

Optimización de embarcaciones de recreo mediante la utilización de un código CFD

M. López Rodríguez (1),
J. García Espinosa (2)
E. Oñate (2)

(1) Nautatec, Ingeniería Naval Diseño de Yates S.L.
(2) Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

(*) Trabajo presentado en las XXXVIII Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval celebradas en Barcelona durante los días 23 y 24 de noviembre de 2000

Indice

Palabras clave Resumen/Abstract

- 1.- Introducción
- 2.- Fundamentos teóricos del código cfd
 - 2.1 Formulación estabilizada de las ecuaciones de dinámica de fluidos con superficie libre
 - 2.2 El Método de pasos fraccionados estabilizado
- 3.- Ejemplos de aplicación
 - 3.1. Catamarán turístico 79' de vela
 - 3.2. Crucero de vela IMS 40'
 - 3.3. Embarcación de planeo 15m
- 4.- Definición del problema geométrico
- 5.- Resultados
 - 5.1. Resultados del Catamarán Turístico 79' de vela
 - 5.2. Resultados del Crucero de vela IMS 40'
 - 5.3. Resultados de la Embarcación del planeo de 15m
- 6.- Conclusiones
- 7.- Referencias

Palabras clave

Ecuaciones de Navier-Stokes, RANSE, Superficie Libre, Análisis de Flujo Global y Local, Resistencia Viscosa, Resistencia por Formación de Olas, Campo de Estela, Campo de Presión, Campo de Velocidad, Algoritmos Estabilizados, Catamarán, Embarcación a Vela, Lancha Rápida, Planeadora, Superficie sustentadora, Validación y Verificación CFD.

Resumen

En la actualidad las más avanzadas técnicas para diseño naval ya no se restringen sólo a proyectos de alto coste; si no que también ahora son de aplicación en el campo de las embarcaciones de recreo y turísticas, dando con ello un valor añadido al proyecto final.

La utilización de un código CFD para el mayor conocimiento del comportamiento hidrodinámico de las embarcaciones de recreo y turísticas es de una gran utilidad debido a las complejidades que en el diseño de estas se presentan. Estas herramientas nos van a proporcionar una serie de datos como sustentación lateral en las embarcaciones de vela o interacción entre cascos en catamaranes con deriva lateral, que de otra forma nunca pudieran conocerse.

Los resultados hidrodinámicos obtenidos nos sirven para comparar las diferentes alternativas, y para además obtener unos valores que directamente son usados para la predicción de velocidad de la embarcación, que más tarde se verán refrendadas por las pruebas de mar. La utilización de técnicas CFD, basadas en el método de los elementos finitos, para la resolución de las ecuaciones de Reynolds (RANSE), incluyendo efectos de superficie libre, hace que todo esto sea posible.

En este trabajo se presentan diversos resultados de aplicación del código CFD SHYNE a varias embarcaciones deportivas y de recreo. SHYNE está basado en la técnica del Cálculo Finitesimal para la integración de las ecuaciones de Reynolds.

Abstract

At present the most advance techniques used on naval design are applied on the yacht design too. This gives a technical performance and doesn't represent a big extra over the project cost.

The use of a CFD code, for a better knowledge of yacht hydrodynamic behaviour, is very useful due to the complexity of the yacht design process. The CFD code will supply data as lift of the sailing boats or interaction between hulls of a catamaran, that otherwise never could be known.

The obtained hydrodynamic results are used by the naval architect to compare several options, and moreover to obtain data used to predict the boat speed without extrapolation. Later, this prediction will be approved on the sea trials. The use of CFD techniques based on the finite element method to solve the Reynolds equations (RANSE), including free surface effects, makes this possible.

In this work, several examples of application of the CFD code SHYNE to different geometries are presented. SHYNE is based on the Finite Calculus (FC) technique to integrate the Reynolds equations.

1.- Introducción

La diversidad y complejidad de las geometrías de los cascos de las embarcaciones turísticas y de recreo dificulta en gran medida la exactitud en la predicción de su comportamiento hidrodinámico mediante las técnicas tradicionales. Por otra parte, estas mismas razones obligan a un conocimiento exhaustivo de cada tipo de embarcación para lograr una óptima predicción de su comportamiento [1]. La práctica tradicio-

nal recurre en estas ocasiones al ensayo experimental, pero los reducidos presupuestos de ingeniería de este tipo de proyectos hacen económicamente prohibitiva esta opción.

En la actualidad, la utilización de las herramientas CFD se convierte en una necesidad para aquellos proyectos donde, como en las embarcaciones de recreo y turísticas, las exigencias tecnológicas adquieren una significada importancia. 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 y requiere una nueva filosofía de proyecto. 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 [2].

Más concretamente, la utilización de las herramientas CFD nos va a permitir predecir con éxito el comportamiento hidrodinámico de cualquier tipo de embarcación de recreo, solventado todas las dificultades mencionadas anteriormente y con un coste asequible para esta clase de proyectos de ingeniería. La metodología CFD nos va a ayudar a conocer individualizadamente el aporte, tanto en la resistencia al avance, la fuerza de sustentación, la resistencia de presión como en la resistencia viscosa de cada uno de los apéndices sustentadores tan usuales en algunas de las embarcaciones de recreo; siendo este hecho de suma importancia y que de ninguna otra manera podríamos conocer.

Desde un punto de vista matemático, el movimiento de un fluido alrededor de una embarcación 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 y aunque ya a finales del siglo pasado aparecen las primeras referencias sobre el cálculo aproximado de la resistencia por formación de olas en buques [3], este problema ha seguido desafiando a matemáticos e hidrodinámicos durante el presente siglo.

En la actualidad, gracias al desarrollo de los CFD, las ecuaciones que gobiernan el problema pueden resolverse de forma aproximada por algoritmos numéricos, proporcionando información sobre los movimientos y las solicitaciones sobre la embarcación, en las diferentes etapas de diseño.

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 (que no esta panelizada) 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 [4], distribuidas sobre la superficie libre, como singularidad elemental. El más conocido de estos esquemas fue presentado originalmente por Dawson [5] y está basado en el método de Hess y Smith [6] 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 tan conocidos como DAWSON, RAPID [7], SPLASH [8] o SHIPFLOW [9] 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.

En los últimos años, la aparición de esquemas numéricos para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes ha permitido un enfoque más realista del problema de predicción de la resistencia por formación de olas. Los esquemas numéricos para la resolución de estas ecuaciones se enfrentan a las siguientes dificultades [10]:

1. El importante carácter no lineal de las ecuaciones de Navier Stokes ocasiona que los esquemas de integración tradicionales presenten importantes problemas de inestabilidad.
2. La resolución precisa de la ecuación de la superficie libre, que construye el movimiento de las partículas a una superficie fluida, de posición a priori desconocida.

Los esquemas más exactos desarrollados incluyen un algoritmo para la resolución del flujo incompresible tridimensional acoplado a un esquema bidimensional para la resolución del transporte en la superficie libre.

