

**IV SIMPOSIUM PANAMERICANO
DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA NAVAL
“SYMMEDUC”**

Veracruz, Ver. México
Septiembre 2001

**LOS CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) EN
LA FORMACIÓN HIDRODINÁMICA
DEL INGENIERO NAVAL**

Dr. Luis Pérez Rojas¹
D. Antonio Souto Iglesias²
D. Pablo Roca Fernández-Vizarra³

¹ Canal de Ensayos Hidrodinámicos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Arco de la Victoria s/n. 28040 Madrid. España.
Email: lperezr@etsin.upm.es

² Laboratorio de Hidrodinámica Numérica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Arco de la Victoria s/n. 28040 Madrid. España.
Email: asouto@etsin.upm.es

³ Laboratorio de Hidrodinámica Numérica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Arco de la Victoria s/n. 28040 Madrid. España.
Email: proca@etsin.upm.es

Resumen

La hidrodinámica del buque constituye una de las materias básicas en la formación académica de un Ingeniero Naval. Durante muchos años el “canal de ensayos” ha sido la herramienta experimental básica en este campo hidrodinámico constituyendo, mediante el ensayo con modelos, el método tradicional en la optimización de las formas de los buques.

El desarrollo de los ordenadores propició la aparición de los denominados CFD (Computational Fluid Dynamics) como una nueva herramienta matemática en el diseño hidrodinámico.

Este trabajo presenta las actividades que en el campo de la formación práctica de la Teoría del Buque se están llevando a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid tanto en el campo tradicional de los ensayos con modelos de buques como en los algoritmos matemáticos de optimización de formas.

Abstract

The Ship Hydrodynamics is one of the basis in the formation of a Naval Architect. For a long time, the “towing tank” has been the main tool in the ship lines optimization, using ship models, in this field of practical Hydrodynamics.

The development of computers has originated a new mathematical tool in this field of hydrodynamic optimization, the CFD, the Computational Fluid Dynamics.

In this paper, the activities that are carried on in the field of Naval Architecture Studies in the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales of the Politechnical University of Madrid are presented, not only in the traditional ship model tests but in the new numerical tools also.

0.- Introducción.

Es de todos conocida la necesidad e importancia de las “clases prácticas” en la formación de un ingeniero, aunque también es verdad que este tipo de enseñanza abarca un amplio abanico de posibilidades, desde la resolución de un problema en la pizarra hasta la visita a una empresa o exposición.

A pesar de esta variedad, el fin de cualquier clase práctica es de sedimentar los conocimientos teóricos y mostrar de forma inmediata la aplicación y/o utilidad de la parte teórica.

Este trabajo trata de presentar las “clases prácticas” en la asignatura de “Teoría del Buque” en la formación del Ingeniero Naval, haciendo un especial énfasis en las nuevas técnicas de la hidrodinámica numérica naval.

Después de una breve descripción sobre las funciones del ingeniero naval y sobre sus conocimientos en “Teoría del Buque”, se contempla el escenario en el que tienen lugar las prácticas con modelos físicos, el “canal de ensayos”, indicando los diferentes tipos de ensayos tradicionales que constituyen el análisis del comportamiento hidrodinámico de un buque.



Figura 1. Alumnos construyendo un modelo

La modelización matemática de la resistencia al avance de un buque se formuló entre los siglos XVII y XVIII y por ello se presenta también en este trabajo una breve reseña sobre la génesis del problema de la resistencia. La dificultad de la resolución de estas ecuaciones hizo esperar dos siglos a los científicos e investigadores para que pudieran ofrecer una posible solución al problema.

Para complementar la formación práctica de los alumnos en este nuevo campo del enfoque matemático de la teoría del buque, se presenta finalmente el trabajo

desarrollado para que los alumnos analicen el flujo alrededor de unas formas determinadas susceptibles de cambiar sus dimensiones principales, la velocidad de avance y el mallado del dominio de análisis, tanto en el casco del cuerpo como en la superficie libre a considerar

1.- El Ingeniero Naval y la Teoría del Buque

El actual Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española define al Ingeniero Naval como el que tiene a su cargo proyectar, hacer y conservar las construcciones navales, poniendo de manifiesto las tres facetas de diseñar, construir y mantener al buque y que con el concepto de explotación cubriría los campos de actuación del ingeniero naval.

Carlos Godino en su libro “Teoría del Buque y sus aplicaciones” [1], define la Arquitectura Naval como la ciencia que trata de los conocimientos necesarios para la construcción de los buques, dividiendo estos conocimientos en dos grandes grupos:

La “Construcción Naval” que comprende el estudio de las condiciones que deben satisfacer los barcos, desde el punto de vista constructivo, y determina la forma y espesores que deben tener sus diferentes partes, según los esfuerzos a que han de estar sometidos y las condiciones a que deben satisfacer en cada caso.

La “Teoría del Buque” que estudia el barco considerado como un flotador que se mueve en un líquido y se refiere exclusivamente a las formas exteriores del mismo, que son las que determinan sus condiciones de resistencia al movimiento y estabilidad.

Esta breve introducción nos pone de manifiesto la importancia de la mencionada “Teoría del Buque” en la formación del ingeniero naval, perfectamente entroncada con la hidrodinámica, rama de la mecánica de fluidos que tiene por objeto el estudio de las leyes del movimiento de los líquidos, fluidos prácticamente incompresibles, y su interacción con los cuerpos sólidos.

El buque inicialmente lo podemos considerar como un flotador que trata de permanecer en posición vertical frente a perturbaciones exteriores. Estamos en la “**Estática del Buque**”. Pero el buque no sólo flota sino que tiene que avanzar y suponemos que en línea recta, es la “**Resistencia al avance**”. Pero para vencer esta resistencia y navegar a una cierta velocidad debemos instalar algún artilugio que lo propulse, es la “**Propulsión**”. El elemento más tradicional de propulsión es la hélice porque hasta el momento, es el artilugio que tiene mejor rendimiento en condiciones normales de navegación en buques convencionales.

Realmente, el buque no avanza en línea recta debido a los agentes exteriores. Además, en algunas ocasiones por iniciativa propia cambia de rumbo; es decir, se mueve en un plano. Estamos ante la “**Maniobrabilidad**” del buque. Y finalmente, la realidad es que el buque se mueve con seis grados de libertad en un mar en régimen aleatorio. Su estudio constituye el “**Comportamiento en la mar**”.

