

DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE LA SUPERFICIE LIBRE DE UN CANAL DE EXPERIENCIAS

FREE SURFACE PROFILE DETERMINATION IN AN EXPERIMENTAL CIRCULATING WATER CHANNEL

Alejandro Vaccari^a, Julio Giménez^a, Nicolás Antonelli^a, Nicolás Biocca^b, Gustavo E.
Carr^b y Santiago A. Urquiza^a

^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*

^bCONICET - Mar del Plata, Argentina, *http://mardelplata-conicet.gob.ar/*

Palabras clave: Canal de recirculación, fluidodinámica computacional, hidrodinámica naval

Resumen. Dada la complejidad del flujo en la zona circundante a las embarcaciones, los canales de experiencias han sido una herramienta fundamental en el diseño de las mismas, determinando, entre otras magnitudes, la resistencia al avance tanto por formación de ola como por efectos viscosos. Un aspecto fundamental de este tipo de instalaciones es el perfil de superficie libre y el resalto producido por el dissipador de torbellinos. Debido a su resistencia hidráulica, dicha componente puede ocasionar una variación significativa en el perfil de alturas de la superficie libre. En este trabajo se modela computacionalmente el régimen de flujo en el canal, teniendo en cuenta la geometría del mismo y las diferentes alturas y caudales de trabajo. Los objetivos principales de este trabajo son: determinar si la obstrucción provocada por el rompevórtices introduce perturbaciones significativas de la superficie libre en la zona de ensayos sin recurrir a costosos modelos físicos a escala; validar la hipótesis empleada en trabajos previos acerca de las pequeñas variaciones en la altura de la superficie libre. De esta manera, se obtiene como resultado el perfil de la superficie libre a lo largo del canal de ensayos.

Keywords: Recirculating channel, Computational Fluid Dynamics, Naval Hydrodynamics.

Abstract. Towing tanks and other recirculating experimental facilities have been fundamental tools for the ships design cycle, mainly due to the flow complexity around the vessel hull. They are used to estimate the corresponding hydrodynamic resistance due to wave formation and viscous effects. A core feature of this kind of devices is the free surface profile and its variation and jumps occurring near the the vortex dissipator. Due to its hydraulic resistance, that component could introduce disturbances on the free surface profiles in the trial zone. In this connection, the present work make focus on computational modeling of the flow regime in the channel, taking into account its geometry and flow rates. The main goal of this work is twofold: first, to determine by computational modeling if the obstruction caused by the breaker panel introduces significant disturbances on the free surface in the test area without having to lean on expensive physical reduced scale models; second, to validate the hypothesis used in previous works about small variations on the free surface height. Thus, a profile of the free surface along the channel is obtained.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de todo el siglo XX los canales de experiencias hidrodinámicas fueron una de las herramientas fundamentales de asistencia al diseño y al proyecto de buques y todo tipo de embarcaciones en los que se requería analizar el comportamiento en condiciones de servicio y otras variables relevantes como el arrastre, la estabilidad y la maniobrabilidad, como paso necesario a la construcción del mismo. Actualmente, con el vertiginoso progreso de los métodos computacionales y la capacidad de cálculo de los computadores, los ensayos experimentales comienzan a complementarse con los ensayos “in silicio”.

