

Avances en la estimación de la resistencia de catamaranes

Marcos Salas^a
Prasanta K. Sahoo^b
Richard Luco^a

Resumen

Los cascos tipo catamarán han sido usados desde tiempos remotos, sin embargo, casi siempre han estado restringidos a embarcaciones menores. Recientemente se ha constatado un crecimiento masivo de este tipo de embarcaciones en la industria de ferris, naves deportivas y de placer. El uso de materiales compuestos y de aluminio, sumado a mayor potencia, han permitido que los rangos de operación se desarrollen en velocidades altas. Uno de los desafíos que deben enfrentar los arquitectos navales que proyectan estas naves, es estimar con suficiente exactitud la resistencia de los cascos al avance, una tarea para nada trivial pues hasta hoy subsiste un cierto grado de incertidumbre, particularmente debido a la interacción que es posible constatar entre ellos.

En el presente trabajo se muestran los progresos en los métodos de evaluación de la resistencia al avance en embarcaciones multicasco, particularmente la de un catamarán, obtenida por dinámica de fluidos computacional –CFD–, y por ensayo en canal de pruebas hidrodinámicas realizado por la Universidad Austral de Chile. Además, se presenta un método basado en ecuaciones de regresiones para el cálculo del coeficiente de resistencia de olas de catamaranes con cascos redondos en un régimen de velocidad de semidesplazamiento.

Palabras clave: Catamarán, resistencia al avance, CFD.

Abstract

The catamaran type hulls have been used since remote times; however, they have almost always been restricted to minor ships. A massive growth of these kinds of vessels has been noted recently in the ferry industry, for sporting vessels and pleasure. The use of compound materials and of aluminum, added to greater power, has allowed that the ranges of operations are developed at high speeds. One of the challenges which naval architects who project these vessels must face, is to estimate with enough precision, the hull resistance to drag, a task which is not trivial at all because until today, a certain degree of uncertainty remains, particularly due to the interaction that is possible to notice between them.

In the present study, the progresses in the methods of evaluation of the drag in multi-hull ships, particularly that of a catamarans, obtained by computational fluids dynamics –CFD–, and through tests in a hydrodynamic testing canal carried out by the Universidad Austral of Chile. Besides, a method based on equations of regressions is presented for the calculation of the drag coefficient of waves for catamarans with round hulls in a regime of semidisplacement speed.

Key Words: Catamaran, resistance, CFD.

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2008
Fecha de aceptación: 11 de abril de 2008

^a Universidad Austral de Chile. Departamento de Ingeniería Naval.
^b Australian Maritime College.
Autor correspondiente: msalas@uach.cl

Introducción

Los catamaranes se usan crecientemente en la flota mundial de ferris; las características inherentes a este tipo de casco, gran área de cubierta y estabilidad de formas, han sido explotadas con ventaja en diseños avanzados. Lo anterior pone en evidencia la necesidad de contar con métodos eficientes de estimación de su resistencia al avance, la cual, como se sabe, tiene dos componentes principales: resistencia viscosa y generación de olas. El primero puede ser calculado con bastante exactitud con el método dado por la *ITTC –International Towing Tank Conference–* de 1957, usando un factor de forma apropiado, mientras el segundo, la resistencia por generación de olas, permanece como un desafío para los investigadores, particularmente al considerar el problema de interacción de los trenes de olas generados por ambos cascos. Se entiende que son necesarias diferentes fórmulas para distintas configuraciones de cascos, por lo que no es posible generalizar el problema.

Las ecuaciones de tipo matemático que gobiernan el movimiento de un fluido alrededor de una embarcación son conocidas desde el siglo XIX, aunque las que rigen el fenómeno en aquellos casos que tienen un interés práctico no pueden ser abordadas de una forma analítica. Sin embargo, y pese a que ya en ese tiempo aparecen las primeras referencias sobre el cálculo aproximado de la resistencia por formación de olas en buques, este problema sigue desafiando a matemáticos e hidrodinámicos.