En el presente artículo se presenta un método estabilizado basado en el método de los elementos finitos que pretende solventar cada uno de los problemas anteriores. La metodología se basa en la modificación de las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos que gobiernan el flujo viscoso incompresible y el movimiento de la superficie libre, mediante la aplicación del método de Cálculo Finitesimal (CF) [11][12][13][14].

En el presente caso las ecuaciones modificadas son resueltas usando un esquema de pasos fraccionados semi-implícito y el método de los elementos finitos (FEM). Los efectos de la superficie libre, tras calcular su última posición, son tenidos en cuenta de manera simplificada mediante la imposición de una presión sobre la misma, obtenida de la denominada ecuación dinámica de superficie libre.

El mencionado esquema se ha plasmado en el código CFD SHYNE [15] que ha sido aplicado con éxito en el análisis de geometrías de diversos tipos de buques [16]. A lo largo del presente trabajo se presentarán diversos ejemplos de aplicación de SHYNE al diseño de embarcaciones de recreo en un rango muy amplio de números de Froude.

2.- Fundamentos teóricos del código cfd

2.1. Formulación estabilizada de las ecuaciones de dinámica de fluidos con superficie libre

Consideraremos el movimiento de un fluido incompresible viscoso y turbulento alrededor de un cuerpo. Este movimiento es descrito por las ecuaciones de *Navier Stokes*, que son el resultado de la aplicación de las leyes clásicas de conservación de cantidad de movimiento y de masa sobre un dominio de control infinitesimal. Estas ecuaciones se presentan a continuación,

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \\ r_d &= \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

Donde u_i es la i -ésima componente del campo de velocidades del fluido, p es la presión dinámica (que incluye los términos hidrostáticos), τ_{ij} es la parte desviadora del tensor de tensiones del fluido y ρ la densidad (constante) del fluido. Ω es el dominio fluido considerado, descrito por la función vectorial de la posición x_i .

Como es conocido, la integración de las anteriores ecuaciones presenta diversos problemas, asociados al importante carácter no lineal de las mismas. En los últimos años ha existido una intensa búsqueda de la solución a los mencionados problemas. Desde el uso de interpolaciones mixtas de velocidad-presión que cumplieran con la denominada condición *BB*, junto al uso de metodologías tipo *upwind*, hasta la estrategia más reciente basada en la técnica de *Galerkin Least Squares* que permite utilizar interpolación de igual orden para la velocidad y la presión.

Del mismo modo, otros métodos como *Characteristic Galerkin*, *Variational Multiscale* o *Residual Free Bubbles* permiten corregir total o parcialmente los problemas de inestabilidad que plantea la resolución de las ecuaciones de *Navier Stokes* [14].

Los mencionados métodos, aún habiendo recibido un importante respaldo matemático y práctico, no cuentan con la suficiente base física

tras ellos. En este trabajo se presenta una metodología apoyada en un enfoque mucho más físico y simple, basada en la técnica de Cálculo Finitesimal (CF) [17][18][19][20].

Esta técnica parte de la aplicación de las leyes clásicas de conservación sobre un dominio de control con dimensiones finitas, representando la variación de las cantidades involucradas mediante una expansión en serie de Taylor de mayor orden. La aplicación de esta técnica permite obtener una forma estabilizada, de las ecuaciones de Navier Stokes, como

$$\begin{aligned} r_i - \frac{1}{2} h_{mi} \nabla r_i - \frac{\delta}{2} \frac{\partial r_i}{\partial t} &= 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \\ r_d - \frac{1}{2} h_d \nabla r_d &= 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

Los parámetros h_{mi} y h_d son las denominadas longitudes características. Estas cantidades tienen un cierto carácter geométrico y están relacionadas con las dimensiones de los dominios finitos donde se imponen los balances de cantidad de movimiento y de masa. Del mismo modo d es el tiempo característico relacionado con el paso de tiempo de integración que se utilice.

Es interesante hacer notar que para h_{mi} y $h_d \rightarrow 0$ se recupera la forma original de las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento y de masa.

Por otra parte, el método aplicado para derivar las ecuaciones (2) es absolutamente general y permite, por consideraciones similares, derivar una nueva forma de la ecuación cinemática de superficie libre, como

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} - \mathbf{u} \nabla \beta + \frac{1}{2} h_\beta \nabla (\mathbf{u} \nabla \beta) = 0 \quad (3)$$

La anterior (3) es la forma estabilizada de la ecuación cinemática de superficie libre, que construye el movimiento de las partículas a una superficie fluida de posición a priori desconocida. Del mismo modo que anteriormente, el parámetro h_β es la longitud característica del problema de superficie libre y está relacionada con las dimensiones del dominio finito alrededor de un punto donde se impone que la partícula fluida permanezca en la superficie de corriente.

La ecuación (3) se relaciona con el problema fluido (2) mediante la ecuación dinámica de superficie libre que expresa la continuidad de esfuerzos a través de esta superficie. Esta ecuación, si se desprecian las componentes en dirección tangente a la superficie libre, puede expresarse como

$$\mathbf{p} = \tau_{33} + \frac{\gamma}{r} \quad (4)$$

Donde p es la presión absoluta en la superficie, g es la tensión superficial y r el radio de curvatura medio de la superficie libre.

Las ecuaciones (2) y (3) se completan con el juego de condiciones de contorno e iniciales clásicas en este tipo de problemas.

A partir de las ecuaciones de Navier Stokes (2) presentadas anteriormente, es simple derivar las denominadas ecuaciones de Reynolds, que rigen el comportamiento de un fluido en régimen turbulento, ya que esto sólo implica la modificación de las tensiones del fluido mediante la adición del denominado tensor de Reynolds. Si suponemos que el fluido es newtoniano y hacemos la suposición habitual de que las tensiones turbulentas son proporcionales al gradiente de las velocidades (hipótesis de Boussinesq) obtenemos [10],

$$r_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) - 2(\nu + \nu_T) \frac{\partial \varepsilon_{ji}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido, ν_T es la denominada viscosidad turbulenta y ε es el gradiente simétrico de la velocidad dado por

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

La discusión que se presenta a continuación es igualmente aplicable a la ecuación de balance de cantidad de movimiento de Reynolds anterior.

2.2 El Método de pasos fraccionados estabilizado

La ecuación de balance de cantidad de movimiento estabilizada puede discretizarse en el tiempo como

$$\begin{aligned} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j)^n - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ji}^n}{\partial x_j} + \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - \frac{1}{2} h_{mi}^n \nabla r_i^n - \frac{\delta}{2} \frac{\partial r_i^n}{\partial t} &= 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

Un algoritmo de pasos fraccionados puede obtenerse simplemente, fraccionando la ecuación anterior como sigue

$$u_i^* = u_i^n + \Delta t \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} - \frac{1}{2} h_{mi} \nabla r_i - \frac{\delta}{2} \frac{\partial r_i}{\partial t} \right] \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \quad (6)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^* - \Delta t \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \text{en } \Omega \quad (7)$$

Se debe señalar que la suma de las ecuaciones (6) y (7) anteriores da como resultado la ecuación estabilizada de balance de cantidad de movimiento original (5).