Los conceptos anteriores: Estática, Resistencia, Propulsión Maniobrabilidad y Comportamiento en la mar, constituyen a grandes rasgos las partes en las se puede estructurar la materia de “Teoría del Buque”.

Todos los aspectos anteriores pueden estudiarse bajo aspectos puramente matemáticos con ayuda de ordenadores. Este enfoque requiere resolver las ecuaciones de Navier-Stokes ante diversas condiciones de contorno. La no linealidad de estas ecuaciones junto con unas condiciones de contorno en presencia de la interfase aire-agua hace que no exista una solución analítica del problema y que las aproximaciones numéricas aún disten en cierta medida de la realidad [2].

Sin embargo, el creciente desarrollo del mundo de los ordenadores hace que cada día las soluciones numéricas aproximadas sean de mayor utilidad en la optimización de las formas de los buques, de tal forma que hoy día no puede entenderse la Teoría del Buque sin una cierta dedicación a lo que podríamos denominar “**Hidrodinámica numérica**”, entendida bajo un aspecto práctico y aplicado como es todo el marco de esta materia de Teoría del Buque.

2.- El uso de modelos en la Ingeniería Naval

El proyecto de cualquier embarcación o estructura marina precisa del desarrollo de modelos físicos y matemáticos. De ellos y del conocimiento aproximado de su comportamiento real se obtienen los datos necesarios para valorar las ventajas e inconvenientes de las posibles alternativas. Hasta hace poco tiempo los únicos modelos prácticos eran los físicos por lo que el desarrollo de la arquitectura naval ha ido en gran medida de la mano del de los ensayos con modelos.

Las características que midamos y los fenómenos que observemos en el modelo serán extrapolables al buque real si los números adimensionales que rigen los distintos fenómenos son iguales en el buque y en el modelo. Si esto no es posible, como es el caso del avance de un buque, los resultados no son directamente extrapolables y se requiere de una serie de hipótesis teóricas que añaden ciertas incertidumbres a la predicción del comportamiento del buque real.

Esta práctica de utilizar modelos de buques para analizar su comportamiento se remonta a los tiempos de Leonardo, quien llevó a cabo una serie de ensayos en tres modelos que tenían las mismas dimensiones principales (eslora, manga y calado) pero diferente distribución de área de cuadernas y por ello, distinto desplazamiento. Aunque nada se sabe del procedimiento que siguió para llevar a cabo estas pruebas observó que los cuerpos: *“a pesar de moverse impulsados por la misma potencia el que tenía más cerca de proa la cuaderna de mayor área iba más deprisa”*, conclusión razonable por la lentitud a la que debió realizar los ensayos. En estas situaciones predomina la resistencia debida a la viscosidad, por lo que para cualquier cuerpo que navegue por la superficie de un fluido es tener la parte de atrás de forma que facilite la salida del fluido sin desprendimientos con curvas suaves y gradientes de presión pequeños, tal y como son las formas de los peces [3,4]

Durante muchos años, diversos investigadores como Samuel Fortrey, Fredrik Henrik Chapman, Colonel Beaufoy o Benjamín Franklin, hicieron ensayos con modelos utilizando el arrastre por gravedad. Fue en 1871, cuando William Froude utilizó el canal construido cerca de Torquay de 85 metros de longitud, una anchura de 11 metros en la superficie libre del canal y una profundidad de 3 metros en el centro y que disponía de un “carro” propulsado mecánicamente para remolcar modelos, considerándose el precursor de los canales existentes hoy día. Un detenido estudio histórico de los comienzos y los primeros ensayos en hidrodinámica puede verse en J.A.Aláez [5].

2.1.- Los Canales de Ensayo.

Los Canales de Ensayo que pudiéramos calificar de tradicionales son rectangulares, muy largos y sobre los que corre mediante railes el carro arrastrando el modelo. Su tamaño concuerda con su utilización; así, los muy pequeños (con modelos del orden de 1 m) están dedicados casi exclusivamente a la investigación cualitativa, los de tamaño intermedio (con modelos del orden de 3 a 5 m) pueden alternar los trabajos comerciales con la investigación y las grandes instalaciones (modelos de hasta 12 m) cuya finalidad es hacer prioritariamente ensayos de tipo comercial, pero resaltando que este calificativo de comercial no debe entenderse bajo un aspecto peyorativo sino que dado el volumen de su inmovilizado deben hacer rentables estas instalaciones mediante la realización de ensayos sistemáticos de forma más o menos convencional [6].

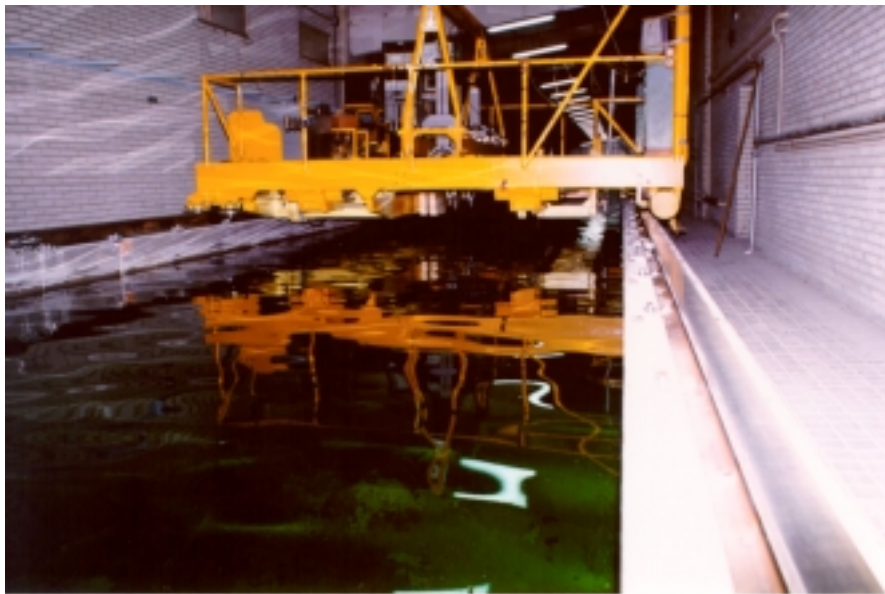


Figura 2. Canal de Ensayos de la ETSIN

Los ensayos en el canal de aguas tranquilas, el que acabamos de calificar de tradicional, permiten determinar esencialmente la resistencia de la carena al avance, el comportamiento del propulsor y la interacción carena-propulsor [7].

