



Grado en Arquitectura Naval e Ingeniería de Sistemas Marinos

Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica

2016

Trabajo Fin de Grado

**Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al
avance de embarcaciones catamaranes con pantoque
redondeado mediante métodos numéricos**

Director:
Codirector:
Autor:

José Enrique Gutiérrez Romero
Domingo L. García López
María Martín Martínez

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Enrique Gutiérrez Romero, por su tiempo, conocimiento y dedicación.

A Don Domingo L. García López por toda la documentación aportada y su ayuda.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	14
CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL CATAMARÁN	15
1. INTRODUCCIÓN AL CATAMARÁN	16
2. VENTAJAS Y PROBLEMAS DEL CATAMARÁN SOBRE EL BUQUE MONOCASCO	16
3. APLICACIÓN DEL CATAMARÁN.....	17
4. RESISTENCIA AL AVANCE	17
5. TIPOS DE CATAMARÁN.....	18
5.1. Clasificación general de buques.....	18
5.2. Tipos de catamarán, Clasificación I.....	19
5.2.1. Catamarán	19
5.2.2. SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull).....	20
5.2.3. SES (Surface Effect Ship).....	21
5.2.4. WAVE PIERCER	21
5.3. Tipos de catamarán, Clasificación II.....	22
5.3.1. Catamaranes de vela.....	22
5.3.2. Catamaranes propulsados por motor	23
CAPÍTULO 2. GENERACIÓN DE FORMAS	25
1. FORMAS EN CATAMARANES.....	26
2. MODELO BASE	28
3. DIMENSIONAMIENTO DEL BUQUE.....	29
3.1. Introducción	29
3.2. Dimensionamiento a partir de base de datos	29
4. BUQUE PROYECTO	32
4.1. Dimensiones principales	32
4.2. Características hidrostáticas	33
4.2.1. Tablas de características hidrostáticas.....	33
4.2.2. Curvas hidrostáticas	35
4.2.3. Plano de formas.....	38
CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE POTENCIA	39
1. INTRODUCCIÓN	40
1.1. Introducción a los métodos	40
1.2. Componentes de la resistencia	41
2. MÉTODOS	41
2.1. Método de Armstrong, factor de forma del monocasco	41
2.2. Factor de forma para catamaranes.....	43
2.3. Serie de catamaranes de pantoque redondeado de Sahoo, Browne y Salas (2004).....	44
2.4. Regresión a partir del método de Molland y al. (1994).....	47
2.5. Método de Ping-Zhong.....	48

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RESISTENCIA.....	52
1. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FORMA DEL MONOCASCO, MÉTODO DE ARMSTRONG.....	53
1.1. Caso de estudio	53
1.2. Comparación con caso de referencia.....	55
2. CÁLCULO DEL FACTOR DE FORMA PARA EL CATAMARÁN.....	57
2.1. Cálculo del factor de forma para el catamarán.....	57
2.2. Comparación con caso de referencia.....	58
3. MÉTODO DE SAHOO, BROWNE Y SALAS (2004) PARA CATAMARANES DE PANTOQUE REDONDEADO.....	59
3.1. Caso de estudio	59
3.2. Comparación con caso de referencia.....	63
4. MÉTODO DE MOLLAND Y AL. (1994).....	66
4.1. Caso de estudio	66
4.2. Caso de referencia	68
5. MÉTODO DE PING-ZHONG.....	69
5.1. Caso de estudio	69
5.2. Caso de referencia	71
6. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS	74
6.1. Comparación del coeficiente de resistencia por formación de olas	74
6.2. Comparación del coeficiente de resistencia total	75
6.3. Conclusión.....	76
CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS CFD.....	77
1. INTRODUCCIÓN	78
2. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	78
2.1. Ventajas.....	78
2.2. Inconvenientes.....	79
3. CAMPOS DE APLICACIÓN	79
3.1. Campos de aplicación en la hidrodinámica.....	79
4. MODELOS FÍSICO-MATEMÁTICOS	81
4.1. Modelo de flujo potencial	81
4.2. Modelos para flujo ideal.....	82
4.3. Modelos para flujos ideales, estacionarios y rotacionales.....	82
4.4. Solución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes	82
4.5. Modelos parabólicos de las ecuaciones de Navier-Stokes	83
4.6. Modelos de flujo incompresible.....	83
4.7. Modelos para la resolución de las turbulencias.....	84
4.7.1. Simulación directa de las ecuaciones (“Direct Simulation”, DS)	84
4.7.2. Simulación directa de grandes vórtices (“Large Eddy Simulation”, LES)	84
4.7.3. Modelos URANS (“Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes”).....	84
4.7.4. Modelos que promedian las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS)	85

4.8. Modelos de turbulencia	86
4.8.1. Modelos algebraicos.....	86
4.8.2. Modelos de ecuación de energía cinética turbulenta.....	87
4.8.3. Modelos de una ecuación de cierre	88
4.8.4. Modelos de dos ecuaciones de cierre	89
5. TÉCNICAS EMPLEADAS EN CFD	92
5.1. BOUNDARY ELEMENT METHODS (BEM)	92
5.2. FINITE DIFFERENCE METHODS (FDM)	92
5.3. FINITE ELEMENT METHODS (FEM)	92
5.4. FINITE VOLUME METHODS (FVM).....	93
5.5. MÉTODOS ESPECTRALES	93
CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE CFD PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA.....	94
1. TDYN.....	95
1.1. TDYN CFD+HT	95
2. DEFINICIÓN DEL MODELO Y DE LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA	96
2.1. Definición del volumen de control.....	96
2.1.1. Tamaño del volumen de control.....	96
2.1.2. Utilización de la "cuchara"	96
2.1.3. Definición de las condiciones de contorno.....	99
2.2. Selección del Modelo de Turbulencia.....	99
2.3. Selección del tamaño de malla	100
3. APLICACIÓN PARA DISTINTAS VELOCIDADES	102
3.1. Componentes de la fuerza	102
3.2. Mínima y máxima elevación de la ola.....	103
3.3. Perfil de la altura de ola.....	104
3.4. Presiones sobre el casco	106
4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	108
5. CONCLUSIONES	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111

NOMENCLATURA

A_F	Área de la flotación
A_T	Área del espejo
A_{ST}	Área sumergida del espejo
B	Manga del monocasco en la flotación
B_{DELFT}	Manga total del catamarán DELFT-372
B_F	Manga total de la flotación
B_{media}	Manga media obtenida de la base de datos de catamaranes
B_T	Manga total
B/T	Relación manga-calado
C_A	Coefficiente de correlación
C_B	Coefficiente de bloque
C_F	Coefficiente de resistencia de fricción, según la línea ITTC-57
$C_{F,CFD}$	Coefficiente de resistencia de fricción obtenido por CFD
C_M	Coefficiente de la maestra
C_P	Coefficiente prismático
C_{WCAT}	Coefficiente de resistencia por formación de olas del catamarán
C_{WMONO}	Coefficiente de resistencia por formación de olas del monocasco
C_{WP}	Coefficiente de la flotación
C_R	Coefficiente de resistencia residuo
C_T	Coefficiente de resistencia total
C_V	Coefficiente de esbeltez
Fn	Número de Froude, $Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}}$
g	Aceleración de la gravedad $9,81 \text{ m/s}^2$
i_E	Semiángulo de entrada en la flotación
KB	Altura del centro de carena sobre la base
L o L_f	Eslora en la flotación
L_C	Longitud de la cuchara
L_0	Longitud de onda característica
LCB	Posición longitudinal del centro de carena (desde el espejo)
LCF	Posición longitudinal del centro de flotación (desde el espejo)
LCG	Posición longitudinal del centro de gravedad (desde popa)
L_{PP}	Eslora entre perpendiculares

L_T	Eslora total
P_{FX}	Componente longitudinal de la fuerza de presión
Re	Número de Reynolds, $Rn = \frac{VL}{\nu}$
R_{TCAT}	Resistencia total del catamarán
R_{TMONO}	Resistencia total del monocasco
s	Separación (medida entre los planos centrales de los monocascos)
s/L	Relación separación eslora
S	Superficie mojada
T	Calado
V	Velocidad
V_{FX}	Componente longitudinal de la resistencia viscosa
$(1+k)_{mono}$	Factor de forma del monocasco
$(1+\gamma k)$	Factor de forma viscoso para catamaranes
β	Ángulo de astilla muerta, medido según Lloyds Register
γ	Factor de interferencia viscosa
ρ	Densidad del fluido
τ	Factor de interferencia de la resistencia por formación de olas
ν	Viscosidad cinemática del fluido
Δ	Desplazamiento
∇	Desplazamiento volumétrico

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características geométricas DELF-372.....	28
Tabla 2.2. Características principales catamaranes seleccionados.....	30
Tabla 2.3. Dimensiones del modelo a escalar.....	31
Tabla 2.4. Características del modelo escalado.....	32
Tabla 2.5. Características hidrostáticas al calado de proyecto	33
Tabla 2.6. Características hidrostáticas a distintos calados, 0,5 metros por encima y por debajo del calado de proyecto, sin trimado ni escora	34
Tabla 3.1. Métodos de predicción de resistencia catamaranes	40
Tabla 3.2. Factor de forma del monocasco, (Armstrong, 2000).....	42
Tabla 3.3. Factor de forma viscoso de catamaranes (Molland et al, 1994)	43
Tabla 3.4. Coeficientes de regresión para ecuación 3.6	43
Tabla 3.5. Series sistemáticas de catamaranes (Sahoo, Browney y Salas, 2004)	44
Tabla 3.6. Hidrostáticas de series sistemáticas (Sahoo, Browney y Salas, 2004).....	44
Tabla 3.7. Coeficientes de regresión e índice de confianza (R^2) para ecuación (3.7)	46
Tabla 3.8. Coeficientes de regresión e índice de confianza (R^2) para ecuación (3.8) ...	46
Tabla 3.9. Coeficientes de regresión e índice de confianza (R^2) para ecuación (3.9)	47
Tabla 3.10. Variables Método de Ping-Zhong.....	49
Tabla 3.11. Variables Xi, Método de Ping-Zhong	49
Tabla 3.12. Constantes Bi, Método de Ping-Zhong.....	50
Tabla 4.1. Parámetros para el factor de forma del monocasco.....	53
Tabla 4.2. Cálculo del factor de forma del monocasco	53
Tabla 4.3. Características del catamarán de referencia para el Método de Armstrong y el Método de Sahoo.....	55
Tabla 4.4. Cálculo del factor de forma del monocasco para el caso de referencia.....	55
Tabla 4.5. Cálculo del factor de forma del catamarán.....	57

Tabla 4.6. Cálculo del factor de forma del catamarán	57
Tabla 4.7. Cálculo del factor de forma del casco de referencia.....	58
Tabla 4.8. Coeficientes de la resistencia por formación de olas	59
Tabla 4.9. Componentes y coeficiente de resistencia total	60
Tabla 4.10. Resistencia total del catamarán calculada por el Método de Sahoo, para distintas velocidades.....	61
Tabla 4.11. Componentes y coeficiente de resistencia total del catamarán referencia ..	62
Tabla 4.12. Resistencia total del catamarán de referencia calculada mediante el Método de Sahoo, para distintas velocidades.....	63
Tabla 4.13. Coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, Método Molland y al.	63
Tabla 4.14. Cálculo de la resistencia total, Método Molland	67
Tabla 4.15. Cálculo de las variables del método de Ping-Zhong.....	69
Tabla 4.16. Cálculo de los coeficientes de resistencia así como de la resistencia total de uno de los monocascos del catamarán a partir del método de Ping-Zhong	69
Tabla 4.17. Resistencia del catamarán, método de Ping-Zhong.....	70
Tabla 4.18. Características del buque de referencia.....	71
Tabla 4.19. Variables del buque de referencia.....	71
Tabla 4.20. Cálculo de los coeficientes de resistencia y de la resistencia total del buque referencia, Método de Ping-Zhong.....	72
Tabla 4.21. Resumen de los resultados del Método de Sahoo.....	76
Tabla 6.1. Dimensiones del volumen de control	96
Tabla 6.2. Tamaños de malla definidos en los últimos pasos de optimización de la misma	100
Tabla 6.3. Números de Froude y velocidades para los que se han realizado las simulaciones	101
Tabla 6.4. Resultados obtenidos mediante CFD para el catamarán de estudio	102
Tabla 6.5. Valor y posición de ola máxima y mínima.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Catamarán Herreshoff Duplex, navegando en el río Támesis, Londres. Construido en Rhode Island USA, en 1877	19
Figura 1.2. Catamarán de alta velocidad de tipo SWATH, “SWATCH Planet”	20
Figura 1.3. Catamarán tipo SES	21
Figura 1.4. Catamarán Militar de tipo WAVE PIERCER.....	21
Figura 1.5. Catamarán deportivo	22
Figura 1.6. Catamarán crucero a vela, “Hemisphere, Pendennis Shipyard”	23
Figura 1.7. Catamaranes dedicados al turismo de lujo en el lago Titicaca	23
Figura 1.8. Catamarán ferry de transporte de pasajeros de Tasmania, “Kilimanjaro IV”	24
Figura 1.9. Catamarán HSV Sea Slice de la armada de Estados Unidos	24
Figura 2.1. Formas de secciones de catamaranes	26
Figura 2.2. Secciones asimétricas y simétricas	26
Figura 2.3. Plano de formas DELFT-372	28
Figura 2.4. Modelización 3D DELFT-372	28
Figura 3.1. Caja de cuadernas de los modelos 1 al 7 (Sahoo, Browne y Salas, 2004)..	45
Figura 5.1. Los CFDs facilitan el diseño del sistema de propulsión, en la figura se muestra la distribución de presiones.....	80
Figura 6.1. Espejo no sumergido y espejo sumergido.....	96
Figura 6.2. Modelo de estudio, en Tdyn con las cucharas correspondientes para el número de Froude.....	97
Figura 6.3. Entidades geométricas que definen el problema.....	98
Figura 6.4. Ensayo del modelo sin la utilización de cucharas.....	98
Figura 6.5. Condiciones de contorno.....	99
Figura 6.6. Ejemplo de mallado	101
Figura 6.7. Altura de ola máxima y mínima para F_n igual a 0,5.....	103
Figura 6.8. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,9	104
Figura 6.9. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,5	104

Figura 6.10. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,4	105
Figura 6.11. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,3	105
Figura 6.12. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,9	106
Figura 6.13. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,5	106
Figura 6.14. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,4	107
Figura 6.15. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,3	107

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Representación eslora frente manga catamaranes seleccionados.....	30
Gráfica 2.2. Representación eslora frente manga subgrupo de catamaranes	31
Gráfica 2.3. Curva de áreas seccionales (no escalada).....	33
Gráfica 2.4. Representación de los coeficientes, C_P , C_B , C_{WP}	35
Gráfica 2.5. Curva de la variación del desplazamiento para distintos calados.....	35
Gráfica 2.6. Curva de variación de superficie mojada a distintos calados	36
Gráfica 2.7. Curva de variación del área de flotación a distintos calados.....	36
Gráfica 2.8. Curva de variación de la posición longitudinal del centro de carena a distintos calados	37
Gráfica 2.9. Curva de variación de la posición longitudinal del centro de flotación a distintos calados	37
Gráfica 2.10. Curva de variación de la altura del centro de carena sobre la base a distintos calados.....	38
Gráfica 4.1. Representación del factor de forma del monocasco calculado para distintos números de Froude.....	54
Gráfica 4.2. Representación del factor de forma del monocasco calculado para el caso de referencia.....	56
Gráfica 4.3. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del monocasco, obtenido por el Método de Sahoo, frente al número de Froude	59
Gráfica 4.4. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, obtenido por el Método de Sahoo, frente al número de Froude	60
Gráfica 4.5. Representación de la contribución de los coeficientes, de formación de olas del catamarán y de fricción, al coeficiente de resistencia total.....	61
Gráfica 4.6. Estimación de la resistencia total del catamarán de estudio mediante el Método de Sahoo	62
Gráfica 4.7. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del monocasco del catamarán de referencia, obtenido por el Método de Sahoo	63
Gráfica 4.8. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán de referencia, Método de Sahoo	64

Gráfica 4.9. Estimación de la resistencia total del catamarán de referencia mediante el Método de Sahoo	64
Gráfica 4.10. Representación de los coeficientes de resistencia total del catamarán de referencia y del catamarán de estudio, calculados mediante el Método de Sahoo	65
Gráfica 4.11. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán calculado mediante el método de Molland y al.	66
Gráfica 4.12. Estimación de la resistencia total, Método de Molland.....	67
Gráfica 4.13. Comparación de la resistencia total obtenida por el Método de Molland y por el Método de Sahoo	68
Gráfica 4.14. Representación de coeficiente de resistencia por formación de olas para distintos catamaranes de pantoque redondeado, calculado por el Método de Molland et al.....	68
Gráfica 4.15. Estimación de la resistencia total, Método de Ping-Zhong	70
Gráfica 4.16. Representación del coeficiente de resistencia total del buque de referencia calculado mediante el Método de Ping-Zhong	72
Gráfica 4.17. Estimación de la resistencia total del buque de referencia mediante el Método de Ping-Zhong	72
Gráfica 4.18. Comparación de los coeficientes de resistencia total obtenidos por el método de Ping-Zhong para el catamarán y el buque de referencia	73
Gráfica 4.19. Comparación de los coeficientes de resistencia por formación de olas obtenidos por el Método de Sahoo y por el Método de Molland y al.....	74
Gráfica 4.20. Comparación de los coeficientes de resistencia total obtenidos por todos los métodos	75
Gráfica 4.21. Comparación de la resistencia total obtenidos por el Método de Sahoo y el Método de Ping-Zhong para el catamarán de estudio.....	75
Gráfica 4.22. Resistencia total del catamarán calculada mediante el Método de Sahoo	76
Gráfica 6.1. Representación de las fuerzas obtenidas mediante CFD para el catamarán de estudio ensayado a distintas velocidades	102
Gráfica 6.2. Representación de las resistencias totales teniendo en cuentas distintas formas de cálculo del factor de forma del catamarán	106

PRESENTACIÓN

En este proyecto se pretende realizar una estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de una embarcación catamarán con pantoque redondeado mediante métodos numéricos.

A partir de métodos numéricos de predicción de resistencia se estima la resistencia del catamarán. No todos los métodos son aplicables a catamaranes, y de los métodos válidos para catamaranes, no todos son aplicables al caso particular de estudio. Para encontrar el método más adecuado al catamarán de estudio es necesario la comparar más de un método.

Con la herramienta CFD (Computational Fluid Dynamics), mecánica de fluidos computacional, se obtiene una predicción de resistencia de remolque bastante fiable.

El catamarán de estudio corresponde a un modelo DELFT 372, el cual se utiliza de referencia para numerosos estudios de validación de resistencia. El modelo es escalado de manera que los resultados obtenidos sean aplicables a catamaranes reales. Las dimensiones principales para realizar la escala se obtienen a partir de una base de datos de catamaranes de distintas características.

Con la finalidad de obtener resultados de métodos distintos los métodos utilizados son: el Método de Molland et al, el Método de Sahoo y el Método de Ping-Zhong.

Tanto el Método de Molland et al, como el Método de Sahoo, son métodos de predicción de resistencia específicos para catamaranes. Esto último no quiere decir que sean aplicables al caso de estudio, hay que comprobar que los resultados son válidos, ya que depende de más variables además del tipo de buque.

También se aplica el Método de Ping-Zhong. Este método es propio de buques monocasco con pantoque redondeado. La aplicación de un método de monocasco para la predicción de resistencia de un catamarán no es correcta, sin embargo los resultados permiten comprobar cuál de los métodos aplicables a catamaranes es mejor. Para verificar la correcta aplicación de los métodos se establece un caso de referencia, de resultados son conocidos.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos por los tres métodos, anteriormente citados, así como la comparación con los resultados obtenidos por CFD se determina cual de los Métodos es el más aplicables al caso de estudio.

Se pretende determinar la resistencia de remolque del catamarán, comprobando cual de los métodos aplicados se ajusta más al caso de estudio y comprobando las diferencias que se establecen entre los resultados obtenidos por CFD con los resultados obtenidos mediante métodos de predicción.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL CATAMARÁN

1. INTRODUCCIÓN AL CATAMARÁN

Catamarán es el nombre que recibe el buque de dos cascos. Hasta hace muy poco se consideraba que el catamarán se comportaba mucho peor que un buque de un solo casco, debido a su mayor resistencia a la marcha a bajas velocidades.

A pesar de estos inconvenientes el catamarán rápido se ha convertido en un popular medio de transporte de pasajeros en todo el mundo. Debido principalmente a su buena estabilidad transversal, a la posibilidad de alcanzar altas velocidades y a un área de cubierta por tonelada de desplazamiento mucho mayor que la de un monocasco.

2. VENTAJAS Y PROBLEMAS DEL CATAMARÁN SOBRE EL BUQUE MONOCASCO

Las ventajas del catamarán sobre el buque monocasco se basan en dividir el desplazamiento entre dos cuerpos paralelos entre sí, separados transversalmente y conectados por una estructura de unión. Esto supone principalmente:

- Relación desplazamiento-eslora de cada cuerpo del catamarán menor que la de un buque monocasco de la misma eslora. Lo que permite proyectar los cuerpos minimizando la resistencia a alta velocidad sin preocuparse por la pérdida de estabilidad que provocan las formas finas.
- Estabilidad transversal mucho mayor que la de un buque monocasco de misma eslora o desplazamiento debido a su gran momento de inercia de la flotación.
- Área útil de cubierta mayor que la de un monocasco de misma eslora o desplazamiento.
- Buen momento de giro al maniobrar con las hélices, que se encuentran bastante separadas transversalmente al situarse en la popa de los cascos.

Los principales problemas que plantea el proyecto de una embarcación de dos cascos son:

- Mal comportamiento a baja velocidad debido a una mayor superficie mojada que la que tendría el monocasco de misma eslora o desplazamiento.
- Baja relación carga útil-peso de la estructura debido al peso que supone la estructura de unión entre los dos cuerpos.
- La parte baja de la estructura de unión de los dos cascos sufre fuertes cargas hidrodinámicas por el impacto de las olas al navegar por mares agitados. Para evitarlo es necesario mantener la estructura a suficiente distancia, por lo que no pueden permitirse grandes variaciones de calado. En general, el catamarán admite pocas variaciones en el peso de la carga a transportar.

3. APLICACIÓN DEL CATAMARÁN

La mayoría de los catamaranes recientemente construidos son transbordadores o buques ferry para viajes cortos que se mueven en la zona de semiplano y que poseen una excelente estabilidad transversal y una buena maniobrabilidad. La eslora de estas embarcaciones varía entre 20 y 40 metros, mientras que el número de pasajeros que son capaces de transportar oscila entre cien y cuatrocientos.

Aunque la aplicación principal del catamarán es como buque rápido, a veces se utiliza como embarcación lenta si lo que se busca son cualquiera de sus otras cualidades.

Uno de los usos más frecuentes del catamarán es como yate de vela. El yate de vela de un solo casco lleva normalmente lastre para contrarrestar el par escorante producido por las velas. Los barcos de más de un casco no llevan lastre, ya que la separación transversal que hay entre los cuerpos les da suficiente estabilidad, permitiéndoles llevar más superficie vélica que la que llevaría un monocasco equivalente, sin que por ello peligre su seguridad.

4. RESISTENCIA AL AVANCE

En general, en la zona de bajos valores del número de Froude (baja velocidad) la resistencia al avance de un catamarán es mayor que la de una embarcación de un solo casco de misma eslora o desplazamiento debido a que para esas velocidades predomina la resistencia de fricción. Los catamaranes tienen mayor resistencia de fricción que los monocascos principalmente debido a su superficie mojada. Sin embargo su resistencia por formación de olas a altos números de Froude es menor en comparación con los modelos monocasco, debido principalmente a sus esbeltos monocascos.

La característica fundamental de la resistencia al avance de los catamaranes, y la que representa la mayor complejidad, es la que aparece como consecuencia de la interferencia de los flujos que rodean a cada uno de los cuerpos. Esta interferencia se debe a los sistemas de olas generados por cada cuerpo y al cambio de flujo alrededor de un casco, debido a la presencia del otro. Estas dos interferencias pueden aumentar o disminuir la resistencia total del catamarán.

Cabe destacar que mientras la resistencia de un monocasco es función únicamente de su geometría, de un catamarán depende de la separación entre sus cascos. En general, la resistencia es mayor cuanto más próximos están los cascos y va disminuyendo a medida que la distancia transversal entre ellos se va haciendo mayor, llegándose a un punto en que, aunque se aumente la separación, la resistencia ya no disminuye. El aumento de la separación entre cascos conlleva un gran incremento en el peso debido a una estructura de unión más resistente.

Tradicionalmente se ha aceptado la utilización de la línea ITTC-1975 acompañada de un factor de forma. El factor de forma se utiliza para estimar la componente total de la resistencia viscosa. En el catamarán, el factor de forma incluye los efectos de la interacción entre los monocascos: cambios en la capa límite debidos a la modificación del campo de presiones alrededor de los monocascos, y la influencia en la resistencia de fricción debida al aumento de la velocidad entre los monocascos.

El interés principal, en el campo de los catamaranes de alta velocidad, es una apropiada magnitud del factor de forma y su dependencia con el casco y con los parámetros operacionales. La solución no se puede generalizar mediante una simple fórmula, además varía con las distintas configuraciones de los catamaranes.

5. TIPOS DE CATAMARÁN

Es necesario ubicar el catamarán entre los demás tipos de tipos de barcos, así como, distinguir dentro de la categoría de catamarán los distintos tipos que existen.

5.1. Clasificación general de buques

Hay diversas formas de clasificar los distintos tipos de barco. Según procedimientos de diseño comunes, o según la dimensión crítica, puede establecerse la siguiente clasificación:

- Buques de peso muerto, su peso muerto es decisivo en las características de diseño. Los bulk carriers y los petroleros son los representantes típicos de esta categoría
- Buques de volumen, el condicionante más exigente es el volumen de bodegas o tanques de carga. Estos buques transportan cargas relativamente ligeras con un factor de estiba de más de 2 m³/t (por ejemplo: algodón, frutas, equipamiento electrónico,...)
- Buques de dimensiones lineales, con una dimensión lineal (eslora, manga, puntal) restringida por condiciones externas o limitadas por la capacidad de carga. Las restricciones de estos buques se deben, principalmente a los canales de paso que requieran las rutas de navegación.
- Buques para cargas modulares, transportan cargas de tamaño normalizado. Las dimensiones principales del buque varían en cantidades discretas, dependientes de las dimensiones de los módulos normalizados. Los buques típicos de esta categoría son los portacontenedores.
- Buques de servicio, su parámetro principal de dimensionamiento es la estabilidad. El buque típico es el remolcador.
- Buques de propósitos especiales. Estos buques no pueden ser categorizados por ninguna de las categorías anteriores debido a sus condiciones especiales de diseño y operación. Como por ejemplo: rompehielos, pesqueros, costeros... De la misma manera, todos los barcos no convencionales son intrínsecamente son barcos de propósitos especiales, y su diseño depende enormemente del tipo específico, del tamaño y la velocidad (dentro de las embarcaciones de alta velocidad se encuentran los navíos multicasco: catamaranes, trimaranes, vehículos de colchón de aire,...).

5.2. Tipos de catamarán, Clasificación I

5.2.1. *Catamarán*

Buque compuesto por dos monocascos similares, separados cierta distancia transversal y unidos mediante una estructura en forma de viga resistente. Generalmente navega a medias o altas velocidades (puede planear o hacerlo parcialmente).

A partir del catamarán tradicional surgen distintos híbridos que se describen en los siguientes subapartados.

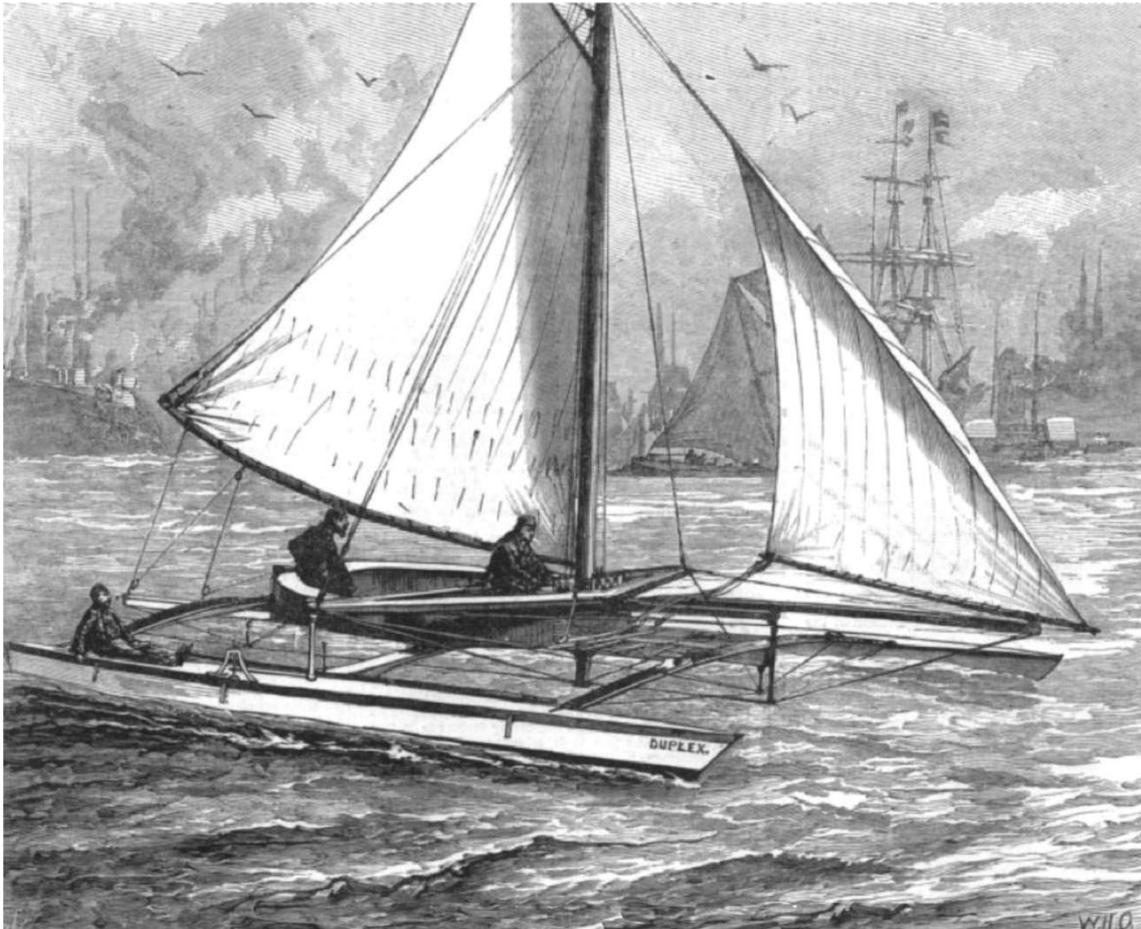


Figura 1.1. Catamarán Herreshoff Duplex, navegando en el río Támesis, Londres. Construido en Rhode Island USA, en 1877.

5.2.2. *SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull)*

Tipo de catamarán de área de flotación pequeña para bajas, medias y relativamente altas velocidades (hasta 35 nudos, dependiendo del tamaño del buque); caracterizado por un comportamiento excelente en el mar, navegando a alta velocidad.

Esta configuración reduce la resistencia por formación de olas trasladando volumen de desplazamiento bajo la línea de flotación utilizando dos cascos tubulares, similares a los de un submarino, unidos a la cubierta por secciones transversales estrechas. Al principio este diseño se utilizó en navíos de investigación oceanográficos o barcos de rescate, posteriormente en aplicaciones militares.

Comparado con el catamarán tradicional este modelo presenta:

- Una plataforma estable incluso en mares severos. Tiene bajos movimientos, aceleraciones y resistencia en olas.
- Mayor área de cubierta.
- Reducción significativa de la resistencia por formación de olas.
- Debido al incremento de superficie mojada la demanda de potencia es mayor, principalmente por una mayor resistencia por fricción.
- Capacidad de carga limitada; cambios de peso muerto generan cambios significativos en el calado, lo cual es importante por la cercanía de la estructura de unión a la superficie del agua, y en el trimado.

