

## APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS CFD AL DISEÑO HIDRODINÁMICO DE UN VELERO TIPO COPA AMÉRICA

Gloria Vicente <sup>\*</sup>, José Manuel Olalla <sup>†</sup>, y Jorge Ponsín <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Ingeniero Aeronáutico  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)  
Área de Dinámica de Fluidos  
Ctra. Ajalvir, p.k. 4.5, 28850 Torrejón de Ardoz - Madrid  
e-mail:ponsinj@inta.es, vicenteg@inta.es, página web: <http://www.inta.es>

<sup>†</sup>Ingeniero Técnico Aeronáutico  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)  
Área de Dinámica de Fluidos  
Ctra. Ajalvir, p.k. 4.5, 28850 Torrejón de Ardoz - Madrid  
e-mail:olallajm@inta.es, página web: <http://www.inta.es>

**Palabras clave:** CFD. Diseño hidrodinámico.

**Resumen.** *El diseño de un Copa América es un proceso multidisciplinar que involucra expertos en diseño naval, estructuras y dinámica de fluidos. El cometido de estos últimos es diseñar geometrías que reduzcan al máximo la resistencia de la parte sumergida del barco. No olvidemos que hablamos de competiciones en las que aumentar en una décima de nudo la velocidad del barco puede resultar decisivo para el resultado final.*

*En este artículo se pretende demostrar la utilidad de la aplicación de herramientas CFD en las distintas fases del diseño hidrodinámico del barco, comparando en cada caso los resultados obtenidos con datos experimentales.*

## 1 INTRODUCCIÓN

La utilización de herramientas CFD, inicialmente desarrolladas para su uso en aerodinámica de aviones, en el diseño de veleros de competición a partir de 1983, abrió un campo hasta entonces desconocido para mejorar la eficiencia hidrodinámica de las partes sumergidas de este tipo de barcos.

Como no podía ser de otra forma, la Copa América, la competición más importante y más antigua dentro del mundo de la vela, fue la que introdujo este tipo de técnicas en el diseño de sus barcos.

La participación española en la Copa América data de 1992 y desde el primer momento el equipo del Desafío Español trató de utilizar las técnicas más innovadoras en el diseño involucrando a las empresas punteras de nuestro país. El INTA participó en el proyecto desde el principio, inicialmente ensayando las distintas configuraciones de apéndices en el túnel aerodinámico y ya a partir de la edición de 1995 participando, además, activamente en el diseño y análisis de las partes sumergidas.

Para la edición de 1999 se planteó, desde 1996, un proyecto de I+D a gran escala, financiado por la CICYT, en el que participan además del INTA, el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de el PARdo (CEHIPAR), la Universidad Politécnica de Zaragoza (UPZ) y la Oficina Técnica del Copa América Desafío Español 99 (CADE99).



Fig. 1 Vista de la parte sumergida del barco

EL trabajo del INTA en este proyecto es una vez más participar en el diseño de las partes sumergidas del barco utilizando herramientas CFD y su posterior ensayo en túnel aerodinámico. En todo momento el trabajo está coordinado y apoyado por la Oficina Técnica de CADE99.

## 2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS

A diferencia de otros factores que intervienen en las prestaciones de un velero de alta competición (habilidad de la tripulación, etc), la eficiencia hidrodinámica se puede mejorar desde la perspectiva de un análisis ingenieril y más concretamente mediante métodos de simulación de flujo. El objetivo fundamental es minimizar las fuerzas de resistencia que aparecen sobre la parte sumergida. En un caso estacionario, podemos dividir estas fuerzas según su origen en (se incluye porcentaje del total para ceñida a 9 nudos):

- a) Resistencia producida por efectos viscosos ..... 58%
- b) Resistencia de ola ..... 20%
- c) Resistencia inducida ..... 11%
- d) Resistencia añadida por el oleaje..... 11%

Todas estas componentes varían con la velocidad del barco. De alguna manera podemos decir que las reglas de la competición en cuanto que fijan la relación longitud/área de cada clase están determinando los márgenes en que se van a mover estos valores de resistencia. Pero además de esto las fuerzas de resistencia están también determinadas por la variación de las formas del barco. Del diseñador depende identificar la forma óptima para unas condiciones determinadas. El reto en este proceso está en que las características fluidomecánicas responsables de cada fuente de resistencia son interactivas y tienen dependencia mútua. No existe un método capaz de tratar de forma simultánea todo el problema, por lo cual es fundamental la experiencia y la visión global del diseñador.

