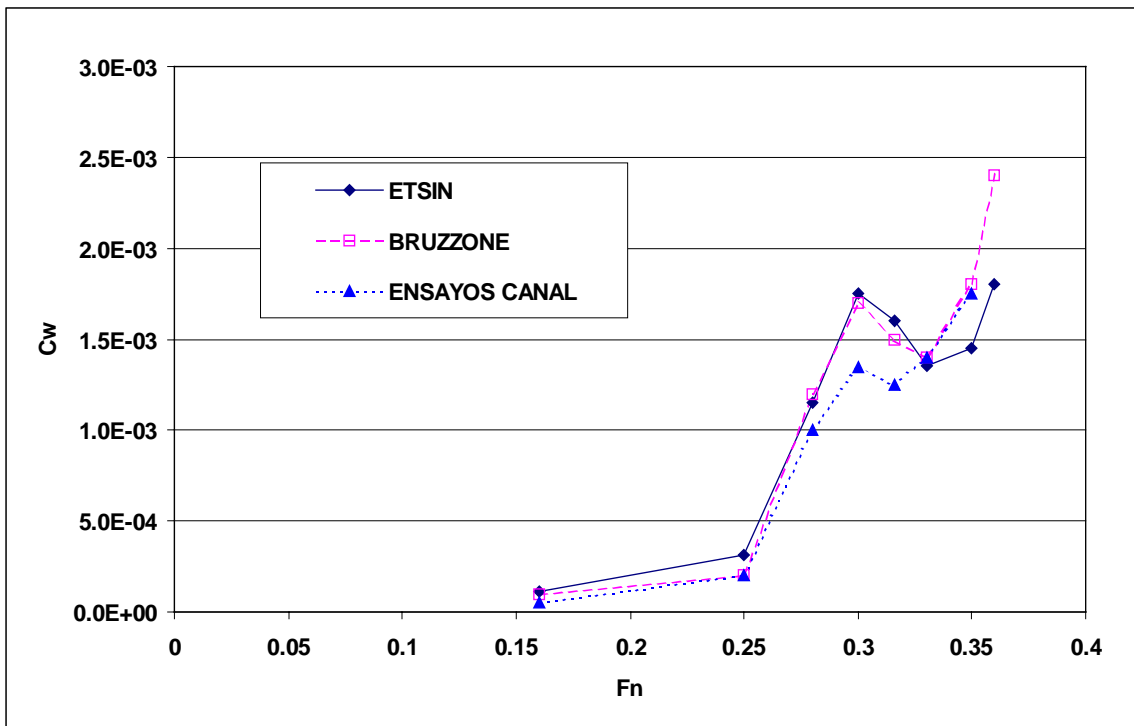
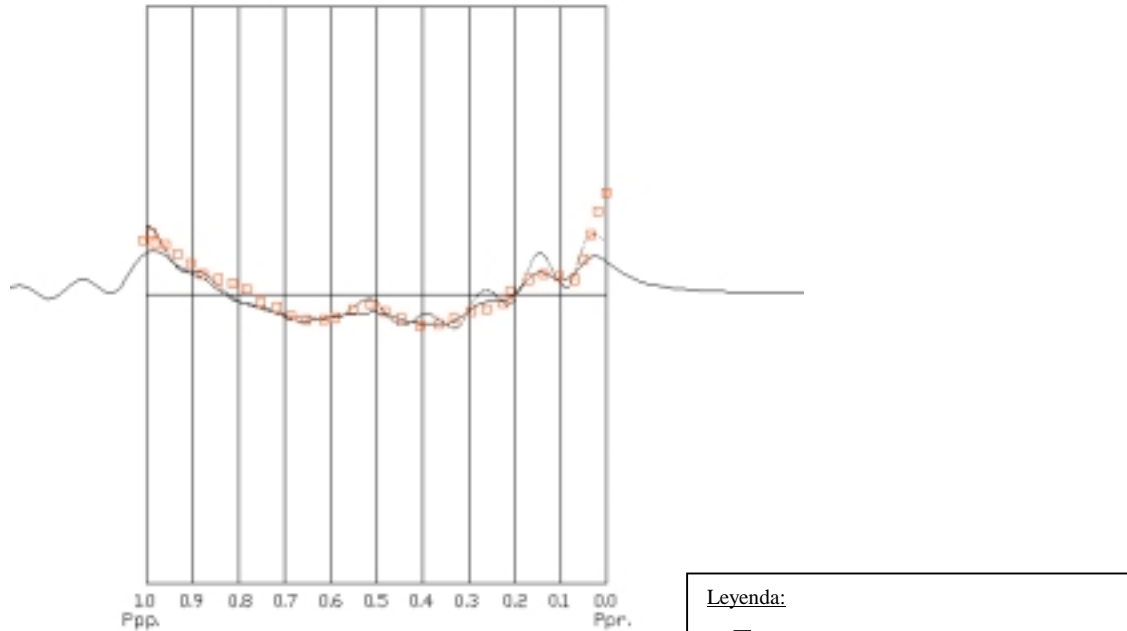


Fig.7  $C_w$  en función del número de Froude.

