

PROPUESTA DE MEJORA DE UN CASCO EN UNA EMBARCACIÓN RÍGIDA

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Marc Porras Juanola

Dirigido por:
Anna Mujal Colilles
Rafael Pacheco

Grau en Enginyeria en Sistemes y Tecnologia Naval

Barcelona, 28/06/2021

Departamento de CEN

Agradecimientos

Antes de todo, a través de estas líneas, me gustaría agradecer a los profesores Anna Mujal y Rafael Pacheco por su tiempo empleado, además de su valiosa asesoría y preocupación constante durante el desarrollo de este trabajo.

De la misma forma, agradezco enormemente la empresa del astillero por brindarme toda la información y recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Por último, quiero agradecer a mis amigos y a mi familia, por apoyarme durante el transcurso de esta etapa de mi vida. En especial, a los que siempre estuvieron ahí para darme los mejores consejos en los mejores momentos.

Abstracto

En el presente trabajo se expondrán los resultados obtenidos al analizar hidrodinámicamente el casco de una embarcación de planeo de una eslora de 7m dedicada al sector del recreo y en corta media a la pesca amateur.

Se realizará una recopilación de datos que a posteriori servirán para realizar una comparativa entre diferentes programas informáticos y métodos de cálculo para predecir el comportamiento de una determinada carena en régimen de planeo.

Además, una vez analizados se propondrá unas mejoras para optimizar las formas del casco y llegar a alcanzar un mejor rendimiento de la embarcación a nivel hidrodinámico.

Tabla de contenido

Contenido

Agradecimientos	3
Abstracto	4
Tabla de contenido	5
Contenido.....	5
Listado de Figuras	7
Listado de Ecuaciones	9
Capítulo 1: Introducción	10
Capítulo 2: Objetivos	11
Capítulo 3: Metodología	12
3.1 Definiciones	12
3.2 Métodos de cálculo	13
3.2.1 Generales	13
Resistencia al avance.....	13
Coeficiente k (factor de formas).....	13
Resistencia por fricción y Resistencia residual	14
Resistencia por formación de olas	14
<i>Spray-rails</i> (Radanes o Carril de agua).....	15
3.3 MAXSURF	16
3.3.1 Savitsky	16
Explicaciones físicas y matemáticas sobre el planeo de las embarcaciones	16
Consideraciones Iniciales	16
Elevación de la ola para superficies de planeo planas	16
Teoría	16
Formulación	17
Área de presión mojada del ángulo del pantoque para una superficie de planeo	18
Teoría	18
Datos experimentales obtenidos	20
Área mojada del carril de agua en una superficie de planeo	20
Ejemplo	21
Formulación	21
Levantamiento de una superficie plana para el planeo	22
Formulación	23
Interpretación y graficas con los resultados obtenidos por Savitsky	25
Sustentación en el ángulo de pantoque para una superficie de planeo	27
Teoría	27
Formulación	27
Resistencia de una superficie de planeo	28
Teoría	28
Ejemplo	28
Contribución de la velocidad en la resistencia.....	30

Formulación	31
Rangos de sustentación y resistencia en superficies de planeo	32
Gráficas e interpretación	32
Ejemplo	32
Centro de presión de las superficies de planeo	33
Teoría	33
Aplicación	34
3.3.2 Blount and Fox	34
Aplicación	34
3.3.3 Holtrop	35
Aplicación	35
Capítulo 4: Modelo	36
4.1 Características principales	37
Dimensiones	37
Motorización	37
4.2 Modelo 2D	37
Creación del perfil	37
Creación de las líneas de agua	38
4.3 Modelo 3D	38
Delineado	38
Creación de superficies	38
Carriles de agua	39
Modelado	39
Problemática	39
4.4 Parámetros del modelo	40
Maxsurf	40
Capítulo 5: Resultados y discusión.....	42
5.1 Maxsurf	42
5.1.1 Límites para usar el método de Savitsky	42
5.1.2 Resultados Savitsky	42
5.2 TDYN.....	48
5.2.1 Creación del caso	48
5.2.2 Resultados obtenidos	52
Elevación total	52
Velocidad del fluido	53
Velocidad V_x	53
Velocidad V_y	54
Velocidad V_z	54
5.3 Resultados de la prueba empírica de la embarcación.....	55
Capítulo 6: Propuestas de mejora	56
6.1 Hidrostáticas de Maxsurf modelo nuevo	57
6.2 Comparativa de gráficos del Maxsurf Resistance	58
Capítulo 7: Conclusiones	62
Bibliografía	63

Listado de Figuras

<i>Ilustración 1: Descripción de la superficie prismática – Fuente: Cultofsea (202)</i>	12
<i>Ilustración 2: Descripción del ángulo de asiento</i>	12
<i>Ilustración 3: Descripción del ángulo del pantoque – Fuente: JobbieCrew (2021)</i>	12
<i>Ilustración 4: Descomposición de la R_{total} – Fuente: Mayor (2009)</i>	13
<i>Ilustración 5: Diagrama de radanes</i>	15
<i>Ilustración 6: Descripción de la consideración de la eslora (λ) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	16
<i>Ilustración 7: Gráfico de la relación eslora-manga considerando la elevación de la ola – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	17
<i>Ilustración 8: Intersección de la línea de flotación para una superf. con un Ángulo de Pantoque α – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	18
<i>Ilustración 9: $L_k - L_c$ vs. Ángulos de Asiento y pantoque – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	19
<i>Ilustración 10: Descripción gráfica de las líneas sobre la carena – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i> .21	
<i>Ilustración 11: Vista de la parte inferior de un plano paralelo a la quilla – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	22
<i>Ilustración 12: Descripción gráfica de la parte inferior de una carena en planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	23
<i>Ilustración 13: Definición gráfica de las esloras L_c y L_k – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	25
<i>Ilustración 14: Coeficiente de sustentación en una superficie de planeo plana ($\beta = 0^\circ$) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	25
<i>Ilustración 15: Carga de Planeo vs. Desplazamiento para una superficie de planeo variando el C_v – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	26
<i>Ilustración 16: Diagrama de la sustentación con un ángulo de pantoque determinado para una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	28
<i>Ilustración 17: Componentes de la resistencia en una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	29
<i>Ilustración 18: Media de valores de la velocidad en la parte inferior de la superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	31
<i>Ilustración 19: Diagrama de la dispersión de la ola sobre la superficie de la carena – Fuente: Mintu, Shafiul (2016)</i>	31
<i>Ilustración 20: Variación de la relación resistencia-sustentación con la velocidad – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i>	32
<i>Ilustración 21: Centro de presiones de una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)</i> .34	
<i>Ilustración 22: Vista del perfil de la embarcación Garbín 26</i>	36
<i>Ilustración 23: Bocetos de Perfil y Planta del Modelo Garbín 26</i>	36
<i>Ilustración 24: Vista de Perfil del boceto 2D digital</i>	37
<i>Ilustración 25: Vista desde Planta de las líneas de agua en digital</i>	38
<i>Ilustración 26: Vista de Alzado del Boceto en 2D</i>	38
<i>Ilustración 27: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y Boceto en 3D del Modelo vista Perspectiva</i>	38
<i>Ilustración 28: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y vista Perspectiva con Carril de agua</i>	39
<i>Ilustración 29: Curva de áreas en función de la sección con guías de agua</i>	39
<i>Ilustración 30: Curva de áreas en función de la sección para el modelo sin guías de agua</i>	39
<i>Ilustración 31: Vista de perfil del modelo en Maxsurf</i>	41
<i>Ilustración 32: Vista de planta del modelo en Maxsurf</i>	41
<i>Ilustración 33: Vista de alzado del modelo en Maxsurf</i>	41
<i>Ilustración 34: Tabla de comprobación de límites físicos para usar el método de Savitsky</i>	42
<i>Ilustración 35: Gráfico Resistencia (kN) vs. Velocidad (kn)</i>	42
<i>Ilustración 36: Gráfico Potencia (kW) vs. Velocidad (kn)</i>	44
<i>Ilustración 37: Gráfico Coef. de resist. residual y Coef. de resist. de fricción vs. Velocidad (kn)</i>	45
<i>Ilustración 38: Gráfico Coeficiente de Resistencia total del casco desnudo vs. Velocidad (kn)</i>	46
<i>Ilustración 39: Gráfico Trim (grados) vs. Velocidad (kn)</i>	47

<i>Ilustración 40: Modelo del casco en formato IGES</i>	48
<i>Ilustración 41: Vista en detalle de los elementos de la Ilustración 40</i>	48
<i>Ilustración 42: Vista del caso con el tanque numérico</i>	49
<i>Ilustración 43: Panel de control de programa Tdyn (definición de condiciones de contorno)</i>	49
<i>Ilustración 44: "free Surface" del caso a ensayar</i>	50
<i>Ilustración 45: "Outlet" del caso a ensayar</i>	50
<i>Ilustración 46: Vista isométrica del "Body"</i>	51
<i>Ilustración 47: Malla del caso a ensayar</i>	51
<i>Ilustración 48: Diagrama de elevación de la ola</i>	52
<i>Ilustración 49: Diagrama en detalle del diagrama de elevación de la ola</i>	52
<i>Ilustración 50: Diagrama de velocidades del fluido</i>	53
<i>Ilustración 51: Diagrama de velocidad Vx del fluido</i>	53
<i>Ilustración 52: Diagrama de velocidad Vy</i>	54
<i>Ilustración 53: Diagrama de velocidad Vz</i>	54
<i>Ilustración 54: Fotograma del video donde se veo como se ensaya el modelo</i>	55
<i>Ilustración 55: Comparación de carenas Original vs. Propuesta</i>	56
<i>Ilustración 56: Vista de Perfil del modelo Propuesto</i>	56
<i>Ilustración 57: Tabla comparativa de las hidrostáticas modelo Propuesto vs. Original</i>	57
<i>Ilustración 58: Grafico (modelo propuesto vs original) Resistencia vs. Velocidad</i>	58
<i>Ilustración 59: Gráfico (modelo propuesto vs original) Potencia Vs. Velocidad</i>	59
<i>Ilustración 60: Gráfico (modelo propuesto vs original) Coeficiente de Resistencia Total vs. Velocidad</i>	60
<i>Ilustración 61: Gráfico (modelo propuesto vs original) Coeficiente de resistencia Savitsky vs. Velocidad</i> .	60
<i>Ilustración 62: Gráfico comparativo (modelo propuesto vs original) trim vs. Velocidad</i>	61
<i>Ilustración 63: Predicción de la estela generada por la embarcación</i>	62

Listado de Ecuaciones

<i>Ecuación 1</i>	13
<i>Ecuación 2</i>	13
<i>Ecuación 3</i>	14
<i>Ecuación 4</i>	14
<i>Ecuación 5</i>	14
<i>Ecuación 6</i>	14
<i>Ecuación 7</i>	15
<i>Ecuación 8</i>	17
<i>Ecuación 9</i>	18
<i>Ecuación 10</i>	19
<i>Ecuación 11</i>	20
<i>Ecuación 12</i>	20
<i>Ecuación 13</i>	21
<i>Ecuación 14</i>	22
<i>Ecuación 15</i>	23
<i>Ecuación 16</i>	23
<i>Ecuación 17</i>	23
<i>Ecuación 18</i>	24
<i>Ecuación 19</i>	24
<i>Ecuación 20</i>	24
<i>Ecuación 21</i>	24
<i>Ecuación 22</i>	24
<i>Ecuación 23</i>	27
<i>Ecuación 24</i>	27
<i>Ecuación 25</i>	29
<i>Ecuación 26</i>	29
<i>Ecuación 27</i>	30
<i>Ecuación 28</i>	30
<i>Ecuación 29</i>	30
<i>Ecuación 30</i>	30
<i>Ecuación 31</i>	30
<i>Ecuación 32</i>	30
<i>Ecuación 33</i>	32
<i>Ecuación 34</i>	32
<i>Ecuación 35</i>	34
<i>Ecuación 36</i>	43
<i>Ecuación 37</i>	43
<i>Ecuación 38</i>	43
<i>Ecuación 39</i>	44
<i>Ecuación 40</i>	47

Capítulo 1: Introducción

La hidrodinámica es la parte de la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en movimiento, para ello se deben considerar parámetros como la velocidad, la presión y el flujo. Más en detalle por lo que a la mecánica de los fluidos se refiere, se investigan las propiedades de un fluido que son la fricción, el origen viscoso, si es compresible, etc.

Se han realizado numerosos experimentos (Series 60, Métodos de predicción de resistencia al avance, Savitsky, etc.) que han servido para generar inmensas bases de datos muy útiles para más tarde crear revolucionarias teorías que han permitido el avance en el entendimiento del comportamiento de los fluidos, y su aplicación a la realidad a través de mejoras en los diseños de las embarcaciones.

Una tipología de embarcación sobre la que todavía existen numerosos puntos desconocidos son las embarcaciones de recreo náutico y en concreto las embarcaciones de planeo. La complicación de estas recae en el hecho de la variabilidad en el área mojada del casco y el uso en altas velocidades. Las embarcaciones de planeo, por sus dimensiones reducidas pueden construirse en una gran cantidad de dársenas más pequeñas y por lo tanto suponen una fuente de economía local. Para ello, la investigación en mejoras en este tipo de embarcaciones puede ser rápidamente contrastada y descartada o aplicada según resulte.

La principal motivación que me llevó a realizar este trabajo es la aplicabilidad real del mismo, es decir, la embarcación sobre la que se realizará el análisis hidrodinámico se encuentra en pleno funcionamiento y se le podrán aplicar todos los cambios y mejoras que se propondrán para alcanzar el mejor rendimiento posible en un futuro próximo.

Capítulo 2: Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es realizar unas mejoras de las formas de un barco a partir de un análisis hidrodinámico meticuloso. La metodología empleada para ello, consistirá en recoger y analizar los datos que se ofrecen en dos programas informáticos diferentes, por un lado, Maxsurf que será el principal y por el otro, un programa de computación de métodos numéricos avanzados (Tdyn).

Para llevar a cabo este objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Entender el comportamiento de los fluidos en contacto con la superficie del casco en especial para el caso de embarcaciones de planeo. Para ello, se explicarán todos los fundamentos y principios necesarios de forma clara y concisa de cómo se comportan los fluidos según los métodos de Savitsky, Holtrop y Blount and Fox.
2. Aprender a utilizar todos los programas informáticos implicados en el proceso de análisis hidrodinámico para un cuerpo en situación de planeo (AutoCAD, Maxsurf, Rhinoceros 3D, Tdyn)
3. Realizar pruebas de verificación con la embarcación real para validar el método utilizado
4. Lograr uno nuevo diseño con una mejora hidrodinámica notable.

Capítulo 3: Metodología

Consistirá en realizar un análisis hidrodinámico de un casco utilizando varios métodos como son Savitsky y Tdyn. Luego todos los datos recolectados y analizados servirán para proponer una mejora, se verificará con la ayuda de los programas anteriores y en un futuro próximo se probará en el mismo casco.

3.1 Definiciones

Superficie prismática (Ilustración 1: Descripción de la superficie prismática – Fuente: Cultofsea (202)): superficie extraída de la relación entre el volumen del casco y el volumen de un prisma.

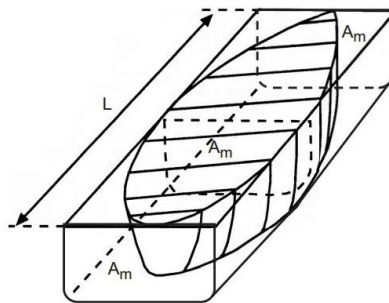


Ilustración 1: Descripción de la superficie prismática – Fuente: Cultofsea (202)

Ángulo de asiento “Trim” (Ilustración 2: Descripción del ángulo de asiento): ángulo que forma la embarcación con respecto a la superficie del agua.



Ilustración 2: Descripción del ángulo de asiento

Ángulo de pantoque “Deadrise” (Ilustración 3: Descripción del ángulo del pantoque – Fuente: JobbieCrew (2021)): ángulo que se forma entre la parte inferior de la embarcación y el plano horizontal.

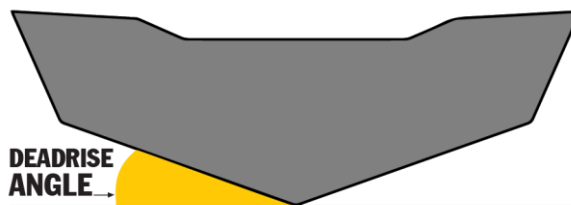


Ilustración 3: Descripción del ángulo del pantoque – Fuente: JobbieCrew (2021)

Área mojada/Superficie mojada: se designa para aquella región de la superficie mojada donde se ejerce la presión del agua.

3.2 Métodos de cálculo

3.2.1 Generales

Resistencia al avance

Se basa en el método de Froude, el cual nos dice que hay que calcular la resistencia a partir del sumatorio de la resistencia de fricción, la residual o viscosa y la de formación de olas.

La problemática general que presenta este método es que no se puede igualar el coeficiente de resistencia residual de un modelo, con el de un buque real. La razón reside en la imposibilidad de mantener la semejanza del número de Reynolds entre ambos.

A continuación, se presenta una ecuación que engloba todos los términos anteriormente nombrados.

Ecuación 1

$$R_{total} = R_w + (R_f + R_r) = R_w + \{0.5\delta V^2[(1 + k)(C_f + \Delta C_f)]Sm\}$$

R_w = Resistencia por formación de olas

R_f = Resistencia por fricción

R_r = Resistencia residual

Sm = Superficie mojada

El desglose de la Resistencia Total Ilustración 4: Descomposición de la R_{total} – Fuente: Mayor (2009) a la que es sometido un cuerpo en contacto con un fluido como el agua se puede esquematizar de la siguiente forma:

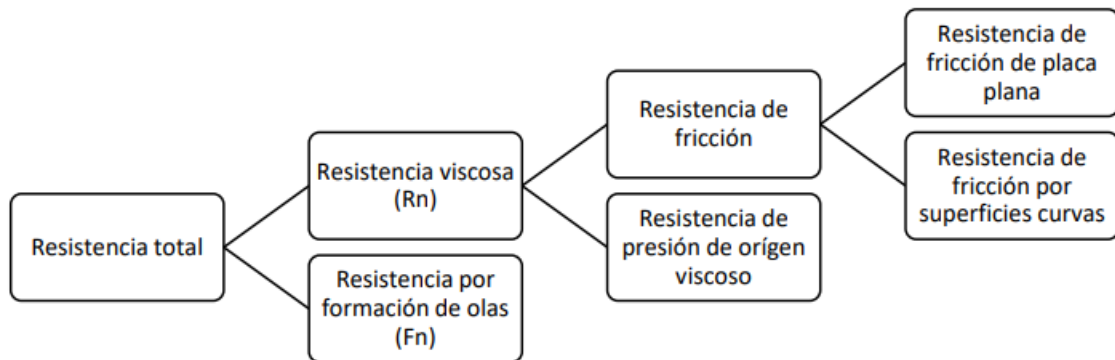


Ilustración 4: Descomposición de la R_{total} – Fuente: Mayor (2009)

Coeficiente k (factor de formas)

Se define como aquel número que ha sido deducido a partir de realizar numerosos ensayos empíricos en canales con diferentes series de modelos con características dimensionales parecidas.

La ecuación deducida por ITTC-57:

Ecuación 2

$$k = 18.7 \left(\frac{B C_B}{L} \right)^2$$

Resistencia por fricción y Resistencia residual

En primer lugar se sabe que alrededor de un cuerpo en contacto con un fluido real se desarrolla una capa límite, que a su vez, produce dos efectos de origen viscoso. El primero, genera una componente llamada resistencia de fricción o viscosa (R_f), está es la fricción debida el rozamiento entre el cuerpo, en este caso el modelo y el fluido. En cambio, el segundo es una resistencia residual (R_r) que se considera como la alteración de la distribución del campo de presiones que aparece alrededor del cuerpo.

La Resistencia por fricción se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 3

$$R_f = C_f \times S_m \times V^{1.825}$$

Y el coeficiente de fricción de Froude (C_f) se puede calcular, según ITTC'57:

Ecuación 4

$$C_f = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2}$$

También está demostrado que cuando se comparan los resultados obtenidos con una placa lisa en verso a los de la escala real, se observan pequeñas variaciones. Estas, tiene lugar debido a que el modelo real tiene una mayor rugosidad y además es un poco curvado con respecto a la placa lisa. Así pues, se encontró una forma de corregir este error y es mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

Ecuación 5

$$\Delta C_f = \left[\left(105 \left(\frac{K_s}{L} \right)^{1/3} - 0.64 \right) \right] 10^{-3}$$

De nuevo, la resistencia residual es la porción que queda al margen de la componente de fricción. En todo caso, la resistencia residual está relacionada principalmente con las formas del casco y con la variación de presión dinámica y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 6

$$R_r = k(C_f + \Delta C_f)0.5\delta V^2 S_m$$

Resistencia por formación de olas

Con respecto a esta resistencia se ha encontrado que su origen proviene de un fenómeno gravitacional y que dentro de este campo se pueden diferenciar dos tipos de olas, divergentes y transversales. La formación de olas tiene se inicia cuando un objeto en movimiento entra en contacto con la superficie del agua y el aire. El movimiento de la embarcación provoca una variación en el fluido, que implícitamente afecta al campo de presiones generado en el entorno del casco. Del mismo modo las líneas de corriente producidas por el barco también se ven distorsionadas.