En cuanto a las herramientas CFD, también es criterio del diseñador seleccionar la más adecuada, en este caso para obtener cada tipo de resistencia de la forma mas económica posible sin pérdida de precisión. Es obvio que las herramientas más sofisticadas deben ser capaces de calcular la resistencia de forma global, pero no es menos cierto, que los tiempos de cálculo que requieren las hacen inviables para evaluar una amplia serie de configuraciones posibles. El criterio seguido en este trabajo ha sido el siguiente:

- Resistencia viscosa de la quilla: (flujo 2D) código potencial con acoplamiento de capa límite 2D. Calculo de Cd 3D integrando el Cd para cada sección.
- Resistencia inducida de la quilla y viscosa e inducida de casco-bulbo y timón: Código de paneles 3D con acoplamiento de capa límite cuasi 2D.
- Resistencia de ola del conjunto: Código de paneles con superficie libre.
- Comprobación resistencia total del conjunto de apéndices: Código de Navier-Stokes

## 3 RESISTENCIA DE OLA

Este tipo de resistencia, que es característica de configuraciones hidrodinámicas, contribuye de forma nortable a la resistencia total del barco, especialmente en el rango de velocidades altas como las producidas en las empopadas o en situaciones de ceñida con alto ángulo de escora. El origen de esta resistencia podría ser catalogado de potencial, y es debido a la energía que comunica el barco a la superficie libre, generando como consecuencia el tren de

olas que sigue al barco. Afortunadamente, el hecho de tener un carácter no viscoso, permite utilizar métodos de cálculo fundamentados en la teoría potencial. De entre ellos el más popular es el de los denominados métodos de paneles o singularidades. Estos métodos se basan en distribuir singularidades en el cuerpo (barco y apéndices) y en la superficie libre. Dichas singularidades cumplen automáticamente la ecuación que rige el movimiento de un fluido incompresible e irrotacional, esto es, la ecuación de Laplace. La intensidad de las singularidades se determina imponiendo las condiciones de contorno en las superficies. En este tipo de programas, la condición de contorno en la superficie libre requiere un tratamiento especial, debido que la solución debe cumplir una condición especial denominada condición de radiación. Dicha condición expresa que las olas generadas por el barco no se pueden propagar aguas arriba del mismo. Numéricamente, esto implica que hay que añadir una determinada disipación numérica en el esquema numérico que expresa la condición de contorno dinámica en la superficie libre. La mayoría de los programas comerciales utilizan diferencias finitas “upwind”, al estilo de programas de cálculo de aerodinámica transónica, para implementar la mencionada condición de contorno. Otra cuestión relevante es que las condiciones de contorno en la superficie libre son no lineales. La técnica usual para hallar la solución no lineal es la de resolver de forma iterativa la condición de contorno, linealizándola a partir de la solución previa. Por último cabe destacar que el hecho de que numéricamente la superficie libre esté truncada (no es infinita) requiere un tratamiento especial para evitar reflexiones espúreas de las olas.

En general los programas basados en métodos de paneles son robustos, rápidos, y proporcionan resultados que, en comparación con los experimentos, suelen ser buenos tanto a nivel cuantitativo, como cualitativo. Desde el punto de vista del diseñador este último punto es muy importante ya que su objetivo es hallar la forma de la carena que proporcione en un determinado rango de velocidades, una menor resistencia de ola. Para ello, es fundamental que el programa capte de forma cualitativa las diferencias que puede provocar, por ejemplo, dos tipos diferentes de proa en la misma carena.

En el proyecto de I+D de la COPA AMERICA se eligió, tras una selección entre diversos programas de cálculo basados en diversos métodos aparte de los de paneles, el programa SPLASH como programa de cálculo de resistencia de ola para realizar el diseño del COPA AMERICA1999.

En la figura 2 se muestra el típico resultado de un programa de cálculo de resistencia de ola basado en un método de paneles. En este caso el cálculo fue efectuado sobre el RIOJA 95, y los resultados mostrados provienen de un programa desarrollado en el INTA, que posee las características discutidas anteriormente. Los resultados experimentales fueron obtenidos en el canal hidrodinámico de El Pardo, con un modelo a escala 1:3,5 del RIOJA. También se muestra en dicha figura, el mapa de olas obtenido alrededor del barco a 7 knts.

