

VALIDACIONES NUMÉRICAS DE FLUJOS EXPERIMENTALES PARA APLICAR A LA NAVEGACIÓN DE BUQUES CARGUEROS TIPO PÁNAMAX

NUMERICAL VALIDATIONS OF EXPERIMENTAL FLOWS TO APPLY TO THE NAVIGATION OF PANAMAX-TYPE CARGO SHIPS

Gerardo Franck^{a,b}, Silvina Mangini^b, Hugo Prendes^b, Jose Huespe^b y Walter Tonini^{a,c}

^a*Mecánica Computacional Aula FICH-CIMNE. UNL. Ciudad Univeritaria. 3000. Santa Fe.
Argentina. www.fich.unl.edu.ar/facultad/categorias/aula-fich-cimne/*

^b*Laboratorio de Hidráulica. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. UNL. Ciudad Univeritaria.
3000. Santa Fe. Argentina. <https://www.fich.unl.edu.ar/>*

^c*Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco.*

Palabras clave: Hidrodinámica del buque, Hidrovía Argentina, validación experimental, dinámica de los fluidos computacional, flujo en superficie libre, Método VOF, tensiones de corte.

Resumen. La Hidrovía Argentina presenta problemas de calado debido a los pasos de navegación. En nuestro proyecto de investigación, nos proponemos estudiar los procesos de dragado hidrodinámicos naturales en canales de navegación (fracción fina y arenas sueltas del lecho), aprovechando la frecuencia del tránsito de buques y la turbulencia generada por su paso, que re-suspende el sedimento fino del lecho favoreciendo el auto-mantenimiento del canal. Para analizar lo expuesto, se formuló un modelo numérico de navegación de un casco Wigley, el que fué calibrado con un modelo experimental realizado en el Instituto Pprime, Univ. Poitiers. El software utilizado de dinámica de los fluidos computacional es Simcenter STAR-CCM+. La elevación de la superficie libre causada por el movimiento del barco se captura mediante el método del volumen de fluido (VOF), determinando el campo de velocidades, el oleaje y la tensión de corte sobre el lecho.

Keywords: Ship hydrodynamics; Argentine waterway, experimental validation; Computational Fluid Dynamics (CFD), Free Surface flow, VOF-Volume of Fluid, Shear stress.

Abstract The Argentine Waterway presents draft problems due to the navigation steps. We propose to study the natural hydrodynamic dredging processes in navigation channels (fine fraction and loose sands on bed), taking advantage of the frequency of ship transit and the turbulence generated by their passage, which re-suspends the sediment fineness of the bed, favoring the self-maintenance of the channel. To analyze the above, a numerical navigation model of a hull was formulated, which was calibrated with an experimental model carried out at the Pprime Institute, Poitiers, France. The software used is STAR-CCM+. The free surface elevation caused by ship motion is captured using the volume of fluid (VOF) method, determining position, the velocity field, the waves and the shear stress on the bed.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos del proyecto “Procesos Hidrosedimentológicos que afectan a la navegación fluvial en las Hidrovías Argentinas” es analizar los sistemas de dragado hidrodinámico, (fracción fina no compacta y arenas finas sueltas del lecho) con el propósito de verificar dragados de auto-mantenimiento debido al frecuente tránsito de buques en canales de navegación, situación que sucede en el Canal Punta Indio en el Río de la Plata. En este aspecto, se puede afirmar que el paso de los buques, los cuales, debido a su sistema de propulsión (hélices) y los efectos hidrodinámicos que se generan debajo de la quilla, causan un nivel de turbulencia que re-suspende el sedimento fino del lecho, favoreciendo la flotabilidad del buque siguiente y el auto-mantenimiento del canal, ver (Mangini et al., 2019). El objetivo final de esta investigación es simular numéricamente el impacto de la re-suspensión de sedimentos ya mencionada. Los resultados esperados aportarán a la planificación de un uso sostenido y sustentable del sistema fluvial. Las tareas que se presentan en este trabajo, (denominada etapa de calibración), son las correspondientes a la formulación de un modelo numérico de simulación de la navegación de una embarcación en un canal de paredes rígidas, utilizando un software de dinámica de los fluidos computacional Simcenter STAR-CCM+, capturando la superficie libre usando un modelo de volumen de fluido VOF y su validación (comparando velocidades y patrón de olas) a partir de un modelo de simulación experimental realizado en el canal de laboratorio del Instituto Pprime en Francia, con el fin de llegar a cuantificar las tensiones de corte en el lecho, necesarias para analizar posteriormente la resuspensión de sedimentos mencionada. Estudios anteriores, han demostrado que los modelos numéricos pueden reproducir con bastante precisión las olas generadas por barcos en aguas poco confinadas y en régimen subcrítico, de allí que en nuestro caso hemos tomado dichos datos experimentales y los tratamos de validar para luego encarar los procesos de resuspensión comparando los trabajos de (Linde, 2017) y (Acosta Lopera, 2019).