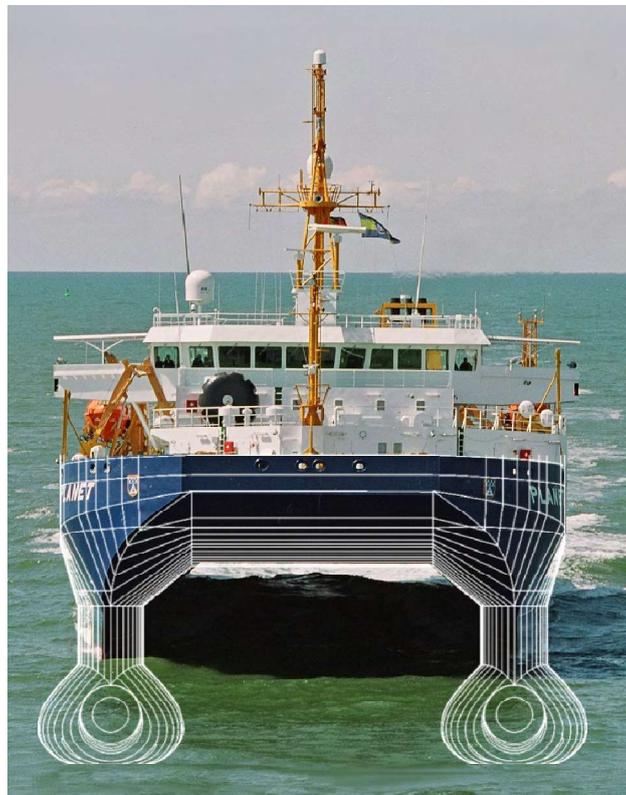


Figura 1.2. Catamarán de alta velocidad de tipo SWATH, “SWATCH Planet”.

5.2.3. SES (Surface Effect Ship)

Tipo de catamarán con colchón de aire de apoyo para altas velocidades (mayores de 40 nudos). Es similar a los buques con colchón de aire, pero sin los faldones laterales, mejorando el comportamiento en la mar y las características de carga.



Figura 1.3. Catamarán tipo SES.

5.2.4. WAVE PIERCER

Catamarán diseñado para que cada uno de los cascos atraviese las olas en lugar de pasar sobre ellas. Esto permite navegar a través de las olas, es decir en peores condiciones de navegación, a velocidades superiores. La velocidad suele ser mayor de 35 nudos, dependiendo del tamaño del catamarán.

La configuración de la cubierta entre cascos suele tener forma de V para permitir penetrar en la cresta de las olas. Este tipo de catamarán se utiliza para yates, ferries de pasajeros y embarcaciones militares.



Figura 1.4. Catamarán Militar de tipo WAVE PIERCER.

5.3. Tipos de catamarán, Clasificación II

Como se ha dicho anteriormente los catamaranes actuales están enfocados en su gran mayoría a aplicaciones que requieran altas velocidades. Para enumerar los distintos tipos de catamarán se puede establecer la siguiente clasificación: catamaranes propulsados vela y catamaranes propulsados por motor.

5.3.1. *Catamaranes de vela*

Es uno de los usos más frecuentes del catamarán como yate de vela. El desarrollo de materiales ligeros y de resinas especiales ha hecho posible aprovechar las ventajas de las embarcaciones de más de un casco sin un gran aumento de peso.

Dentro de esta categoría se encuentran:

- Catamaranes deportivos: diseñados para un número pequeño de tripulantes. La mayoría disponen de una tela elástica entre los dos monocascos, y un mástil para la vela. En esta aplicación se persiguen las altas velocidades propias de los catamaranes.



Figura 1.5. Catamarán deportivo.

- Crucero: la elección de un catamarán para este uso tiene las ventajas propias del catamarán como son mayores velocidades, y menor calado que permite navegar en profundidades menores. Pero también tiene desventajas como menor capacidad de carga frente a un monocasco y un gasto añadido por tener dos motores y dos timones.



Figura 1.6. Catamarán crucero a vela, “Hemisphere, Pendennis Shipyard”.

5.3.2. *Catamaranes propulsados por motor*

La configuración del catamarán en esta clasificación se aplica a navíos impulsados en los que se necesita velocidad y una gran área de cubierta para carga. Entre los más grandes se encuentran los transportadores de coches y los militares para patrulla y costeros.

- Cruceros: en esta aplicación el catamarán permite una gran estabilidad, minimizando los movimientos del barco en el agua. Además permite la disposición de amplias cubiertas para alojamiento y acomodaciones.



Figura 1.7. Catamaranes dedicados al turismo de lujo en el lago Titicaca.

- Transporte de pasaje o ferry: el catamarán es el medio más popular para el transporte de pasajeros sobre todo por su gran velocidad y amplias cubiertas.



Figura 1.8. Catamarán ferry de transporte de pasajeros de Tasmania, “Kilimanjaro IV”.

- Militar: utilizados principalmente para el transporte rápido de carga y para la entrada en puertos donde se requiere un calado pequeño.



Figura 1.9. Catamarán HSV Sea Slice de la armada de Estados Unidos.

CAPÍTULO 2. GENERACIÓN DE FORMAS

1. FORMAS EN CATAMARANES

La característica fundamental de los cascos de un catamarán es que pueden hacerse más finos y esbeltos que los de un monocasco de la misma eslora o del mismo desplazamiento, esto permite aprovechar sus ventajas en lo que resistencia al avance se refiere.

La finura de los cascos evita que la resistencia por formación de olas crezca mucho con la velocidad y facilita el que la embarcación pueda alcanzar altas velocidades. En un monocasco, debido principalmente al cumplimiento de los criterios de estabilidad, se goza de menos libertad para escoger las dimensiones y el resto de los parámetros de forma, de manera que la embarcación pueda superar la barrera hidrodinámica que supone la resistencia por formación de olas. Mientras en un monocasco la relación eslora-manga no es casi nunca mayor de cinco o seis a uno. En un catamarán rápido normalmente está entre nueve y once a uno. Esta relación es aún mayor en embarcaciones de vela de dos cascos, con relaciones de hasta veinte o veinticinco a uno en multicascos de regatas.

En las figura 2.1. y 2.2. se muestran en esquema diversas formas de secciones de catamaranes: asimétricas, simétricas, de fondo plano, redondo y elíptico.

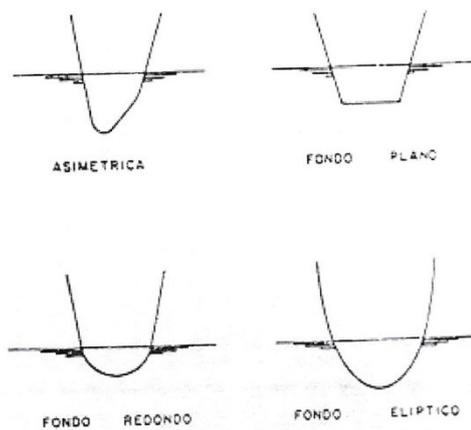


Figura 2.1. Formas de secciones de catamaranes.

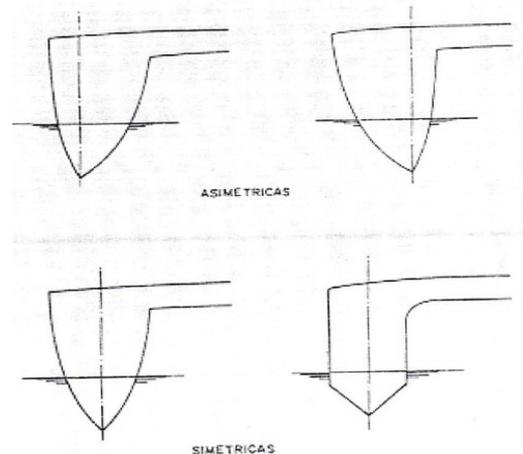


Figura 2.2. Secciones asimétricas y simétricas.

En cualquier caso, el que la estabilidad de la embarcación no dependa de las formas de los cascos permite utilizar formas no simétricas. En general, las formas de un catamarán se dividen en simétricas y asimétricas. La simetría o asimetría de un casco se refiere a la división del volumen de carena por el plano teórico de crujía. Dentro de las formas asimétricas están las que se conocen como partidas (Split out) que se obtienen al dividir por la línea de crujía el casco de un monocasco de alta velocidad y separar transversalmente las dos mitades una cierta distancia.

No hay una regla fija sobre qué forma es la más adecuada para un proyecto determinado de un catamarán rápido, cada una de las formas tiene una zona de aplicación, que depende de la velocidad y de la separación entre cascos.

A velocidades bajas, números de Froude de hasta 0,20, el uso de catamaranes no es por sus ventajas hidrodinámicas si no por otros motivos como una gran área de cubierta, una buena estabilidad o un espacio central protegido para tareas como investigación oceanográfica o submarina. Por ser el barco lento predomina la resistencia de fricción por lo que el que el barco sea simétrico no perjudica su comportamiento en aguas tranquilas. De todos modos, no es usual que los catamaranes se muevan en esta gama de velocidades.

La interferencia debida a las olas nace de la superposición de los sistemas de olas generados por cada uno de los cascos y puede modificar el valor, en gran medida, el valor de la resistencia por formación de olas del buque, especialmente en la zona de velocidad alta en la que esta clase de resistencia es grande. Para velocidades correspondientes a números de Froude entre 0,2 y 0,4, la interferencia de los sistemas de olas es muy importante. Por consiguiente, es la zona de velocidades en la que, en la elección de la separación entre cascos, deben tenerse en cuenta especialmente los criterios hidrodinámicos.

Para altas velocidades, una mala elección de la separación de los cascos puede hacer navegar la embarcación en un máximo de la resistencia por formación de olas. Para evitar cualquier tipo de interferencia se suelen utilizar cascos asimétricos, en los que se ha eliminado casi completamente la curvatura longitudinal del costado interior, haciendo más difícil el aumento de la resistencia.

Aunque la resistencia por formación de olas aumenta con la velocidad, la interferencia de los sistemas de olas pierde importancia. Además la embarcación empieza a generar una cierta sustentación dinámica, por lo que las formas deben ser las adecuadas para permitir el planeo del buque. Las formas simétricas son las adecuadas ya que se necesitan líneas que ayuden a crear sustentación dinámica quedando entonces la discusión entre formas redondas o con codillo. En un monocasco unas formas u otras dependen del número de Froude, en el catamarán no está tan claro, pues muchas desventajas de la forma redonda desaparecen por la unión de los cascos.

Cuando el catamarán planea completamente las formas pueden ser cualquiera de las citadas, simétricas o asimétricas, con la única condición de que deben ser adecuadas para el planeo. Las formas asimétricas para barcos que se muevan a altas velocidades suelen ser las divididas. Al planear completamente, el agua solo toca el fondo y no toca los costados, la superficie mojada es la misma que tendría el barco sin partir y se elimina el inconveniente de las formas asimétricas.

Las formas que tienen curvatura longitudinal en los costados interiores y los costados exteriores planos, para las separaciones más frecuentes, presentan una resistencia al avance muy superior a la de las formas simétricas o asimétricas con costados planos en el interior. Esto es debido a la gran perturbación que se crea en la superficie del agua en la zona entre los dos cascos. Además, al estrecharse el paso del fluido entre los cuerpos, la velocidad del agua entre los cascos aumenta, haciéndose mayor la resistencia de fricción.

2. MODELO BASE

El modelo elegido como modelo base es el catamarán DELFT 372, diseñado en la Universidad Tecnológica DELFT (1998). Las características geométricas están recogidas en la Tabla 2.1, el plano de formas del modelo en la figura 2.3. y el modelo 3D en la figura 2.4.

Tabla 2.1. Características geométricas DELFT-372.

Medida	Valor	Unidad
Eslora total, L_0	3,110	m
Eslora entre perpendiculares, L_{pp}	3,000	m
Manga total, B	0,940	m
Manga del semicasco, b	0,240	m
Distancia entre los centros de los cascos, s	0,700	m
Calado, T	0,150	m
Puntal, D	0,300	m
Desplazamiento	87,070	kg
Centro de gravedad vertical, KG	0,340	m
Centro de gravedad longitudinal, LCG	1,410	m

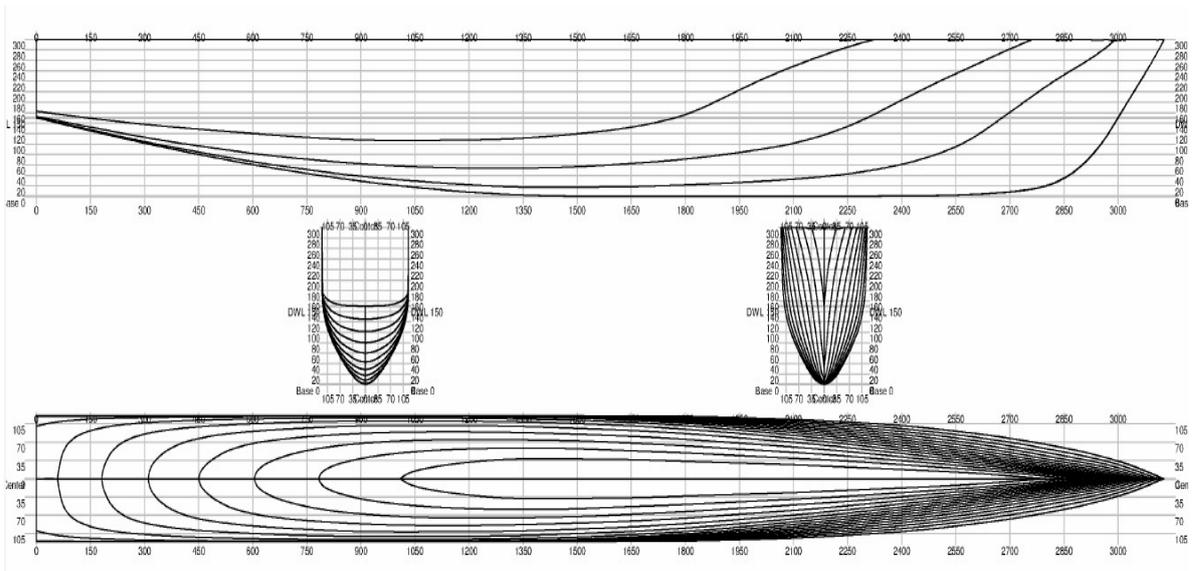


Figura 2.3. Plano de formas DELFT-372.



Figura 2.4. Modelización 3D DELFT-372.

3. DIMENSIONAMIENTO DEL BUQUE

3.1. Introducción

Se entiende por dimensionamiento de un buque la determinación de sus características principales, con un grado de precisión adecuado, en las primeras etapas de diseño del buque de forma que definan el buque más apropiado para el propósito para el cual ha sido concebido.

Para el dimensionamiento, en todos los casos, se comienza por la investigación de buques similares y fiables que configuren una base de datos de referencia. A partir de esta base de datos podrá establecerse uno o varios buques base, que servirán como referencia para ciertos cálculos.

A la hora de ejecutar el proyecto, existen diversas formas de enfrentarse a la estimación de las dimensiones aproximadas del buque. Se citan algunas:

- Mediante gráficos que representan el valor de las dimensiones principales en relación con la función objetivo. Gráficos obtenidos por regresión de muestras de buques actuales.
- Mediante tablas que indican los rangos normales de las relaciones dimensionales y el número de Froude.
- Mediante fórmulas analíticas que se han obtenido a partir de análisis de regresión.
- Mediante el análisis de una base de datos.
- A partir de un buque de características similares tomando como referencia (buque base).

3.2. Dimensionamiento a partir de base de datos.

Al partir de las formas de un modelo de experiencias es necesario ajustar sus dimensiones de forma que se correspondan con las de la embarcación buscada.

A partir de una base de datos de distintos catamaranes reales se obtiene la manga como dimensión característica. Al no partir de unos criterios previos, se escala el modelo a partir de la manga, debido a que haciéndolo con la eslora no se obtienen buenos resultados.

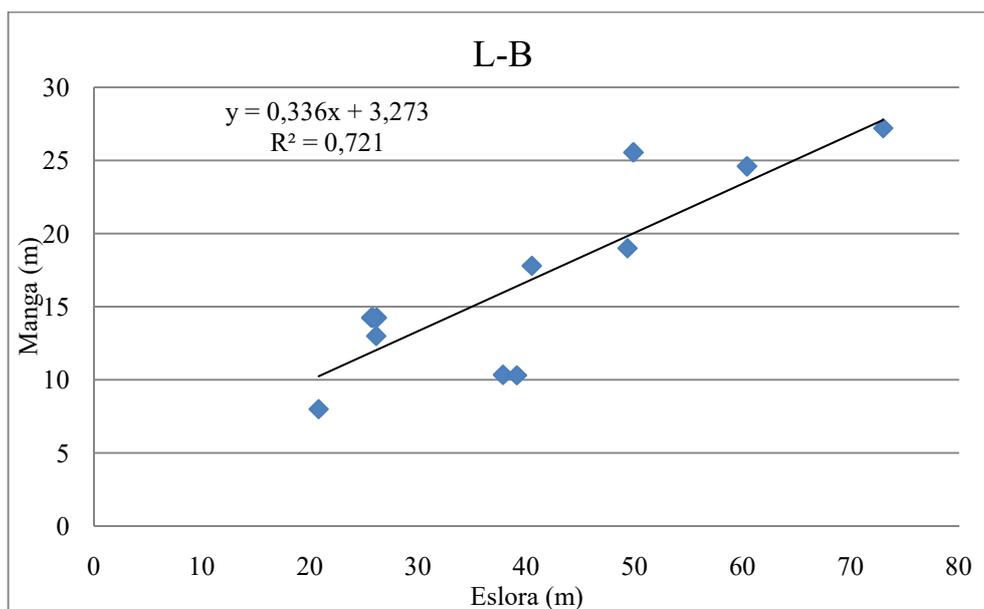
Con la base de datos, mediante regresión por mínimos cuadrados, se establece una aproximación de las dimensiones finales del buque. Realizando el escalado para la manga el resto de las dimensiones quedan definidas por el proceso de escala.

La base de datos completa es la lista de catamaranes reales recogida en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características principales catamaranes seleccionados.

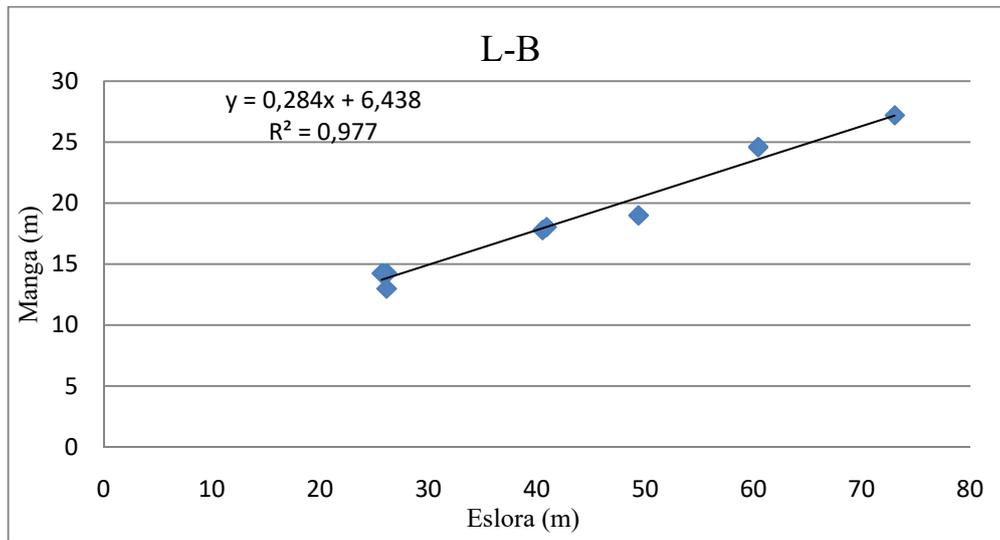
Catamarán	L(m)	B(m)	T(m)	Δ(t)	V(n)
Planet	73,000	27,200	6,800	3500,0	15,0
OPV	49,350	19,000	4,550	900,0	20,0
Pilot Tenders	25,650	14,250	2,700	129,0	18,0
Pilot Satation	49,900	25,550	5,900	1480,0	14,2
MCMV Demonstrator	26,150	14,250	3,200	132,9	16,0
Motor Yacht	40,500	17,800	4,100	597,0	14,0
Pilot Station Ship	60,400	24,600	6,000	1800,0	12,5
Windpark Tender	26,100	13,000	2,700	132,9	18,0
Patrol Boat	25,800	14,250	2,700	132,9	20,0
Seastreak	37,838	10,340	1,934	182,6	37,0
New York Water Taxi	20,781	8,000	1,642	57,3	26,0
Jet Cat Express	39,117	10,310	2,033	206,0	37,5

Representando la relación eslora-manga se pueden descartar los catamaranes que tengan unas dimensiones menos generalizadas. En el gráfico 2.1. se muestra la regresión de la lista inicial de catamaranes.



Gráfica 2.1. Representación eslora frente manga catamaranes seleccionados.

Descartando de la lista los buques: New York Water Taxi, Pilot Station Ship, Seastreak y Jet Cat Express, se obtiene una recta de regresión con una bondad de ajuste del 98%.



Gráfica 2.2. Representación eslora frente manga subgrupo de catamaranes.

A partir de las características del subgrupo seleccionado se pueden establecer la manga, calado y velocidad para el modelo. Dichas dimensiones son la media de las correspondientes a los catamaranes seleccionados, recogidas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dimensiones del modelo a escalar.

Medida	Valor	Unidades
Manga	18,000	m
Calado	4,100	m
Eslora	57,447	m
Velocidad	17,000	n

Siendo el factor de escala aplicado:

$$\alpha = \frac{B_{media}}{B_{DELFT}} = \frac{18}{0,940} = 19,149 \quad (2.1)$$

4. BUQUE PROYECTO

4.1. Dimensiones principales

Escalando la dimensión de la manga en el modelo base quedan definidas el resto de medidas, eslora, distancia entre monocascos y puntal. En la Tabla 2.4. se recogen todas las características del modelo una vez escalado.

Tabla 2.4. Características modelo escalado.

Medida	Valor	Unidad
Eslora total, L_T	59,921	m
Eslora entre perpendiculares, L_{PP}	57,447	m
Manga total, B_T	18,000	m
Manga del monocasco, B	4,596	m
Distancia entre los centros de los cascos, s	13,404	m
Calado, T	4,100	m
Puntal, D	5,745	m

4.2. Características hidrostáticas

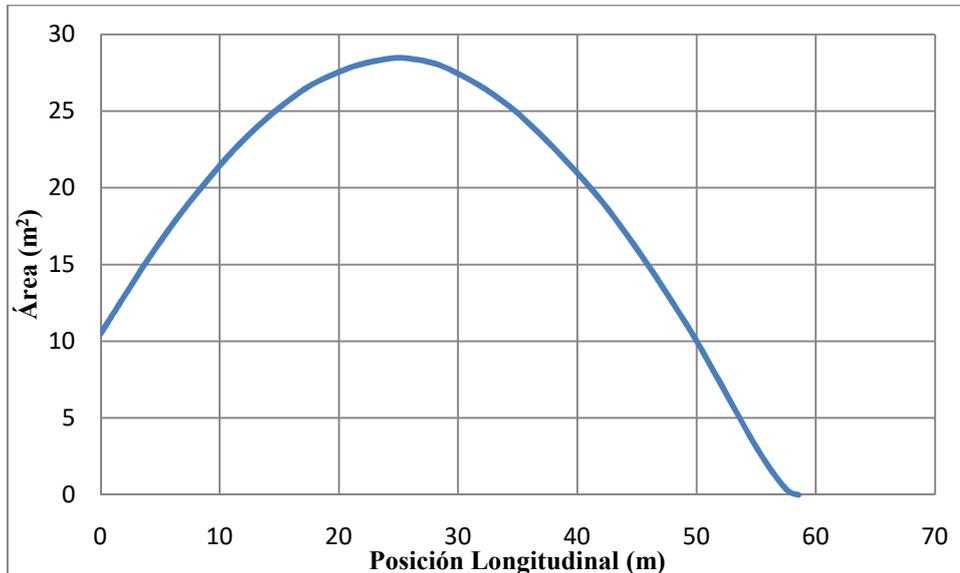
4.2.1. *Tablas de características hidrostáticas*

Mediante los programas Maxsurf Modeler y Rhinoceros se pueden obtener las características hidrostáticas de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características hidrostáticas al calado de proyecto.

Medida	Monocasco	Catamarán	Unidad
Δ	581,700	1163,000	t
∇	567,506	1135,012	m ³
T	4,100	4,100	
Lf	58,536	58,536	m
S	500,474	1006,189	m ²
A _F	221,195	442,389	m ²
A _M	21,793	43,587	m ²
A _T	12,808	25,616	m ²
C _p	0,682	0,682	-
C _b	0,514	0,514	-
LCB	25,786	25,786	m
LCF	24,681	24,681	m
KB	2,626	2,626	m
i _E	17,618	17,618	°
β	35,585	35,585	°

La curva de áreas se muestra en el siguiente gráfico:

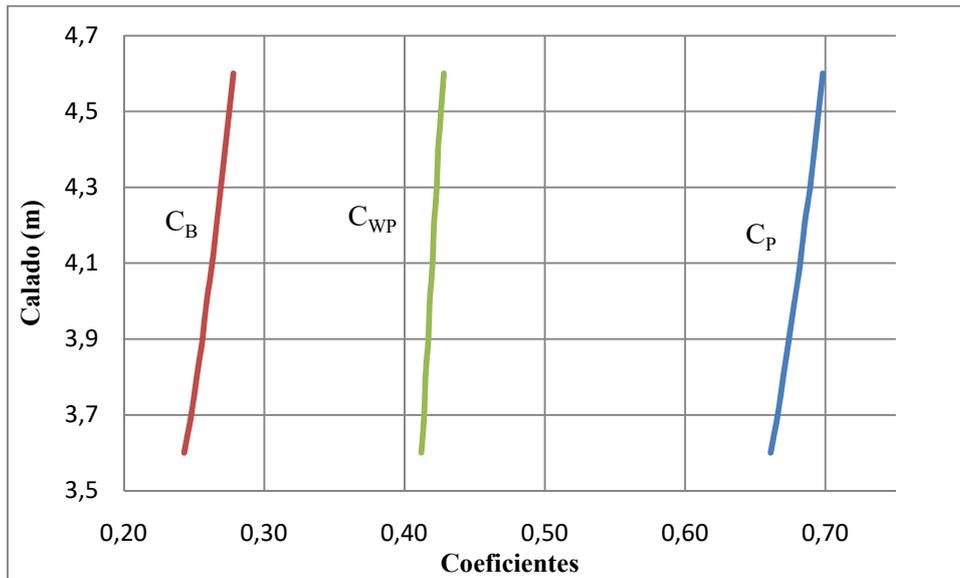


Gráfica 2.3. Curva de áreas seccionales (no escalada).

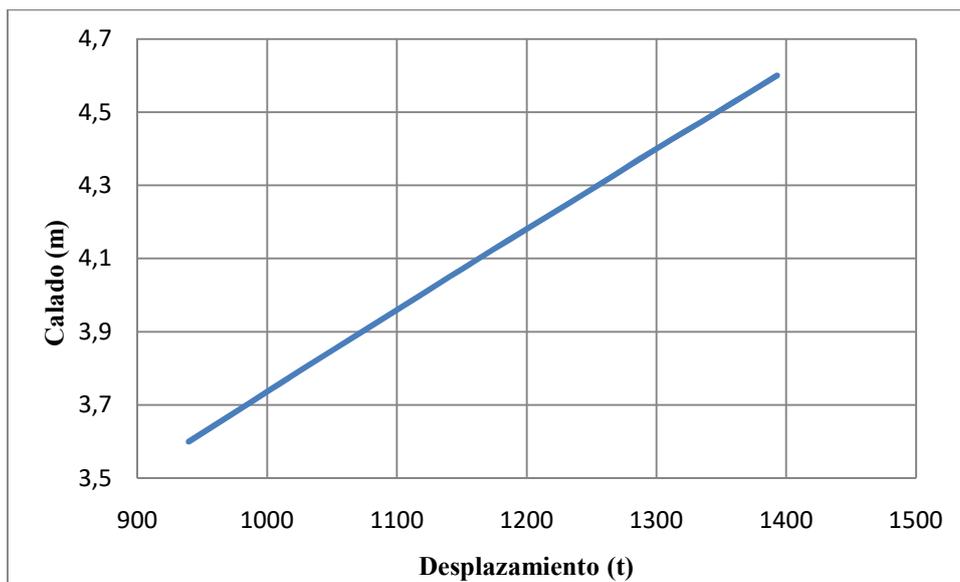
Tabla 2.6. Características hidrostáticas distintos calados, 0,5 metros por encima y por debajo del calado de proyecto, sin trimado ni escora.

T(m)	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
Δ (t)	939,5	983,8	1028	1073	1118	1163	1209	1255	1300	1347	1393
Lf(m)	58,094	58,183	58,271	58,36	58,448	58,536	58,625	58,713	58,801	58,886	58,968
B _F	18,002	18,002	18,002	18,001	18,001	18,001	18,001	18,001	18,001	18	18
S (m ²)	886,194	910,042	934,016	958,032	982,088	1006,189	1030,332	1054,518	1078,749	1103,022	1127,337
Af (m ²)	431,369	433,545	435,744	437,939	440,153	442,389	444,647	446,931	449,244	451,582	453,942
C _p	0,661	0,666	0,67	0,674	0,678	0,682	0,685	0,689	0,692	0,695	0,698
C _b	0,243	0,248	0,252	0,256	0,259	0,263	0,266	0,269	0,272	0,275	0,278
C _m	0,375	0,379	0,382	0,385	0,388	0,391	0,394	0,397	0,399	0,402	0,404
C _{wp}	0,412	0,414	0,415	0,417	0,418	0,42	0,421	0,423	0,424	0,426	0,428
LCB (m)	26,115	26,028	25,953	25,889	25,833	25,786	25,747	25,714	25,688	25,667	25,651
LCF (m)	24,14	24,245	24,353	24,461	24,57	24,681	24,793	24,906	25,021	25,137	25,253
KB (m)	2,334	2,394	2,452	2,511	2,569	2,626	2,683	2,741	2,797	2,854	2,911

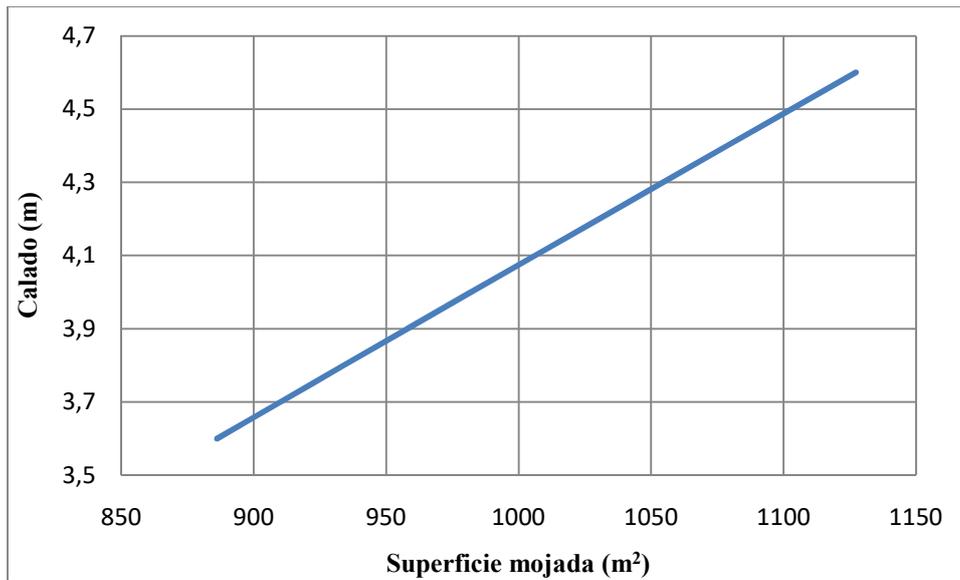
4.2.2. Curvas hidrostáticas



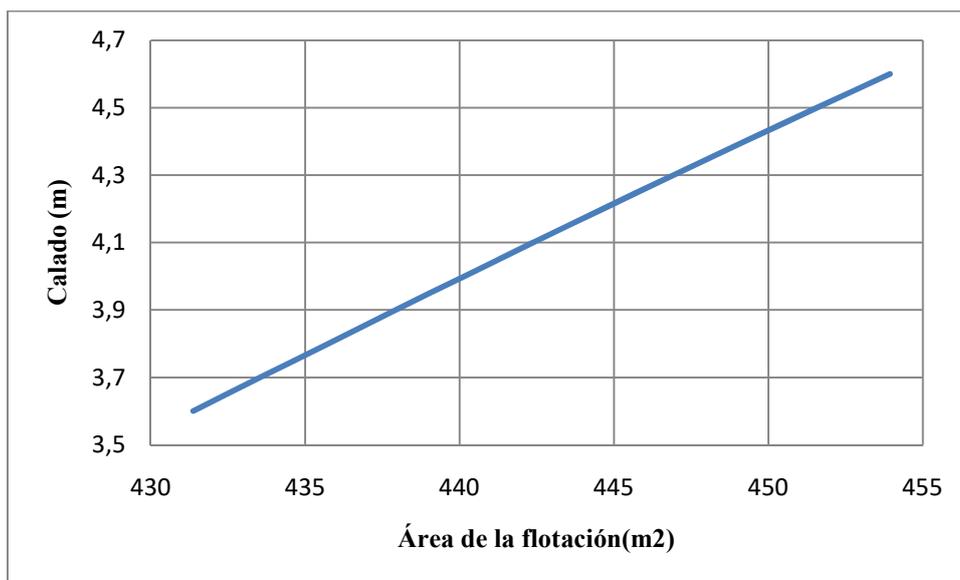
Gráfica 2.4. Representación de los coeficientes, C_P , C_B , C_{WP} .