Recientemente, gracias al desarrollo de códigos *CFD*, las ecuaciones del problema pueden resolverse de forma aproximada por algoritmos numéricos, proporcionando información sobre los movimientos y las sollicitaciones 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 de buques que avanzan 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 fuentes 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 está 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 usa fuentes de Rankine, distribuidas sobre la superficie libre, como singularidad elemental. El más conocido de estos esquemas fue presentado originalmente por Dawson y está basado en el método de Hess y Smith 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, Splash* o *Shipflow* 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.

La dinámica de fluidos computacional es utilizada crecientemente como medio de cálculo de la resistencia al avance. En este trabajo se ha recurrido a los códigos *Shyne* y *Shipflow*, disponibles en el ámbito naval; el primero se usó para calcular la resistencia de un catamarán menor y compararlo con ensayos experimentales, el segundo se utilizó para obtener resultados de resistencia por formación de olas de distintas configuraciones de cascos, y sobre la base de estos resultados generar regresiones que puedan representarse como ecuaciones para el cálculo de la resistencia a las olas de cascos de formas típicas.

Comparación de *CFD* y métodos experimentales

Se han registrado rápidos avances en el cálculo teórico de la resistencia de olas mediante códigos *CFD*. En esta sección se muestra como ejemplo la comparación del resultados de resistencia al avance de un catamarán, obtenida mediante el código

Shyne y experimentos con un modelo a escala realizado en el canal de pruebas hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile.

La nave en estudio corresponde a un multicasco construido en materiales compuestos por Astilleros Alwoplast Ltda. (Chile).

Las características principales de la embarcación se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características del catamarán

Eslora total	16,76 m
Manga máxima	6,0 m
Puntal de diseño	2,4 m
Calado	0,8 m
Desplazamiento	19 ton

El código *CFD Shyne* fue desarrollado utilizando técnicas de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, que son las que gobiernan el movimiento del fluido alrededor de un cuerpo. El fundamento teórico del código, es presentado de forma general por García et al. (2002).

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:

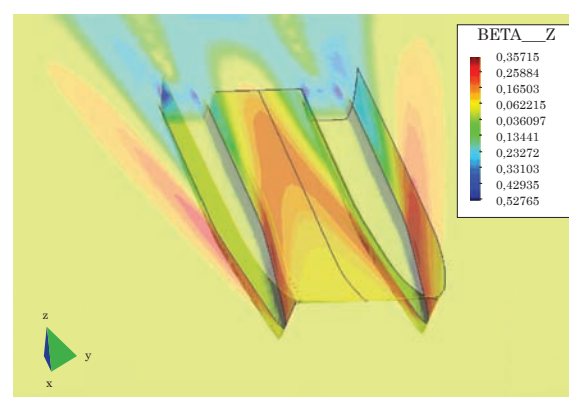
- El carácter no lineal de las ecuaciones de Navier Stokes ocasiona que los esquemas de integración tradicionales presenten importantes problemas de inestabilidad.
- La resolución precisa de la ecuación de la superficie libre, que restringe el movimiento de las partículas a una superficie fluida, de 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 procedimiento estabilizado basado en el método de los elementos finitos que pretende solventar cada uno de los problemas anteriores. La metodología se fundamenta 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 cálculo finitesimal *-CF-*.

En el código *Shyne* las ecuaciones modificadas son resueltas usando un esquema de pasos fraccionados semiimplícito 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. La generación de olas mediante el código *CFD* se muestra en el Gráfico 1.

Gráfico 1. Generación de olas, $V=28$ Kn

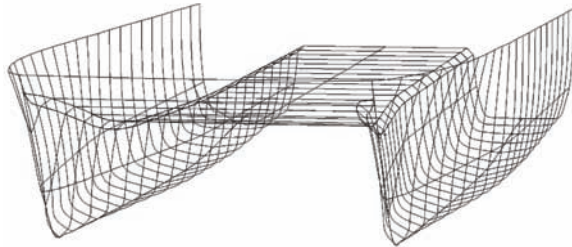


Para realizar los ensayos experimentales, es decir, ensayos de remolque en el laboratorio de hidrodinámica naval del Instituto de Ciencias Navales y Marítimas de la Universidad Austral de Chile, se construyó un modelo de plástico reforzado con fibra de vidrio a una escala de 1/17. Las formas del modelo ensayado se muestran en el Gráfico 2.