2. MODELO NUMERICO

2.1. Ecuaciones de Gobierno

Para resolver los problemas de este trabajo relacionados con la dinámica de fluidos computacional (CFD), se presentan las ecuaciones que gobiernan los movimientos de los fluidos. El modelo hidrodinámico desarrollado se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) por medio del resolutor de STAR CCM+. Se plantean los siguientes supuestos para el proceso de cálculo:

- se supone que el fluido es isotrópico, incompresible, homogéneo y newtoniano.
- el flujo es constante y tridimensional.
- se desprecia la tensión superficial en la interfaz aire-agua.

Se utilizó la ecuación de Navier-Stokes (NS) para obtener la ecuación de Reynolds-Averaging Navier-Stokes (RANS) mediante descomposición de Reynolds. El modelo de turbulencia realizable $k - \epsilon$ y el método de volumen finito (FVM) se aplican para simular el flujo turbulento y calcular valores en puntos específicos/áreas pequeñas en una celda o elemento de una malla, respectivamente. Para rastrear y localizar la superficie libre entre el aire y el agua se utiliza el método del Volumen de Fluido (VOF-Volume of Fluid). Las ecuaciones que gobiernan el sistema las podemos resumir de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) \right) = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{f} + \mathbf{q} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\bar{\mathbf{I}} + \bar{\boldsymbol{\tau}} = -p\bar{\mathbf{I}} + \mu(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T + \underbrace{\lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\bar{\mathbf{I}}}_{=0}) \quad (3)$$

donde \mathbf{v} es el vector de velocidad del fluido, t es el tiempo, p es la presión, ρ y μ son la densidad del fluido y la viscosidad dinámica, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ representa el tensor de tensión viscoso. El término \mathbf{f} en (2) comprende las fuerzas del cuerpo y \mathbf{q} es un término fuente de cantidad de movimiento opcional, que representa el amortiguamiento y que describiremos más adelante. Para las simulaciones actuales, la única fuerza corporal considerada fue la aceleración gravitacional. En este estudio sólo se consideran fluidos newtonianos incompresibles. Las condiciones de contorno fueron impuestas según el tipo de simulación adoptado y depende de la aproximación utilizada para comparar con el modelo experimental. El método del volumen de fluido (VOF) implementado en el software STAR-CCM+ se utiliza para tener en cuenta las dos fases (aire y agua). Se pueden encontrar más detalles sobre dicho método en (Muzafferija y Perić, 1999). Las ecuaciones gobernantes se aplican a cada celda y se discretizan según el Método de Volúmenes Finitos (FVM: Finite Volume Method). La integración en el tiempo se basa en una variación cuadrática, que también es una aproximación de segundo orden. El sistema de ecuaciones acopladas resultante se linealiza y se resuelve mediante el resolutor iterativo, implícito segregado de STAR-CCM+, utilizando un método algebraico multigrilla con esquema de relajación de Gauss-Seidel. Para obtener más información sobre la discretización y los resolutores de las ecuaciones gobernantes, ver Ferziger y Perić (2002) o el manual del software (STAR-CCM+, 2023). La parte turbulenta se resolvió adoptando los métodos de Navier-Stokes promediados por Reynolds (RANS) para flujo medio. El modelo estándar $k - \epsilon$ es el modelo utilizado y dentro del mismo se adoptó el Realizable $k - \epsilon$ Two-layer.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES EXPERIMENTALES