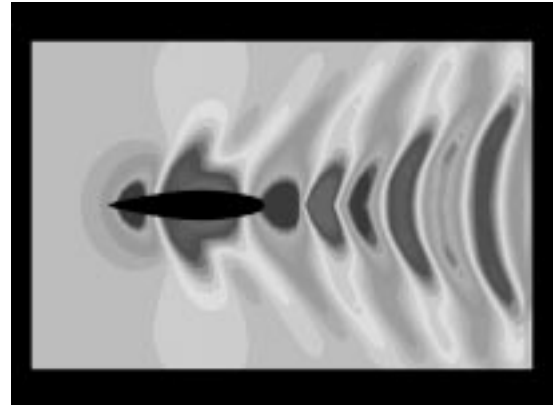
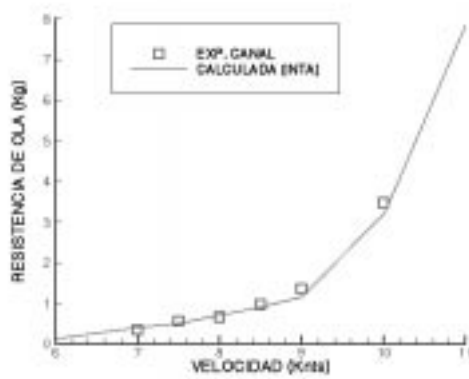


Fig. 2 Resistencia y mapa de altura de olas del casco del Rioja de España

#### 4 RESISTENCIA INDUCIDA

Todo ala o dispositivo sustentador genera resistencia inducida como consecuencia de las velocidades inducidas por la estela de torbellinos que es dejada tras su paso. Estas velocidades inducidas hacen que la corriente incidente al ala se defleccione en sentido opuesto a la fuerza generada, haciendo que esta fuerza (de dirección casi perpendicular a la corriente incidente aguas arriba, para un ala eficiente) se gire hacia atrás, aguas abajo aumentando su componente resistente. En la figura 3 se puede ver el efecto de la estela de torbellinos en las líneas de corriente obtenidas mediante una simulación con un método de paneles.

Para generar la fuerza lateral necesaria, sobre todo en ceñida, es necesario utilizar un dispositivo que genere poca resistencia inducida y poco resbamiento. El dispositivo más eficiente para este tipo de barcos es una quilla en forma de ala casi rectangular.

Para un ala de envergadura "b" la resistencia inducida "Di" para generar una sustentación "L" responde a la siguiente expresión.

$$D_i = \frac{L^2}{q\pi b^2 e}$$

Donde "e" es un factor de eficiencia del ala, función de la distribución de la sustentación a lo largo de la envergadura y de valor 1 para alas elípticas, y q es la presión dinámica función de la velocidad del barco

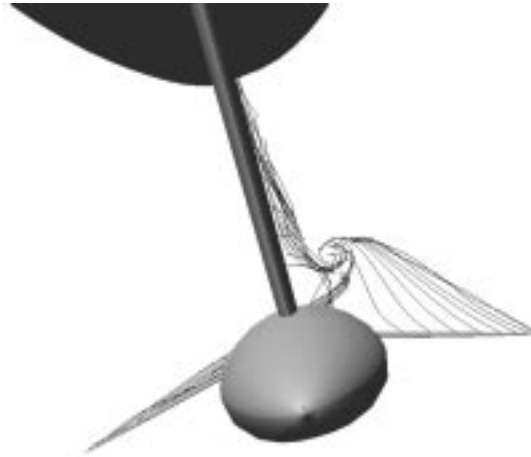


Fig 3 Estela de torbellinos de los apéndices

Como se ve la principal forma de reducir la resistencia inducida es aumentar la envergadura del ala, en este caso el calado de la quilla. Pero el calado del barco viene limitado por las normas de la regata. Así pues la única opción es actuar sobre el factor "e" alterando la forma de la distribución de la sustentación a lo largo de la envergadura. Esto se puede hacer añadiendo unas aletas al final de la quilla, normalmente encastradas en el bulbo como se puede ver en la figura 3.

Para estudiar la eficiencia de estos dispositivos los códigos más adecuados desde el punto de vista precisión/coste de computación son los métodos potenciales de paneles, por ser los mecanismos que generan la resistencia inducida, de carácter potencial. En la figura 4 se puede ver una comparación con resultados experimentales y en la 5 una comparación de resistencias inducidas para una configuración de barco completo con y sin aletas.