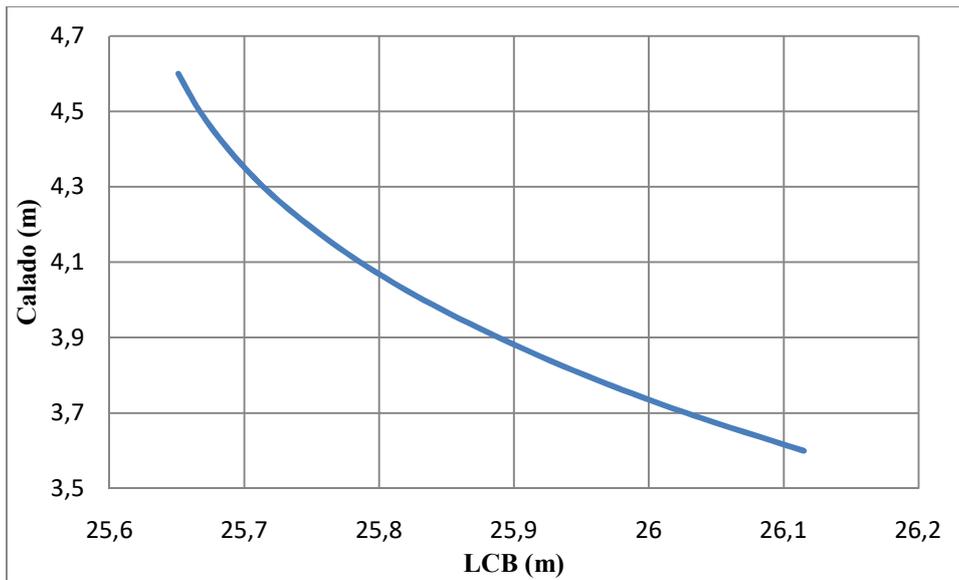
Gráfica 2.5. Curva de la variación del desplazamiento para distintos calados.



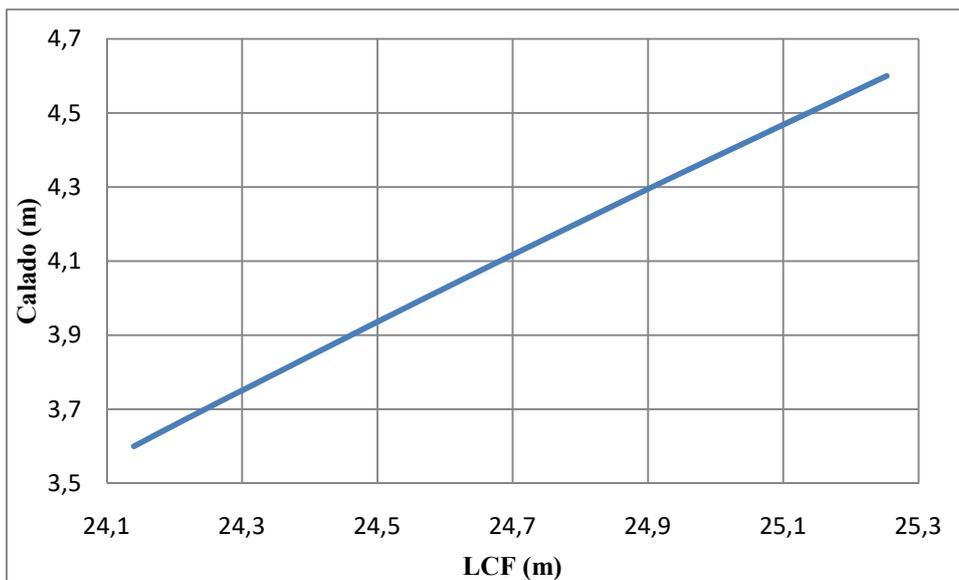
Gráfica 2.6. Curva de variación de superficie mojada a distintos calados.



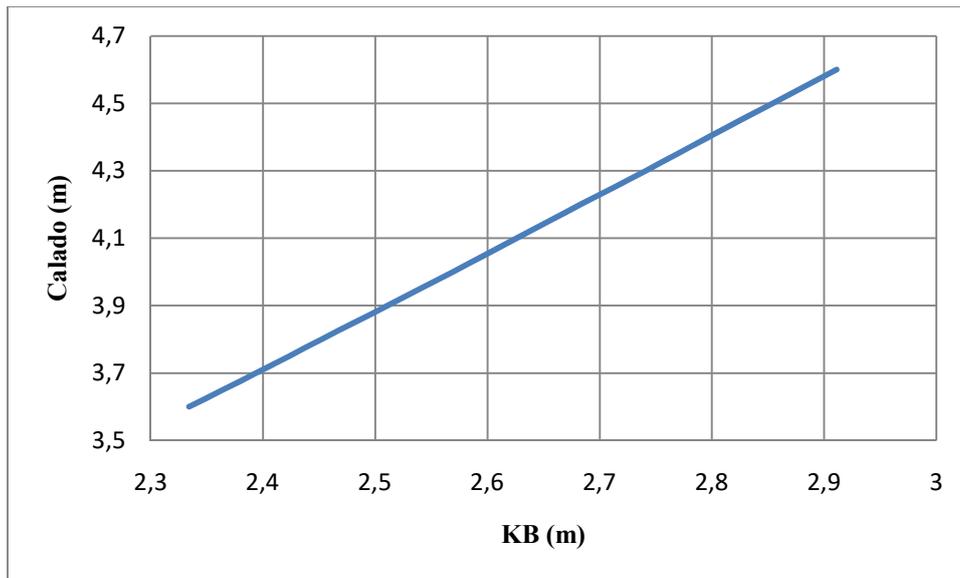
Gráfica 2.7. Curva de variación del área de flotación a distintos calados.



Gráfica 2.8. Curva de variación de la posición longitudinal del centro de carena a distintos calados.



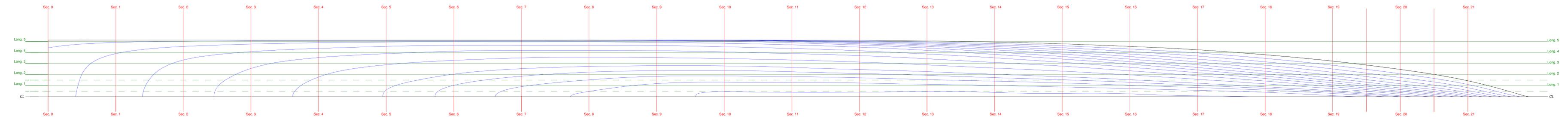
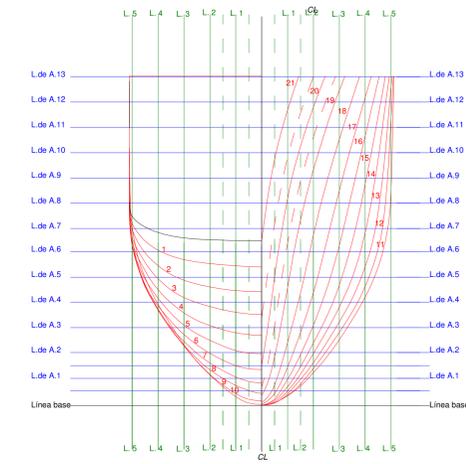
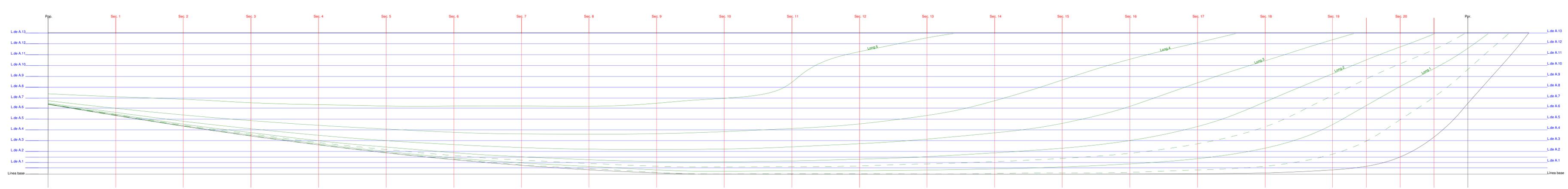
Gráfica 2.9. Curva de variación de la posición longitudinal del centro de flotación a distintos calados.



Gráfica 2.10. Curva de variación de la altura del centro de carena sobre la base a distintos calados.

4.2.3. Plano de formas

Se muestra el plano de formas en la siguiente página.



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Eslora total	59.921 m
Eslora entre perpendiculares	57.447 m
Calado de proyecto	4.100 m
Manga flot. proyecto	18.000 m

CARACTERÍSTICAS DE TRAZADO

Separación entre líneas de agua	0.441 m
Separación entre secciones	2.736 m
Separación entre longitudinales	0.450 m

Universidad Politécnica
de Cartagena

DELFT-372

PLANO DE FORMAS

ESCALA
1:50

ETSINO
2016

FDO. MARÍA MARTÍN MARTÍNEZ

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE POTENCIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción a los métodos

Los métodos de predicción de resistencia al avance en catamaranes han tenido un amplio desarrollo durante los años 90 y la primera década del siglo XXI. Dentro de los métodos de predicción de la resistencia pueden encontrarse diferentes tipos dependiendo del tipo de catamarán estudiado.

Tabla 3.1. Métodos de predicción de resistencia catamaranes.

Método	Tipo de catamarán	Obtención del método	Rango de aplicación
Insel and Molland's method (1992)	Semidesplazamiento	Serie sistemática	-
Milward's method (1992)	-	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Molland et al. Method (1994)	Desplazamiento	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Armstrong method (2000)	Desplazamiento	Regresión estadística	$0,5 < F_n < 1,0$
Método VWS (1995)	Planeo; Codillos rectos	Regresión estadística	$0,8 < F_n < 1,4$
Método Hanhirova (1995)	Planeo de alta velocidad	Regresión estadística	-
Método Pham (2001)	Codillos rectos	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$
Método Sahoo (2002)	Semidesplazamiento	Regresión estadística y serie sistemática	$0,4 < F_n < 1,4$
Método Sahoo (2004)	Pantoque redondeado	Regresión estadística y serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Método Sahoo (2007)	Semidesplazamiento	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$

La mayoría de estos métodos dividen la resistencia en dos componentes, resistencia por fricción y resistencia por formación de olas. La resistencia por fricción se obtiene por la fórmula ITTC-57 y la resistencia por formación de olas queda determinada mediante expresiones que relacionan las dimensiones del casco. Además, establecen coeficientes para la corrección del factor de forma en la determinación del coeficiente de resistencia total.

1.2. Componentes de la resistencia

En la mayoría de los métodos se establece el coeficiente de resistencia total mediante la siguiente expresión:

$$C_T = (1 + \gamma k)C_F + \tau C_{WMONO}, \quad (3.1)$$

siendo τ el cociente entre la resistencia por formación de olas del buque catamarán y monocasco:

$$\tau = \frac{C_{WCAT}}{C_{WMONO}}, \quad (3.2)$$

y γ un parámetro dependiente únicamente de la relación L/B.

El coeficiente de resistencia queda determinado por diferentes expresiones dependiendo del método y del tipo de buque.

Existen metodologías para la estimación de la resistencia al avance donde la determinación de la resistencia al avance del monocasco, C_{WMONO} , no viene dada por ninguna ecuación. En estos casos se introduce directamente el coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, C_{WCAT} , en la ecuación (3.1) como se muestra a continuación:

$$\tau C_{WMONO} = C_{WCAT}. \quad (3.4)$$

$$C_T = (1 + \gamma k)C_F + C_{WCAT}. \quad (3.5)$$

2. MÉTODOS

2.1. Método de Armstrong, factor de forma del monocasco

La tesis de Armstrong examina los métodos de predicción de resistencia para los catamaranes rápidos recientemente diseñados. Armstrong propone los factores de forma del mono-casco presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Factor de forma del monocasco, Armstrong (2000).

Parámetro	Ecuación	Validez
$(1 + k)$	$0,65 + 350(Fn)^{-0,67} \left(\frac{B}{T}\right)^{0,15} \left(\frac{L}{B}\right)^{-1,5} \left(\frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}}\right)^{-1,5}$	$0,5 < Fn < 1,0$
$(1 + k)_{modelo}$	$1,45 - 0,139 \left(\frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}}\right)^{0,6} \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6 < \frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}} < 8$ $12 < \frac{L}{B} < 15$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $3 \cdot 10^6 < Rn < 5 \cdot 10^6$
$(1 + k)_{buque}$	$1,72 - f \left(\frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}}\right)^g \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6,5 < \frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}} < 9,5$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $0,6 < Fn < 1,0$ $10^9 < Rn < 2 \cdot 10^9$
f	$-2,25Fn^2 + 4,47Fn - 1,61$	$Fn < 1,0$
f	0,61	$Fn > 1,0$
g	$0,76 - 1,09f$	

2.2. Factor de forma para catamaranes

Al no disponer de una ecuación para el factor de forma en los catamaranes ($1 + \gamma k$), es necesario establecer un modelo de regresión a partir de los datos de la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Factor de forma viscoso de catamaranes (Molland et al, 1994).

$L/\nabla^{1/3}$	B/T	$s/L = 0,2$	$s/L = 0,3$	$s/L = 0,4$	$s/L = 0,5$
		$1 + \gamma \cdot k$			
8,5	1,5	1,44	1,43	1,44	1,47
8,5	2,0	1,41	1,45	1,4	1,38
8,5	2,5	1,41	1,43	1,42	1,44
Promedio	-	1,42	1,44	1,42	1,43
9,5	1,5	1,48	1,44	1,46	1,48
9,5	2,0	1,42	1,40	1,47	1,44
9,5	2,5	1,40	1,40	1,45	1,44
Promedio	-	1,41	1,41	1,46	1,45

Para cada número de Froude estudiado, el factor de forma del catamarán ($1 + \gamma k$) será función de las diferentes características geométricas y del factor de forma del mono-casco ($1 + k$). Utilizando múltiples análisis de regresión se encuentra una ecuación general, ecuación (3.6), y unos coeficientes de regresión, Tabla 3.4.

$$(1 + \gamma \cdot k) = f\left(\frac{B}{T}; \frac{L}{\nabla^{1/3}}; \frac{s}{L}; (1 + k)\right)$$

$$(1 + \gamma k) = a_0 + a_1 \frac{B}{T} + a_2 \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_3 \frac{s}{L} + a_4(1 + k) + a_5 \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_6 \frac{B}{T} \frac{s}{L} + a_7 \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} + a_8 \frac{B}{T} (1 + k) + a_9 \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{10} \frac{s}{L} (1 + k) + a_{11} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} + a_{12} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{13} \frac{B}{T} \frac{s}{L} (1 + k) + a_{14} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} (1 + k). \quad (3.6)$$

Tabla 3.4. Coeficientes de regresión para ecuación 3.6.

a_0	0	a_8	-2,506
a_1	0,258	a_9	-2,432
a_2	2,505	a_{10}	100,173
a_3	-150,791	a_{11}	-1,636
a_4	4,932	a_{12}	1,417
a_5	-1,446	a_{13}	-43,355
a_6	68,628	a_{14}	-2,927
a_7	6,549		

2.3. Serie de catamaranes de pantoque redondeado de Sahoo, Browne y Salas (2004)

Los autores amplían en el trabajo realizado por Schwetz y Sahoo (2002) trabajando de manera más profunda sobre una serie sistemática de catamaranes de pantoque redondeado y comparando con el análisis CFD.

La serie sistemática usada para este análisis está basada en formas de casco típicas usadas por la industria de transporte de alta velocidad en Australia (ferry). Para producir la serie de monocascos se utiliza un procedimiento de transformación paramétrico. La Tabla 3.5 ilustra los parámetros geométricos de la serie de monocascos desarrollada. Para cada modelo se presentan las características hidrostáticas en la Tabla 3.6, también parámetros relevantes para el análisis de regresión.

Tabla 3.5. Serie sistemática de catamaranes (Sahoo, Browne y Salas, 2004).

Modelo	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/∇ ^{1/3}	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Tabla 3.6. Hidrostáticas de serie sistemática (Sahoo, Browne y Salas, 2004).

M	L (m)	B (m)	T (m)	Δ (t) (Max.)	i_E (deg)	β (deg)	WSA (m²)	LCB (m)	LCF (m)
1	50,00	3,33	2,22	151,93	5,43	42,99	246,10	22,30	20,27
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	22,29	21,41
4	50,00	3,33	1,33	91,08	4,00	23,32	181,97	22,27	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

Las posiciones de LCB y LCF son respecto al espejo. La serie sistemática de monocascos comprende relaciones de s/L entre 0,2 y 0,4, y un rango del número de Froude entre 0,2 y 1,0. Las cajas de cuadernas de los modelos del estudio están ilustradas en la figura 3.1.

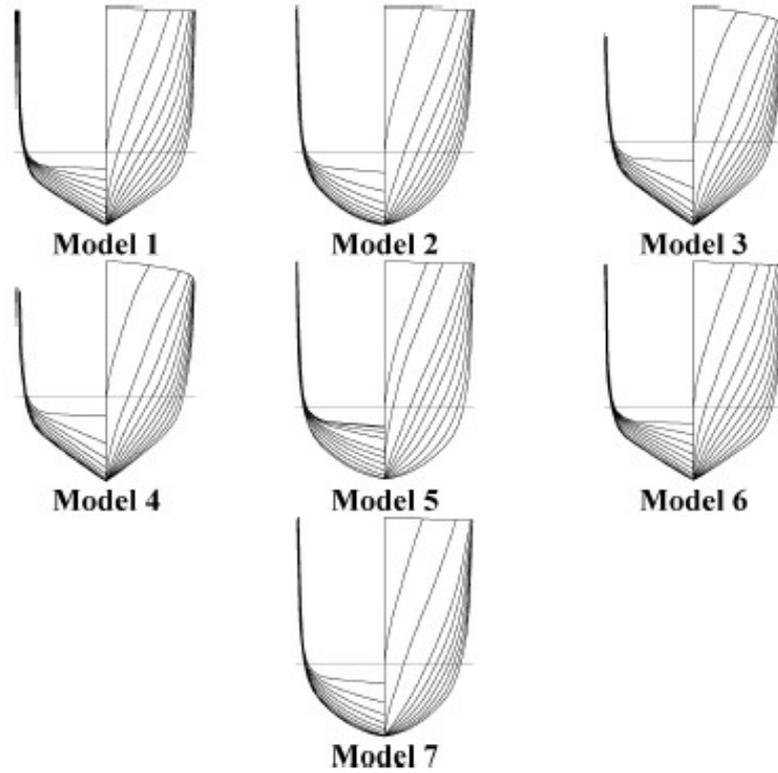


Figura 3.1. Cajas de cuadernas de los modelos 1 al 7 (Sahoo, Browne y Salas, 2004).

Las ecuaciones obtenidas de la regresión para calcular el coeficiente de formación de olas para el monocasco y el catamarán son las ecuaciones (3.7) y (3.8), y sus coeficientes de regresión se recogen en las Tablas 3.7 y 3.8 respectivamente.

$$C_{WMONO} = e^{c_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{c_2} (C_B)^{c_3} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{c_4} (i_E)^{c_5} (\beta)^{c_6} \quad (3.7)$$

$$C_{WCAT} = e^{c_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{c_2} (C_B)^{c_3} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{c_4} (i_E)^{c_5} (\beta)^{c_6} \left(\frac{S}{B}\right)^{c_8} \quad (3.8)$$

Tabla 3.7. Coeficientes de regresión y R^2 para ecuación (3.7).

F_n	C1	C2	C3	C4	C5	C6	R²
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	-0,41	0,999
0,6	2,031	-0,239	0,000	-3,402	-0,138	-0,091	0,999
0,7	1,130	-0,22	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

Tabla 3.8. Coeficientes de regresión e índice de confianza (R^2) para ecuación (3.8).

F_n	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	R²
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

2.4. Regresión a partir del método de Molland y al. (1994)

Basado en el estudio de Molland y al, (1994), se establece una ecuación mediante regresión para obtener el coeficiente de resistencia por formación de olas directamente de las características del catamarán.

El C_{WCAT} se obtiene de la ecuación (3.9) y los coeficientes de regresión se muestran en la Tabla 3.9.

$$\begin{aligned}
 C_{WCAT} = & b_0 + b_1 \frac{L}{B} + b_2 \frac{B}{T} + b_3 \frac{L}{\sqrt[3]{L}} + b_4 \frac{s}{L} + b_5 \frac{L}{B} \frac{B}{T} + b_6 \frac{L}{B} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} + b_7 \frac{B}{T} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} \\
 & + b_8 \frac{L}{B} \frac{s}{L} + b_9 \frac{B}{T} \frac{s}{L} + b_{10} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} \frac{s}{L} + b_{11} \frac{L}{B} \frac{B}{T} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} + b_{12} \frac{L}{B} \frac{B}{T} \frac{s}{L} \\
 & + b_{13} \frac{L}{B} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} \frac{s}{L} + b_{14} \frac{B}{T} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} \frac{s}{L} + b_{15} \frac{L}{B} \frac{B}{T} \frac{L}{\sqrt[3]{L}} \frac{s}{L}.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Tabla 3.9. Coeficientes de regresión y R^2 para ecuación (3.9).

Fn	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
0,20	0,000	-1,010	-3,482	2,936	0,434	-1,782	0,053	1,169
0,25	0,000	-0,624	-1,430	0,911	14,494	-0,576	0,063	0,573
0,30	0,000	-0,135	-1,171	0,928	-21,610	-0,730	0,012	0,487
0,35	0,000	-1,870	-8,177	5,059	4,144	-2,346	0,095	2,106
0,40	0,000	-1,437	-2,620	2,150	32,489	-0,306	0,082	0,413
0,45	0,000	2,504	10,900	-6,979	10,979	4,132	-0,114	-2,901
0,50	0,000	5,921	19,565	-8,431	39,226	1,270	-0,324	-2,430
0,55	0,000	3,149	26,826	-2,589	111,705	-1,619	-0,237	-2,989
0,60	0,000	1,398	29,096	0,614	107,296	-2,655	-0,191	-3,503
0,65	0,000	0,701	17,120	-0,514	65,457	-0,368	-0,092	-2,409
0,70	0,000	1,602	13,789	-2,218	59,031	0,291	-0,122	-2,024
0,75	0,000	2,173	9,941	-2,585	53,376	0,192	-0,151	-1,356
0,80	0,000	1,811	9,833	-2,216	44,561	0,217	-0,139	-1,497
0,85	0,000	1,841	10,540	-1,971	38,833	-0,315	-0,138	-1,409
0,90	0,000	2,148	13,265	-2,749	33,474	0,104	-0,168	-2,080
0,95	0,000	2,448	13,923	-3,472	31,412	0,402	-0,183	-2,266
1,00	0,000	2,882	14,586	-4,781	7,184	0,961	-0,189	-2,480

Fn	b8	b9	b10	b11	b12	b13	b14	b15
0,20	2,437	8,242	-6,962	0,041	4,230	-0,137	-2,816	-0,092
0,25	1,051	-3,927	-3,763	-0,004	0,905	-0,043	0,120	-0,021
0,30	3,235	12,628	0,754	0,017	-0,351	-0,328	-1,728	0,119
0,35	4,918	21,604	-12,503	0,012	5,082	-0,270	-5,153	0,021
0,40	2,854	-2,519	-11,615	-0,022	2,830	-0,035	-0,280	-0,075
0,45	-0,970	-7,798	10,730	-0,100	-11,150	-0,046	5,288	0,444
0,50	-11,378	-24,067	13,500	0,076	-6,242	0,614	3,816	0,171
0,55	-13,638	-77,986	-5,439	0,244	3,388	1,254	9,134	-0,586
0,60	-9,326	-83,327	-13,326	0,320	6,584	1,134	10,051	-0,797
0,65	-4,015	-38,325	-7,119	0,120	0,620	0,512	5,253	-0,199
0,70	-5,949	-33,130	-2,283	0,079	-0,876	0,572	4,822	-0,136
0,75	-7,233	-26,712	-1,242	0,067	0,184	0,637	3,380	-0,169
0,80	-6,278	-27,259	-1,141	0,074	0,618	0,591	3,702	-0,230
0,85	-5,976	-28,430	-1,758	0,106	2,476	0,556	3,214	-0,330
0,90	-5,934	-32,675	0,171	0,120	1,401	0,559	4,515	-0,338
0,95	-6,845	-36,448	3,349	0,117	-0,169	0,599	5,638	-0,315
1,00	-5,623	-27,406	9,518	0,100	-2,972	0,363	5,129	-0,140

2.5. Método de Ping-Zhong

El método de Ping-Zhong es un método para buques monocasco que trata de mejorar los resultados del trabajo de Mercier-Savitsky, haciéndolo más aplicable a formas de pantoque redondeado.

La resistencia al avance de los catamaranes es mucho más compleja que la de los monocascos, la aplicación de un método que no tenga en cuenta un factor de forma que incluya los efectos de la interacción entre cascos, como son los métodos para monocasco, no es correcta. Sin embargo, para disponer de más resultados, y compararlos con los obtenidos con métodos que sí aplicables, se puede calcular la resistencia al avance de uno de los monocascos del catamarán por el método de Ping-Zhong y luego multiplicarlo por dos, siempre teniendo en cuenta que los resultados son solo comparativos.

Este método utiliza una regresión que es función de cinco variables que se muestran en la Tabla 3.10. El coeficiente de resistencia total se calcula según la ecuación (3.10), donde C_F es el coeficiente de resistencia de fricción según la línea ITTC-57, C_A es el coeficiente de correlación igual a $0,4 \cdot 10^{-3}$, y C_R es el coeficiente de resistencia residuo, calculado por la fórmula (3.11).

Tabla 3.10. Variables Método Ping-Zhong.

Variables	Fórmula	Validez
Coefficiente de esbeltez	$C_V = \frac{1000\nabla}{L_F^3}$	$1,5 < C_V < 11,0$
Coefficiente prismático	$C_P = \frac{\nabla}{A_M L_F}$	$0,573 < C_P < 0,764$
Relación del área del espejo	$F_T = \frac{A_T}{A_M}$	$0,00 < F_T < 0,74$
Posición longitudinal del centro de carena	$F = \frac{100l_{cb}}{L_F}$	$0,00 < F < 6,40$
Semiángulo de entrada en la flotación	i_E	$7,60 < i_E < 26,6$

$$C_T = C_F + C_R + C_A, \quad (3.10)$$

$$10^3 C_R = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_4 X_4 + \dots + B_{53} X_{53}. \quad (3.11)$$

Las variables X_i , son funciones de las variables independientes citadas anteriormente y del número de Froude basado en la eslora del buque. Los valores de las constantes B_i , se recogen en la Tablas siguientes, para Números de Froude comprendidos entre 0,4 y 1,0.

Tabla 3.11. Variables X_i , Método Ping-Zhong.

Nº	X_i	Nº	X_i	Nº	X_i	Nº	X_i
0	1	14	F	28	$C_V^2 C_P^2$	42	$F_T F$
1	$C_V^{0,25}$	15	F^3	29	$C_V i_E^{0,5}$	43	$F_T F^3$
2	$C_V^{0,50}$	16	$i_E^{0,5}$	30	$C_V^{0,5} i_E$	44	$F_T C_P^2$
3	$C_V^{0,75}$	17	i_E	31	$C_V i_E$	45	$F_T C_P^3$
4	$C_V^{1,00}$	18	$C_V^{0,5} F$	32	$C_V i_E^{1,5}$	46	$F_T C_P^{-1}$
5	$C_V^{2,00}$	19	$C_V F$	33	$C_V i_E^3$	47	$F_T i_E$
6	$C_V^{2,25}$	20	$C_V F^2$	34	$C_V i_E^4$	48	$F_T i_E^{1,5}$
7	$C_V^{3,00}$	21	$C_V F^3$	35	$C_V i_E^5$	49	$F_T C_V^3$
8	$C_V^{4,00}$	22	$C_V F^5$	36	$C_V i_E^{0,5}$	50	$C_V F_T F$
9	$C_V^{5,00}$	23	$C_V F^6$	37	$C_V F_T^{0,5}$	51	$F C_P F_T$
10	$C_V^{5,00}$	24	$C_V^{0,5} C_P$	38	$C_V F_T$	52	$F^2 C_P^2 F_T^2$
11	F_T^2	25	$C_V C_P^{0,5}$	39	$C_V F_T^2$	53	$C_V F_T F C_P$
12	F_T^3	26	$C_V C_P$	40	$C_V F_T^{4,5}$	--	--
13	C_P	27	$C_V C_P^2$	41	$C_V F_T^5$	--	--

Tabla 3.12. Constantes Bi, método Ping-Zhong.

