

DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES RESISTIVOS PARA BUQUES DE LA “SERIE 60” UTILIZANDO FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL

DETERMINING RESISTANCE COEFFICIENT FOR SERIES 60 VESSELS USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Nicolás A. Antonelli^{a,b,c}, Hernán G. Kunert^a, Alejandro Vaccari^a, Santiago A. Urquiza^{a,c},
Nicolás Biocca^{b,c}, Juan M. Gimenez^{b,c} y Gustavo E. Carr^{b,c}

^aGrupo HidroSim, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mar del Plata, Buque
Pesquero Dorrego N° 281, Mar del Plata, Argentina, [email:hidrodinamica@mdp.utn.edu.ar](mailto:hidrodinamica@mdp.utn.edu.ar)

^bCONICET - Mar del Plata, Argentina, <http://mardelplata-conicet.gov.ar/>

^cGrupo de Ingeniería Asistida por Computadora (GIAC), Universidad Nacional de Mar del Plata,
Facultad de Ingeniería, Juan B. Justo N° 4302, Mar del Plata, Argentina, [email:ingenier@fi.mdp.edu.ar](mailto:ingenier@fi.mdp.edu.ar)

Palabras clave: Buque, Flujos a superficie libre, Fluidodinámica Computacional, Resistencia al avance, Hidrodinámica naval.

Resumen. El modelado computacional del comportamiento de un buque en el mar requiere capturar con precisión complejos fenómenos como los de superficie libre, formación de capa límite, predicción del flujo viscoso turbulento, formación de vórtices, interacción fluido-estructura, cavitación, entre otros. El objetivo del presente trabajo es validar una técnica para el modelado de la superficie libre para casos tridimensionales y estimación de efectos de arrastre, aplicable a posteriores trabajos de optimización de formas de cascos. En este trabajo se toma el casco W4210, perteneciente a la "Serie 60" y se calculan los coeficientes de arrastre utilizando las formulaciones de volúmenes finitos, mediante el software ANSYS Fluent, para resolver las ecuaciones de gobierno (Navier-Stokes) y de transporte de superficie libre. Para la generación geométrica se utiliza modelado paramétrico con scripts de Python mediante la plataforma GNU Salome. Los resultados obtenidos son consistentes con los resultados experimentales.

Keywords: Ship, Free surface flow, CFD, Ship resistance, Marine hydrodynamics.

Abstract. The computational modeling of the behavior of a ship in the sea requires to accurately capture complex phenomena such as those of free surface, formation of boundary layer, prediction of viscous turbulent flow, formation of vortices, fluid-structure interaction, cavitation, among others. The objective of the present work is to validate a technique for the modeling of the free surface for three-dimensional cases and estimation of drag effects, applicable to subsequent optimization of hull shapes. In this work the hull W4210 is taken, belonging to the "Series 60" and the drag coefficients are calculated using the finite volume formulations, using ANSYS Fluent software, to solve the government equations (Navier-Stokes) and free surface transport. Geometric generation uses parametric modeling with Python scripts using the GNU Salome platform. The results obtained are consistent with the experimental results.

1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, el proyecto de buques se basaba en copiar diseños existentes, realizando modificaciones basadas en el conocimiento empírico de los profesionales, cuyo desempeño sólo era posible de evaluar a posteriori en canales de ensayos experimentales o de acuerdo al comportamiento de los buques en servicio. En las últimas 3 décadas, el modelado computacional viene haciendo posible, cada vez con mejor capacidad predictiva, calcular los rendimientos de los sistemas permitiendo evaluar las correcciones y mejoras propuestas de manera virtual y a bajo costo, minimizando la cantidad de los costosos ensayos en canales de experiencias hidrodinámicas. Por tanto, reconociendo que la predicción de resistencia al avance de la embarcación a proyectar resulta de vital importancia, se impone la necesidad de desarrollar métodos numéricos robustos y precisos.

Por otra parte, se sabe que la simulación del comportamiento hidrodinámico de los artefactos navales mediante fluidodinámica computacional tiene su sinergia con los canales de experiencias hidrodinámicas (ya sean de circulación o de remolque), herramientas fundamentales de la ingeniería naval para el diseño y optimización de formas de buques y otros artefactos navales. Por tanto, la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mar del Plata, decidió el diseño y construcción de un canal de remolque con fines didácticos. Nuestros grupos de investigación UTN Hidrosim y UNMDP GIAC han trabajado anteriormente en simulaciones numéricas aplicadas al diseño del mismo (Vaccari *et al.*, 2017, 2016). Dado que el mismo se encuentra en sus etapas finales de construcción, y que realizaremos ensayos para modelos físicos, nace la necesidad de complementar los resultados de las mediciones realizadas con las que se calculen mediante técnicas de CFD.