En esta sección veremos los detalles de la simulación de un modelo experimental que utilizamos a los efectos de validar el software y a posteriori poder aplicarlo al cálculo de resuspensión de sedimentos en buques cargueros.

3.1. Modelo Físico experimental. Laboratorio Pprime Towing Tank

3.1.1. Descripción del Canal utilizado

El canal del Laboratorio Pprime tiene 20 [m] de largo, 1,5 [m] de ancho y 1,2 [m] de profundidad. Su sección transversal, es de forma trapezoidal y consta de un falso fondo para realizar pruebas en aguas poco profundas. El canal está equipado con un carro que remolca el modelo del barco. Los dispositivos de medición están instalados en el carro de remolque y su velocidad se controla por computadora. Las Figuras 1 y 2 muestran una descripción general del Canal del Instituto Pprime y la sección transversal del mismo, ver (Caplier et al., 2015).

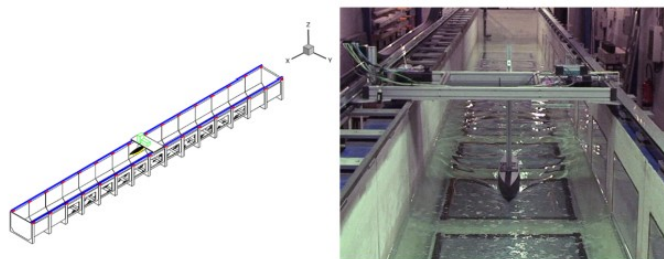


Figura 1: Canal de simulación experimental del Instituto Pprime. Fuente: Caplier et al. (2015)

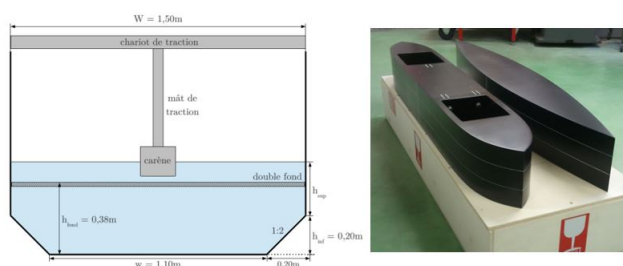


Figura 2: Sección Transversal del canal de simulación y casco utilizado (CWn8, a la izquierda). Instituto Pprime. Fuente: Caplier et al. (2015)

3.1.2. Modelo y Geometría de la embarcación: Wigley CWn8

En las experimentaciones llevadas a cabo en el Laboratorio Pprime se utilizó entre otros, un casco parabólico de forma Wigley, de sección rectangular cuya denominación es CWn8, con un coeficiente de bloque de $C_b = 0,89$, una longitud de $L = 1,20 [m]$, un ancho de $B = 0,18 [m]$ y una altura de $Ht = 0,15 [m]$. La Figura 2 muestra una imagen de los modelos de cascos utilizados. La forma del mismo se rige por la siguiente expresión matemática:

$$y_{CWn8} = \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^8 \right] \quad (4)$$

Las olas del modelo de barco se midieron con un método de medición óptica basado en el principio de correlación estéreo (Chatellier et al., 2010).

3.2. MODELO NUMERICO

La simulación fue realizada con el software Simcenter STAR-CCM+ vs 2302 (STAR-CCM+, 2023). La configuración geométrica del canal 3.1.1 y el casco del modelo de barco, utilizado en el experimento del laboratorio Pprime 3.1.2 se han reproducido por medio de un CAD y luego se exportaron a STAR CCM+ en formato parasolid.