Algunos de ellos poseen dispositivos generadores de olas, lo que permite determinar las características anteriormente reseñadas ante la acción de las olas, así como realizar ensayos de “comportamiento en la mar” con olas de proa o de popa.

Otras posibilidades pueden ser los “falsos fondos” para los ensayos en aguas poco profundas o la refrigeración para los ensayos de resistencia al avance en hielo.

Ahora bien, en estas instalaciones la observación del flujo alrededor del modelo, aunque posible mediante vídeo submarino, queda reducida a un corto intervalo de tiempo. Esta dificultad puede soslayarse con los canales de circulación de agua, en donde el modelo está en reposo y es el agua la que se mueve en un circuito cerrado.

En los casos anteriores, el modelo sigue una trayectoria rectilínea, lo que no permite, salvo casos concretos [8], evaluar su capacidad de maniobra. Por ello, existen otros canales en donde su anchura, ya significativa, posibilita que el modelo tenga una total libertad que, junto con los dispositivos de generación de olas, hace posible el estudio del comportamiento del modelo en mar real.

Recordando que el proceso de cavitación consiste en el paso de un líquido a la fase de vapor cuando su presión se reduce a una determinada, tenemos que en los “canales” anteriores, en el modelo físico, la presión en un punto del fluido no se corresponde con la realidad, dado que en ambos casos, sobre la superficie del canal y en la mar, tenemos la presión atmosférica. En aquellos fenómenos donde se posibilita la cavitación, es necesario disponer de canales despresurizados o de túneles de cavitación, en donde se reproducen las condiciones correspondientes a la realidad, permitiendo principalmente el estudio de la cavitación de propulsores.

Finalmente, los túneles de viento, básicos en los estudios aerodinámicos, son un complemento de los estudios de hidrodinámica, principalmente en la consideración de la capa límite turbulenta y en la formación de la estela en aquellos problemas relacionados con la resistencia de fricción y el proyecto de propulsores.

2.2.- El Canal de la ETSIN.

El “canal” de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid fue inaugurado en 1967 con unas dimensiones de 56 metros de largo, 3,8 m de ancho y 2,2 m de calado. Posteriormente se aumentó su longitud hasta los 100 m. Para poner en movimiento los modelos se dispone de un carro de estructura de acero, que rueda sobre dos líneas de carriles ancladas en los pretilos laterales del “canal”. En la figura 1 se muestra un corte transversal de este “canal” [9].

En la cabecera se prolonga en un canalillo de trimado cuyas paredes laterales están constituidas por cristales de 12 mm de espesor. Este canalillo está situado sobre un foso desde el que se puede ver con más comodidad. En el otro extremo, existe un generador de olas de tipo pantalla que permite ensayos en aguas agitadas con olas regulares de hasta 0,2 m y períodos comprendidos entre 0,5 y 2 segundos.

Por este canal pasaron numerosas promociones de ingenieros navales y la Asociación de Investigación de Construcción Naval lo utilizó para llevar a cabo una obra significativa en el campo de la investigación. La crisis del sector naval provocó que la referida Asociación dejara de utilizar dichas instalaciones reduciéndose su uso a las prácticas de la asignatura de “Teoría del Buque”.

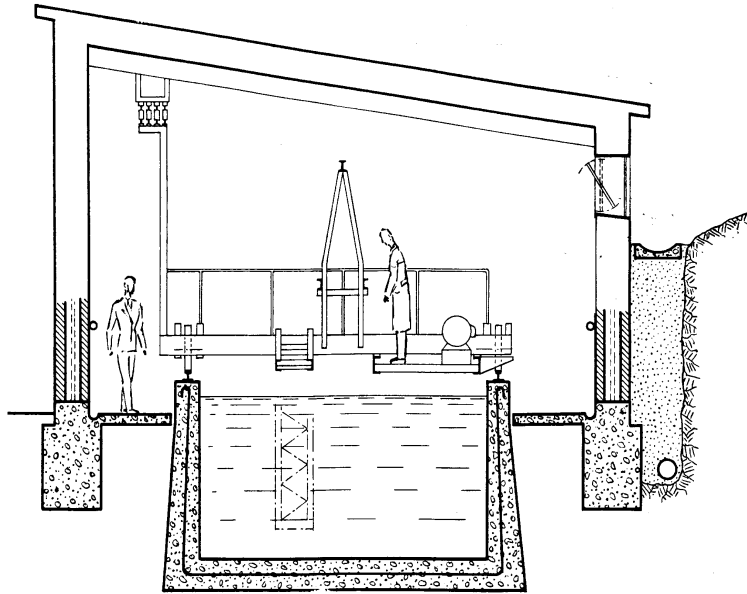


Figura 3.- Corte transversal del canal de la ETSIN

A principios del año 1988, un grupo de ingenieros navales, vinculados de diversa forma con la ETSIN, decidieron poner operativo dicho Canal a través de contratos de investigación en el marco de la Ley de Reforma Universitaria.

En esta nueva época han sido numerosos los trabajos llevados a cabo en el campo del movimiento de balance de buques, su amortiguamiento, la optimización de embarcaciones de competición a vela, la modelización de los movimientos del buque, la optimización de formas y otros muchos que se engloban bajo el denominador común de la hidrodinámica.

La faceta investigadora ha adquirido una gran relevancia, ya que es la que ha posibilitado a través de los “contratos de investigación” el resurgir de las instalaciones y realmente completa la actividad docente.

2.3.- Breve descripción de las prácticas tradicionales de “Teoría del Buque”.

Una vez descrito el escenario, pasemos a conocer las “prácticas” que tratan de llevar al alumno al mundo real de la Teoría del Buque. Empecemos por las tradicionales, las que se realizan alrededor del “canal de ensayos”.

La primera práctica está dedicada a la estabilidad del buque y trata de reproducir la realización de la denominada “**Experiencia de Estabilidad**” para determinar la altura del centro de gravedad de un buque. Mediante el traslado transversal de pesos se provoca una escora (movimiento angular alrededor de un eje longitudinal). La medida del ángulo de inclinación ante el momento perturbador proporciona la altura metacéntrica, distancia entre el centro de gravedad y el metacentro de la condición de carga estudiada. Con la ayuda de las “curvas hidrostáticas” se podrá deducir la altura del centro de gravedad. Como ya se ha indicado, con esta práctica se modeliza la

“Experiencia de estabilidad” tal y como se realiza en la realidad. El valor obtenido no será el del buque real pero su realización será necesaria cuando en algunos casos queramos reproducir en el modelo las condiciones dinámicas del buque real.

