



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL MAR DEL PLATA  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

**Título:** Estudio del efecto de navegación en aguas restringidas en un canal de experiencias hidrodinámicas.

**Autor:** Antonellia, Nicolás A.; Kunert, Hernán G.; Gogniat, Guillermina; Biocca, Nicolás; Gimenezb, Juan M.; Carrb, Gustavo E.; Urquiza, Santiago A.

**Año 2021**

## ESTUDIO DEL EFECTO DE NAVEGACIÓN EN AGUAS RESTRINGIDAS EN UN CANAL DE EXPERIENCIAS HIDRODINÁMICAS

### STUDY OF THE EFFECT OF NAVIGATION IN CONFINED WATERS IN A CIRCULATING WATER CHANNEL

Nicolás A. Antonelli<sup>a,b,c</sup>, Hernán G. Kunert<sup>a</sup>, Guillermina Gogniat<sup>a</sup>, Nicolás Biocca<sup>b,c</sup>,  
Juan M. Gimenez<sup>b,c</sup>, Gustavo E. Carr<sup>b,c</sup> y Santiago A. Urquiza<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Grupo 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)

<sup>b</sup>CONICET - Mar del Plata, Argentina, <http://mardelplata-conicet.gob.ar/>

<sup>c</sup>Grupo 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, Hidrodinámica naval.

#### Resumen.

Los canales de experiencias hidrodinámicas son una de las principales herramientas de la ingeniería naval para el diseño de buques. En este tipo de experiencias se toman mediciones de determinados parámetros físicos para luego correlacionarlos con los del buque real. Con estos fines, la UTN Facultad Regional Mar del Plata diseñó y e inició las primeras etapas de construcción de un canal de ciclo cerrado con fines académicos. En este trabajo se estudian los efectos que introducen la cercanía del fondo y las paredes laterales del canal en el flujo alrededor del modelo en contraste con las condiciones operativas reales. Se procura determinar el factor de escala ideal para realizar los ensayos en el canal existente utilizando las formulaciones de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de gobierno (Navier-Stokes) y de transporte de superficie libre. Se obtienen datos de la variación de la resistencia al avance en función del número de Froude para diferentes relaciones del factor de obstrucción.

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

**Abstract.** Hydrodynamic experience channels are one of the main naval engineering tools for ship design. In this type of experience, measurements of certain physical parameters are taken and then correlated with those of the real ship. For this purpose, the UTN Facultad Regional Mar del Plata designed and began the first stages of construction of a closed loop channel for academic purposes. In this work, the effects that the proximity of the bottom and the lateral walls of the channel introduce in the flow around the model in contrast with the real operating conditions are studied. An attempt is made to determine the ideal scale factor for testing the existing canal using the finite volume formulas to solve the government equations (Navier-Stokes) and free surface transport equations. Data are obtained on the variation of the drag as a function of the Froude number for different block ratios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los canales de experiencias hidrodinámicos se han utilizado para predecir el comportamiento de las formas de buques diseñadas, mediante la construcción de dichos modelos con una determinada escala y su análisis. Esto dió origen al concepto de optimización de diseño de carenas y formas, tanto para buques de velocidad (cargueros, portacontenedores, graneleros) como de tiro (remolcadores, buques de salvamento, etc.)

Actualmente, dados los altos costos operativos de los ensayos en canales experimentales, y el avance de las técnicas computacionales y capacidad de cálculo de las computadoras, se viene trabajando en la sinergia y complementación de dichos ensayos con el cálculo CFD, es decir, Fluidodinámica Computacional (por sus siglas en inglés).

Por tanto, el canal de ensayos tiene por objetivo generar las condiciones de flujo correctas para analizar modelos de embarcaciones en él, así también como hélices, perfiles hidrodinámicos o demás apéndices que requieran un cálculo en específico, como podría ser el de resistencia al avance, comportamiento en el mar, cavitación, etc.

Dentro de los canales de experiencias hidrodinámicas, existen dos grandes grupos: los de agua recirculante y los de remolque. En este contexto, la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Mar del Plata decidió el diseño y construcción de un canal de ciclo cerrado con fines didácticos y científicos. Entre sus ventajas encontramos: instalaciones más reducidas en tamaño, menor inversión inicial que los canales de remolque y la posibilidad de operar durante tiempo indefinido.