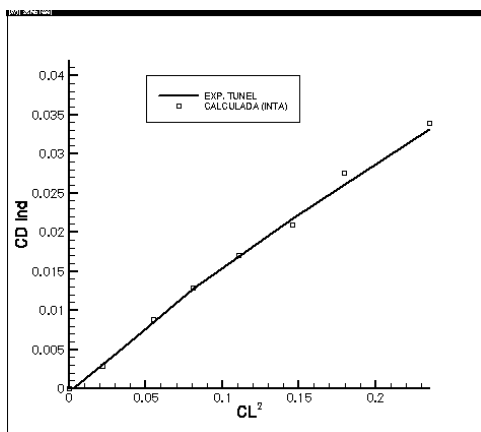


Fig 4 Comparación con resultados de tunel

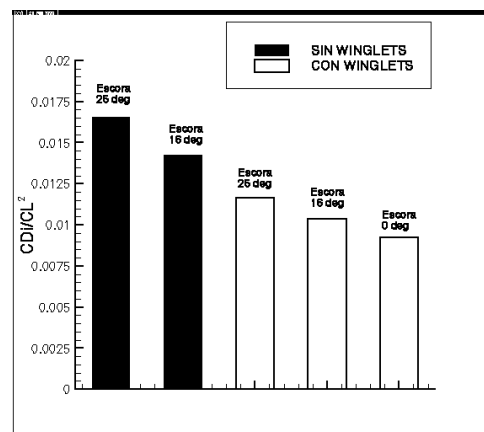


Fig 5 Resistencia inducida con y sin aletas

## 5 RESISTENCIA PRODUCIDA POR EFECTOS VISCOSOS

La resistencia debida a efectos viscosos podemos dividirla a su vez en dos, la resistencia de fricción y la producida por la posible separación del flujo.

La resistencia de fricción tiene su origen en la viscosidad natural del agua y dependerá del área mojada y del coeficiente de fricción de cada una de las partes. La contribución por componentes a la total de fricción es en nuestro caso para una velocidad de nueve nudos en ceñida:

*Casco*  $\approx 76\%$

*Quilla*  $\approx 7\%$

*Timón*  $\approx 5\%$

*Bulbo*  $\approx 11\%$

*Alas*  $\approx 1\%$

Se detectan pues dos formas posibles para reducir esta resistencia, reducir al máximo el área mojada de cada una de las partes, y diseñar formas para mantener el flujo laminar en la mayor parte de la superficie, sin que se produzca desprendimiento, ya que en este tipo de flujo el coeficiente de fricción es menor.

Analicemos estas dos posibilidades en cada una de las partes objeto de estudio.

### 5.1 Casco

La distribución de formas del casco es un apartado básico dentro del diseño naval, en él intervienen multitud de factores entre los que la reducción del área mojada es una restricción más, a tener en cuenta. La posible modificación de la forma del casco, exclusivamente desde el punto de vista de reducir el área mojada, está fuera del alcance de este trabajo.

En cuanto al porcentaje de flujo laminar, debemos decir que el número de Reynolds en el casco es tan grande, debido a su tamaño, que el flujo es turbulento prácticamente desde la proa, independientemente de su forma.

Así pues en el estudio realizado no se considera el casco como una de las partes a mejorar en cuanto a resistencia de fricción.

### 5.2 Quilla

En cuanto al área mojada de la quilla tenemos que tener en cuenta las siguientes restricciones: la envergadura está fijada por el calado máximo permitido por la regla de la competición. Por tanto para una forma en planta trapezoidal fija, el parámetro libre es por tanto la cuerda, que estará limitada inferiormente por motivos estructurales.

El porcentaje de flujo laminar en la quilla dependerá fundamentalmente del perfil que se elija. Por eso la evaluación de la resistencia viscosa de la quilla se calculó partiendo de la del perfil. A continuación se describe el proceso seguido para la selección del perfil de la quilla.

Se realizó una búsqueda entre perfiles de series conocidas que cumplieran las siguientes restricciones:

- Perfil simétrico
- Comportamiento laminar al Reynolds de funcionamiento ( $3-4 \cdot 10^6 / m$ )
- Espesor 12-18%

Se define como comportamiento laminar el hecho de que la polar del perfil presente un punto de inflexión en las proximidades de la zona de mínima resistencia (Figs. 6 y 7).