Si se substituye la ecuación (7) en la ecuación de balance de masa, se puede obtener tras algunas simples manipulaciones.

$$\begin{aligned} (\Delta t + \tau_d) \frac{\partial^2 p^n}{\partial x_i^2} &= \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} - \tau_d \frac{\partial g_i^n}{\partial x_i} \\ g_i^n &= \rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial \tau_{ji}^n}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde $\tau_d = -2u h_d$.

El método de pasos fraccionados típico desprecia la contribución de los términos que son afectados por el factor τ_d en la ecuación (8). Se puede comprobar que estos términos introducen un efecto de estabilización adicional que mejora la solución numérica cuando los valores de Δt son pequeños.

Del mismo modo, la ecuación de superficie libre (3) puede discretizarse en el tiempo para dar

$$\beta^{n+1} = \beta^n - \Delta t \left[\mathbf{u} \nabla \beta - \frac{1}{2} h_\beta \nabla (\mathbf{u} \nabla \beta) + u_3 \right] \quad \text{en } \Gamma_{FS} \quad (9)$$

A continuación se presenta un esquema de solución del problema para un incremento de tiempo. Este incluye los siguientes pasos [21][22].

1. Resolver explícitamente las velocidades fraccionarias u_i^* ; usando la ecuación (6).
2. Calcular el campo de presiones p^n resolviendo la ecuación (8). Sobre la superficie libre calculada en el paso de tiempo anterior, mediante 4, se impondrá una presión dada por la ecuación (4). Para ello es necesario que la malla volumétrica se adapte a la posición de la nueva superficie libre. Esta actualización de la malla puede ser llevada a cabo mediante el algoritmo presentado en [10]. Sin embargo, para los ejemplos incluidos en este trabajo, se ha despreciado el movimiento de la superficie libre, imponiendo sobre la superficie original la presión dinámica que se obtiene directamente de la (4) como

$$p = \frac{1}{\rho} \left[\tau_{33} + \frac{\gamma}{r} \right] - g\beta$$

3. Calcular el campo de velocidades u_i^{n+1} mediante la proyección de la velocidad fraccionaria (7).
4. Resolver para el campo de velocidades u_i^n la posición actualizada de la superficie libre β^{n+1} usando la ecuación (9).

La precisión de las ecuaciones presentadas depende del tamaño del incremento de tiempo que debe satisfacer en todo caso los criterios de estabilidad de la solución acoplada.

Las ecuaciones (6-9) se discretizan en el espacio por medio de una formulación de elementos finitos (EF) de Galerkin, utilizando elementos tetraédricos con aproximación lineal para velocidades, presión y elevación de la superficie libre. Los detalles de la formulación EF del algoritmo presentado, así como de su aplicación a diferentes problemas prácticos pueden encontrarse en [10][16].

3.- Ejemplos de aplicación

De los estudios realizados con el Sistema de Análisis Hidrodinámico SHYNE, sobre el tipo de embarcaciones que nos ocupa, se van a destacar tres casos que por sus características resultan de especial interés.

El primero es un Catamarán de Vela para uso turístico. La peculiaridad de la predicción de su comportamiento hidrodinámico resulta de la interacción de los dos cascos de dicho catamarán. Si ya resulta importante conocer dicha interacción en un catamarán que navega sin deriva, mucho mayor resulta dicho conocimiento cuando el catamarán navega con deriva como es caso de los catamaranes a vela.

El segundo es un Crucero de Vela de competición. En este caso el gran interés se basará en conocer, por su puesto la resistencia al avance y la sustentación que aportan tanto el casco como la quilla y el timón como se verá en el caso del catamarán, pero sobre todo poder observar las líneas de corriente en las puntas de quilla y timón, y sus interacciones con el casco.

Y el último caso es uno totalmente distinto a los anteriores pero fundamental en el campo de las embarcaciones de recreo, este es una embarcación de planeo. La peculiaridad de esta embarcación es su alto número de Froude. En este caso se contrastarán los resultados obtenidos mediante SHYNE para el estudio de esta embarcación de planeo con los resultados de canal.

3.1. Catamarán turístico 79' de vela

El Catamarán turístico 79' de vela es un catamarán a vela diseñado como plataforma de ocio para el transporte de pasajeros en navegación a vela, contando con propulsión auxiliar suficiente, tanto para entrada y salida de puerto, como para navegación normal.

El fin de esta embarcación son las salidas cortas diurnas o nocturnas locales para paseos breves, para lo cual se provee una habilitación mínima para el número de pasajeros abordo. A la vez que, en el fondo de ambos cascos, se dispone de unos puestos para la observación del fondo marino. La maniobra es sencilla, orientada a facilitar el manejo y el control de la embarcación mediante una tripulación reducida, con total seguridad en todas las situaciones de navegación.

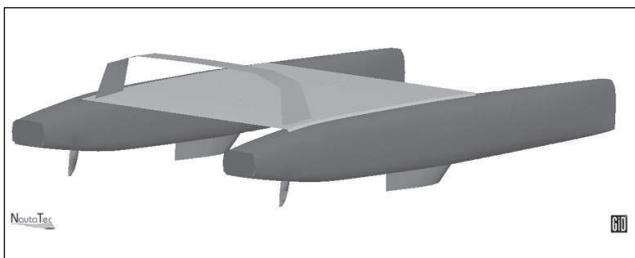


Figura 1

Sus características principales son las siguientes:

Eslora total	23,950 m
Eslora entre perpendiculares	23,350 m
Manga máxima total	11,750 m
Manga máxima de cada casco	1,650 m
Calado de cascos con apéndices	1,310 m
Puntal de cascos	2,401 m
Desplazamiento	26.730 kg
Area vélica máxima en ceñida	222 m ²
Pasajeros	120

En el estudio hidrodinámico de esta embarcación se contemplaron diversos aspectos que podían tener mucha importancia en su optimización y que en una primera fase eran desconocidos.

Para este estudio se partió de una geometría de cascos única y sobradamente contrastada, siendo el principal aspecto a estudiar la distancia entre los cascos y su influencia tanto en la resistencia al avance como en la sustentación lateral. Las tres alternativas estudiadas fueron:

Distancia entre crujía de casco	10,100 m
Distancia entre crujía de cascos	9,100 m
Distancia entre crujía de cascos	8,100 m

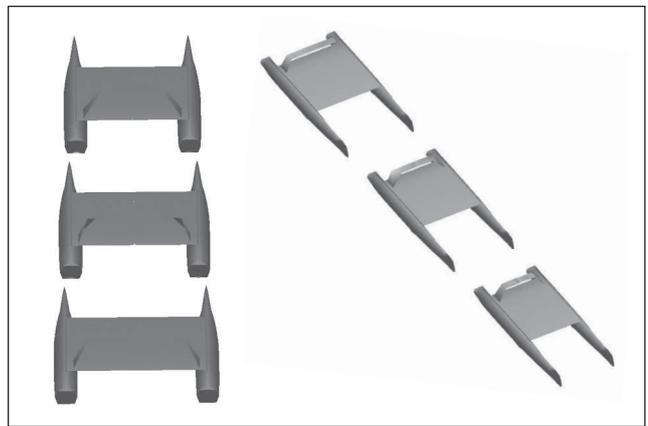


Figura 2(a) y 2(b)

El estudio incluirá un rango de velocidades que van desde 8 nudos hasta los 28 nudos, siendo el rango de trabajo real de 8 nudos a 16 nudos. Además, aparte de embarcación sin deriva o deriva igual a 0°, se estudiarán varias derivas como son 1°, 2,5° y 5°; aunque el rango de trabajo oscila de 0° a 2,5° se quiso comprobar cuales eran los resultados a grandes derivas. Otros aspectos que se estudiaron fueron la contribución de cada uno de los elementos que componen el casco en la resistencia de presión, resistencia viscosa y sustentación lateral.