3.2.1. Características geométricas del dominio

El tamaño del dominio numérico se extiende desde tres veces la eslora L del barco arriba del modelo hasta cinco veces la eslora del barco detrás del modelo; como se muestra en la Figura 3.

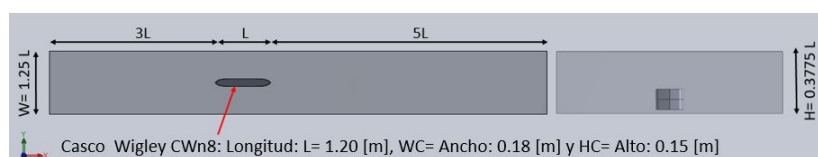


Figura 3: Vista esquemática de la configuración geométrica del canal a simular y su modelo.

3.2.2. Configuración y Parámetros Geométricos

La configuración utilizada para la comparación entre el experimento y la simulación numérica se resumen en la Tabla 1 junto con los parámetros correspondientes. La Figura 4 muestra una vista esquemática del canal modelado.

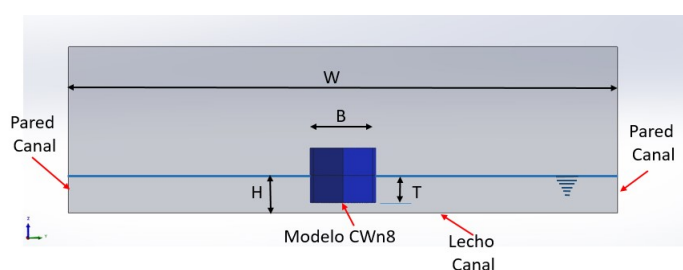


Figura 4: Representación esquemática del modelo y parámetros geométricos del Canal (Vista en Planta y Frontal). Lab. Pprime

Conf.	H[m]	T[m]	W[m]	$\frac{H}{T}$	$\frac{W}{B}$	$\frac{AC}{AB}$	V[m/s]	F_h
CWn8	0.103	0.075	1.50	1.37	8.33	11.44	0.8	0.8

Tabla 1: Configuración simulada y parámetros correspondientes. Laboratorio Pprime

Se pueden hacer las siguientes observaciones sobre la configuración estudiada:

- El barco está fijo y no puede hundirse ni rotar sobre algún eje.
- La configuración del canal presenta una alta restricción de profundidad de agua ($H/T = 1,34 < 4$) y ninguna restricción de ancho de canal ($W/B = 8,33 > 4$).
- La velocidad probada para el casco CWn8 es cercana a la velocidad límite de Schijf ($V_L = 0,81 [m/s]$) para esta configuración y los barcos de navegación interior, que en general no navegan a tales velocidades.

3.2.3. Condiciones de borde

En estas simulaciones no se aplicó movimiento al modelo del barco por su costo computacional, eligiendo mover el canal a la velocidad del mismo, por lo que las condiciones de contorno fueron establecidas en base a ese criterio. Debido a la inclusión del modelo VOF, las condiciones adoptadas fueron: para la superficie de entrada (Inlet) una condición de Velocity Inlet, con un valor constante de $0,8 [m/s]$ similar a la velocidad del modelo en el ensayo físico. A las paredes laterales y al fondo, se impuso una condición de pared, pero con velocidad tangencial de $0,8 [m/s]$, lo que permitió calcular la tensión de corte. Para la superficie de salida (Outlet) se

impuso una condición de presión (Pressure Outlet), a la superficie superior (Top) una de velocidad (Velocity Inlet) o bien de simetría (Symmetry Plane) y al plano medio, una condición de simetría (Symmetry Plane). Para la superficie libre se aplicó el modelo VOF. Respecto al casco de la embarcación, al cual se le impuso una condición de pared (Wall).