Las condiciones de ensayo fueron especificadas en el rango de operación de la embarcación, es decir, se utilizó como desplazamiento el de plena carga que corresponde a 19 toneladas y un rango de velocidades que varía entre los 10 y 30 nudos.

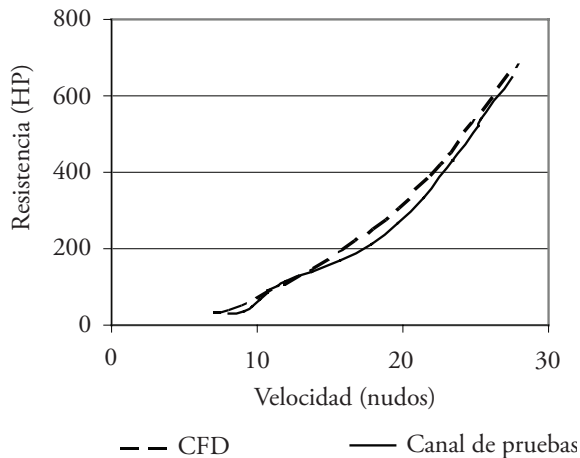
El método de correlación utilizado fue el método de Froude y la línea de fricción la de la *ITTC* de 1957.

Gráfico 2. Formas del catamarán



Una comparación gráfica de las curvas de resistencia al avance se observa en el Gráfico 3, del que se concluye que existe una diferencia de aproximadamente 4,5% entre lo obtenido mediante los ensayos de canal y los ensayos numéricos.

Gráfico 3. Comparación de resistencia



En la curva correspondiente a los ensayos de canal se observa el fenómeno natural de sustentación, que se produce entre los 10 y 14 Kn, siendo una zona de transición entre el régimen de semiplaneo y el de planeo. Este fenómeno no se refleja en la curva de los ensayos numéricos, debido a la condición del método utilizado, que si bien corresponde a un código viscoso no tiene en consideración los parámetros de cambio de trimado. En códigos de última generación este problema ya ha sido resuelto, pudiendo representarse fielmente este fenómeno.

Cálculo del coeficiente de resistencia de olas

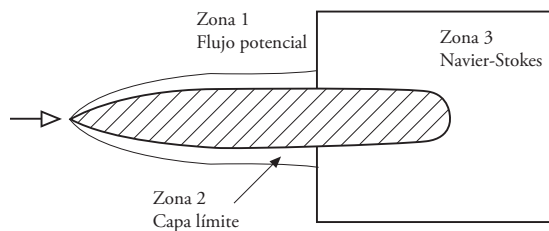
La resistencia al avance de un catamarán básicamente reside en calcular adecuadamente la resistencia por formación de olas, la cual puede estimarse a partir del coeficiente calculado por métodos experimentales o *CFD*. En esta parte del trabajo se ha usado el programa *Shipflow* para establecer los valores del coeficiente de resistencia de olas, y a partir de estos obtener ecuaciones de regresión que permitan contar con una herramienta útil en la estimación de la resistencia al avance de catamaranes.

Para obtener el coeficiente de resistencia de olas, C_{wv} , se divide el dominio fluido en tres regiones, dependiendo del modelo que pueda representar más eficientemente el tipo de flujo predominante en cada región. De esta forma las ecuaciones del flujo pueden ser resueltas de tal modo que se pueda maximizar la eficiencia computacional, tal como es descrito por Larsson (1993).

