

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**UN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
PARA ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DE
ESTRUCTURAS NAVALES**

Autor: Julio García Espinosa
Director: Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra
Codirector: Honorio Sierra Cano

Introducción

En este capítulo introductorio se presentan las líneas básicas del trabajo que se ha llevado a cabo en esta tesis. Para ello, en primer lugar, se hará un recorrido sobre los métodos tradicionales para el diseño de buques. Se describirán sucintamente los procedimientos operativos de ensayo en un canal de experiencias y se discutirán sus problemáticas y limitaciones, así como las posibilidades de utilizar metodologías alternativas basadas en herramientas numéricas.

0.1 El Proyecto del Buque

Los detalles del proyecto de un buque o de su contrato de construcción difieren de un buque a otro aunque sean de una misma serie. Sin embargo, dicho contrato de construcción incluye habitualmente los requisitos de peso muerto y velocidad en unas ciertas condiciones de mar. En dichas condiciones, el buque, avanzando a velocidad uniforme, está sujeto a sollicitaciones de varios tipos. La resistencia al avance en la velocidad de servicio determina la potencia de la planta propulsora, y por lo tanto el consumo de combustible, uno de los factores de influencia determinante en la economía en servicio del buque. La minimización de la resistencia al avance y en consecuencia de la potencia propulsora, así como el asegurar que la planta propulsora sea capaz de entregar una potencia suficiente para cumplir los citados requisitos son, por lo tanto, una de las funciones más importantes de la oficina de proyectos y aspectos de importancia crucial en el diseño del buque.

La resistencia total viene determinada por la acción de las fuerzas hidrodinámicas que dependen de una serie de contribuciones individuales [Rav96] entre las que se pueden incluir las siguientes: la resistencia del casco desnudo, la resistencia de los apéndices, las pérdidas de la maquinaria y de los ejes, el rendimiento propulsivo, el ensuciamiento del casco y el entorno medioambiental. De las anteriores, la contribución más importante se debe a la resistencia del casco desnudo que depende principalmente de las formas del buque. La optimización de las formas del buque, en el sentido de minimización de la

resistencia al avance, es un problema de gran complejidad, no sólo por las muchas limitaciones prácticas impuestas por las especificaciones del proyecto (dimensiones principales, peso muerto, capacidad de carga, costes de construcción,...) y otros requisitos como los criterios de estabilidad, comportamiento en la mar y maniobrabilidad, sino también por la dificultad de determinar un coste operacional mínimo, dadas las diferentes condiciones de explotación que se pueden dar. En efecto, la optimización planteada es difícilmente aplicable en la práctica, debido a la dificultad para cuantificar el efecto de todos los parámetros involucrados, y cómo no, por la limitación del tiempo de diseño que impone la realidad. Por esta razón el problema se suele abordar de manera simplificada.

Las simplificación más usual para abordar el objetivo propuesto es considerar por separado el comportamiento del buque en aguas tranquilas y su respuesta en olas.

La optimización hidrodinámica de las formas del casco para los buques mercantes típicos se dirige principalmente a la minimización de la potencia requerida en aguas tranquilas, que es en la práctica un límite inferior de la potencia propulsora. Es habitual suponer que el estado de la mar actúa incrementando la resistencia al avance. Este procedimiento lleva a un grado de acercamiento suficiente al diseño óptimo en condiciones de operación, y de paso asegura que se alcance la velocidad mínima contractual en aguas tranquilas.

0.2 La Resistencia al Avance del Buque

Como se ha señalado en el apartado anterior, la resistencia al avance del buque en aguas tranquilas es un aspecto de vital importancia práctica. Es habitual suponer que esta compuesta por una serie de contribuciones aditivas, entre las que se pueden nombrar:

- La resistencia viscosa, asociada con la generación de la capa límite y la estela [Alá72].
- La resistencia por formación de olas, debida a la generación de las ondas de gravedad en la superficie del mar.
- La resistencia al avance debida a la fricción del aire con casco y superestructura.
- La resistencia por apéndices, debida, tanto a su propia resistencia, como a su influencia sobre la resistencia de la carena desnuda.

- Otros tipos de resistencia[LB97] que aparecen en casos especiales como la resistencia debida a la formación de *spray*, la resistencia por olas rompientes o la resistencia inducida debida a fenómenos de sustentación dinámica.

En la mayoría de los buques mercantes la componente de resistencia viscosa es la más importante. Su variación es aproximadamente cuadrática con la velocidad del buque, y es conocida su gran dependencia con el coeficiente de bloque¹ del buque. Sin embargo, fenómenos locales de separación de flujo, pueden causar incrementos drásticos en la resistencia viscosa.

La componente de la resistencia debida a la formación de olas varía en los casos prácticos entre un 10% y un 70% de la resistencia total de un buque en aguas tranquilas[Rav96]. Mientras que para velocidades bajas esta resistencia es prácticamente nula, se eleva drásticamente al aumentar la velocidad. Además, igual que ocurre con la componente viscosa, depende de manera importante del coeficiente de bloque. Pero, quizá el aspecto más significativo de esta componente, y el que le confiere mayor importancia es su capacidad de experimentar importantes variaciones ante relativamente pequeñas modificaciones de las formas del buque.

Es evidente que la capacidad de predecir la resistencia total del buque, discriminando la variación de la componente por formación de olas, ante variaciones de las formas, así como la localización de fenómenos de separación de flujo, es un aspecto de gran importancia, a la hora de posibilitar su reducción en la fase de diseño.

Tradicionalmente, el Ingeniero Naval ha mirado los ensayos hidrodinámicos con modelos como el mejor medio para conocer la resistencia al avance. El remolque del modelo a la velocidad a escala produce un mapa de olas que es geoméricamente similar al del buque real y permite que la componente de resistencia por formación de olas sea escalada directamente desde la medición en el ensayo de remolque[Pér89].

Respecto al resto de componentes de la resistencia al avance, y en particular la resistencia viscosa, la problemática es mayor pues no existen técnicas directas que permitan el escalado de los resultados experimentales.