Los canales de experiencias están diseñados para generar condiciones de flujo controladas que permitan evaluar modelos a escala de embarcaciones o ciertas componentes específicas, con vistas a mejorar algún aspecto de su desempeño o producir los datos necesarios que permitan seleccionar de manera adecuada componentes tales como las plantas propulsoras. Básicamente existen dos tipos de canales, los de remolque y los de recirculación. Estos últimos, aunque requieren potencias de operación elevadas, presentan algunas características ventajosas: requieren una inversión inicial reducida, pudiendo operar durante lapsos de tiempo indefinidos a la vez que demandan instalaciones reducidas en porte. Reconociendo la relevancia de los canales de ensayos hidrodinámicos en el proyecto de buques, en la Facultad Regional Mar del Plata de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) se tomó la decisión de diseñar y construir un canal de ciclo cerrado con fines didácticos, científicos y de extensión. Para el diseño se ha tomado como punto de partida y principal referencia un caso similar expuesto por [Da Silva Ássi G. et al. \(2005\)](#), otras consideraciones adicionales pueden encontrarse en las referencias consignadas en dicho trabajo. Varios aspectos deben ser tenidos en cuenta durante el diseño del canal, fundamentalmente lograr condiciones de flujo uniformes y estables en la zona de análisis durante todo el ensayo. Es así que se torna relevante determinar si el panel rompevórtices introducirá perturbaciones en la altura de la superficie libre en la zona de ensayos. Dichas perturbaciones podrían ser pequeñas comparadas con la profundidad del canal pero significativas respecto a la escala de los modelos de buques a ensayar. Motivado en estos condicionamientos relevantes para el diseño, se recurre al modelado computacional basado en la discretización de las ecuaciones 1D de flujo en canales para descartar perturbaciones significativas en la zona de pruebas, evitando tener que recurrir a realizar ensayos con modelos físicos a escala del canal, que son costosos por naturaleza. Por otra parte, en trabajos anteriores ([Vaccari et al., 2016, 2017](#)), se analizó con modelos 3D de Navier-Stokes las complejidades del flujo debido la acción del panel rompevórtices en el ingreso a la sección de pruebas y también, la estructura del mismo en el colector de entrada. En dichos trabajos se analizó la estructura tridimensional del campo de velocidades despreciando el efecto de variación de altura en la superficie libre. Consecuentemente, otro objetivo de este trabajo es validar dicha hipótesis, determinando la forma del perfil de la superficie libre y el resalto producido por el dissipador de torbellinos. Debido a su resistencia hidráulica, dicha componente podría ocasionar una variación en la altura de la superficie libre que invalide las hipótesis utilizadas en aquellos trabajos. Asimismo, como la componente dominante del flujo es en la dirección de la línea progresiva del canal, los resultados del modelo 1D arrojarán valores significativos de las variaciones de altura sin tener que recurrir a modelos dimensionalmente más complejos.

Teniendo en cuenta los objetivos enunciados y las consideraciones ya señaladas, se modela por Elementos Finitos el régimen de flujo en el canal, llevando en consideración las variaciones geométricas del ancho en las distintas secciones del mismo. Además se evalúan los caudales de trabajo significativos según requerimientos de diseño. Así se obtiene como resultado el perfil

Tipo de Circuito	Horizontal, de ciclo cerrado
Área de ensayo	(5700 x 1000 x 550) mm
Velocidad de ensayo	(0,15-0,50) m/s
Caudal de circulación	650 m ³ /h
Impulsor	Bomba centrífuga axial
Potencia	38 kW
Tipo de fluido	Agua dulce

Tabla 1: Especificaciones técnicas.

de la superficie libre desde el colector de entrada hasta el colector de salida, incluyendo la zona de ensayos, poniendo énfasis en las alturas de resalto producidas por el panel rompevórtices asociadas a variaciones en los niveles de resistencia hidráulica del mismo. En las siguientes secciones se presenta una breve descripción de las características del canal, el modelo computacional implementado y los correspondientes resultados obtenidos.

2. ESPECIFICACIONES DEL CANAL DE ENSAYOS HIDROSIM-UTN

Las principales características técnicas del canal Hidrosim-UTN son detalladas brevemente en lo que sigue, indicándose valores de los parámetros de diseño más significativos. En [Vaccari et al. \(2016\)](#) se enuncian las razones que definen los aspectos fundamental del diseño y sus características esenciales, entre otros, el sistema impulsor por bomba centrífuga y cañerías en la parte inferior de la zona de pruebas.

2.1. Especificaciones de diseño

Un esquema del canal de recirculación Hidrosim-UTN puede apreciarse en la Figura 1. En la misma se observa la sección de ensayos diseñada para permitir analizar modelos a escala en un rango de 1 : 50 a 1 : 30, con números de Froude del orden de 0, 15 y velocidades del fluido entre 0, 15 y 0, 50 m/s. Estos valores se alcanzan impulsando el agua con una bomba centrífuga de 650 m³/h y 38 kW de potencia. Las principales características de diseño se detallan en la Tabla 1.