3.2.4. Formulación general para el amortiguamiento lineal y cuadrático

En este párrafo describiremos brevemente lo relacionado con la amortiguación de onda lineal, que está representada por el término q en la ecuación (5). Dicho término lo podemos expresar de la siguiente forma:

$$q_i^{d,lin} = \rho C_{i,lin} u_i \quad (5)$$

La amortiguación de ondas cuadráticas toma la forma, (6):

$$q_i^{d,quad} = \rho C_{i,quad} |u_i| u_i \quad (6)$$

con coeficiente $C_{i,quad}$, que regula la resistencia y la adaptación de la amortiguación. Para más información ver [Peric y Moustafa \(2017\)](#).

3.2.5. Discretización

Con respecto a la discretización del dominio y teniendo en cuenta la importancia de la misma en los resultados numéricos, en primer lugar se generó una malla compuesta por 2118289 celdas, como malla gruesa y luego una más refinada con 3291417, con celdas pseudo-estructuradas. El tamaño de malla para la superficie libre, varía según la zona, por ejemplo en las cercanías al casco tenemos valores $dx = dy = 7 [mm]$, pasando a $12 [mm]$ un poco más alejado y cerca de la pared del canal $20 [mm]$. En cada una de estas zonas se mantuvo una discretización de $dz = 2 [mm]$ en altura, en especial en la superficie libre. En la Figura 5 se aprecia la malla global con un enfoque alrededor del modelo. El degradé en el refinamiento cerca del casco es importante para capturar el movimiento del oleaje y el desrefinamiento en los extremos tiene por objetivo el amortiguamiento de las olas.

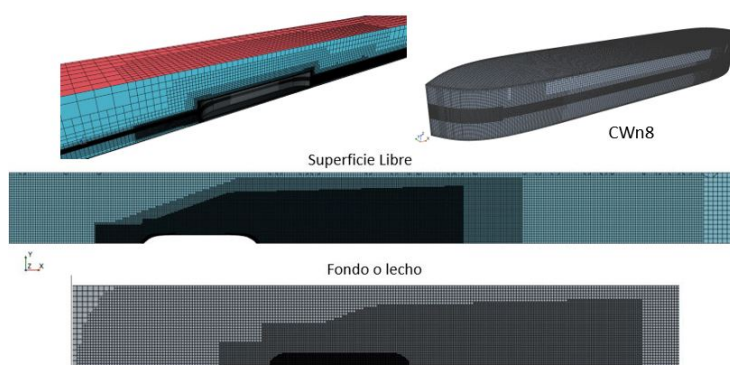


Figura 5: Malla generada en el dominio con celdas pseudo-estructuras. Detalle de la malla global y alrededor del modelo.

3.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos de la validación, entre los que se encuentran la configuración de olas y la velocidad en la superficie libre al costado del casco. Los valores de tensiones de corte en el lecho serán solo de carácter informativo, (ya que no fueron medidos en el modelo experimental). Respecto de las simulaciones numéricas, se realizaron dos tipos casi idénticos, con diferencias en la forma de aplicar el amortiguamiento. En ambas se aplicó un amortiguamiento tanto en la condición de borde de entrada (inlet) como en la salida (outlet), utilizando el modelo descrito en la Sección 3.2.4 con los parámetros correspondientes. En la primera simulación numérica (b) se generó una capa de amortiguamiento localizado con valores de longitud de la capa de 3,2 [m] en el inlet y 2,4 [m] en el outlet, no logrando el efecto deseado, sobre todo aguas arriba del modelo, generándose una ola que retrocedía hacia la entrada. En la segunda simulación, utilizamos un dominio extendido (c) y el amortiguamiento se realizó por región en forma global y en la zona de entrada, agregando uno en dirección transversal al flujo, sobre la pared del canal hasta la zona cercana al casco de la embarcación, logrando de esa manera amortiguar el efecto de la ola en retroceso, pero con el consecuente aumento en la profundidad en aproximadamente 0,01 [m]. Para el resto de la pared del canal, desde el modelo hacia la salida del flujo, se dejó sin amortiguar lo que permitió analizar el efecto del rebote de olas en las mismas.