El problema que tiene este tipo de perfiles es que suelen dar muy poca resistencia en un rango de ángulos de ataque muy estrecho y su comportamiento fuera de este rango suele empeorar mucho y bruscamente.

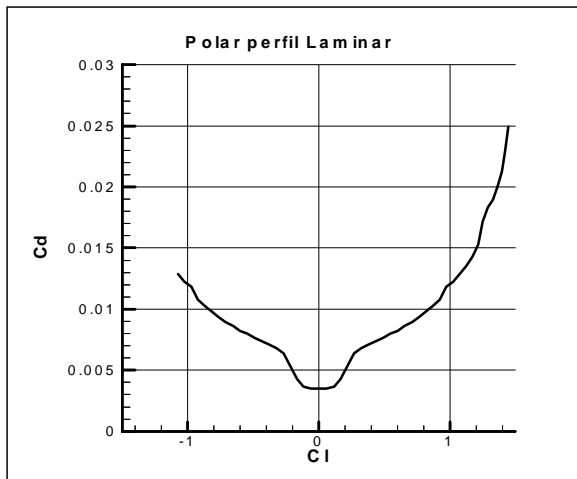


Fig. 6 Polar de un perfil laminar típico

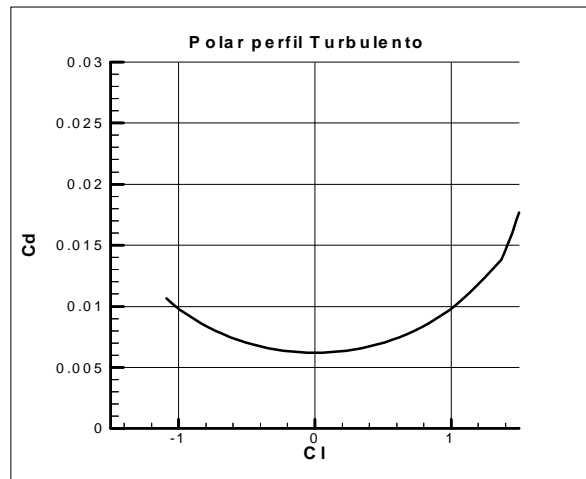


Fig. 7 Polar de un perfil turbulento típico

También varía su comportamiento en gran medida cuando algún agente externo provoca anticipadamente la transición de la corriente. En el caso de un barco hay que tener en cuenta que la corriente incidente no es límpia ya que las olas, presencia de algas, movimientos del propio barco (cabeceo), etc, hacen que muy probablemente tenga un alto nivel de turbulencia, desconocido a priori.

Por ello se quiso tener en cuenta también algunos perfiles turbulentos, que podían comportarse peor puntualmente pero mejor de forma global si se evaluaban en un amplio rango de condiciones de funcionamiento. Se consideraron en total 22 perfiles, 18 de ellos laminares y 3 turbulentos.

Después de una validación previa con datos experimentales, se eligió como código de análisis el XFOIL, que es un código de paneles bidimensional, que resuelve la ecuación potencial y tiene acoplado un método integral de cálculo de capa límite con interacción



viscoso-no viscoso. Este código nos permite obtener los valores de  $C_l$  y  $C_d$  (tanto de fricción como por separación del flujo) de un perfil para un ángulo de ataque y a un número de Reynolds determinado, y por tanto, la curva  $C_l$ - $C_d$  en un rango de ángulos de ataque.

De esta forma seríamos capaces de seleccionar el perfil que diera menos resistencia para una sustentación dada a un número de Reynolds determinado. Pero esto no daba la solución al problema.

Había que tener en cuenta además que el perfil de la quilla debía llevar un trim-tab de un porcentaje de la cuerda no determinado y que el ángulo de deflexión de este trim-tab debía ser tal que minimizara la resistencia del perfil para cada ángulo de deriva. Se estimó que la deflexión del trim-tab estaría en un rango entre  $0$  y  $15^\circ$  y que el porcentaje de cuerda variaría entre el 10 y el 30%.

Las variaciones previstas de cuerda y velocidad llevaron a considerar 4 números de Reynolds: 3, 4, 5 y  $6 \cdot 10^6$

Se calcularon por tanto las polares correspondientes a 22 perfiles, 3 porcentajes de trim-tab, 8 deflexiones de trim-tab y 4 Reynolds dejando la transición libre (corriente no perturbada) y fijándola en el borde de ataque (transición provocada por causas externas).