Sobre su diseño básico, en [Vaccari et al. \(2016\)](#) se determinan sus principales características tales como sus dimensiones, características generales de la bomba, condiciones operativas, etc. Por otra parte en [Vaccari et al. \(2017\)](#) se simula el efecto de un panel rompevórtices a la entrada, colocado con el objetivo de regularizar el flujo en la zona de ensayos. Luego, en [Vaccari et al. \(2018\)](#) estudia la superficie libre en la zona de ensayo para las condiciones operativas reales.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es estudiar los efectos que introducen la cercanía del fondo y las paredes del canal en el flujo en condiciones operativas reales. Para ello, se modela computacionalmente el comportamiento de un buque típico (pesquero) a verificar en el canal real para diferentes velocidades, profundidades y anchos del canal; con el objetivo de determinar el efecto que se introduce por la navegación en aguas confinadas. Una de las aplicaciones principales será la selección de la escala del modelo a utilizar en el canal físico.

## 2. RESISTENCIA AL AVANCE EN BUQUES

La resistencia total que experimenta una embarcación al navegar puede dividirse en diferentes componentes según indica la tabla 1.

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:

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

Resistencia total	Resistencia viscosa	Resistencia por fricción de placa plana Resistencia por efecto de la rugosidad superficial Resistencia friccional por formas Resistencia por presión de origen viscoso
	Resistencia por olas	Resistencia por formación de olas Resistencia por ruptura de olas

Tabla 1: Clasificación de los efectos resistivos en un buque.

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

### 3. MODELADO NUMÉRICO

Las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos newtonianos se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. Se utiliza el método de volúmenes finitos para tratar las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) en un solver para propósitos generales del grupo.

#### 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  $q$ , la ecuación 2 trata el transporte de interfase a través de la fracción de volumen.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = 0 \quad (2)$$

Donde  $\alpha_q$  es la fracción de volumen de la fase  $q$  dentro del elemento y  $\rho_q$  la densidad de la fase  $q$ . 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), como muestran las ecuaciones 3 y 4.

$$\rho = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

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

#### 3.2. Tratamiento de la turbulencia

Se utiliza el modelo realizable K-epsilon", propuesto por [Shih et al. \(1995\)](#), el cual plantea una nueva formulación para modelar la viscosidad turbulenta y la ecuación derivada de la ecuación para calcular las fluctuaciones promedio de la vorticidad. Entre sus ventajas, se encuentra la buena performance para modelar flujos con capas límites y grandes gradientes de presiones, separación y recirculación de flujos como es el caso de los buques, según se trata en [Nguyen et al. \(2017\)](#).

### 3.3. Condiciones de contorno

Para imponer la velocidad en la pared se utilizan penalizadores, mientras que los parámetros de turbulencia a la entrada se calculan a partir de una escala de longitud igual al 4 % de la eslora en flotación.

## 4. CASOS DE ESTUDIO

Se seleccionó como geometría un buque pesquero congelador tangonero típico con las características que indica la tabla 2. Tiene casco doble arista y proa bulbo, según se ve en la figura 1.