La curva de  $C_w$  es muy similar en los tres casos hasta números de Froude de 0.27, a partir del cual los datos experimentales permanecen por debajo de los numéricos que se conservan muy similares hasta el número de Froude de 0.32. Los perfiles numéricos son bastante similares con la salvedad de la zona de proa, en donde se aprecian que el perfil de Bruzzone para el número de Froude bajo supera a los valores experimentales y que para el número de Froude de 0.316, la predicción de Bruzzone se aproxima más a los datos experimentales que los cálculos de la ETSIN. Las razones de estas discrepancias de la zona de proa para números de Froude altos debe buscarse en el carácter no lineal del método de Bruzzone frente al planteamiento lineal de los desarrollos de la ETSIN. No obstante, se considera que los valores obtenidos son muy

positivos y dentro del rango aceptado por la comunidad internacional {Nakatake, 1994} para este tipo de cálculos.

$Fn=0.160$ .



$Fn=0.316$ .

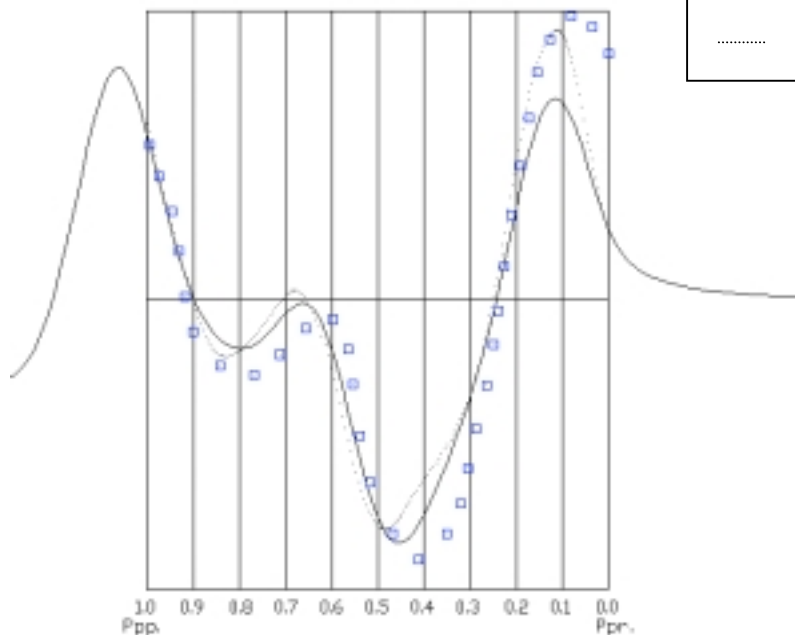
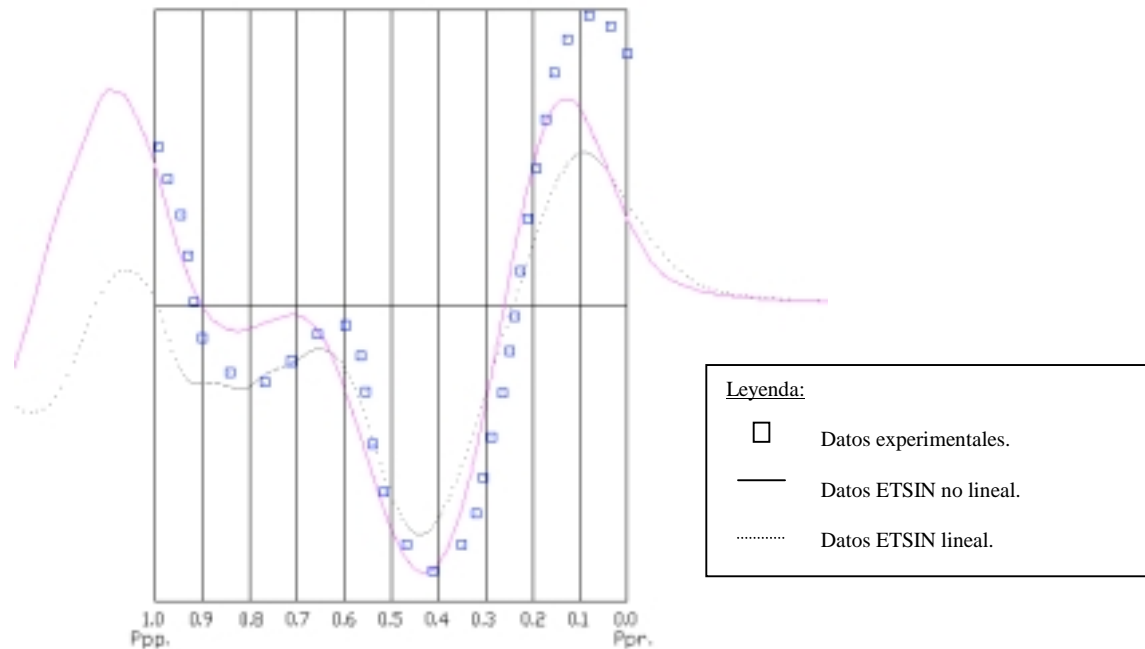


Fig.8 Perfiles de ola. Validación.