Esto nos llevó a calcular un total de 4224 polares.

Para cada Reynolds, porcentaje de trim-tab y criterio de transición (libre o fija), se calculó la envolvente de las polares correspondientes a cada deflexión de trim-tab, obteniendo así la mínima resistencia que se podía obtener con una quilla dada (perfil+ cuerda + % trim-tab) para una sustentación dada a una velocidad determinada.

La conclusión de todo esto es que para una condición de navegación determinada (velocidad del barco, ángulo de escora y ángulo de deriva), para la que se requiere una sustentación dada, podemos encontrar una quilla que es mejor que el resto, pero ¿cuál es la mejor a lo largo de toda la regata?.

Para tratar de responder a esta pregunta se definió lo que llamamos Área de Resistencia Ponderada que nos iba a permitir evaluar en primer lugar que configuración perfil-cuerda-% de trim-tab se comportaría mejor en una regata estándar a igualdad del resto de los componentes del barco y en segundo lugar cual sería el ángulo de deriva y la deflexión de trim-tab óptima en cada configuración para una velocidad de viento determinada.

En el cálculo de esta Área de Resistencia Ponderada se dieron los siguientes pasos:

- Estimación del área lateral total necesaria para cada velocidad de viento en ceñida y en empopada
- Porcentaje de reparto de cargas entre quilla y timón  $\rightarrow$  área de sustentación de la quilla
- Relación existente entre el  $C_l$  de la quilla y el del perfil.
- Relación entre el  $C_d$  del perfil y el área de resistencia viscosa de la quilla ( $A_{DVQ} = C_{d_q} \cdot A_q$ )
- Factor de penalización en función del ángulo de deriva que tiene en cuenta la pérdida de eficiencia de las velas cuando aumenta el ángulo de deriva.

- Áreas de resistencia de restantes: inducida de casco, quilla, bulbo y timón, viscosa del casco, bulbo y timón, resistencia de ola del conjunto.
- Factor de ponderación que tiene en cuenta el porcentaje de tiempo que se navega en ceñida y en empopada.
- Esto nos daría un área de resistencia ponderada para cada velocidad de viento, integrando para todas las velocidades de viento, teniendo en cuenta la probabilidad de cada una, se obtiene el ARP.

De la clasificación de las distintas configuraciones según su valor de ARP, se eliminó aquellas que no cumplían el mínimo en cuanto al módulo resistente exigido.

Se ha obtenido una clasificación a partir de las polares obtenidas con transición fija y otra a partir de las obtenidas con transición libre. Como la laminaridad de la corriente sigue siendo una incógnita, se tuvo que llegar a una solución de compromiso entre las dos clasificaciones.

### 5.3 Timón

El estudio para reducir la resistencia viscosa en el timón fue similar al realizado en la quilla, teniendo en cuenta sus propias peculiaridades:

La función primordial del timón es mantener el rumbo. Su principal requisito es que la entrada en pérdida se produzca a ángulos de ataque los más altos posible.

La carga de sustentación correspondiente al timón suele ser del orden de la mitad de la de la quilla. Un valor normal de reparto de cargas puede ser: 70 % para la quilla y 30% para el timón.

La corriente llega al timón mucho más perturbada ya que incluso puede suceder que se interfiera con la estela de la quilla y el bulbo.

El timón está mucho más cerca de la superficie libre, pudiendo llegar a salir del agua en algunos casos.

### 5.4 Bulbo

La filosofía de diseño en el bulbo es fundamentalmente minimizar la resistencia de origen viscoso, ya que ésta es la componente principal de resistencia de este apéndice. El objetivo es encontrar geometrías que minimicen la estela de base y a su vez tengan una zona laminar lo más extensa posible. Estos dos objetivos son en cierto modo incompatibles, ya que el criterio de máxima laminaridad, que se favorece retrasando la sección de espesor máximo, conduce a aumentos en el gradiente de presión adverso en la parte posterior del bulbo, lo cual adelanta el desprendimiento con el consiguiente ensanchamiento de la estela.

Para su diseño se partió de perfiles laminares NACA de la serie 6. Se construyeron con ellos bulbos de revolución que se fueron modificando (ver Fig. 8) para que cumplieran distintos requisitos (P.e. Posición en altura del centro de gravedad determinada, volumen fijo, etc), teniendo en cuenta en todo momento que el área mojada fuera la mínima posible.