Las siguientes tres prácticas constituyen la trilogía, buscando un símil literario, de la razón de ser de un canal de ensayos hidrodinámicos, el predecir la potencia que se ha de instalar en un barco para que alcance una cierta velocidad. Inicialmente se evalúa la bondad de las formas del buque mediante el **ensayo de remolque**. En este ensayo el modelo es remolcado a diversas velocidades midiendo la resistencia que experimenta al avance. Paralelamente se miden los trimados de proa y popa, lo que permite determinar el hundimiento dinámico del modelo (sinkage), así como el trimado (trim).



Figura 4.- Modelo en un ensayo de remolque

Esta resistencia debe ser vencida por un cierto elemento, desde el remo hasta el más sofisticado propulsor. Considerando el medio más tradicional, la hélice, se ensaya en el canal haciéndola avanzar con una determinadas revoluciones provocadas por un cierto momento propulsor. Este movimiento en las determinadas formas de las palas de la hélice hace que aparezca un cierto empuje. Estamos en el **ensayo del propulsor aislado** y con él se analiza el comportamiento de la hélice.

Pero como la hélice y el casco del buque van juntos, estos dos elementos se deben ensayar juntos en el denominado **ensayo de autopropulsión**, para determinar la acción que la hélice hace sobre el casco y paralelamente, el casco sobre la hélice.

Como ya se ha indicado, el buque no sólo flota y avanza en línea recta sino que está sometido a movimientos con seis grados de libertad en un mar de carácter aleatorio. El análisis del **movimiento de balance** (movimiento angular alrededor de un eje transversal) constituye la siguiente práctica analizando este movimiento ante las olas que le llegan al modelo por el costado. En esta práctica se realiza inicialmente un ensayo de extinción de balance para determinar el coeficiente de amortiguamiento. La práctica dedicada a los **tanques estabilizadores pasivos** como medio para reducir los molestos balances cierra el ciclo experimental de la formación hidrodinámica del ingeniero naval.



Figura 5.- Dispositivo del ensayador de tanques estabilizadores

3.- La Hidrodinámica numérica.

Se ha indicado anteriormente que cualquier trabajo de ingeniería requiere del desarrollo de modelos físicos y matemáticos y hasta el momento nos hemos centrado sólo en los modelos físicos a través de los “canales de ensayo”.

Por ello, veamos ahora el aspecto matemático aunque sea necesario precisar que el uso de modelos matemáticos no es nuevo y la interpretación de la naturaleza en clave matemática se remonta a los griegos. Galileo, el padre de la cinemática, dijo que el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático. Newton escribió unos principios matemáticos de Filosofía Natural. Pero el hecho de que la naturaleza se presente en esta clave matemática está lejos de ser obvio incluso ahora, transcurridos cinco siglos desde esa lectura matemática del mundo que recogió e impulsó la Revolución Científica. Todo lo más que cabe decir es que las matemáticas, hasta ahora, funcionan muy bien como herramienta de la física.

3.1.- El problema de la resistencia.

El problema de la resistencia, entendida como el efecto que una corriente fluida ejercía sobre un cuerpo inmerso en su seno fue uno de los dos pilares en donde se sustentó la génesis y evolución de la mecánica de fluidos en los siglos XVII y XVIII [10]. El interés que despertó este problema se explica, aunque no exclusivamente, por su evidente utilidad práctica, ya que barcos, molinos y otras máquinas se encontraban sometidos a estas fuerzas y cumplían sus funciones por la existencia de las mismas.

Los primeros enfoques para explicar la resistencia, allá por el último tercio del siglo XVII, siguieron unas pautas muy diferentes y fue a mediados del siglo XVIII cuando se llegó a las ecuaciones básicas del movimiento, aunque la falta de capacidad

de cálculo matemático y de los conocimientos adecuados de la viscosidad imposibilitaron el avance en esa dirección.

Entre finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII se constituyó la “teoría del impacto” que fue explotada, aplicada, discutida y rebatida en este siglo XVIII. Esta teoría se basaba en dos hipótesis: la primera que suponía que el fluido estaba formado por un conjunto de partículas individualizadas e independientes; la segunda que asimilaba la resistencia a la suma de los efectos mecánicos de todos los choques.

Esta teoría no daba explicación a las fuerzas en las popas y así Euler a mediados del siglo XVIII conjeturó que el fluido contorneaba el cuerpo introduciendo el modelo currentilíneo con lo cual se aproximó a las concepciones actuales. Sin embargo las dificultades de formulación para hallar las presiones en estos nuevos modelos eran tantas, que tuvo que admitir que si bien el fluido seguía las líneas de corriente, las fuerzas en cada punto las obtenía por las fórmulas del impacto.

Por esa misma época Jean le Rond d’Alambert expone su idea sobre el tratamiento de la estructura del movimiento de una corriente fluida alrededor de un cuerpo. El fluido, al que supone animado con un movimiento uniforme aguas arriba, al acercarse al cuerpo empieza a desviarse formando unas líneas de corriente que lo contornearán para luego volver aguas abajo a la condición de uniforme. El cambio es continuo y gradual, y demuestra que la estructura del campo fluido, esto es, la forma geométrica de las líneas de corriente es independiente de la velocidad, y sólo depende de la forma del cuerpo. Como consecuencia la velocidad en un punto concreto será proporcional a la existente aguas arriba, hecho que permite adimensionalizar el movimiento. Por otro lado, el efecto del fluido sobre el cuerpo será el producido por la presión y no el choque. Para obtener el campo fluido parte de dos premisas: la continuidad y la dinámica, deduciendo por primera vez las hoy llamadas ecuaciones generales del movimiento de los fluidos: la de la continuidad y la del impulso.

Sin embargo la dificultad de la resolución de estas ecuaciones, conocidas a mediados del siglo XVIII, ha hecho que su desarrollo quedara paralizado hasta la llegada de los ordenadores en los años sesenta del siglo pasado.

3.2.- Los CFD de nuestros días.

En 1945 fue cuando Neumann [11], en un congreso, propuso, al parecer por primera vez, usar el ordenador para integrar las ecuaciones de la mecánica de fluidos. La capacidad de cálculo había mejorado considerablemente y parecía posible encontrar soluciones matemáticas fiables. Con ello se recuperaba la vieja tesis de Lagrange sobre la posibilidad de resolver matemáticamente los problemas que plantea el estudio del movimiento de los fluidos [5].