Aparte del aspecto hidrodinámico, a la hora de la selección final, se tuvieron en cuenta otros parámetros importantes como son el coste de construcción, número de pasajeros, etc.; pero que finalmente llevaron a hacer coincidir con la solución hidrodinámica más óptima.

3.2. Crucero de vela IMS 40'

El Crucero de vela IMS 40' es una embarcación a vela diseñada para la competición IMS enmarcada dentro de la clase crucero-regata o clase B. Aun cumpliendo la reglamentación en cuanto a habitabilidad para esta clase, el Crucero de vela IMS 40' está orientado a la alta competición puesto que en su diseño se han estudiado tanto los aspectos hidrodinámicos como los estructurales, de cara a obtener una embarcación eficiente y robusta.

Tanto su tamaño como el tipo de barco lo sitúan en un segmento especialmente adecuado para las regatas de alta competición para contar con buenas posibilidades dentro de la clasificación general. Su habilitación interior es sencilla pero permite un nivel de confort adecuado para una tripulación de 6 personas en regatas oceánicas.



Figura 3

Sus características principales son las siguientes:

Eslora total	12,100 m
Eslora entre perpendiculares	10,598 m
Manga máxima	3,650 m
Calado medio	2,550 m
Puntal	3,900 m
Desplazamiento a plena carga	6.450 kg
Area vélica	93 m ²

En el estudio de esta embarcación aparte de poder obtener las curvas de resistencia al avance y sustentación lateral para diferentes velocidades, escoras y derivas, que conforman toda la matriz de cálculo; se estudiará mediante la observación de las líneas de corriente, los acuerdos de casco-quilla y casco-timón así como el desprendimiento en la punta del timón y de la quilla.

3.3 Embarcación de planeo 15m

La Embarcación de planeo 15m utilizada para este estudio fue una de las embarcaciones utilizadas para validación del código CFD SHYNE en *Flash Esprit Project* [23] de la UE. Esta embarcación es una lancha de vigilancia de alta velocidad con altas prestaciones en mares desarrollados.

Aunque el objetivo de esta embarcación es la vigilancia costera, se ha incluido en este trabajo porque sus formas son asimilables a embarcaciones similares con objeto de recreo. Por el cometido de la embarcación deberá tener una autonomía cercana a las 400 millas, a la vez que debe de ser capaz de desarrollar altas velocidades cercanas a los 40 nudos durante la interceptación. Su estructura es muy robusta con el fin de poder soportar las fuertes cargas de impacto local a las que se ve sometido por la alta velocidad o las grandes olas.

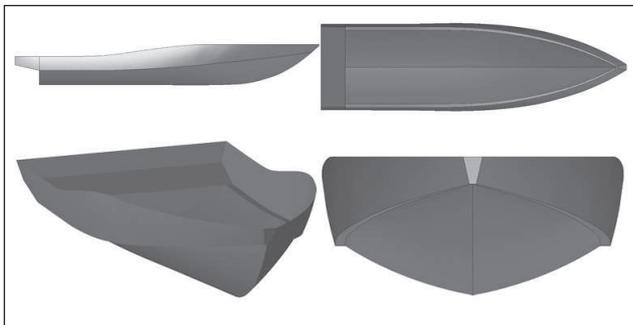


Figura 4

Sus características principales son las siguientes:

Eslora total	15,200 m
Eslora entre perpendiculares	12,161 m
Manga máxima total	4,280 m
Manga máxima en flotación	3,539 m
Calado	0,657 m
Coefficiente de bloque	0,431
L/B	3,436
B/T	5,387

El estudio sobre esta embarcación, que se presenta aquí, consiste en la validación de los datos de canal. La embarcación fue ensayada en el BEC, París. Las velocidades de ensayo fueron desde los 15 nudos a los 40 nudos. La validación se realizará por comprobación directa de los datos extrapolados de canal contra los datos obtenidos directamente a escala real del estudio mediante SHYNE. Estos valores se representarán en coeficientes de manera que se pueda observar con detalle las pequeñas diferencias.

También se realizará un pequeño estudio con el fin de ver como son las líneas de corriente en el fondo del casco, de manera que la orientación de los *water-jets* sea lo más óptima a fin de perder la menor energía del agua entrante.

La dificultad de este estudio estriba en que cualquier otro código CFD fracasa en números de *Froude* superiores a 0,35. En nuestro estudio se contemplan números de *Froude* de 0,7 a 1,9. Aparte de esto podremos ver que incluso en la zona de preplaneo, que es muy complicada de predecir por cualquier otro método, se obtienen con SHYNE buenos resultados.

4.- Definición del problema geométrico

Para la definición mediante SHYNE tanto de las geometrías, como de las condiciones de contorno que se imponen a las superficies del casco y las propiedades que definen al fluido, se han tenido en cuenta todos los estudios que durante varios años se llevan desarrollando mediante SHYNE para obtener los resultados más reales.

De este modo el fluido se representa mediante una malla volumétrica, incluida dentro de una caja que simularía un canal clásico. Las dimensiones de esta simulación de canal a gran escala dependen del número de *Froude* y de las dimensiones del barco. La superficie del mar se representa mediante la condición de superficie libre (9) acoplada con la resolución del fluido mediante (4). El fluido tiene viscosidad de 1-3 kg/ms y una densidad de 1.024 kg/m³, siendo la gravedad igual a 9,81 m/s². El modelo de turbulencia utilizado para la resolución de las ecuaciones de Reynolds es de Smagorinsky [10]. Las paredes laterales, fondo y final tienen una condición de absorción de energía de tal manera que simulan un mar infinito, en el caso de que se quisiese simular un mar con fondo restringido bastaría con modificar dicha condición. Mientras que en la pared del frente de agua se le impone que la velocidad siempre se fija y a la que se ensaya. La definición de todo este dominio volumétrico de integración se ha realizado de acuerdo con los usos habituales en los códigos CFD internacionalmente aceptados.