El efecto puede variar en función de la velocidad, a decir verdad, a medida que esta aumenta la resistencia también lo hace y la ola generada puede llegar incluso a superar la eslora de la embarcación y convertirse en la componente de la resistencia con más relevancia.

Esta resistencia se puede descomponer en 3 factores:

1. La primera es la energía necesaria para generar los trenes libres de olas (transversales y divergentes). Sin embargo, a medida que las velocidades son lo suficientemente altas la energía requerida va disminuyendo, con lo cual va perdiendo su importancia.
2. La segunda simboliza la resistencia que se consume al generar los *sprays* (carriles de agua), que a su vez tienen una parte en el origen viscoso y otra en la presión.
3. Por último, la resistencia debida a las fuerzas hidrodinámicas de presión que actúan en un plano perpendicular al casco, es una consecuencia de la sustentación dinámica y aparece cuando la embarcación entra en un régimen de planeo.

Ecuación 7

$$R_w = R_{wp} + R_s + R_p$$

Destacara que, en embarcaciones de planeo, el ángulo que se genera puede variar hasta el punto en el que las olas transversales desaparecen.

Spray-rails (Radanes o Carril de agua)

Este tipo de apéndice sobresale del casco provocando un aumento de la resistencia al avance a velocidades bajas como se observa en Ilustración 5: Diagrama de radanes. Sin embargo, cuando la velocidad va aumentando se produce un incremento de la sustentación notable y una separación del flujo alrededor del cuerpo mucho más rápida. En definitiva, la embarcación empieza a planear antes.

Consideraciones principales, se debe intentar conseguir un ángulo lo más agudo posible en el punto A, donde el agua deja el casco para que las uniones de los radanes con la carena sean lo más suaves posible. Además, la superficie entre A y B debe estar lo más inclinada hacia abajo para reducir las aceleraciones verticales que se pueden generar al golpear el casco con la zona con las olas en la zona de la proa. Estos apéndices son efectivos hasta que el flujo generado por debajo del casco es prácticamente paralelo a la quilla.

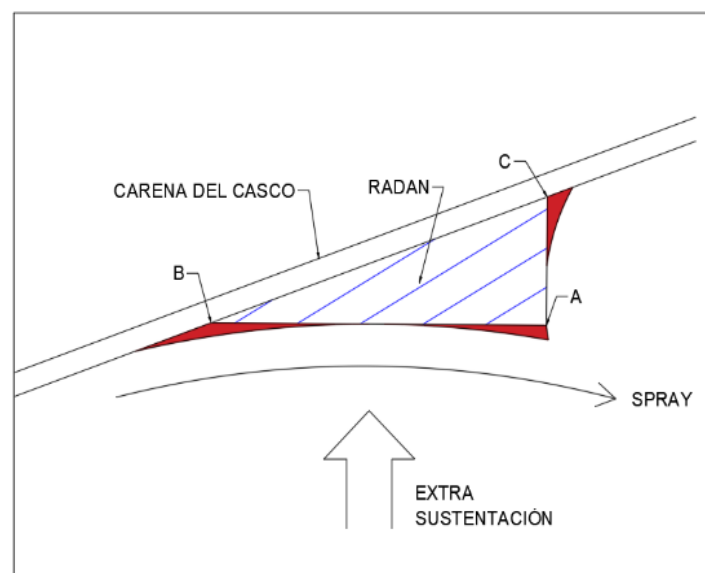


Ilustración 5: Diagrama de radanes

3.3 MAXSURF

MaxSurf es un programa que dispone de diferentes módulos. En concreto en este trabajo se utilizará el MaxSurf Resistance para estudiar cuál es el método más adecuado para calcular la resistencia hidrodinámica al avance.

En todo caso, MaxSurf Resistance dispone de cuatro modos de cálculo de la resistencia (Planing, Displacement, Yachts y Analytical) para embarcaciones de planeo. No obstante, se detallan a continuación las que se considera más adecuadas para una embarcación de planeo como la que es objeto de este trabajo.

3.3.1 Savitsky

Explicaciones físicas y matemáticas sobre el planeo de las embarcaciones

Consideraciones Iniciales

La superficie de planeo prismática se considera que tiene un ángulo de pantoque constante, una manga constante y un ángulo de asiento constante a lo largo de la superficie mojada de planeo.

Hay que tener en cuenta que en la mayor parte de los casos en el ámbito naval se utiliza la eslora como principal parámetro para adimensionalizar. Sin embargo, en este método se utiliza la manga porqué, para los cascos diseñados para el planeo la eslora mojada varía con el ángulo de asiento, la distribución de pesos y la velocidad de navegación. Además, es posible variar la eslora de este tipo de embarcaciones sin variar las características hidrodinámicas en situaciones de alta velocidad.

Las abreviaturas utilizadas en este apartado son exclusivas del método de Savitsky.

Elevación de la ola para superficies de planeo planas

Teoría

Para empezar, se considera el caso específico en el que las superficies de la popa tienen formas planas. Dicha consideración produce un fenómeno de elevación del agua por la parte delantera que conlleva a la consideración de una eslora mojada de mayor tamaño.

Wagner estudió este fenómeno del agua doblándose hacia delante en una pequeña sección a través de la superficie de planeo Ilustración 6: Descripción de la consideración de la eslora (λ) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964) y descubrió que esa era la razón por la cual se forman los *sprays* (carriles de agua).

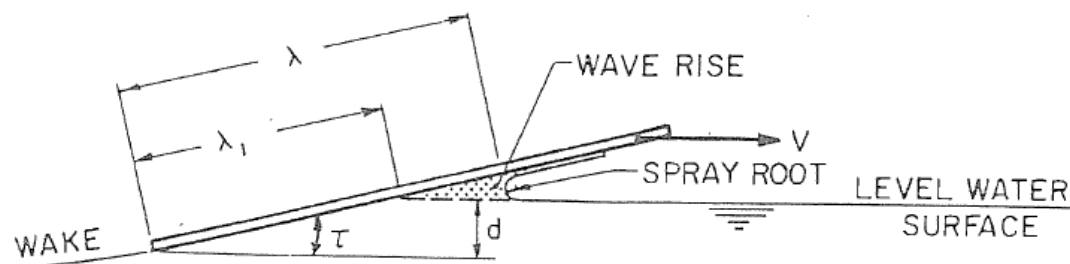


Ilustración 6: Descripción de la consideración de la eslora (λ) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Formulación

Para valores del ángulo de asiento pequeños, la línea de estancamiento y el *spray-root* (región donde se origina el carril de agua) prácticamente coinciden. Sin embargo, a medida que el ángulo aumenta, dicha distancia también.

Los primeros datos que se obtuvieron sobre la eslora mojada, se determinaron con la ayuda de la siguiente Ilustración 7: Gráfico de la relación eslora-manga considerando la elevación de la ola – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964).

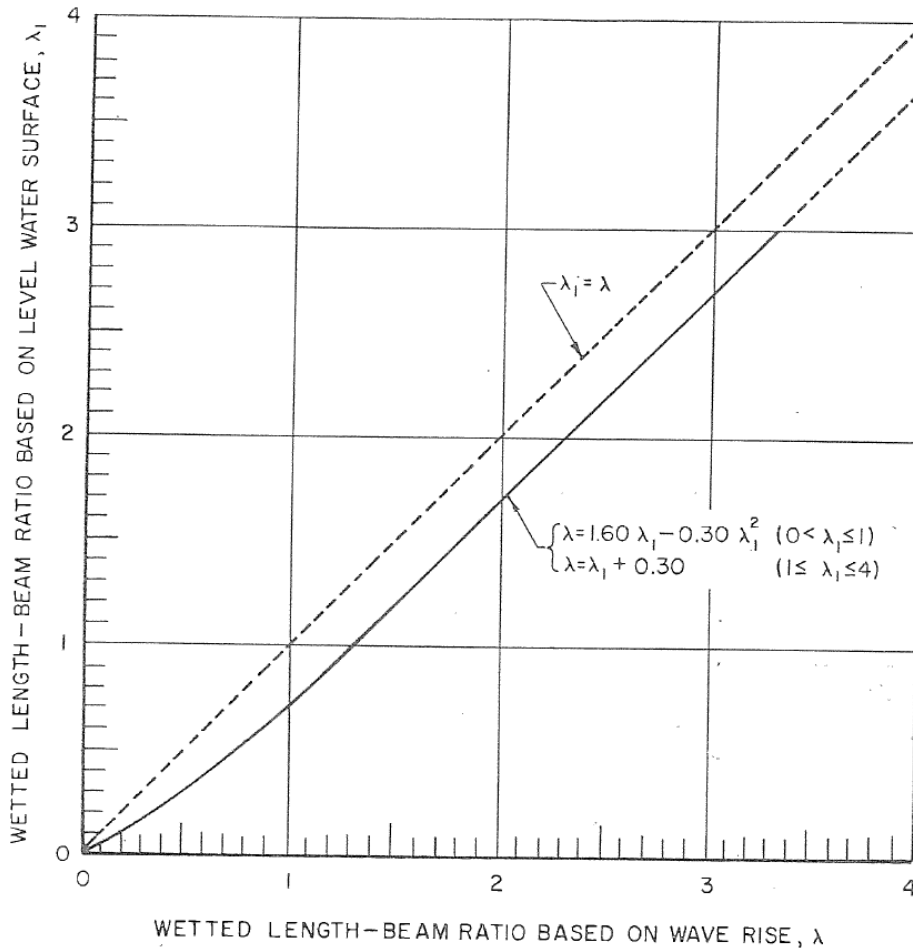


Ilustración 7: Gráfico de la relación eslora-manga considerando la elevación de la ola – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

$\lambda =$ relación eslora/manga = l/b

La relación empírica entre la ola y su altura se obtiene a partir de la relación entre dos ecuaciones.

Ecuación 8

$$\lambda = \lambda_1 + 0.30$$

$$\lambda = 1.60\lambda_1 - 0.30\lambda_1^2$$

Tras el debate entre **Savitsky** y **Neidinger** en 1954, concluyeron que el rango del ángulo de asiento podía llegar a variar desde 2 a 24 grados si se cumplían los siguientes rangos:

$$\lambda \leq 4; \text{ y } 0.6 \leq C_v \leq 25$$

Área de presión mojada del ángulo del pantoque para una superficie de planeo

Teoría

Para el caso de las formas en V de las superficies de planeo, la intersección entre la superficie de popa y el agua inalterada se encuentra por un lado a lo largo de 2 líneas oblicuas (O-C) y por el otro entre la quilla y el pantoque (O-B) Ilustración 8: Intersección de la línea de flotación para una superf. con un Ángulo de Pantoque τ – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964). También, se determinó que con un ángulo de asiento de aproximadamente 15 grados el agua deja de acumularse en la línea de la quilla.

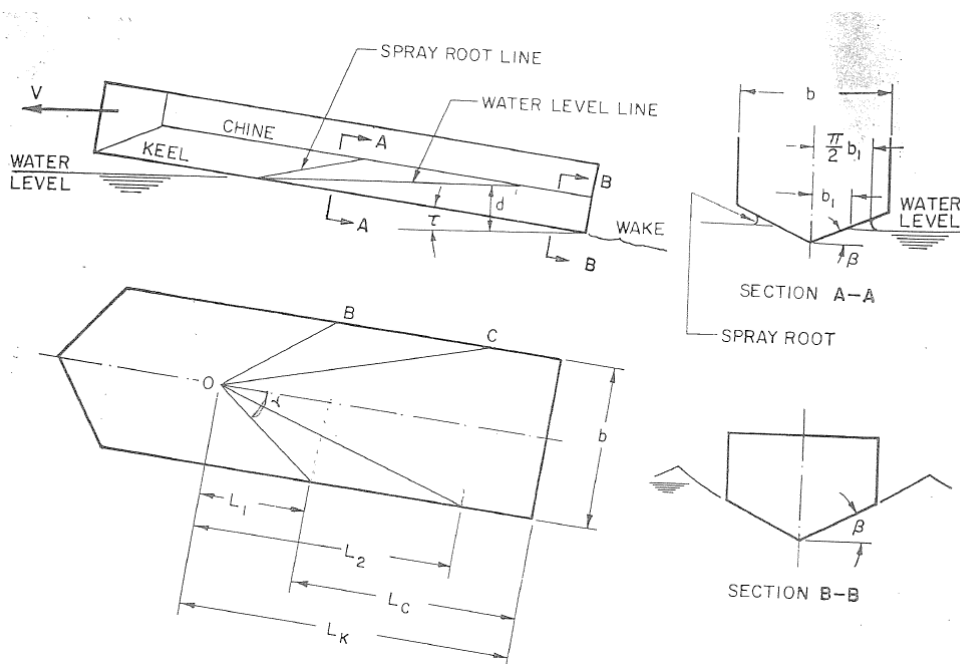


Ilustración 8: Intersección de la línea de flotación para una superf. con un Ángulo de Pantoque τ – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

El primer punto de contacto con el agua es O y donde hay una elevación de la superficie del agua a lo largo de la línea donde se origina el carril de agua (O-B).

Generalmente, se descubrió que la línea dicha línea era ligeramente convexa, pero su curvatura era tan pequeña que se acabó considerando negligible.

Así que la eslora mojada de una superficie del ángulo de pantoque es constante, se define como el promedio de esloras de quilla y esloras de pantoque medidas desde el espejo de popa hasta la intersección con la línea (O-B).

La diferencia entre estas dos esloras medidas en la situación de aguas tranquilas se calcula mediante la siguiente expresión:

Ecuación 9

$$L_2 = \frac{b \tan \beta}{2 \tan \tau}$$

b = manga de la superficie en posición de planeo

τ = ángulo de asiento de la superficie en posición de planeo

β = ángulo de pantoque de la superficie en posición de planeo

El aumento de la ola en el área del donde se origina la el carril de agua, se le aplica la siguiente consideración hecha por Wagner:

Para el modelo, la superficie que penetra verticalmente en el fluido, es con forma de cuña bidimensional.

Constató que la anchura de dicha cuña era $\pi/2$, lo que corresponde a la anchura mojada definida por la intersección entre el agua calmada y la popa.

Entonces, Wagner halló la diferencia entre la eslora mojada de la quilla y la del pantoque para una cara de la superficie de planeo prismática se encuentra mediante:

Ecuación 10

$$L_k - L_c = \frac{b \tan \beta}{\pi \tan \tau}$$

L_k = eslora mojada de la quilla

L_c = eslora mojada en el pantoque

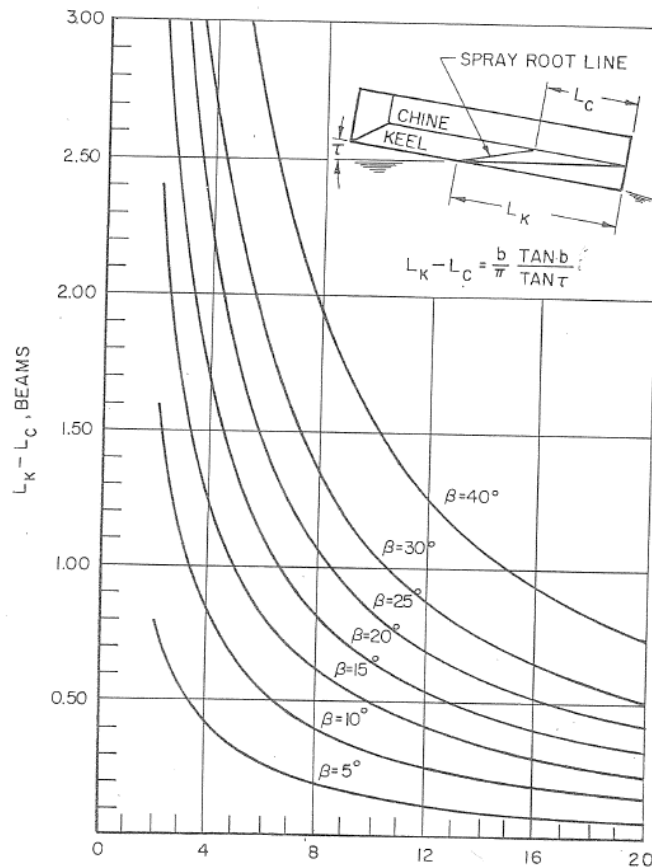


Ilustración 9: $L_k - L_c$ vs. Ángulos de Asiento y pantoque – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Una vez se vio que la eslora tiene este factor de $\pi/2$ para los casos donde la forma de la superficie de planeo es en V.

Se argumenta que la relación vista en Ilustración 9: $L_k - L_c$ vs. Ángulos de Asiento y pantoque – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964), se puede definir como:

Ecuación 11

$$L_k = d/\sin\tau$$

Luego, la relación eslora/manga (λ) se puede escribir así:

Ecuación 12

$$\lambda = \frac{\frac{d}{\sin\tau} - \frac{b \tan\beta}{2\pi \tan\tau}}{b} = \frac{L_k + L_c}{2b}$$

Datos experimentales obtenidos

Experimentalmente, se demuestra que Ecuación 10 es aplicable para todas las combinaciones de los ángulos de pantoque y asiento siempre que $C_v > 2$. Para las superficies con un ángulo de pantoque de 10 grados o menos, Ecuación 10 se puede seguir aplicando si $C_v = 1$.

En el caso de superficies con ángulo de pantoque iguales a 20 grados, con $C_v = 1$ y $\tau \leq 4$ grados, los valores $L_k - L_c$ son mayores que los que se pueden calcular con Ecuación 10.

Superficies con 30 grados de ángulo de pantoque con $C_v = 1$ y $\tau \leq 6$ grados, la formación del área donde se origina el carril de agua se rompe.

Notar que para $C_v = 1$ para valores dados de ángulos de pantoque y asiento que cumplen: $L_k - L_c = 1.66b$ dicha área también se rompe.

Se define (γ) como el ángulo entre la línea de formación del carril y la de la medida a la quilla.

Este ángulo (γ) se calcula y normalmente da como resultado 17 grados. Coincide donde el carril deja de formarse, es decir, se rompe.

Área mojada del carril de agua en una superficie de planeo

Esta se divide en 2 regiones, una que se encuentra a popa de donde se origina el carril de agua comúnmente conocida como área de presión y la otra se sitúa delante. La que está situada delante, es la que contribuye a la resistencia, mientras que la otra no.

Las direcciones del flujo que se han determinado en ambas áreas se han conseguido a través de fotografías subacuáticas.

Por un lado, se ha encontrado que el flujo en la región de la superficie de presión es mayoritariamente a popa con un cierto flujo transversal a lo largo del pantoque. Mientras que, por el otro, el flujo a través de la línea del *spray-root*, es principalmente a lo largo de la dirección de la línea de estancamiento (*stagnation line*).

En la zona del área mojada por el carril las direcciones del flujo son proporcionales al ángulo entre las partículas del fluido que se aproximan y la línea de estancamiento, que es igual al ángulo entre la dirección de los *sprays jets* y la línea de estancamiento.

Ejemplo

Cualquier línea de movimiento en el área del carril es casi un reflejo de la línea de estancamiento de la dirección de la velocidad incidente.

Con lo cual, se deduce que dada la presión en el área en el carril de agua es casi atmosférica, según **Bernoulli** se puede suponer que la velocidad en el carril es igual a la velocidad de planeo.

Las ecuaciones que definen la dirección de dicho carril en términos del ángulo de asiento y pantoque las dan **Pierson y Leshnover**.

Formulación

El área del carril real se extiende desde la línea donde se origina hacia adelante, hasta la línea de borde (*spray edge*). El ángulo (Φ) es el que queda determinado por la quilla la línea de borde en el medio del plano inferior Ilustración 10: Descripción gráfica de las líneas sobre la carena – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964).

Según la siguiente fórmula:

Ecuación 13

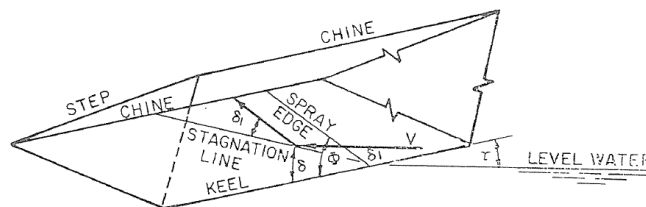
$$\tan\Phi = \frac{A + k_1}{1 - Ak_1}$$

Donde:

$$A = \frac{\left\{ \sin^2 \tau (1 - 2K) + K^2 \tan^2 \tau \left[\left(\frac{1}{\sin^2 \beta} \right) - \sin^2 \tau \right] \right\}^{1/2}}{\cos \tau + K \tan \tau \sin \tau}$$

$$k_1 = \frac{K \tan \tau}{\sin \beta}$$

$$K \approx \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{3 \tan^2 \beta \cos \beta}{1.7 \pi^2} - \frac{\tan \beta \sin^2 \beta}{3.3 \pi} \right)$$



$$\tan \theta = \tan \Phi \cos \beta$$

$$\tan \alpha = \frac{\pi}{2} \frac{\tan \tau}{\tan \beta}$$

Ilustración 10: Descripción gráfica de las líneas sobre la carena – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

El área total del spray (A_s), para ambos lados, proyectado en el plano a través de la quilla se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 14

$$A_s = \frac{b^2}{2} \left(\frac{\tan \beta}{\pi \tan \tau} - \frac{1}{4 \tan \phi \cos \beta} \right)$$

Haciendo una observación de la eslora del pantoque mojada durante una situación de planeo
 Ilustración 11: Vista de la parte inferior de un plano paralelo a la quilla – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964), la línea de borde siempre está por delante de la intersección de la de donde se origina el carril.