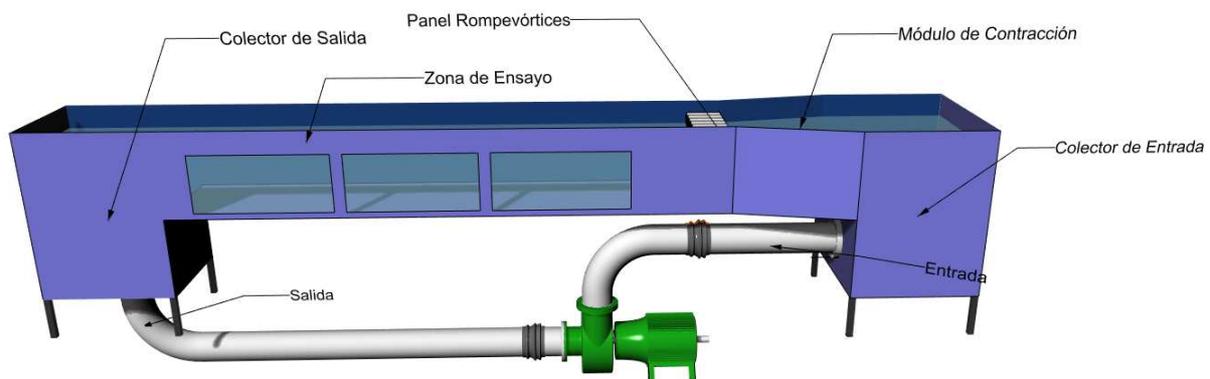


Figura 1: Modelo del canal HidroSim-UTN.

2.2. Principales dimensiones

El canal posee una longitud total de 8,00 m de largo, un ancho de 1,00 m y una altura máxima de 0,55 m en la sección de ensayo. El mismo está dividido en tres componentes principales. En su comienzo se encuentra el colector de entrada, el módulo de contracción y el panel rompevórtices (Figura 2), que direccionan el flujo hacia el sector de ensayos. La zona siguiente es la de pruebas, de 5,70 m de longitud, 1,00 m de ancho y 0,50 m de altura efectiva en condiciones normales. Éste es el sector en donde se ensaya el modelo hidrodinámico y se realizan las determinaciones, para desembocar en el colector de salida. La retrocirculación se canaliza mediante una tubería de 10 pulgadas de diámetro y una bomba centrífuga ubicadas en la parte inferior del canal.

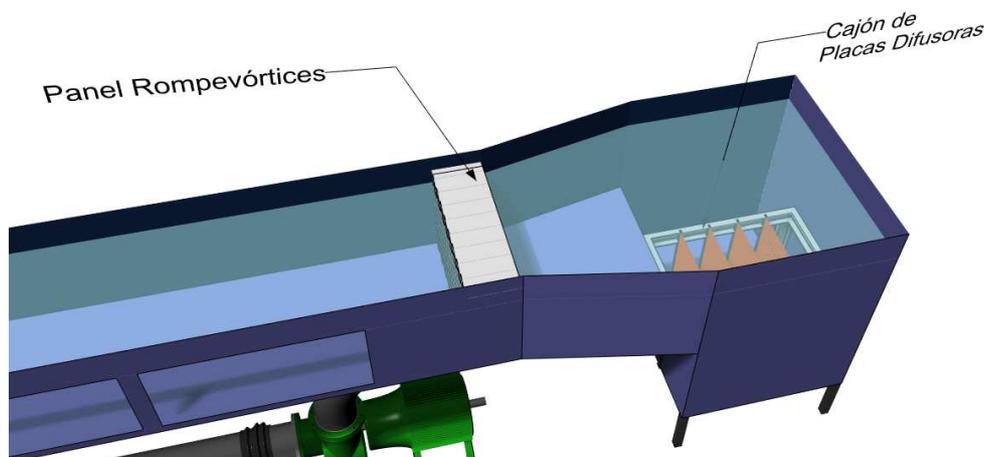


Figura 2: Detalle del colector de entrada.

3. MODELADO COMPUTACIONAL

En esta sección se presentan las ecuaciones 1D para flujos en canales abiertos que modelan adecuadamente el régimen hidrodinámico y la variación de altura a lo largo de las diferentes secciones del dispositivo. En flujos transitorios en canales abiertos, se asume que la profundidad y la velocidad del agua cambian con el tiempo y la posición longitudinal.