El Gráfico 4 representa esta aproximación por regiones del dominio fluido. El código *CFD* se basa en tres métodos diferentes para cada zona:

- Zona 1: Método del flujo potencial
- Zona 2: Método de la capa límite
- Zona 3: Método de Navier-Stokes

Gráfico 4. Distribución de zonas de flujo



El método del flujo potencial es usado para analizar el fluido en la capa externa a la capa límite, designada como zona 1 en el Gráfico 4. En esta zona el flujo es tratado en forma de líneas de corriente continuas empezando desde la proa del buque y extendiéndose hacia la popa. La región que describe

la delgada capa límite es definida como zona 2, la naturaleza del flujo cambia en esta región a medida que se avanza desde proa hacia popa. El flujo laminar empieza desde el punto de estagnación, diverge gradualmente a medida que avanza hacia popa hasta que alcanza el punto de transición donde las fuerzas viscosas no son suficientemente fuertes como para mantener el flujo en líneas de corriente paralelas; consecuentemente el flujo pasa a ser turbulento.

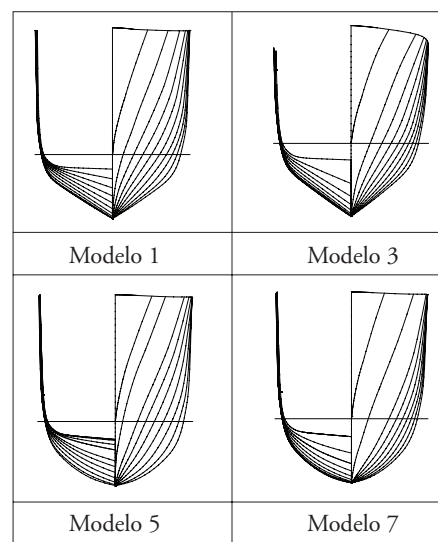
La región de popa descrita como zona 3 representa la región fluida donde el flujo es completamente turbulento y se genera la estela del buque. Esta incluye la región de la capa límite hacia popa del punto de transición donde el flujo pasa a ser turbulento, usualmente ubicado en la mitad del buque. Las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicadas en esta región para calcular la energía y por lo tanto la correspondiente resistencia inducida. Para tomar en cuenta las olas creadas es necesario modelar la superficie libre, extendiéndose desde antes de la proa hasta bastante a popa del casco, aproximadamente dos longitudes de ola, y también hacia ambas bandas del casco.

Una de las mayores limitaciones de *Shipflow* es su incapacidad para modelar problemas que incluyan *spray* de olas u olas que rompen, lo que usualmente sucede a velocidades altas, por tal razón el estudio se limitó a velocidades con número de Froude hasta 1,0, considerado el límite superior para que el fenómeno no se presente.

Serie de catamaranes de casco redondo

La serie sistemática desarrollada es representativa de formas de catamaranes de alta velocidad usados

Gráfico 5. Formas representativas de la serie.



Fuente: Sahoo, Browne y Salas (2004)

como ferris como se puede apreciar en el Gráfico 5. Para producir las formas deseadas de semicascos se usó un procedimiento de transformación paramétrica.

El Cuadro 2 presenta los parámetros geométricos de semicascos usados para generar la serie. Para cada modelo se obtuvieron las características hidrostáticas las cuales se muestran en el Cuadro 3 incluyendo parámetros relevantes usados en el análisis de regresión.

La serie sistemática producida fue restringida a un rango de separación de cascos s/L entre 0,2 y 0,4 y la velocidad se mantuvo en el rango de F_n entre 0,2 y 1,0. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el coeficiente de resistencia de olas se presentan en las ecuaciones (1) y (2).

El Cuadro 4 presenta las constantes requeridas para la ecuación de cálculo del coeficiente de resistencia

Cuadro 2. Serie sistemática de catamaranes

Model	1	2	3	4	5	6	7
L/B	15,00	15,00	15,00	15,00	12,50	12,50	10,00
B/T	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	2,50	2,50
C_B	0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,45	0,45
$L/\nabla^{1/3}$	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Cuadro 3. Características hidrostáticas de la serie sistemática