Por otra parte, la modificación del diseño al objeto de reducir la resistencia al avance requiere de la intuición y experiencia del ingeniero naval, más que de la ciencia. Esta aproximación puede complementarse con el análisis estadístico de los datos experimentales y el apoyo de teorías muy simples. Los métodos semiempíricos así desarrollados son útiles en la predicción de las características de las formas, pero sólo tienen en cuenta una serie de paráme-

¹Proporción entre el volumen del buque y el del paralelepípedo en que se inscribe.

tros básicos del buque, por lo que su utilidad en el diseño queda ciertamente restringida [GPVC98].

0.3 Sobre el Desarrollo de los Métodos CFD

Desde un punto de vista matemático, el movimiento de un fluido alrededor de un buque es conocido desde el siglo pasado, aunque las ecuaciones que gobiernan el fenómeno en aquellos casos que tienen un interés práctico no pueden ser abordados de una forma analítica. Sin embargo, ya a finales del siglo pasado aparecen las primeras referencias sobre el cálculo aproximado de la resistencia por formación de olas en buques [Mic98]. Pero, aún durante el presente siglo, este problema ha seguido desafiando a matemáticos e hidrodinámicos.

Tradicionalmente, la teoría de formación de olas se ha basado en dos enfoques: uno basado en la expansión sistemática, considerando pequeña la relación *amplitud / longitud de ola* [Sto47] y otro basado en la suposición de una relación *profundidad / longitud de ola* pequeña [Bou71] [Ray].

En el presente, gracias al desarrollo de los cálculos fluido dinámicos por ordenador (*computational fluid dynamics*) en adelante *CFD*, las ecuaciones que gobiernan el problema pueden resolverse de forma aproximada por algoritmos numéricos proporcionando información sobre los movimientos y la resistencia al avance del buque en las etapas de diseño. Una revisión de los métodos numéricos en flujos con superficie libre puede encontrarse en [Weh70].

Actualmente, los métodos de elementos de contorno o de singularidades son la base de la mayoría de los algoritmos numéricos para la predicción del mapa de olas ideal de buques avanzando con velocidad uniforme. Estos esquemas numéricos pueden clasificarse en dos categorías, dependiendo de la elección de la singularidad utilizada en la superficie libre, base del método. La primera clase de esquemas usa manantiales de Kelvin como singularidad elemental. La ventaja de estos métodos es que el campo de velocidades generado satisface la condición de superficie libre de Kelvin, eliminando así la integración sobre ella (y su discretización) y que la condición de radiación se satisface de manera natural. Estos esquemas tienen en contra la imposibilidad de incluir efectos no lineales en la formación de las olas.

La segunda clase de esquemas usa fuentes de Rankine, distribuidas sobre la superficie libre, como singularidad elemental. El más conocido de estos esquemas fue presentado originalmente por Dawson [Daw77] y está basado en el método de Hess y Smith [HS64b] [HS64a] para la resolución del flujo alrededor de un cuerpo sumergido, usando una distribución de fuentes

sobre los paneles que discretizan el casco. Este método ha sido y es ampliamente aplicado para la predicción de la resistencia por formación de olas. Códigos comerciales tan conocidos como DAWSON, RAPID [Rav92] [Rav96], SPLASH [Ros95] [TS92] [TSL93a] o SHIPFLOW [LRB⁺98] pertenecen a este tipo. Frente a su sencillez y robustez, estos métodos tienen el gran inconveniente de la importante dependencia de la solución de parámetros como el tamaño del dominio y de la discretización. Por otra parte, sus principios básicos se encuentran en la denominada teoría de buques lentos, que restringe su utilización a un rango de números de Froude (F_n). Una pequeña introducción a la teoría que sustenta estos métodos puede encontrarse en el apéndice A. Por otra parte, una revisión de este tipo de métodos puede encontrarse en [Rav96] y se incluirá una pequeña muestra en el capítulo 2 del presente trabajo.

En los últimos años, el gran crecimiento de la capacidad de cálculo junto con el desarrollo de los modelos numéricos para la solución de las ecuaciones de Euler ($R_n \rightarrow \infty$) y Navier-Stokes ha permitido pensar en un enfoque más realista del problema de predicción de la resistencia al avance de buques. Sin embargo, pese a los esfuerzos por desarrollar metodologías en este sentido, la falta de cualidades como la fiabilidad y robustez, junto con las limitaciones prácticas que presenta la complejidad de las metodologías, no han permitido la aparición de ningún código comercial capaz de resolver el problema así planteado.

Por otra parte, la aparición relativamente reciente de herramientas de diseño basadas en estos métodos, se enfrentan a un importante desafío. La información a disposición de los proyectistas gracias a estas técnicas es diferente a la obtenida en la práctica tradicional del proyecto de un buque. Esta información requiere una nueva *filosofía de proyecto*², al considerar, por ejemplo, la optimización de las formas de un buque (ver por ejemplo [GPVC98] [PSS96] [LRB⁺98] [JL96]).

0.4 Los Códigos CFD en el Proyecto del Buque

La incertidumbre asociada con la determinación de las componentes de la resistencia al avance del buque requiere que su cálculo se realice con sumo cuidado a fin de obtener una especificación final de la planta propulsora acorde a las exigencias del buque, en otras palabras, su optimización para la especificada velocidad de servicio. Este cálculo debe asegurar al astillero constructor con un cierto grado de seguridad que cumplirá los requisitos del

²Asociada a la definición de un ciclo de optimización del diseño basado en herramientas CFD.

armador a la vez que se ha minimizado el tamaño de la planta propulsora y su coste.

Como ya se ha mencionado, los ensayos hidrodinámicos con modelos son actualmente la herramienta básica de la que dispone el arquitecto naval para conocer las características hidrodinámicas del buque. Sin embargo, existen en la práctica dos limitaciones al uso generalizado de ensayos con modelos como ayuda al diseño. Por una parte, el relativamente elevado coste de estos, que provoca sea inviable su utilización en muchos casos prácticos de presupuesto modesto. Y por otra, la gran dificultad de definir un proceso sistemático de optimización del diseño a partir de los datos suministrados por los canales de experiencias.

Por estas razones se han desarrollado diversas técnicas que permiten reducir al mínimo la realización de ensayos experimentales, bien utilizando bases de datos de ensayos con modelos para extrapolar los resultados a un caso concreto, bien utilizando los resultados experimentales de un casco base e inferir la influencia de las posibles variaciones.