El cálculo de la resistencia se realizó con el código VSAERO, que es un código de paneles 3D con acoplamiento de capa límite.

Los resultados de resistencia de cada uno de los bulbos se analizaron globalmente en el Programa de Predicción de Velocidad (VPP).

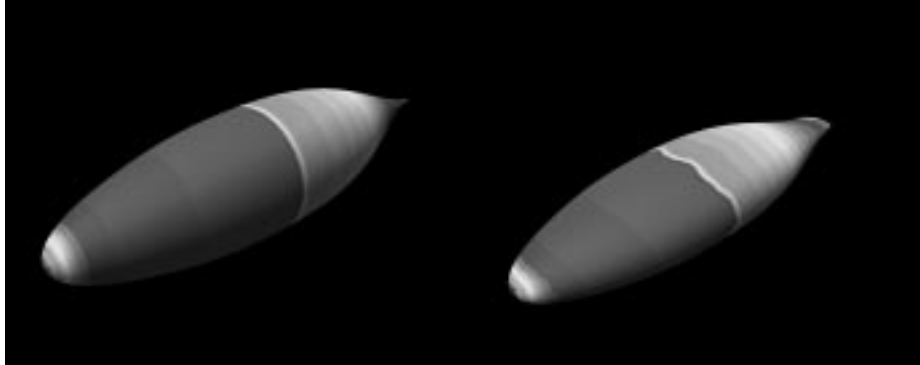


Fig. 8 Bulbos analizados en distintas fases

#### 5.4 Aletas

La contribución de las aletas a la resistencia es en cualquier caso muy pequeña. No obstante se ha realizado una selección de perfiles, cuyo análisis 2D permitió seleccionar el más adecuado.

El estudio de la forma en planta, torsión y posición de las aletas está actualmente en curso.

### 6. METODOS DE NAVIER-STOKES

Los métodos de paneles están limitados a flujos sin fuertes desprendimientos, donde los efectos viscosos están débilmente acoplados con los potenciales y a geometrías en las que la sustentación está generada principalmente por superficies sustentadoras con bordes de salida de poco espesor. Esto es debido a que son métodos de carácter lineal (a excepción de acoplamiento de capa límite o relajación de estelas flexibles) y en los que la vorticidad se concentra en delgadas estelas de torbellinos, condiciones que no se cumplen cuando hay grandes zonas de corriente desprendida (altos ángulos de ataque o anchas estelas de base p.e.). Por otro lado los modelos de capa límite que se suelen acoplar con los métodos de paneles no tienen en cuenta interacciones entre las capas límite en las uniones de los distintos componentes como unión quilla-bulbo o aletas-bulbo por lo que no pueden estimar la resistencia de interferencia entre componentes.

Es en todos estos casos donde los solvers de Navier-Stokes tienen su papel. Aunque por otro lado tienen un inconveniente frente a los métodos con modelos de capa límite calibrados con correlaciones experimentales como suele ser el caso de los métodos de paneles: la predicción de la transición de laminar a turbulento, lo que supone una fuerte limitación a la hora de estimar las resistencias de fricción o en los casos en que los desprendimientos dependan en suficiente grado del punto de transición.

Pero el principal inconveniente frente a los métodos de paneles es el mayor tiempo de computación, del orden de 100 veces mayor que los métodos de Navier-Stokes para la misma geometría. Esto hace que los métodos de paneles no sean prácticos como herramientas de diseño y se utilicen principalmente como herramientas de análisis para estudiar configuraciones finales.

Dentro de los solver de Navier-Stokes se puede distinguir entre los solvers estructurados que solo pueden usar mallas estructuradas, de tipo multibloque si se quieren simular flujos sobre geometrías medianamente complejas y los solvers de tipo no estructurado, los cuales suelen poder usar mallas de tipo estructurado, no estructurado o bien híbridas (parte estructurada y parte no estructurada), y que son los únicos que pueden simular flujos sobre geometrías de gran complejidad con escalas de diferente orden (por ejemplo el flujo alrededor de una toma de pitot para un anemómetro en una configuración de avión completo).

Los de tipo estructurado tienen la ventaja de necesitar menos memoria y menor tiempo de computación en compensación a su limitación a geometrías no muy complejas, aunque los tiempos de generación de la malla son muy superiores a los no estructurados.