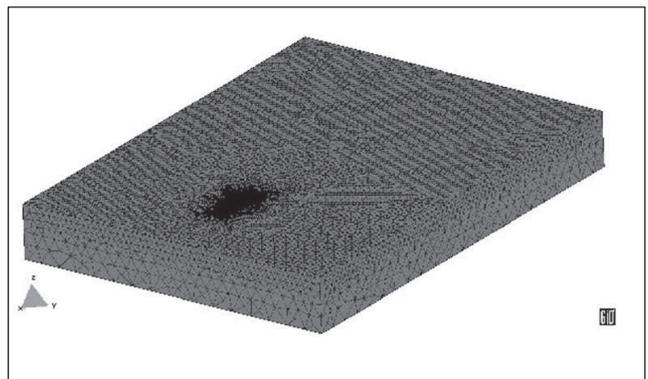


Figura 5

En la superficie del casco se simula una ley de pared, en este caso se ha utilizado la ley de pared extendida de *Reichardt* [10]. Esta condición permite el deslizamiento del fluido sobre el casco, y así la ola propia puede desplazarse teniendo en cuenta la superficie del casco y todas las demás condiciones impuestas a esta.

En las tres siguientes figuras se pueden observar las mallas de las superficies del casco de las tres embarcaciones a analizar:

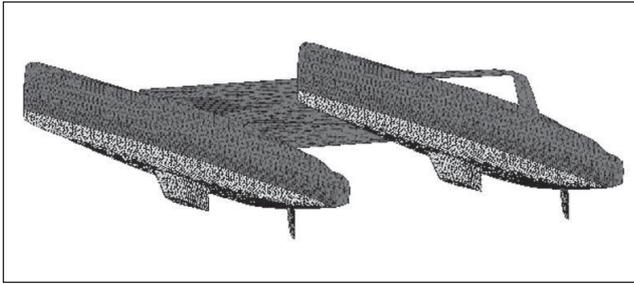


Figura 6

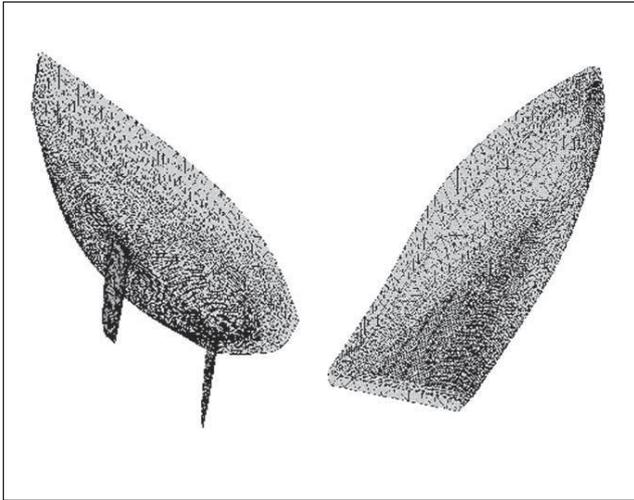


Figura 7

Tanto la generación de las mallas, introducción de datos y tratamiento de los resultados, han sido realizados mediante el módulo de pre y post-procesamiento GiD, incluido en el sistema SHYNE.

5.- Resultados

5.1. Resultados del Catamarán turístico 79' de vela

Debido a que el objetivo de nuestro estudio consistía en encontrar la distancia más óptima entre los cascos se realizó una matriz de estudio de distancias entre casco y derivas. Para ello los barcos ensayados se denominaron con las siguientes siglas:

"79cata5_0" embarcación con la distancia entre crujía de cascos	10,100 m
"79cata4_5" embarcación con la distancia entre crujía de cascos	9,100 m
"79cata4_0" embarcación con la distancia entre crujía de cascos	8,100 m

En los siguientes gráficos se puede observar los resultados de las resistencias de cada embarcación a cada una de las derivas estudiadas:

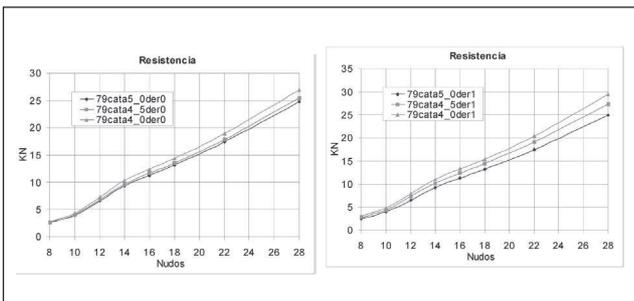


Figura 8(a) y 8(b)

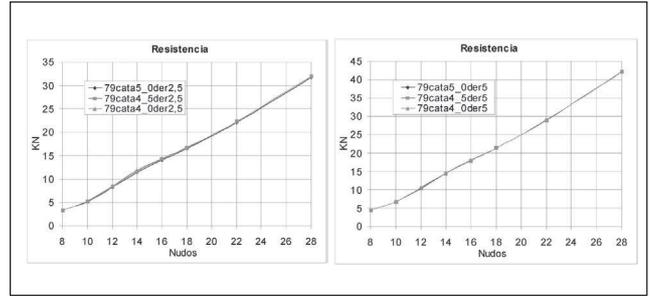


Figura 9(a) y 9(b)

Se observa que según se va incrementado la deriva, la separación de los cascos no tiene casi influencia en la resistencia. Aunque el dato importante a destacar es que en las derivas de funcionamiento, en el entorno de 1°, la embarcación 79cata5_0 tiene menos resistencia.

A modo de ejemplo en los dos siguientes gráficos se puede observar las curvas de resistencia y sustentación lateral para la embarcación 79cata4_5, donde la resistencia y la sustentación aumentan con la deriva, como es lógico.

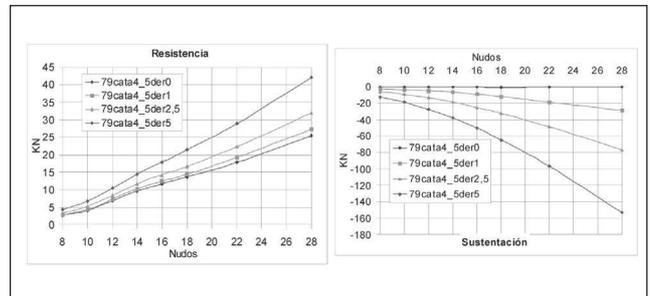


Figura 10(a) y 10(b)

También a modo de ejemplo podemos ver cuál es la contribución de cada uno de los elementos que componen la embarcación: casco, quilla y timón. Los valores que se representarán son: F_x término de la resistencia resultante de la integración de las fuerzas de presión, $V F_x$ término de la resistencia resultante de la integración de las tensiones tangenciales del fluido sobre el casco.