Las consideraciones apuntadas en el párrafo anterior sobre las limitaciones del planteamiento lineal han originado nuevos desarrollos implementando las condiciones de contorno no lineales. La capacidad actual de los equipos informáticos utilizados junto con los algoritmos no depurados totalmente sólo ha permitido utilizar por el momento



mallados gruesos. Para este tipo de mallado, en la figura 9, se incluyen los resultados lineal y no lineal junto con los valores experimentales, observándose una mejor aproximación del método no lineal.



## 6.- CONCLUSIONES.

De lo contenido en los apartados anteriores se pueden indicar las siguientes consideraciones finales:

- La calidad de un programa de ordenador puede evaluarse considerando una serie de características siguiendo las Normas ISO.
- Los CFD es una herramienta en constante desarrollo que ha traspasado su origen en la Academia para instalarse en las Oficinas Técnicas y convertirse en una método muy utilizado en la optimización hidrodinámica del proyecto de un buque.
- La calidad de un programa de CFD queda demostrada a través de una validación con datos principalmente experimentales.
- La validación efectuada al programa de CFD desarrollado por el equipo investigador de la ETSIN, frente a los datos experimentales de un buque de la Serie 60, demuestra la calidad de dicho desarrollo.

- Los cálculos efectuados demuestran la sensibilidad de los resultados con el mallado utilizado para definir el dominio de cálculo.
- Aunque los resultados obtenidos demuestran la bondad del planteamiento lineal, la consideración no lineal de las condiciones de contorno parecen mejorar estos resultados.

## **AGRADECIMIENTOS.**

En la actualidad, cualquier actividad de investigación requiere un “equipo” formado por un elevado número de personas. El presente trabajo no escapa de esta máxima. Además de los autores, la labor de los Sres. Rodríguez García, Mata Alvarez-Santullano y Talens Mión debe ser especialmente reconocida.

## **BIBLIOGRAFIA.**

International Standard, “Information technology - Software product evaluation - Quality characteristics and guidelines for their use”, Número de referencia ISO/IEC 9126:1991(E), edición 15.11.1991.

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.

Bermejo, R.; Pérez Rojas, L.; Sánchez, J.M.; Souto, A. y Zamora, R., “Una nota sobre esquemas para la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes por elementos finitos en hidrodinámica”, Revista “Ingeniería Naval” nº 693, Abril 1993.

Michell, J.H. “The Wave Resistance of a Ship”, Philosophical Magazine, Vol. 45, nº 272. 1898.

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.

Hess, J.L. y Smith, A.M.O.; “Calculation of Non lifting Potential Flow About Arbitrary Three-dimensional Bodies” Journal of Ship Research, September 1964.

Pérez Rojas, L. y otros.; “Report of the Resistance and Flow Committee”, 21<sup>st</sup>. International Towing Tank Conference, Proceedings Vol. 1, pags. 439-514, Trondheim, Noruega. Septiembre 1996.

Dolphin, G.W.; “Evaluation of Computational Fluid Dynamics for a Flat Plate and Axisymmetric Body from Model-to Full-Scale reynolds Numbers”, M.Sc. Thesis, University of Iowa, mayo 1997.

Lin W.C. y otros; “Report of The Quality Control Group”, 20<sup>th</sup>. International Towing Tank Conference, Proceedings Vol.1, págs. 79-105, San Francisco, EE UU, Septiembre 1993.

Huang, T.T., Liu, H-L, Groves, N.C., Forlini: T.J., Blanton, J.N. y Gowing, S.; “Measurements of Flows Over an Axisymmetric Body with Various Appendages (DARPA SUBOFF Experiments)” , 19<sup>th</sup>. Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, 1992.

Devenport, W.J y Simpson, R.L.; “LDV Measurement in the Flow Past a Wing-Body Junction”. Aplicación de LDV a la Mecánica de Fluidos. Lisboa 1988

Toda, Y. et al.: “Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake Field of a Series 60  $C_b = 0.60$  Ship Model for Froude Numbers 0.16 and 0.316”, IHR Report n° 352, Agosto 1991.

Todd, F.H.; “Series 60, Methodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships”, David Talor Model Basin, Report 1712, Julio 1963.

Bruzzone, D.; “Numerical Evaluation of the Steady Free Surface Waves”, Proceedings CFD Workshop Tokyo 1994, Marzo 1994, Tokyo, Japón. Vol. 1, pág. 126-134.

Nakatake, K y Takeshi, H.; “Review of Program 2 Inviscid Flow around Series 60 with Free Surface” Proceedings CFD Workshop Tokyo 1994, Marzo 1994, Tokyo, Japón. Vol. 2, pág. 130-159.