Los métodos computacionales aplicados a la hidrodinámica marina se utilizan, principalmente, para predicciones del flujo alrededor del buque y sus superestructuras, tanto para análisis estacionarios como transitorios. Los resultados que se obtienen, principalmente involucran: resistencia al avance, comportamiento en el mar y cálculo de fuerzas y momentos actuantes. Entre las principales cuestiones a resolver en estos tipos de problemas se encuentran el tratamiento de la capa límite alrededor del casco del buque, predicción del flujo viscoso turbulento, formación de vórtices, interacción entre buques, interacción fluido-estructura, rompimiento de olas y cavitación.

Dependiendo de las simplificaciones físicas realizadas, se tiene una amplia variedad de modelos fluidodinámicos que permiten realizar estos cálculos. Debido a su reducido coste computacional, uno de los más utilizados son los modelos de flujo potencial (Zhang *et al.*, 2019). Su principal desventaja radica en que desprecian los efectos viscosos. En Kim *et al.* (2017a) y Kim *et al.* (2017b) se utiliza este enfoque para predecir la resistencia añadida por efectos del viento y olas, y los movimientos de cuerpo rígido de la embarcación.

Por otra parte, los métodos que resuelven las ecuaciones de Navier Stokes promediadas según Reynolds (RANS), permitiendo simulaciones más realistas, contemplan en su formulación los efectos turbulentos (Nguyen *et al.*, 2017). En Karim y Naz (2017) se combinan ambas técnicas para resolver el flujo, ya que en la zona de proa del buque se emplean formulaciones de flujo potencial y en la zona de popa, técnicas RANS (flujo viscoso). Además, hacen uso de la teoría de línea de elevación de Prandtl (lifting line) para resolver el flujo alrededor de la hélice. En Ozdemir y Barlas (2017) se utilizan un tratamiento tipo URANS con técnicas VOF para modelar la superficie libre y modelo de turbulencia k-epsilon.

Entre las técnicas de mallado para hidrodinámica naval, se distinguen dos grandes grupos: las mallas convencionales y las mallas superpuestas, comunmente conocidas por su nombre en

inglés "overset grids" (Stern et al., 2015). En Castro et al. (2017), se utilizan solvers de dinámica multicuerpo y fluidodinámica, desarrollados en la Universidad de Iowa, para simular interacción fluido-estructura, utilizando mallas dinámicas overset.

En Bhushan et al. (2011), se describen y se aplican los solvers CFDShip-Iowa V4 y V6, herramientas computacionales más destacadas en materia de fluidodinámica de buques. La versión V4 resuelve las ecuaciones URANS/DES en la fase líquida, utilizando modelos de turbulencia k-omega, k-epsilon y ARS. Para permitir movimiento relativo entre las mallas del buque y el agua, utiliza mallas overset adaptativas; mientras que, para modelar la interfase agua-aire hace uso de métodos tipo Level-Set. Por otra parte, CFDShip-Iowa V6 resuelve las ecuaciones URANS/LES/DES multifase, y utiliza mallas cartesianas. Para modelizar la turbulencia usa tanto BKW, como k-g y k-epsilon, y la interfaz es modelada utilizando técnicas de Level-Set, Level-Set de partículas y técnicas acomodadas de Level-Set y VOF (Carrica et al., 2016).

En Shen et al. (2015) se implementan mallas overset adaptativas y técnicas VOF en OpenFOAM para obtener curvas de rendimiento de hélices marinas, factores de autopropulsión de buques, curvas de resistencia y análisis de superficie libre.

En el presente trabajo se implementa una metodología de captura de interfase VOF y modelo de turbulencia Realizable K-Epsilon, por su buen desempeño para este tipo de problemas, teniendo en cuenta el relevamiento del estado del arte realizado. Por tanto, el objetivo será desarrollar y validar una metodología para calcular la resistencia al avance de buques, sin asiento, que navegan en aguas tranquilas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Nomenclatura naval básica

En este apartado se listan algunas definiciones de nomenclatura naval básicas, necesarias para describir de forma general el casco de un buque:

Coefficiente de block (o "de bloque") (C_B): Relación entre volumen de carena y volumen del paralelepípedo que la contiene.