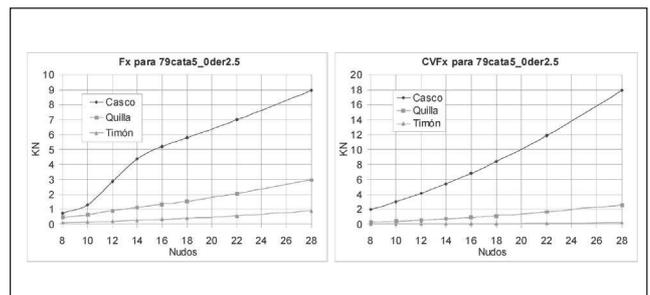


Figura 11(a) y 11(b)

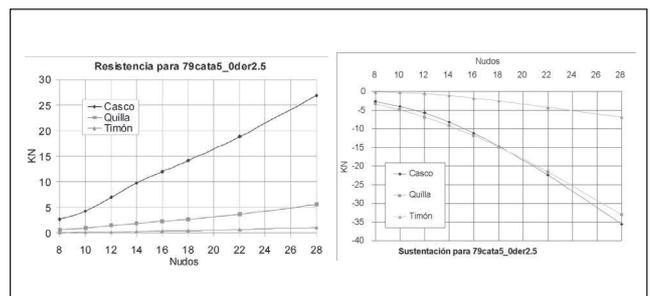


Figura 12(a) y 12(b)

Una de las cosas que se puede observar es como son los mapas de alturas de olas a cada una de las velocidades y derivas, en este caso se mostrarán los casos de 79cata4_5 a unas velocidades de 8 y 28 nudos, a 0° de deriva y 5° de deriva. Por último se mostrará la malla deformada.

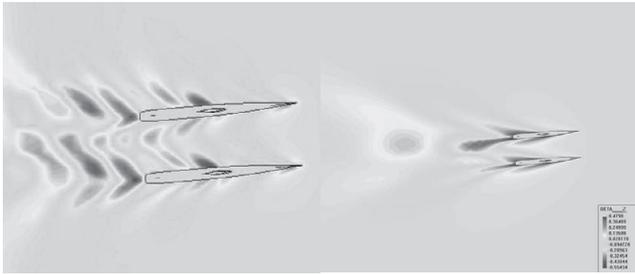


Figura 13(a) y 13(b)

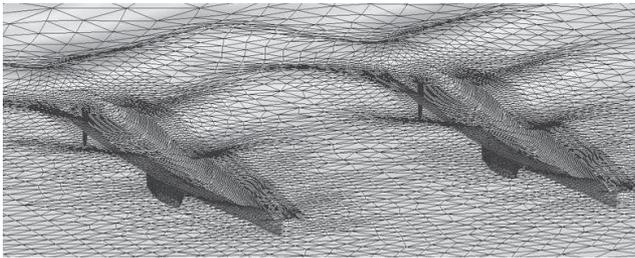


Figura 14

5.2. Resultados del Crucero de vela IMS 40'

Una de las mayores utilidades que nos proporciona el código SHYNE es la de poder realizar estudios locales como el que se presenta a continuación: el diseño del acuerdo entre el casco y la quilla de esta embarcación mediante el análisis de los resultados de SHYNE.

A continuación se van a mostrar los resultados comparativos de los análisis de una quilla sin acuerdo y con acuerdo, como las que se muestran en la siguiente imagen:

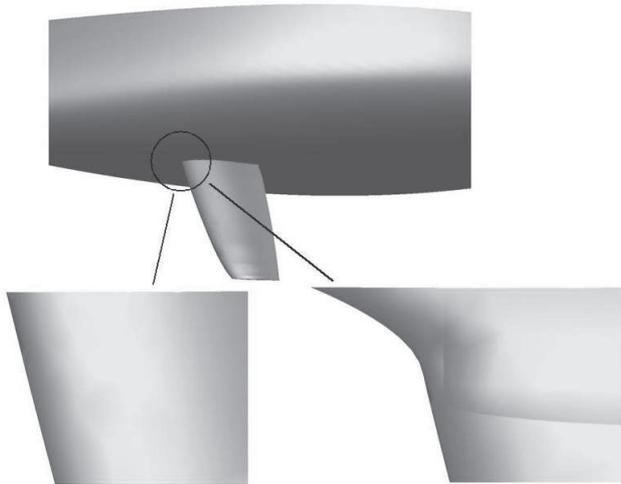


Figura 15

Los resultados en los que se basa el análisis llevado a cabo corresponden a una situación normal de navegación para esta embarcación a vela, definida por una velocidad de 8 nudos, una escora de 25° y una deriva de 3°. A continuación se muestra un mapa de altura de olas, correspondiente al mencionado análisis, que permite observar el efecto de la escora y la deriva. También se incluyen unas imágenes de un trazado de líneas de corriente, tanto en una vista perpendicular a la superficie del agua como desde proa, que dan idea de cómo llegan las partículas de agua al casco.



Figura 16

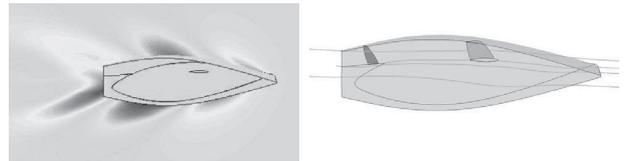


Figura 17 (a) y 17(b)

A continuación, en la imagen de la derecha, se muestra un trazado de las líneas de corriente para el caso de quilla sin acuerdo y a la de la izquierda las líneas de corriente para la misma quilla pero con acuerdo tanto lateral como frontal. Se observa como en el caso de quilla con acuerdo las líneas de corriente se separan antes del casco, lo cual provoca que las curvaturas de las líneas de corriente sean menores, lo que justifica que en este caso se reduzca la resistencia.

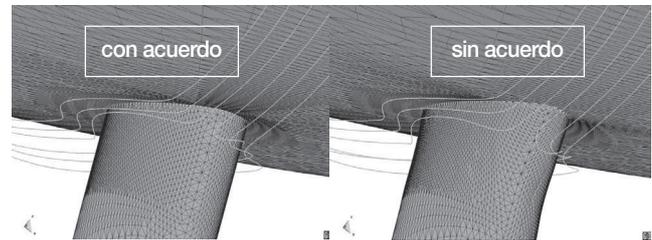


Figura 18(a) y 18(b)

La anterior aseveración se ve contrastada por los resultados de los mapas de presiones. En estos, la quilla sin acuerdo muestra un mayor gradiente de presiones entre el casco y la quilla en su parte de proa.

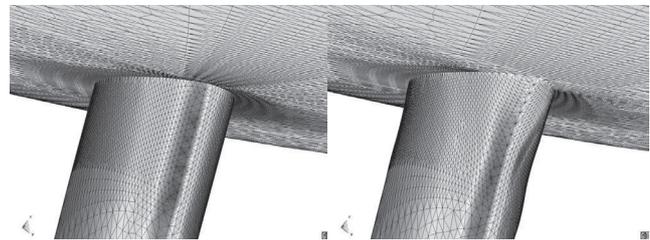


Figura 19(a) y 19(b)

En esta otra vista de costado de los mapas de presión se observa el menor gradiente longitudinal de presiones en la unión de quilla a casco sobre la quilla con acuerdo, lo que implica una menor resistencia al disminuir el desprendimiento del fluido que circunda el casco, como anteriormente se ha señalado.