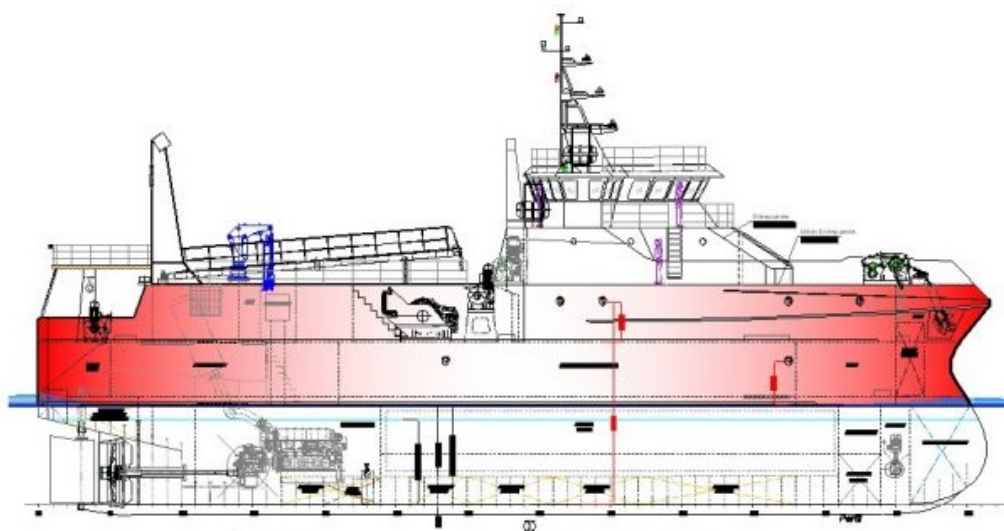


Figura 1: Buque pesquero utilizado para los cálculos.

Eslora en flotación ( $L_f$ )	39,175 m
Manga en flotación ( $B$ )	9,70 m
Calado ( $T$ )	4,15 m
Desplazamiento ( $\Delta$ )	1020 TON
Coefficiente de block <sup>a</sup>	0,631

Tabla 2: Dimensiones principales de la carena utilizada.

<sup>a</sup>Coefficiente de forma del casco. Indica su fineza, se calcula como la relación entre el volumen de carena y el volumen del paralelepípedo que lo contiene

Para el mallado de las zonas lejos del buque se tomó el tamaño de elemento igual a 0.8 m y se realizaron 3 discretizaciones: la primera en una caja alrededor del buque con tamaño de elemento igual a 0.2 m, la segunda en una caja rectangular más una triangular cubriendo la zona donde se espera se genere el oleaje, con tamaño de elemento también de 0.2 m y la tercera sólo en una franja muy fina alrededor de la superficie libre inicial con tamaño 0.024 m.

Se realizaron un total de 32 casos, resultantes de la combinación de 2 velocidades, 4 anchos de canal y 4 profundidades según indica la tabla 3. El número de Froude se calcula en función de la eslora en flotación.

		$C_w$							
		18	13	8	3	18	13	8	3
$C_d$	5,5	1	2	3	4	17	18	19	20
	4	5	6	7	8	21	22	23	24
	2,5	9	10	11	12	25	26	27	28
	1	13	14	15	16	29	30	31	32
		$Fr = 0,32$				$Fr = 0,375$			

Tabla 3: Casos de estudio.

Se define entonces el coeficiente  $C_w$  y  $C_d$  según indican las ecuaciones 5 y 6, donde  $B$  es la manga del buque,  $W$  es el ancho del canal,  $T$  es el calado del buque y  $D$  es la profundidad del canal, según indica la tabla 3.

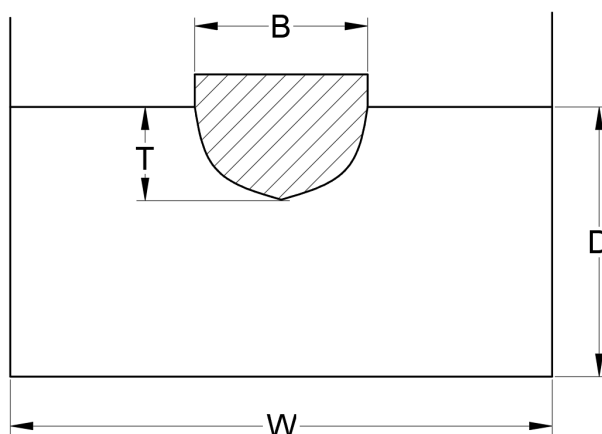


Figura 2: Diagrama dimensiones del buque y canal (ilustrativo).

$$C_w = \frac{W}{B} \tag{5}$$

$$C_w = \frac{D - T}{T} \tag{6}$$

### 5. RESULTADOS

En la tabla 4 se observan las diferencias porcentuales con respecto al resultado obtenido con las condiciones de mar abierto, para la velocidad de 12,2 nudos (número de Froude igual a 0,32) De igual manera, en la tabla 5 se observan los resultados para la velocidad de 14,3 nudos (número de Froude igual a 0,375).