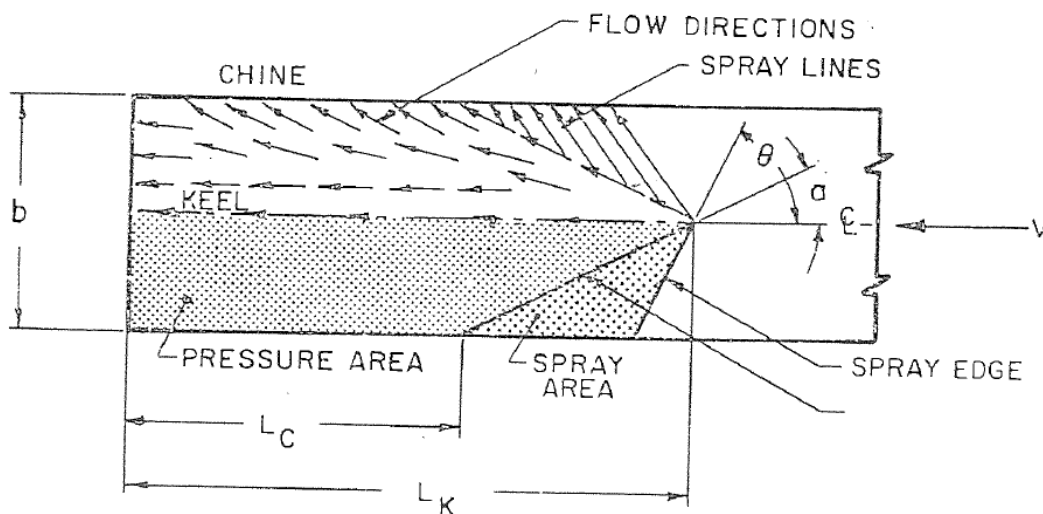


Ilustración 11: Vista de la parte inferior de un plano paralelo a la quilla – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Levantamiento de una superficie plana para el planeo

La obtención de una fórmula empírica para explicar el fenómeno de levantamiento está basada en una combinación del efecto dinámico y el estático.

Dicho de una forma más precisa, la elevación de una superficie de planeo se atribuye a 2 efectos separados, el primero es la reacción dinámica del fluido contra la superficie en movimiento y el segundo se llama contribución de la flotación a la sustentación con presiones estáticas, que corresponden a un calado y un ángulo de asiento determinado. La contribución a la flotación se representa como la influencia de la gravedad.

Para coeficientes de velocidad bajos, predomina la componente de sustentación, y a medida que la velocidad aumenta se empiezan a desarrollar los efectos de elevación dinámica.

Al principio, los efectos de elevación dinámica tienden a disminuir la carga que puede soportar una superficie, pero a medida que aumenta la velocidad, las cargas sobre la superficie también aumentan.

Finalmente, a velocidades altas predominan los coeficientes dinámicos que contribuyen a la elevación, y el efecto la presión estática se puede negligir.

Recopilando el apartado anterior, la dirección del flujo del fluido a través del área de presión en una superficie de planeo es una combinación de flujo longitudinal y una parte de flujo transversal a través de ambas líneas del pantoque.

Aerodinámicamente se sabe que las superficies con (λ) pequeña tienen un flujo predominante longitudinal y que el fenómeno de elevación es directamente proporcional a (τ) . Sin embargo, para superficies idealizadas con $(\lambda = \infty)$ (lo que a efectos prácticos es lo que se considera cuando estamos delante de un modelo con una eslora grande y una manga pequeña Ilustración 12: Descripción gráfica de la parte inferior de una carena en planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)), el valor del flujo transversal en la dirección de elevación sería proporcional a τ^2 .

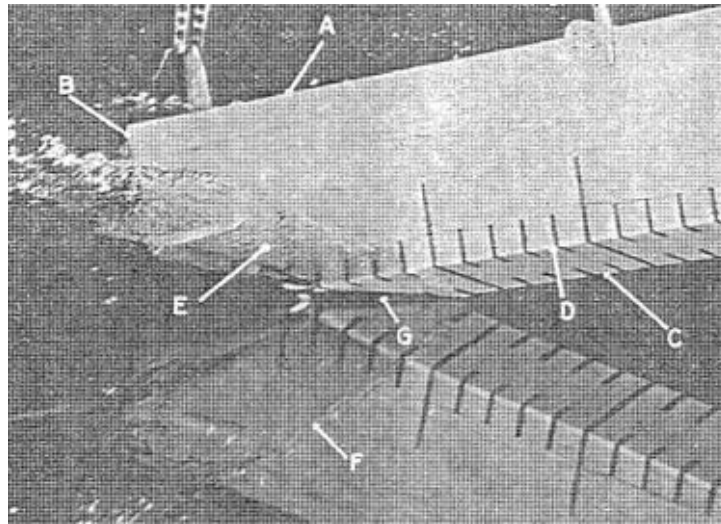


Ilustración 12: Descripción gráfica de la parte inferior de una carena en planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

- A: Cuña – B: Espejo de popa – C: Quilla – D: Pantoque – E: Bigote del carril
 F: Reflejo del borde del carril – G: Región donde se origina el carril de agua

Formulación

A continuación, para una relación de (λ) normal, la elevación se puede representar como:

Ecuación 15

$$C_L = A\tau + B\tau^2$$

Se debe tener en cuenta, que el rango de valores aplicables en superficies de planeo puede variar, respecto a la ecuación anterior. Por ello, se aplica una corrección al segundo término, que se puede aproximar elevado τ a 1.1.

Ecuación 16

$$C_L/\tau^{1.1} = f(\lambda, C_v)$$

Sottorf hizo un análisis de datos a alta velocidad y encontró que el término hidrostático es negligible, para un ángulo de asiento dado y que la componente dinámica del coeficiente de elevación varía como $\lambda^{1/2}$. Propuso la siguiente ecuación:

Ecuación 17

$$C_{L_d} = c\lambda^{1/2} \tau^{1.1}$$

Donde (c) es una constante que se tiene que determinar a partir de la componente hidrostática de elevación y unos parámetros que los proporcionan los ensayos de una placa plana.

La componente hidrostática de elevación para una placa plana con los parámetros de (b, λ y τ) determinados, se puede escribir como:

Ecuación 18

$$L_b = \frac{1}{2} \rho g b^3 (\lambda - 0.30)^2 \tan \tau$$

Si dividimos en ambos lados por:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 b^2$$

Y se asume que:

$$(\lambda - 0.30)^2 = K\lambda^n$$

Donde (D) y (n) son constantes que se deben determinar en esta nueva ecuación:

Ecuación 19

$$C_{L_d} = \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \tan \tau$$

Además, sabemos si la diferencia entre ($\tan \tau$ y $\tau^{1.1}$) es negligible, (C_{L_d}) es igual a:

Ecuación 20

$$C_{L_d} = \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \tau^{1.1}$$

Finalmente, combinando las ecuaciones Ecuación 17 y Ecuación 20, obtenemos la ecuación para calcular el coeficiente de sustentación para una superficie de planeo:

Ecuación 21

$$C_L = \tau^{1.1} \left(c\lambda^{1/2} + \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \right)$$

Esta última ecuación tiene una ventaja y es que se ilustra el efecto de las variables sobre la elevación de planeo. Las constantes, (C, D y n) se evalúan aplicando la fórmula anterior en un base de datos con una gran colección de datos sobre de superficies de planeo, el procedimiento se puede encontrar en **Savitsky and Neidinger**.

Como resultado final se obtiene la siguiente ecuación para un *angulo de pantoque* = 0:

Ecuación 22

$$C_L = \tau^{1.1} \left[0.0120\lambda^{1/2} + \frac{0.0055\lambda^{5/2}}{C_v^2} \right]$$

La ecuación anterior solo si se puede aplicar si estamos ensayando modelos dentro del siguiente rango de valores:

$$0.60 \leq C_v \leq 13$$

$$2^\circ \leq \tau \leq 15^\circ$$

$$\lambda \leq 4$$

Interpretación y graficas con los resultados obtenidos por Savitsky

En primer lugar, definimos gráficamente las esloras L_c y L_k y el ángulo β , Ilustración 13:

Definición gráfica de las esloras L_c y L_k – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

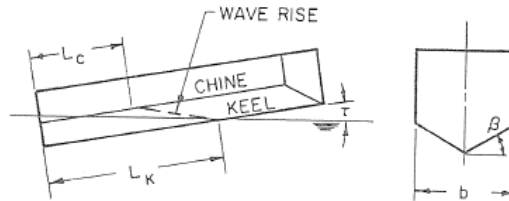


Ilustración 13: Definición gráfica de las esloras L_c y L_k – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

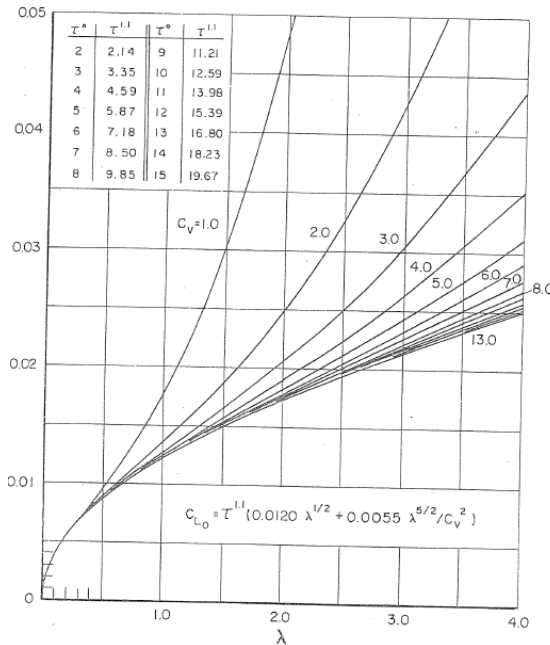


Ilustración 14: Coeficiente de sustentación en una superficie de planeo plana ($\beta = 0^\circ$) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Como se muestra en la Ilustración 14: Coeficiente de sustentación en una superficie de planeo plana ($\beta = 0^\circ$) – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964) se ha realizado una gráfica ($C_L/\tau^{1.1}$ vs. λ) para un gran rango de (C_v – value). Examinando la gráfica, si se fija un valor de (λ), se obtiene que la contribución de la flotación a la elevación significativa frente a coeficientes de velocidad altos hasta que estos se aproximan a 10.

Entonces tenemos que la elevación dinámica a $C_v > 10$ es predominante e independiente de la velocidad. En consecuencia, para $C_v > 10$ el coeficiente de elevación para una placa plana puede expresarse como:

$$C_L = 0.0120\lambda^{1/2} \tau^{1.1}$$

Se representa la pérdida de elevación experimentada por una superficie de planeo a muy bajas velocidades $C_v \leq 1$.

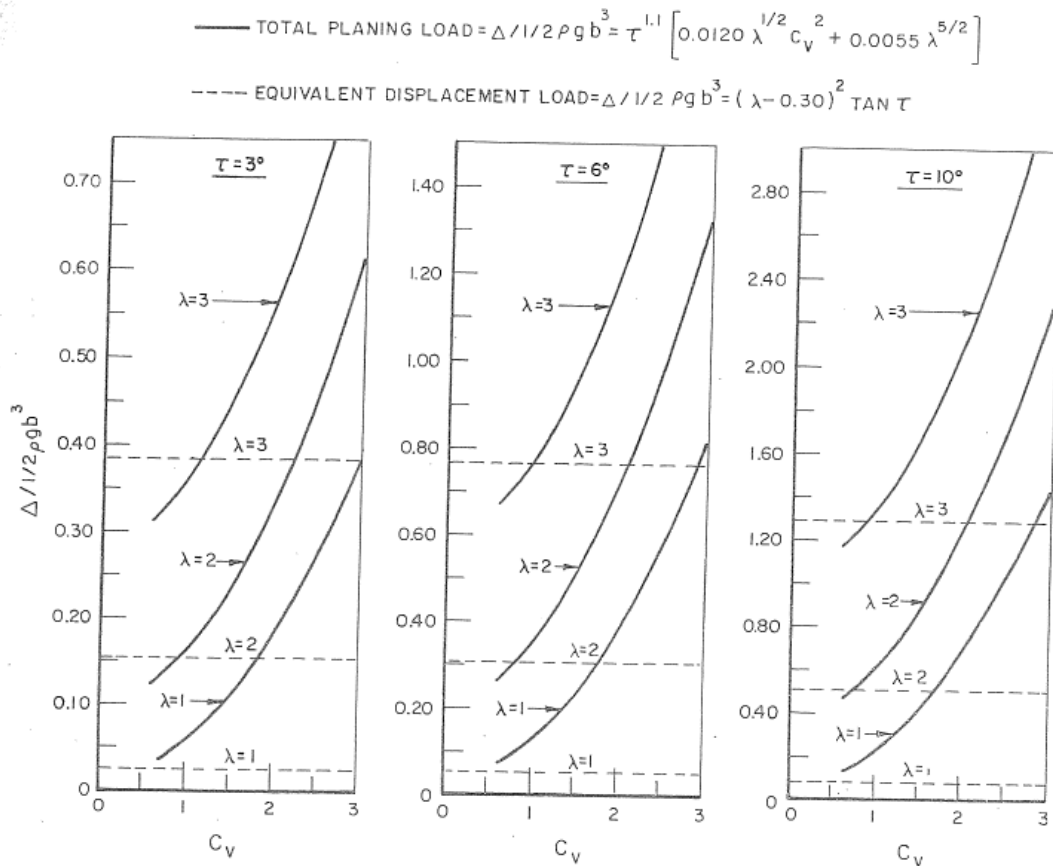


Ilustración 15: Carga de Planeo vs. Desplazamiento para una superficie de planeo variando el C_v – Fuente: Savitsky *Planing Hulls* (1964)

Se comparan las elevaciones resultantes que corresponden a la pura elevación estática (flotabilidad), para un caldo y trimado determinados.

En Ilustración 15: Carga de Planeo vs. Desplazamiento para una superficie de planeo variando el C_v – Fuente: Savitsky *Planing Hulls* (1964) se enfrenta un coeficiente de peso vs. el coeficiente de velocidad para 3 longitudes y 3 ángulos de asiento distintos. Las curvas son las cargas de planeo según lo predicho por las Ecuación 22 y se ve que varían en función de (C_v) .

Las líneas discontinuas son las cargas flotantes, obtenidas en b, λ y τ .

A medida que (C_v) se acerca a 0, es natural y se espera que el cálculo de la carga se acerca a la carga flotante. Notar que en el grafico anteriormente mostrado, en el rango $0.60 \leq C_v \leq 1$ el movimiento de la superficie de planeo se reduce por debajo del valor esperado. Este efecto es algo parecido al experimento *sinkage* para embarcaciones de desplazamiento a velocidades bajas.

Para $C_v \approx 1$, el total de la carga de planeo es aproximadamente igual a la hipotética carga flotante.

Para $C_v > 1$ la reacción positiva de la ración del fluido en la parte de planeo inferior, aumenta rápidamente proporcionalmente al aumento de la velocidad.

Sustentación en el ángulo de pantoque para una superficie de planeo

Teoría

Para un ángulo de asiento dado y una (λ) estándar, el efecto de aumento del ángulo de pantoque tiende a reducir la sustentación de planeo.

Esta reducción de la sustentación es causada principalmente por la reducción de la presión de estancamiento en el borde del área mojada.

El ángulo entre la línea de estancamiento y la quilla se calcula mediante:

Ecuación 23

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \tau}{2 \tan \beta} \right)$$

Cuando, ($\beta = 0$) la línea de estancamiento es normal a la quilla y normal a la velocidad de flujo libre, entonces la carga de estancamiento total desarrollada es:

$$\frac{1}{2} \rho V^2$$

Para valores mayores de (β), el ángulo (γ) decrece, así la carga de estancamiento deja de desarrollarse. Por ello, la sustentación de planeo se ve reducida Ilustración 16: Diagrama de la sustentación con un ángulo de pantoque determinado para una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964) .

Una de las consecuencias de este fenómeno, es la presencia del ángulo de pantoque, el cual provoca que la línea de estancamiento se desplace a popa así, contribuyendo a una reducción de la sustentación.

Formulación

La ecuación empírica utilizada para representar el coeficiente de sustentación para una superficie en el pantoque es:

Ecuación 24

$$C_{L\beta} = C_{L_0} - 0.0065\beta C_{L_0}^{0.60}$$

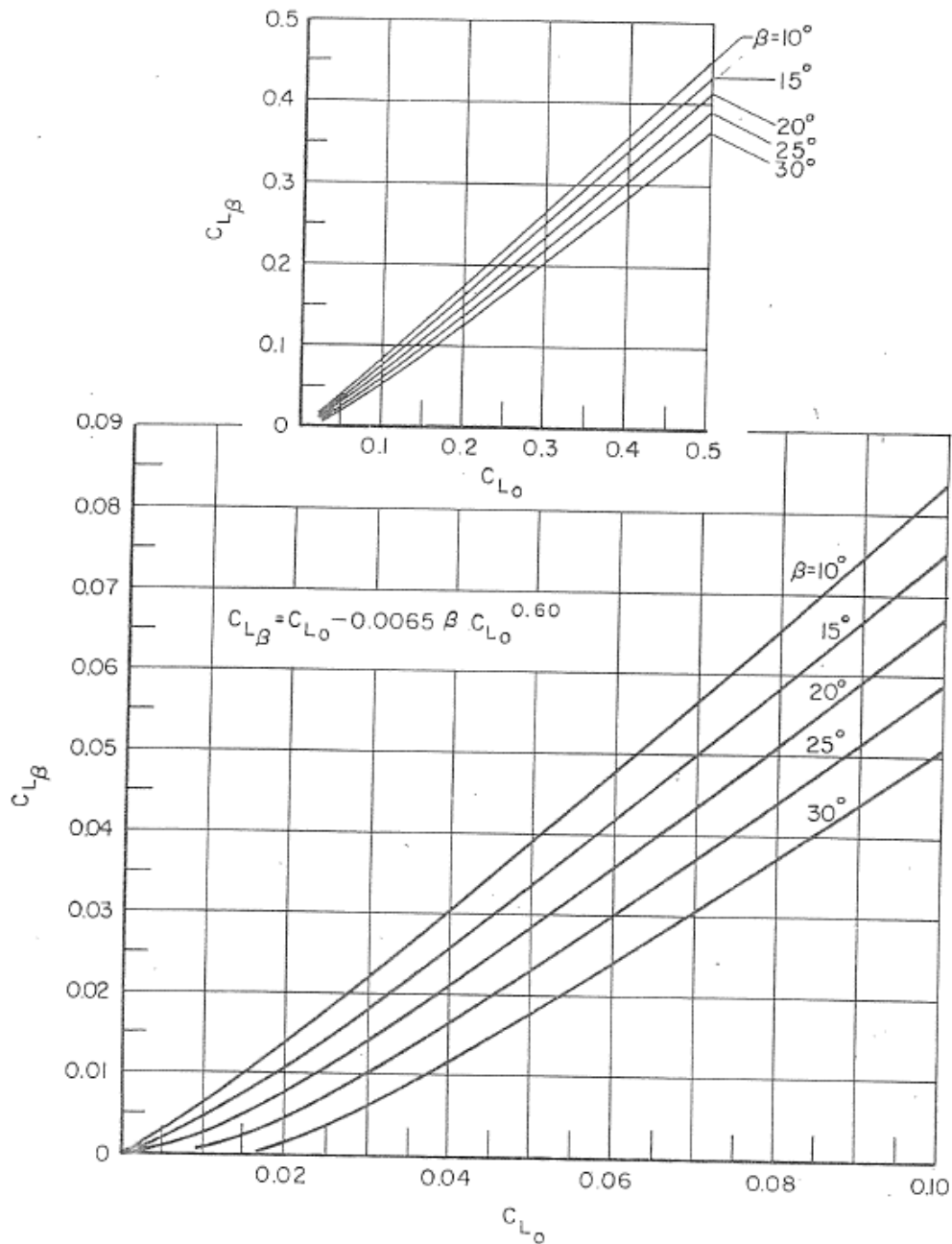


Ilustración 16: Diagrama de la sustentación con un ángulo de pantoque determinado para una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Resistencia de una superficie de planeo

Teoría

La resistencia hidrodinámica total de una superficie de planeo se compone de dos partes, la de la carga de resistencia desarrollada por la presión actuando en dirección normal y la de la resistencia viscosa que actúa de forma tangencial a la popa. Esto se aplica en ambas áreas, la de presión y la del carril.

Si el costado está mojado, se le tiene que añadir la componente viscosa correspondiente.

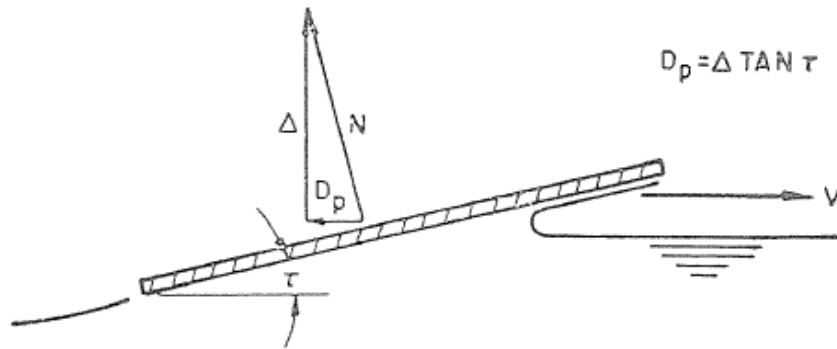
Ejemplo

Para el siguiente caso se asume que no estará mojado el costado del casco.