Coefficiente prismático longitudinal (C_P): Relación entre volumen de carena y volumen de un prisma cuya base tiene igual área que la sección maestra y de longitud igual a la eslora en flotación.

Coefficiente de flotación (C_F): Relación entre las áreas del plano de flotación y del rectángulo que lo circunscribe.

Coefficiente de sección maestra (C_M): Relación entre las áreas de la sección maestra y del rectángulo que la circunscribe.

El resto de la nomenclatura puede observarse en la Figura 1, mientras que la Figura 2 ilustra los parámetros utilizados para calcular los coeficientes de forma.

2.2. Resistencia al avance en buques

La resistencia total que experimenta una embarcación al navegar puede dividirse en diferentes componentes:

- Resistencia viscosa, a su vez compuesta por las siguientes componentes:
 - Resistencia por fricción de placa plana: Producto de fuerzas tangenciales entre la superficie sólida y el agua (también llamada "Skin Friction").
 - Resistencia por efecto de la rugosidad superficial: Normalmente es baja pero puede aumentar si se acumulan muchas incrustaciones de vida marina (fouling) en el casco.

- Resistencia friccional por formas: Se produce por diferencias entre la velocidad local del agua cerca de la carena (la cual se incrementa por curvatura de ésta última) y la velocidad del flujo no perturbado delante del buque.
- Resistencia por presión de origen viscoso: Este efecto se presenta por el desbalance de presiones entre las zonas de proa y popa, producto de las fuerzas normales a la superficie del casco.
- Resistencia por olas, la cual está causada por la remoción de partículas de su posición de equilibrio y la consecuente generación de olas, causando resistencia al movimiento del cuerpo. Se pueden dividir en:
 - Resistencia por formación de olas o "Wave patter resistance".
 - Resistencia por ruptura de olas o "Wave breaking resistance".

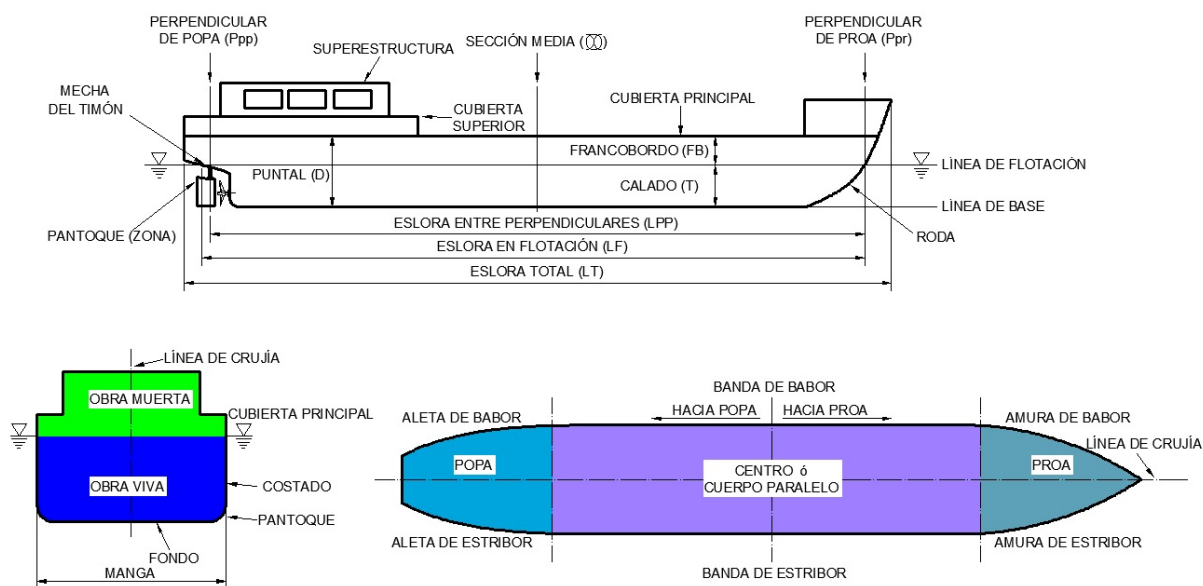


Figura 1: Nomenclatura naval básica.