	Fn=0,40	Fn=0,45	Fn=0,50	Fn=0,55	Fn=0,60
B0	0,42805	-11,52091	14,52452	-0,1736828	2,78574
B1	0	12,05635	0	0	0
B2	0	0	-15,14608	0	0
B3	0	0	0	0	-8,29346
B4	0	0	0	0	0
B5	0	0	0	0	0
B6	0	0	0	0	-0,031805
B7	-0,0113839	0	0	0	0
B8	0	0	-0,0002901	0	0
B9	0,0001653	0	0	0	0
B10	0	0	0	0	0
B11	0	0	0	19,48025	0
B12	0	0	17,454218	0	0
B13	0	0	-21,87962	0	0
B14	0	0	0	0	0
B15	0	0	0	-0,0032666	0
B16	0	0	0	0	0
B17	0	0	0	0	0
B18	0	0	0,1199874	0	0
B19	0	0	0	0,190309	0,23562
B20	0	0	0,0340045	0	-0,032878
B21	0,0022619	0	-0,005236	0	0
B22	0	0,000362547	0	0	0
B23	-1,1915E-05	-0,000058925	0	0	0
B24	0	0	23,81034	0	0
B25	0	0	0	0	9,7215
B26	0	0	0	0	0
B27	2,76043	0,95357	0	4,2690504	0
B28	0	0	0	0	0
B29	0	0	0,5344617	0,1262725	0
B30	0	0	0	0	0
B31	0,0286367	0	0	0	0
B32	0	0	0	0	-0,0028312
B33	0	5,81294E-05	0	0	0
B34	-3,881E-07	0	0	0	0
B35	0	-5,94E-08	0	0	7,9E-09
B36	0	0	0	0	0
B37	-0,6157	-0,25582	0	0	-0,71001
B38	0	0	0	0	-2,27459
B39	1,63655	0	0	2,468475	0
B40	0	0	0	0	38,129
B41	-3,28294	0	0	0	-40,043
B42	0	0	0	0	0
B43	0	0	-0,0172769	0	0
B44	0	0	0	-13,891417	0
B45	0	0	0	0	0
B46	0	0	0	0	0
B47	0	0	0	-0,451056	0
B48	0	0	-0,1614093	0	0
B49	0	0	0	0	0
B50	0	0	0	-0,610085	0
B51	0	0	0	0	0
B52	0	0	0	0	0
B53	0	0	0	0	0

	Fn=0,70	Fn=0,80	Fn=0,90	Fn=1,00
B0	-0,35459	-6,71762	-1,994458	1,20146
B1	0	0	0	0
B2	0	0	0	0
B3	0	0	0	0
B4	0	-0,751494	0	0
B5	-0,177265	0	0	-1,080677
B6	0	0	0	0
B7	0	-0,0009476	-0,0009158	0,193216
B8	0	0	0	0
B9	0	0	0	0
B10	0	0	0	-0,0011667
B11	11,02738	0	0	0
B12	0	7,226846	0	-15,69293
B13	0	0	5,053618	-17,853539
B14	0	0	0	-0,0893517
B15	0	0,0079214	0	0
B16	0	4,8320759	0	1,6347212
B17	0	-0,809705	0	0
B18	0	0	0	0
B19	0,185261	0,0446722	0	0
B20	0	0	0,0105693	0
B21	0	-0,0020337	-0,0018758	0
B22	0	0	0	0
B23	0	0	0	0
B24	0	0	0	12,22024
B25	0	0	0	0
B26	2,813155	2,8205227	1,3038071	0
B27	0	0	0	0
B28	0,283344	0	0	0
B29	0	0	0	0
B30	0	0	0	-0,0837985
B31	0	0,0208361	0	0
B32	0	0	0	0
B33	0	0	0	0
B34	0	0	0	0
B35	0	0	0	0
B36	0,0060398	0	0	0
B37	0	0	0	0
B38	0	0	0	0
B39	2,366091	0	0	0
B40	0	0	0	0
B41	0	0	0	0
B42	0	-0,969916	0	0
B43	0	0	0	0
B44	0	0	0	0
B45	0	0	0	14,15138
B46	0	-1,0089253	-2,0058359	0
B47	-0,325001	0	0	0
B48	0	0	0	0
B49	0	0	0,0027594	0
B50	0	0	0	0
B51	-2,25472	0	0	0
B52	0,568792	0	0	0
B53	-0,8565412	0	0	0

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RESISTENCIA

1. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE FORMA DEL MONOCASCO, MÉTODO DE ARMSTRONG

1.1. Caso de estudio

Para saber cuál es la expresión correcta a aplicar del método de Armstrong para determinar el factor de forma del monocasco, se obtienen los parámetros de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros para el factor de forma del monocasco.

$L/\nabla^{1/3}$	5,612
B/T	1,121
Fn	0,2-1,04
Re	10^8 - 10^9

De los rangos de la Tabla 4.1 se observa que para determinadas velocidades no se cumple ninguno de ellos. A partir del factor de forma del monocasco, calculado por la ecuación de la Tabla 3.2, se obtendrá el factor de forma del catamarán. Dado el incumplimiento de los rangos, y las grandes diferencias de valores, se optará por utilizar como factor de forma del catamarán la media aritmética de los valores obtenidos.

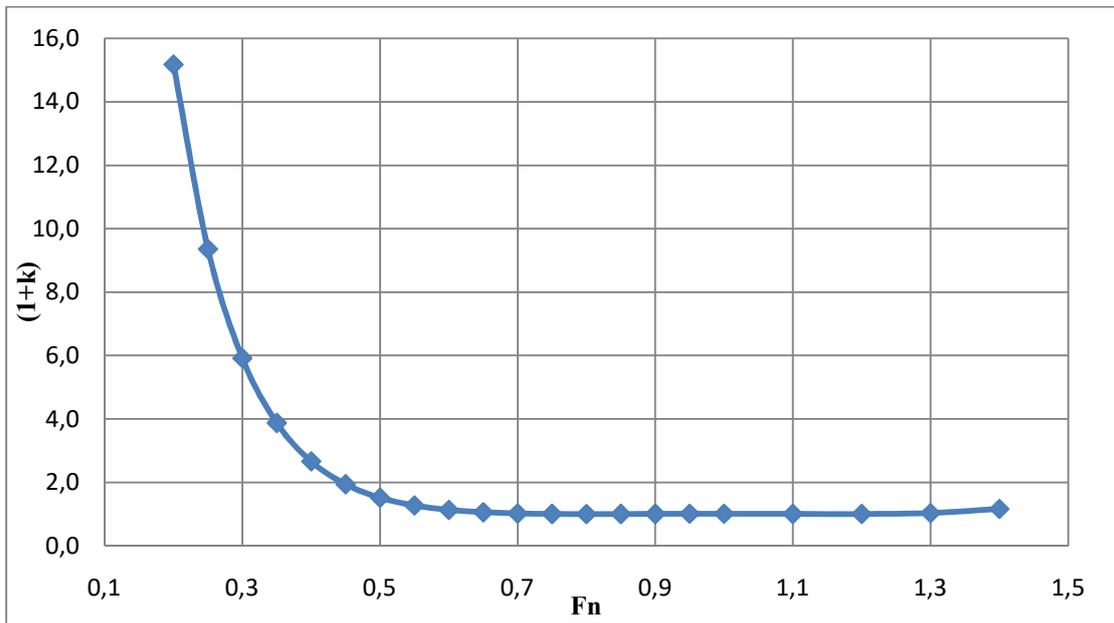
$$(1 + k)_{buque} = 1,72 - f(L/\nabla^{1/3})^g (B/T)^{-0,1}. \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.2. se presenta el cálculo del factor de forma del monocasco para cada valor de la velocidad.

Tabla 4.2. Cálculo del factor de forma del monocasco.

V(nudos)	Fn	Re	(1+k)
9,315	0,200	2,360E+08	15,172
13,972	0,300	3,541E+08	5,916
18,629	0,400	4,721E+08	2,660
20,958	0,450	5,311E+08	1,940
23,286	0,500	5,901E+08	1,516
25,615	0,550	6,491E+08	1,271
27,944	0,600	7,081E+08	1,133
32,601	0,700	8,262E+08	1,022
37,258	0,800	9,442E+08	1,002
41,916	0,900	1,062E+09	1,006
46,573	1,000	1,180E+09	1,009

Representando el factor de forma calculado mediante la ecuación (4.1) frente al número de Froude se obtiene la siguiente gráfica:



Gráfica 4.1. Representación del factor de forma del monocasco calculado para distintos números de Froude.

1.2. Comparación con caso de referencia

Como caso de referencia tanto para este apartado, Método de Armstrong, como para el siguiente, Método de Sahoo, se toma un catamarán del que se conocen los resultados, extraído de la asignatura Hidrodinámica y Resistencia. Las características de este catamarán referencia son las recogidas en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3. Características del catamarán de referencia para el Método de Armstrong y el Método de Sahoo.

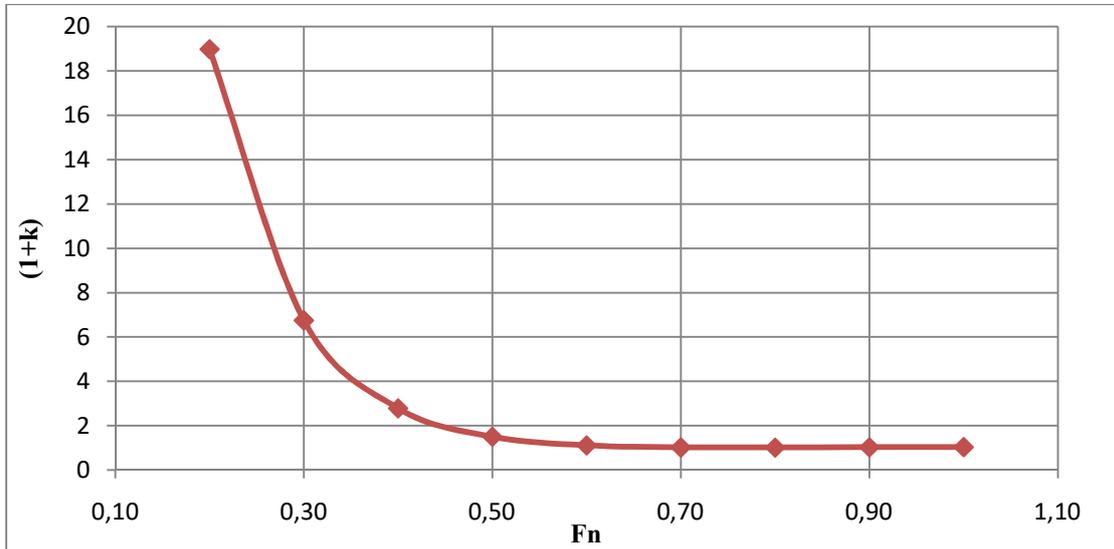
L_f	34,120	m
B	2,880	m
T	1,500	m
∇	129,711	m ³
LCB	16,456	m
LCF	15,851	m
i_E	10	°
β	30	°
s	3,412	m
S	245,323	m ²

En el caso de referencia se ha utilizado la misma ecuación para el cálculo del factor de forma del monocasco.

Tabla 4.4. Cálculo del factor de forma del monocasco para el caso de referencia.

V(nudos)	F_n	Re	(1+k)
7,111	0,200	1,050E+08	18,978
10,667	0,300	1,576E+08	6,752
14,223	0,400	2,101E+08	2,783
17,779	0,500	2,626E+08	1,501
21,334	0,600	3,151E+08	1,113
24,890	0,700	3,677E+08	1,020
28,446	0,800	4,202E+08	1,016
32,001	0,900	4,727E+08	1,029
35,557	1,000	5,252E+08	1,035

En la representación del factor de forma calculado, Gráfica 4.2, se observa que por el rango inferior la ecuación no da resultados lineales. En este caso de referencia, una vez calculado el factor de forma para el catamarán, también se opta por utilizar un valor promediado.



Gráfica 4.2. Representación del factor de forma del monocasco calculado para el caso de referencia.

Comparando con la curva obtenida en el modelo de estudio verificamos que tienen una forma similar, por lo que el Método de Armstrong ha sido correctamente aplicado.

2. CÁLCULO DEL FACTOR DE FORMA PARA EL CATAMARÁN

2.1. Cálculo del factor de forma para el catamarán

Aplicando la ecuación (4.1), con sus respectivos coeficientes de regresión así como el factor de forma del monocasco, calculado en el apartado anterior, se obtiene el factor de forma para el catamarán, $(1+\gamma k)$, para distintas velocidades.

Tabla 4.5. Cálculo del factor de forma del catamarán.

V(nudos)	Fn	(1+k)	(1+ γ k)
9,315	0,200	2,382	76,892
13,972	0,300	1,970	26,562
18,629	0,400	1,739	8,858
20,958	0,450	1,656	4,943
23,286	0,500	1,588	2,640
25,615	0,550	1,530	1,307
27,944	0,600	1,480	0,556
32,601	0,700	1,398	-0,047
37,258	0,800	1,334	-0,153
41,916	0,900	1,282	-0,132
46,573	1,000	1,239	-0,115

Para el cálculo del coeficiente de resistencia total se utiliza como valor del factor de forma del catamarán el obtenido realizando la media aritmética para los valores correspondientes al número de Froude entre 0,3 y 0,6, como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Cálculo del factor de forma del catamarán.

V(nudos)	Fn	(1+k)	(1+ γ k)
13,972	0,300	1,970	26,562
18,629	0,400	1,739	8,858
20,958	0,450	1,656	4,943
23,286	0,500	1,588	2,640
25,615	0,550	1,530	1,307
27,944	0,600	1,480	0,556
Media			9,654

2.2. Comparación con caso de referencia

Aplicando la ecuación (4.1) con sus coeficientes de regresión y el factor de forma del monocasco, se obtiene el factor de forma para el catamarán de referencia.

Tabla 4.7. Cálculo del factor de forma del caso de referencia.

V(nudos)	Fn	(1+k)	(1+γk)
7,111	0,200	18,978	27,989
10,667	0,300	6,752	9,610
14,223	0,400	2,783	3,644
17,779	0,500	1,501	1,716
21,334	0,600	1,113	1,133
24,890	0,700	1,020	0,993
28,446	0,800	1,016	0,988
32,001	0,900	1,029	1,007
35,557	1,000	1,035	1,015

Los resultados correspondientes a los valores de Froude 0,2 y 0,3 presentan mucha variación con los resultados del catamarán de estudio debido a la desviación que presenta la fórmula del factor de forma del monocasco para estos valores de Froude

Al igual que en el caso de estudio, es necesario utilizar un valor promedio del factor de forma del catamarán dada la variación de los resultados. Se utiliza un factor de forma del catamarán igual a 1,6, media aritmética de los valores correspondientes a valores de Froude entre 0,4 y 0,9.

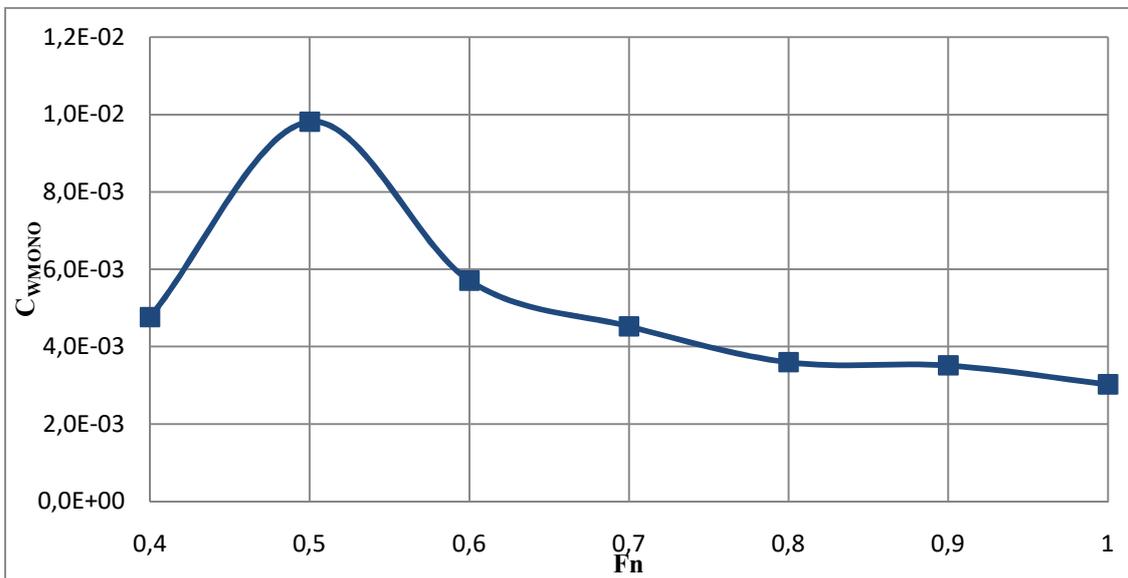
3. MÉTODO DE SAHOO, BROWNE Y SALAS (2004) PARA CATAMARANES DE PANTOQUE REDONDEADO

3.1. Caso de estudio

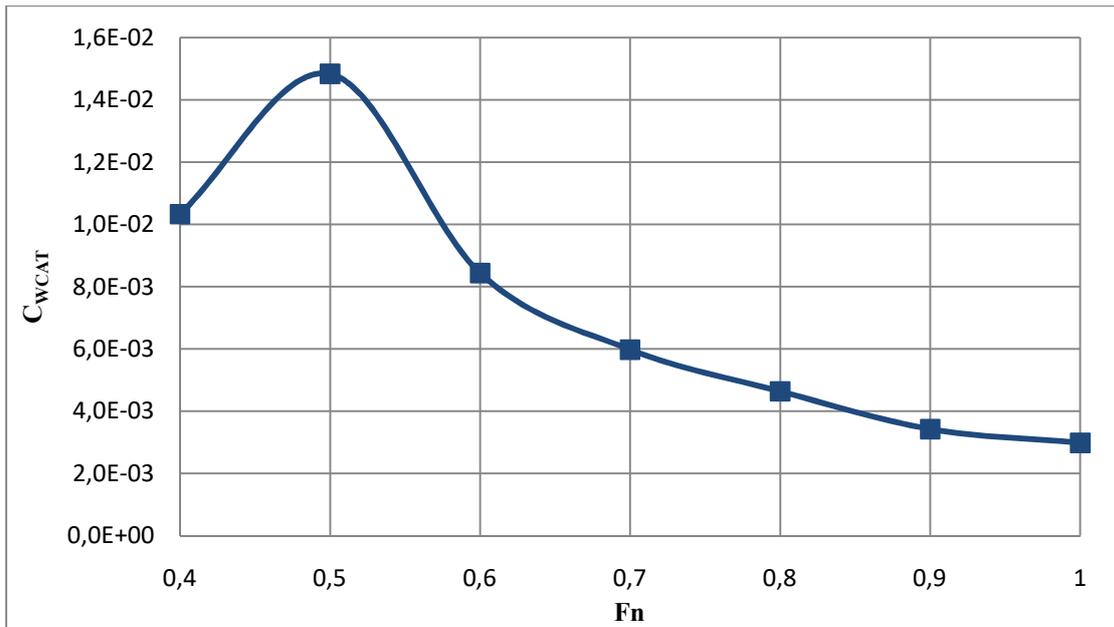
Aplicando la ecuación (3.7) y la ecuación (3.8), cada una con sus respectivos coeficientes se obtienen los coeficientes de resistencia por formación de olas para el monocasco y para el catamarán. Los resultados se dan en la Tabla 4.8, y se representan en las gráficas 4.3. y 4.4.

Tabla 4.8. Coeficientes de la resistencia por formación de olas.

F_n	C_{WMONO}	C_{WCAT}
0,2	9,797E-03	1,343E-02
0,3	9,684E-03	1,050E-02
0,4	4,763E-03	1,033E-02
0,5	9,813E-03	1,484E-02
0,6	5,707E-03	8,439E-03
0,7	4,525E-03	5,979E-03
0,8	3,596E-03	4,638E-03
0,9	3,514E-03	3,425E-03
1	3,023E-03	2,983E-03



Gráfica 4.3. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del monocasco, obtenido por el Método de Sahoo, frente al número de Froude.



Gráfica 4.4. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, obtenido por el Método de Sahoo, frente al número de Froude.

El coeficiente de resistencia de fricción se calcula a partir de la línea ITTC-57.

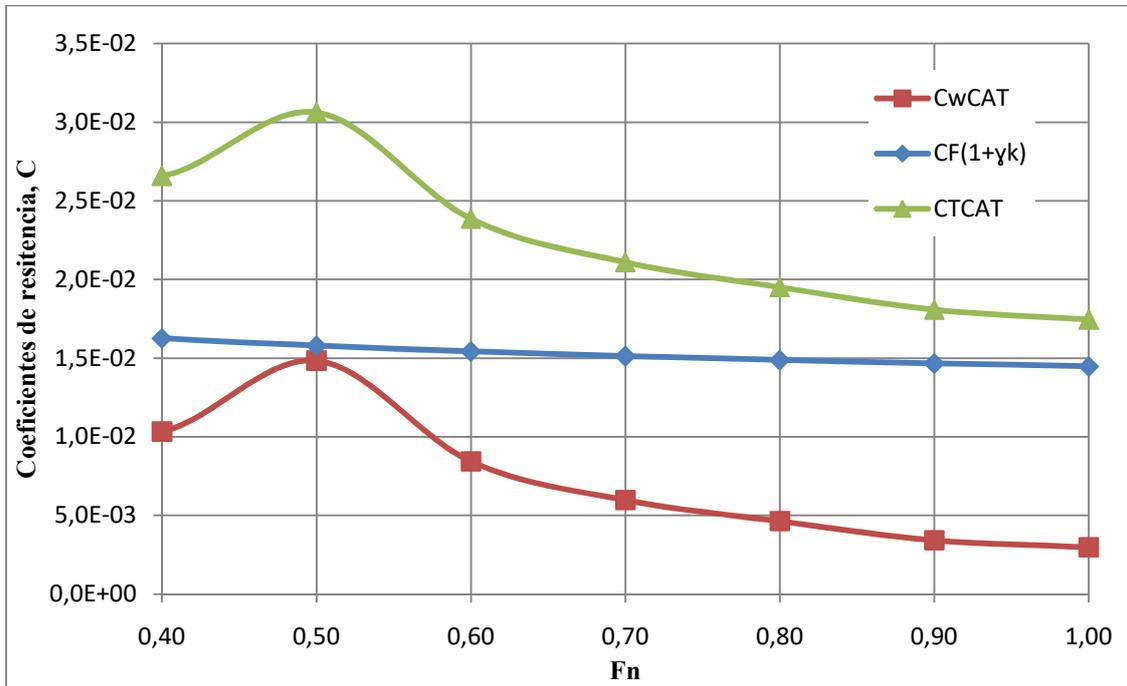
$$C_F = \frac{0,075}{(\text{Log}_{10}Rn - 2)^2} \quad (4.2)$$

En la siguiente Tabla se muestran los distintos coeficientes así como el coeficiente de resistencia total.

Tabla 4.9. Componentes y coeficiente de resistencia total.

F _n	V(n)	C _{W_{CAT}}	C _{W_{MONO}}	τ	R _n	(1+γk)C _F	C _{TCAT}
0,2	9,315	1,343E-02	9,797E-03	1,371	2,360E+08	1,783E-02	3,126E-02
0,3	13,972	1,050E-02	9,684E-03	1,084	3,541E+08	1,688E-02	2,738E-02
0,4	18,629	1,033E-02	4,763E-03	2,169	4,721E+08	1,626E-02	2,659E-02
0,5	23,286	1,484E-02	9,813E-03	1,512	5,901E+08	1,579E-02	3,063E-02
0,6	27,944	8,439E-03	5,707E-03	1,479	7,081E+08	1,543E-02	2,387E-02
0,7	32,601	5,979E-03	4,525E-03	1,321	8,262E+08	1,513E-02	2,111E-02
0,8	37,258	4,638E-03	3,596E-03	1,290	9,442E+08	1,488E-02	1,952E-02
0,9	41,916	3,425E-03	3,514E-03	0,975	1,062E+09	1,467E-02	1,809E-02
1,0	46,573	2,983E-03	3,023E-03	0,987	1,180E+09	1,448E-02	1,746E-02

Obtenidas los distintos coeficientes de resistencia es interesante representarlos en un mismo gráfico con la finalidad de observar la aportación de cada uno al coeficiente de resistencia total.



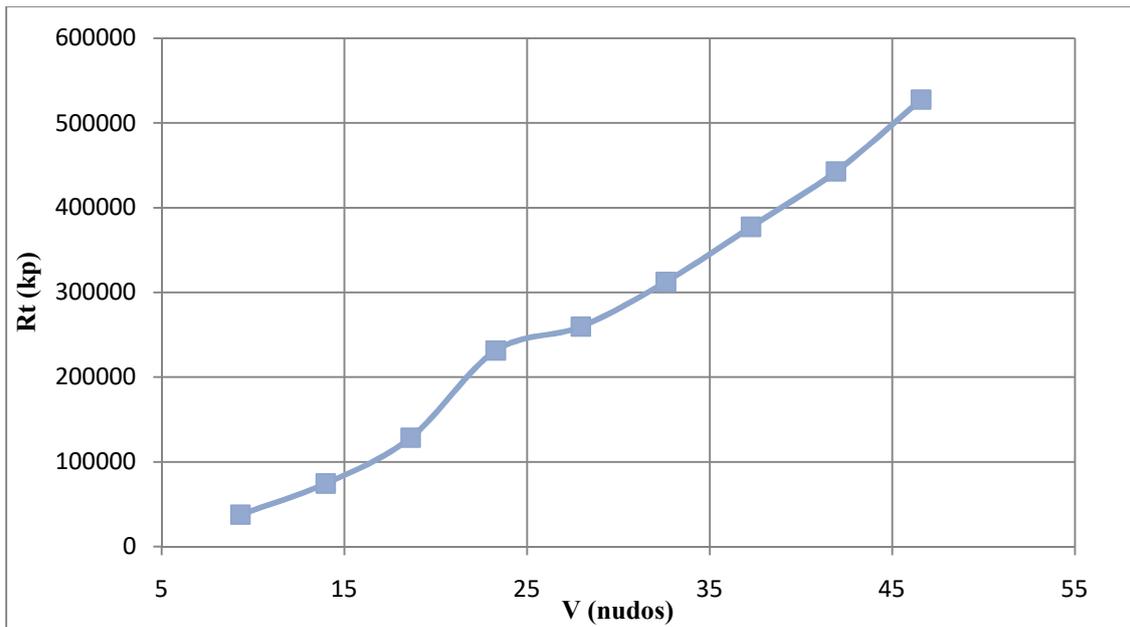
Gráfica 4.5. Representación de la contribución de los coeficientes, de formación de olas del catamarán y de fricción, al coeficiente de resistencia total.

Mediante la ecuación (4.3) se puede determinar la resistencia total al avance del catamarán.

$$R_T = C_T \frac{1}{2} \rho S V^2. \quad (4.3)$$

Tabla 4.10. Resistencia total del catamarán calculada por el Método Sahoo, para distintas velocidades.

V(nudos)	R _{TCAT} (kp)
9,315	37776,4
13,972	74456,7
18,629	128530,8
23,286	231370,2
27,944	259609,3
32,601	312536,6
37,258	377445,8
41,916	442733,1
46,573	527531,7



Gráfica 4.6. Estimación de la resistencia total del catamarán de estudio mediante el Método de Sahoo.

3.2. Comparación con caso de referencia

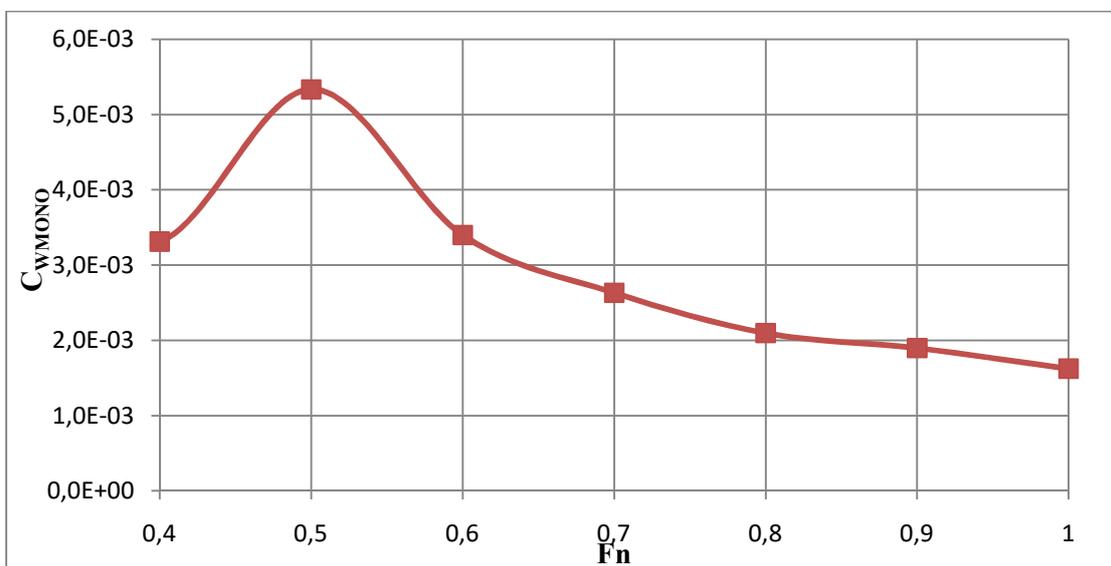
Aplicando el método de Sahoo al catamarán de referencia se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.11. Componentes y coeficiente de resistencia total del catamarán referencia.

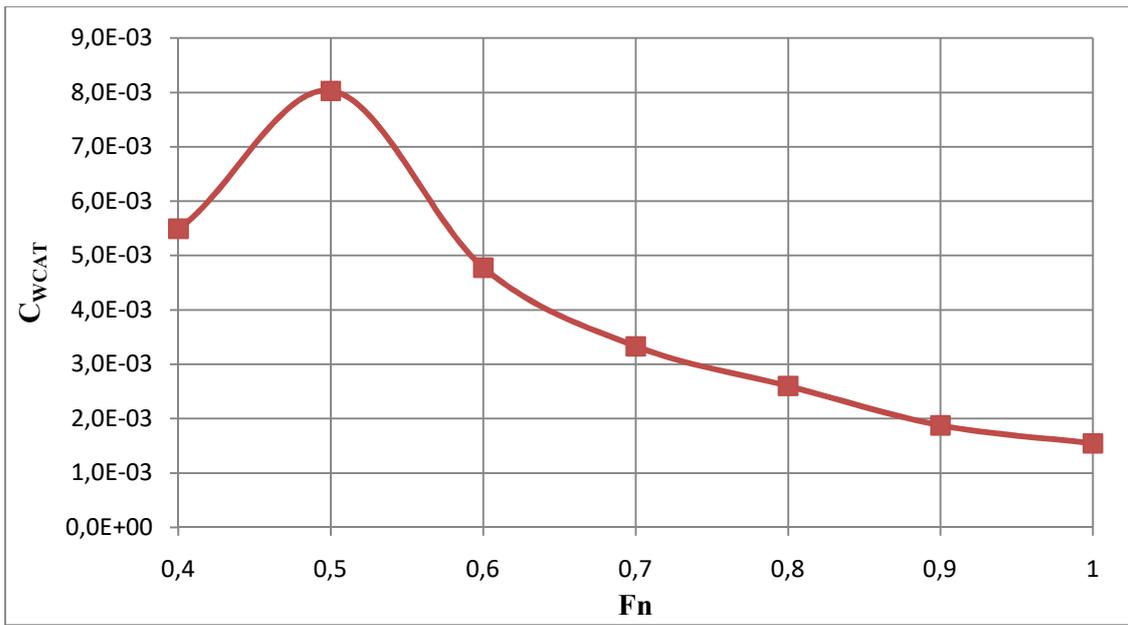
Fn	V(n)	C_{WCAT}	C_{WMONO}	τ	Re	C_F	C_{TCAT}
0,2	7,111	6,389E-03	5,182E-03	1,233	1,05E+08	2,069E-03	9,699E-03
0,3	10,667	4,283E-03	3,985E-03	1,075	1,58E+08	1,953E-03	7,408E-03
0,4	14,223	5,493E-03	3,313E-03	1,658	2,10E+08	1,876E-03	8,495E-03
0,5	17,779	8,029E-03	5,335E-03	1,505	2,63E+08	1,820E-03	1,094E-02
0,6	21,334	4,777E-03	3,400E-03	1,405	3,15E+08	1,776E-03	7,619E-03
0,7	24,890	3,330E-03	2,633E-03	1,265	3,68E+08	1,740E-03	6,114E-03
0,8	28,446	2,600E-03	2,098E-03	1,239	4,20E+08	1,710E-03	5,335E-03
0,9	32,001	1,875E-03	1,898E-03	0,988	4,73E+08	1,683E-03	4,569E-03
1,0	35,557	1,542E-03	1,624E-03	0,950	5,25E+08	1,661E-03	4,199E-03

Tabla 4.12. Resistencia total del catamarán de referencia calculada mediante Método Sahoo, para distintas velocidades.