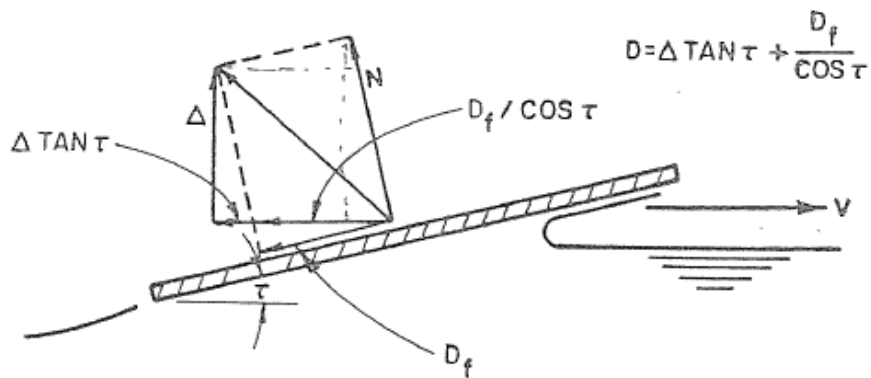
Para un fluido sin fricción, la fuerza tangencial es igual a 0, Ilustración 17: Componentes de la resistencia en una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964) . Por eso, para un ángulo de asiento, carga y fuerza normal concretos en la parte inferior, la componente de resistencia (D_p), debida a las fuerzas de presión es:

Ecuación 25

$$D_p = \Delta \tan \tau$$



a) FRICTIONLESS FLUID



b) VISCOUS FLUID

Ilustración 17: Componentes de la resistencia en una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Cuando la resistencia de fricción (D_f) actúa tangencialmente al inferior se añade, a la resistencia total (D):

Ecuación 26

$$D = \Delta \tan \tau + \frac{D_f}{\cos \tau}$$

Para el cálculo de la componente de la resistencia viscosa:

Ecuación 27

$$D_f = \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos \beta^4}$$

Donde:

$C_f =$ *Schoenderr*, Coeficiente de fricción turbulento

$V_1 =$ Velocidad media de la carena inferior

Contribución de la velocidad en la resistencia

La velocidad (V_1) es menor que la velocidad de planeo anticipada (V), debido a que la presión de planeo inferior es mayor que la de presión de flujo libre.

Sottorf, Parkinson y Locke dedujeron que la velocidad media de la parte inferior a alta velocidad es donde la contribución flotante a la sustentación es negligible.

Savitsky y Ross desarrollaron una expresión aplicable en el rango de velocidades ($1 < C_f < 13$). Se puede utilizar el caso en el que el casco tiene un ($deadrise = 0$), la contribución dinámica a la sustentación de planeo viene dado por:

Ecuación 28

$$C_{fd} = 0.0120 \lambda^{1/2} \tau^{1.1}$$

La carga dinámica en el inferior es:

Ecuación 29

$$\Delta_d = \frac{1}{2} \rho V^2 b^2 (\lambda^{1/2} \tau^{1.1})$$

La presión dinámica media es:

Ecuación 30

$$p_d = \frac{\Delta}{\lambda b^2 \cos \tau} = \frac{0.0120 \tau^{1.1} \rho V^2}{2 \lambda^{1/2} \cos \tau}$$

Se aplica **Bernoulli** entre las condiciones de flujo libre, la presión media y las condiciones de velocidad en la parte inferior de la superficie de planeo:

Ecuación 31

$$V_1 = V \left(1 - \frac{2p_d}{\rho V^2} \right)^{1/2}$$

Se substituye la ecuación Ecuación 30 en la Ecuación 31:

Ecuación 32

$$V_1 = V \left(1 - \frac{0.0120 \tau^{1.1} \rho V^2}{2 \lambda^{1/2} \cos \tau} \right)^{1/2} \text{ para } (\beta = 0)$$

La velocidad media para un ángulo específico de pantoque se calcula de una manera análoga utilizando el coeficiente de sustentación para superficies dadas por Ecuación 23.

Los rangos (V_1/V) se calculan en 4 ángulos de pantoque se ven en la siguiente Ilustración 18: Media de valores de la velocidad en la parte inferior de la superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964):

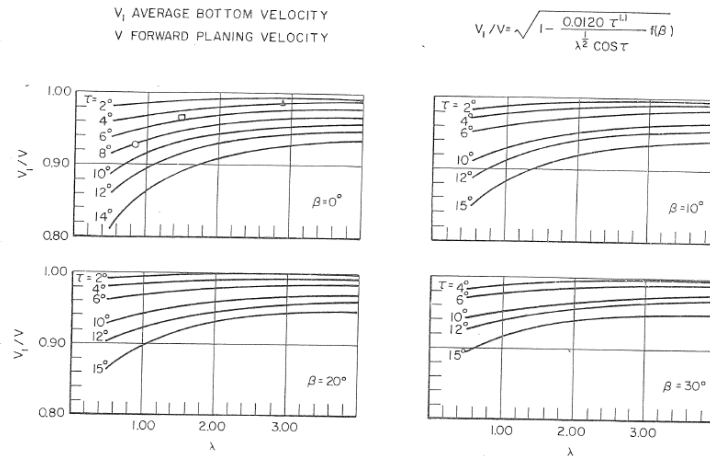


Ilustración 18: Media de valores de la velocidad en la parte inferior de la superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Formulación

Destacar que el área mojada usada en (19) es el área de presión inferior que es igual a (λb^2).

Previamente, en los reportes realizados en el **Davidson Laboratory**, se constató que la resistencia de fricción desarrollada en el área del carril Ecuación 14 por delante de la línea donde se origina el carril de agua, Ilustración 19: Diagrama de la dispersión de la ola sobre la superficie de la carena – Fuente: Mintu, Shafiul (2016).

Sin embargo, en los últimos estudios se indica que con un ángulo de asiento menor a 4 grados (común para embarcaciones de planeo) la anchura del spray es considerablemente menor al asumido. De hecho, el *spray sheet* (estela del carril) aparece mucho más delgado que el desplazamiento de la capa límite normal en el mismo número de Reynolds. Por eso, hasta que este efecto esté más estudiado, se recomienda que los ángulos de asiento sean menores a 4 grados, respecto al área usada para calcular la resistencia viscosa es (λb^2).

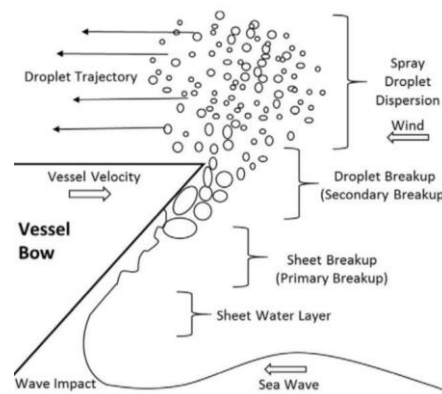


Ilustración 19: Diagrama de la dispersión de la ola sobre la superficie de la carena – Fuente: Mintu, Shafiul (2016)

En el caso de ángulos de asiento mayores se usan los resultados de **Savitsky and Neidinger** (estudios que desarrollaron en un conjunto de ecuaciones empíricas para superficies de planeo) y los de **Savitsky and Ross**

En resumen, la resistencia hidrodinámica de una superficie de planeo viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 33

$$D = \Delta \tan \tau + \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos \beta \cos \tau}$$

Donde (V_1) está trazado en la Ilustración 17: Componentes de la resistencia en una superficie de planeo, (C_f) es el coeficiente Turbulencia-Fricción. El número de Reynolds se calcula:

Ecuación 34

$$R_n = \frac{V_1 \lambda b}{\gamma}$$

$\gamma = \text{viscosidad cinemática}$

Rangos de sustentación y resistencia en superficies de planeo

Gráficas e interpretación

Previamente se examinan las principales variaciones de rangos de resistencia y sustentación en función de la velocidad, la eslora mojada y el ángulo de asiento

Ejemplo

Los datos con los que se han obtenido las siguientes gráficas, Ilustración 20: Variación de la relación resistencia-sustentación con la velocidad – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964), con diferentes ángulos de asiento, un modelo con una manga de 9 pulgadas y un ángulo de pantoque a 20 grados.

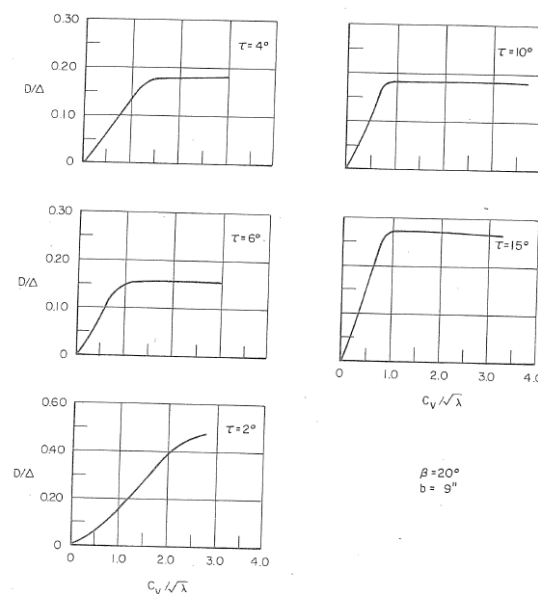


Ilustración 20: Variación de la relación resistencia-sustentación con la velocidad – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

En el eje de abscisas se representa la velocidad basada en la longitud de la eslora mojada que también es conocido como el número de Froude.

Estos rangos de sustentación y resistencia solo son aplicables para embarcaciones de 9 pulgadas y no se pueden aplicar directamente a escala para otras embarcaciones.

Como se observa en el gráfico anterior, la relación $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ contra $\left(\frac{C_v}{\lambda^{1/2}}\right)$, generalmente colapsa en una sola curva para cada ángulo de asiento por encima de los rangos de (λ) y (C_v) .

Hasta $\left(\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} \approx 1\right)$, hay un aumento rápido de los rangos de $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ para todos los ángulos de asiento.

Para $\tau > 2^\circ$ y $\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} > 1$, el rango $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ es prácticamente constante para cualquier combinación de velocidad y eslora mojada.

Para $\tau = 2^\circ$, la curva de $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ aparece acercarse a un valor constante para valores de $\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} > 2$.

Las variaciones anteriores de $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ se pueden asociar a cambios observados en las condiciones de flujo alrededor de la superficie de planeo. Se sabe que para $C_v \geq 2$ hay una clara separación del fluido del pantoque y el espejo. Y que para $C_v \leq 1$ el grado de separación del flujo desde el espejo, para un ángulo de asiento dado, es una función de la longitud del área mojada, cuanto más corta es la longitud, mayor es la separación de flujo.

Con un grado creciente de separación del flujo del espejo de popa, la fuerza de resistencia aumenta y, por lo tanto, la relación $\left(\frac{D}{\Delta}\right)$ aumenta hasta que se produce la separación de flujo a lo largo del pantoque y el espejo.

Si se define que el planeo existe cuando el fluido se desprende del espejo de popa y el pantoque, usando la Ilustración 20: Variación de la relación resistencia-sustentación con la velocidad se puede definir el momento de inicio del planeo cuando:

$$\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} = 1, \text{ para } \tau \geq 4^\circ \text{ y } \frac{C_v}{\lambda^{1/2}} = 2, \text{ para } \tau \geq 2^\circ$$

En esencia, el planeo ocurre cuando la relación entre la resistencia y la sustentación en un ángulo de asiento determinado es esencialmente constante. Hay más formas de definir el punto de inicio de planeo. Destacar que para todas las definiciones del inicio de planeo solo la parte inferior de la superficie de planeo está mojada. El uso de la relación $\left(\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} = 1\right)$ define el punto en el cual el fenómeno empieza a suceder.

Centro de presión de las superficies de planeo

Teoría

Se ha demostrado que el centro de presión resultante de las superficies de planeo se puede evaluar con precisión mediante consideraciones separadas de la componente de flotación y la fuerza dinámica de sustentación. Se considera que el centro de presión de la componente dinámica se encuentra en el 75% de la longitud media hacia adelante del espejo de popa, mientras que se supone que el centro de presión de la fuerza de flotación está en el 33% hacia delante del espejo, estos porcentajes se pueden deducir gracias al siguiente gráfico, Ilustración 21: Centro de presiones de una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964).

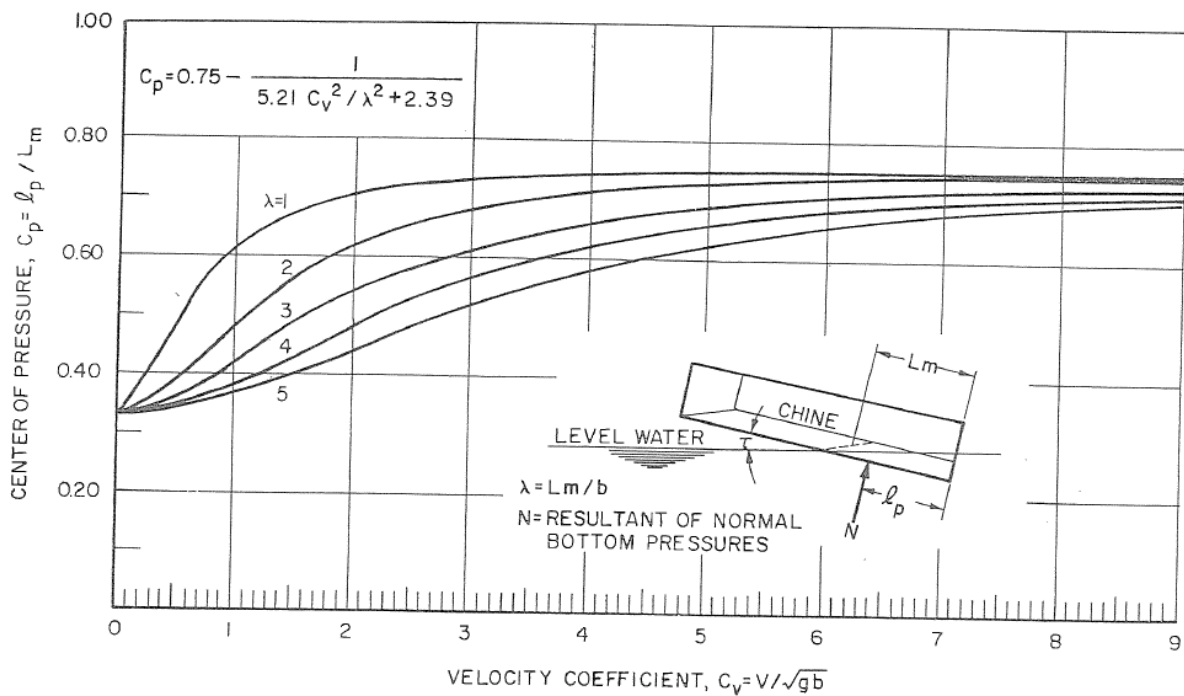


Ilustración 21: Centro de presiones de una superficie de planeo – Fuente: Savitsky Planing Hulls (1964)

Estas distancias son aproximaciones que están aceptadas empíricamente. Añadiendo los momentos que recibe el espejo de popa por cada una de las dos componentes de la carga total y después dividiéndola por la carga total, nos deja la expresión de la distancia al centro de presión por delante del espejo. Usando los valores de las componentes de flotación y de fuerza dinámica dadas en Ecuación 22, el centro de presión (C_p) se encuentra:

Ecuación 35

$$C_p = \frac{l_p}{\lambda b} = 0.75 - \frac{1}{5.21 \frac{C_v^2}{\lambda^2} + 2.39}$$

Aplicación

Se utiliza para estimar la resistencia de las embarcaciones de planeo. Se divide en dos partes, la primera sirve para calcular la resistencia durante la situación de antes del planeo “Savitsky Pre-Planing” y la segunda para la situación durante el planeo “Savitsky Planing”.

3.3.2 Blount and Fox

Aplicación

Es un algoritmo basado en el método de Savitsky, ofrece ciertas mejoras respecto al método anterior sobre todo durante el “hump speed” velocidad de la embarcación durante el levantamiento que se produce en la situación de planeo (momento de resistencia máximo con el agua). Este método se considera el mejor para embarcaciones que tienen un ángulo de salida de la popa muerto o tienen una manga variable en la popa.

3.3.3 Holtrop

Aplicación

Uno de los métodos más utilizados por su gran versatilidad y precisión para el cálculo de la resistencia de embarcaciones que pertenecen a la categoría de embarcaciones de desplazamiento (petroleros, cargueros, buques de carga general, remolcadores, barcos de pesca).

Capítulo 4: Modelo

En relación al modelo seleccionado para el análisis hidrodinámico corresponde al de una embarcación fabricada a mano llamada Garbín 26, Ilustración 22: Vista del perfil de la embarcación Garbín 26.

La razón por la cual se ha escogido este modelo en concreto es por la disponibilidad y accesibilidad que se me ofreció con esta embarcación, ya que se me permite el acceso a todos los documentos oficiales de fabricación y a todas las especificaciones de diseño que se han utilizado para el proyecto. Además, se sabía de antemano que debido a pruebas realizadas por los mismos fabricantes la embarcación no terminaba de alcanzar una situación óptima de planeo.



Ilustración 22: Vista del perfil de la embarcación Garbín 26

Cabe destacar que uno de los mayores inconvenientes con los que se ha encontrado a la hora de realizar las primeras vistas del modelo es que este se construyó sin planos y a posteriori se hicieron los siguientes bocetos, Ilustración 23: Bocetos de Perfil y Planta del Modelo Garbín 26:

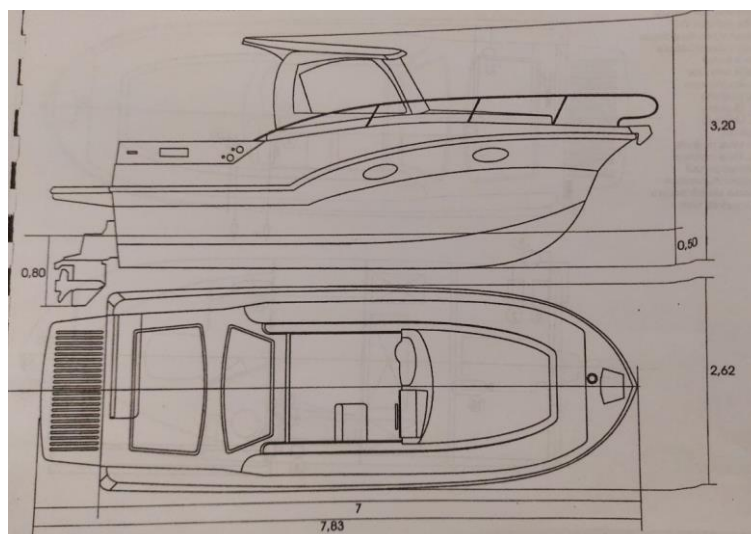


Ilustración 23: Bocetos de Perfil y Planta del Modelo Garbín 26

4.1 Características principales

Se trata de una embarcación para 8 pasajeros destinado a la pesca-paseo, con cabina y solárium.

Dimensiones

Eslora Total: 7.83m

Eslora PP: 6.86m

Puntal: 1.93m

Manga: 2.60m

Desplazamiento en plena carga: 4.50T

Motorización

Por lo que respecta a la motorización de la embarcación consta de las siguientes especificaciones:

- Motor: Volvo Penta 240 V6
- Potencia: 240CV
- Tipo de motor: Intraborda
- Combustible: Diésel
- Hélice: Acero INOX
- Número de palas: 3
- Paso: 20"
- Diámetro: 14.5"

4.2 Modelo 2D

Creación del perfil

Para empezar el análisis del casco de la embarcación, primero se ha dibujado a partir del boceto proporcionado por la empresa del fabricante una vista en 2D del perfil. Así pues, con el programa de diseño Rhinoceros 3D se ha generado el siguiente boceto, Ilustración 24: Vista de Perfil del boceto 2D digital.

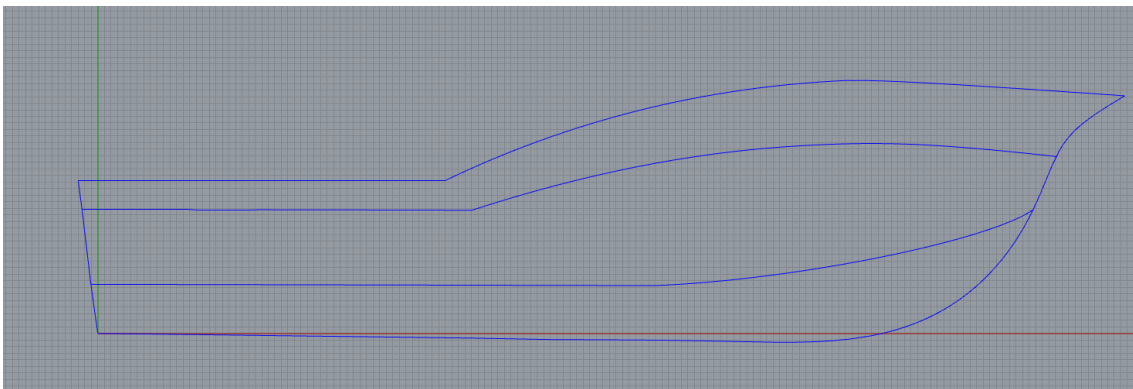


Ilustración 24: Vista de Perfil del boceto 2D digital

Se trata de conservar al máximo las relaciones de escala y proporcionalidad respecto el boceto original.