Otro tipo de observaciones que se puede realizar mediante el Sistema de Análisis Hidrodinámico SHYNE, es el análisis de la magnitud de la turbulencia creada por la quilla o el timón. Estas observaciones se pue-

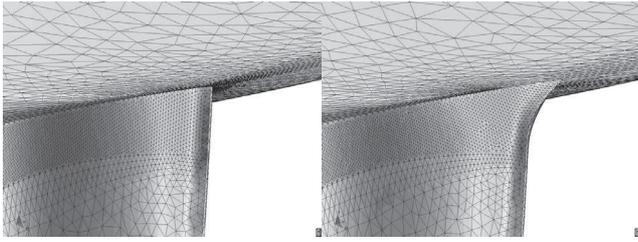


Figura 20(a) y 20(b)

den realizar, o bien directamente, gracias a los valores de los esfuerzos de Reynolds, o indirectamente mediante comparación de los mapas de las tres componentes de la velocidad, y en concreto las componentes "OZ" y "OY", en planos posteriores a quilla o timón en cada caso. En la siguiente imagen se puede observar la velocidad según "OZ" en un plano posterior a la quilla, el fuerte cambio de sentido de la componente según "OZ" denota la aparición de turbulencia lo que puede redundar en un aumento de la resistencia.

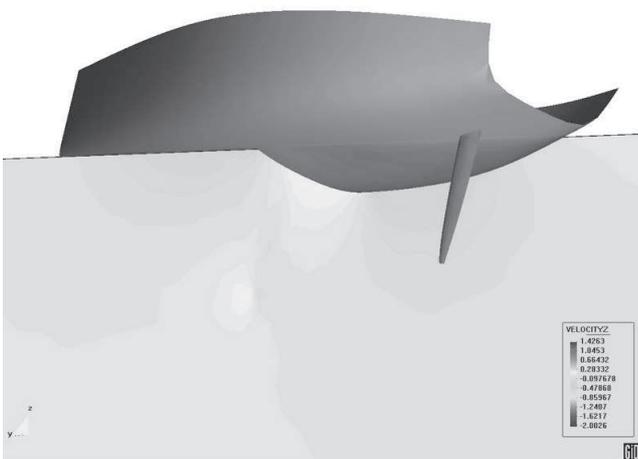


Figura 21

Aunque todos estos estudios son de gran ayuda a la hora de conocer el problema con el que nos enfrentamos, no debemos olvidar que sigue siendo los valores de las fuerzas de resistencia y sustentación quienes al final nos darán un valor absoluto mucho más objetivo del estudio que estemos realizando.

5.3. Resultados de la Embarcación de planeo 15m

Como se ha descrito anteriormente, en estudio se realizará una validación del código según los datos del informe *SP TECHNOLOGIES Planning Craft Model Test Results. Flash Esprit Project* [23].

Los valores que se presentan están adimensionalizados utilizando el método recomendado por la ITTC'57, que en este tipo de barcos es el más adecuado. El Coeficiente de Resistencia Total CT resulta de la suma de dos términos uno el Coeficiente de Resistencia de Fricción CV y otro el Coeficiente de Resistencia Residual CR.

El Coeficiente de Resistencia de Fricción se obtiene como:

$$CV = 0.075 / (\log(Re))^{-2}$$

donde Re es el número de Reynolds del ensayo.

El Coeficiente de Resistencia Residual se obtiene a escala de modelo como diferencia del Coeficiente de Resistencia Total del modelo, obtenido del ensayo, y el Coeficiente de Resistencia de Fricción del modelo.

$$CR = CT_m - CV_m$$

En la siguiente gráfica se puede observar la validación del código mediante la comparación de la curva extrapolada de canal y la obtenida por simulación directa mediante SHYNE.

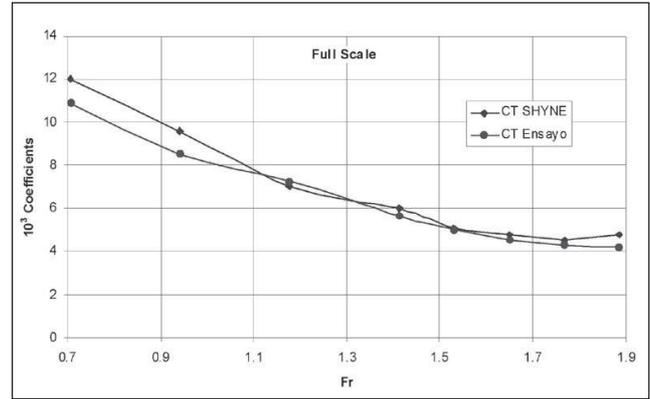


Figura 22

Y en la siguiente gráfica se pueden ver los coeficientes desglosados. Esta los valores CFx SHYNE es el término de presión resultante de la integración de todas las fuerzas de presión y el CVFx SHYNE es el término viscoso resultante de la integración de todas las fuerzas viscosas sobre los cuerpos sumergidos.

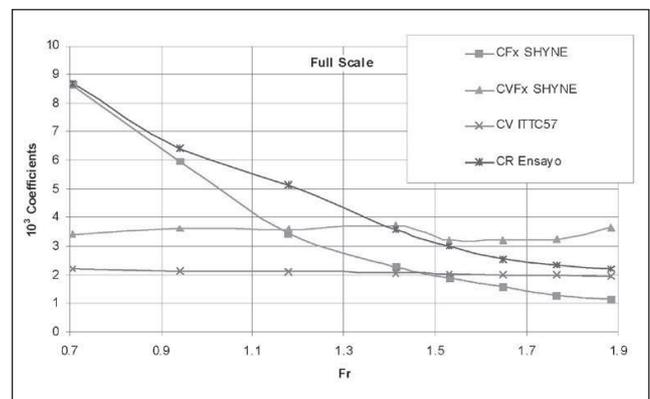


Figura 23

En la siguiente imagen se puede ver el mapa de la altura de olas:

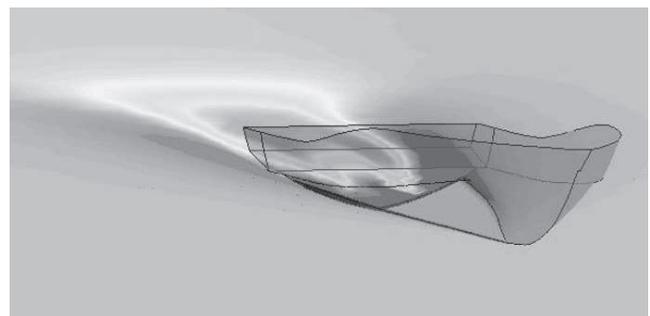


Figura 24

La otra parte de este estudio consistió en poder observar las líneas de corriente en fondo del casco. El trazado de las mismas se presenta a continuación.

Se comprueba la divergencia existente en las líneas de corriente en el fondo del casco pudiendo medir el ángulo de dichas líneas y con ello orientar los propulsores en la orientación más adecuada con el fin de aprovechar al máximo la energía del agua entrante [24].