Junto con estas técnicas, las herramientas *CFD* permiten al proyectista investigar una gran serie de opciones de diseño en los primeras fases del proyecto antes de que se inicie la fase de construcción, ayudando principalmente a definir ese ciclo de optimización del diseño de formas, del que, lamentablemente carecen la mayoría de los diseños en ingeniería naval.

Resumiendo, es normal en muchos proyectos, que los ensayos experimentales se realicen en la etapa final del desarrollo del proyecto para confirmar las estimaciones realizadas a lo largo del mismo. Este proceso de confirmación del proyecto final mediante ensayos hidrodinámicos seguirá existiendo durante los próximos tiempos. Sin embargo, los códigos *CFD* comienzan a cobrar gran importancia en algunas oficinas técnicas y en general en proyectos que, por su pequeña envergadura, no pueden apoyarse en la experimentación tradicional, recurriendo a los beneficios de la más económica *experimentación numérica*.

Por otra parte, los ensayos en canal de experiencias son una base vital para el desarrollo de herramientas *CFD*, permitiendo comprobar su validez [PSS97] [LRB⁺98] y siendo base para la aparición de nuevas teorías para describir diferentes fenomenologías.

0.4.1 Los Ensayos en Canal de Experiencias

Por todas las razones expuestas en la discusión anterior, se considera de interés para la presente exposición, introducir brevemente los diferentes tipos de ensayos experimentales con modelos, teniendo como objetivo, tanto presentar sus capacidades y limitaciones para el diseño de buques, en comparación

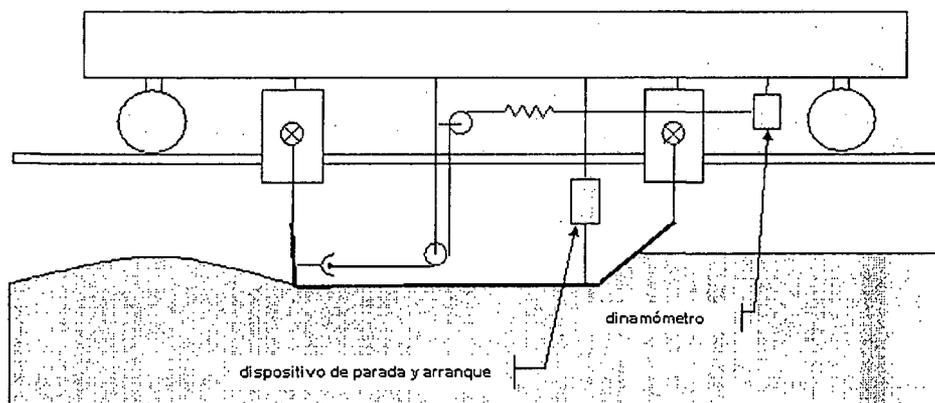


Figura 0.1: Esquema de un sistema de medición de la resistencia al avance en el ensayo de remolque en aguas tranquilas.

con la metodología basada en procedimientos numéricos, como tener en consideración las posibilidades de estos ensayos en la validación de herramientas *CFD*.

El Ensayo de Remolque

Como ya se ha mencionado, un aspecto primordial del proyecto del buque es el dimensionamiento de la planta propulsora, predecir su potencia para desarrollar una determinada velocidad o ejercer un determinado tiro en el caso de los buques pesqueros o remolcadores. Tradicionalmente, los ensayos en canal han constituido la única vía disponible para permitir al proyectista determinar los anteriores parámetros.

Realmente, la idea de realizar ensayos con modelos de buques no es nueva. Así, Leonardo da Vinci llevó a cabo una serie de ensayos con tres modelos de diferentes, para valorar el efecto de diferentes distribuciones de desplazamiento en proa y popa.

Durante muchos años, diversos investigadores como Samuel Fortrey o Benjamin Franklin hicieron ensayos con modelos utilizando el arrastre por gravedad. Pero no fue hasta 1871, cuando William Froude utilizó el que puede considerarse el primer canal de ensayos, precursor de los tanques de remolque existentes hoy en día[PA92].

La principal misión de los ensayos de remolque en aguas tranquilas es la determinación de la resistencia de la carena al avance. En la figura 0.1 puede verse un esquema típico de un sistema actual de medición de la resistencia al avance en el ensayo de remolque en aguas tranquilas.

Lamentablemente la imposibilidad práctica de llevar a cabo ensayos ex-

perimentales a escala, perfectamente semejantes a los del buque real³, obliga a cometer un importante error en la reproducción de los efectos que dependen del número de Reynolds R_n . Como es bien sabido existen diversos procedimientos, basados en la experiencia acumulada, y con un cierto origen teórico que permiten obtener la resistencia al avance del buque en función de los valores obtenidos en la escala del modelo.

Para ello, se ha de suponer que las diversas componentes de la resistencia al avance, dependientes de diferentes parámetros adimensionales, son aditivas [LB97] [Rav96] [Pér89]. El primer paso necesario, es separar la componente de la resistencia dependiente de R_n del resto, para ello son necesarios diversos artificios, ampliamente conocidos, cuya discusión puede encontrarse en [Pér89].

La base teórica del proceso está en asimilar la resistencia, denominada de fricción⁴ del barco, a la de una placa plana de superficie igual que la mojada del buque. Dado que, para la placa plana sumergida existe una fórmula empírica, que permite obtener el coeficiente adimensional de resistencia en función⁵ de R_n , la extrapolación de su valor en el barco a partir de los datos del modelo, se puede reducir a una simple corrección de esa fórmula. Esta corrección se basa en parámetro que se suele denominar *factor de forma*.

Se hace evidente, que el proceso mencionado basa todo su valor en la experiencia acumulada de años, más que en las evidencias teóricas que plantea. De ahí la importancia que, en los canales de experiencias, tiene la manera de proceder específica para la determinación de la resistencia total⁶.

Por otra parte, del ensayo de remolque en aguas tranquilas puede obtenerse otro tipo de información de interés para el arquitecto naval. La medición de los perfiles de olas, complementa los valores del factor de forma obtenidos por las técnicas de extrapolación clásicas ya mencionadas, ya que a partir de ellos existen diversas técnicas muy fiables que permiten determinar este parámetro de forma exacta. Además, el análisis del mapa de olas permite inferir datos generales sobre las características de las formas en relación con la resistencia por formación de olas [LRB⁺98] [LB97]. En la figura 0.2 se

³Lo cual obligaría a que fueran iguales tanto el número de R_n como el número de Froude F_n , en el modelo a escala y en el buque real.