Creación de las líneas de agua

Para el caso de la creación de las líneas de agua se han recogido las cotas in situ con un metro. Y se obtuvieron las siguientes líneas, Ilustración 25: Vista desde Planta de las líneas de agua en digital:



Ilustración 25: Vista desde Planta de las líneas de agua en digital

4.3 Modelo 3D

Delineado

Para empezar a crear las principales formas de la embarcación se deben tener creadas las líneas de agua y las de perfil en 2D.

Una vez obtenidas, se construyen líneas en 2 vistas y se obtiene la siguiente forma de la carena. Siempre se debe intentar realizar líneas con el mínimo de puntos de control posible para obtener una línea lo más suave posible, Ilustración 26: Vista de Alzado del Boceto en 2D.

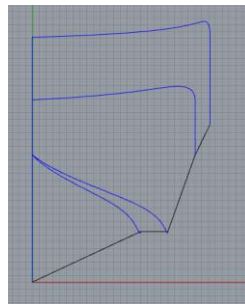


Ilustración 26: Vista de Alzado del Boceto en 2D

Creación de superficies

A continuación, con la herramienta de barrido por dos carriles se generan las superficies del modelo en 3D,

Ilustración 27: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y Boceto en 3D del Modelo vista Perspectiva. Añadir que se disponen varios métodos para realizar las superficies, sin embargo, la que qué porta mayor suavidad y control sobre las mismas es la de barrido por dos carriles.

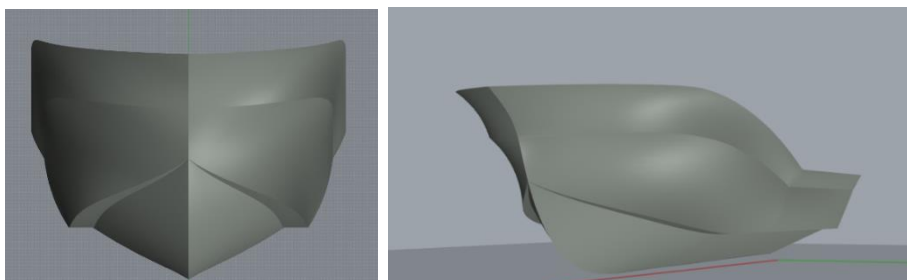


Ilustración 27: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y Boceto en 3D del Modelo vista Perspectiva

Carriles de agua

Modelado

Se han modelado dos carriles. Ilustración 28: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y vista Perspectiva con Carril de agua para cada lado de la carena con una herramienta llamada “extraerisocurva”:

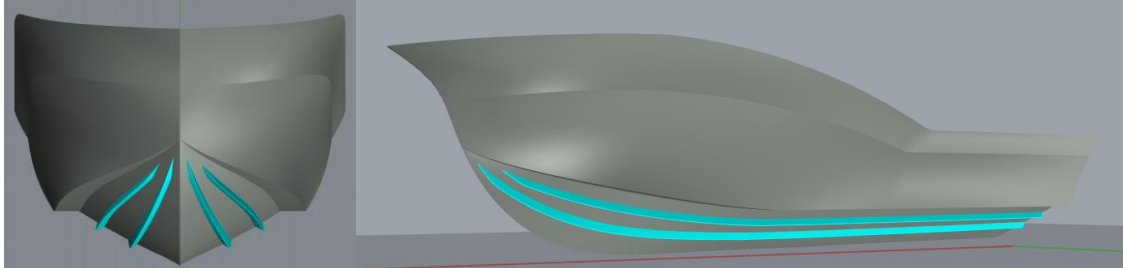


Ilustración 28: Boceto en 3D del Modelo vista Alzado y vista Perspectiva con Carril de agua

Problemática

Cuando se ha exportado el modelo al programa Maxsurf este no ha sido capaz de recrear el modelo con guías correctamente. Con lo cual, se generan imperfecciones en el área calculada según la sección del modelo como se observa en la Ilustración 29: Curva de áreas en función de la sección.

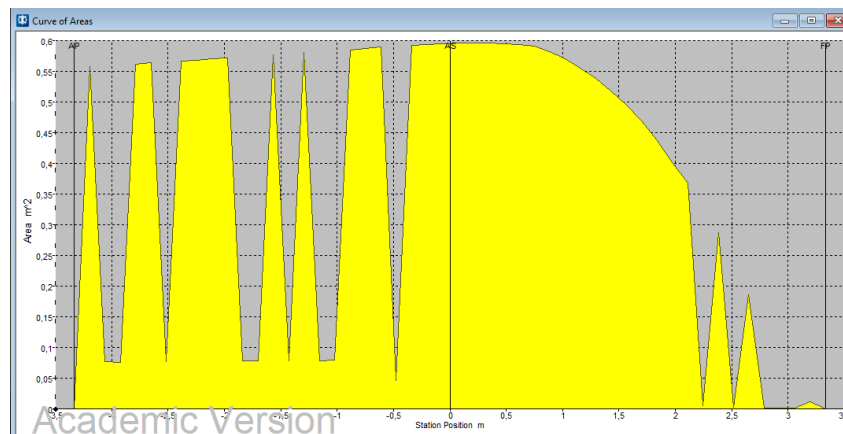


Ilustración 29: Curva de áreas en función de la sección con guías de agua

Por esta razón, solo se realizan cálculos se con la embarcación sin carriles Ilustración 30: Curva de áreas en función de la sección para el modelo sin guías de agua de agua con este programa.



Ilustración 30: Curva de áreas en función de la sección para el modelo sin guías de agua

4.4 Parámetros del modelo

Maxsurf

Una vez exportado el modelo se han obtenido las siguientes hidrostáticas, como parámetros de referencia para conocer la línea de flotación (WL) se han utilizado los datos proporcionados por los diseñadores de la embarcación:

Displacement	3,252	Kg
Volume (displaced)	2,564	m ³
Draft Amidships	0,5	m
Immersed depth	0,5	m
WL Length	6,674	m
Beam max extents on WL	1,864	m
Beam extents on WL of station with max area	1,859	m
Wetted Area	13,248	m ²
Max sect. area	0,480	m ²
Sect. area amidships	0,471	m ²
Waterpl. Area	10,863	m ²
Prismatic coeff. (Cp)	0,801	
Block coeff. (Cb)	0,412	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,533	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,873	
KB	0,346	m
KG fluid	0,500	m
BMt	1,118	m
BML	12,656	m
GMt corrected	0,963	m
GML	12,501	m
KMt	1,463	m
KML	13,001	m
Immersion (TPc)	0,111	tonne/cm
MTc	0,049	Tonne*m
RM at 1deg = GMt. Disp. sin (1)	44,180	Kg*m
Length-Beam ratio	3,581	
Beam-Draft ratio	3,730	
Length: Vol ^{0.333} ratio	4,877	

Estas son las 3 vistas que se pueden observar desde las ventanas del programa Maxsurf: Ilustración 31: Vista de perfil del modelo en Maxsurf Ilustración 32: Vista de planta del modelo en Maxsurf e Ilustración 33: Vista de alzado del modelo en Maxsurf

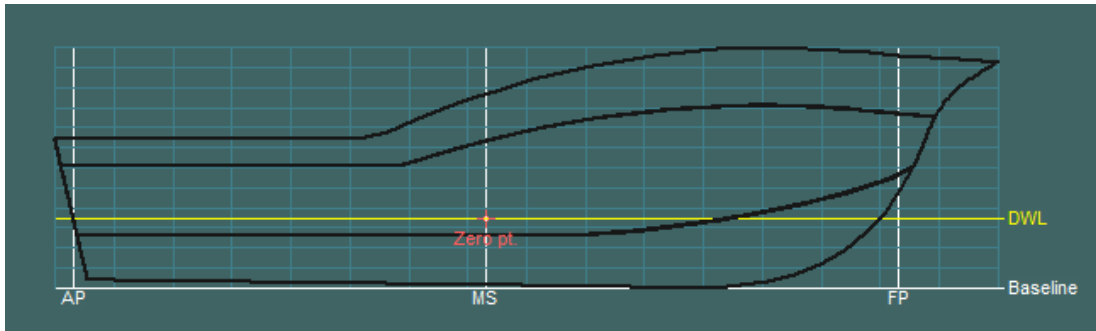


Ilustración 31: Vista de perfil del modelo en Maxsurf

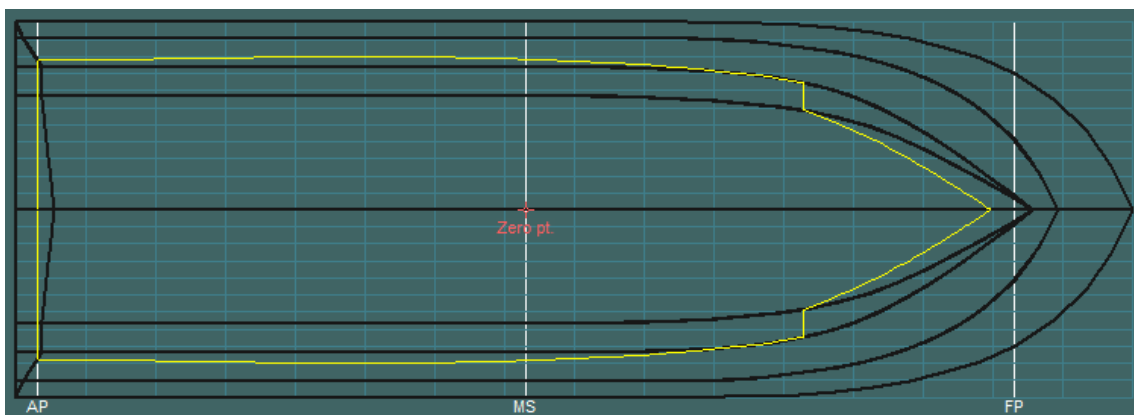


Ilustración 32: Vista de planta del modelo en Maxsurf

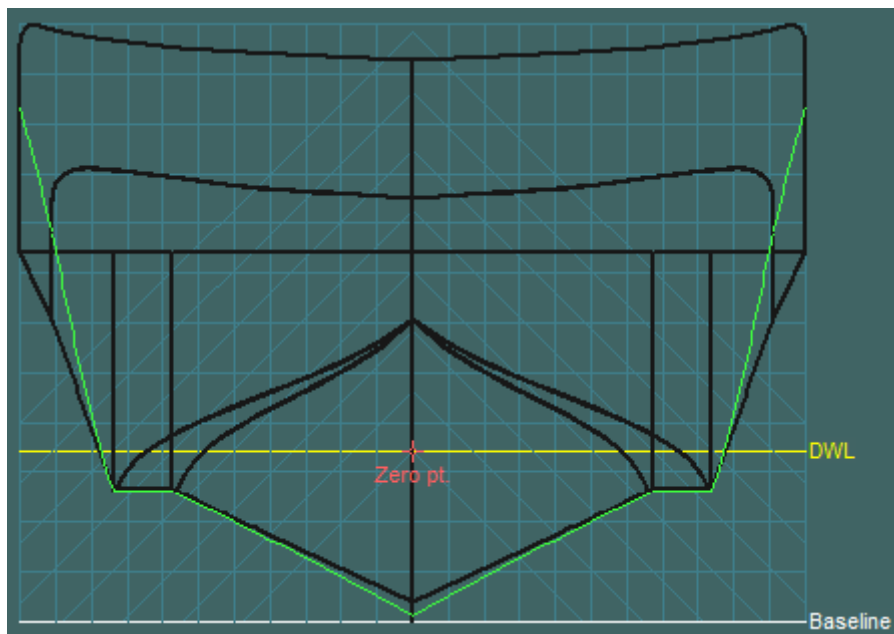


Ilustración 33: Vista de alzado del modelo en Maxsurf

Capítulo 5: Resultados y discusión

5.1 Maxsurf

5.1.1 Límites para usar el método de Savitsky

Antes de poder usar este método para calcular la resistencia al avance se debe comprobar que la embarcación cumpla con los siguientes criterios.

				Datos del modelo a ensayar	
10 grados	$\leq \beta \leq$	30 grados	28,60 grados		CUMPLE
3 grados	$\leq \tau \leq$	5 grados	3.5 grados		CUMPLE
	$L_k \leq$	$\frac{0.10 \tan \beta}{\pi \tan \tau}$	$2.23 \leq 2,87$		CUMPLE
	$0.017L_k \times \tau^{1.5} \leq$	0.18	0,03		CUMPLE
4.0	$\leq C_v \leq$	8	4,68		CUMPLE

Ilustración 34: Tabla de comprobación de límites físicos para usar el método de Savitsky

5.1.2 Resultados Savitsky

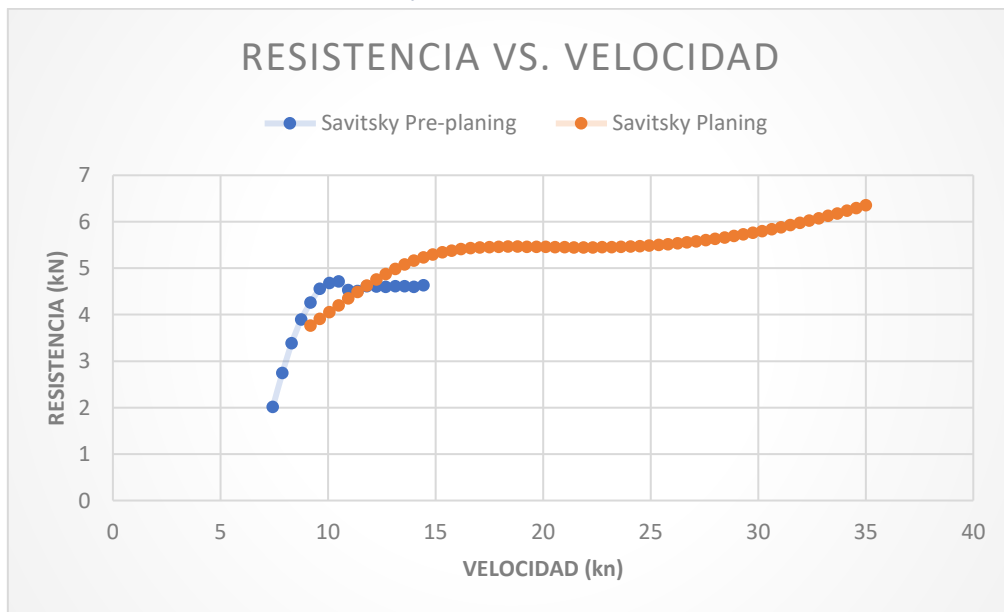


Ilustración 35: Gráfico Resistencia (kN) vs. Velocidad (kn)

Con esta gráfica, Ilustración 35: Gráfico Resistencia (kN) vs. Velocidad (kn), donde se enfrenta la resistencia y la velocidad Ilustración 35: Gráfico Resistencia (kN) vs. Velocidad (kn). Se puede observar como la resistencia aumenta en función de la velocidad, es decir, a medida que la velocidad aumenta la resistencia también lo hace.

Sin embargo, cuando la embarcación se encuentra en situación de planeo entre el rango de velocidades de 15 kn a 25 kn la resistencia se mantiene constante a 5,5 kN. De la misma forma, se debe destacar que a velocidades bajas entre las velocidades de 7,5 kn y 12 kn el aumento de la resistencia que se produce es mucho más rápido, por lo consiguiente, pasa de 2kN a 4.5kN mientras que de los 12kn a los 15 kn solo hay un aumento de 1kN en la resistencia. Lo mismo

ocurre, entre las velocidades de 25 y 35kn, que hay la misma variación de 1kN. En definitiva, pasa de los 5.5kN a la velocidad de 25kn a 6.5kN a 35kn.

Con los resultados obtenidos en esta gráfica se ha calculado el momento en el que la embarcación empieza a planear a partir de las ecuaciones de Savitsky:

Ecuación 36

$$\frac{C_v}{\lambda^{1/2}} = 1$$

A partir de las hidroestaticas de Maxusrf se sabe que λ es igual a:

$$\lambda = 3.581$$

El coeficiente de velocidad C_v es igual a:

Ecuación 37

$$C_v = \frac{V}{(g * \lambda)^{1/2}} = \frac{V}{(9.81 * 3.971)^{1/2}}$$

Si substituímos en la Ecuación 36 encontramos que la velocidad (V) a la que el modelo empieza a planear es:

Ecuación 38

$$\frac{V}{(9.81 * 3.971)^{1/2}} = 1 \quad V = 11.22 \text{ kn}$$

De esta forma, se obtiene que la velocidad a la que la embarcación empieza a planear es igual a 12.44 kn. Por tal motivo, las gráficas de los 2 metodos de Savitsky (Pre-planing y Planing) coinciden, es decir, se cruzan en el punto exacto cuando se alcanza la velocidad de inicio de planeo que se ha calculado.

Como resultado, se han usado como datos validos los recogidos por el metodo de Pre-planing antes de llegar a los 12.44 kn y los recogidos por el metodo Planing para el resto de valores que sobrepasan dicha velocidad.

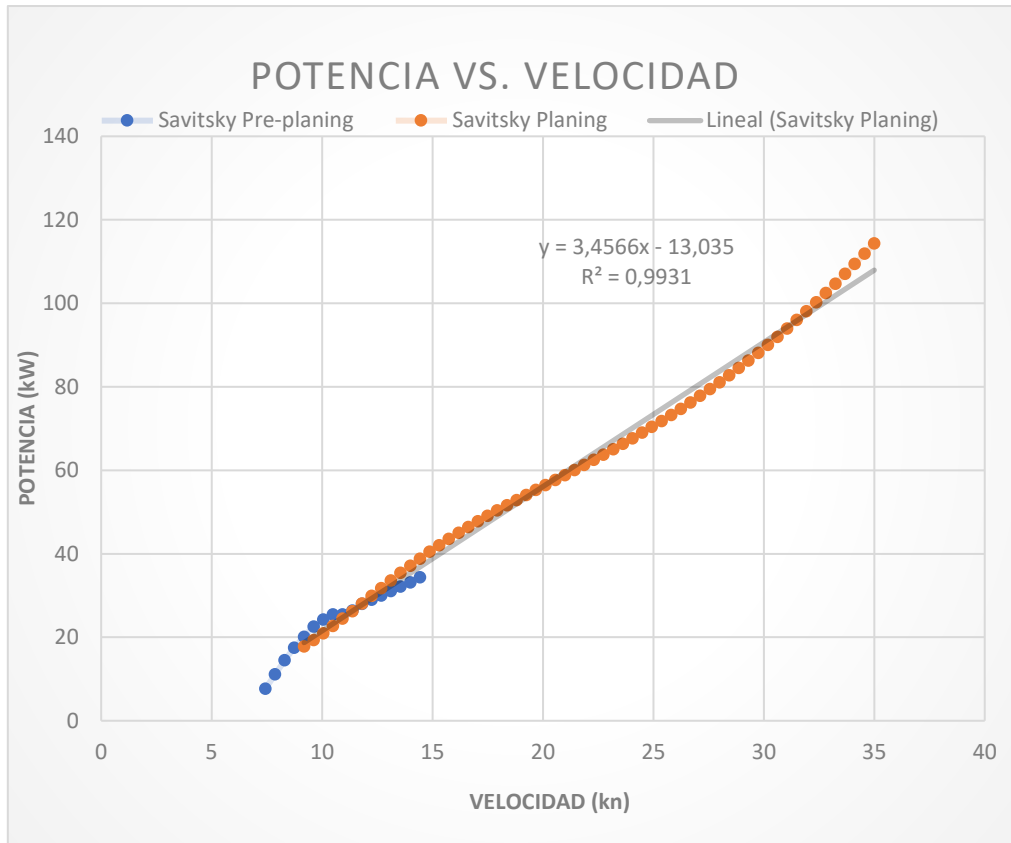


Ilustración 36: Gráfico Potencia (kW) vs. Velocidad (kn)

En esta gráfica, Ilustración 36: Gráfico Potencia (kW) vs. Velocidad (kn), se expone la relación entre la potencia que se debe desarrollar y la velocidad que llega a alcanzar el modelo Ilustración 36: Gráfico Potencia (kW) vs. Velocidad (kn). Se puede observar como aumenta la potencia de forma proporcional a 3.4566 con respecto a la velocidad. Se sabe que la velocidad de diseño del modelo es de 30 kn, con lo cual, a partir del gráfico anterior se deduce que la potencia de propulsión mínima en estas condiciones debe ser igual a:

Ecuación 39

$$3.4566 \times 30 - 13.035 = 90.66 \text{ kW}$$

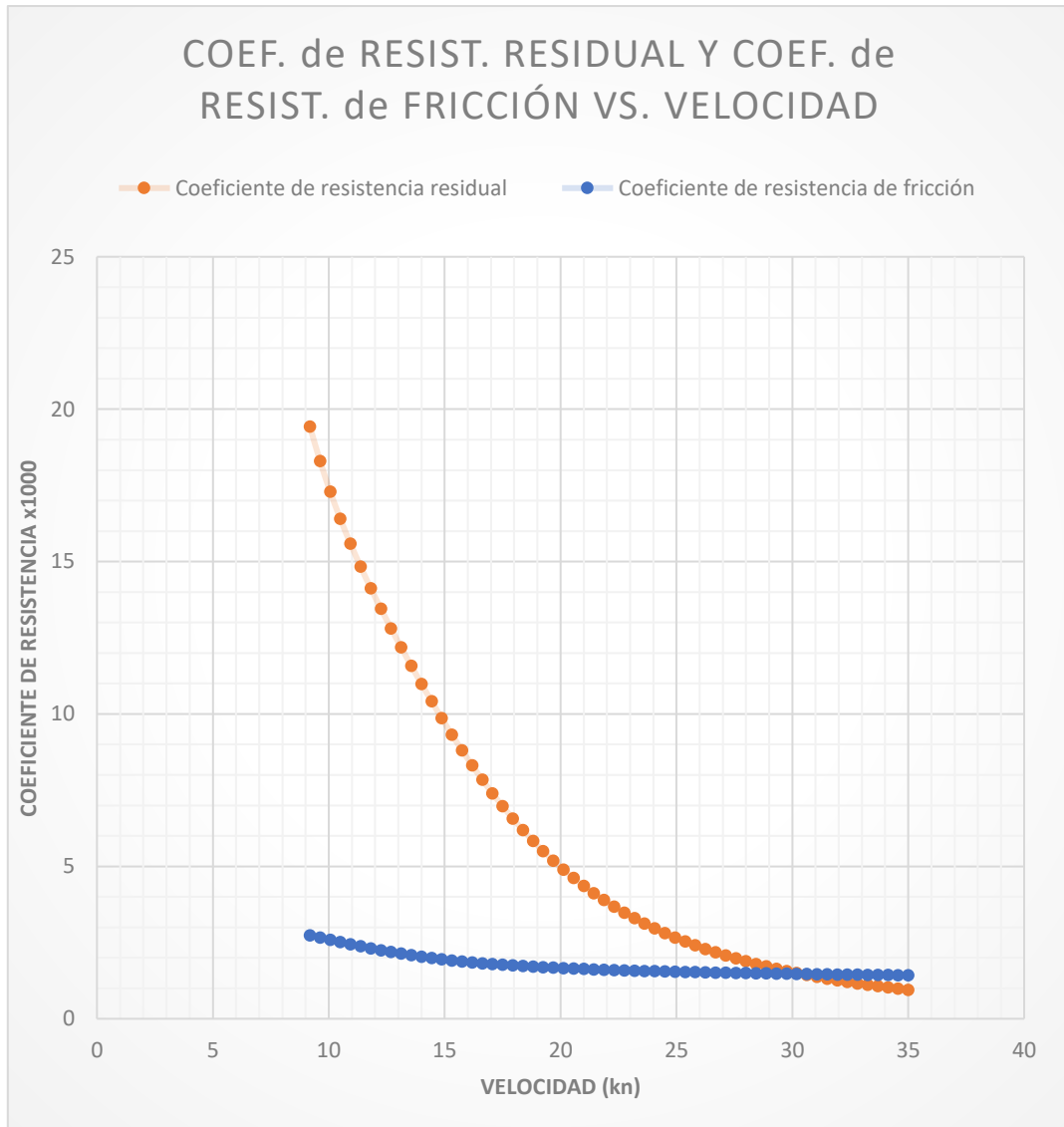


Ilustración 37: Gráfico Coef. de resist. residual y Coef. de resist. de fricción vs. Velocidad (kn)

Se ha generado esta gráfica, Ilustración 37: Gráfico Coef. de resist. residual y Coef. de resist. de fricción vs. Velocidad (kn), relacionando las dos resistencias (fricción y residual) con la velocidad. Claramente, a medida que la velocidad aumenta estos coeficientes disminuyen. No obstante, la resistencia total sigue aumentando, como se ha podido observar en Ilustración 35: Gráfico Resistencia (kN) vs. Velocidad (kn), el razonamiento a este fenómeno se encuentra cuando se analiza la fórmula utilizada para calcular la resistencia total Ecuación 1:

$$R_{total} = R_f + R_r = 0.5 \delta V^2 [(1 + k)(C_f + \Delta C_f)] S m$$

La R_{total} dependen de la R_f y R_r , que a su vez depende de la Velocidad (V), está elevada al cuadrado, es decir, que aunque estos Coeficientes de resistencia aumenten en función de la velocidad esta siempre será mucho mayor, con lo cual, la resistencia total seguirá aumentando.

En el caso del coeficiente de resistencia residual, decrece de una forma exponencial negativa, pasa de 0.02 con una velocidad de 9kn a 0.00095 con una velocidad de 35kn. Sin embargo, en el caso de la resistencia de fricción que también disminuye no lo hace de una forma tan exponencial, pasa de 0.0027 a 9kn 0.0014, se mantiene prácticamente constante cuando se alcanza la velocidad de 20kn.

Destacar que a la velocidad de 30.4kn la resistencia de fricción y la residual tienen el mismo valor. Como consecuencia, a partir de esta velocidad la resistencia residual es mayor a la de fricción.

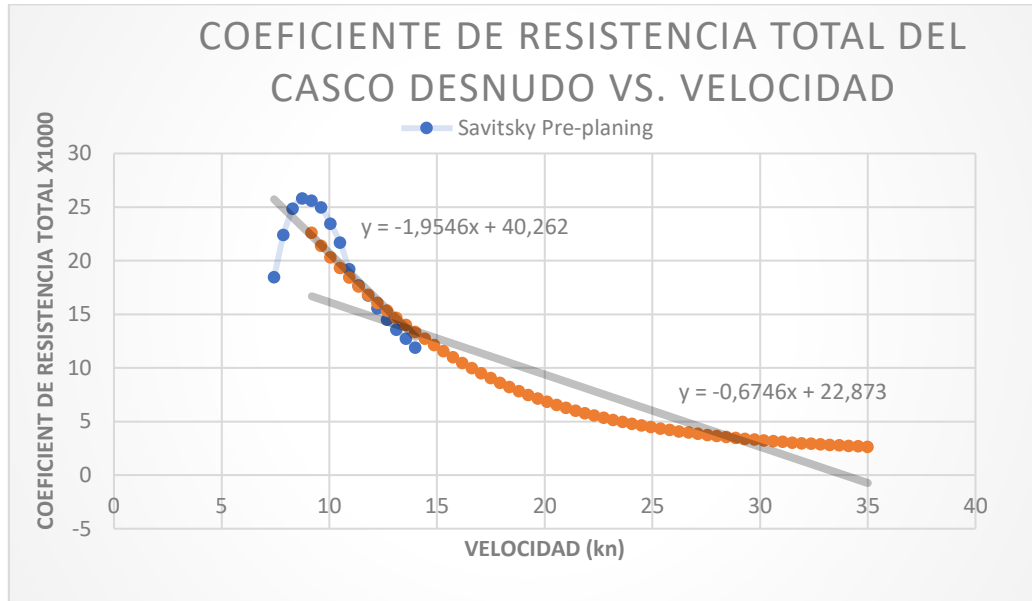


Ilustración 38: Gráfico Coeficiente de Resistencia total del casco desnudo vs. Velocidad (kn)

Con relación a la resistencia total del casco desnudo Ilustración 38: Gráfico Coeficiente de Resistencia total del casco desnudo vs. Velocidad (kn) (se considera casco desnudo, aquel que no lleva nada más que las partes estructurales del casco), en este caso se relaciona la suma de las resistencias (fricción y residual) con la velocidad.

Se considerarán los datos obtenidos con el método de Pre-planing hasta la velocidad de 12.44 kn como se calculado anteriormente y luego los obtenidos con el Planing. Por una parte, se ve como en el inicio el coeficiente de resistencia aumenta rápidamente hasta 0.025 a una velocidad de 8.3kn y a continuación empieza a disminuir de forma exponencial negativa, hasta llegar a 0.0026 a una velocidad de 35kn. Cuando el coeficiente empieza a disminuir, lo hace de forma mucho más rápida al principio (con una pendiente de -1.95) y luego se va estabilizando (con una pendiente de -0.67).

El razonamiento, es el mismo que el del gráfico anterior en relación al aumento de la resistencia total frente a la disminución del coeficiente de resistencia total, ya que, el coeficiente de resistencia total es la suma de los coeficientes de resistencias (Residual y Fricción).

En definitiva, al principio el coeficiente de resistencia total aumenta debido a que el coeficiente de resistencia por fricción a bajas velocidades tiene un gran peso, por lo contrario cuando este alcanza el pico máximo de 0.025 a 8.3kn empieza disminuir drásticamente y luego se estabiliza debido a que a medida que la velocidad aumenta el peso del coeficiente de fricción, va disminuyendo. Si se mira como se calcula el número de Rn , se ve como a medida que la velocidad aumenta, este a su vez aumenta y esta dividido en la fórmula de como se calcula el coeficiente de fricción. Así se explica el comportamiento y el peso que tiene el Rn en el cálculo de la resistencia total.

Ecuación 40

$$Rn = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{y} \quad C_f = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2}$$

D = diametro de la tubería

V = velocidad del fluido

μ = viscosidad dinámica del fluido

ρ = densidad del fluido

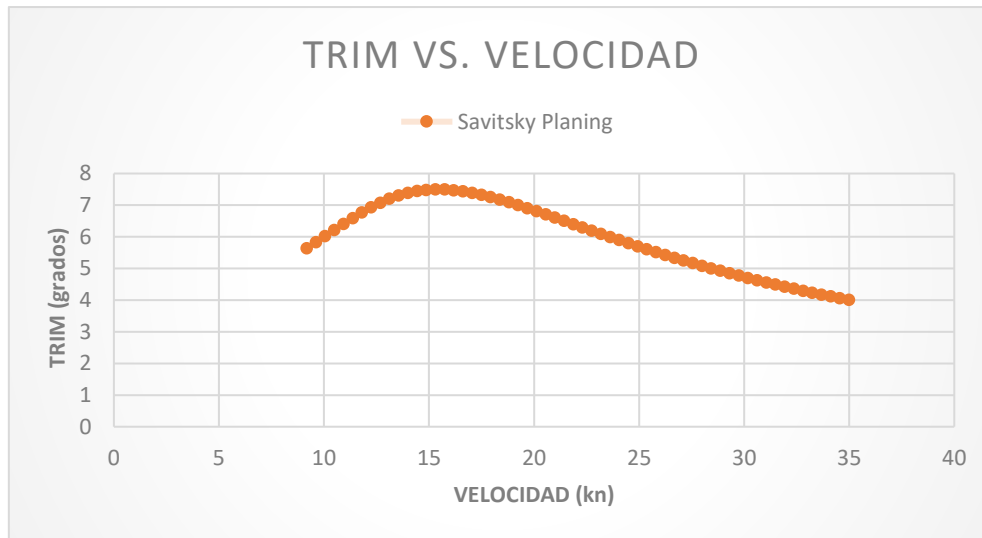


Ilustración 39: Gráfico Trim (grados) vs. Velocidad (kn)

La última gráfica, Ilustración 39: Gráfico Trim (grados) vs. Velocidad (kn) que se ha obtenido con el método de Savitsky es el de la relación entre el ángulo de asiento y la velocidad de la embarcación Ilustración 39: Gráfico Trim (grados) vs. Velocidad (kn)

Se observan dos comportamientos a medida que la velocidad aumenta. El primero, es de crecimiento desde 5.6° hasta 7.5° durante el rango de velocidades comprendido entre 9.19 y 15.31kn. El segundo en cambio es de decrecimiento pasa de 7.5° a 4°, durante el rango de 15.31 a 35 kn

La razón detrás de este comportamiento es fácilmente observable en la realidad cuando una embarcación pasa de 0 a una velocidad alta de planeo la embarcación al inicio la proa se levanta rápidamente y luego, cuando se alcanza un régimen de planeo estable este ángulo va disminuyendo con lo cual, la proa desciende.

5.2 TDYN

5.2.1 Creación del caso

El primer paso a realizar, consiste en exportar el casco modelado en Rhinoceros a un formato donde el modelo queda definido por una serie de elementos finitos, en este caso se ha exportado en formato IGES o Initial Graphics Exchange Specification, Ilustración 40: Modelo del casco en formato IGES e Ilustración 41: Vista en detalle de los elementos de la Ilustración 40.

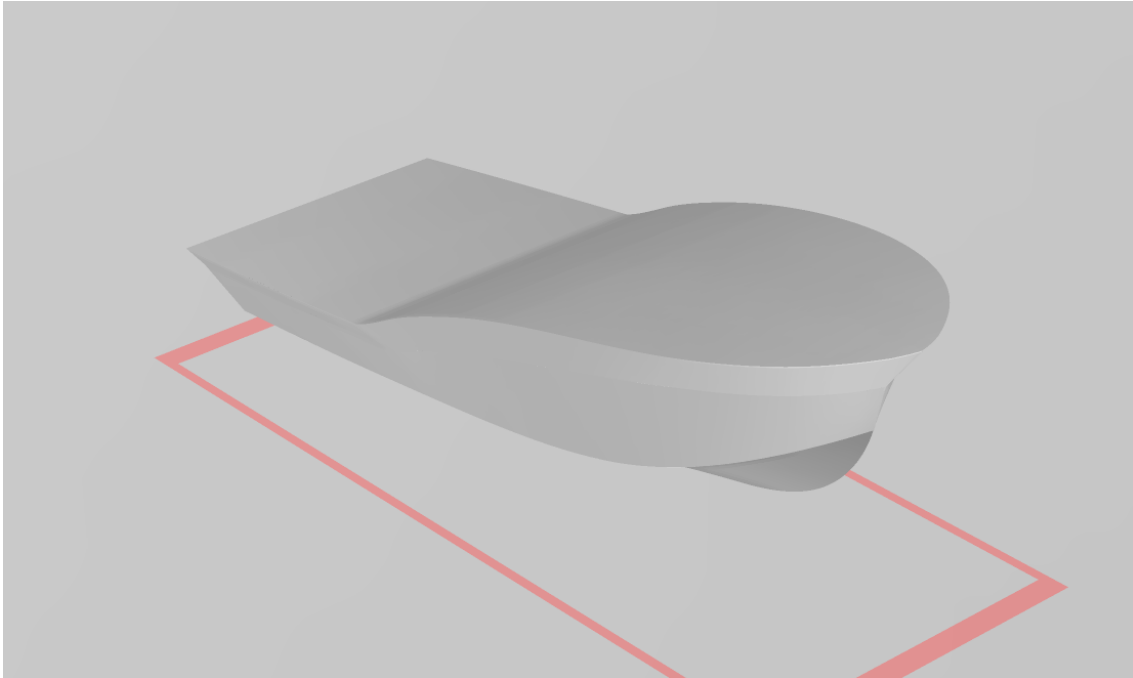


Ilustración 40: Modelo del casco en formato IGES

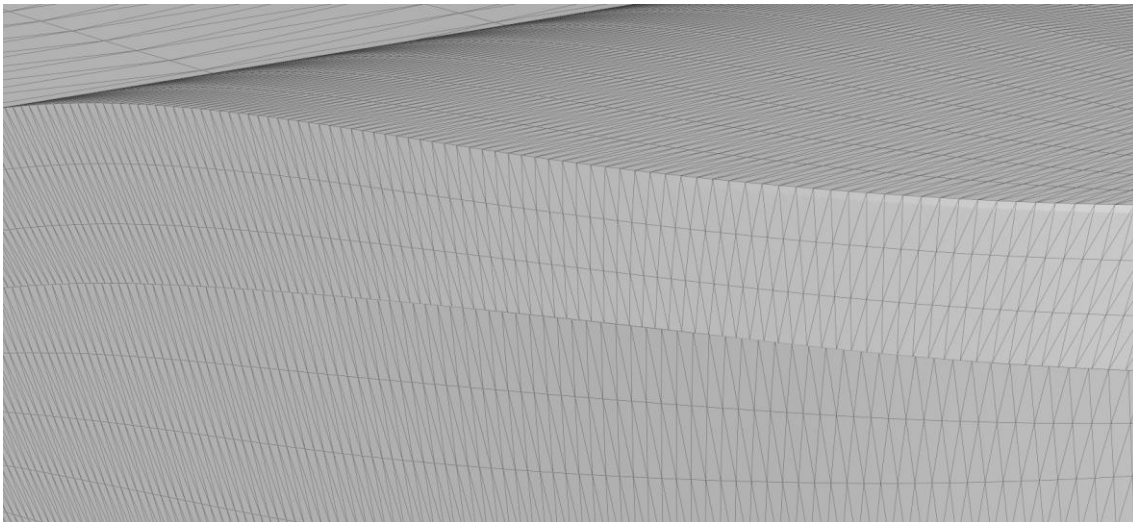


Ilustración 41: Vista en detalle de los elementos de la Ilustración 40

En el siguiente paso se deben crear y definir las condiciones de contorno, la superficie libre “*free Surface*”, la entrada y la salida de la corriente “*Outlet*” y lo más importante el casco o “*Body*”.

Para crear la “*free Surface*” y el “*Outlet*”, dentro del programa Tdyn, se ha generado un cilindro con el modelo del casco en el centro y se ha partido el mismo por la línea de flotación como se

observa en la Ilustración 42: Vista del caso con el tanque numérico, este cilindro servirá como tanque numérico para realizar el ensayo con el programa.



Ilustración 42: Vista del caso con el tanque numérico

A continuación, se definen las condiciones de contorno des del panel de control como se muestra en la Ilustración 43: Panel de control de programa Tdyn (definición de condiciones de contorno)

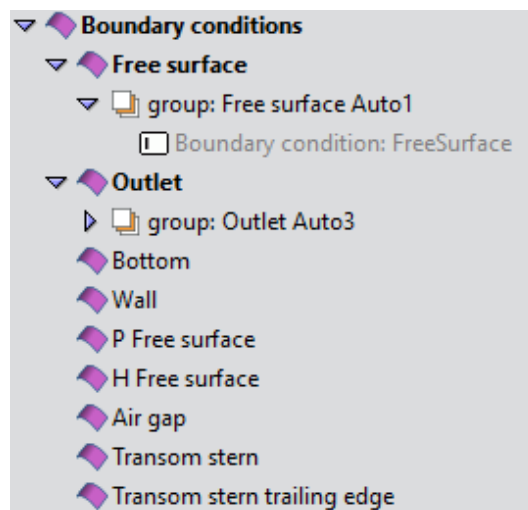


Ilustración 43: Panel de control de programa Tdyn (definición de condiciones de contorno)

Si observamos la "free Surface" mediante el comando "draw all groups" queda definida de la siguiente forma Ilustración 44: "free Surface" del caso a ensayar.

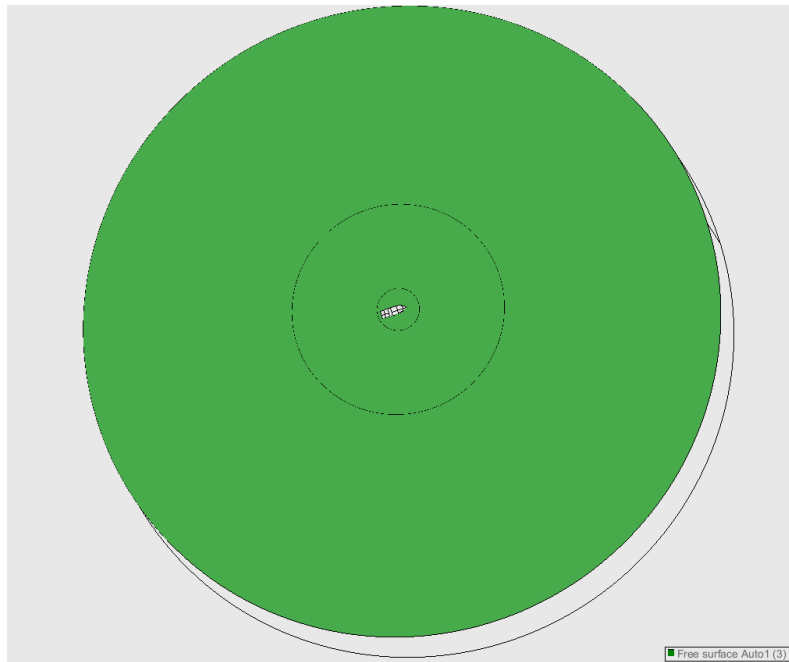


Ilustración 44: "free Surface" del caso a ensayar

De la misma forma, se define el "Outlet" del caso para poder definir un punto de entrada y de fuga para la corriente Ilustración 45: "Outlet" del caso a ensayar que posteriormente se le aplicará.

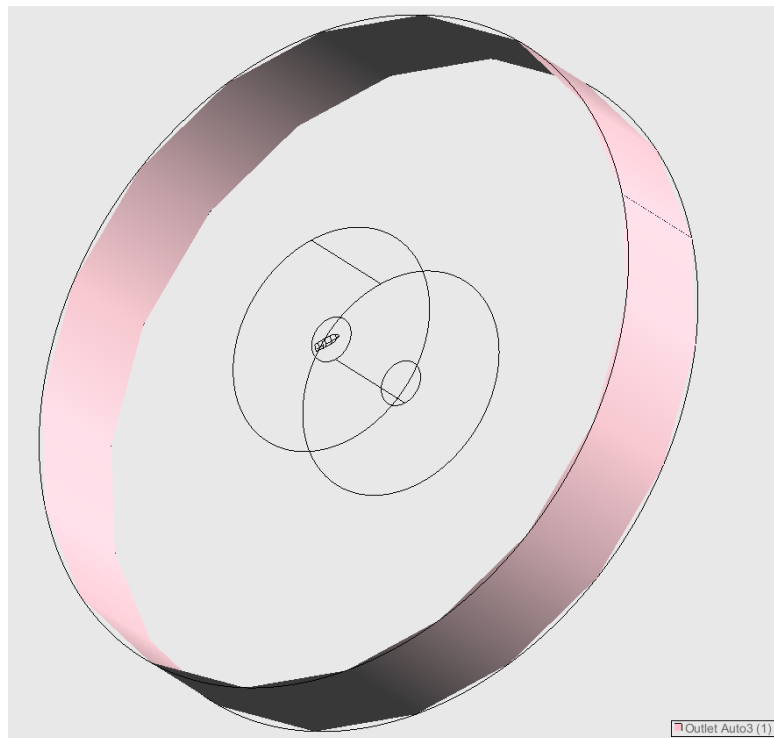


Ilustración 45: "Outlet" del caso a ensayar

Luego se debe definir el "Body", en este caso se refiere al modelo que se ha importado al principio desde Rhinoceros, se debe tener en cuenta que solo se necesita la parte de la carena que queda sumergida, es decir, por debajo de la línea de flotación (0,5 m según las especificaciones dadas por el Astillero). Por esta razón se debe cortar la carena a nivel de la "free Surface" con la herramienta de corte para que queda como se muestra en Ilustración 46: Vista isométrica del "Body".