En el más de medio siglo transcurrido desde entonces, el uso de los ordenadores en la resolución matemática de las ecuaciones que rigen la mecánica de fluidos no ha hecho sino crecer dando lugar a los denominados CFD, siglas de las palabras inglesas Computational Fluid Dynamics. Tal y como se indica en [5], no todos los cálculos que se llevan a cabo por el ordenador, cuando se proyecta hidrodinámicamente una embarcación pertenecen a los denominados CFD. El CFD implica la solución, obtenida

por medio de ordenador, de las ecuaciones teóricas utilizadas en la predicción del comportamiento hidrodinámico. Por tanto no caben dentro de los CFD estimaciones estadísticas de la resistencia, o análisis también estadísticos de estabilidad después de averías.

El punto de partida de los nuevos métodos fue el trabajo de Hess y Smith, publicado en 1962 [12] en donde por primera vez se podía calcular el flujo potencial, en tres dimensiones, alrededor de formas arbitrarias con condiciones en los límites. Dawson en 1977 [13], introdujo la superficie libre, aunque apoyándose en una linealización de la condición de superficie libre. Para hacerlo se partía de una solución de modelo doble y luego se buscaba otra solución imponiendo la condición de superficie libre sobre la propia superficie deformada.

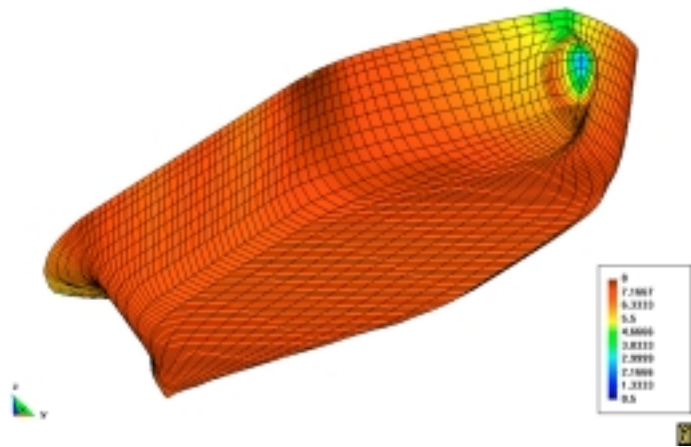


Figura 6.- CFD. Distribución de presiones sobre el casco

Estas soluciones iniciales se basan en los flujos potenciales asumiendo que el fluido no tiene viscosidad y que el flujo es irrotacional por lo que el campo de velocidades puede obtenerse como gradiente de una función potencial y la ecuación diferencial que rige el proceso es la ecuación de Laplace. Sin embargo, al no tener en cuenta la viscosidad, su alcance es limitado. De esta forma, al principio de los sesenta, el flujo viscoso se calculaba a partir de las ecuaciones de la capa límite bidimensional. Se pasó posteriormente a considerar la capa límite tridimensional, pero los resultados no eran totalmente satisfactorios en la popa del buque donde el espesor de la capa límite es grande y donde también aparecen fenómenos de separación.

De esta forma, actualmente, el método mas usual de considerar la viscosidad es el resolver las denominadas RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations), en donde la turbulencia se ha introducido en las ecuaciones de Navier Stokes. La resolución de estas ecuaciones sujetas a las condiciones de contorno reales de la superficie libre sigue encerrando ciertas incertidumbres.

Por ello, si los códigos potenciales pueden considerarse actualmente como una herramienta más de diseño en las formas hidrodinámicas del buque, abandonando la Academia para formar parte de las oficinas de diseño, los cálculos viscosos siguen inmersos en su proceso de desarrollo científico, siendo escasos los ejemplos de su uso como una herramienta rutinaria de diseño.

3.3.- El código CFD desarrollado en la ETSIN.

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 [14,15] con trabajos sobre flujo potencial tratado con el método de paneles según técnicas basadas en los desarrollos del Profesor Louis Landweber[16]. En [17] se presentó una discusión sobre la comparación de este método de Landweber y el más conocido y ya mencionado de Hess y Smith[12], en donde se pone de manifiesto las cualidades del profesor Landweber de saber dar el tratamiento más adecuado a un determinado problema sin que por ello pierda su rigor científico.

El código potencial desarrollado en la ETSIN se basa en el método de paneles con superficie libre que fue introducido inicialmente por Dawson [13] como ya se ha indicado.

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.

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[13]. La generalización consiste en poder panelizar arbitrariamente la superficie libre, sin necesidad de que sean líneas de corriente del problema sin superficie libre (Bruzzone[18]). 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 (Raven [19]).

En una primera aproximación, el problema no considera la superficie libre. Para que ésta se mantenga plana, se coloca un reflejo de la obra viva por encima de la misma, 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 una vez que se considera la superficie libre. Se linealiza la condición dinámica, que es básicamente la ecuación de Bernoulli, que no es lineal en la velocidad, tomando como base de dicha linealización el primer flujo calculado. La condición de radiación se impone de modo numérico, a través del uso de operadores up-wind, de modo similar a Dawson.

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.

4.- Trabajos prácticos sobre CFD.

Lo expuesto anteriormente sobre el papel actual de los CFD en la actuación del Ingeniero Naval como herramienta de diseño en la optimización hidrodinámica de las formas de los buques, hace pensar que la formación de este ingeniero naval debe incluir el conocer estas “nuevas” herramientas o, al menos, su uso.

Se podría pensar que la parte práctica de un CFD para un alumno debería ser el desarrollar, o al menos en parte, uno de estos códigos y quizás fuera cierto en las asignaturas de cálculo numérico, informática avanzada o mecánica de fluidos avanzada y siempre rozando el nivel de doctorado o de postgraduado, pero no en una asignatura totalmente aplicada como es la Teoría del Buque. El ingeniero naval debe estar capacitado para desarrollar un CFD en el ámbito de su labor profesional posterior en aquellos casos en que su trayectoria profesional lo exija. Sin embargo si serán muchos más los que requieran su utilización durante el ejercicio de su profesión. De ahí que en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales se tomara recientemente la decisión de, en el ámbito de la asignatura de Teoría del Buque, diseñar una “práctica” que ayudara a los alumnos a conocer la utilización de estos códigos.

El diseño de esta parte práctica tiene que tener en cuenta que la utilización de estos códigos no es tan sencilla como un simple “procesador de textos” y requieren una actuación activa del usuario.