⁴Que es la componente de la resistencia total que depende de R_n .

⁵Según las recomendaciones de la ITTC (ver kimmgw2.kimm.re.kr/ITTC/), el coeficiente de resistencia de fricción en la placa plana sumergida, esta dado por,

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2}$$

⁶Aunque el esquema general es común a todos los canales de experiencias, cada uno debe corregir ciertos errores sistemáticos en sus procedimientos.

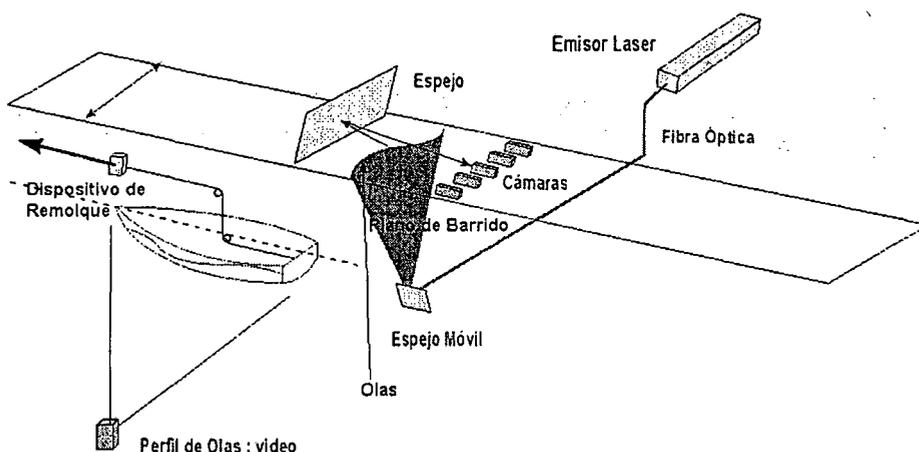


Figura 0.2: Esquema de un sistema óptico de medición de perfiles de olas en un canal de ensayos.

presenta un esquema típico de una instalación de medición óptica de perfiles de olas en un canal de ensayos.

Además, la medición del campo de estelas del modelo, puede dar una idea clara de la bondad de las formas, en lo referente a la resistencia viscosa, y puede ser de gran interés para determinar la calidad de las formas en lo que a la conformación de la popa y a su interacción con el propulsor se refiere. En la figura 0.3 se presenta un esquema típico de una instalación de medición de campos de velocidades de estelas en un canal de experiencias hidrodinámicas.

Hay que añadir que los ensayos en canal de remolque, pueden completarse con análisis del propulsor aislado y del modelo en autopropulsión. Evidentemente, al igual que en el caso anterior, la imposibilidad de realizar un ensayo semejante al de escala real, junto con la gran dificultad de extrapolación de los resultados al buque⁷, provocan que su interés práctico sea muy limitado.

Además, existen canales de remolque que incluyen generadores de olas, lo que permite determinar las características anteriormente reseñadas ante la acción de las olas, así como realizar ensayos para evaluar el comportamiento en la mar del buque. En muchos casos estos canales de remolque multi-propósito han desaparecido con la llegada de tanques especializados en el ensayo en olas.

⁷ Aún mayor que en el caso anterior, pues en el ensayo del propulsor, aparecen fenómenos como la cavitación que no está gobernada por los ya mencionados R_n y F_n . Además, la interacción entre los diferentes fenómenos puede tomar gran importancia, no siendo justificable la suposición de adición de las componentes de la resistencia total.

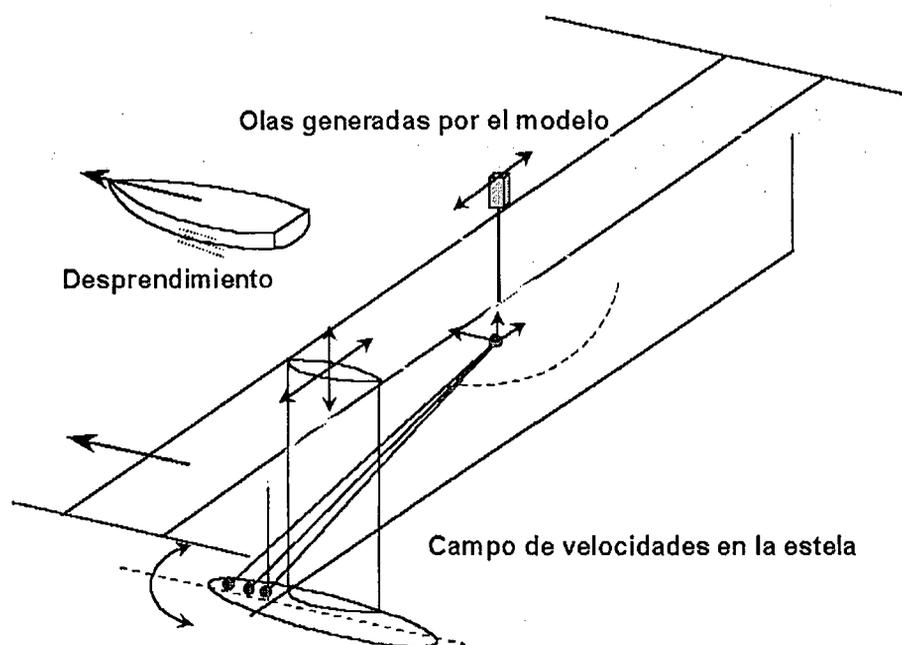


Figura 0.3: Esquema de un sistema óptico de medición de estelas en un canal de ensayos

El Ensayo en Canal de Olas

Como ya se ha mencionado, la aparición de tanques para el ensayo de modelos a escala en olas (ver figura 0.4), permiten el estudio del comportamiento del buque en situaciones de mar concretas. Estas situaciones pueden ser definidas por los requisitos de operatividad del buque, o incluso por situaciones críticas de avería.