3.3.1. Comparación de olas generadas por el casco entre resultados experimentales y numéricos

La Figura 6 muestra en forma gráfica los resultados experimentales (a), y los correspondientes a las dos simulaciones numéricas (b y c), correspondientes a los contornos de onda generados por el paso de un barco CWn8 a una velocidad de 0,8 [m/s], concluyendo:

- Los contornos de onda experimentales y numéricos exhiben un patrón de onda similar alrededor del barco.
- Las olas transversales se generan con un frente de onda perpendicular a la dirección de movimiento del barco.
- Las ondas divergentes presentan un frente de onda en forma de V.
- La intersección entre olas divergentes y transversales forman un área triangular detrás del barco, siendo dicha área mayor en la simulación numérica.
- La altura de olas generadas detrás del barco (a $X/L_{pp} > 1,5$) disminuye más rápidamente en los resultados numéricos que en los resultados experimentales.
- La reflexión de las olas en la pared del canal es mayor en los resultados experimentales.

Cabe aclarar que en el caso c) utilizamos un canal extendido, $8,5L$ hacia la entrada y $11L$ hacia la salida, medidos desde el casco.

La Figura 7, compara los perfiles de elevación del pelo de agua experimental (exp) y numéricos (num) para $Y/B = 1, 2$ y 3 . En dicha figura se observa una estrecha coincidencia entre ambos perfiles cerca del barco ($-1 < X/L_{pp} < 1$), no así lejos del mismo ($X/L_{pp} > 1$). La amplitud de onda obtenida en la simulación numérica también disminuye más rápido que en la experimental. Finalmente, los perfiles de la simulación numérica muestran un aumento de la

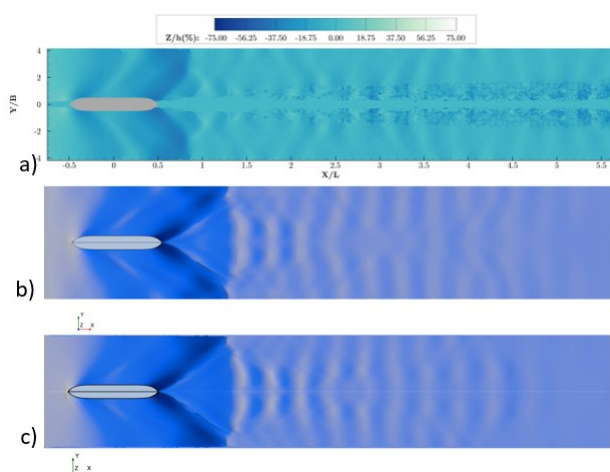


Figura 6: Contornos de onda generados por el paso del barco CWn8 a una velocidad de $0,8 [m/s]$: (a) resultados experimentales, (b) y (c) resultados numéricos.

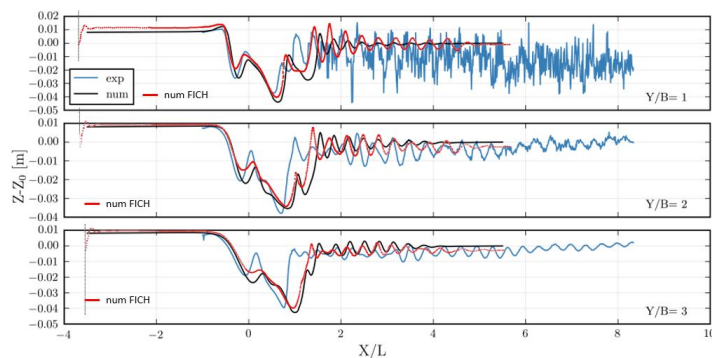


Figura 7: Perfil longitudinal de superficie libre Z (donde $Z_0 = 0,103 [m]$ corresponde a la profundidad del agua) en $Y/B = 1, 2, 3$.