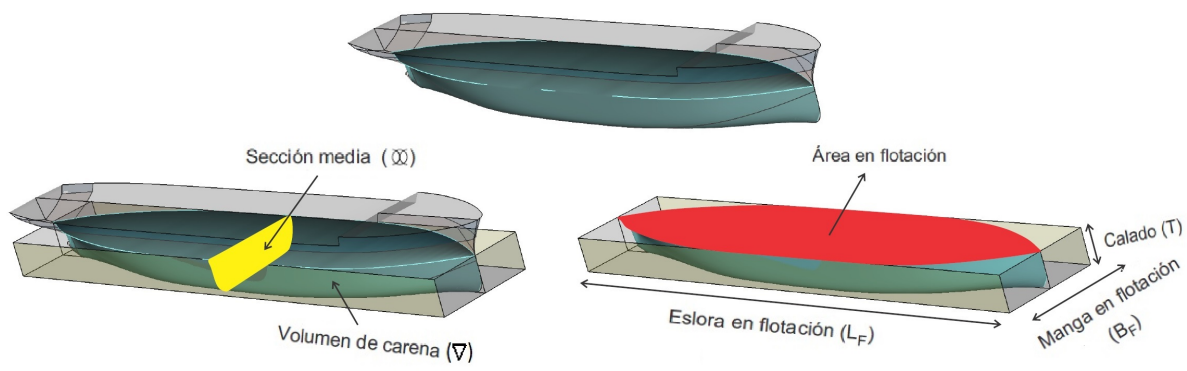


Figura 2: Nomenclatura naval: Volúmenes y áreas sumergidas.

Obviamente, esta clasificación en resistencia de ola y resistencia viscosa se corresponde con la separación de ambos fenómenos físicos: la generación de olas en el casco y el flujo viscoso alrededor del mismo. Aunque se sabe que ocurren de forma simultánea en la realidad, separarlos resulta útil para su estudio y posterior aplicación para la estimación de potencia.

En la práctica, se utilizan comúnmente los llamados "coeficientes resistivos", en lugar de los valores en unidades de fuerza de la resistencia, ya que permiten una mejor apreciación del rendimiento del buque en navegación. Mediante análisis dimensional, se definió el "Coeficiente de resistencia total" (C_T) con la siguiente expresión:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho SV^2} \quad (1)$$

Donde R_T es la resistencia al avance total, ρ es la densidad del fluido, S es la superficie mojada del casco y V es la velocidad de la embarcación.

3. MODELADO NUMÉRICO EN ANSYS FLUENT

Las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos newtonianos se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. ANSYS Fluent utiliza el método de volúmenes finitos para tratar las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS).

3.1. Tratamiento de la superficie libre

Se selecciona la metodología VOF para modelar la superficie libre existente entre ambas fases. De forma general, para la fase q , se tiene la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2)$$

Donde α_q es la fracción de volumen de la fase q dentro del elemento. La transferencia de masa de la fase agua a la fase aire se denota \dot{m}_{pq} , y \dot{m}_{qp} es lo opuesto. Por otra parte S_{α_q} es una función de transferencia de masa que puede setearse (por defecto es 0).

Para el presente análisis, dado que no hay fuente de masa ni transferencia entre las fases, la ecuación 2 se reduce a:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = 0 \quad (3)$$

Además, al tratarse de dos fases, se resuelve la ecuación de volumen una para una de ellas, y la restante se restringe según la siguiente ecuación:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

En este método, las propiedades físicas de la mezcla dentro de cada elemento se calculan utilizando el valor local de la función "fracción de volumen" (comúnmente llamada función VOF), de forma que:

$$\rho = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \quad (5)$$

$$\mu = \sum_{q=1}^n \alpha_q \mu_q \quad (6)$$

Se utiliza la opción de Fluent para modelar flujos en canales abiertos utilizando formulación VOF. En este tipo de flujo, existe una superficie libre entre el fluido que está fluyendo (típicamente agua líquida) y el que lo rodea (por lo general, aire atmosférico).

En el modelo de "Flujo en canal abierto" que utiliza Fluent, existen dos opciones para definir la condición de ingreso "corriente arriba": en forma de presión o en forma de caudal másico a la entrada. Se optó por la primera, para la cual la presión a la entrada, se define según la siguiente expresión:

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho V^2 (\rho - \rho_0) |\vec{g}| (\hat{g}(\vec{b} - \vec{a})) \quad (7)$$

Donde \vec{b} y \vec{a} son los vectores posición del centroide de área y de cualquier punto de la superficie libre (la cual se asume horizontal y normal a la dirección de la gravedad), respectivamente. Además, \vec{g} es el vector gravedad, \hat{g} es el vector unitario gravedad, V es el módulo de la velocidad, ρ es la densidad en ese elemento, y ρ_0 es la densidad de referencia.