		$C_w$			
		18	13	8	3
$C_d$	5,5	1 %	4 %	115 %	568 %
	4	2 %	6 %	118 %	580 %
	2,5	4 %	7 %	119 %	590 %
	1	6 %	8 %	122 %	599 %

Tabla 4: Resultados obtenidos para velocidad 12,2 nudos.

		$C_w$			
		18	13	8	3
$C_d$	5,5	4 %	6 %	120 %	572 %
	4	7 %	9 %	126 %	586 %
	2,5	11 %	12 %	131 %	600 %
	1	17 %	15 %	140 %	613 %

Tabla 5: Resultados obtenidos para velocidad 14,3 nudos.

El oleaje generado por el buque se ve afectado en función del ancho del canal, como puede verse en las figuras 3 y 4. Como se observan en las figuras 5 y 6, el oleaje a lo largo de la eslora del buque (para los casos de mayor ancho y profundidad) varía en función de la velocidad, incrementándose su longitud de onda a medida que aumenta el número de froude.

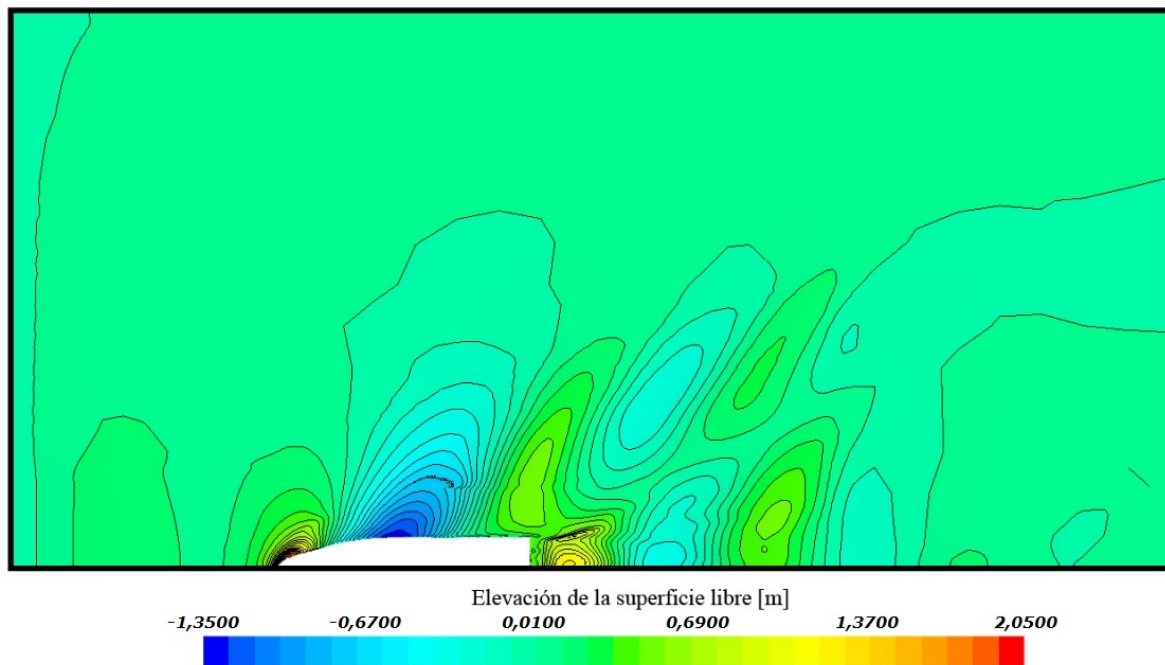


Figura 3: Elevación de la superficie libre para el caso 13.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se seleccionó una geometría de un buque pesquero típico cuyos resultados de resistencia al avance son conocidos, y se implementó computacionalmente el análisis del mismo mediante el método de volúmenes finitos. Se trató la turbulencia mediante un modelo tipo Realizable K-Epsilon, mientras que la superficie libre mediante metodología VOF.