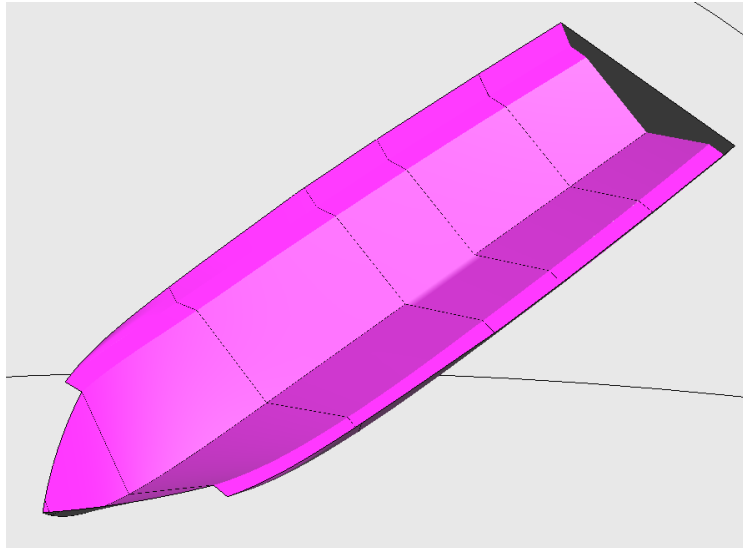


Ilustración 46: Vista isométrica del "Body"

En este punto también se deben definir varias propiedades del cuerpo "Body", como son su masa y sus grados de libertad para realizar un ensayo lo más real posible se deben liberar al menos 2 grados en "Heave" rotación en el eje z o guiñada y en "Pitch" rotación en el eje y o como se llama de forma común cabeceo.

Por último, en lo que las condiciones de contorno se refieren, se debe especificar cuál es la velocidad de la embarcación y la dirección para el ensayo se ha podido correr el caso para 2 velocidades para una velocidad de 9.72 kn y otra a 19.43 kn.

El próximo paso consiste en mallar correctamente el caso Ilustración 47: Malla del caso a ensayar, para ello se debe realizar una malla lo más fina posible alrededor del cuerpo y a medida que nos vamos separando ir agrandando los elementos que constituyen la malla

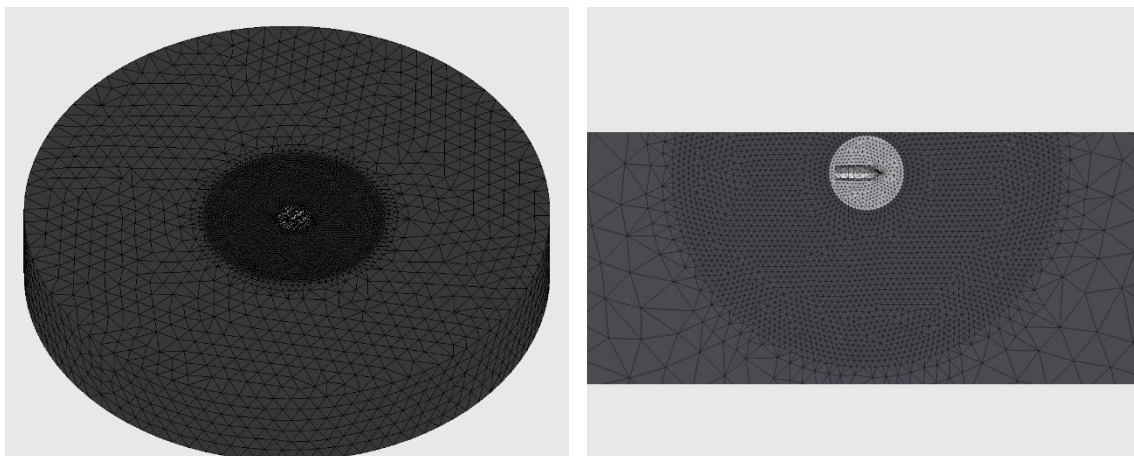


Ilustración 47: Malla del caso a ensayar

5.2.2 Resultados obtenidos

Este programa tiene un complemento de Postproceso que permite visualizar los resultados después de terminar el proceso de cálculo de forma correcta.

Elevación total

El primer parámetro que podemos observar tras los dos ensayos realizados es la elevación de la superficie libre, es decir, el patrón de olas que se genera al pasar un fluido en este caso el agua alrededor de las formas de la carena Ilustración 48: Diagrama de elevación de la ola .

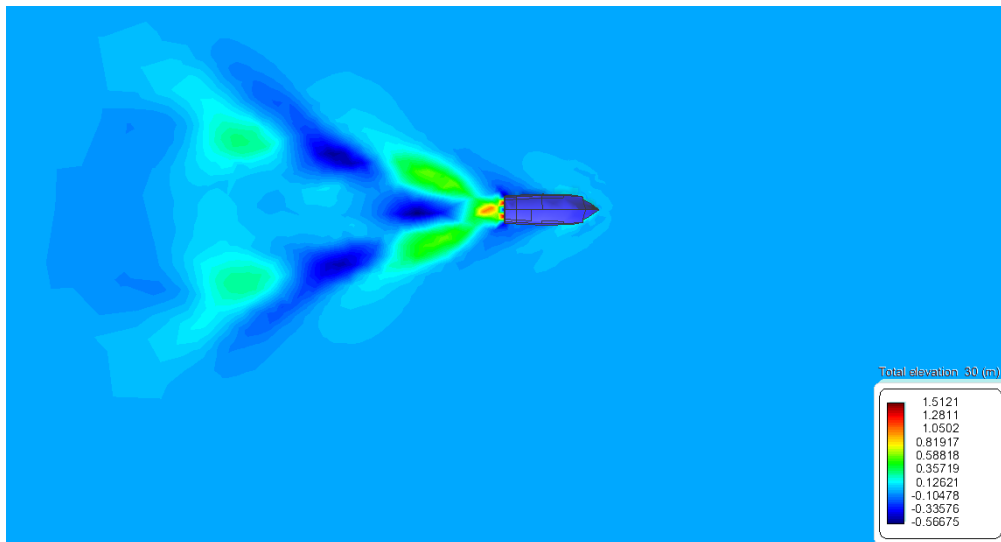


Ilustración 48: Diagrama de elevación de la ola

Según se observa en a imagen se genera picos de elevación en la ola en el espejo de popa muy cerca de los radanes y justamente en el centro Ilustración 49: Diagrama en detalle del diagrama de elevación de la ola9.

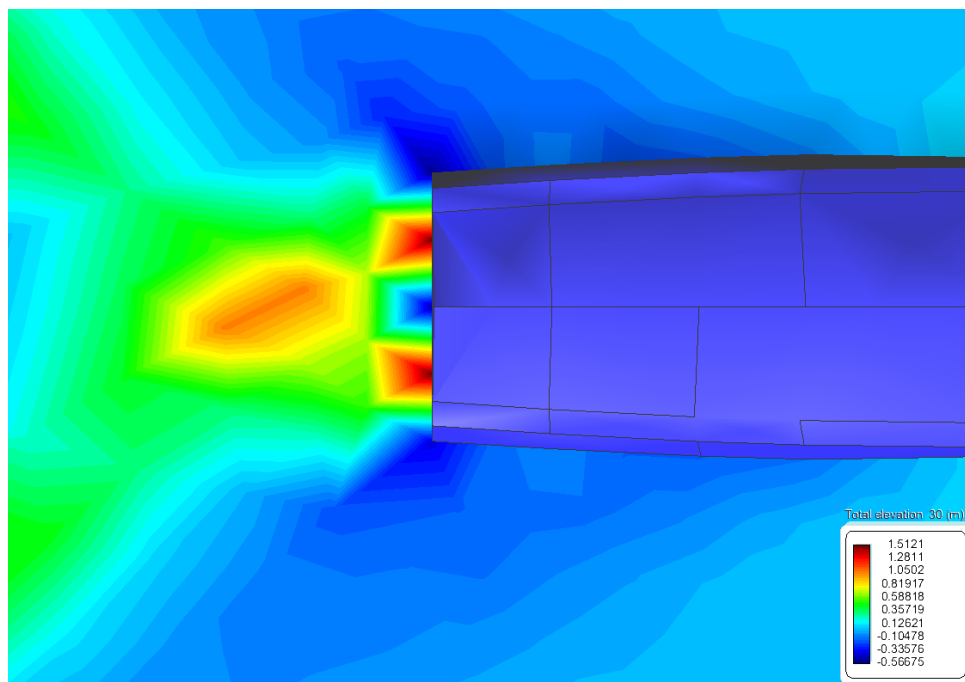


Ilustración 49: Diagrama en detalle del diagrama de elevación de la ola

Si nos fijamos con mucha atención en los picos máximos, estos llegan a una elevación de la ola de 1.5 m, y unos valles de -0.567 m unos números muy elevados para el tipo de embarcación que estamos ensayando.

Este fenómeno solo se explica si las formas del casco son demasiado exageradas en este punto y por ende se crean unas olas con un pico muy elevado, que a su vez son muy difíciles de dispersar.

Velocidad del fluido

El siguiente parámetro que observamos es la velocidad del fluido Ilustración 50: Diagrama de velocidades del fluido, como se ha visto anteriormente existe un problema de hidrodinámica en el espejo de popa del modelo, ya que es donde se concentran las máximas y las mínimas velocidades. Más detalladamente, llegan a alcanzar unos valores de velocidad de hasta 14.63 m/s y justo después unas mínimas de 2.9 m/s.

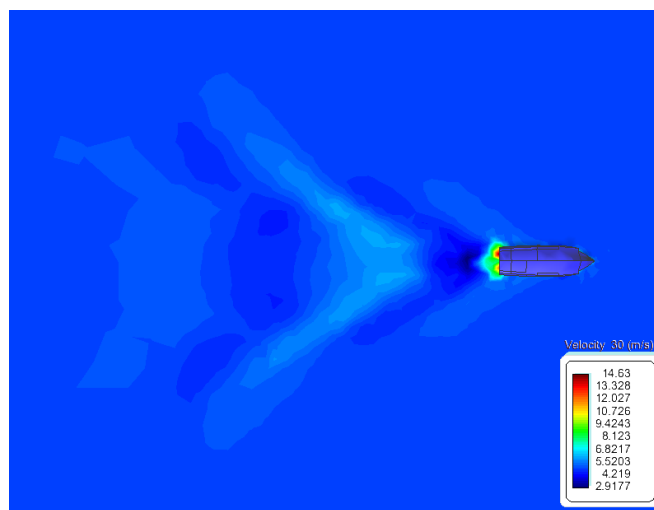


Ilustración 50: Diagrama de velocidades del fluido

Velocidad Vx

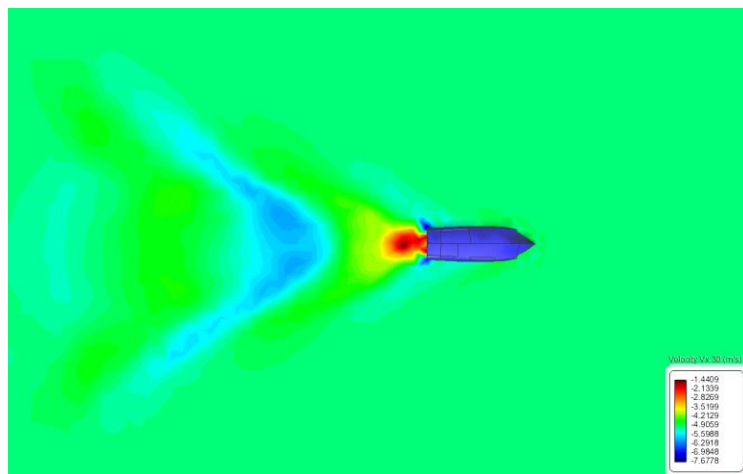


Ilustración 51: Diagrama de velocidad Vx del fluido

Si se separa la velocidad Vx. Ilustración 51: Diagrama de velocidad Vx del fluido, la que se mueve en el sentido del eje x aún se ve más claro que se concentran todas las velocidades en la arista de popa que conecta con el costado y el espejo de popa. La deducción que obtenemos tras

observar que las máximas velocidades convergen todas en este punto es que en esa zona se está generando unos remolinos.

Velocidad Vy

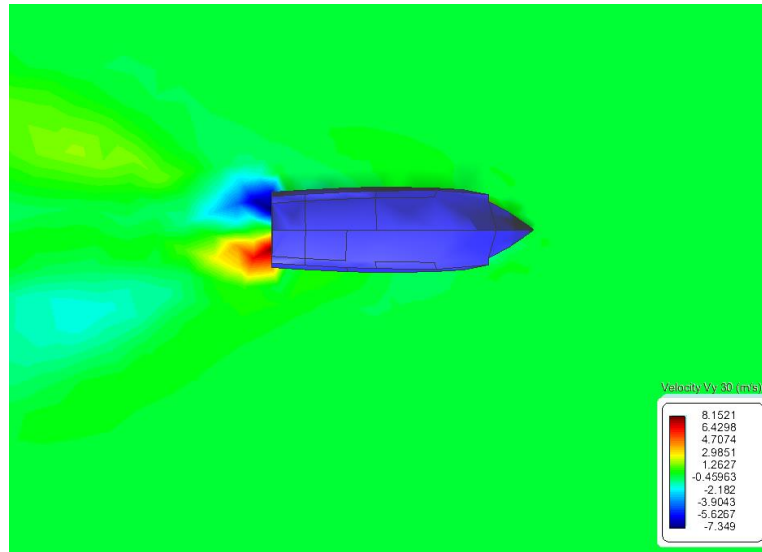


Ilustración 52: Diagrama de velocidad Vy

De la misma forma aún se ves más claro si observamos el interior diagrama: Ilustración 52: Diagrama de velocidad Vy la velocidad que obtenemos en el eje y, para cada costado del modelo tenemos una velocidad de entre 7 y 8 m/s en direcciones opuestas con lo cual ya queda más que claro que en esa zona se producen grandes remolinos que no favorecen en ningún caso a la hidrodinámica de la embarcación.

Velocidad Vz

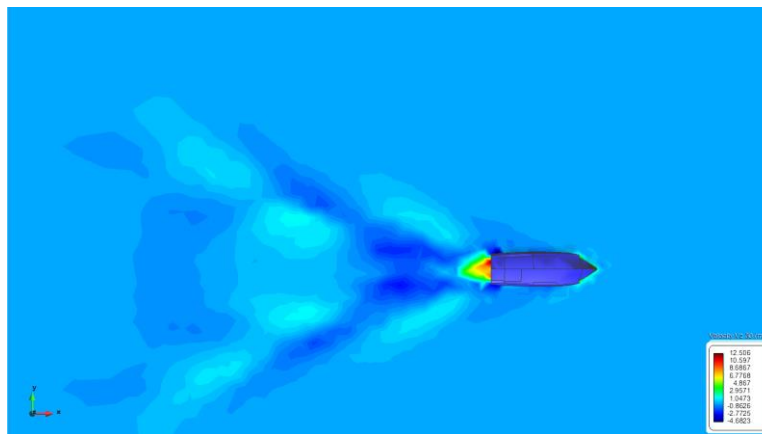


Ilustración 53: Diagrama de velocidad Vz

Por último, se observa la velocidad en el eje z, Ilustración 53: Diagrama de velocidad Vz, y se ve de donde proviene el otro punto de picos de velocidad en el centro del espejo de popa. Llegando a alcanzar una velocidad de 12.51 m/s.

Por fin, se entiende entonces que se está generando una gran ola y por eso la velocidad en este punto es tan elevada, añadir que coincide en el punto donde la elevación de la ola sobre la superficie libre es la mayor.

5.3 Resultados de la prueba empírica de la embarcación

Por último, se probó la velocidad máxima a la que llegaba la embarcación y a qué velocidad empezaba a planear.

Se ha realizado un [vídeo](#) del ensayo se puede observar un fotograma del ensayo en la siguiente **Ilustración 54**: Fotograma del video donde se veo como se ensaya el modelo:



Ilustración 54: Fotograma del video donde se veo como se ensaya el modelo

De acuerdo con los datos recogidos, la velocidad máxima que ha alcanzado la embarcación han sido 34 kn y la velocidad donde la embarcación ha empezado a planear (con la mar plana) han sido 10.5kn. Como información adicional, añadir que el tiempo que ha tardado a alcanzar ese régimen han sido 6 segundos.

Capítulo 6: Propuestas de mejora

Una vez detectados los puntos donde el rendimiento hidrodinámico es más problemático, se han realizado unos cambios sobre todo enfocados en mejorar las formas del espejo de popa.

Como resultado, se han propuesto unas líneas mucho más esveltas de modo que se han evitado las líneas tan agresivas que predominan en el modelo original. Si bien es cierto, con la ayuda del programa Rhinoceros se han podido comparar las carenas sobre poniendo la del modelo propuesto y la del modelo original, Ilustración 55: Comparación de carenas Original vs. Propuesta.

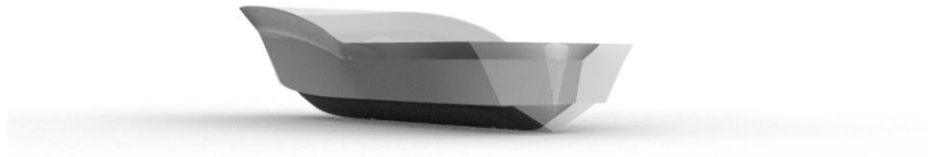


Ilustración 55: Comparación de carenas Original vs. Propuesta

Si se observa con detalle la zona de la popa, Ilustración 56: Vista de Perfil del modelo Propuesto, se puede ver la reconstrucción de esta zona tiene como objetivo disminuir la formación de remolinos, sin olvidar la intención de conseguir un flujo del agua lo más laminar posible alrededor de la carena.