4. CASOS DE ESTUDIO

Se seleccionó la serie sistemática de cascos denominada "Serie 60" (Todd, 1963), familia de formas de buques desarrollada por el "Bureau of Ships Fundamental Hydromechanics Research Program" (BSFHRP) estadounidense, donde cada "individuo" es definido a partir de coeficientes y parámetros tales como: longitudes características, coeficientes de forma y relaciones entre parámetros. Específicamente, se toma la geometría del modelo W4210 de la familia de cascos de la Serie 60 cuyas principales características se listan en la Tabla 1.

Al igual que todos los modelos de la serie, los resultados de coeficientes resistivos son conocidos y serán utilizados para validar la metodología.

Eslora entre perpendiculares (Lpp)	121,92 m
Manga (B)	16,255 m
Calado (T)	6,501 m
Desplazamiento (Δ)	7807 TON
Coficiente de block	0,600
Coficiente de sección maestra	0,977
Coficiente prismático longitudinal	0,614
Coficiente de flotación	0,706
Medio ángulo de entrada de la proa	7°
Eslora en flotación	123,962 m
Posición longitudinal del centro de flotación (LCB) desde sección maestra (positivo a popa)	1,5 % de Lpp
$L/\nabla^{1/3}$	6,165
Superficie mojada (S)	2533,46 m ²
$\Delta/(L/100)^3$	4307,84
$S/\nabla^{2/3}$	6,481

Tabla 1: Dimensiones principales del casco W4210.

Modelos numéricos		
Multifase	Volume of Fluid	
Turbulencia	Realizable $K - \epsilon$	
Fases		
Primaria	Aire	
Secundaria	Agua líquida	
Condiciones de borde		
Entrada	Altura de superficie libre	6,501 m
	Velocidad	Varía con el número de Froude
	Intensidad de turbulencia	4 %
	Escala de longitud turbulenta	3,66 m %
Salida	Altura de superficie libre	6,501 m
	Intensidad de turbulencia	4 %
	Escala de longitud turbulenta	3,66 m %
Inferior, Superior Crujía y Lateral	Simetría	
Buque	Pared	
Acoplamiento Presión-Velocidad		
Tipo	Acoplado. Pseudo-transitorio	
Esquemas de discretización		
Presión	PRESTO!	
Cantidad de movimiento	Upwinding de segundo orden	
Fracción de volumen	Compresible	
Energía cinética turbulenta	Upwinding de segundo orden	
Tasa de disipación específica	Upwinding de segundo orden	

Tabla 2: Resumen de Fluent.

Se realizaron un total de 6 casos, para los números de Froude: 0,175 ; 0,207 ; 0,239 ; 0,271 ; 0,303 y 0,316, de forma tal de validar la metodología con los resultados experimentales obtenidos por [Todd \(1963\)](#). Los valores ingresados a Fluent son los mismos para todos los casos y se presentan en la [Tabla 2](#).

5. GENERACIÓN GEOMÉTRICA Y MALLADO

Mediante un script en Python se parametrizó la generación geométrica del buque en la plataforma Salomé, de forma tal que, mediante la modificación de los parámetros que definen las líneas del casco, automáticamente se generan los volúmenes que serán utilizados para crear las mallas. A partir de la Tabla de geometrías que publica [Todd \(1963\)](#), se generan los puntos correspondientes, que serán utilizados para generar las curvas de cada sección. Estas últimas son utilizadas para construir las superficies del casco (Ver [Figura 3](#)). Las geometrías se exportan en formato IGES a ANSYS SpaceClaim.

La determinación de las dimensiones del dominio se basó en una relación de compromiso entre la introducción correcta de las condiciones de contorno del problema y el costo computacional. El valor adoptado para el ancho del canal es suficiente para evitar introducir reflexión de olas; la longitud del canal permite el desarrollo correcto del flujo alrededor del buque, mientras que la profundidad seleccionada no introduce efectos indeseables de aguas poco profundas.