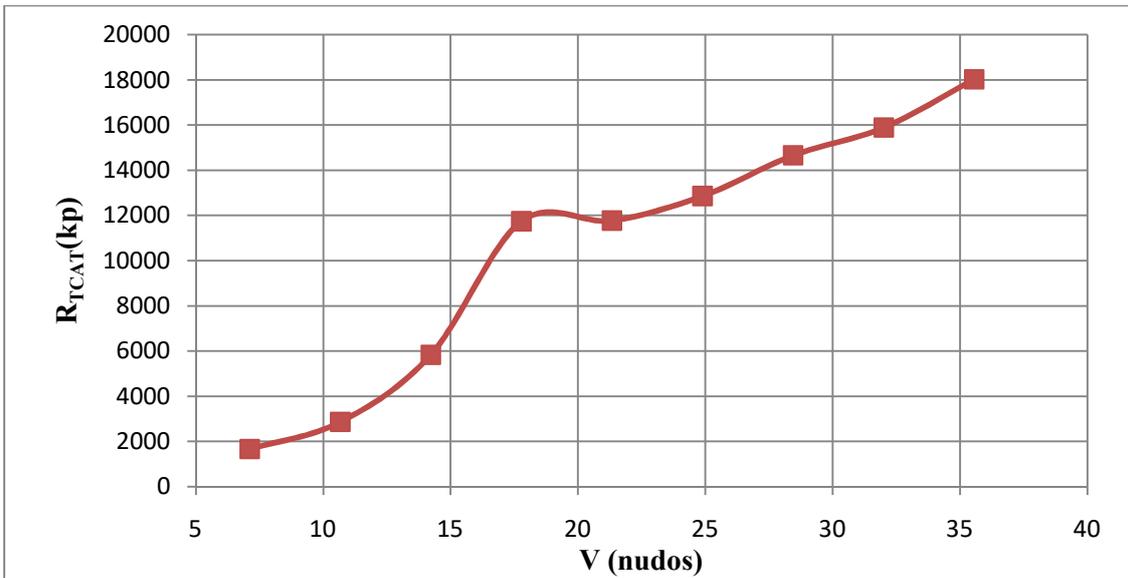
V(n)	R _{T-CAT} (kp)
7,111	1665,8
10,667	2862,5
14,223	5835,7
17,779	11744,1
21,334	11776,1
24,890	12862,3
28,446	14660,0
32,001	15890,1
35,557	18029,8



Gráfica 4.7. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del monocasco del catamarán de referencia, obtenido por el Método de Sahoo.



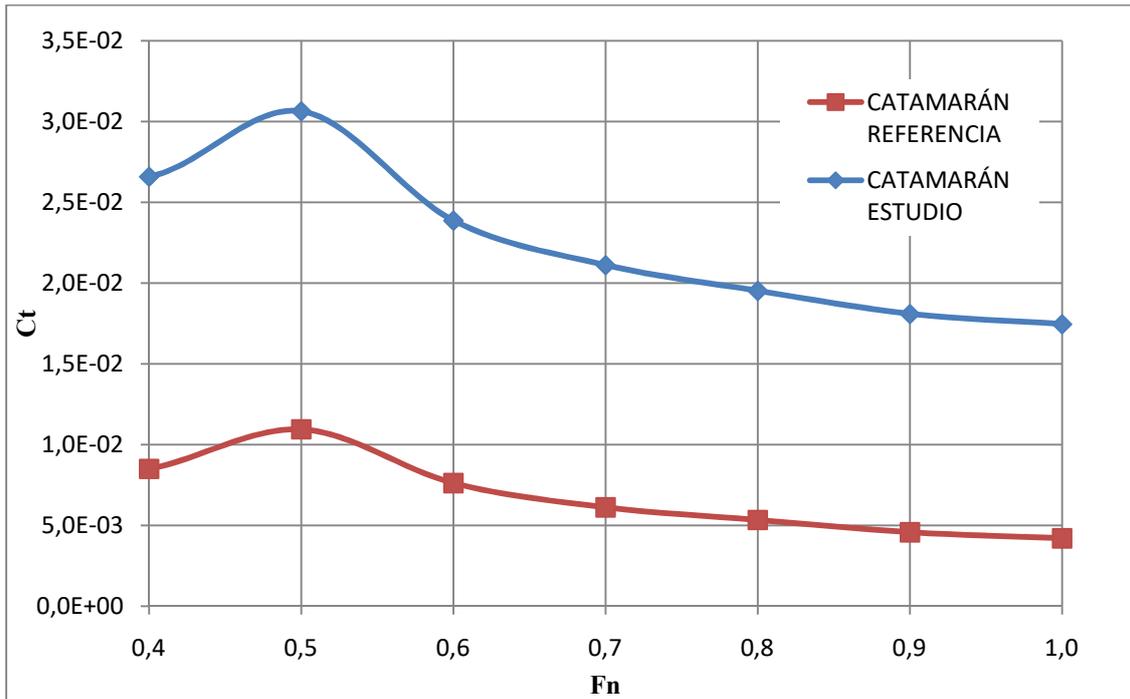
Gráfica 4.8. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán de referencia, Método de Sahoo.



Gráfica 4.9. Estimación de la resistencia total del catamarán de referencia mediante el Método de Sahoo.

Comparando la curva de la resistencia total del catamarán de referencia con el catamarán de estudio vemos que ambas curvas tienen una forma parecida por lo que el método se ha aplicado de forma correcta.

Representando los coeficientes de resistencia total de referencia y del catamarán de estudio vemos la similitud en la forma de las curvas. Para los distintos valores de Froude, el coeficiente de resistencia total del catamarán de estudio es mayor al del catamarán de referencia, esto se debe, entre otras cosas, a una mayor eslora del buque de estudio.



Gráfica 4.10. Representación de los coeficientes de resistencia total del catamarán de referencia y del catamarán de estudio, calculados mediante el Método de Sahoo.

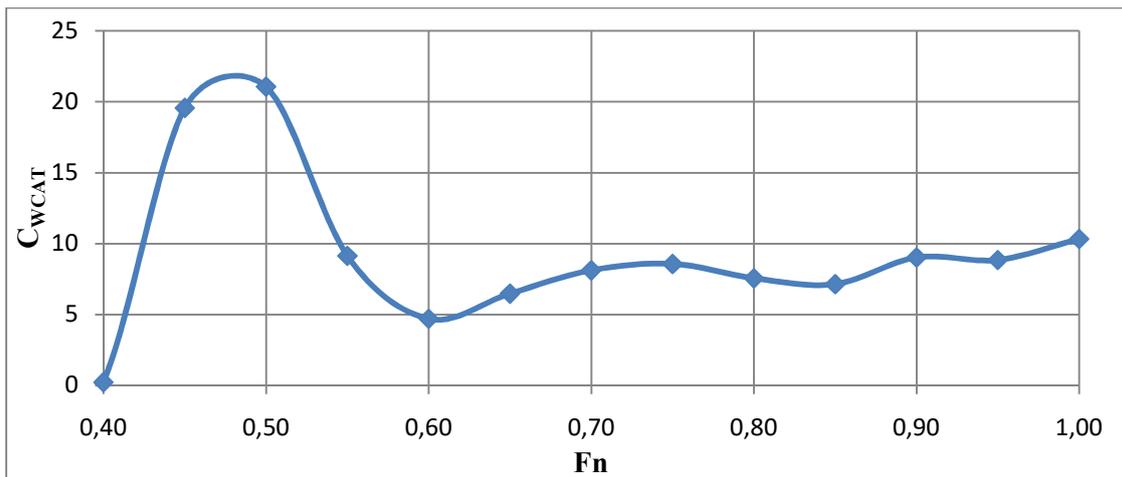
4. MÉTODO DE MOLLAND Y AL. (1994)

4.1. Caso de estudio

Aplicando la ecuación (3.9) con sus coeficientes se obtiene el coeficiente de resistencia al avance del catamarán para cada velocidad.

Tabla 4.13. Coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, Método Molland y al.

Fn	C_{WCAT}
0,20	-5,087
0,25	-2,292
0,30	-1,088
0,35	-7,159
0,40	0,245
0,45	19,560
0,50	21,054
0,55	9,145
0,60	4,710
0,65	6,482
0,70	8,124
0,75	8,571
0,80	7,565
0,85	7,147
0,90	9,031
0,95	8,852
1,00	10,337

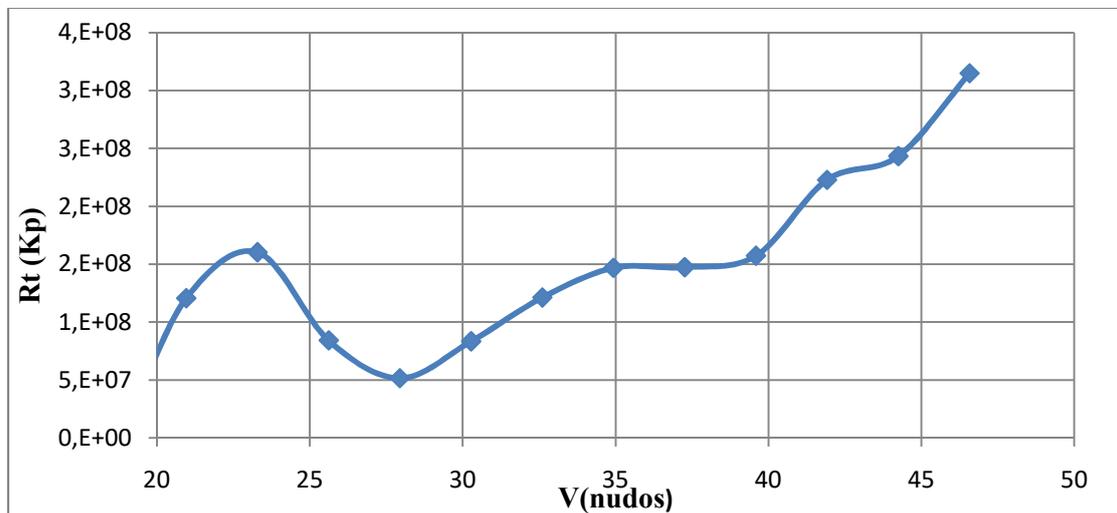


Gráfica 4.11. Representación del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán calculado mediante el método de Molland y al.

Este método no ofrece ninguna ecuación para el cálculo de la resistencia del monocasco, por lo que para sacar el coeficiente de resistencia total se introduce directamente $C_{W,CAT}$, sin calcular τ ni $C_{W,MONO}$.

Tabla 4.14. Cálculo de la resistencia total, Método Molland.

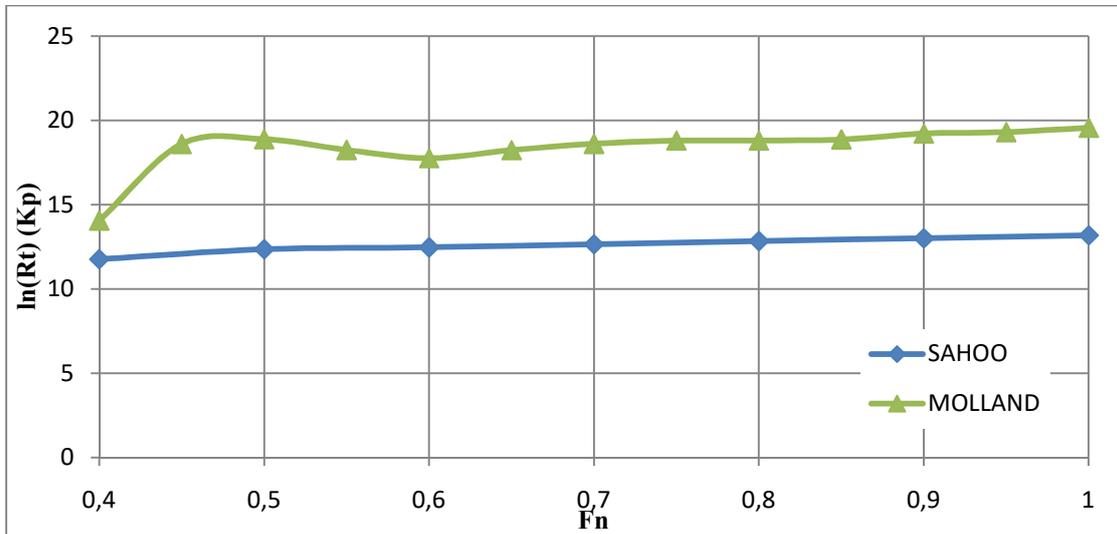
F_n	$V(n)$	$(1+\gamma_k)$	$C_{W,CAT}$	R_n	C_{FCAT}	C_{TCAT}	R_{TCAT} (Kp)
0,20	9,315	7,349	-5,087	2,360E+08	1,847E-03	-5,074	-6180396,656
0,25	11,643	6,041	-2,292	2,951E+08	1,792E-03	-2,281	-4341514,384
0,30	13,972	5,109	-1,088	3,541E+08	1,749E-03	-1,080	-2958584,126
0,35	16,301	4,404	-7,159	4,131E+08	1,713E-03	-7,152	-26678829,2
0,40	18,629	3,850	0,245	4,721E+08	1,684E-03	0,251	1223042,364
0,45	20,958	3,401	19,560	5,311E+08	1,658E-03	19,566	120653503,7
0,50	23,286	3,028	21,054	5,901E+08	1,636E-03	21,059	160324895,7
0,55	25,615	2,713	9,145	6,491E+08	1,616E-03	9,150	84284675,13
0,60	27,944	2,442	4,710	7,081E+08	1,598E-03	4,714	51676967,92
0,65	30,272	2,206	6,482	7,671E+08	1,582E-03	6,485	83439775,47
0,70	32,601	1,999	8,124	8,262E+08	1,568E-03	8,128	121275278,4
0,75	34,930	1,815	8,571	8,852E+08	1,554E-03	8,573	146855526,6
0,80	37,258	1,651	7,565	9,442E+08	1,542E-03	7,567	147484027,6
0,85	39,587	1,503	7,147	1,003E+09	1,530E-03	7,150	157305253,5
0,90	41,916	1,369	9,031	1,062E+09	1,519E-03	9,033	222818166,3
0,95	44,244	1,246	8,852	1,121E+09	1,509E-03	8,854	243339033,7
1,00	46,573	1,134	10,337	1,180E+09	1,500E-03	10,338	314822876,1



Gráfica 4.12. Estimación de la resistencia total, Método de Molland.

Se observa que los valores obtenidos por este método son mucho mayores a los obtenidos por el Método de Sahoo, e incluso incoherentes (negativos) para números de Froude menores de 0,35. Esto puede deberse a que el método de Molland no sea aplicable al catamarán de estudio, debido a que las características de este difieren de las de los catamaranes utilizados para generar la regresión del método.

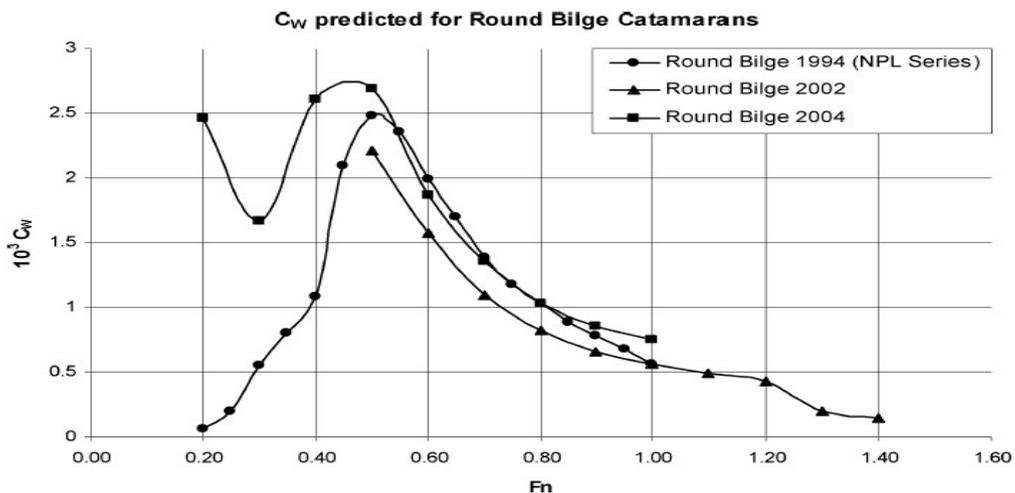
En la siguiente gráfica se representa la resistencia obtenida por el Método de Sahoo y la obtenida por el Método de Molland. La diferencia entre los dos Métodos es tan grande que es necesario hacer una representación logarítmica de la Resistencia.



Gráfica 4.13. Comparación del logaritmo neperiano de la resistencia total obtenida por Método de Molland y por el Método de Sahoo.

4.2. Caso de referencia

Del método de Molland et al. se dispone de una gráfica obtenida de la referencia (Molland et al, 2004) que compara el coeficiente de resistencia por formación de olas calculado por el método de Molland et al. para distintos catamaranes con pantoque redondeado.



Gráfica 4.14. Representación de coeficiente de resistencia por formación de olas para distintos catamaranes de pantoque redondeado, calculado por el Método de Molland et al..

Comparando los resultados obtenidos para el catamarán de estudio se observa que los valores obtenidos no son válidos, se alejan demasiado de los resultados típicos. Por lo que definitivamente se desecha este método de estimación de la resistencia para el catamarán de estudio.

5. MÉTODO DE PING-ZHONG

5.1. Caso de estudio

Este método solo sirve, en el caso de estudio, como comparación con los demás métodos. La aplicación de este método consiste en determinar la resistencia de uno de los monocascos del catamarán, como si se tratara de un buque completo, y multiplicarla por dos.

Tabla 4.15. Cálculo de las variables del método de Ping-Zhong.

Variables	Resultado
C_V	2,829
C_P	0,628
F_T	0,232
F	5,018
i_E	17,618

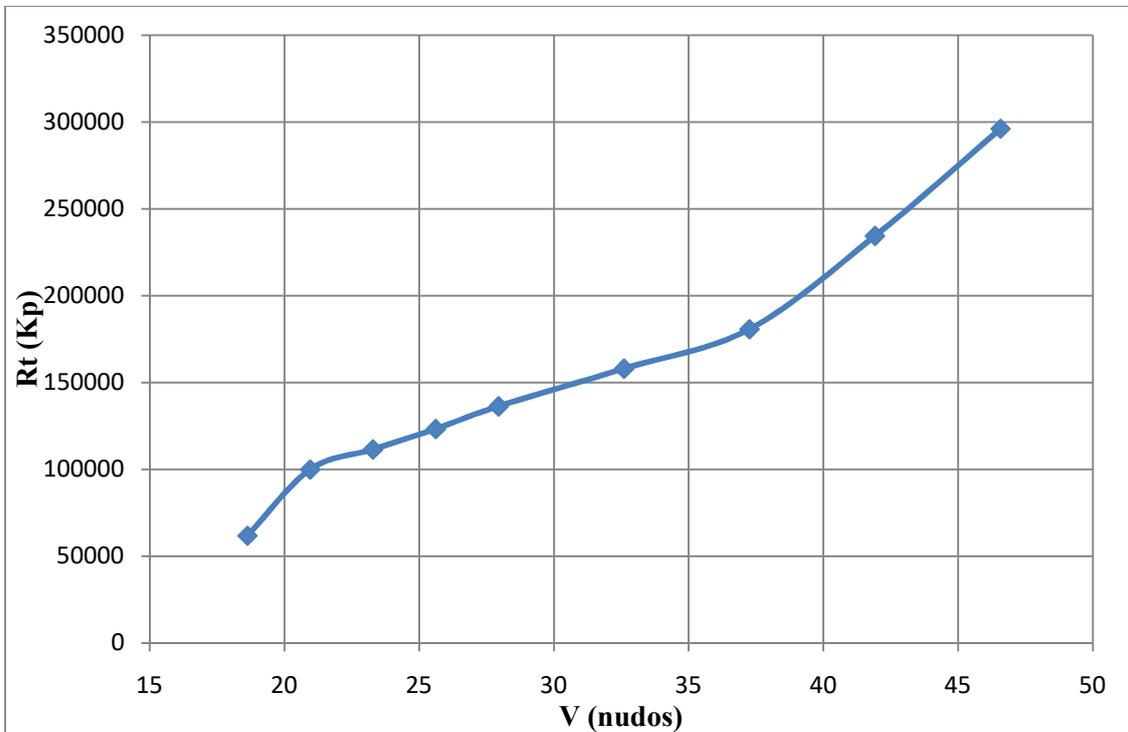
Aplicando la ecuación (3.11) con sus correspondientes constantes se obtiene el coeficiente de resistencia residuo, el coeficiente de resistencia de fricción por la línea ITTC-57 y el de correlación es constante ($0,4 \cdot 10^{-3}$).

Tabla 4.16. Cálculo de los coeficientes de resistencia así como de la resistencia total de uno de los monocascos del catamarán a partir del método de Ping-Zhong.

F_n	V (n)	Re	C_F	C_R	C_{TMONO}	$R_{TMONO}(kp)$
0,40	18,629	4,721E+08	1,684E-03	4,264E-03	6,348E-03	30930,448
0,45	20,958	5,311E+08	1,658E-03	6,047E-03	8,105E-03	49980,426
0,50	23,286	5,901E+08	1,636E-03	5,289E-03	7,325E-03	55763,753
0,55	25,615	6,491E+08	1,616E-03	4,675E-03	6,691E-03	61636,199
0,60	27,944	7,081E+08	1,598E-03	4,219E-03	6,218E-03	68161,923
0,70	32,601	8,262E+08	1,568E-03	3,327E-03	5,294E-03	78997,954
0,80	37,258	9,442E+08	1,542E-03	2,696E-03	4,637E-03	90381,124
0,90	41,916	1,042E+09	1,523E-03	2,830E-03	4,752E-03	117224,723
1,00	46,573	1,158E+09	1,503E-03	2,959E-03	4,862E-03	148067,039

Tabla 4.17. Resistencia del catamarán, método de Ping-Zhong.

V (n)	R_TCAT(kp)
18,629	61860,896
20,958	99960,851
23,286	111527,506
25,615	123272,398
27,944	136323,846
32,601	157995,909
37,258	180762,248
41,916	234449,446
46,573	296134,077



Gráfica 4.15. Estimación de la resistencia total, Método de Ping-Zhong.

5.2. Caso de referencia

Para comparar los resultados del catamarán de estudio obtenidos por el método de Ping-Zhong se toma una aplicación del Método de Ping-Zhong de la que se conocen los resultados. Se trata de un ejemplo extraído de la referencia (García, 2016). Como se mencionó en apartados anteriores el Método de Ping-Zhong no es un método propio de catamaranes, los resultados para el catamarán se consideran solo orientativos. En el caso de referencia se aplica el método a un buque monocasco que cumple con los requisitos del método, pero es suficiente para tener una visión general de los resultados que da el método correctamente aplicado.

Las características del buque de referencia son las recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 4.18. Características del buque de referencia.

L_f	45,000	m
B	8,400	m
T	3,090	m
C_B	0,469	-
C_P	0,669	-
∇	547,758	m ³
A_M	18,200	m ²
A_{ST}	6,700	m ²
LCG	1,440	M
i_E	17,100	°
S	413,200	m ²
C_A	4,00E-04	-

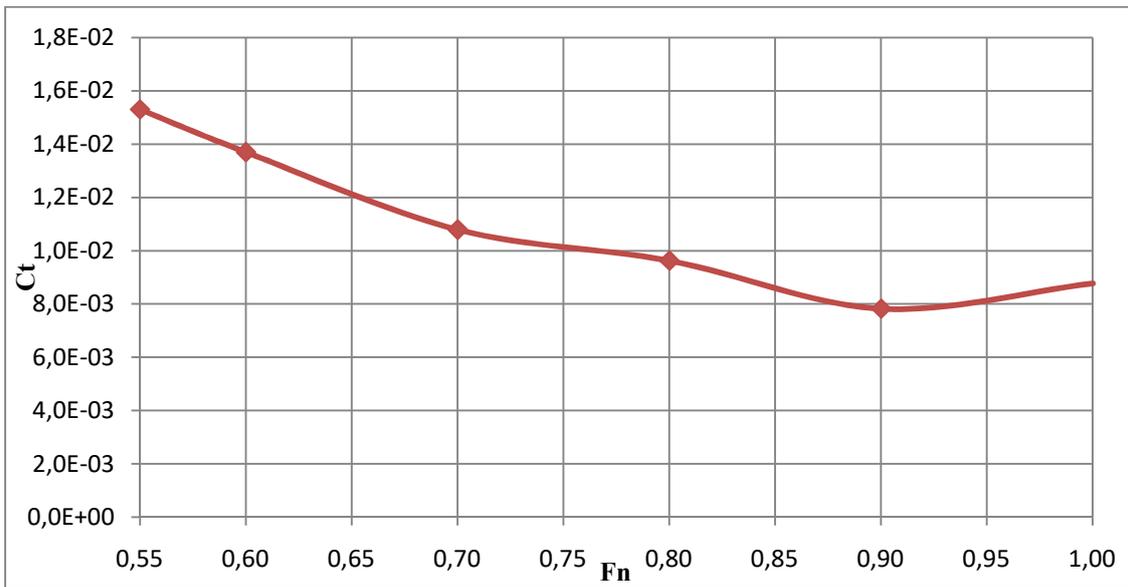
En la tabla 4.18 se muestran las variables del método de Ping-Zhong, y en la tabla 4.19 el cálculo de los distintos coeficientes de resistencia así como la resistencia total para distintas velocidades, y por lo tanto distintos números de Froude.

Tabla 4.19. Variables del buque de referencia.

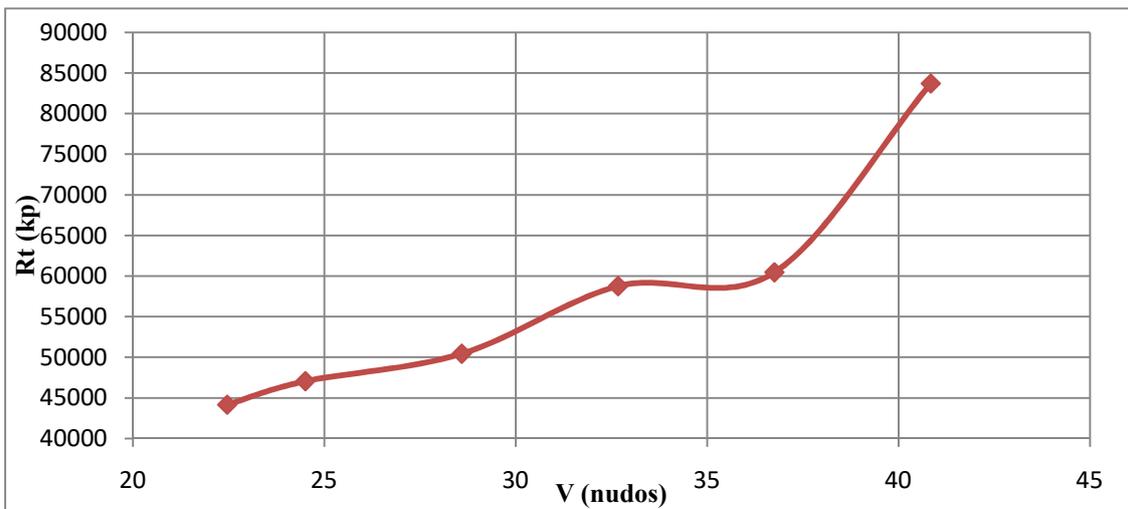
Variables	Resultado
C_V	6,011
C_P	0,669
F_T	0,368
F	3,200
i_E	17,100

Tabla 4.20. Cálculo de los coeficientes de resistencia y de la resistencia total del buque referencia, Método de Ping-Zhong.

F_n	V (n)	R_n	C_F	C_R	C_{TMONO}	R_T(kp)
0,55	22,463	4,376E+08	1,701E-03	1,321E-02	1,531E-02	44168,0
0,60	24,505	4,774E+08	1,681E-03	1,162E-02	1,370E-02	47060,3
0,70	28,589	5,570E+08	1,648E-03	8,744E-03	1,079E-02	50441,0
0,80	32,673	6,365E+08	1,620E-03	7,606E-03	9,580E-03	58763,7
0,90	36,757	7,161E+08	1,596E-03	5,830E-03	7,825E-03	60469,3
1,00	40,841	7,957E+08	1,575E-03	6,801E-03	8,776E-03	83710,0

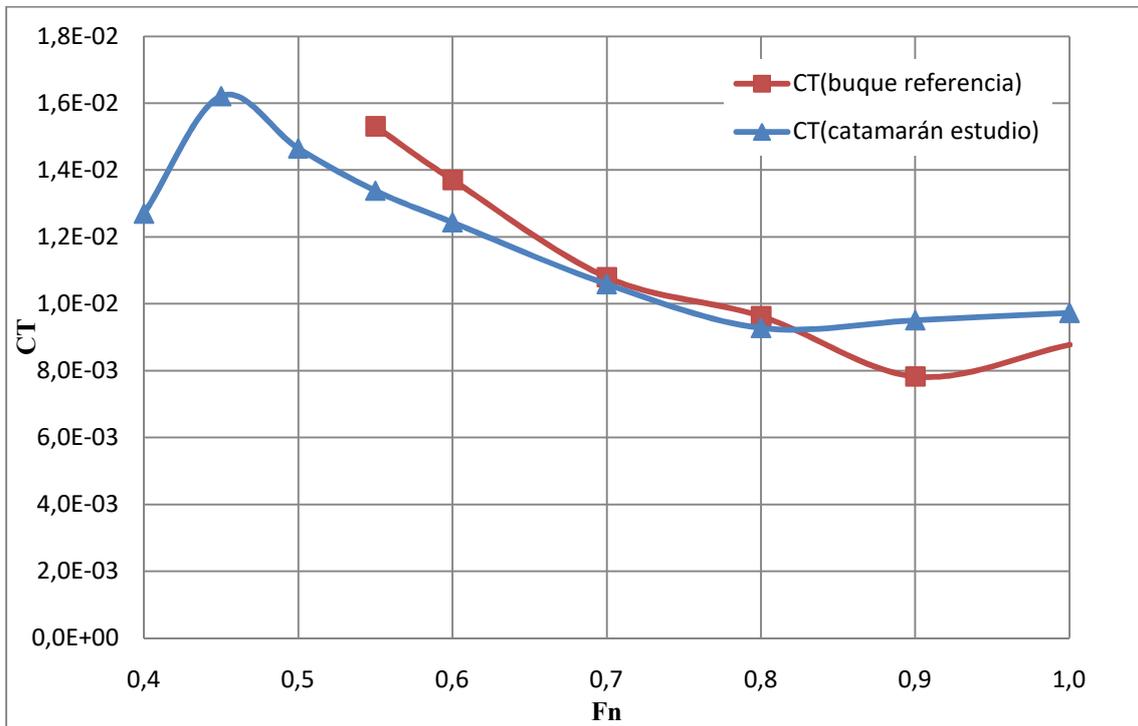


Gráfica 4.16. Representación del coeficiente de resistencia total del buque de referencia calculado mediante el Método de Ping-Zhong.



Gráfica 4.17. Estimación de la resistencia total del buque de referencia mediante el Método de Ping-Zhong.

Representando en un mismo gráfico los coeficientes de resistencia total calculados para el catamarán de estudio y para el buque de referencia se obtiene la Gráfica 4.18:



Gráfica 4.18. Comparación de los coeficientes de resistencia total obtenidos por el método de Ping-Zhong para el catamarán y el buque de referencia.

Como se observa en la gráfica el coeficiente de resistencia total calculado para el catamarán toma valores próximos a los del coeficiente del buque referencia. Se puede considerar, por lo tanto que el método ha sido correctamente aplicado.

6. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

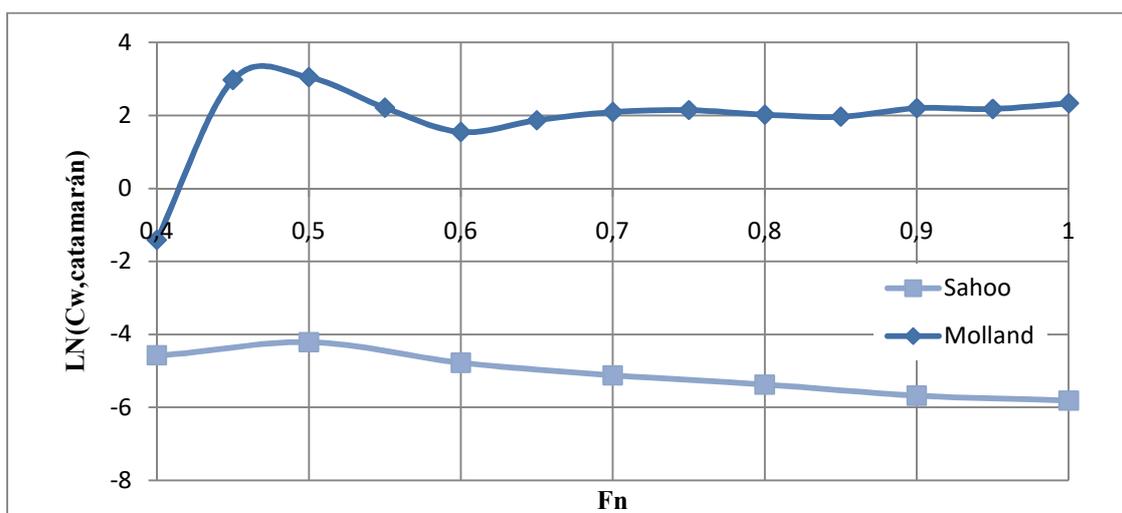
Antes de proceder a la comparación de los resultados obtenidos por los distintos métodos, cabe indicar que, además de la comparación con las formas de las curvas, se ha comprobado en las hojas de cálculo utilizadas para el catamarán de estudio de cada método, que introduciendo los datos de los casos de referencia, los resultados finales eran los esperados.