Modelo	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Δ (ton)	i_E (grad)	β_M (grad)	S_W (m ²)	LCB (m)	LCF (m)
1	50,00	3,33	2,22	151,93	5,43	42,99	246,10	22,30	20,70
2	50,00	3,33	2,22	170,91	7,18	44,32	256,20	22,27	21,54
3	50,00	3,33	1,33	113,90	7,03	24,94	195,89	22,34	21,41
4	50,00	3,33	1,33	91,08	4,00	23,32	181,97	22,29	19,99
5	50,00	4,00	2,67	246,10	8,60	44,11	307,57	22,27	21,54
6	50,00	4,00	1,60	147,69	8,60	30,37	231,71	22,27	21,54
7	50,00	5,00	2,00	230,77	10,71	30,37	289,80	22,27	21,54

$$C_{Wdem} = e^{C_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C_2} (C_B)^{C_3} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{C_4} (i_E)^{C_5} (\beta)^{C_6} \quad (1)$$

$$C_{Wcat} = e^{C_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C_2} \left(\frac{B}{T}\right)^{C_3} (C_B)^{C_4} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{C_5} (i_E)^{C_6} (\beta)^{C_7} \left(\frac{s}{L}\right)^{C_8} \quad (2)$$

Cuadro 4. Coeficientes de regresión y R² para semicascos en la ecuación (1)

Fn	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	R ₂
0,2	3,001	-0,159	0,515	-3,666	-0,194	0,000	0,967
0,3	1,221	0,000	0,815	-3,445	0,218	0,000	0,985
0,4	3,180	-0,702	0,377	-3,114	-0,390	0,000	1,000
0,5	2,519	0,396	-0,775	-4,175	0,000	-0,410	0,999
0,6	2,031	-0,239	0,000	-3,402	-0,138	-0,091	0,999
0,7	1,130	-0,220	0,000	-3,221	-0,043	-0,081	0,999
0,8	0,600	-0,272	0,000	-3,079	0,000	-0,063	0,999
0,9	-0,216	0,000	-0,228	-3,158	0,173	-0,178	0,999
1,0	-1,086	0,000	-0,396	-2,965	0,300	-0,203	0,998

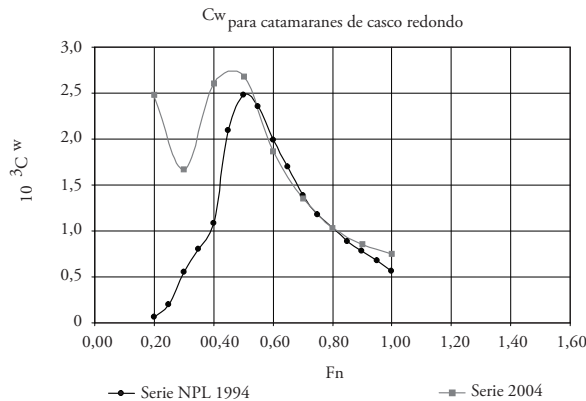
Cuadro 5. Coeficientes de regresión y R² para catamaranes en ecuación (2)

Fn	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	R ₂
0,2	2,571	0,436	0,000	0,000	-4,124	-0,039	-0,199	0,037	0,995
0,3	0,585	0,000	0,000	0,945	-3,282	0,246	0,087	-0,089	0,989
0,4	3,324	0,000	-0,471	-0,963	-3,523	0,000	-0,688	-0,035	0,984
0,5	2,439	0,379	0,000	-0,600	-4,262	0,000	-0,337	-0,368	0,999
0,6	1,809	-0,110	0,000	0,000	-3,625	-0,061	-0,095	-0,314	0,997
0,7	1,055	0,000	0,082	-0,025	-3,617	0,000	-0,064	-0,181	0,997
0,8	0,603	0,222	0,266	0,000	-3,869	0,000	0,000	-0,069	0,998
0,9	-0,466	0,049	0,162	0,000	-3,322	0,128	0,000	-0,006	0,999
1,0	-1,221	0,000	0,117	0,000	-3,046	0,264	0,000	0,075	0,995

de olas del semicasco de (1) y el Cuadro 5 presenta las constantes necesarias para la evaluación del coeficiente de resistencia de olas del catamarán de (2). En ambos casos, R^2 representa un parámetro de evaluación de la correlación de las curvas de regresión, 0 indica que no hay correlación y 1 indica que la correlación es de 100%.