Inicialmente se debe realizar el mallado del cuerpo, su discretización física, que se quiera estudiar para lo que se debe contar con un “preprocesador” o mallador. Aunque no siempre una mayor utilización de nodos conlleva un resultado más estable, una mejor definición del dominio del problema suele proporcionar una mejor convergencia de la solución. Sin embargo, siempre existirá una limitación en la memoria del ordenador.

Posteriormente, se han de realizar los cálculos del algoritmo pertinente lo que conlleva tanto memoria como tiempo de computación. Finalmente, un postprocesador deberá presentar los valores que proporciona como salida los mencionados cálculos.

Una característica a señalar es la gran cantidad de datos que proporcionan estos cálculos lo que ha hecho cambiar la filosofía de diseño de las formas de un buque. Anteriormente, el proyectista contaba simplemente con los datos de la resistencia al avance provenientes de un ensayo de remolque o de un cálculo de predicción de potencia, quizás también con los aspectos del tren de olas dejado por el modelo en un canal de ensayos. Actualmente, con los cálculos de CFD tendrá en su poder una cantidad ingente de datos: distribuciones de presiones sobre el casco, perfil de ola sobre el casco, distribuciones de velocidades en las inmediaciones del buque y cortes longitudinales de las olas dejadas por el buque.

Evidentemente, el mallado del modelo, el proceso de cálculo y el postproceso de los datos requiere una cierta cantidad de tiempo computacional dependiendo de la complejidad del buque analizado y de la discretización efectuada al dominio de cálculo.

Considerando el marco esbozado en los párrafos anteriores, la “práctica” se diseñó de tal forma que fuera autosuficiente y que todos los elementos informáticos se pudieran recoger en un CD. Así el alumno o grupo de alumnos podría realizar los trabajos con más libertad incluso con su ordenador personal, no limitándose a los estudios o trabajos establecidos de forma reglada.

Para facilitar este planteamiento y reducir el tiempo de cálculo, la práctica realiza los cálculos del flujo alrededor de carenas Wigley de 16 metros de eslora. Estas carenas vienen definidas analíticamente por la ecuación:

$$y = \frac{B}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{z}{T}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2\right) \cdot \left(1 - 0.6 \left(\frac{2x}{L}\right)^2\right)$$

donde y son las semimangas; la x va desde $-L/2$ a $+L/2$ y la z de $-T$ a 0 . Los valores iniciales de la manga B y el calado T son: $B = 1.5$ m y $T = 1$ m. La eslora viene representada por L y su valor como ya se ha indicado es de 16 m.

El mallado del cuerpo y los cálculos pertinentes se realizan mediante el programa Mallador30/Interfaz. Esta aplicación permite realizar cálculos de flujo alrededor de carenas Wigley con distintas relaciones de dimensiones principales y a distintas velocidades. Para ello se generan mallados de carena y superficie libre a los que se aplica el método potencial descrito.

En primer lugar se definen los parámetros del mallado de la carena: número de líneas de agua (debe ser mayor o igual a 3) y número de puntos por línea de agua (debe ser mayor o igual a 13). También pueden modificarse la manga y el calado definiendo unos coeficientes que multiplicarán a sus valores originales. Después de definir parámetros y coeficientes se genera automáticamente la malla y se ejecuta el Meshview, aplicación que permite la visualización del mallado.

A continuación se definen los parámetros que definirán el mallado de la superficie libre: número de nodos en sentido longitudinal y en sentido transversal (para media superficie libre). Una vez definidos estos parámetros el programa genera la malla de la superficie libre y ejecuta el Meshview. Para definir el número de nodos en sentido longitudinal suele tenerse en cuenta que la longitud de onda de la ola propia de la carena, considerada como punto de presión es $\lambda = 2\pi V^2/g$, y que se recomienda poner al menos 15 paneles por longitud de ola.

Para terminar de definir el problema se fija la velocidad de avance; se supone que dicha velocidad es paralela al eje X (popa-proa) por lo que sólo se pide su módulo. En realidad los cálculos se realizan para una carena fija sobre la que incide un flujo de velocidad igual y sentido contrario a la de avance. La duración del cálculo dependerá del número de elementos del mallado. Una estimación de la memoria RAM necesaria para los cálculos puede obtenerse con la fórmula $RAM \cong 1.2 \cdot 10^{-5} N^2$ (MB), donde N es el número de incógnitas (nº de paneles de medio casco y media superficie libre). Igualmente, el tiempo de cálculo es proporcional a N^2 .

Al mallar se fija el origen de los ejes en el punto medio entre los extremos de proa y popa de la carena de manera que éstos puntos serán respectivamente: $(8,0,0)$ y $(-8,0,0)$. El tamaño de la malla de la superficie libre en sentido longitudinal es de 32.3 m y transversalmente 10.6 m.

En las figuras 7 y 8 se ven vistas de los mallados tanto del casco como de la superficie libre.

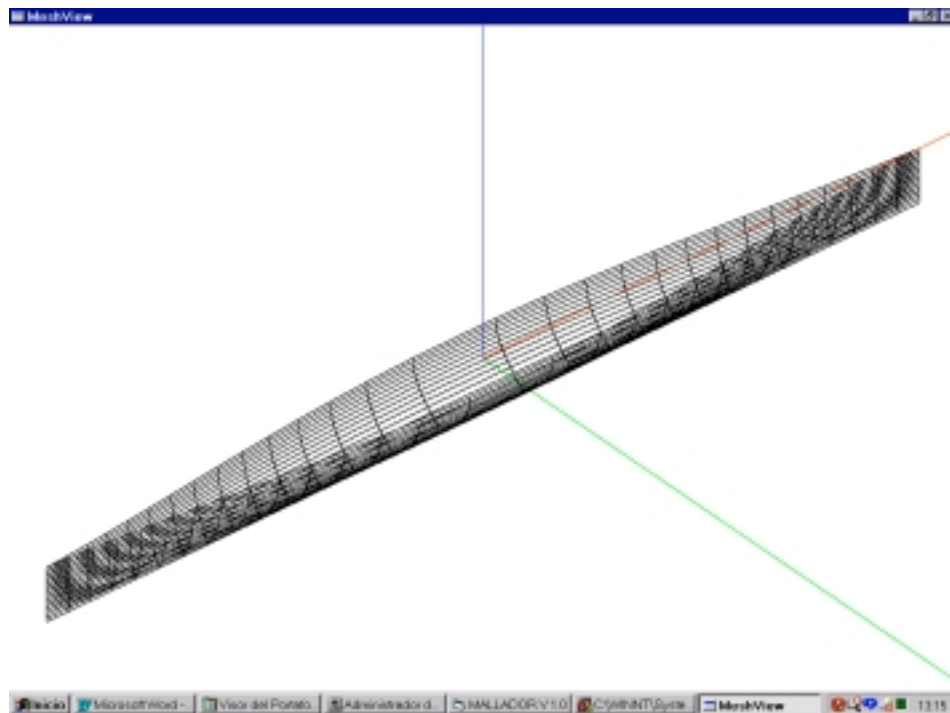


Figura 7.- Vista del mallado del casco en Meshview.