Con la comparación realizada catamarán de estudio-buque de referencia se comprueba la correcta aplicación de cada método. Para comprobar si los métodos son aplicables o no, se comparan los distintos métodos entre ellos.

6.1. Comparación del coeficiente de resistencia por formación de olas

En este apartado se pretende comparar el coeficiente de resistencia por formación de olas calculado en cada método, con la finalidad de determinar cuál o cuáles de ellos son válidos.

Se representa en la siguiente gráfica el logaritmo neperiano del coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán calculado mediante el Método de Sahoo y el Método de Molland et al, la representación en escala logarítmica es necesaria dada la gran diferencia entre los resultados de los dos Métodos.



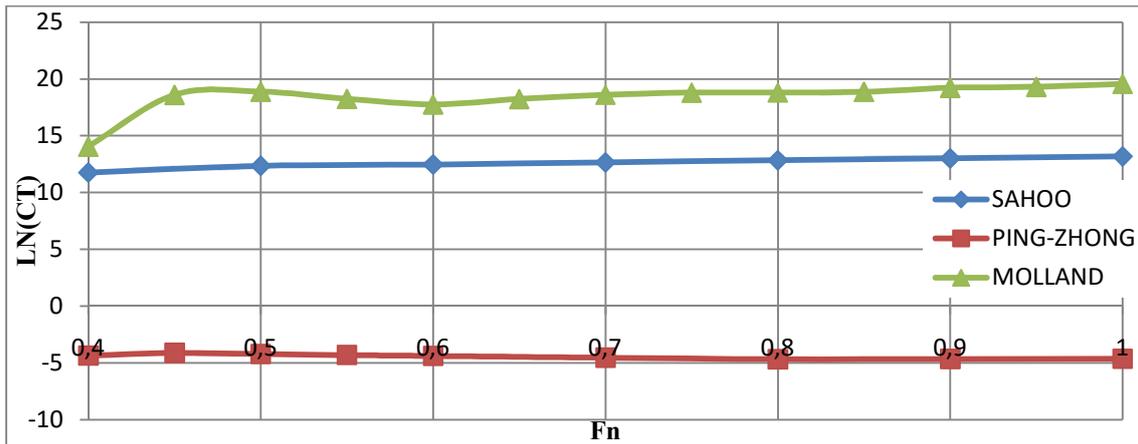
Gráfica 4.19. Comparación de los coeficientes de resistencia por formación de olas obtenidos por el Método de Sahoo y por el Método de Molland y al.

Como se aprecia en la gráfica anterior uno de los métodos no es aplicable, probablemente el Método de Molland ya que da valores demasiado grandes, además el Método de Sahoo es en particular para catamaranes con pantoque redondeado como es el catamarán de estudio, distinción que el Método de Molland y al, no presenta.

6.2. Comparación del coeficiente de resistencia total

Con la finalidad de comprobar cuál de los métodos es aplicable, el Método de Sahoo o el Método de Molland y al., se procede a comparar el coeficiente de resistencia total de ambos métodos con el calculado mediante el Método de Ping-Zhong. El método de Ping-Zhong, en el estudio del catamarán, solo sirve como resultado orientativo pero es suficiente para desestimar uno de los métodos.

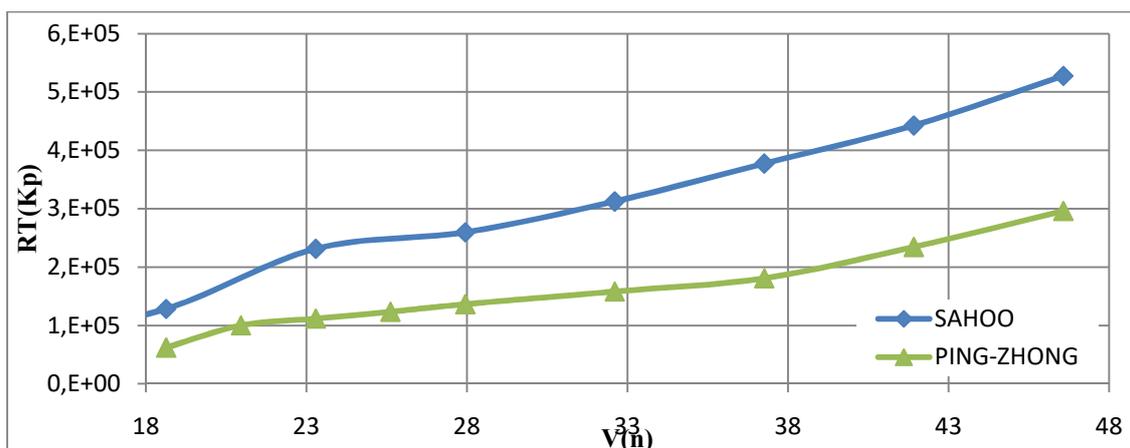
En la siguiente gráfica se representa el logaritmo neperiano del coeficiente de resistencia total calculado para los tres métodos, citados en el apartado anterior.



Gráfica 4.20. Comparación de los coeficientes de resistencia total obtenidos por todos los métodos.

Como cabía esperar el coeficiente de resistencia total calculado por el Método de Molland es demasiado grande. Definitivamente se desestima este método.

En la gráfica 4.21 siguiente se representan únicamente los coeficientes de resistencia total calculados mediante el Método de Sahoo y el Método de Ping-Zhong, comprobándose la coherencia de los resultados obtenidos por el Método de Sahoo.



Gráfica 4.21. Comparación de la resistencia total obtenidos por el Método de Sahoo y el Método de Ping-Zhong para el catamarán de estudio.

6.3. Conclusión

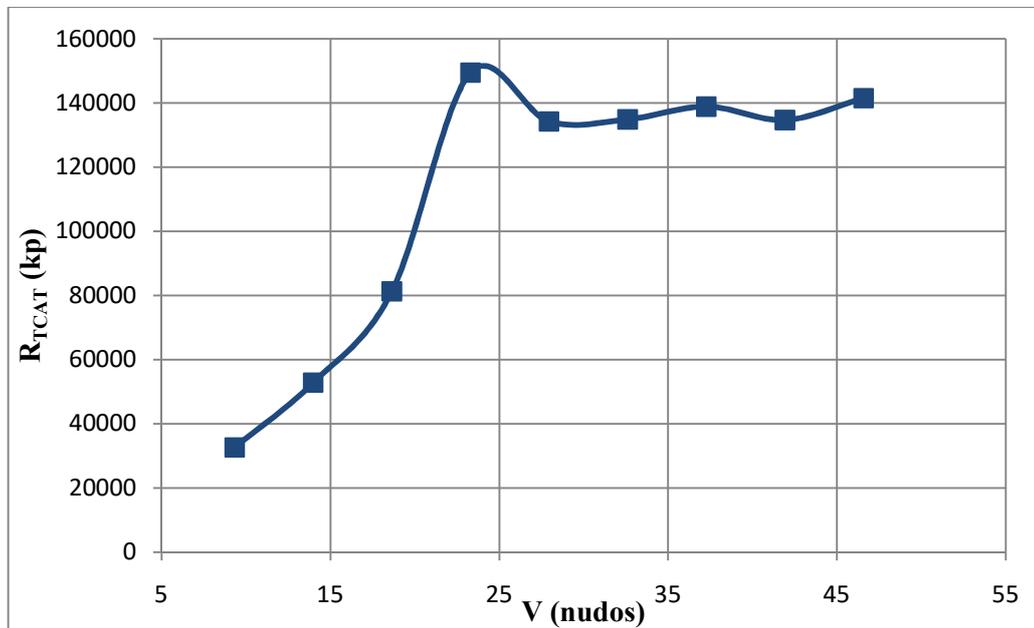
De la comparación de los métodos se concluye que el Método de Molland et al, no es aplicable al catamarán de estudio, mientras que los resultados obtenidos por el Método de Sahoo sí lo son.

Se toman los resultados del Método de Sahoo como resultados teóricos de referencia para proceder a la comparación con los obtenidos mediante cálculo por CFD.

Con la finalidad de concluir el presente capítulo con los resultados del método de predicción de resistencia elegido, se recoge en la siguiente tabla un resumen de los resultados del Método de Sahoo, así como la curva de resistencia.

Tabla 4.21. Resumen de los resultados del Método de Sahoo

Fn	V(n)	C_{TCAT}	R_{TCAT}(Kp)
0,2	9,315	3,126E-02	37776,4
0,3	13,972	2,738E-02	74456,7
0,4	18,629	2,659E-02	128530,8
0,5	23,286	3,063E-02	231370,2
0,6	27,944	2,387E-02	259609,3
0,7	32,601	2,111E-02	312536,6
0,8	37,258	1,952E-02	377445,8
0,9	41,916	1,809E-02	442733,1
1,0	46,573	1,476E-02	527531,7



Gráfica 4.22. Resistencia total del catamarán calculada mediante el Método de Sahoo.

CAPÍTULO 5. INTRODUCCIÓN A LOS CFD

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos es un campo de la ciencia que estudia las leyes físicas que gobiernan el fluido o fluido bajo varias condiciones. Ha requerido un gran esfuerzo entender las leyes que gobiernan y la naturaleza de los fluidos en si mismos, resultando un campo complejo en la teoría y en la investigación.

“Computational Fluid Dynamics” o CFD es una herramienta utilizada para generar simulaciones de fluidos con la ayuda del ordenador. CFD encuentra la solución de las leyes dinámicas que gobiernan los fluidos numéricamente. El complejo grupo de ecuaciones diferenciales parciales se resuelven en el dominio geométrico dividido en pequeños volúmenes, comúnmente conocido como malla.

CFD ha permitido entender el mundo de nuevas formas. Ahora es posible ver cómo sería estar dentro de un horno, modelar cómo fluye la sangre a través de las arterias y las venas e incluso crear mundos virtuales. CFD permite a los analistas a simular y entender los flujos de fluido sin la necesidad de ayudarse con instrumentos para medir las distintas variables del fluido en los lugares deseados.

2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

2.1. Ventajas

A continuación se explican algunas de las ventajas por las que CFD está adquiriendo gran popularidad.

CFD permite la simulación numérica de flujos de fluidos, resultados que siguen disponibles para su estudio aún después de que el análisis concluya. Esto es una gran ventaja, sobretodo en ensayos de duración muy corta como las pruebas de túnel aerodinámico.

Mediante el análisis con CFD se pueden observar las propiedades del fluido sin perturbar al propio fluido, esto no es siempre posible con los instrumentos de medida convencionales.

Permite una reducción sustancial en tiempo y costes en nuevos diseños. CFD puede utilizarse como una herramienta para descartar diseños, los ingenieros y analistas pueden estudiar numéricamente los prototipos y experimentar solo aquellos que parezcan prometedores.

Al trabajar con esta herramienta es posible simular sistemas y condiciones que sería muy difícil y/o muy costoso analizar experimentalmente. Además de sistemas y condiciones difíciles de simular, se presenta la posibilidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límites de funcionamiento, por ejemplo, accidentes con sustancias tóxicas. También, CFD permite observar el comportamiento del fluido en localizaciones que no son accesibles para los instrumentos de medida, como por ejemplo dentro de una cámara de combustión.

El nivel de detalle prácticamente ilimitado. Los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras que los programas CFD pueden generar gran cantidad de información sin coste añadido y con posibilidad de hacer estudios paramétricos.

Existe la capacidad de generación de gráficos que permiten una mejor comprensión del resultado y así estimular la compra del producto, proporcionándole un valor añadido al producto.

2.2. Inconvenientes

Todas las ventajas del CFD conllevan un inconveniente principal, que es, la necesidad de personal con grandes conocimientos de las ecuaciones que modelan los fenómenos físicos.

Otra desventaja es que no siempre es posible llegar a resultados lo suficientemente precisos, dando lugar a grandes errores en cuestiones básicas. Esta imposibilidad se debe a insuficientes e incompletos modelos de simulación entre ellos, incompletos modelos para simular el efecto de la turbulencia, fenómenos multifásicos o la combustión, entre otros.

También la simplificación del fenómeno a estudiar para que el hardware y el software puedan abordarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.

A pesar de la creciente velocidad de cómputo disponible, CFD aún no ha madurado al nivel para poder ser usado al tiempo real de cómputo. Los análisis numéricos requieren un tiempo significativo para introducirlos y realizarlos.

Por último y no menos importante, la tendencia humana a creerse todo lo procedente del ordenador, sobre todo cuando se presentan resultados de forma atractiva.

3. CAMPOS DE APLICACIÓN

La herramienta CFD tiene aplicación en casi todos los campos de la técnica actual. Algunas de las áreas en las que esta herramienta tiene una gran importancia son: aeroespacial, arquitectura, automovilismo, ingeniería civil, películas y gráficos en ordenadores, hidráulica térmica nuclear, industria de procesos, de semiconductores, del acero, del cristal, flujos de aire, flujos a través de tuberías y conductos, medicina...

3.1. Campos de aplicación en la hidrodinámica

Además de los campos de aplicación de CFD anteriormente citados, en la hidrodinámica también es aplicable esta herramienta. En la hidrodinámica CFD se utiliza en los siguientes campos:

Resistencia y propulsión: las aplicaciones CFD se centran fundamentalmente en ese campo. Aquí sobre todo, se suelen utilizar cálculos potenciales donde se desprecian los efectos de la viscosidad y formación de olas en superficie libre. Esto proporciona unos cálculos simples, rápidos y más o menos acertados. Sin embargo, con el tiempo y ya a finales de los 90, empezaron a considerarse todos estos efectos siendo el caballo de batalla.

Maniobrabilidad: este aspecto, cada día gana más en importancia con las nuevas regulaciones de la IMO tras accidentes marítimos de buques tanques. Así pues, el análisis mediante herramientas CFD de los flujos alrededor de apéndices del buque permiten calcular los distintos momentos producidos y así, evaluar la maniobrabilidad del buque.

Comportamiento en el mar: aquí los códigos CFD, constituyen una parte poco madura en este campo, aunque cada día más existen códigos comerciales que permiten el cálculo de los movimientos del buque frente a un determinado estado de mar. Sin embargo, éste problema presenta una gran dificultad ya que es necesario disponer una malla de diferente tamaño según la altura de ola y diferentes características del mar, así como un dominio computacional grande que permita representar los estados del mar así como fenómenos de difracción de oleaje, embarque de agua en cubierta... Otra aplicación dentro de este campo es el "Offshore", campo con gran visión de futuro; aquí el estudio de las cargas de oleaje y viento sobre las estructuras resulta de suma importancia para un buen diseño.

Diseño de propulsores: en campo de los CFD las técnicas utilizadas son viscosas ya que permiten un mejor cálculo del rendimiento del propulsor para una mejor aproximación a los resultados de experimentos reales. Aquí se emplean técnicas BEM ("Boundary Element Methods") u otras como superficies sustentadoras.

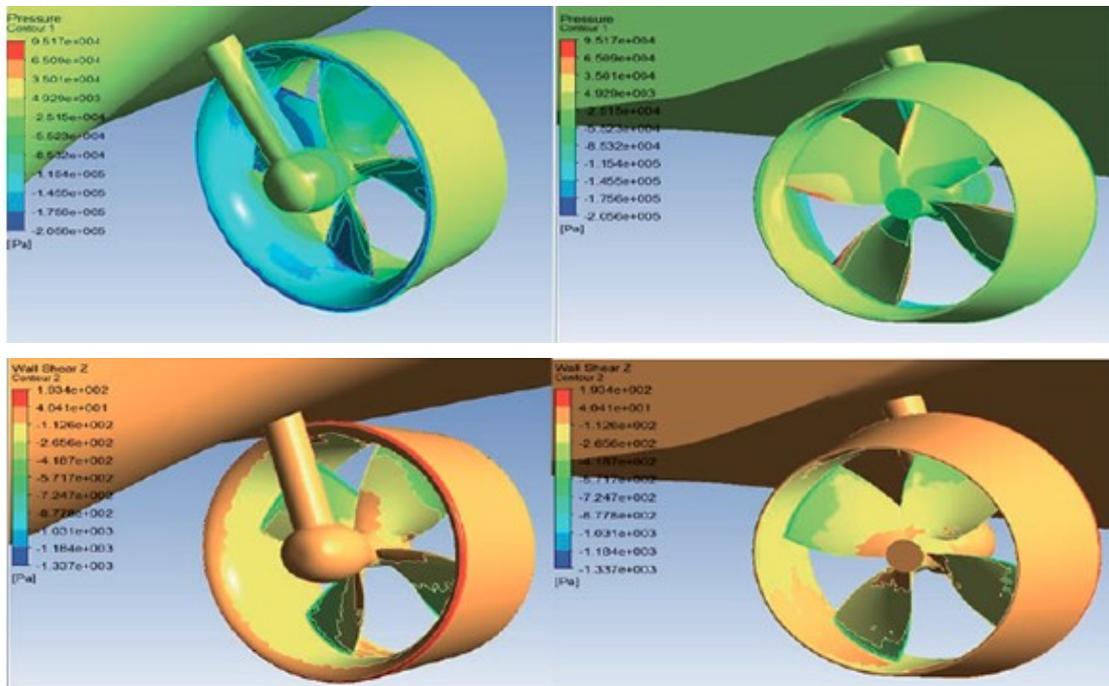


Figura 5.1. Los CFDs facilitan el diseño del sistema de propulsión, en la figura se muestra la distribución de presiones en la parte superior y la de la resistencia viscosa en la parte inferior, en el propulsor de un buque.

4. MODELOS FÍSICO-MATEMÁTICOS

Las ecuaciones de conservación de masa y momentum resultan más complejas de lo que parecen. Existen términos no lineales, acoplados y difíciles de resolver. La experiencia ha demostrado que las ecuaciones de Navier-Stokes describen con exactitud el movimiento del fluido, sin embargo, sólo han sido capaces de resolverse unos pocos casos en geometrías simples y cuya aplicación a la industria resulta limitada.

4.1. Modelo de flujo potencial

Describen el comportamiento de fluidos irrotacionales en flujos ideales. La teoría básica para el cálculo en este caso, consiste en partir de la definición de potencial de velocidades, constituyendo una simplificación adicional para el cálculo de flujos estacionarios. Así, dentro de estos modelos podemos encontrar diferentes métodos desarrollados por distintos autores, como Michell en 1898 que ya obtuvo fórmulas para el cálculo de coeficientes por formación de olas, Haverlock en 1932 que también dio soluciones para el cálculo de la resistencia por formación de olas o el método de Hess & Smith para el cálculo del potencial de velocidades. Todos estos métodos plantean el siguiente problema, Ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5.1)$$

Para resolver este problema se aplican condiciones de contorno en la superficie libre del fluido, así como en la superficie libre del buque:

Condiciones de contorno:

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 \\ \phi = Ux + \phi_p \end{cases} \rightarrow \nabla^2 \phi_p = 0 \quad (5.2)$$

y en la superficie del buque:

$$\begin{aligned} V_n = \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_s &= 0 \\ \left. \frac{\partial \phi_p}{\partial n} \right|_s &= -U \left. \frac{\partial x}{\partial n} \right|_s \end{aligned} \quad (5.3)$$

Condición de contorno cinemática:

$$\left(U + \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \phi_p}{\partial z} (-1) = 0 \quad (5.4)$$

Condición de contorno dinámica

$$p + \frac{\rho}{2} \left[\left(U + \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho gh = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (5.5)$$

4.2. Modelos para flujo ideal

Cuando el número de Reynolds es suficientemente elevado, lo que ocurre en muchas de las aplicaciones prácticas de la Mecánica de Fluidos, despreciar los efectos viscosos y de conducción de las ecuaciones resulta una aproximación bastante cómoda pues elimina los términos difusivos de segundo orden en las ecuaciones diferenciales y hace que las ecuaciones de gobierno pasen a ser de primer orden, con todo lo que lleva asociado en cuanto a simplificación de cálculos.

Con las hipótesis de despreciar los efectos viscosos y la transferencia de calor por conducción, es decir, si se considera al fluido como ideal, se obtienen las ecuaciones de Euler. Las ecuaciones de Euler adoptan las expresiones siguientes:

Continuidad:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5.6)$$

Momentum:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{f}_e \quad (5.7)$$

4.3. Modelos para flujos ideales, estacionarios y rotacionales

Es un tipo de modelos muy similar a los del fluido ideal. Consiste en reducir el número de variables que intervienen en los cálculos introduciendo la vorticidad en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de la energía. No se consideran aquí ni las pérdidas por viscosidad en la capa límite ni los efectos de la turbulencia.

4.4. Solución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen una modelización correcta del flujo de un fluido Newtoniano, incluyendo todos los efectos viscosos y térmicos. Adecuadamente resueltas incluyen los efectos de la turbulencia y de la capa límite, pero esta resolución directa requiere de una discretización espacial y temporal tan fina que está claramente fuera del alcance de cualquier aplicación industrial. Así pues, el avance en la computación permite su resolución en grandes supercomputadoras.

La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes sí que es posible si se utilizan modelos adecuados para simular el efecto de la turbulencia y de la capa límite en discretizaciones no tan detalladas.

4.5. Modelos parabólicos de las ecuaciones de Navier-Stokes

Este tipo de modelos ha sido desarrollado para el cálculo de flujos supersónicos e hipersónicos, donde la captura de las ondas de choque, gradientes de presión, esfuerzos viscosos superficiales y transferencia de calor son los objetivos más importantes para en el diseño.

Las ecuaciones de gobierno parabólicas se obtienen a partir de las de Navier-Stokes considerando las siguientes hipótesis:

- Flujo estacionario.
- Los gradientes de esfuerzos viscosos son despreciables en la dirección de las líneas de corriente.
- Los gradientes de presión en la dirección de las líneas de corriente se aproximan por su valor en zonas de capa límite cercanas.

La aplicación de estas técnicas queda restringida al campo aeronáutico.

4.6. Modelos de flujo incompresible

Un flujo se denomina incompresible cuando la densidad del fluido en cada instante permanece independiente de las variaciones de presión. Cuando el flujo es además isoterma, las ecuaciones de gobierno se simplifican notablemente y la solución para las distintas variables se hace independiente de la temperatura. El sistema de ecuaciones requerido queda reducido a la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento, que expresadas adimensionalmente y con la única presencia de la gravedad como fuerza volumétrica, adoptan las siguientes formas:

Continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5.8)$$

Cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \cdot \vec{u} + \frac{1}{Fn} \vec{g} \quad (5.9)$$

De esta forma, las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento son independientes de la ecuación de la energía, que no es necesario resolver para obtener los campos de velocidades y presión. Pese a la ventaja que esto parece implicar, en la práctica, las dos ecuaciones a resolver se vuelven “rígidas” por la ausencia de derivada temporal en la ecuación de continuidad, y su solución resulta más dificultosa.

4.7. Modelos para la resolución de las turbulencias

El número de Reynolds de un flujo da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas con los efectos convectivos, y las fuerzas viscosas. Ya sabemos que para valores inferiores al Reynolds crítico el flujo es intrínsecamente estable y las capas de fluido adyacentes se deslizan unas sobre otras de forma ordenada llamando a este régimen laminar.

Si el flujo tiene un valor del número de Reynolds por encima del crítico, se manifiestan en éste unas perturbaciones que dan lugar a un cambio radical en el comportamiento del flujo. El movimiento se vuelve intrínsecamente no estacionario, incluso con condiciones de contorno constantes. Este régimen lo denominamos flujo turbulento.

La turbulencia se define como el estado de movimiento de un fluido en el que las distintas variables relevantes (presión, velocidad, etc.) fluctúan de una forma desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico en el que las distintas variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo y estos valores varían de una forma aleatoria y desordenada.

La descripción del movimiento de las partículas fluidas debido al efecto de la turbulencia resulta altamente compleja y constituye un problema aún sin solución desde el punto de vista de los métodos numéricos. Así pues, la simulación de las turbulencias constituye una de los principales obstáculos de los CFD.

4.7.1. Simulación directa de las ecuaciones (“Direct Simulation”, DS)

Este método consiste, en realidad, en no utilizar ningún modelo para la turbulencia, sino realizar discretizaciones temporales y espaciales que sean capaces de simular el flujo en un determinado problema.

La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes resulta hoy en día abordable sólo para un número muy limitado de problemas simples de interés académico. La primera solución de este tipo se realizó en 1981 en la Universidad de Stanford.

4.7.2. Simulación directa de grandes vórtices (“Large Eddy Simulation”, LES)

Este tipo de técnicas numéricas reducen la complejidad de las ecuaciones de gobierno considerando sólo parte de los efectos turbulentos del flujo. Se estudia el intercambio energético entre las denominadas “fluctuaciones de gran escala” y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia. Se trata de un tipo de modelo intermedio entre la simulación directa y el promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes, que extiende el promedio temporal a la captura de ciertos efectos turbulentos básicos de forma numérica. Aunque sin llegar al extremo de la simulación directa, sólo es posible para problemas simplificados y requiere unas capacidades de cálculo muy elevadas.

4.7.3. Modelos URANS (“Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes)

Son modelos matemáticos muy similares a los métodos RANS, sin embargo, en este caso trabajan en régimen transitorio en lugar de permanente como lo hacen los métodos RANS. Así la solución del problema depende del tiempo. Este tipo de métodos está sufriendo gran desarrollo en la actualidad.

4.7.4. Modelos que promedian las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS)

Los modelos de promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes) han sido muy estudiados y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas prácticos resueltos mediante técnicas numéricas.

El procedimiento de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introduce en las ecuaciones con el fin de obtener los comportamientos promedio y turbulento (aleatorio) de las distintas variables. El punto de partida es muy sencillo. Se trata de obtener una descomposición de las variables en su valor medio y su valor fluctuante. Así existen tres formas más pertinentes en la promediado de Reynold, las cuales son: promediado del tiempo, promediado espacial y el promedio del ensamble.

Así, el promediado temporal es adecuado para turbulencias estacionarias; es decir, flujos cuya media no varía con el tiempo. La promediado del tiempo puede ser definida como.

$$F_T(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt. \quad (5.10)$$

La promediación espacial, resulta adecuada, para flujos con turbulencias homogéneas; es decir, flujos uniformes en todas las direcciones.

$$F_V(x) = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint f(x, t) dV. \quad (5.11)$$

El promedio del ensamble es la técnica más general de promediado. En un ejemplo idealizado en términos de medidas, para N experimentos iguales, donde $f(x, t) = f_n(x, t)$ resulta que la media es FE, donde:

$$F_E(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(x, t). \quad (5.12)$$

Cuando la turbulencia es homogénea y estacionaria, se asumen que estos tres promedios resultan iguales. Esta asunción es conocida como hipótesis ergódica. Por ejemplo, para la velocidad, la descomposición sería:

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}', \quad (5.13)$$

donde la componente media de la velocidad se obtiene haciendo la integral de la velocidad instantánea:

$$\bar{\vec{u}} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) dt, \quad (5.14)$$

suponiéndose que el periodo de integración (T) es lo suficientemente grande en comparación con la escala temporal de la turbulencia, pero lo suficientemente pequeño como para captar cualquier fenómeno no estacionario distinto a la turbulencia. La utilización de este tipo de métodos es bastante adecuada, pues la mayoría de los fenómenos no estacionarios en Mecánica de Fluidos tiene lugar a frecuencias con rangos muy alejados del rango de frecuencias de la turbulencia.

4.8. Modelos de turbulencia

El proceso de promediado temporal de las ecuaciones diferenciales, da lugar a unos términos, denominados de tensiones de Reynolds (“Reynolds stresses”), que involucran medias de los productos de las fluctuaciones de las componentes de la velocidad, cuya relación con las componentes medias del flujo es desconocida. Para obtener dicha relación es necesario introducir un modelo adicional, denominado modelo de turbulencia o de cierre. Las distintas posibilidades prácticas en cuanto a modelos de turbulencia son analizadas a continuación.

Así pues, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian sobre las escalas de las fluctuaciones de turbulencia (RANS). Estos métodos dan lugar a un campo de flujo promediado y simulado que es más uniforme que el flujo real, y, por tanto, reduce drásticamente el número de puntos de la discretización espacial y de la temporal necesario para obtener las variables buscadas.

Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones de las variables con los valores promedio, de forma que se puedan resolver las ecuaciones de gobierno. Un modelo de turbulencia será útil, dentro de un programa CFD de propósito general, si es lo suficientemente aproximado, sencillo y económico. Entre los modelos más comunes podemos encontrar algunos de los explicados en los siguientes párrafos.

4.8.1. Modelos algebraicos

Los modelos algebraicos de turbulencia o modelos de cero ecuaciones, son aquellos que no necesitan ecuaciones adicionales, y son calculados directamente desde las variables del fluido. Utilizan las hipótesis de aproximación de Boussinesq para obtener las tensiones de Reynolds. En ellos la viscosidad turbulenta y la longitud de mezcla dependen en particular del fluido y deberán ser especificados por adelantado. Como consecuencia, este tipo de modelos de ecuación no son muy apropiados ya que no tendrán en cuenta efectos como convecciones, difusiones de la energía turbulenta. Este tipo de modelos resultan demasiado simples para su utilización en simulaciones en general, por ello es necesario tener un especial cuidado de utilizarlo en geometrías complicadas o procesos complejos, ya que los resultados no serían válidos.

Modelo de longitud de mezcla de Prandtl: Prandtl en 1925 puso sobre la mesa las hipótesis y bases para el desarrollo de este método. Formuló un modelo de turbulencia según el cual las partículas fluidas coalescían y se unían en grupos que se movían como una sola unidad. Además visualizó que el flujo cortante adquiriría un perfil lineal, y los grupos de moléculas retenían su momentum en la dirección x para una distancia en la dirección y , a la que denominó longitud de mezcla (“ l_{mix} ”). Así postuló que:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} \rho u_{mix} l_{mix} \frac{dU}{dy}, \quad (5.15)$$

donde la velocidad de mezcla "umix" adquiriría la siguiente expresión:

$$u_{mix} = constante \cdot l_{mix} \left| \frac{dU}{dy} \right|. \quad (5.16)$$

Podemos decir que "l_{mix}" no es una propiedad física del fluido y agrupando términos resulta que:

$$\tau_{xy} = \mu_T \frac{dU}{dy}, \quad (5.17.)$$

dónde el término μ_T lo denominamos viscosidad turbulenta.

$$\mu_T = \rho l_{mix}^2 \left| \frac{dU}{dy} \right|. \quad (5.18)$$

Entre otros modelos algebraicos podemos encontrar:

1. Modelo de Cebeci-Smith.
2. Modelo de Baldwin-Lomax.
3. Modelo de Johnson-King.
4. Modelos dependientes de la rugosidad.
5. Modelos de longitud de mezcla.

4.8.2. Modelos de ecuación de energía cinética turbulenta

Dentro de este punto se incluyen tanto los modelos de una ecuación de cierre y de dos ecuaciones. Ambos modelos retienen las aproximaciones de Boussinesq para la viscosidad turbulenta pero difieren en un importante aspecto, mientras que los modelos de una ecuación resultan incompletos ya que relacionan la longitud de escala turbulenta con alguna dimensión típica del flujo. Por el contrario, los modelos de dos ecuaciones provienen de una ecuación más para la longitud de escala turbulenta, lo que equivale a decir que presentan un modelo completo.