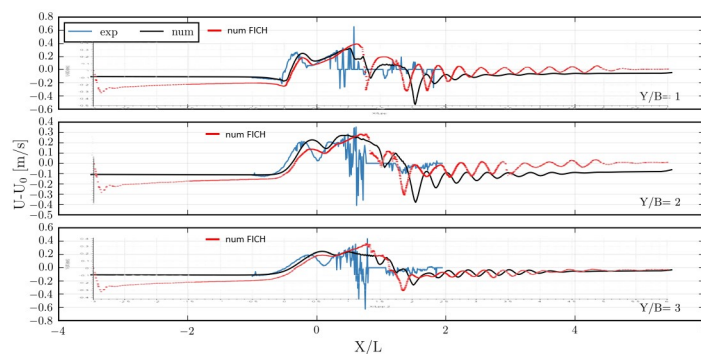


Figura 8: Perfil longitudinal de velocidad en la superficie libre: $U - U_0$ (donde $U_0 = 0,8 [m/s]$ es la velocidad del modelo) en $Y/B = 1, 2, 3$

profundidad del agua de alrededor de $0,01 [m]$ al comienzo del dominio numérico que no está presente en los perfiles experimentales, el mismo se generó a partir de la implementación del amortiguamiento impuesto para evitar el reflejo de la ola hacia la entrada del dominio. En la Figura 8 se muestra una comparación entre los resultados experimentales (exp) y numéricos (num) de los perfiles longitudinales para $Y/B = 1, 2$ y 3 para la velocidad relativa de superficie libre $U - U_0$, donde U_0 es la velocidad del modelo $0,8 [m/s]$. Ambas simulaciones exhiben perfiles

similares para dicha velocidad. Sin embargo, los perfiles longitudinales numéricos muestran un pico de velocidad negativo alrededor de $X/L = 1,5$ que no está presente en los perfiles experimentales. Este pico corresponde a la onda divergente que forma la base del triángulo descrito en la Figura 7, y concuerda con un aumento de la profundidad del agua creado por esta ola y con una disminución de la velocidad en la superficie libre. Los perfiles numéricos de la superficie libre también muestran una disminución de la velocidad de aproximadamente $0,2 [m/s]$ en la parte delantera del barco que se propaga hasta la entrada. Dicha disminución no aparece en los perfiles experimentales o por lo menos no fueron reportados. Físicamente, esos dos fenómenos (aumento de la profundidad del agua y disminución de la velocidad en la parte delantera del barco) podrían interpretarse como si la onda de proa se propagara numéricamente hasta el comienzo del dominio numérico. Finalmente, la rápida variación de la velocidad y sus picos observados en los datos experimentales se deben al ruido de la medición y no representan ningún comportamiento físico del fluido. Estos picos están ubicados después de la popa del barco donde el flujo es altamente turbulento y el método de medición óptica no es capaz de reconstruir con precisión el flujo de fluido. En general, el modelo numérico proporciona buenos resultados hidrodinámicos alrededor del barco. Para analizar más en profundidad lo dicho, en la Figura 9 muestra la velocidad relativa $U - U_0$ debajo del casco de la embarcación a $1,5 [cm]$ del lecho, donde se puede observar un crecimiento de la misma hacia el final. La Figura 10 muestra los valores de la tensión de corte en el fondo, pero no se han reportado datos experimentales para comparar. Destacamos esta variable como uno de los parámetros a obtener en futuras simulaciones a los efectos de analizar el comportamiento del sedimento y su resuspensión.