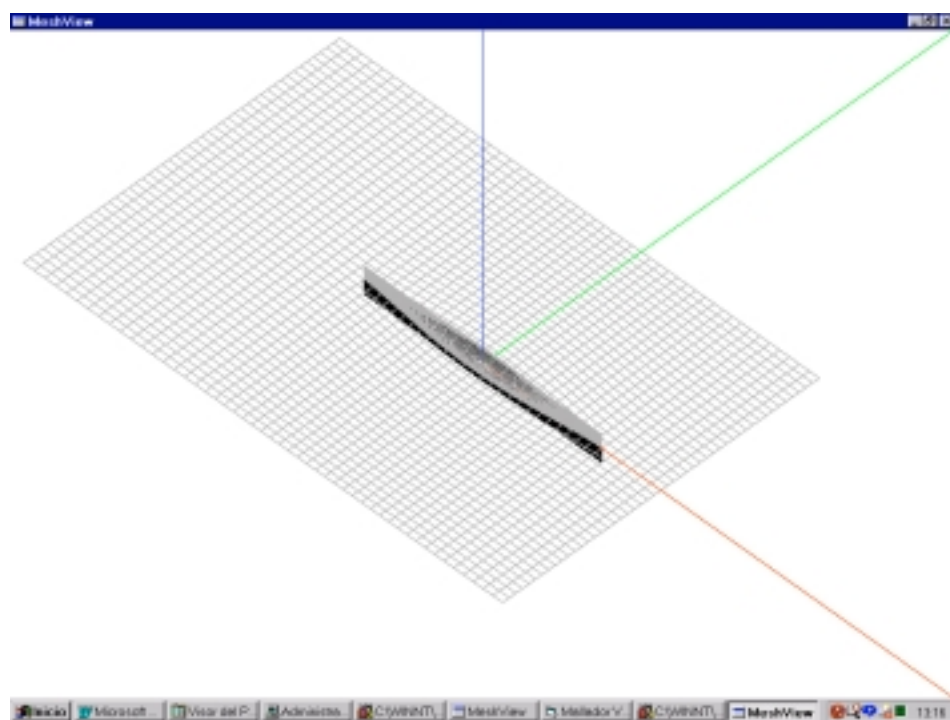


Figura 8.- Vista del mallado de casco y superficie libre en Meshview.

Las salidas que proporciona el programa son las siguientes:

- Visualización de la superficie libre del flujo, proporcionada por el programa POST.
- Archivos con datos de cortes de la superficie libre a distancias 0.5665B y 1.5508B de crujía. También la intersección de la superficie libre con crujía y carena. Con ellos pueden construirse representaciones de los cortes de ola mediante hojas de cálculo.
- Estimación del coeficiente de resistencia por formación de olas C_w .

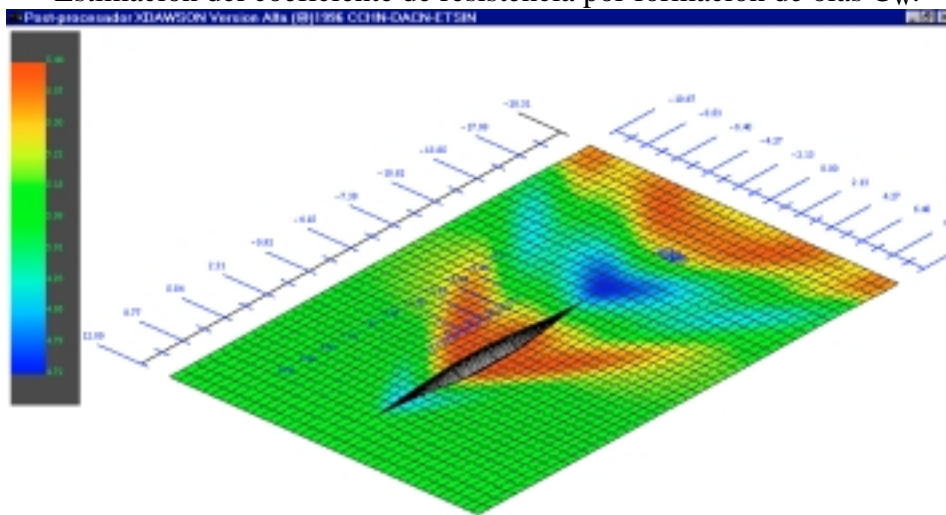


Figura 9.- Vista de la distribución de velocidades en la superficie libre con POST.

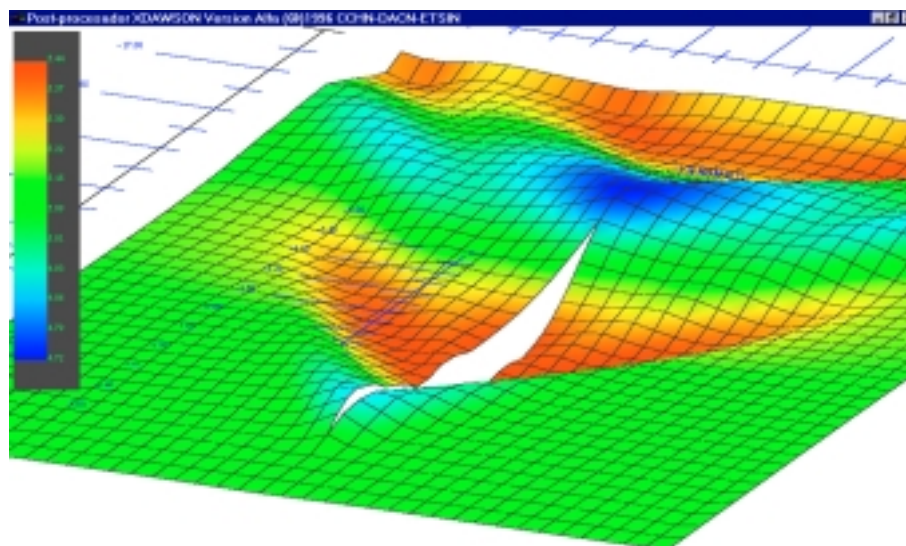


Figura 10.- Elevaciones de superficie libre con factor de amplificación en POST.