Por otro lado, e independientemente de la topología de malla utilizada, se puede optar entre una simulación con un modelo de turbulencia de función de pared o un modelo de turbulencia de bajo número de Reynolds. El primer tipo hace una estimación de los esfuerzos viscosos en la superficies sólidas usando perfiles de semejanza lo que permite utilizar mallas relativamente bastas cerca de las paredes sólidas y el segundo resuelve el flujo dentro de la capa límite requiriendo un mayor número de celdillas lo que lógicamente supone un mayor tiempo de cálculo.

Por otro lado estos últimos son menos robustos desde el punto de vista de la convergencia de la simulación lo que quiere decir que son mas sensibles a la calidad de la malla y a la solución inicial.

Desde el punto de vista de aplicabilidad de los dos modelos, los de función de pared son poco adecuados para interacciones de capa límite y de menor precisión para flujos desprendidos.

En la figura 10 se puede ver los nodos sobre la superficie de una configuración quilla-bulbo de una malla utilizada para una simulacion con malla no estructurada y modelo de turbulencia k-ε con función de pared. El número total de celdillas es de 250000 . En la figura 11 se puede ver una comparación entre los resultados obtenidos con esta malla y los resultados del tunel para la sustentación lateral.

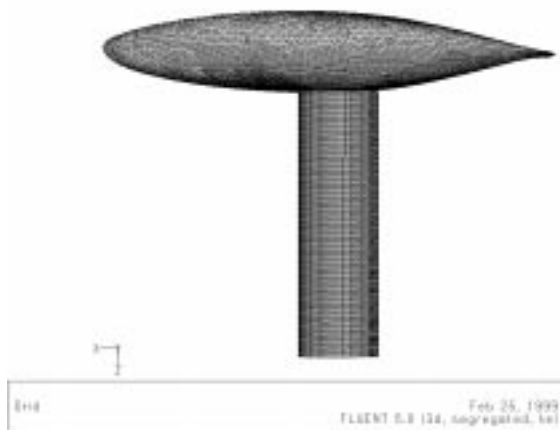


Fig 10 Mallado superficial

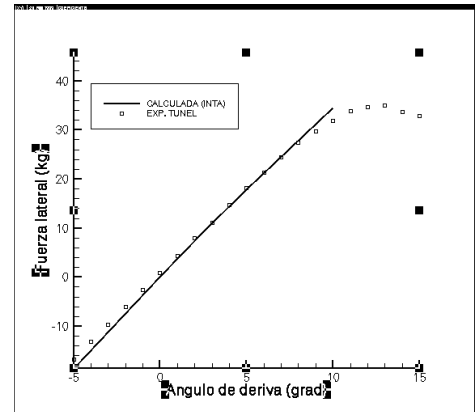


Fig 11 Comparación con tunel

## 6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha tratado de demostrar que los métodos de CFD son una herramienta indispensable para el diseño de configuraciones de este tipo. No obstante hay que tener en cuenta que el grado de madurez de estos códigos no permiten utilizarlos como “cajas negras” y sigue siendo imprescindible que el usuario tenga experiencia en mecánica de fluidos, debido principalmente a la fuerte dependencia de los resultados de la calidad de los mallados y de la definición de las condiciones de contorno.

También es fundamental que el diseñador sepa elegir el método más apropiado para cada situación desde el punto de vista “calidad de los resultados/tiempo de computacion”, ya que el método más sofisticado, p.e. cálculos de Navier-Stokes, no siempre es el más adecuado.

## 7 AGRADECIMIENTOS

La financiación de este proyecto de I+D ha sido realizada por la CICYT mediante las Acciones Especiales TAP95-2089-E, TAP96-2382-E y TAP97-2106-E

## REFERENCIAS

- [1] C.W.Boppe.”Sailboat hydrodynamic drag source prediction and performance assesment”.The tenth chesapeake sailing yacht symposium.
- [2] C.W. Boppe, B.S. Rosen & J.P. Laiosa. “ Stars & Stripes ´87; Computational Flow Simulations for Hydrodynamic Design “.The eighth chesapeake sailing yacht symposium.
- [3] E.N.Tinoco.”IACC Appendage Studies”. The eleventh chesapeake sailing yacht symposium.
- [4] J.W.Slooff. “On wings and keels,(II)”
- [5] J.H.Milgram.”Fluid mechanics for sailing vessel design”. Annu. Rev. Fluid Mech. 1998.30:613-53

- [6] P. v. Oossanen."Method for the calculation of the resistance and side force of sailing yachts"