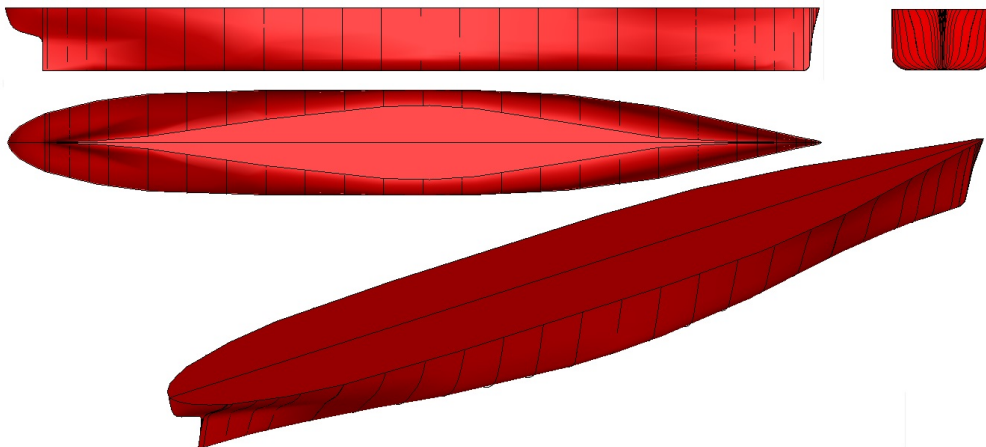


Figura 3: Geometría del W4210 generada.

Una vez en el entorno de ANSYS, se generan mallas estructuradas utilizando elementos hexaédricos. La malla que fue finalmente utilizada para los cálculos (469K elementos) tiene un tamaño característico dado en las zonas lejanas al buque, y está refinada en las zonas cercanas, alrededor y detrás del buque, lo cual puede observarse en la figura 4.

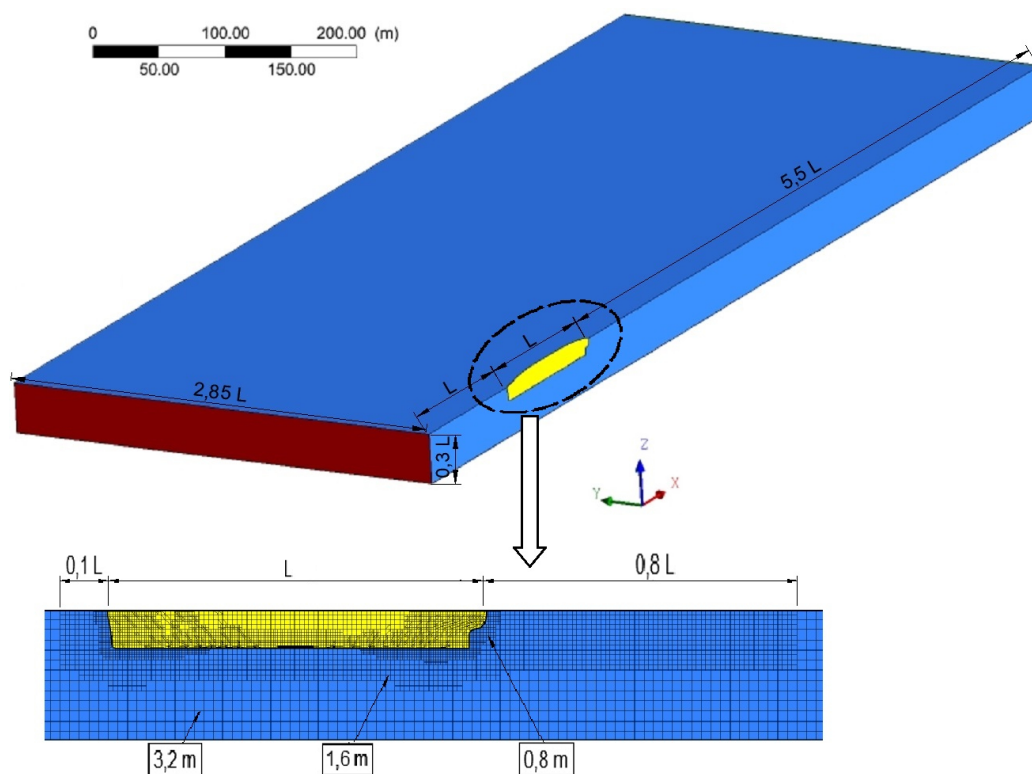


Figura 4: Dominio de trabajo.

6. RESULTADOS

En la Tabla 3 se colocan los casos realizados y se comparan los resultados obtenidos con los experimentales. Cabe aclarar que el número de Froude se calcula en base a la eslora, y que C_T se define en la ecuación 1.