Lamentablemente, la complejidad de los fenómenos que se desarrollan en estas simulaciones complica de manera importante la extrapolación de estos resultados a la realidad. Sin embargo, en muchos casos prácticos, puede suponerse despreciable el efecto que los fenómenos viscosos introducen en el problema, permitiendo, bajo este supuesto, la extrapolación directa de los resultados. En otros casos, el análisis de los resultados sólo puede hacerse desde un punto de vista cualitativo.

El Ensayo de Maniobrabilidad

Los ensayos de maniobrabilidad, son una posibilidad aparecida más recientemente en el mundo experimental. La disponibilidad de sistemas electrónicos ligeros de posicionamiento y gobierno a distancia, han posibilitado el desa-

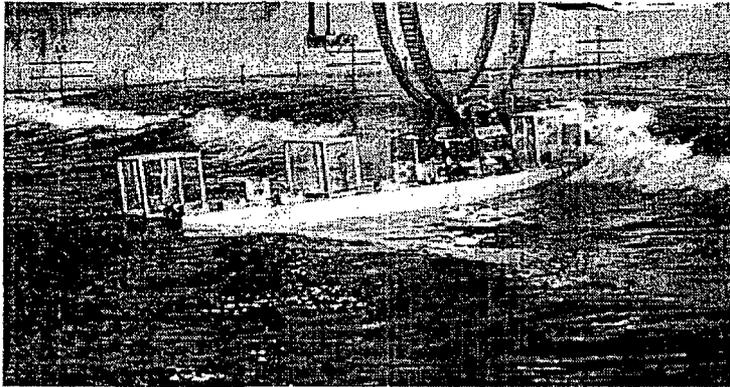


Figura 0.4: Ensayo de un modelo en tanque de olas.

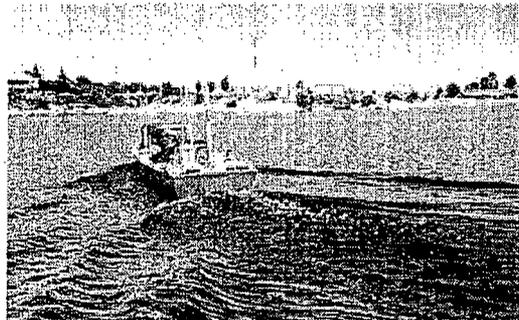


Figura 0.5: Ensayo de maniobrabilidad con modelo en un lago.

rollo⁸ de este tipo de ensayos, que pueden realizarse en lagos naturales (ver figura 0.5).

El principal objetivo de este ensayo es, obviamente, valorar las capacidades de maniobra del buque. Lamentablemente, difícilmente pueden extrapolarse los resultados de este tipo de ensayos al buque real, por lo que su valoración ha de ser cualitativa.

El Ensayo en Tunel de Cavitación

Por último se ha de hacer mención a otro tipo de ensayo clásico. El denominado ensayo en túnel de cavitación (ver figura 0.6). Este ensayo tiene por objetivo valorar el comportamiento de las hélices. Lamentablemente, como hemos comentado con anterioridad, difícilmente pueden extraerse, más

⁸Es evidente la limitación física, para este tipo de ensayos, de un canal convencional, dado que las maniobras requerían de un tanque de grandes dimensiones.

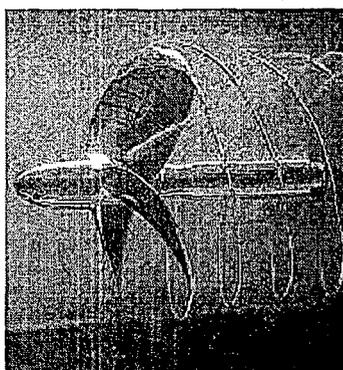


Figura 0.6: Ensayo de una hélice en tanque de cavitación.

aún cuando gran parte de la fenomenología del proceso se debe a la interacción con el casco y timón, resuelta sólo parcialmente en este tipo de ensayos [Pér89], información cuantitativa de este tipo de ensayos.

Aunque, se ha de tener en cuenta que la información suministrada por este tipo de ensayos es vital para entender los distintos fenómenos que se desarrollan ante el propulsor.

0.4.2 Los CFD como Herramienta de Diseño

En la práctica, la utilización de herramientas como los CFD se convierte hoy en día en una necesidad para aquellos proyectos en donde las exigencias tecnológicas adquieren una significativa importancia [LRB⁺98]. En [GPVC98] se pone de manifiesto la necesidad de esta contribución en el diseño de buques de crucero y pasaje, donde la velocidad y la confortabilidad exigen una cuidada elección de formas.

Las herramientas CFD pueden proporcionar significativas contribuciones en el conjunto del proceso de proyecto desde los estudios iniciales conceptuales hasta el proyecto detallado como queda reflejado en la figura 0.7.

Armado con esta información, el proyectista puede utilizar los CFD para realizar estudios de optimización y afinar el proyecto para una serie de características del comportamiento del buque y atributos del casco. En la tradicional espiral del proyecto que se presenta en la figura 0.7, se indican aquellas actuaciones en donde se considera que los cálculos con *CFD* están en disposición de ayudar a los métodos normalmente establecidos y aceptados.

Desafortunadamente, para la mayoría de los ingenieros navales estas herramientas se presentan aún lejanas desde el punto de vista práctico, en parte por su complejidad de manejo, que requiere en ocasiones verdaderos