Los cálculos se realizaron con el buque en escala real, variando las dimensiones del canal. Los resultados alcanzados fueron satisfactorios y permiten, por un lado, el diseño de futuros canales de experiencias dada una escala de modelo; o bien, determinar la escala si se tiene el canal ya construido (como es el caso del canal de experiencias de la UTN FRMDP).

Los resultados obtenidos demuestran, por otra parte, que la metodología es capaz predecir los efectos resistivos de manera realista, obteniendo que la restricción lateral (ancho del canal) es la que introduce mayores diferencias al flujo alrededor del buque. Se realizaron pruebas con

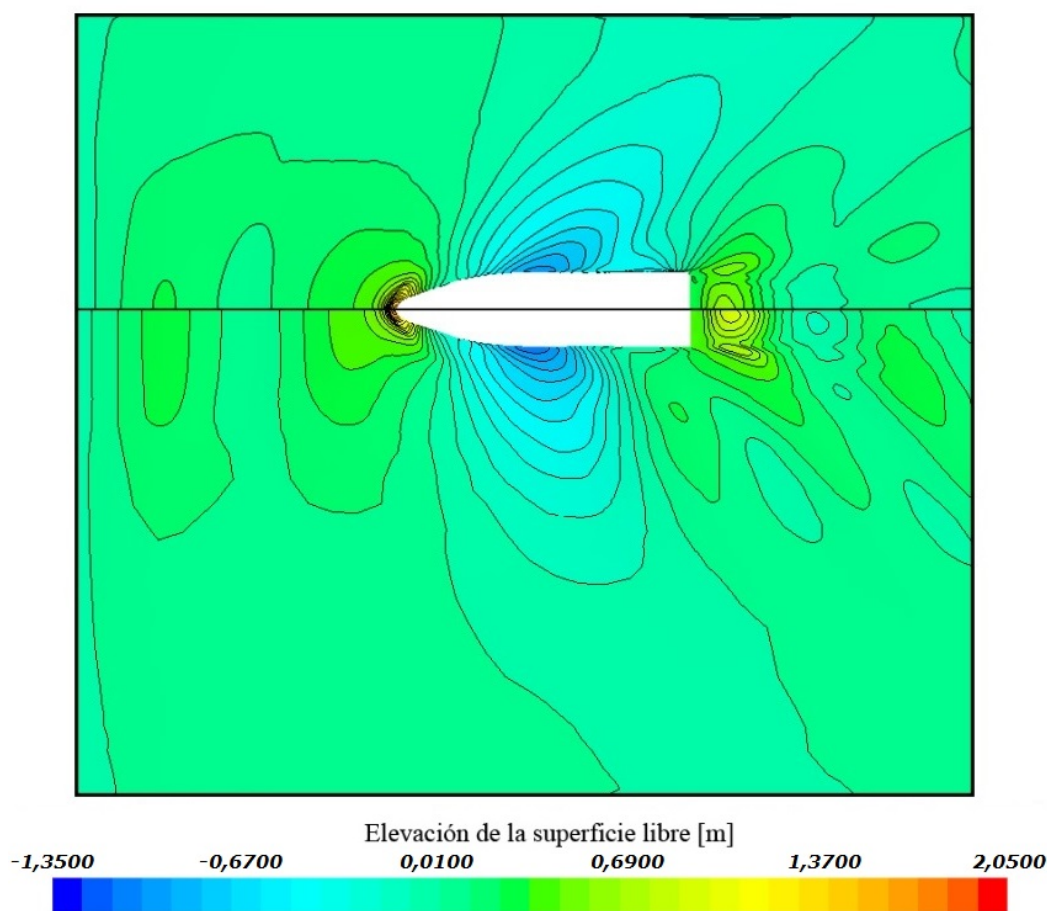


Figura 4: Elevación de la superficie libre para el 14 (arriba) y 15 (abajo).