Al comparar los resultados de resistencia al avance con los datos experimentales disponibilizados por el BSFHRP, se obtienen correlaciones aceptables (errores menores al 10 %).

Caso	Fr	Fluent		Todd (1963)		Error
		Resistencia (kN)	$C_T \times 10^{-3}$	Resistencia (kN)	$C_T \times 10^{-3}$	
1	0,175	131,38	2,817	123,07	2,639	6,75 %
2	0,207	189,98	2,917	174,88	2,685	8,63 %
3	0,239	246,86	2,847	235,26	2,713	4,93 %
4	0,271	348,94	3,133	326,68	2,933	6,81 %
5	0,303	542,66	3,900	561,67	4,037	-3,39 %
6	0,316	597,82	3,959	640,13	4,239	-6,61 %

Tabla 3: Resumen de resultados.

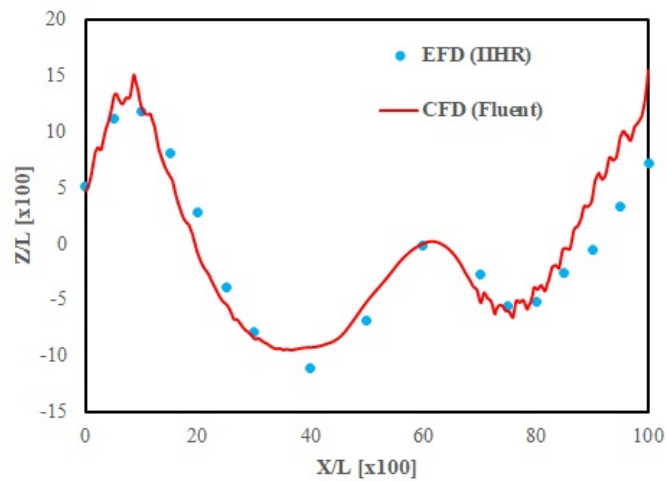


Figura 5: Elevación de la superficie libre a lo largo del casco para el caso 5. Fuente: Toda et al. (1991).

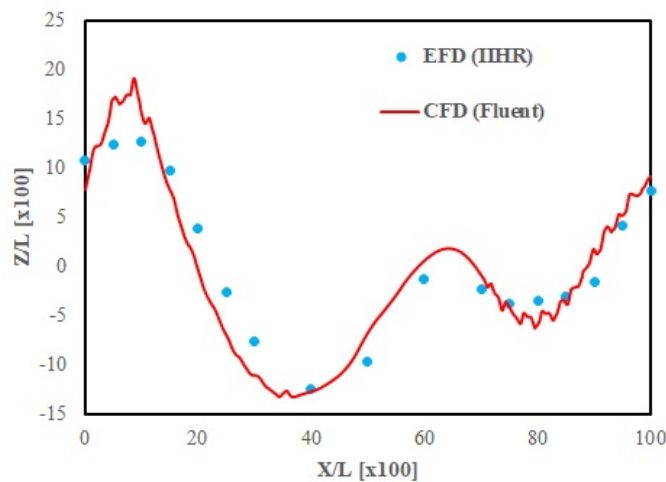


Figura 6: Elevación de la superficie libre a lo largo del casco para el caso 6. Fuente: Toda et al. (1991).

De igual manera, las superficies libres obtenidas son aceptables y concuerdan con los datos empíricos (Ver Figura 5 y 6).

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha tomado la geometría de un casco ampliamente utilizado para validación de metodologías de cálculo por fluidodinámica computacional, como lo es la "Serie 60", y se trabajó en la implementación computacional de mallas con el objetivo de calcular la resistencia al avance en aguas tranquilas mediante la técnica de volúmenes finitos.

La metodología de implementar programación en lenguaje Python que brinda la plataforma Salomé, conjuntamente con las herramientas que brinda la suite Ansys, ha resultado muy versátil para la generación paramétrica de geometrías para mallas de CFD, permitiendo un adecuado nivel de control en las mismas. Es de destacar, en este sentido, la potencialidad de la programación de códigos en lenguaje de script para acelerar los tiempos de creación de geometrías y mado, mediante la parametrización de todas estas fases iniciales del estudio.

Los resultados obtenidos demuestran que el conjunto de herramientas seleccionadas es capaz predecir los efectos que inciden en la resistencia al avance de manera realista. No obstante, se debe tener en cuenta que el nivel de discretización espacial seleccionado fue una solución de compromiso entre la capacidad de cálculo computacional disponible actualmente por nuestro equipo y la calidad de la solución.