6.- Conclusiones

De los trabajos realizados por Nautatec, con el fin de tener un mejor conocimiento del comportamiento hidrodinámico de las tres embarcaciones detalladas anteriormente, mediante el uso del Sistema de Análisis

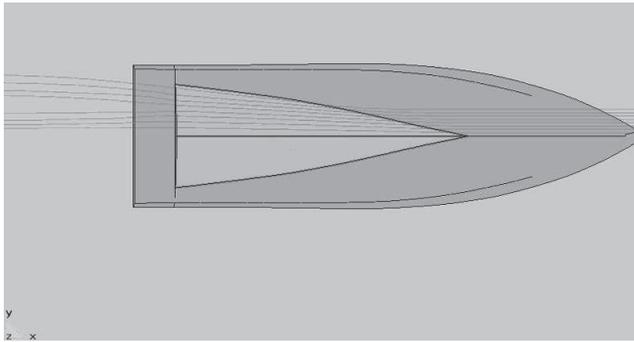


Figura 25

Hidrodinámico SHYNE desarrollado por CIMNE se puede obtener las siguientes conclusiones:

- El uso de un código CFD, y en concreto de SHYNE, en el campo de la ingeniería naval dedicada a las embarcaciones de recreo y turísticas, queda sobradamente justificada tanto por la calidad y cantidad diversa de resultados que se pueden obtener, como por el bajo coste que representa.
- Los resultados de resistencia al avance, obtenidos mediante el código SHYNE según las condiciones de contorno detalladas anteriormente, de la embarcación de planeo 15 m muestran un alto ajuste con los resultados de ensayo de canal incluso a números de *Froude* cercanos a 1.9. Teniendo los componentes en los que se divide la resistencia, es decir resistencia residual y resistencia viscosa, un buen ajuste con las fuerzas F_x y $V F_x$ obtenidas directamente de SHYNE, si bien las mencionadas componentes no son totalmente comparables [10][25][26].
- La validación altamente positiva de los resultados de canal mediante SHYNE para una embarcación con números de *Froude* superiores a 1 es un hecho necesario de destacar, puesto que no se conocen referencias de códigos CFD que hayan logrado este hecho.
- La optimización del comportamiento hidrodinámico de un Catamarán turístico 79' de vela ha sido totalmente posible mediante la utilización del código SHYNE. Los resultados obtenidos de la resistencia al avance y de sustentación lateral sirvieron para un mayor conocimiento de dicha embarcación. Aun más el hecho de poder conocer la contribución, de cada uno de los componentes de dicha embarcación, tanto en la resistencia como en la sustentación lateral.
- La separación de los cascos del Catamarán turístico 79', después del estudio realizado, fue fijada en 10,100 metros, aparte de otras consideraciones. El puntal de las quillas pudo ser reducido debido que una gran parte de la sustentación lateral es producida por los cascos, lo cual fue beneficioso en la operatividad del barco pudiendo abarcar otra serie de propósitos turísticos como los de visión submarina.
- Los estudios de zonas locales de la embarcación con el código SHYNE, mediante la observación de las líneas de corriente y los campos de presión, permiten una mejor comprensión del problema a resolver, a la vez que realizar la optimización deseada.

7.- Referencias

- 1] Larsson, L. and Eliasson, R. E., *Principles of Yacht Design*. International Marine. Camden, Maine (1994).
- 2] Gutelle, P., *Design of Sailing Yachts*. Warsah Publising, Southampton (1994).
- 3] J.M. Michell. The wave resistance of ships. *Philos. Mag.* 45:106-123, 1898.
- 4] J. García, A. Souto y L. Pérez. Sobre los CFD. Una herramienta de diseño en buques de crucero y pasaje. XXXIV SSTT de Ingeniería Naval (AINE) 1998.
- 5] C.W. Dawson. A practical computer method for solving ship wave problems. In 2nd. Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, pages 30-38. Berkeley USA, 1997.
- 6] J. Hess y A. Smith. Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary tridimensional bodies. *Jnl. Ship Research*, 1964.
- 7] H.C. Raven. A solution method for the nonlinear ship wave resistance problem. PHD Thesis, Technische Universiteit Delft, 1996.
- 8] B. Rosen. SPLASH Manual, the world's leading free-surface flow simulations. South Bay Simulations, 1995.
- 9] L.Larsson, B. Regnström, L. Broberg, D.Q. Li y C.E. Janson. Failures, Fantasies and Feats in the theoretical / numerical prediction of ship performance. In 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998.
- 10] J. García. Un Método Estabilizado para Análisis Hidrodinámico de Estructuras Navales. PHD Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.
- 11] E. Oñate, *Derivation of stabilized equations for advective-diffusive transport and fluid flow problems*, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 151, 1-2, pp. 233-267 (1998).
- 12] E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *Computation of the stabilization parameter for the finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 25, pp. 1385-1407 (1997).
- 13] E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *An alpha adaptive approach for stabilized finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, *New Adv. In adaptive Comp. Met. In Mech.*, P. Ladeveze and J.T. Oden (Eds.), Elsevier (1998).
- 14] E. Oñate, *A finite element method for incompressible viscous flows using a finite increment calculus formulation*, *Research Report N. 150, CIMNE, Barcelona* (1998).
- 15] J. García, G. Denzel y J. Royo. SHYNE Manual. Disponible en www.cimne.upc.es/shyne. Barcelona 1999.
- 16] J. García, E. Oñate, H. Sierra, C. Sacco y S. Idelsohn. A stabilised numerical method for analysis of ship hydrodynamics. ECCOMAS 98 (Vol. II). Atenas 1998.
- 17] E. Oñate, *Derivation of stabilized equations for advective-diffusive transport and fluid flow problems*, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 151, 1-2, pp. 233-267 (1998).
- 18] E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *Computation of the stabilization parameter for the finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 25, pp. 1385-1407 (1997).
- 19] E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *An alpha adaptive approach for stabilized finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, *New Adv. In adaptive Comp. Met. In Mech.*, P. Ladeveze and J.T. Oden (Eds.), Elsevier (1998).
- 20] E. Oñate, *A finite element method for incompressible viscous flows using a finite increment calculus formulation*, *Research Report N. 150, CIMNE, Barcelona* (1998).
- 21] Oñate, E. and García, J., *A stabilized finite element method for analysis of fluid structure interaction problems involving free surface waves*, *Proceedings of Fluid Structure Interaction Conference, Trondheim* (1999).
- 22] Zienkiewicz O.C., Morgan, K., Satya, B.V.K., Codina, R. and Vázquez, M., *A general algorithm for compressible and incompressible flow. Part II, Tests on the explicit form*, *Int. Journ. Num. Meth. Fluids.*, 20, 887-913 (1995)
- 23] Steivenard, P. Galtier, B. and Thiery, G., *SP TECHNOLOGIES Planning Craft Model Test Results*. Flash Esprit Project. BEC Paris (1999).
- 24] Reed, A., Telste, J. and Scragg, C., *Analysis of Transom Stern Flows*. 18Th Symposium Naval Hydrodynamics (1990).
- 25] P. Ward Brown., *An experimental and theoretical study of Planning Surfaces with trim flaps*. Davidson Laboratory. Report SIT-DL-71-1463. April (1971).
- 26] Clement, Eugene P. and Blount, Donald L., *Resistance Test of a Systematic Series of Planning Hull Forms*. SNAME.