El Gráfico 6 muestra los coeficientes de resistencia de olas obtenidos por el método de regresión descrito comparados con resultados experimentales de Molland et al. (1994) para la serie NPL. La serie NPL está basada en monocascos dispuestos en configuración de catamarán. El valor de la astilla muerta en la sección media del casco y la mitad del ángulo de entrada del plano de flotación se han considerado constantes en 7 y 30 grados respectivamente.

Gráfico 6. Coeficientes de resistencia de olas para catamaranes de casco redondo



Fuente: Molland et al. (1994) y resultados del estudio

Conclusiones

La comparación de resultados de resistencia al avance de un catamarán obtenida mediante CFD y experimentos en canal de pruebas muestra que un análisis numérico puede actualmente estimar la resistencia al avance con precisión aceptable para el caso estudiado.

La factibilidad de poder realizar numerosos ensayos, sin incurrir en costos elevados (de ejecución de modelos) hacen del método numérico una alternativa de selección de formas a la hora de encarar

un nuevo diseño o de mejorar uno ya existente. Si bien los métodos numéricos son una alternativa de alta viabilidad, no se pretende, con lo detallado en este trabajo, plantear un reemplazo de los canales de pruebas, sino un complemento entre ambos métodos.

En cuanto a la estimación por regresión lineal del coeficiente de resistencia de olas, se puede observar en el Gráfico 6, que los resultados de las dos series, sobre Fn 0,5 y hasta Fn igual a 1,0, son muy cercanos lo que hace concluir que el método presentado es válido para estimar el coeficiente de resistencia de olas de un catamarán de casco redondo en este rango de velocidades.

Es interesante analizar el peso relativo de los parámetros utilizados en las ecuaciones de regresión de un semicasco y la configuración catamarán. Del análisis de las ecuaciones se concluye que el parámetro que tiene mayor influencia en la resistencia de olas es la relación de esbeltez dada por la eslora y el volumen de la carena ($L/\nabla^{1/3}$). A continuación se deduce que el ángulo de entrada, de astilla muerta, y la separación entre los cascos, son también importantes. La relación entre la manga y el calado son importantes solo cuando se alcanzan velocidades altas.

Los resultados obtenidos muestran que el método de regresión puede ser empleado satisfactoriamente en la estimación de la resistencia de olas de un catamarán, sin embargo los parámetros usados deben estar en el rango utilizado en la serie.

Nomenclatura

B	Manga de semicasco en la flotación
B/T	Relación manga/calado
C_w	Coeficiente de resistencia de olas
$C_{w\text{demi}}$	Coeficiente de resistencia de olas de semicasco
$C_{w\text{cat}}$	Coeficiente de resistencia de olas de catamarán
F_n	Número de Froude
i_E	Semiángulo de entrada
L	Eslora en flotación
L/B	Relación eslora/manga (de semicasco)

$L/\nabla^{1/3}$	Relación de esbeltez
LCF	Posición longitudinal del centro de flotación (desde el espejo)
LCB	Posición longitudinal del centro de empuje (desde el espejo)
s	Separación de cascos (medida entre crujías de semicascos)
s/L	Relación de separación de cascos
S_w	Superficie mojada
V	Velocidad
β_M	Astilla muerta al centro
Δ	Desplazamiento
∇	Volumen de la carena

Referencias

- García, J.; Luco, R.; Salas, M.; López, M.; and Oñate, E. (2002), "An Advanced finite element method for fluid-dynamic analysis of America's Cup boat". Auckland, New Zealand 2002.
- Larsson, L. (1993), Resistance and Flow Predictions Using Shipflow Code. 19th Wegemt School, Nantes, France.
- Molland, A. F., Wellicome, J. F. and Couser, P. R. (1994), "Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draft Ratio", *Ship Science Report n.º 71*, University of Southampton, UK.
- Sahoo P. K., Browne N. and Salas M. (2004, september), "Experimental and CFD Study of Wave Resistance of High-Speed Round Bilge Catamaran Hull Forms". Proceedings of 4th International Conference on High Performance Marine Vehicles, Rome, Italy.