Se proyecta continuar la línea de investigación aplicando las técnicas desarrolladas a otros cascos de buques, de forma tal de estudiar la robustez de la técnica desarrollada. Por otra parte, se trabajará en la complementación con el canal de experiencias hidrodinámicas instalado en la UTN Facultad Regional Mar del Plata, de forma tal de intercambiar información con las mediciones que se desarrollen en el canal físico. Posteriormente, se espera aplicar los conocimientos adquiridos a la optimización de formas de carenas, de forma tal de formular, paralelamente, estudios sobre la influencia de los parámetros que describen las líneas del casco.

REFERENCIAS

- Bhushan S., Carrica P., Yang J., y Stern F. Scalability studies and large grid computations for surface combatant using cfdship-iowa. *IJHPCA*, 25:466–487, 2011. doi:10.1177/1094342010394887.
- Carrica P., Kerkvliet M., Quadvlieg F., Pontarelli M., y Martin J. Cfd simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation. *31st Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2016.
- Castro A., Martin E., y Carrica P. Coupled computational fluid mechanics/multibody dynamics approach for naval applications. (artículo completo) *Mecánica Computacional. Fluid Mechanics (A)*, XXXV(15):805–818, 2017. ISSN 2591-3522.
- Karim M.M. y Naz N. Computation of flow field around ship hull including self propulsion characteristics at varying rudder positions. *Procedia Engineering*, 194:96 – 103, 2017. ISSN 1877-7058. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.122. 10th International Conference on Marine Technology, MARTEC 2016.
- Kim M., Hizir O., Turan O., Day S., y Incecik A. Estimation of added resistance and ship speed loss in a seaway. *Ocean Engineering*, 141:465 – 476, 2017a. ISSN 0029-8018. doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.051.
- Kim Y.C., Kim K.S., Kim J., Kim Y., Park I.R., y Jang Y.H. Analysis of added resistance and seakeeping responses in head sea conditions for low-speed full ships using urans approach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(6):641 – 654, 2017b. ISSN 2092-6782. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.03.001.
- Nguyen T., Iyata S., Ngo Van H., y Ikeda Y. Effects of turbulence models on the cfd results of

- ship resistance and wake. 2017.
- Ozdemir Y.H. y Barlas B. Numerical study of ship motions and added resistance in regular incident waves of kvlcc2 model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(2):149 – 159, 2017. ISSN 2092-6782. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.09.001>.
- Shen Z., Wan D., y Carrica P.M. Dynamic overset grids in openfoam with application to kcs self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering*, 108:287 – 306, 2015. ISSN 0029-8018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.035>.
- Stern F., Wang Z., Yang J., Sadat-Hosseini H., Mousaviraad M., Bhushan S., Diez M., Yoon S.H., Wu P.C., Yeon S.M., Dogan T., Kim D.H., Volpi S., Conger M., Michael T., Xing T., Thodal R.S., y Grenestedt J.L. Recent progress in cfd for naval architecture and ocean engineering. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 27(1):1 – 23, 2015. ISSN 1001-6058. doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(15\)60452-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60452-8).
- Toda Y., Stern F., y Longo J. Mean-flow measurements in the boundary layer and wake and wave field of a series 60 cb=0.6 ship model for froude numbers 0.16 and 0.316. *IIHR Report No 352*, 188, 1991.
- Todd F. Series 60. methodical experiments with models of single-screw merchant ships. DTMB, 1963.
- Vaccari A., Giménez J.A., Sanchez Y., Biocca N., Carr G.E., Antonelli N.A., Martinez J.F., y Urquiza S. Simulación de rompevórtices en el colector de entrada de un canal de ensayos. (artículo completo) *Mecánica Computacional. Industrial Applications*, XXXV(16):279–293, 2017. ISSN 2591-3522.
- Vaccari A., Gorga T., Giménez J., Sanchez Y., Biocca N., y Urquiza S. Modelo computacional de un canal de ensayos hidrodinámicos. (artículo completo) *Mecánica Computacional. Industrial Applications*, XXXIV(16):1079–1092, 2016. ISSN 1666-6070.
- Zhang L., Zhang J.N., y Shang Y.C. A potential flow theory and boundary layer theory based hybrid method for waterjet propulsion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4), 2019. ISSN 2077-1312. doi:10.3390/jmse7040113.