3.1. Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de momento y continuidad unidimensionales para cálculos de superficie libre se conocen como las ecuaciones de Saint-Venant (Chanson, 2004). Los supuestos básicos de la ecuación de Saint-Venant son: (1) el flujo es unidimensional; (2) la curvatura de las líneas de corriente es pequeña y la distribución de presión es hidrostática; (3) la resistencia viscosa se manifiesta a través de la tensión de corte en la pared; (4) las pendientes del canal son pequeñas y varían suavemente; (5) densidad de agua constante. Teniendo en cuenta estos supuestos, cada punto en a lo largo de la coordenada progresiva, se puede caracterizar por dos variables, V y h : donde V es la velocidad y h es la profundidad del agua. De esta forma, el problema queda bien descrito por el siguiente sistema de dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para dichas variables:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} + h v b = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -g \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} + g \operatorname{sen}(\theta) - \frac{\tau}{\rho D_h} \quad (2)$$

donde t es el tiempo, $A = B \cdot h$ es el área de la sección transversal, B es el ancho de la superficie libre, x es la coordenada progresiva en la dirección del movimiento principal, $b = 1/B \cdot dB/dx$ es la pendiente relativa del lecho, θ es el ángulo entre el lecho y la horizontal, con $\theta > 0$ para una pendiente descendente y τ es la tensión de corte en el perímetro mojado. Dicho valor se obtiene de las correlaciones de capa límite para placas planas. En lo sucesivo se asume fondo plano, es decir, $\theta = 0$.

Como es evidente, la ecuación 1 es la de continuidad del flujo o conservación de masa y 2 es la ecuación de momento (Chanson, 2004). Esto resulta en un sistema de dos ecuaciones hiperbólicas de primer orden que presentan analogía con aquellas de propagación de ondas en tubos flexibles. De esta manera, se aprovecha la metodología expuesta en Urquiza et al. (2006) para su discretización por elementos finitos empleando técnicas de estabilización del tipo *Least-Squares* a lo largo de las líneas características. Dada la naturaleza hipérbolica de 1-2 este sistema puede reescribirse mediante el análisis de las líneas características (Richtmyer y Morton, 1967) como un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias,

$$\begin{cases} \frac{Dh}{Dt} + \alpha_+ \frac{Dv}{Dt} = \beta_+; & \text{sobre } \dot{x} = \lambda_+; \quad \lambda_+ = v + \sqrt{gh} \\ \frac{Dh}{Dt} + \alpha_- \frac{Dv}{Dt} = \beta_-; & \text{sobre } \dot{x} = \lambda_-; \quad \lambda_- = v - \sqrt{gh} \end{cases} \quad (3)$$

en el cual se han utilizado las siguientes definiciones,

$$\alpha_{\pm} = \pm \sqrt{\frac{h}{g}} \quad \text{y} \quad \beta_{\pm} = d_M + \alpha_{\pm} d_I \quad (4)$$

siendo $d_M = -h v b$ y $d_I = -\tau/(\rho D_h)$.

Volviendo a introducir en el sistema 3 la notación en derivadas parciales resulta

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \lambda_+ \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \alpha_+ \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \lambda_+ \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \beta_+ = 0 \\ \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \lambda_- \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \alpha_- \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \lambda_- \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \beta_- = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Para obtener el método numérico utilizado en este trabajo, comenzamos con una discretización temporal del sistema 5 con un clásico esquema de Crank-Nicholson,

$$\left(\frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} + \lambda_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{n+\frac{1}{2}} \right) + \alpha_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t} + \lambda_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{n+\frac{1}{2}} \right) - \beta_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} = 0 \quad (6)$$