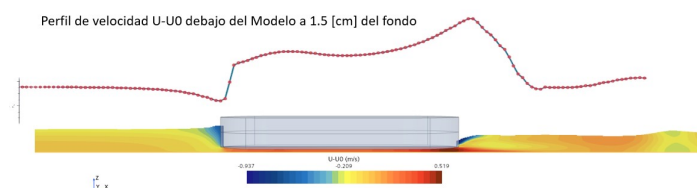


Figura 9: Perfil longitudinal de velocidad debajo del modelo: $U - U_0$ (donde $U_0 = 0,8 [m/s]$ es la velocidad del modelo) a $1,5 [cm]$ del fondo

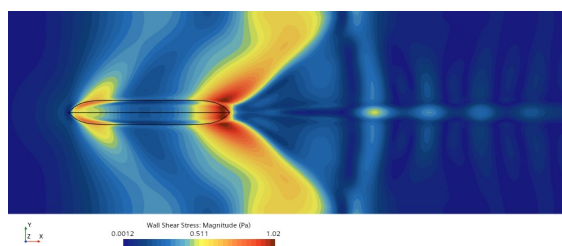


Figura 10: Tensión de corte en el fondo, en la vecindad del modelo

4. CONCLUSIONES

En general, el flujo hidrodinámico alrededor del modelo es bastante aproximado, a pesar de que la comparación entre los resultados empíricos y numéricos nos muestran algunas discrepancias en el patrón de olas generadas por dicho modelo:

- Escaso reflejo de las olas en las orillas, se debería analizar más detenidamente, tanto por el modelo turbulento como la discretización y capas límite.

- La amplitud de onda numérica está atenuada, los reportes experimentales suelen ser mayores.
- La onda de proa parece estar propagándose hacia la entrada, situación que mejora con la aplicación de un amortiguamiento transversal. Se recomienda analizar la influencia de los parámetros de amortiguamiento o el método utilizado de absorción.

Se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad sobre la influencia de varios parámetros numéricos en los resultados y mostró que:

- Las olas detrás del barco están fuertemente influenciadas por la distancia entre la popa y la salida, por lo que se debe tener en cuenta las dimensiones del dominio de simulación.
- La propagación de la onda de proa parece ser creada por un cambio en el régimen de flujo que surge de dar velocidad al fluido y no a la embarcación. Una alternativa sería utilizar la herramienta *OverSetMesh*, que permite mover cuerpos en flujos del tipo CFD.
- Un parámetro a tener en cuenta en futuras simulaciones es la discretización y su influencia en la propagación y amortiguamiento de olas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte brindado por la Facultad de Ingeniería y Recursos Hídricos (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, al proyecto CAI+D 2020 y al Aula FICH-CIMNE

REFERENCIAS

- Acosta Lopera D. Hydrodynamic analysis of inland vessel self-propulsion for cargo transport for navigability in the magdalena river. *Master thesis presented to the Polytechnic School of the University of Sao Paulo*, 2019.
- Caplier C., Linde F., Bernard A., Callaud A., David L., Ouahsine A., Rousseaux G., y Sergent P. Comparaison entre expérience et calcul des ondes générées par un bateau en eaux peu profondes. *Technical report*, 2015.
- Chatellier L., Jarny S., Gibouin F., y David L. Stereoscopic measurement of free surface flows. *EPJ Web of Conferences, EDP Sciences*, 6:12002, 2010.
- Ferziger J. y Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2002.
- Linde F. 3d modelling of ship resistance in restricted waterways and application to an inland eco-driving prototype. *Phd Thesis Mechanics, Université de Technologie de Compiègne*, 2017.
- Mangini S., Prendes H., Huespe J., y Palay Esquivel Y. Modelo físico sobre dragados a pié de muelle utilizando chorros de inyección de agua. *VI Simposio sobre métodos experimentales en Hidráulica. Paisandú., Uruguay*, 2019.
- Muzaferija S. y Perić M. Computation of free surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods, nonlinear water wave interaction. *Nonlinear Water Wave Interaction, WIT Press, Southampton*, páginas 59–100, 1999.
- Peric R. y Moustafa A.M. Reliable damping of free surface waves in numerical simulations. *Hamburg University of Technology (TUHH), Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory, Hamburg, Germany*, 63:1–42, 2017.
- STAR-CCM+ S. *Manual STAR-CCM+*. Simcenter STAR-CCM+ 23.02 Build 18.02.008 (win64/clang11.1vc14.2-r8 Double Precision), 2023.