La ecuación de energía cinética turbulenta: ecuación desarrollada para incorporar los efectos no locales y de históricos del flujo sobre la viscosidad turbulenta a los distintos modelos. Así Prandtl eligió la energía cinética de las fluctuaciones turbulentas como base de la velocidad de escala. Así pues:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} + \overline{v_i^2} + \overline{w_i^2}), \quad (5.19)$$

Así la viscosidad turbulenta, en términos de "k" queda como:

$$\mu_T = \text{Constante} \cdot \rho k^{1/2} l_{mix}. \quad (5.20)$$

Por otro lado, cuando estudiamos la ecuación de tensiones de Reynolds:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{\rho u_i' u_i' u_j'} - \overline{\rho u_j'} \right]. \quad (5.21)$$

Vemos que aparecen una serie de términos que representan procesos que ocurren en los flujos turbulentos. Estos los podemos clasificar en: términos de producción "k", los cuales representan la proporción de energía cinética que es transferida del flujo principal a la turbulencia; términos de disipación "ε", que representan la proporción de energía cinética que es convertida en energía interna térmica.

Así, dentro de los modelos de una y dos ecuaciones podemos encontrar un gran variedad de modelos adecuados cada uno para un determinado tipo de flujo turbulento.

Modelos de una ecuación de cierre

1. Modelo de una ecuación de Prandt.
2. Modelo de Baldwin-Barth.
3. Modelo de Spalart-Allmaras.

Modelos de dos ecuaciones de cierre

1. Modelos de k-epsilon.
2. Modelos de k-omega.

Modelos de dos ecuaciones de cierre con restricciones y límites

4.8.3. Modelos de una ecuación de cierre

Los modelos de una ecuación de energía cinética contemplan la mejora de los modelos algebraicos de resolución mediante el uso de una "viscosidad turbulenta" que no depende puramente de las condiciones locales del fluido pero toma parte por ejemplo en la historia del flujo. Estos modelos son relativamente sencillos y fueron concebidos originalmente para aplicaciones aeroespaciales relacionadas con modelos de flujos de pared maybounded (limitados) y capas límites sometidas a unas condiciones de presiones adversas.

En estos modelos la velocidad V es identificada con $K_1/2$, donde K es la energía cinética por unidad de masa del fluido. Para completar la ecuación de energía cinética turbulenta Prandt postuló que la disipación turbulenta "ε" asumía la siguiente ecuación:

$$\epsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{l}, \quad (5.22)$$

donde C_D es un coeficiente de cierre del modelo y donde la única parte no especificada era la longitud de mezcla. Sin embargo, la experiencia en los modelos de longitud de mezcla dio la suficiente seguridad como para afirmar que $l \propto l_{mix}$, solamente si el ratio de producción o disipación se mantenía constante. Así el primer modelo de una ecuación turbulenta quedaba como:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^{3/2}}{l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (5.23)$$

Más recientemente Baldwin y Barth y por otro lado Spalart and Allmaras han desarrollado métodos más sofisticados, así, por ejemplo, el modelo de Baldwin-Barth incluye siete coeficientes de cierre, dos funciones empíricas de amortiguamiento y alguna otra función que describe la longitud de escala turbulenta.

Originalmente resultaban efectivos con bajo número de Reynolds en los cuales se requería una buena resolución de la región viscosa afectada por la capa límite. Estos modelos están implementados usando funciones de contorno en donde la resolución de la malla no es suficientemente buena, lo que los hace ideales para obtener simulaciones en donde la malla no es suficientemente fina y en donde el cálculo turbulento no es demasiado crítico.

Son relativamente modernos y no se sabe con certeza si son aplicables a cualquier tipo de fluido complejo en ingeniería; así por ejemplo: no se puede predecir la caída de los flujos turbulentos, isotrópicos y homogéneos. Además estos modelos son criticados por la imposibilidad de adaptarlos rápidamente a los cambios de escala "l" ya que en configuraciones geométricas complejas resulta difícil describir "l", porque es dependiente de cantidades no locales como del espesor de capa límite, desplazamiento del espesor... e introduce una incertidumbre algo similar al modelo de ecuación algebraica.

4.8.4. Modelos de dos ecuaciones de cierre

Este tipo de modelos de turbulencia han sido los más estudiados durante las décadas de los 80 y 90 de siglo XX, gran parte de los estudios realizados en estos años son con este tipo de modelos, los cuales permiten una mayor precisión en flujos complicados, pero que conllevan un gasto computacional elevado, aunque actualmente esto ya no resulta un inconveniente por el desarrollo informático.

Este tipo de modelos provienen no sólo de una ecuación para el cálculo de "k" sino que también nos ofrecen ecuación otra para el cálculo de la longitud de escala turbulenta "l". Como consecuencia tenemos modelos que permiten predecir los flujos turbulentos con más precisión. Como punto de partida de estos métodos, tenemos la hipótesis de Boussinesq junto con la ecuación de energía cinética vista anteriormente. Kolmogorov en los años 40, definió entonces la segunda variable, a la que se llamó rango específico de disipación " ω ". Esta cantidad tiene dimensiones de s^{-1} , así de esta manera los valores de la viscosidad turbulenta, longitud de escala turbulenta y disipación turbulenta pueden ser determinadas como:

$$\mu_\tau \sim \frac{\rho k}{\omega} \quad l \sim \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\omega} \quad \epsilon \sim k\omega$$

Hemos de notar que este tipo de modelos de turbulencia no son una herramienta universal para la obtención de las características turbulentas del fluido, dando resultados más o menos aceptables dependiendo de dónde se utilicen.

A continuación nos centraremos en un modelo de dos ecuaciones que resulta ampliamente utilizado en diversas simulaciones, este modelo es el $k-\epsilon$.

Como modelo de cierre o estrategia numérica para resolver de forma aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, se desarrollan dos ecuaciones de transporte adicionales, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ). Estas variables se definen según las expresiones:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_1^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{v_1^2} + \overline{w_1^2}), \quad (5.24)$$

$$\epsilon = 2\overline{v e_{ij}' e_{ij}'}, \quad (5.25)$$

donde $\overline{e_{ij}'}$ es la parte fluctuante del tensor de velocidad de deformación.

Las ecuaciones de transporte k y ϵ se basan en el conocimiento de los procesos que producen los cambios en esas variables y son:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho k \bar{u}) = 2\mu_\tau E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon + \nabla \left[\frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \text{grad } k \right], \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \epsilon \bar{u}) = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_\tau E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon + \nabla \left[\frac{\mu_\tau}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right], \quad (5.27)$$

donde E_{ij} es el tensor de componentes medias de la velocidad de deformación. El significado físico de las anteriores expresiones se puede resumir en el siguiente balance:

$$\begin{aligned} & [\text{Velocidad de cambio de } k/\epsilon] + \left[\text{Transporte de } \frac{k}{\epsilon} \text{ por convección} \right] \\ & = [\text{Producción de } k/\epsilon] - [\text{Destrucción de } k/\epsilon] \\ & + \left[\text{Transporte de } \frac{k}{\epsilon} \text{ por difusión} \right]. \end{aligned}$$

Aparecen varios conceptos cinemáticos relacionados con las “escalas” o longitudes típicas asociadas a los distintos movimientos del flujo (flujo principal medio y flujo oscilante o turbulento, relacionado con los vórtices). Así en este modelo de turbulencia la longitud de escala turbulenta se expresa mediante la siguiente relación como:

$$l = \frac{k^{3/2}}{\epsilon}. \quad (5.28)$$

Este método utiliza la velocidad de disipación ϵ de los remolinos pequeños para definir la escala de longitud "l" de los remolinos grandes porque, para altos números de Reynolds, la velocidad de extracción de energía del flujo de los remolinos grandes es igual a la velocidad de transferencia de energía a los remolinos pequeños. Si esto no fuese así, la energía en algunas escalas de la turbulencia podría aumentar o disminuir sin límite, cosa que no ocurre en la práctica con lo que se justifica el uso de la velocidad de disipación ϵ dentro de la definición de la escala de longitud “l”. Aplicando la misma aproximación del modelo de la longitud de mezcla se puede obtener la viscosidad turbulenta como:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (5.29)$$

Este tipo de modelos presentan ventajas como:

- Sólo se necesita fijar las condiciones iniciales y de contorno.
- Resultados satisfactorios para una gran cantidad de flujos.
- Es el modelo turbulento más ampliamente utilizado en la mayoría de flujos en aplicaciones industriales.
- Se dispone de leyes de pared desarrolladas como condiciones de contorno para este tipo de modelos

Aunque también presenta algunas desventajas:

- Implementación más compleja que los modelos algebraicos debido a la introducción de dos ecuaciones diferenciales adicionales.
- Pobres resultados en casos como: flujos no confinados, flujos con grandes gradientes longitudinales, flujos turbulentos completamente desarrollados en conductos no circulares.

Una variación del método k- ϵ , denominada k- ω , fue publicada por Wilcox en 1993. Se trata de un método RANS en el cual se elimina una variable dividiendo entre ella todas la demás del problema, simplificando la resolución del problema particular. Este método tiene el inconveniente de presentar singularidades, cuando la variable por la que se divide es cero. Por ello este modelo de turbulencia resulta más acertado en el campo aeronáutico que en el naval.

Además de todos estos modelos existen otros que podemos encontrar dentro de la variedad de códigos existentes en el mercado actual de los CFD.

- Modelos v2-f
- Modelos de tensiones de Reynolds (RSM)
- Modelos de simulación de grandes vórtices ("Large eddy simulation"(LES))
 1. Modelo de Smagorinsky
 2. Submalla dinámica
 3. Modelo RNG-LES
 4. Modelo de adaptación a la viscosidad turbulenta cercana a la pared (WALE)
- Modelos de simulación directa

5. TÉCNICAS EMPLEADAS EN CFD

5.1. BOUNDARY ELEMENT METHODS (BEM)

Estas técnicas son empleadas básicamente en el cálculo de flujos potenciales. Así pues, en aplicaciones prácticas en hidrodinámica los métodos BEM reciben el nombre de métodos de los paneles. Este método divide la superficie del buque en pequeños paneles, así cada uno de estos paneles cumple la ecuación de la Laplace del potencial de velocidades $\nabla^2\phi = 0$.

5.2. FINITE DIFFERENCE METHODS (FDM)

En este caso, el dominio fluido es discretizado en todos sus puntos. Así, las derivadas parciales son aproximadas mediante diferencias finitas, para posteriormente resolver un sistema de ecuaciones resultante. El error cometido por este tipo de métodos puede llegar a ser importante. Así, cada vez, son menos utilizados, siendo sustituidos por métodos como los que se presentan en los siguientes puntos.

5.3. FINITE ELEMENT METHODS (FEM)

El método de los elementos finitos predomina fundamentalmente en los cálculos estructurales. En hidrodinámica el rol no es menos importante así que, presentemos muy escuetamente este método.

El MEF es un procedimiento de aproximación de problemas continuos en donde se divide el sistema en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros, siendo la resolución del sistema completo, mediante el ensamblaje de los elementos, similar a un problema discreto.

Para analizar el comportamiento de una estructura continua mediante el MEF se procede de la siguiente manera:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas del problema, como ocurre en el análisis de estructuras.
3. Se elige un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de fluido, dentro de cada "elemento finito", en función de las condiciones de contorno.

4. A partir de aquí el problema se resuelve como un sistema discreto. Es decir, se ensamblan las matrices de cada elemento, se imponen las condiciones de contorno y se resuelve el sistema de ecuaciones de equilibrio del campo fluido, con lo que se determinan los vectores velocidad, tensiones... Sin embargo, en hidrodinámica muchas de las asunciones tomadas para el cálculo elemental, así como las funciones elementales no pueden usarse para el cálculo del error en las integrales de la misma manera que en el método de Galerkin, con lo que el método pierde elegancia.

5.4. FINITE VOLUME METHODS (FVM)

Este método al igual que los métodos anteriores, es utilizado para la discretización tanto temporal como espacial del problema en cuestión. Sin embargo, éstos integran las ecuaciones de conservación de masa y de momentum sobre toda la celda antes de aproximar el valor en el nodo central. Así, se permite que el error cometido en la cara de salida se cancele con el error de la cara vecina, permitiendo la conservación de masa y momentum. Por ello muchos de los códigos comerciales emplean este método para la resolución de las ecuaciones.

5.5. MÉTODOS ESPECTRALES

Los métodos espectrales utilizan el mismo enfoque general que el de diferencias finitas y métodos de elementos finitos sustituyendo las incógnitas de la ecuación que rige por series truncadas.

La diferencia es que, cuando los dos métodos utilizan aproximaciones locales, la aproximación método espectral es válida en todo el dominio. La aproximación es, ya sea por medio de series de Fourier truncada o por una serie de polinomios de Chebyshev. La discrepancia entre la solución exacta y la aproximación se aborda con un concepto similar al de residuos ponderados de los elementos finitos.

CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE CFD PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA

1. TDYN

Tdyn es un software de simulación diseñado por Compass, empresa especializada en la consultoría para el diseño en ingeniería.

Tdyn incluye un conjunto de herramientas de simulación que permite dar solución a casi cualquier necesidad de análisis en ingeniería, incluyendo problemas de cálculo de estructuras, dinámica de fluidos, transferencia de calor, problemas acoplados, multi-física y de comportamiento de la mar.

Tdyn integra tres paquetes de análisis: Tdyn CFD+HT, RamSeries y SeaFEM, que ofrecen 12 módulos de simulación para dar solución a cualquier necesidad de análisis. Los diferentes módulos integrados en Tdyn están disponibles en una única interfaz gráfica (GUI) para definición de la geometría y datos, así como para la generación de malla y postproceso de los resultados del análisis. En este proyecto paquete necesario es el Tdyn CFD+HT.

El entorno de trabajo de Tdyn permite seleccionar y configurar de manera sencilla el tipo de análisis que se va a llevar a cabo (análisis estructural, CFD, multi-física, interacción fluido-estructura, etc.) de manera que se minimice el tiempo necesario para preparar la simulación.

Además, la tecnología de mallado de Tdyn incluye un conjunto de herramientas que permiten crear mallas de gran calidad de manera automática, tanto estructuradas, semiestructuradas, no estructuradas, e incluyendo mallas de capa límite.

1.1. TDYN CFD+HT

Mucho más que un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), Tdyn CFD+HT es una solución de ingeniería completa para la solución de problemas relacionados con flujos (líquidos o sólidos), transferencias de calor y multi-física. El núcleo de cálculo de Tdyn CFD+HT se basa en su puntera tecnología de cálculo finitesimal (FIC-FEM) que ofrece la mayor fiabilidad y precisión, en un algoritmo robusto y rápido.

La solución de análisis ha sido aplicada en simulaciones de la aerodinámica de edificios, hidrodinámica de buques, procesos de fabricación de envases de vidrio, refrigeración de dispositivos electrónicos, flujo en bombas, estudios de ventilación y muchas más.

2. DEFINICIÓN DEL MODELO Y DE LAS CONDICIONES DEL PROBLEMA

2.1. Definición del volumen de control y condiciones de contorno

2.1.1. *Tamaño del volumen de control*

El modelo 3D generado en Rhinoceros se importa a Tdyn en formato .igs. Previamente se define el tipo de problema a resolver (3D, flujo en fluidos y transpiración).

Para la correcta definición de superficies en Tdyn, es necesario que el modelo creado en Rhinoceros esté dividido a la altura del calado de proyecto, de tal manera que la obra viva o la obra muerta se presenten como superficies distintas. A partir de la obra viva se define la superficie libre y el volumen de control.

En la definición del volumen de control es necesario que las dimensiones del mismo sean lo suficientemente grandes para evitar problemas en el fluido, por ejemplo de refracción. Las dimensiones del volumen de control se definen en función de la eslora del buque, con las relaciones aproximadas de la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Dimensiones del volumen de control.

Dirección	Dimensión
Aguas arriba (popa)	$0,7 \cdot L_{PP}$
Aguas abajo (proa)	$1,4 \cdot L_{PP}$
Manga	$0,8 \cdot L_{PP}$
Calado	$0,8 \cdot L_{PP}$

2.1.2. *Utilización de la “cuchara”*

El espejo moja para la flotación de proyecto, sin velocidad, por ello es necesario crear una superficie (“cuchara”) que ayude al cálculo, dado que la metodología de transpiración presenta ciertas limitaciones. En la Figura 6.1. se representa lo que ocurre cuando el espejo está sumergido.

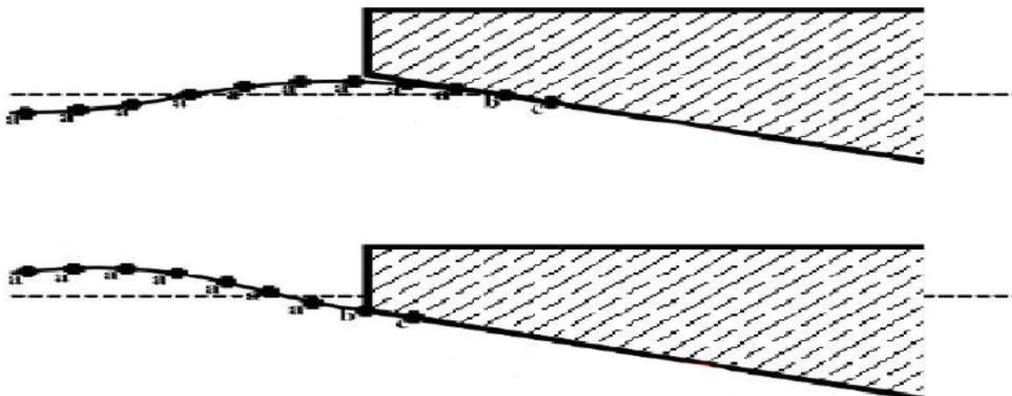


Figura 6.1. Arriba: espejo no sumergido, flujo regular en popa. Abajo: espejo sumergido, flujo travesaño en popa.

La longitud de la cuchara es función del número de Froude, por lo tanto de la velocidad. Para valores de Froude entre 0,1 y 0,35 se utiliza la siguiente expresión:

$$L_C = \pi \cdot Fn^2 \cdot L_0, \quad (6.1)$$

y para números de Froude muy bajos o muy altos:

$$L_C = 0,35 \cdot L_0, \quad (6.2)$$

donde L_0 es la longitud de onda característica del problema dada por la teoría de olas:

$$L_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{V^2}{g}, \quad (6.3)$$

La generación de la cuchara se realiza mediante Rhinoceros como una superficie tangente a la superficie libre y a la parte inferior del espejo de popa, con la longitud calculada mediante las fórmulas anteriores. Como se ha dicho anteriormente la longitud de la cuchara depende de la velocidad, por la que habrá que crear una cuchara distinta para cada velocidad de estudio. En la siguiente figura se muestran modelo y cuchara para el valor Froude igual a 1,0.

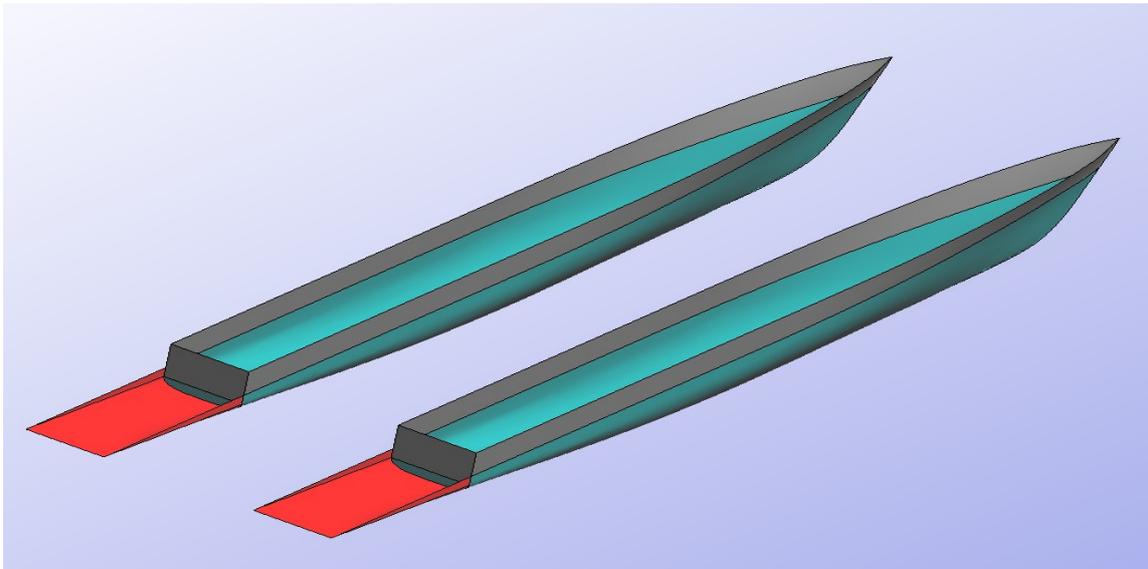


Figura 6.2. Modelo de estudio, en Tdyn, con las cucharas correspondientes para el número de Froude 1.

En la Figura 6.3 se muestra el problema completamente definido, compuesto por el modelo de estudio, las cucharas correspondientes, superficie libre, y finalmente el volumen de control. Las entidades geométricas se agrupan en distintas capas, por comodidad de manejo y visualización.

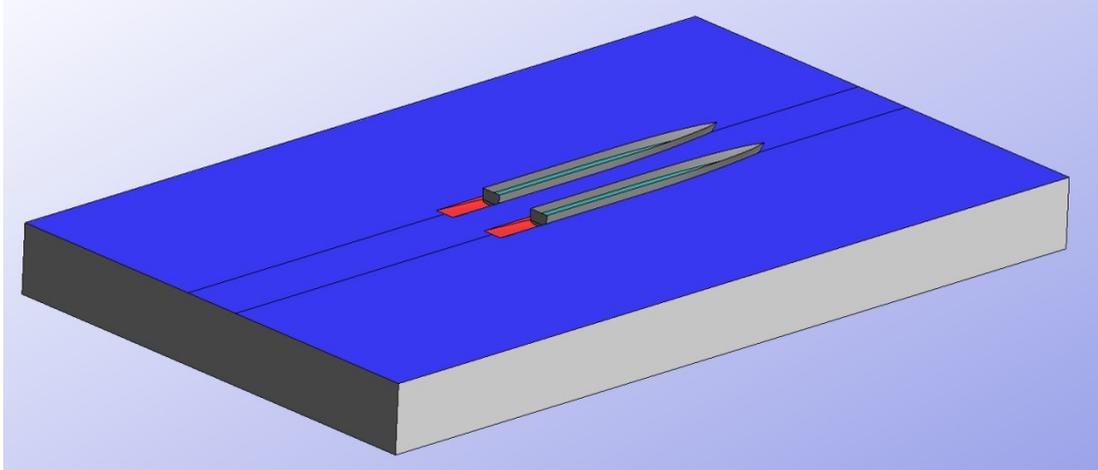


Figura 6.3. Entidades geométricas que definen el problema.

Una vez definido el problema, se realiza la simulación para una misma velocidad con cucharas y prescindiendo de ellas. Se observa que el flujo después del casco se comporta mucho mejor ayudado por las cucharas.

En la Figura 6.4 se muestran los resultados de la altura de ola para el modelo ensayado sin cuchara, se puede ver como el fluido no se comporta correctamente a popa de los espejos.

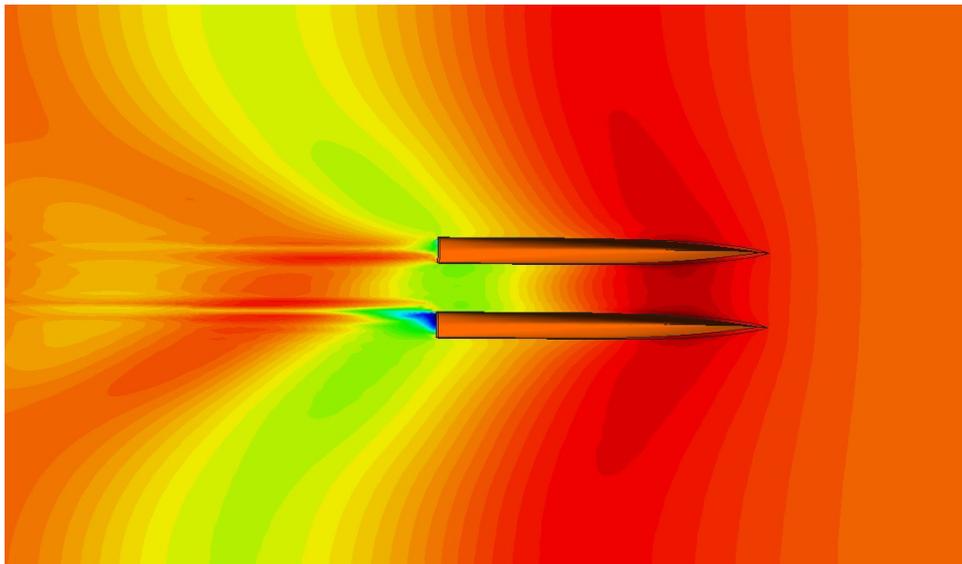


Figura 6.4. Ensayo del modelo sin la utilización de cucharas.

2.1.3. Definición de las condiciones de contorno

Además del modelo de turbulencia, es necesario definir las condiciones de contorno. Es decir fijar los campos de velocidad y presión, el fluido de trabajo en el volumen de control (agua de mar) y la superficie libre. La cuchara irá incluida en la superficie libre, además es necesario fijar el parámetro beta en el comienzo de la cuchara (en el espejo) para definir la altura de la ola en esa zona.

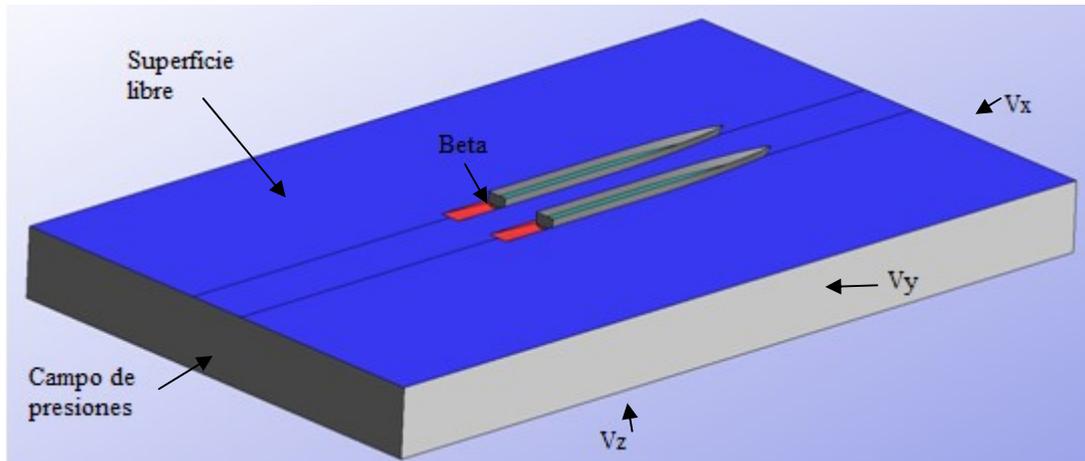


Figura 6.5. Condiciones de contorno aplicadas al modelo en estudio.

2.2. Selección del Modelo de Turbulencia

Una vez definido el problema geoméricamente hay que determinar cuál es el modelo de turbulencia adecuado para el caso de estudio.

Se han realizado una serie de simulaciones con el modelo de turbulencia para altos números de Reynolds así como para el modelo K-Omega. Para ambos se obtienen buenos resultados, pero para el modelo K-Omega se obtienen resultados ligeramente mejores cuando se comparan los resultados de ambos métodos para una misma velocidad respecto a los teóricos.

Cabe indicar que se selecciona como modelo de capa límite pared y-plus, se ensaya también con el modelo de capa límite ITTC pero muestra peores resultados que la primera.

2.3. Selección del tamaño de malla

Por último antes de la simulación se realiza el mallado. El tamaño de la malla se establece persiguiendo la convergencia de los resultados con un tiempo de cálculo aceptable. Cuanto menor sea el tamaño de los elementos de la malla el tiempo de cálculo es mayor, así como la precisión de los mismos, se tiene que encontrar un equilibrio entre ambas cosas. En las zonas de interés donde se requiera mayor precisión, como son el casco y la cuchara, el tamaño de los elementos será menor que el resto del volumen de control.

Para determinar el tamaño de malla que cumpla los requisitos de convergencia de resultados y un tiempo adecuado de cálculo, primero se ensaya con una malla de tamaño grande y poco a poco se va refinando. El último y el penúltimo paso de este proceso realizado corresponden a los tamaños mostrados en la Tabla 6.2, Malla A y B respectivamente.

Tabla 6.2. Tamaños de malla definidos en los últimos pasos de optimización de la misma.

Tamaño de elementos (m)	Malla A	Malla B
Casco	0,30	0,15
Superficie libre	1	1
Cuchara	1	0,50
Tamaño máximo	0,60	0,50
Transición	0,6	0,5
Nodos (K)	113	166
Elementos (K)	658	926

Con la anterior Tabla se pretende mostrar el criterio seguido en el afinamiento de la malla. Se consigue suficiente precisión de cálculo con el último tamaño de malla mostrado en la Tabla 6.2, Malla B. Al ensayar una malla aún más grande se ha observado que el tiempo de cálculo se ralentiza mucho para una diferencia en los resultados muy pequeña.

En la Figura 6.6 se muestra la Malla B, seleccionada para realizar los ensayos a distintas velocidades. Se observa como los elementos son más pequeños en las zonas de interés así como la transición de estos a zonas de elementos más grandes, como la superficie libre.

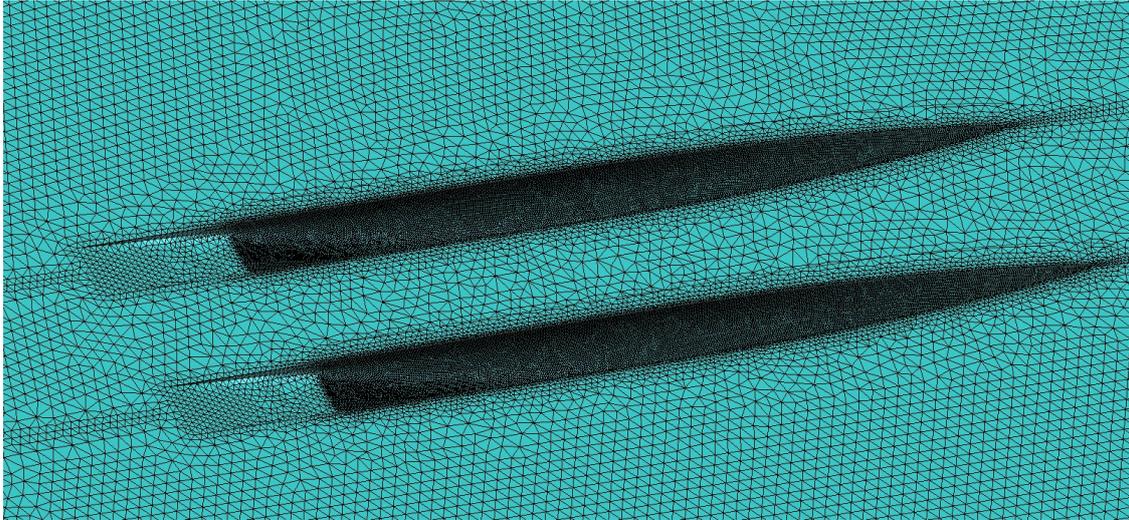


Figura 6.6. Mallado del modelo.

Fijados el tamaño de malla y el resto de parámetros es posible iniciar el proceso de cálculo. Se han realizado ocho simulaciones, para las velocidades correspondientes a los números de Froude indicados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Números de Froude y velocidades para los que se han realizado las simulaciones.