Haciendo uso de las funciones de forma usuales de Elementos Finitos con interpolación lineal de clase C^0 para las variaciones espaciales de h y v , se obtienen dos residuos,

$$\mathcal{R}^{\pm} = \frac{h_i^{n+1} \phi_i - h_i^n \phi_i}{\Delta t} + \lambda_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \frac{\partial h_i^{n+\frac{1}{2}} \phi_i}{\partial x} + \alpha_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{v_i^{n+1} \phi_i - v_i^n \phi_i}{\Delta t} + \lambda_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \frac{\partial v_i^{n+\frac{1}{2}} \phi_i}{\partial x} \right) - \beta_{\pm}^{n+\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Finalmente obtenemos el sistema de ecuaciones para las variables discretas por medio de la técnica de mínimos cuadrados, resultando en

$$\int (\mathcal{R}^+ \mathcal{L}_{h,j}^+ + \mathcal{R}^- \mathcal{L}_{h,j}^-) dx = 0$$

$$\int (\mathcal{R}^+ \mathcal{L}_{v,j}^+ + \mathcal{R}^- \mathcal{L}_{v,j}^-) dx = 0$$
(8)

con

$$\mathcal{L}_{h,j}^\pm = \phi_j + \lambda_\pm^{n+\frac{1}{2}} \tau \frac{\partial \phi_j}{\partial x}; \quad \mathcal{L}_{v,j}^\pm = \alpha_\pm^{n+\frac{1}{2}} \left(\phi_j + \lambda_\pm^{n+\frac{1}{2}} \tau \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \right)$$
(9)

Como se observa en la ecuación 9 las funciones de peso han sido modificadas en las expresiones 8 para introducir ponderación a contracorriente (“upwinding”) por medio del parámetro de tiempo característico τ . Con la elección adecuada de dicho parámetro el sistema 8 puede ser interpretado alternativamente como una formulación de cuadrados mínimos del tipo LSFEM (Carey y Jiang, 1988; Jiang y Carey, 1988) o como una formulación del tipo GLS, “Galerkin Least Squares”, (Hughes et al., 1989), de acuerdo con las siguientes elecciones:

$$\tau = \frac{\Delta t}{2} \rightarrow LSFEM$$
(10)

$$\tau = \frac{\Delta x}{2 |\lambda_\pm^{n+\frac{1}{2}}|} \rightarrow GLS$$
(11)

El sistema de ecuaciones algebraico resultante es no lineal, lo que lleva a utilizar un esquema iterativo de reemplazos sucesivos, conocido también como iteraciones del tipo Piccard.

Esta metodología presenta la ventaja de lograr resultados precisos y estables frente a los fenómenos propagatorios por introducir el upwinding correcto de manera natural, cuestión que no es obvia en el sistema de ecuaciones original 1-2. Al mismo tiempo, la implicitud del esquema permite que en ciertas zonas el número de Courant sea mayor a la unidad, lo que hace posible elegir el paso de tiempo para mantener valores promedio próximos a la unidad manteniendo la precisión en niveles óptimos. Si definimos $\lambda_m = \overline{max(|\lambda_\pm|)}$ como el valor medio espacial de las máximas velocidades de propagación de ondas a nivel local y, definimos el correspondiente número de Courant como $\mathcal{C}_0 = \lambda_m \Delta t / \Delta x$, entonces el paso de tiempo a utilizar en los cálculos para que el esquema opere con $\mathcal{C}_0 = 1$, queda definido por $\Delta t = \Delta x / \lambda_m$. Es interesante observar que para números de Courant próximos a la unidad ambas opciones de elección de τ , señaladas en 10-11, arrojan resultados indistinguibles.

En todos los cálculos se discretizó el dominio espacial con un tamaño de malla uniforme de 1 cm y se eligió el paso de tiempo de forma automática para que resulten números de Courant locales próximos a la unidad, de acuerdo a lo explicitado en el párrafo anterior.

El problema discreto es resuelto en un programa de propósito general que permite implementar tanto el Método de Elementos Finitos como otros métodos computacionales tales como los de Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos y Elementos de Contorno, desarrollado por el grupo (Urquiza y Venere, 2002; Dondero et al., 2008).

4. CASOS EVALUADOS

La figura 3 muestra la vista superior del dominio haciendo uso de la simetría del plano medio. De la misma pueden extraerse las coordenadas de los puntos significativos de la malla.