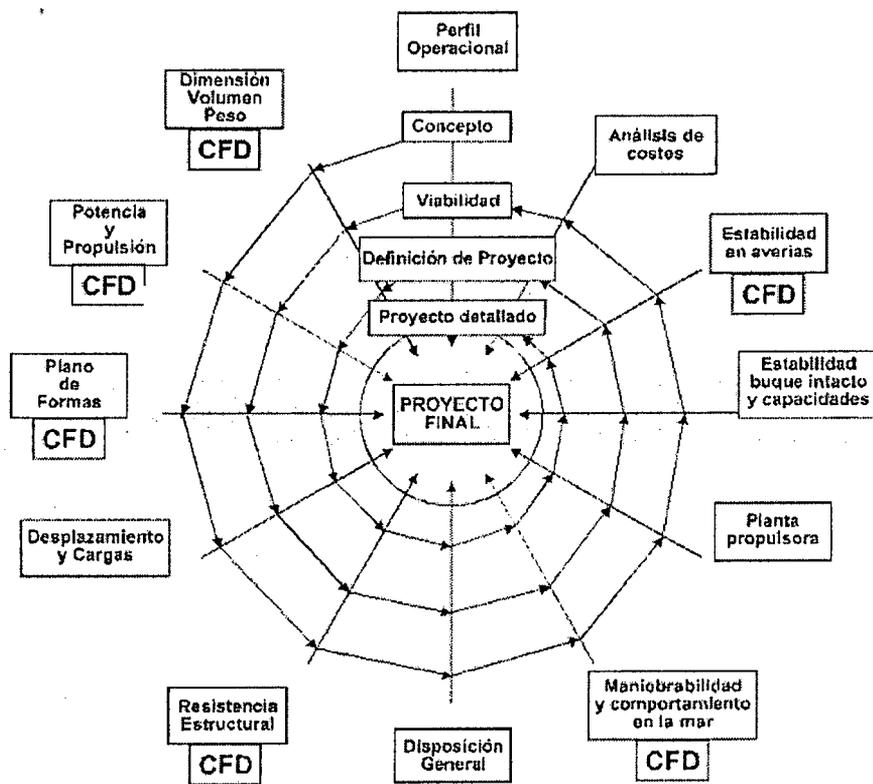


Figura 0.7: Ciclo de diseño de un buque asistido por herramientas CFD.

especialistas en el tema y en parte por el desconocimiento que se tiene de los fenómenos que se están simulando⁹.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, 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 son capaces de intuir la influencia de ciertas modificaciones locales del casco en la resistencia del buque pero, no se dispone de medios para juzgar los efectos de innovaciones en las formas.

Las herramientas *CFD* permiten evaluar estas modificaciones a partir de 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, en muchos casos¹⁰, no en términos absolutos. La mayor mejora que los *CFD* pueden introducir en el proceso del proyecto de un buque es la de permitir la evaluación y comparación de diferentes formas de la carena sin necesidad de ensayarlas. Aunque para la evaluación final del comportamiento del casco continúa siendo útil recurrir al uso del tradicional canal de ensayos, la mayor parte de los refinamientos del casco se pueden realizar merced a estas herramientas numéricas.

Los análisis *CFD* permiten determinar la distribución de los campos de velocidades y presión en todo el dominio de análisis. Campos tan costosos de precisar experimentalmente como la distribución de estelas, las líneas de corriente sobre el casco o los perfiles de olas, son resultados inmediatos de un análisis *CFD*. Se hace evidente que esta información difiere sensiblemente de las magnitudes que se obtienen en la práctica tradicional de los canales de ensayo.

Debido a la gran cantidad de resultados que se pueden obtener de un análisis *CFD*, 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 un mejor uso de las herramientas *CFD*. El mapa de la distribución del coeficiente de presión C_p , del vector velocidad, la representación en tres dimensiones del tren de olas calculado y los perfiles de ola en el casco son los parámetros locales que se pueden utilizar para la evaluación de un casco *ensayado numéricamente*. Junto con estas cantidades locales, es posible conocer los valores integrales de la resistencia por formación de olas, la resistencia viscosa, la fuerza de arfada y el momento de trimado en función de la velocidad.

Una vez que se visualizan los resultados, el proyectista necesita conocer

⁹Y de la manera en que se realiza esa simulación.

¹⁰A semejanza de lo que ocurre en muchos tipos de ensayos experimentales de los referidos anteriormente.

cómo usarlos. El criterio que se aplica para los diagramas del coeficiente de resistencia es bastante obvio; la mejor carena es aquella que presenta el menor coeficiente. Pero este criterio basado en la experiencia tradicional es muy restrictivo. Efectivamente, dado que tras el análisis *CFD* disponemos de una gran cantidad de información, no disponible en la práctica habitual, puede ser de interés considerar otros valores calculados para evaluar comparativamente la calidad de las formas de los buques, y no comprometerse exclusivamente en la fiabilidad de un único parámetro global. Las curvas de isonivel del coeficiente C_p , el mapa de estelas, la distribución de las líneas de corriente cerca del casco y la predicción del perfil de las olas constituyen los principales parámetros locales cuyo examen puede dar elementos razonables para juzgar la bondad de las formas y guiar el proceso de optimización.

Realmente, la presencia de un marcado gradiente positivo a lo largo de las líneas de corriente calculadas implica, cuando coincide con valores positivos de C_p , que la capa límite del fluido viscoso aumenta rápidamente en correspondencia a este gradiente positivo local. Un alto gradiente positivo a popa del buque puede indicar un peligro de separación y en cualquier caso, señal que el casco utiliza una gran cantidad de energía en acelerar la capa límite. Un análisis de las líneas de corriente sobre el casco puede apoyar tales suposiciones.

No se pretende presentar aquí un curso de optimización de formas mediante cálculos de *CFD* sino simplemente dar ideas generales sobre los nuevos criterios que el proyectista debe interpretar para la mejora hidrodinámica de las formas.

Por último, al objeto de plantear esta nueva filosofía de diseño de buques, imaginemos las etapas ideales de un ciclo de optimización de formas basado en los métodos actuales para diseño de cascos y apéndices, que se concretaría en las siguientes etapas:

1. Definición del rango de velocidades y condiciones de operación.
2. Definición de la forma del casco y apéndices preliminar utilizando métodos empíricos o simples modelos hidrodinámicos basados en la teoría de potencial.
3. Construcción de un prototipo a escala.
4. Análisis experimental del comportamiento hidrodinámico del prototipo en canales de ensayo.
5. Escalado de los resultados del modelo a la geometría real del barco.

6. Análisis de los resultados, redefinición de las formas del casco y apéndices y repetición de las etapas 3 a 6 hasta que se alcanzan las especificaciones deseadas del comportamiento del barco.

Es evidente que este es un proceso difícil y caro¹¹, que generalmente no es suficiente para alcanzar un comportamiento óptimo en crucero¹² definido por el máximo nivel de eficiencia hidrodinámica, caracterizada principalmente por una velocidad determinada y por unos requisitos de estabilidad.

Si embargo este ciclo es posible en la práctica si sustituimos la evaluación experimental por el uso de herramientas *CFD*. Evidentemente esta sustitución requiere de la definición de unos ciertos criterios de optimización [PSS96] y el desarrollo de una metodología auxiliar que permita definir ese análisis de resultados y la posterior redefinición de las formas.