F_n	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
V(n)	12,326	11,093	9,861	8,628	7,395	6,163	4,930	3,698

3. APLICACIÓN PARA DISTINTAS VELOCIDADES

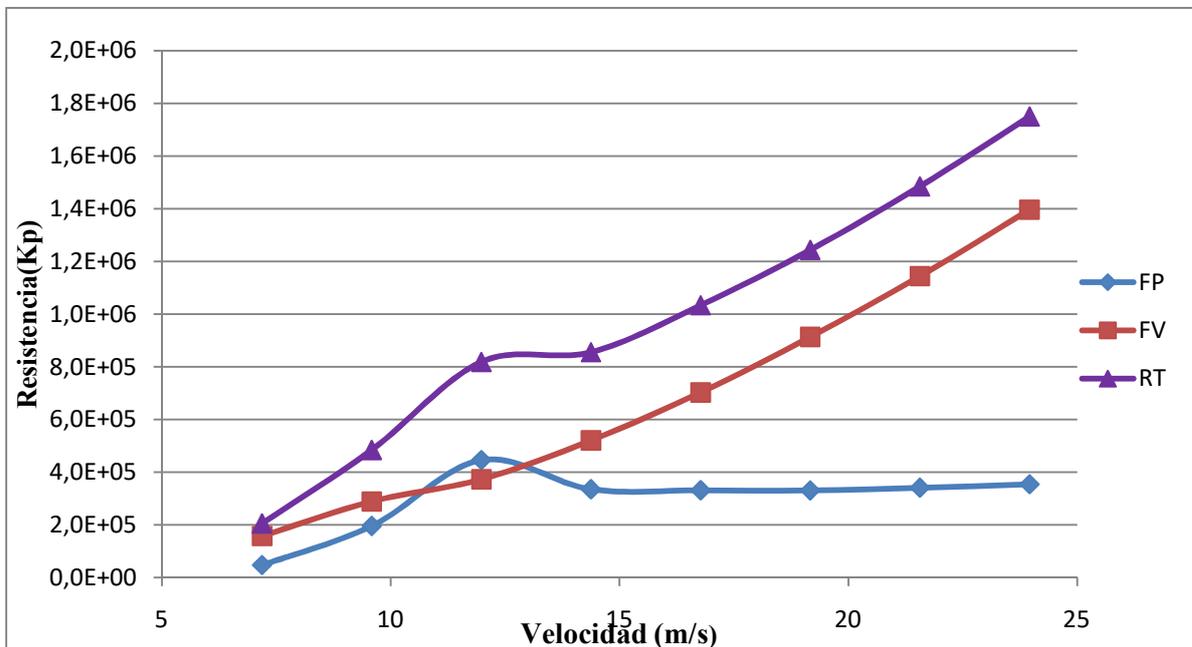
3.1. Componentes de la fuerza.

Tdyn da como resultado distintas componentes de la fuerza. Para la comparación con los resultados teóricos del problema las componentes que se extraen de los resultados del programa son: la componente longitudinal de la fuerza de presión P_{FX} y la componente longitudinal de la resistencia viscosa V_{FX} , que permitirán obtener la resistencia de remolque, que es el valor de interés en este proyecto. En la Tabla 6.4 se muestran los resultados de dichas fuerzas obtenidas para cada velocidad.

Tabla 6.4. Resultados obtenidos mediante CFD para el catamarán de estudio.

F_n	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
V(n)	12,326	11,093	9,861	8,628	7,395	6,163	4,930	3,698
P_{FX}	$3,540 \cdot 10^5$	$3,409 \cdot 10^5$	$3,307 \cdot 10^5$	$3,312 \cdot 10^5$	$3,349 \cdot 10^5$	$4,458 \cdot 10^5$	$1,958 \cdot 10^5$	$5,723 \cdot 10^4$
C_w	$1,172 \cdot 10^{-2}$	$1,393 \cdot 10^{-2}$	$1,710 \cdot 10^{-2}$	$2,237 \cdot 10^{-2}$	$3,079 \cdot 10^{-2}$	$5,902 \cdot 10^{-2}$	$4,050 \cdot 10^{-2}$	$2,105 \cdot 10^{-2}$
V_{FX}	$1,396 \cdot 10^6$	$1,144 \cdot 10^6$	$9,134 \cdot 10^5$	$7,026 \cdot 10^5$	$5,207 \cdot 10^5$	$3,728 \cdot 10^5$	$2,889 \cdot 10^5$	$1,577 \cdot 10^5$
C_v	$4,621 \cdot 10^{-2}$	$4,675 \cdot 10^{-2}$	$4,724 \cdot 10^{-2}$	$4,746 \cdot 10^{-2}$	$4,788 \cdot 10^{-2}$	$4,936 \cdot 10^{-2}$	$5,977 \cdot 10^{-2}$	$5,798 \cdot 10^{-2}$
R_T	$1,750 \cdot 10^6$	$1,485 \cdot 10^6$	$1,244 \cdot 10^6$	$1,034 \cdot 10^6$	$8,556 \cdot 10^5$	$8,186 \cdot 10^5$	$4,847 \cdot 10^5$	$2,149 \cdot 10^5$
C_T	$5,793 \cdot 10^{-2}$	$6,068 \cdot 10^{-2}$	$6,434 \cdot 10^{-2}$	$6,983 \cdot 10^{-2}$	$7,867 \cdot 10^{-2}$	$1,084 \cdot 10^{-1}$	$1,003 \cdot 10^{-1}$	$7,903 \cdot 10^{-2}$

En la Gráfica 6.1 se representan los valores de la Tabla anterior, donde se aprecia el aporte a la resistencia total que hace cada componente.



Gráfica 6.1. Representación de las fuerzas obtenidas mediante CFD para el catamarán de estudio ensayado a distintas velocidades.

3.2. Mínima y máxima elevación de la ola

Entre todos los resultados que el programa ofrece, uno de ellos es el valor mínimo y máximo de la elevación de la ola, así como la posición de dicho valor.

En la Tabla 6.5 se recogen todos los valores de altura máxima y mínima, así como sus posiciones. Cabe indicar que se toma como referencia para estos valores la superficie libre.

Tabla 6.5. Valor y posición de ola máxima y mínima.

Fn	Valor Mínimo (m)	Posición Mín.	Valor Máximo (m)	Posición Max.
1,0	-2,131	Popa Crujía	1,431	Amura Er monocasco Br
0,9	-2,091	Popa Crujía	1,360	Amura Er monocasco Br
0,8	-3,281	Popa cuchara Er	7,817	Popa cuchara Er
0,7	-1,862	Popa Crujía	1,2455	Amura Er monocasco Br
0,6	-1,567	Popa cuchara Er	14,538	Popa cuchara Er
0,5	-1,2272	Espejos Er y Br	0,896	Amura Br monocasco Er
0,4	-1,540	L/2 monocasco Er	1,015	Popa cuchara Er
0,3	-1,227	Espejos Er y Br	1,120	Popa cuchara Er

De forma muy general se puede concluir que las alturas mínimas de ola se dan a popa del modelo, bien en crujía del catamarán o de manera simétrica en crujía de cada monocasco. Este último caso se presenta en la Figura 6.7 correspondiente al valor de Froude 0,5.



Figura 6.7. Altura de ola máxima y mínima para Fn igual a 0,5.

La altura de ola máxima aparece con más frecuencia en las amuras interiores de los monocascos.

3.3. Perfil de la altura de ola

Además de los valores máximos y mínimos de la altura de ola de las distintas simulaciones se puede obtener la representación del perfil de la altura de ola para un determinado tiempo de la simulación. Con el fin de que el flujo se haya estabilizado se selecciona el último paso de tiempo de cada simulación.

A continuación se muestran las figuras correspondientes al perfil de la altura de ola para algunos de los valores de Froude ensayados. Se observa que esta representación da una visión muy clara del movimiento del flujo alrededor del modelo.

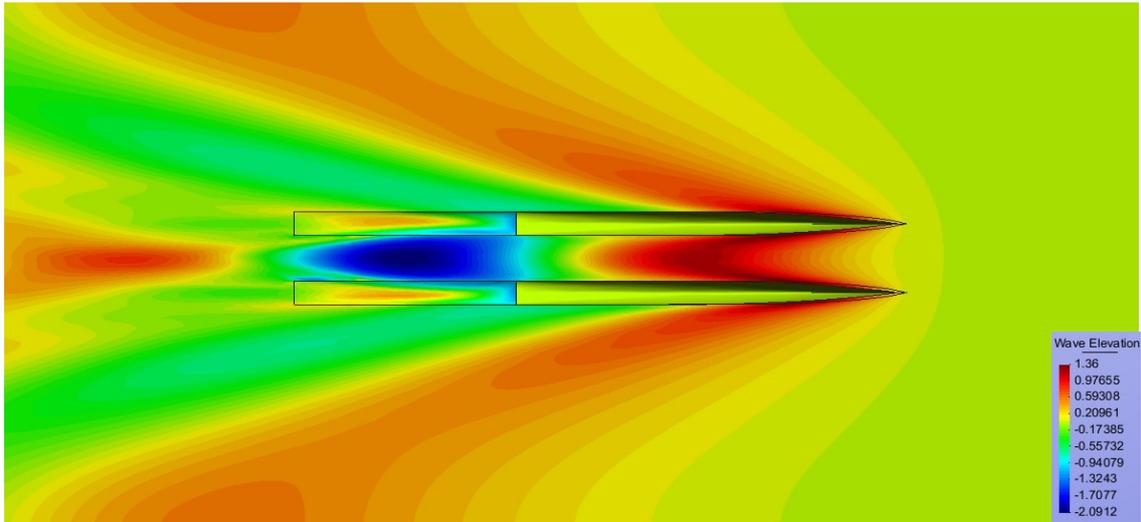


Figura 6.8. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,9.

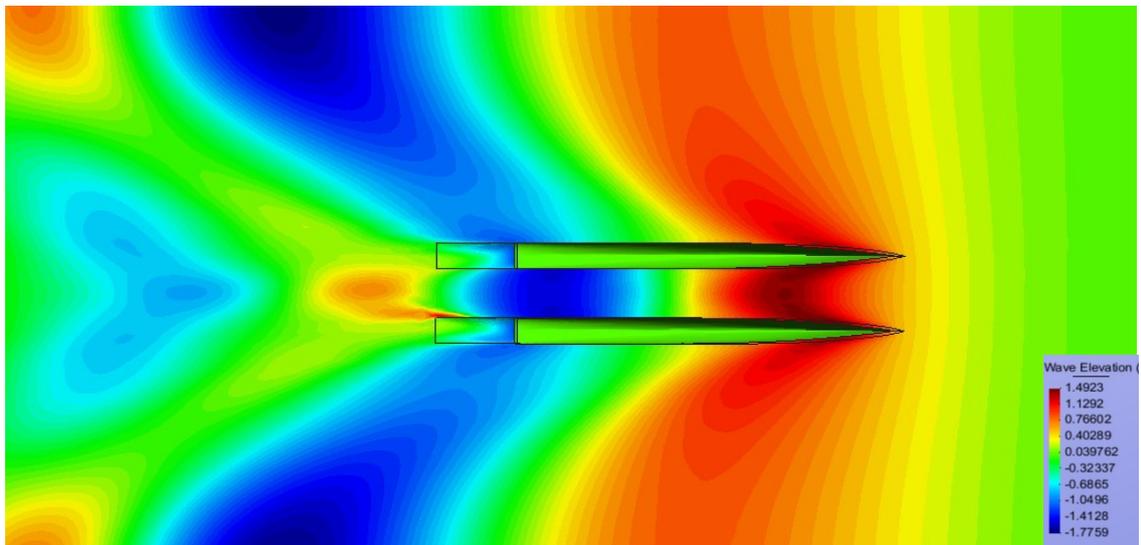


Figura 6.9. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,5.

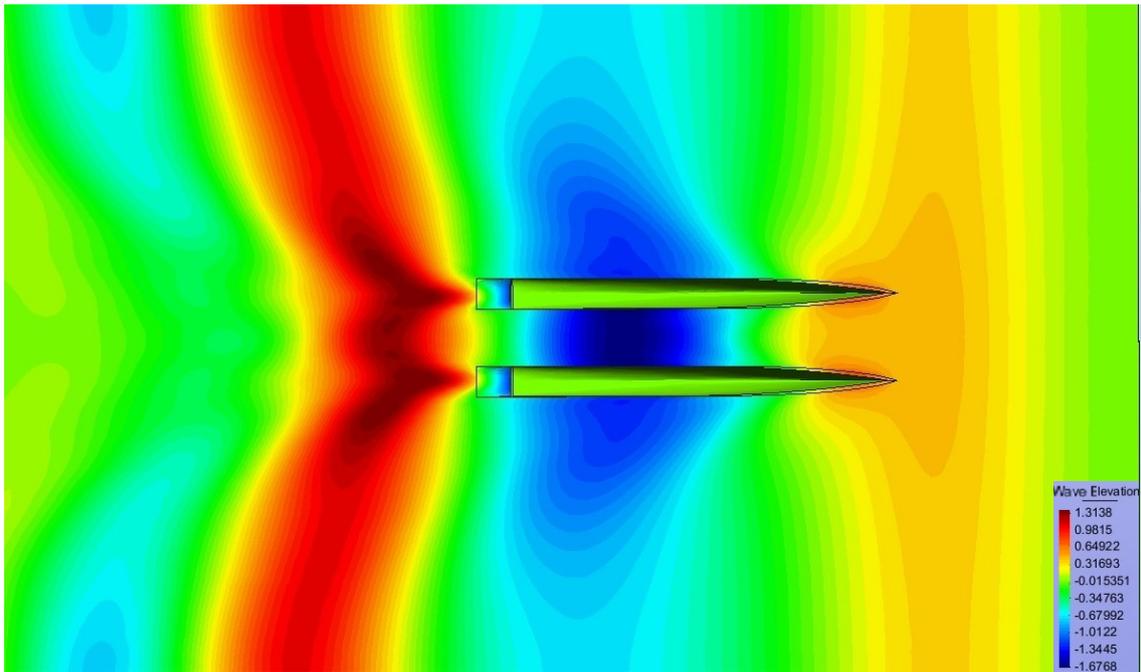


Figura 6.10. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,4.

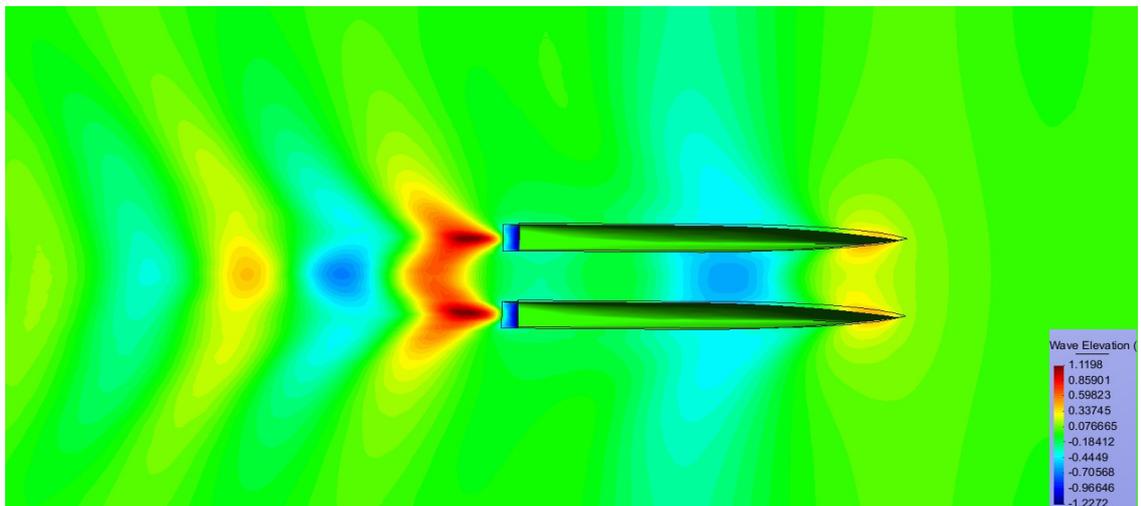


Figura 6.11. Perfil de altura de ola para F_n igual a 0,3.

Se observa como para menores velocidades de ensayo (menor valor de Froude) el fluido presenta menos elevación de ola en toda la superficie libre.

3.4. Presiones sobre el casco

En las siguientes figuras se muestra la distribución de presiones sobre el casco para algunos de los valores de Froude ensayados.

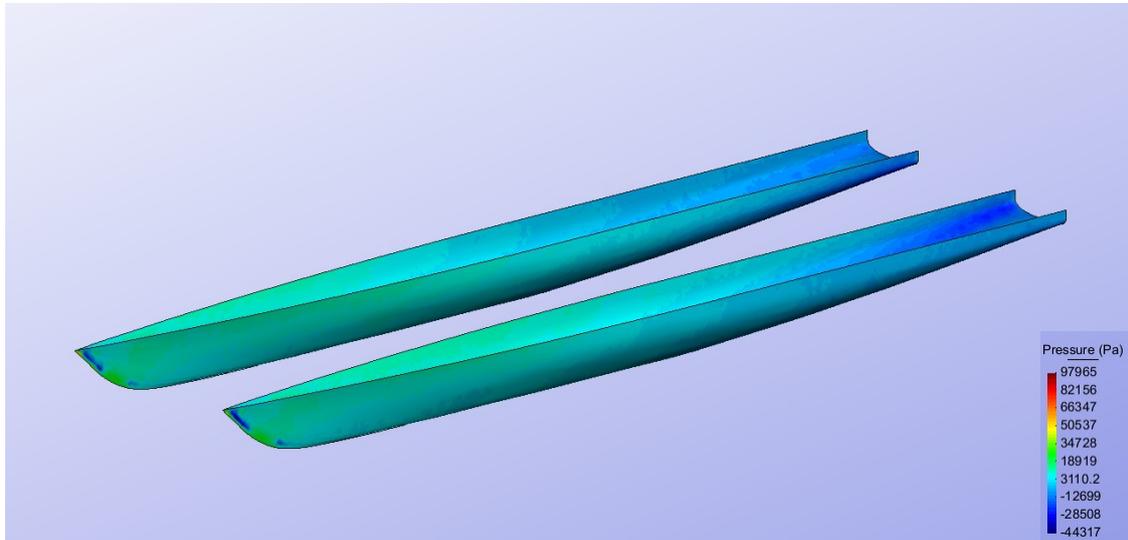


Figura 6.12. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,9.

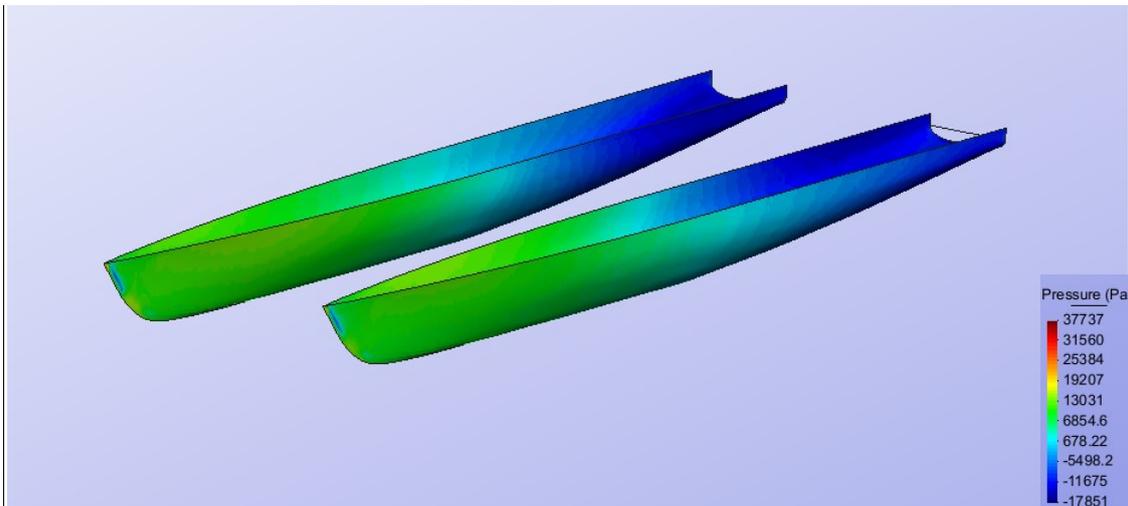


Figura 6.13. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,5.

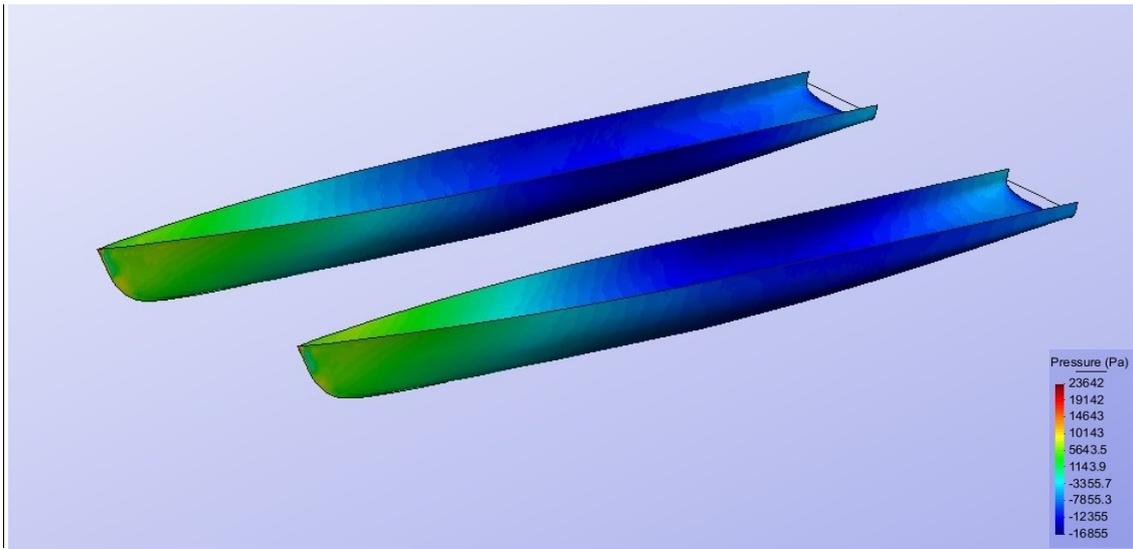


Figura 6.14. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,4.

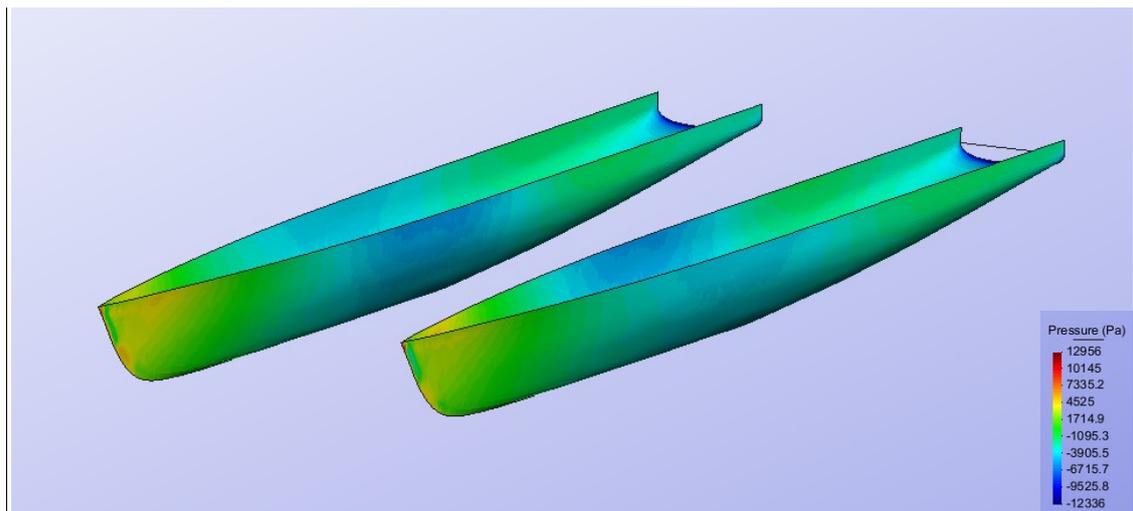


Figura 6.15. Presiones sobre el casco para F_n igual a 0,3.

Como se puede observar en las Figuras anteriores, donde más presión se registra es en la proa del modelo.

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En el Capítulo 4 se desestima que el Método de Molland sea aplicable al caso de estudio, por lo tanto se toman como resultados teóricos los obtenidos por el Método de Sahoo. En el Método de Sahoo es necesaria la utilización de un factor de forma para pasar del coeficiente de resistencia por fricción del monocasco al del catamarán. Este factor de forma se puede calcular mediante el Método de Armstrong, el Método propone la siguiente fórmula:

$$(1 + k)_{buque} = 1,72 - f(L/\nabla^{1/3})^g (B/T)^{-0,1} \quad (6.4)$$

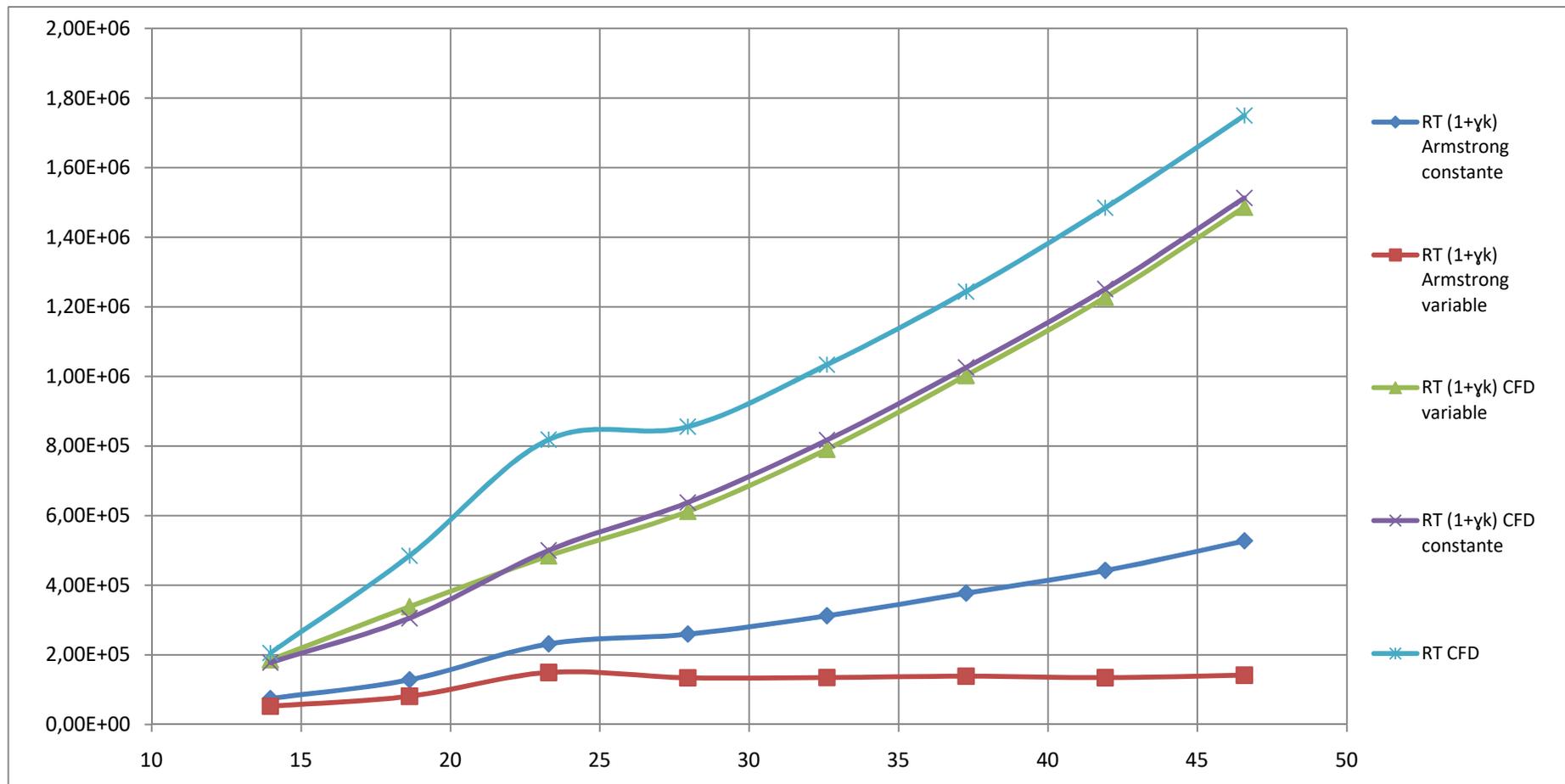
A partir de la cual luego se determina $(1+\gamma k)$ que corresponde al factor de forma del catamarán. La variable f es función del número de Froude, por lo que para cada velocidad de ensayo el coeficiente será distinto. Con respecto a esto último se tienen dos opciones: utilizar el factor de forma del catamarán variable con la velocidad o tomar una media aritmética. Esta última opción es la que se presenta en el Capítulo 4, ya que el factor de forma presenta valores muy distintos en el rango de velocidades.

Con la intención de realizar una comparación con todas las herramientas disponibles se presenta el siguiente gráfico. En este se presenta:

- La resistencia total obtenida por CFD.
- La resistencia total obtenida por Sahoo, tomando el factor de forma del catamarán constante (media aritmética de los valores obtenidos del Método de Armstrong).
- La resistencia total obtenida por Sahoo, tomando el factor de forma del catamarán variable con la velocidad, valores obtenidos del Método de Armstrong.
- La resistencia total obtenida por Sahoo, tomando el factor de forma del catamarán constante obtenido a partir de los resultados de CFD.
- La resistencia total obtenida por Sahoo, tomando el factor de forma del catamarán variable obtenido a partir de los resultados de CFD.

En los dos últimos casos el factor de forma del catamarán se obtiene por la siguiente relación:

$$C_{F,CFD} = (1 + \gamma k)C_F. \quad (6.5)$$



Gráfica 6.2. Representación de las resistencias totales teniendo en cuenta distintas formas de cálculo del factor de forma del catamarán.

5. CONCLUSIONES

Comparando los resultados anteriores se aprecia que el Método de Armstrong subestima el factor de forma. Con el factor de forma calculado a partir de los resultados de CFD, del Método de Sahoo se obtienen valores de la resistencia muy parecidos a los conseguidos por CFD.

Se puede concluir que los Métodos Estadísticos para el cálculo de la resistencia al avance en catamaranes son de utilidad, siendo recomendable la utilización de CFD's para paliar las posibles carencias que surgen en la aplicación de los dichos Métodos. Como se ha podido observar estas carencias pueden proceder del propio Método de cálculo de la resistencia, o bien, de otros Métodos necesarios para la obtención de variables del Método principal.

La aplicación de CFD's en catamaranes es realmente aconsejable debido al particular comportamiento de estos buques. Mientras que un buque monocasco se puede introducir en CFD aprovechando su simetría (medio casco), en los catamaranes es necesaria la modelización de los dos cascos completos, debido a que existe una interferencia entre ellos. Con la utilización de CFD's se puede analizar el comportamiento estos cascos y como afectan al fluido de una manera muy visual y comprensible, gracias a todos los gráficos y simulaciones de las que dispone. Como ejemplo de esto se han mostrado en apartados anteriores distintos resultados y gráficos obtenidos del programa.

Todas las ventajas de la aplicación de CFD's conllevan un incremento del tiempo de trabajo en comparación con los Métodos Estadísticos. Pero como se ha dicho anteriormente, la gran cantidad de información obtenida de la aplicación de CFD's hace que sea más que recomendable su utilización.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ebrahimi A, Rad M, Benisis AH. Experimental and numerical studies on resistance of a catamarán vessel with non-parallel demihulls, *Scientia Iranica* 2014. 21(3):600-608
2. Sahoo, PK and Manson, S and Tuite, A (2008) Practical evaluation of resistance of high-speed catamarán hull forms-Part II. *Ship and Offshore Structures* 2007. 3
3. García-López D. Métodos de Predicción de potencia. Hidrodinámica, Resistencia y propulsión. Apuntes de clase. ETSINO. 2016.
4. Gutiérrez-Romero J.E. Introducción a los CFD. Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión. Apuntes de Clase. ETSINO 2014.
5. Papanikolaou A. *Ship Design, Methodologies of Preliminary Design*. Springer. 2014.
6. Castiglione T, Stern F, Bova S, Kandasamy M. Numerical investigation of seakeeping behavior of a catamarán advancing in regular head waves. 2011.
7. Molland A.F, Wellicome J.f, Crouser P.R. Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draught Ratio. 1994.
8. Crouser P.R, Molland A.F, Armstrong N.A, Utama I.K.A.P. Calm water powering predictions for high-speed catamarans. 1997
9. Alaez-Zazurca J.A. Catamaranes de alta velocidad, canal de experiencias hidrodinámicas, el Pardo. 1991.
10. Dimensionamiento del buque. Proyectos. Apuntes de Clase. ETSINO 2016.
11. Schellenbeger G. *SWATH Technology, Advanced SWATH Design Methods*.
12. www.cfd-online.com
13. Compassis. Tdyn Manual. 2016. www.compassis.com