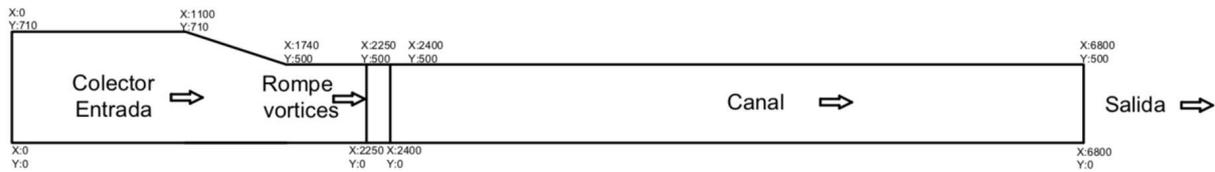


Figura 3: Vista superior del modelo del canal.

Se evaluaron casos que evidencian la estructura de la superficie libre para 2 tamaños de orificios del panel rompevórtices (ojos del panel) que determinan en gran medida la resistencia a la circulación sobre la corriente del canal. Para ello se consideró al panel como conformado por una placa perforada sobre la base de una cuadrícula de 1 cm de lado, en cuyos centros se realizan perforaciones, de las cuales se siguen conductos de 15 cm de longitud que son los encargados de filtrar los vórtices de tamaño mayor a su diámetro. El efecto resistivo de los conductos es llevado en cuenta considerando al panel como un volumen con una permeabilidad congruente con la resistencia de flujo completamente desarrollado a través de los conductos por los cuales se ve obligado a circular la corriente. En el primer caso, Caso 1, se asume un caudal de $Q = 0,18\text{ m}^3/\text{s}$ que para la altura de llenado elegida se corresponde a la máxima velocidad de ensayo preestablecida. En el segundo, identificado como Caso 2 se elige un caudal $Q = 0,054\text{ m}^3/\text{s}$ que resulta en velocidades iguales a las mínimas del rango de operación previsto. Se pretende mostrar que la introducción del panel rompevórtices no introduce variaciones de altura en el perfil de la superficie libre que impongan exigencias especiales, y cuya influencia no perturba significativamente la zona de ensayos para los diferentes caudales de operación. En ambos casos se obtiene el perfil de alturas a lo largo del canal para dos tamaños de ojo del panel rompevórtices de 1 cm y de $0,5\text{ cm}$. Las simulaciones fueron realizadas con un paso de tiempo elegido para que el número de Courant máximo sea igual a la unidad, hasta alcanzar los 150 s donde se obtienen soluciones estacionarias.

5. RESULTADOS

5.1. Caso 1

En la Figura 4 se presentan los resultados de la simulación para el Caso 1 para ambos diámetros de ojo del panel rompevórtices. Se observa que para los valores de caudal operativo máximo no se evidencian variaciones de altura que introduzcan dificultades a tener en cuenta especialmente, encontrándose un perfil de superficie libre relativamente plano en la zona de ensayos. Por otra parte, es éste un requerimiento de diseño que debía ser respetado y que los resultados obtenidos confirman.

En la Figura 5 se observan resultados análogos para el valor de caudal del que resultan velocidades del orden de las mínimas de diseño para las mismas resistencias del panel rompevórtices que en el caso 5.1. Nuevamente, las variaciones de altura de la superficie libre a lo largo del canal se mantienen en un rango que no conllevan resaltos significativos. Es más, incluso en la sección de entrada al panel rompevórtices, donde el ancho del canal sufre una fuerte reducción en el ancho, las variaciones de altura resultan pequeñas comparadas con los valores de llenado del canal.

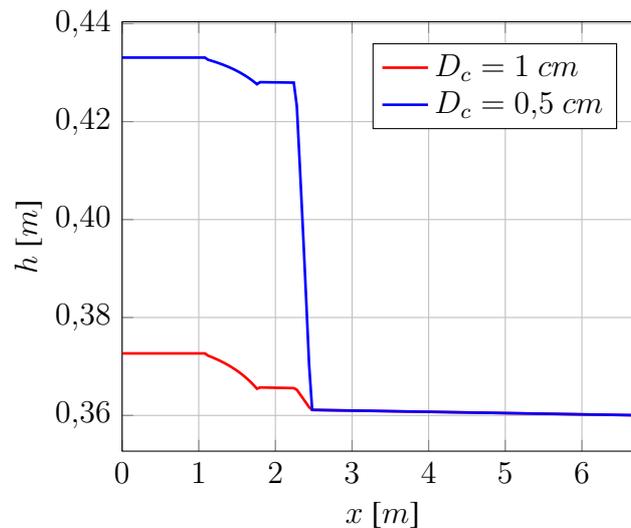


Figura 4: Caso 1, perfil de alturas para $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$