El trabajo a realizar por el alumno o grupo de alumnos consiste en analizar los resultados para distintos números de Froude, en particular 0.160 y 0.316 y modificando alternativamente el calado o la manga. También se recomienda el analizar la variación de los resultados que se obtiene al modificar el número de paneles considerado.

Las experiencias obtenidas de la realización de esta práctica han sido muy reducidas dado que su confección se finalizó a finales del pasado curso académico y los alumnos no tuvieron oportunidad de utilizarla durante el debido tiempo. Sin embargo, las primeras opiniones y resultados obtenidos han sido muy positivas ya que permiten al alumno entrar en el verdadero uso de los CFD, analizar las formas de un buque variando sistemáticamente las dimensiones principales del mismo; en este caso, la manga y el calado.

En este sentido, es importante señalar que esta práctica sirve para que el estudiante compruebe bajo una óptica numérica, conceptos fundamentales de la teoría del buque. Así, es sabido que a igualdad de eslora, aumentos o disminuciones de manga y calado, aumentan o disminuyen la resistencia por formación de olas. Esta es la única que se puede valorar con estas técnicas dado que el método no considera la viscosidad. Estas variaciones se reflejarán en los perfiles longitudinales del tren de olas aumentando o disminuyendo sus máximos.

De este modo el estudiante se acerca a las técnicas de variación de las formas como herramientas de mejora de las mismas en lo que se refiere a la resistencia por formación de olas que por otra parte es la más sensible a la variación de estas formas.

En las versiones futuras de esta práctica se dará la posibilidad de jugar con los parámetros definitorios del bulbo (área cuaderna 20, altura del centro de gravedad, longitud del bulbo) y con otros parámetros del cuerpo de proa que son los que se optimizan con estas técnicas no viscosas, y cuyo efecto no se puede predecir de modo intuitivo.

5.- Conclusiones.

De todo lo expuesto, se pueden señalar una serie de consideraciones finales a modo de conclusiones:

- La Teoría del Buque constituye una parte fundamental en la formación del ingeniero naval, dada la importancia que la faceta hidrodinámica tiene en el diseño de un buque.
- En la docencia de una asignatura aplicada como es la Teoría del Buque, la parte “práctica” de esta asignatura adquiere un papel relevante.
- Los desarrollos de los ordenadores desde los años sesenta del pasado siglo propiciaron la resolución de las ecuaciones matemáticas que modelizan el movimiento de los fluidos, apareciendo una faceta de la hidrodinámica numérica que actualmente es utilizada como una herramienta de diseño hidrodinámico de buques.

- La formación práctica de la Teoría del Buque exige actualmente la inclusión de los cálculos de CFD, al menos en lo que a su utilización se refiere.
- Se ha desarrollado una “práctica” que permite a los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid profundizar en la utilización de estas herramientas mediante el análisis de las variaciones hidrodinámicas de una carena Wigley mediante un código de flujo potencial.

Agradecimientos.

Actualmente toda labor investigadora es fruto de un grupo investigador y de esta forma los desarrollos contemplados en este trabajo han tenido lugar al amparo del equipo investigador generado en torno al “canal de ensayos hidrodinámicos” de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid en donde los alumnos han significado una contribución importante. Una mención especial debe dedicarse a Ignacio Trejo en el desarrollo del programa Mallador, Francisco Mata en el programa Meshview y Juan Antonio Clemente, Víctor Gonzalez y Miguel Talens en el programa Post.

Referencias.

- [1] Godino Gil, Carlos, “Teoría del Buque y sus Aplicaciones”(Estática del Buque). Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1956.
- [2] Bermejo, R.; Pérez-Rojas, L.; Sánchez, J.M.; Souto, A. y Zamora, Z., “Sobre una línea de investigación en hidrodinámica numérica”. Ingeniería Naval, nº 691, Febrero 1993.
- [3] Lewis, E.V., “Principles of Naval Architecture”, Volumen II, SNAME, Nueva York 1988.
- [4] Tursini, L., “Leonardo da Vinci and the problems of the navegation and naval design”, págs. 97-102. Transactions del I.N.A., vol. 95. Londres 1953.
- [5] Aláez, J.A., “Los ensayos con modelos y el desarrollo de la Hidrodinámica”. Publicación nº 147 del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Noviembre 1998. Trabajo presentado en la SYMMEDUC-98, Noviembre 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [6] Abad, R., García Ferrández, A.; Montero, J.Mª.; Pérez Rojas, I. Y Zamora, R., “Aplicaciones informáticas en un Canal de Ensayos Hidrodinámicos”. Ingeniería Naval, nº 654, Diciembre 1989.
- [7] Abad, R., García Ferrández, A.; Montero, J.Mª.; Pérez Rojas, I. Y Zamora, R., “Relación canal de ensayos hidrodinámicos-industria pesquera”. Ingeniería Naval, nº 673, Julio 1991.

- [1] [8] Montero, J.M^a., “Modelización y simulación del comportamiento del buque en aguas tranquilas con aplicación a estudios de maniobras en puertos”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (U.P.M.) , publicada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 1992
- [9] Mazarredo, L., “Proyecto de Canal de Experiencias para la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales”. Ingeniería Naval nº 311, mayo 1961.
- [10] Simón Calero, J., “La génesis de la mecánica de fluidos”. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 1996.
- [11] Morgan, W.B. y Lin, W-Ch., “Computational Fluid Dynamics, Ship Design and Model Evaluation”. 18th ITTC Proceedings. Volumen 2, pp 329-337. Kobe 1987.
- [12] Hess, J.L. y Smith, A.M.O., “Calculation of Nonlifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies”. Journal Ship Research, Septiembre 1964.
- [13] Dawson, C.W.; “A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems” Proc. 2nd. Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, 1977 Berkeley, pp 30-38.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Landweber, L y Macagno, M., “Irrotational Flow About Ship Forms”. Report nº 123. Iowa institute Hydraulic Research. Diciembre 1969.
- [17] 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.
- [18] Bruzzone, D., “Numerical Evaluation of the Steady Free Surface Waves”. Proceedings of CFD Workshop Tokyo 94. Vol 1. Pag 126-134.
- [19] Raven, H.C.,” A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem”. Tesis doctoral, Marin, 1996. ISBN 90-75757-03-4.