0.5 Objetivos del Presente Trabajo

La meta general que se pretende en la presente tesis es el desarrollo de un sistema informático para ayuda al diseño hidrodinámico de barcos. El sistema permitirá predecir la distribución (espacial y temporal) de velocidades y presiones, y por consiguiente las fuerzas ejercidas por el agua sobre el casco de un barco en diferentes configuraciones de navegación. De esta manera se podrá simular el proceso dinámico de interacción buque/agua o bien predecir la posición de equilibrio dinámico del buque en la situación definida. El sistema que se desarrollará, será especialmente adecuado para el diseño óptimo de carenas de buques, pero se podrá aplicar al análisis de una gran variedad de problemas dentro y fuera del ámbito naval.

Con los términos *desarrollo sistema informático* se quiere decir que el proyecto se ha enfocado hacia el desarrollo de los métodos de cálculo y resolución del problema, pero dichos métodos de cálculo deben de integrarse en un sistema informático para diseño asistido por ordenador de carenas de buques, permitiendo de este modo, el fácil procesamiento de la información. El desarrollo del sistema de procesamiento no se consideró objeto del presente trabajo, pero si la integración del módulo de cálculo desarrollado dentro del sistema, así como la incorporación en el mismo de los elementos de procesamiento y otros desarrollos necesarios para el adecuado funcionamiento del sistema dentro del ámbito del diseño naval. Como pre y postprocesador del sistema se eligió el programa *GiD*, desarrollado por el Centro Internacional de

¹¹Inviabile en la práctica.

¹²Debido principalmente a las dificultades en el proceso de escalado.

Métodos Numéricos en Ingeniería [RRE98], por sus adecuadas características al problema planteado.

Con la realización de este proyecto se pretende poner a disposición del arquitecto naval un sistema que permita mejorar los procedimientos actuales de diseño hidrodinámico de barcos. Dicho sistema es claramente innovador, y no existe, en la actualidad, un producto similar debido a las dificultades intrínsecas del análisis *CFD* de barcos, resueltos en parte, sólo muy recientemente.

El canal de experiencias virtual basado en el método de los elementos finitos (*MEF*) que se desarrollará, permitirá medir la mayor parte de los datos necesarios para el diseño en ingeniería naval. Entre las principales variables que se podrán obtener figuran:

1. Distribución de presiones sobre el casco.
2. Distribución de velocidades sobre el casco.
3. Líneas de corriente sobre el casco.
4. Factor de forma.
5. Mapas y perfiles de olas.
6. Solicitaciones sobre el casco, y en concreto resistencia al avance, resistencia por formación de olas y resistencia viscosa.
7. Resistencias de apéndices y añadidas.
8. Situación de equilibrio dinámico y en concreto arfada y trimado.
9. Coeficientes y distribución de la estela potencial y viscosa.

Este proyecto pretende precisamente reducir el coste del ciclo de diseño mediante la utilización de modelos de cálculo que predigan, de una forma económica, en las primeras fases del diseño, el comportamiento hidrodinámico del casco de un barco y sus apéndices para diferentes condiciones de crucero.

Las características preliminares del sistema se pueden enunciar como sigue:

- * Algoritmo de solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Posibilidad de resolución con viscosidad nula (Ecuaciones de Euler).

- * Condición de contorno de superficie libre no lineal apta para buques rápidos. Posibilidad de utilizar condiciones simplificadas. Se pretende huir de las aproximaciones clásicas y permitir que el sistema desarrollado sea válido para una amplia gama de números Froude.
- * Metodología de resolución del problema dinámico de interacción fluido estructura. Esto permite simular problemas de interacción dinámicos y calcular la situación de equilibrio dinámico estacionaria.
- * Posibilidad de incorporar diferentes apéndices o bien otros modelos para estudios de interacción.

El resultado del proyecto pretende ser una suerte de canal de experiencias virtual, que permita reproducir la mayoría de los ensayos en aguas tranquilas y con olas, para su utilización en las primeras fases de diseño del buque.

Por otra parte y como afortunado resultado indirecto dispondremos de un sistema de análisis basado en *CFD* que podrá ser aplicables a otros aspectos del diseño naval (apéndices, efectos del viento en estructuras, diseño de velas, *off-shore*, ...) y a otras ramas de la ingeniería.

La resolución del problema planteado, presenta varias dificultades, muchas de ellas conocidas a priori y que deberán ser solventadas. Entre ellas cabe destacar:

- * Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes:
 - La dificultad numérica asociada a la aplicación de la condición de incompresibilidad, que obliga a que los espacios de elementos finitos sean compatibles (condición de Babuška-Brezzi [BD88] [Bab71] [Cod92]).
 - La convección que aparece en la formulación euleriana de las ecuaciones de Navier-Stokes presenta problemas de inestabilidad numérica cuando este término cobra importancia relativa frente al término viscoso [Cod93a] [HB79].
- * Resolución de las ecuaciones de superficie libre:
 - La superficie libre, representada como una ecuación de convección pura, presenta, al igual que en el caso anterior, problemas de inestabilidad numérica. Además, en este caso, este problema es más crítico. La razón es que las técnicas tradicionales para solventar este inconveniente añaden difusión a la ecuación de transporte, al

objeto de eliminar las oscilaciones numéricas espúreas. Sin embargo, esta difusión es, en muchos casos, suficiente para amortiguar de manera notoria las oscilaciones físicas que se producen en la superficie libre.

* Condición de contorno absorbente:

- Aunque las condiciones de contorno absorbente o libre son necesarias en muchos casos prácticos, aparecen vitales en fenómenos de transporte de ondas. En nuestro caso la presencia de la superficie libre hace imprescindible que se incluya un mecanismo que evite los rebotes de las olas contra los contornos [SDI98] [MC98].

* Acoplamiento fluido / superficie libre:

- Este acoplamiento ha de ser incluido en el algoritmo de resolución del problema. La técnica tradicional para hacerlo consiste en imponer una condición de contorno específica de superficie libre linealizada en el problema fluido. Sin embargo, si se pretende resolver el problema no lineal, el acoplamiento no se puede realizar de una manera tan evidente.