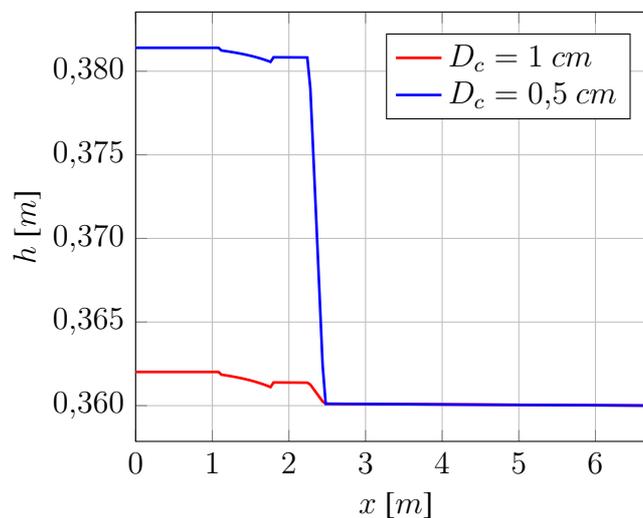


Figura 5: Caso 2, perfil de alturas para $Q = 0,054 \text{ m}^3/\text{s}$

6. CONCLUSIONES

Se ha implementado un modelo unidimensional para las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento que permitió obtener las variaciones de altura de la superficie libre a lo largo de las diferentes secciones del canal de ensayos hidrodinámicos HidroSim-UTN.

Los resultados precedentes permiten anticipar, con esquemas sencillos y a bajo costo computacional, que la estructura del perfil de la superficie libre presenta variaciones que se encuentran dentro de los valores previstos, no imponiendo exigencias adicionales a tener en cuenta para los distintos valores de caudal y filtros de vórtices que se utilizarán. Se observa una estructura de perfil adecuada en la zona de ensayo, ejerciendo el rompevórtices su influencia en una zona bien localizada en sus inmediaciones, lo que da como resultado un perfil de alturas suave y regular en la zona de ensayos, que era lo requerido por diseño. Finalmente, puede señalarse que dentro de cada tramo, excepto en la sección localizada del filtro, la superficie libre puede considerarse plana a los efectos de cálculos tridimensionales del tipo de los realizados en [Vaccari et al. \(2016, 2017\)](#).

REFERENCIAS

- Carey G.F. y Jiang B.N. Least-squares finite elements for first-order hyperbolic systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1988. ISSN 10970207. doi: 10.1002/nme.1620260106.
- Chanson H. The hydraulics of open channel flows: An introduction. página 630, 2004.
- Da Silva Ássi G., Romano Meneghini J., Penteado Aranha J, y Coletto W. Design, assembling and verification of a circulating water channel facility for fluid dynamics experiments. *Proceedings of COBEM 2005 18th International Congress of Mechanical Engineering*, 2005.
- Dondero M., Santiago D., y Urquiza S. Un framework orientado a objetos para la implementación de métodos discretos. *Mecánica computacional*, XXVII:2959–2965, 2008. ISSN 1666-6070.
- Hughes T.J.R., Franca L.P., y Hulbert G.M. A new finite element formulation for computational fluid dynamics: VIII. The galerkin/least-squares method for advective-diffusive equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1989. ISSN 00457825. doi: 10.1016/0045-7825(89)90111-4.
- Jiang B.N. y Carey G.F. A stable least-squares finite element method for non-linear hyperbolic problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 8(8):933–942, 1988. doi: 10.1002/flid.1650080805.
- Richtmyer R.D. y Morton K.W. *Methods for Initial-Value Problems*. Interscience Publishers, 1967.
- Urquiza S.A., Blanco P.J., Vénere M.J., y Feijóo R.A. Multidimensional modelling for the carotid artery blood flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195:33-36, 2006. ISSN 0045-7825.
- Urquiza S.A. y Venere M.J. An application framework architecture for FEM and other related solvers. *MECANICA COMPUTACIONAL Vol.XXI*, páginas 3099–3109, 2002. ISSN 1666-6070.
- 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.