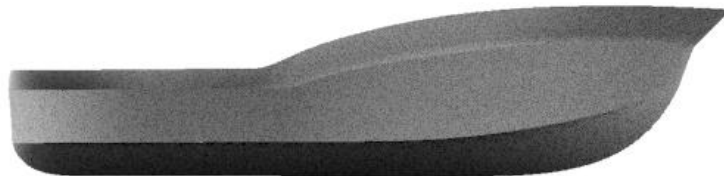


Ilustración 56: Vista de Perfil del modelo Propuesto

6.1 Hidrostáticas de Maxsurf modelo nuevo

A continuación, se ha exportado el modelo propuesto a Maxsurf y se han obtenido las siguientes hidrostáticas:

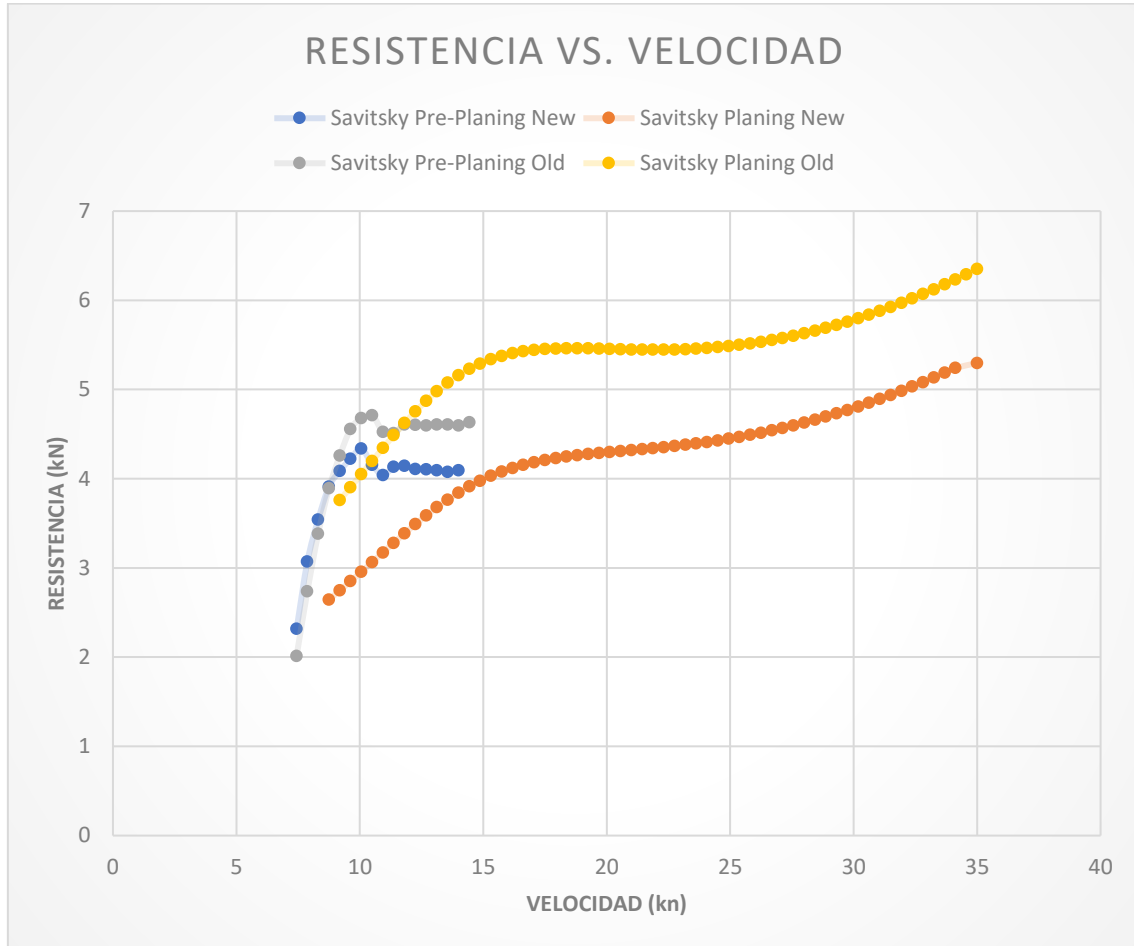
	MODELO PRPUESTO	MODELO ORIGINAL	
Displacement	2820	3,252	Kg
Volume (displaced)	2,751	2,564	m ³
Draft Amidships	0,5	0,5	m
Immersed depth	0,5	0,5	m
WL Length	6,208	6,674	m
Beam max extents on WL	1,960	1,864	m
Beam extents on WL of station with max area	1,932	1,859	m
Wetted Area	12,234	13,248	m ²
Max sect. area	0,569	0,480	m ²
Sect. area amidships	0,568	0,471	m ²
Waterpl. Area	9,983	10,863	m ²
Prismatic coeff. (Cp)	0,779	0,801	
Block coeff. (Cb)	0,454	0,412	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,595	0,533	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,820	0,873	
KB	0,332	0,346	m
KG fluid	0,000	0,500	m
BMt	0,967	1,118	m
BML	8,722	12,656	m
GMt corrected	1,299	0,963	m
GML	9,053	12,501	m
KMt	1,299	1,463	m
KML	9,053	13,001	m
Immersion (TPc)	0,102	0,111	tonne/cm
MTc	0,041	0,049	Tonne*m
RM at 1deg = GMt. Disp. sin (1)	63,917	44,180	Kg*m
Length-Beam ratio	3,167	3,581	
Beam-Draft ratio	3,938	3,730	
Length: Vol ^{0.333} ratio	4,430	4,877	

Ilustración 57: Tabla comparativa de las hidrostáticas modelo Propuesto vs. Original

Observando esta tabla, se puede determinar que se ha reducido el peso y la superficie mojada levemente, parámetros muy relevantes en el cálculo de la resistencia al avance.

6.2 Comparativa de gráficos del Maxsurf Resistance

Por último, se han generado unas gráficas comparado el modelo propuesto (New) con el modelo original (Old) y determinar si el cambio en las formas del espejo de popa ha sido una modificación beneficiosa para el casco.



Il·lustració 58: Gráfico (modelo propuesto vs original) Resistencia vs. Velocidad

La primera gráfica que se observa, Ilustración 63: Predicción de la estela generada por la embarcación, es la que enfrenta la resistencia con la velocidad, la diferencia es clara, tanto por el método de Savitsky Pre-planing como el de Savitsky la resistencia está por encima de la del modelo propuesto. Concretamente, la diferencia es mucho mayor en el caso del método de Savitsky exactamente 1,15 kN menos, este valor se considera prácticamente constante a lo largo de la variación de la velocidad.

Esta es una mejora sustancial respecto al modelo original, por lo que nos ofrece una mejora que puede servir para mejorar el rendimiento hidrodinámico.

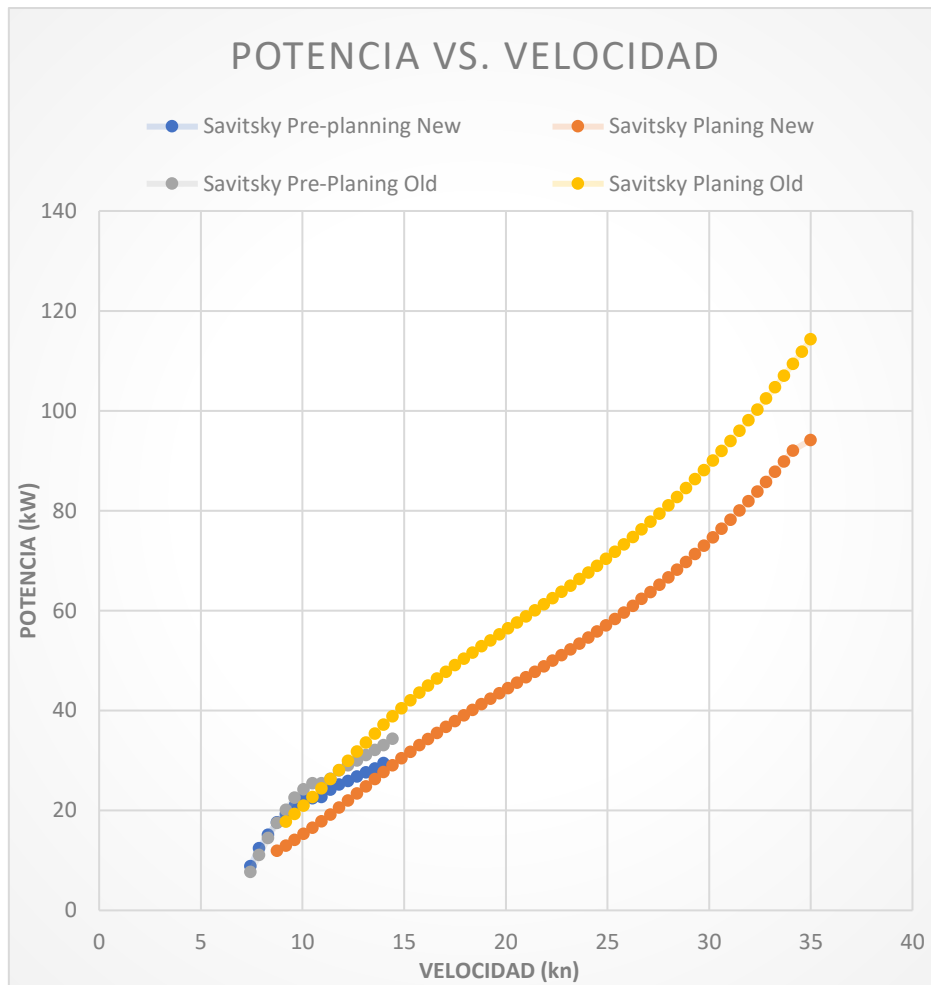


Ilustración 59: Gráfico (modelo propuesto vs original) Potencia Vs. Velocidad

En segundo lugar, se ha calculado la potencia necesaria para obtener una velocidad determinada. Ilustración 59: Gráfico (modelo propuesto vs original) Potencia Vs. Velocidad, que a su vez se han comparado con los resultados obtenidos anteriormente.

Se ha determinada que para ambos métodos la resistencia del modelo propuesto es menor. Sin embargo, cuando se trata del Savitsky Pre-planing la diferencia a bajas velocidades es prácticamente nula y a partir de los 10kn la del modelo original se que se desmarca y aumenta un poco más estableciendo una diferencia máxima de 3.71 kW.

Aunque si observamos los valores ofrecidos por el método de Savitsky, la diferencia que se encuentra ya es mucho mayor llegando a un máximo de 20,18 kW cuando la embarcación alcanza una velocidad de 35kN

Ahora bien, esta mejora permitirá ahorrar hasta 20,18 kW pudiendo disminuir 25 en la potencia del motor a instalar, o en su defecto, ahorrar en términos de combustible.

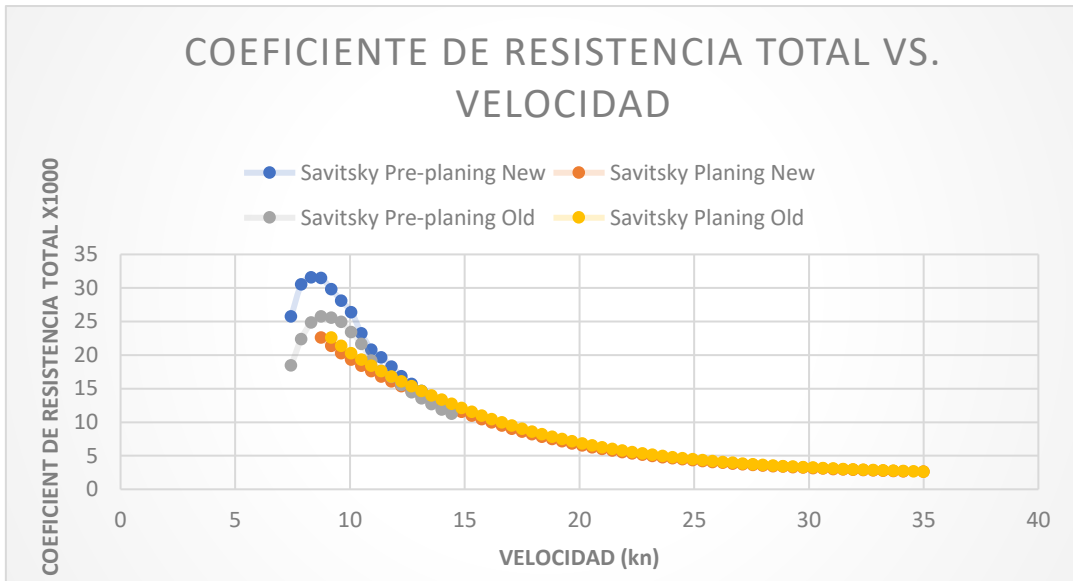


Ilustración 60: Gráfico (modelo propuesto vs original) Coeficiente de Resistencia Total vs. Velocidad

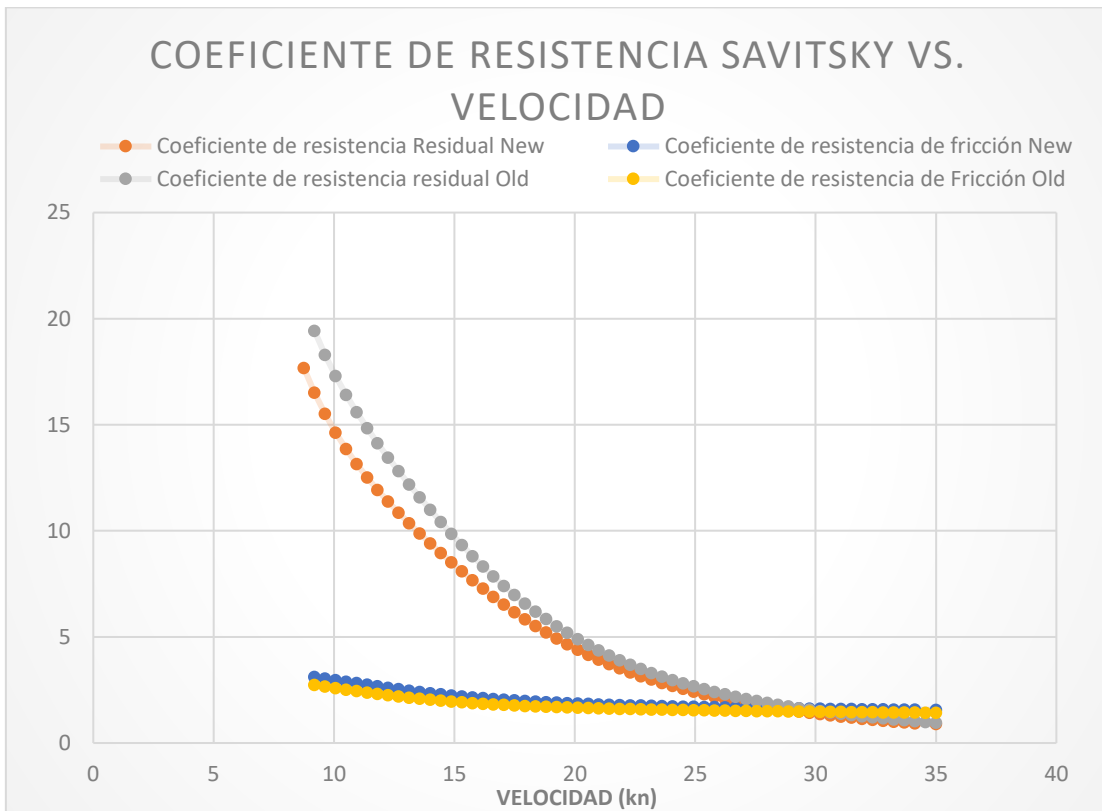


Ilustración 61: Gráfico (modelo propuesto vs original) Coeficiente de resistencia Savitsky vs. Velocidad

A continuación, tenemos la comparación de los coeficientes de resistencia, Ilustración 61: Gráfico (modelo propuesto vs original) Coeficiente de resistencia Savitsky vs. Velocidad. Los datos obtenidos con el modelo propuesto siguen de forma bastante fiel a los obtenidos con el casco original. Aunque, cabe destacar que, en este campo, los coeficientes nuevos están un poco por encima en el caso nuevo, pero se insiste que la tendencia es prácticamente la misma para ambos casos.

Solo señalar que en el coeficiente de resistencia total, en el caso del casco propuesto, con el método de Savitsky Pre-planing, al inicio la diferencia llega a ser de 4,87.

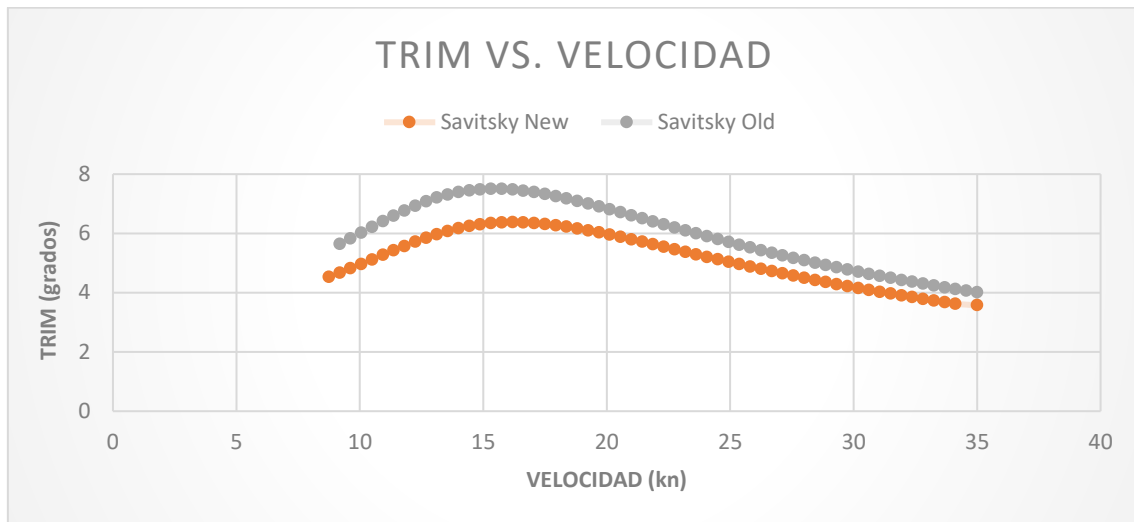


Ilustración 62:Gráfico comparativo (modelo propuesto vs original) trim vs. Velocidad

Por último, tal y como se ha visto en los gráficos anteriores la tendencia del modelo nuevo suele estar por debajo de los valores del modelo original. Con lo que efectivamente, en la [Ilustración 62:Gráfico comparativo \(modelo propuesto vs original\) trim vs. Velocidad](#), el gráfico del trim, vemos que esta tendencia sigue y se encuentra como se ha comentado anteriormente por debajo del rango de ángulos. Si se entra en detalle, el ángulo máximo nuevo alcanza los 6,37 grados frente los 7,5 así disminuyendo el trim en 1,13 grados.

Recapitulando, tras realizar una comparación exhaustiva entre los dos modelos, se puede decir con total seguridad que la hidrodinámica del casco propuesto ofrece un rendimiento mayor.

Capítulo 7: Conclusiones

En definitiva, para diseñar una embarcación de planeo, uno de los pasos más importantes consiste en realizar un buen análisis de las formas hidrodinámicas del casco. Como se ha enunciado durante el trabajo estos procesos de preproducción juegan un papel fundamental para alcanzar el mejor rendimiento posible del modelo y evitar sobrecostos en postproducción que podrían llegar a encarecer abundantemente el precio o el desempeño de la embarcación.

Se ha demostrado que existen varios métodos que con ciertas restricciones pueden llegar a conseguir aproximaciones del comportamiento de la embarcación muy parecidos al de la realidad. Sin embargo, la mejor forma de conseguir los valores más reales consiste en realizar pruebas a escala del mismo modelo o sus prototipos. No obstante, hay que asumir que estas prácticas necesitan de un coste económico mucho mayor, que los programas de cálculo usados en este trabajo (Maxsurf y Tdyn).

Aun así, los resultados obtenidos en las pruebas con la embarcación se acercan bastante a los que se han obtenido a partir de los programas. Por ejemplo, se puede observar en el [vídeo](#) justamente en la zona de la arista entre el espejo de popa y el costado se genera un carril de agua, Ilustración 63: Predicción de la estela generada por la embarcación, tal y como se había predicho en el Tdyn.



Ilustración 63: Predicción de la estela generada por la embarcación

Sin duda alguna, los programas de cálculo pueden llegar a ofrecer resultados muy buenos, pero hay que ir con cuidado, es decir, hay que modelar lo mejor posible con los programas de diseño (Rhinoceros) y hay que saber tratar/interpretar los datos que estos ofrecen.

En relación a que programa es mejor, concluyo que para determinados cálculos hay uno mejor que el otro. Maxsurf resulta suficiente para realizar análisis hidrodinámicos más superficiales y para casos los cuales se quiera calcular una embarcación a grandes velocidades. Ahora bien, para realizar casos más detallados a velocidades pequeñas el de Tdyn ofrece un mejor rendimiento, ya que ofrece unos resultados mucho más exactos y permite interpretar mucho mejor el comportamiento del casco delante de un fluido, con herramientas tan útiles como la animación de los resultados en función del tiempo.

Bibliografia

- Alexandersson, Martin. 2009. "A Study of Methods to Predict Added Resistance in Waves." Royal Institute of Technology, no. January.
http://www.kth.se/polopoly_fs/1.151543!/Menu/general/column-content/attachment/Alexandersson.pdf.
- Clement, E. P., & Blount, D. L. (1963). "Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull" Forms. *SNAME Transaction*, 71(December), 491–579.
- Conform, I., & Fatu, I. (1873). "Hydrodynamics Of Planing Hull by CFD". *Enciclopedia Da Consciencologia*, 6–10.
- Donald L. Blount & David L. Fox. "Small-Craft Power Prediction". *Marine Technol.* Vol 13, No. 1 Jan 1976, pp. 14-45
- FUNG, S. C. (1987). "RESISTANCE PREDICTIONS AND PARAMETRIC STUDIES FOR HIGH-SPEED DISPLACEMENT HULLS". *Naval Engineers Journal*, 99(2), 64–80. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1987.tb02100.x>
- Gong, J., Yan, S., Ma, Q., & Li, Y. (2020). "Added resistance and seakeeping performance of trimarans in oblique waves". *Ocean Engineering*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107721>
- Holtrop, J., & Mennen, G. G. J. (1982). "APPROXIMATE POWER PREDICTION METHOD". In *International Shipbuilding Progress* (Vol. 29, pp. 166–170). <https://doi.org/10.3233/isp-1982-2933501>
- ITTC. (2017). "ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines". ITTC–Recommended Procedures and Guidelines, 1–14. Retrieved from <https://www.ittc.info/media/8001/75-02-02-01.pdf>
- Journée, J. M. J., & Pinkster, J. (2002). "Introduction in Ship Hydromechanics". *TU Delft*, 1(April), 120. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24960424>
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J. C., Valencia, V., ... Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348(6231), 226–229. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2815>
- Newman, J. N. (1970). "Applications of Slender-Body Theory in Ship Hydrodynamics". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2(1), 67–94. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.02.010170.000435>
- Radojčić, D. (2019). Correction to: Reflections on Power Prediction Modeling of Conventional High-Speed Craft (pp. C1–C1). https://doi.org/10.1007/978-3-319-94899-7_8
- Savitsky, Daniel. "Hydrodynamic Design of Planing Hulls." *Mar Technol SNAME N 1* (1964): 71–95. doi: <https://doi.org/10.5957/mt1.1964.1.4.71>
- "SERIES 60 - METHODICAL EXPERIMENTS WITH MODELS OF SINGLE-SCREW MERCHANT SHIPS." (1964). *Naval Engineers Journal*, 76(3), 492–492. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1964.tb04766.x>
- VAN OORTMERSSEN G. (1971). "Power prediction method and its application to small ships". *International Shipbuilding Progress*, 18(207), 397–415. <https://doi.org/10.3233/isp-1971-1820701>