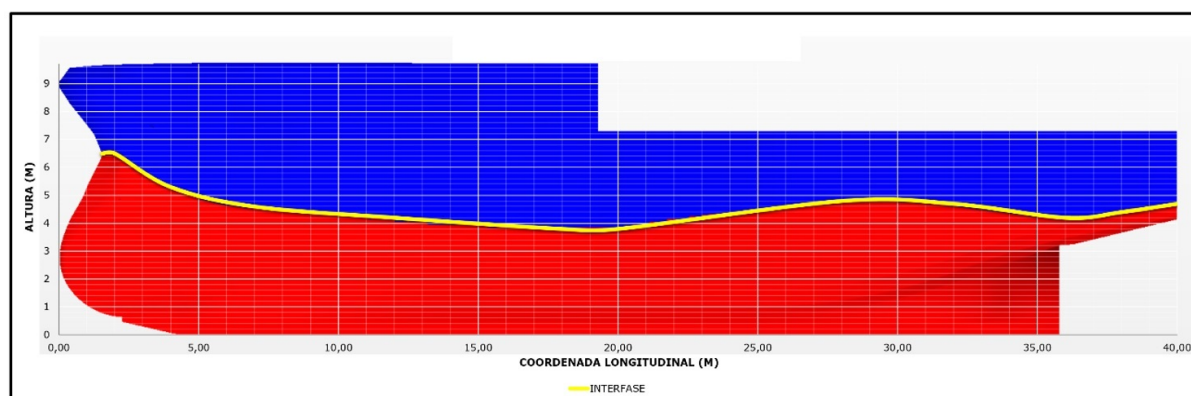


Figura 5: Superficie libre resultante a lo largo de la embarcación. Caso 1

diferentes tamaños de mallas (no detalladas en el presente trabajo) hasta llegar a la calidad de malla que mejor se adaptó a la capacidad de cálculo disponible actualmente.

Posteriormente, se espera aplicar los conocimientos adquiridos a la selección de escalas para construir modelos en el canal físico. Además, se pretende realizar análisis tanto mediante fluidodinámica computacional como experimental sobre las condiciones de flujo con el modelo dentro del canal, considerando la acción de la bomba, paneles rompevórtices y particularidades varias del experimento.



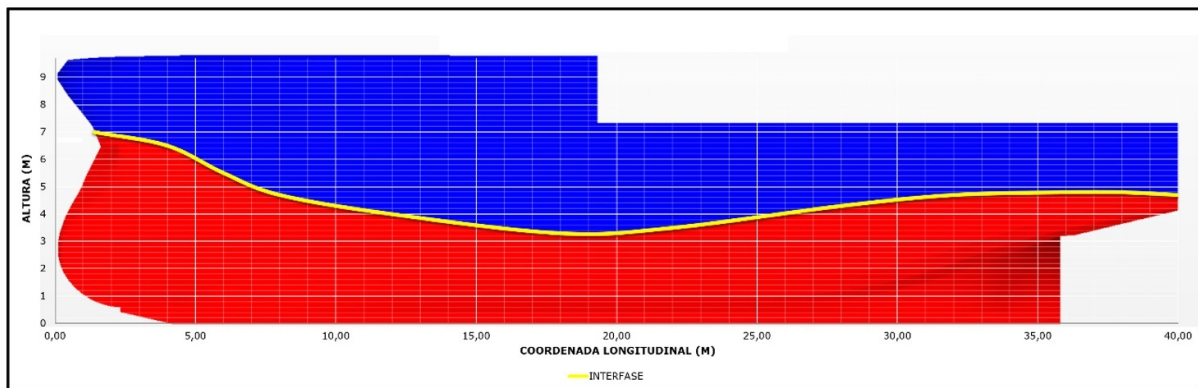


Figura 6: Superficie libre resultante a lo largo de la embarcación. Caso 17

## REFERENCIAS

- Nguyen T., Ibata S., Ngo Van H., y Ikeda Y. Effects of turbulence models on the cfd results of ship resistance and wake. 2017.
- Shih T., Liou W., Shabbir A., Yang Z., y Zhu J. A new k- eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24:227–238, 1995.
- Vaccari A., Giménez J.A., Antonelli N.A., Biocca N., Carr G.E., y Urquiza S. Determinación del perfil de la superficie libre de un canal de experiencias. (*artículo completo*) *Mecánica Computacional. Industrial Applications*, XXXVI(13):569–577, 2018. ISSN 2591-3522.
- 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.