* Acoplamiento fluido / estructura:

- Al igual que en el caso anterior, el acoplamiento del fluido y la estructura ha de ser incluido en el algoritmo de resolución del problema. El diseño de este algoritmo debe ser tal que permita una transmisión elástica de energía entre los medios.

* Cambio de forma del dominio de análisis:

- La manera más natural de solventar este problema es acudir a las técnicas de remallado. Pero esto requiere un control preciso de la definición geométrica del problema, y exige una técnica muy fiable de generación de mallas. Aún es este caso, el coste en tiempo de procesamiento hace que estas técnicas sean inaplicables en la mayoría de los casos prácticos.

Los anteriores problemas han sido abordados y resueltos durante la realización de este proyecto, si bien las soluciones elegidas pueden no ser las óptimas en muchos casos, dado lo ambicioso del trabajo planteado. El encontrar mejores opciones será tema de posibles futuras líneas de investigación.

Por otra parte conviene señalar que gran parte de los objetivos de este proyecto consiste en desarrollar las metodologías apropiadas para resolver los problemas planteados, pues gran parte de ellos no han sido resueltos hasta la fecha. Como muestra, cabe mencionarse el hecho de desarrollar una condición de superficie libre válida para altos números de Froude, frente a los métodos desarrollados hasta la fecha que incluyen una condición sólo apta para buques lentos.

0.5.1 Una Herramienta CFD para el Diseño en Ingeniería Naval

Como ya se ha comentado el presente proyecto surgió con la vocación de ser una herramienta útil para profesionales del diseño en ingeniería naval. Por esta razón sus objetivos están ligados a las necesidades de un posible usuario final con un perfil de arquitecto naval.

Con el objetivo de cumplir estos objetivos se fijaron las siguientes especificaciones que fueron recogidas tras una consulta a una decena de posibles usuarios finales del código, entre los que se encontraban oficinas de diseño, universidades, canales de experiencias y astilleros.

- *El código resultante del proyecto debe poder utilizarse en ordenadores personales tipo PC y redes de PCs.* Este punto limita principalmente los requisitos de memoria de la aplicación que se fijan en torno a 1Gb / PC. La posibilidad de ser operado en redes de PC obliga a hacer un estudio de herramientas disponibles para la ejecución en paralelo sobre redes.
- *El tiempo de cálculo para aplicaciones típicas debe situarse por debajo de las 12h. (una noche) por análisis.* Este aspecto requiere de un análisis y esfuerzo importante en el diseño de un algoritmo rápido y de su optimización para la ejecución en PC. Para esto se recogieron las orientaciones para programadores en procesadores INTEL Pentium.
- *El código resultante del proyecto debe correr sobre sistema operativo WINDOWS de Microsoft. Además debe existir la posibilidad de poder ser ejecutado en otras plataformas y sistemas operativos (principalmente UNIX y LINUX, junto con el ya mencionado WINDOWS).* La portabilidad del código desarrollado afecta a la elección del lenguaje de programación y al cuidado en el seguimiento de los estándares, o en general, al desarrollo y mantenimiento de las diferentes versiones.
- *Resultados de interés:*

- Componentes de la resistencia: resistencia por formación de olas, resistencia viscosa, resistencia inducida, etc..
 - Sustentación.
 - Análisis del efecto en aguas poco profundas.
 - Análisis de la influencia de los apéndices en la resistencia total.
 - Trimado dinámico. Variación con la velocidad.
 - Arfada. Variación con la velocidad.
 - Distribución de la presión e identificación de los puntos críticos.
 - Distribución de la velocidad e identificación de las zonas de separación.
 - Estela nominal en el disco de la hélice.
 - Líneas de Corriente.
 - Mapas de olas.
 - Análisis del efecto de los bulbos de proa.
 - Análisis de disposición de multicascos.
 - Análisis en olas (regulares e irregulares). Movimientos del buque con seis grados de libertad.
 - Probabilidad de pantocazos y emersión de la hélice.
 - Resistencia añadida en olas.
 - Efecto de sistemas de estabilización.
 - Interacción del casco con los diversos apéndices.
- Otros aspectos como la *robustez y fiabilidad* del código deben ser tenidos muy en cuenta.

Evidentemente, las anteriores especificaciones no tuvieron en cuenta la realidad actual que impone severos límites a la teoría del análisis de diferentes fenómenos mencionados y la capacidad de cálculo de los ordenadores que imposibilita en la práctica muchos de los análisis requeridos. Sin embargo, estas especificaciones se tomaron como objetivo de este trabajo y como orientación a posibles líneas de continuidad del mismo.

El grado de cumplimiento de las anteriores especificaciones será discutido en el capítulo de conclusiones y líneas futuras de trabajo.

Por otra parte, estos objetivos restringen de manera importante las posibilidades de elección del método de resolución de las ecuaciones de dinámica de fluidos. Este aspecto será comentado detenidamente durante el desarrollo del presente trabajo.

0.5.2 Organización del Presente Trabajo

La organización del presente trabajo será como sigue. En el siguiente capítulo se presentarán las ecuaciones que gobiernan el problema de mecánica de fluidos (ecuaciones de Navier Stokes) y se hará un breve análisis de las diferentes problemáticas que aparecen en su resolución. En el capítulo 2 se estudia la ecuación de superficie libre. Este estudio nos llevará a un análisis profundo de la ecuación de convección-difusión y su problemática de estabilidad. En el capítulo 3 se aborda el esquema elegido para la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes y su formulación utilizando el método de los elementos finitos. Se hará también una importante discusión sobre las diversas condiciones de contorno aplicables. El capítulo 4 se dedicará a la descripción del algoritmo utilizado para el movimiento de la malla de elementos finitos, necesario para tener en cuenta la deformación del volumen de control durante el proceso de resolución del problema. En el capítulo 5 se presentará el algoritmo completo de resolución del problema y se comentarán diversos aspectos y problemáticas particulares.

A lo largo de cada capítulo se presentarán y discutirán diversos ejemplos académicos, mientras que en el último capítulo se incluirá una serie de ejemplos prácticos incluyendo diversas geometrías de buques reales. También se discutirán los resultados obtenidos, comparándolos con los experimentales disponibles en cada caso.

Por último, se presentarán las conclusiones y líneas futuras de investigación. Además se discutirá el porcentaje de cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto.