

## ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA EVALUAR LA INFLUENCIA DE MACRORRUGOSIDADES EN FLUJOS A ESCALA DE LABORATORIO

### NUMERICAL-EXPERIMENTAL STUDY TO EVALUATE THE INFLUENCE OF MACROROUGHNESSES IN FLOWS IN LABORATORY SCALE

Laura E. Motta Milesi<sup>1</sup>, I. Matías Ragessi<sup>1</sup>, Candelaria Joaquin<sup>1,2</sup>, Leticia Tarrab<sup>1</sup>,  
Román G. Martino<sup>1,2</sup>, Gerardo Hillman<sup>1</sup> y Andrés Rodríguez<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> *Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina ; [emottamilesi@mi.unc.edu.ar](mailto:emottamilesi@mi.unc.edu.ar)*

<sup>2</sup> *Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Córdoba, Argentina.*

**Palabras Clave:** Macrorrugosidades, Fluido Dinámica Computacional, Flujo a dos fases

**Resumen.** La presencia de macrorrugosidades, produce cambios en la hidrodinámica y en la superficie libre (elevación de la superficie del agua); que son relevantes en la distribución de velocidades en la interfaz agua-aire y su relación con el perfil de velocidades en profundidad. Una alternativa a las técnicas experimentales de laboratorio, para estudiar en detalle esta interrelación, es mediante la aplicación de Fluido-Dinámica Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Un modelo validado con datos experimentales permite estudiar la dinámica de flotadores (trazadores) en flujos rápidamente variados, caracterizar mejor el flujo medio y fluctuación turbulenta cerca de la superficie libre. En este trabajo se reportan avances en la validación con datos experimentales de un modelo bidimensional a dos fases (agua-aire), que incorpora una macrorrugosidad (hemicilindro) en el fondo del canal. El software empleado es OpenFOAM(R), que es de código libre y abierto.

**Keywords:** Macroroughnesses, Computational Fluid Dynamics, Two-phase flow

**Abstract.** The presence of macroroughnesses, produces changes in the hydrodynamics and in the free surface (elevation of the water surface) of the flow; which are relevant in the velocity distribution at the water-air interface and its relation with the velocity profile in depth. An alternative to laboratory experimental techniques to study this interrelationship in detail, is through the application of Computational Fluid Dynamics (CFD). A validated model with experimental data allows to study the dynamics of floats (tracers) in rapidly varying flows, characterizing more precisely mean flow and turbulent fluctuation near the free surface. This work reports advances in the validation with experimental data of a two-dimensional model with two phases (water-air), which incorporates macroroughnesses (hemicylinder) arranged in the bottom of the channel. It's been used a free and open-source software called OpenFOAM(R).

## INTRODUCCIÓN

Los lechos de grava en cauces de montaña, típicamente presentan macrorrugosidades. Estas producen cambios en la hidrodinámica y en la superficie libre (elevación de la superficie del agua). Los cambios son tanto a nivel superficial, es decir en la distribución de velocidades en la interfaz agua-aire, como en el perfil de velocidades en profundidad. Estudiar en detalle la interrelación de las macrorrugosidades con el flujo a través de técnicas experimentales clásicas, puede presentar gran dificultad. Esta dificultad en la caracterización experimental de estos flujos radica en que las velocidades presentan elevada variabilidad espacio-temporal debido a que son flujos confinados (o semiconfinados): una capa escurre entre los obstáculos (macrorrugosidades) y otra sobre ellos. En consecuencia, en ríos y canales naturales, la superficie libre del flujo tiene mucha distorsión para poder ser capturada con adecuada precisión mediante técnicas de velocimetría por imágenes (PIV: Particle Image Velocimetry). Una alternativa para estudiar en detalle esta interrelación es mediante la aplicación de la Fluidodinámica Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

En este trabajo se intenta caracterizar este tipo de flujos complejos aplicando modelos numéricos a dos fases validados con datos experimentales. La fluidodinámica computacional permite estudiar flujos rápidamente variados, caracterizar mejor el campo medio de velocidades y las fluctuaciones turbulentas, al mismo tiempo que capturar con precisión la interfaz agua-aire (Ragessi et al., 2014). Este tipo de modelos se puede aplicar también para estudiar la dinámica de flotadores (trazadores), comúnmente utilizados para la caracterización experimental del flujo en laboratorio. Esta información base es de utilidad en el uso de técnicas de cuantificación remota de caudales, que utilizan la velocimetría por imágenes digitales del campo del flujo superficial en condiciones no ideales.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos experimentales se realizaron en un canal prismático de pendiente variable que se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba. El mismo cuenta con dos cubas, una de ingreso y otra de salida que están conectadas a los extremos del canal. Éste tiene 2,5m de longitud, 0,26m de profundidad máxima y 0,08m de ancho. Además, cuenta con una cuba de almacenamiento y un banco de recirculación. Las paredes laterales son de acrílico y las cubas, al igual que la base del canal, son metálicas y revestidas con pintura tipo epoxi. El flujo al ingreso se acondicionó con un tranquilizador de piedras en el fondo de la cuba de ingreso y un rectificador construido con un paquete de sorbetes de 5mm de diámetro y 15cm de longitud, alineados con el flujo longitudinal en el canal. El obstáculo tipo Bump montado en el lecho consistió en un hemcilindro, de 2cm de radio y longitud igual al ancho del canal y fue construido con una impresora 3D. El diámetro de los hilos utilizados para la impresión es de 0,8mm, esta característica se tuvo en cuenta a la hora de definir la rugosidad de las paredes del modelo numérico, en algunos de los casos. El centro de la sección semicircular se ubicó a 1,40m del ingreso del canal.

Para realiza la medición de caudal ( $Q$ ) se utilizó la técnica de aforo volumétrico, que consiste en la medición de volúmenes en un determinado tiempo. El campo de velocidades del flujo y los perfiles de velocidades se midieron usando la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, por su sigla en inglés). El PIV es una técnica no intrusiva de medición, que realiza un análisis Euleriano, aplicando técnicas de correlación cruzada entre cuadros consecutivos de una filmación del campo de flujo, subdividiendo la Región de Interés (ROI, por sus siglas en inglés) en ventanas de inspección, en el centro de las cuales se asigna un vector velocidad.

Para aplicar la técnica, se siembran partículas trazadoras de flotabilidad neutra (densidad relativa 1,03) y 90 micrones de tamaño medio en el seno del fluido, las cuales se visualizan en un plano de interés mediante una lámina láser verde (NeoYag532nm) de 2mm de espesor, como se muestra en la Fig.1. Las partículas se filman con una cámara digital rápida cuyo eje óptico es perpendicular a la lámina láser. Mediante esta técnica también se extrajo la altura de la superficie libre a lo largo de la sección de ensayo. Estas mediciones fueron complementadas con mediciones puntuales mediante un limnómetro ( $\pm 0,1$ mm).

Para el caso en estudio, se registró el flujo con una cámara Sony DSC-RX100M5, configurada a 480 fps (frames por segundo) y se obtuvieron 1756 cuadros (frames) por cada punto analizado. La ventana de inspección utilizada es de  $32 \times 32$  píxeles ( $0,013$ cm/px en el plano físico). Los videos fueron procesados con la herramienta computacional RIVeR (Rectificación de los resultados de velocidad de imagen); y luego, la secuencia de imágenes obtenidas de los videos se procesaron a través del software PIVlab, a partir de la cual se obtuvo el campo de velocidades, tanto instantáneo como medio.

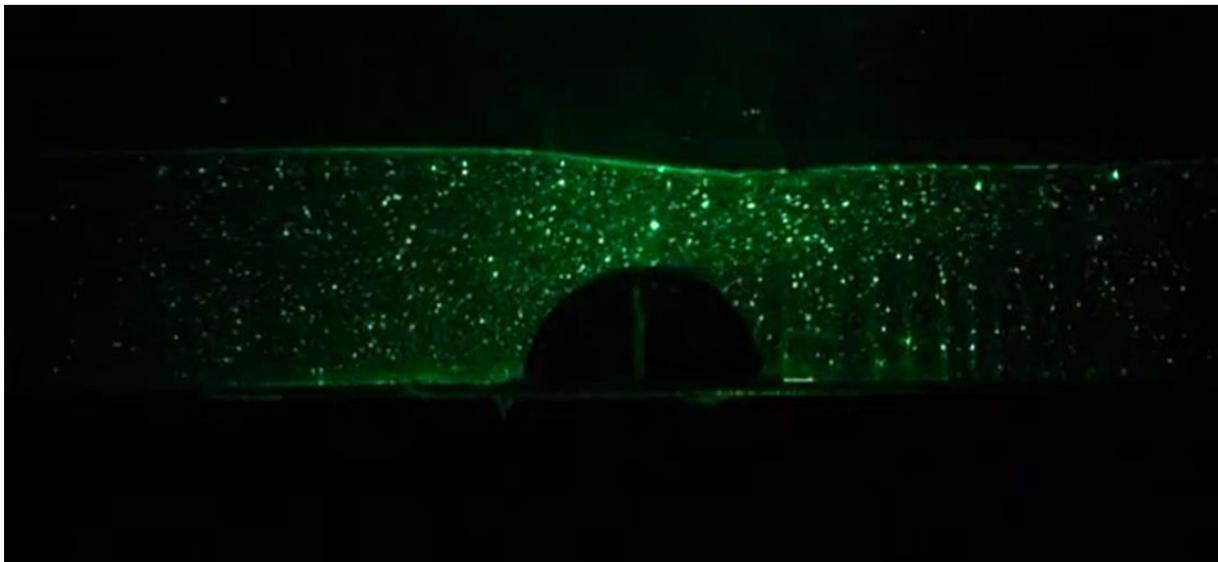


Figura 1- Visualización con láser de las partículas trazadoras.

## MODELO NUMÉRICO

Para la modelación numérica se utilizaron principalmente 2 softwares: 1) GMSH (Geuzaine y Remacle, 2009), que es de código libre, para la generación de la geometría y las mallas; y 2) OpenFOAM(R), que es de código libre y abierto, para la modelación numérica. Se optó por utilizar un modelo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, conocidas como RANS por sus siglas en inglés (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). La modelación se realizó con el solver interFoam de OpenFOAM® a través del método de volúmenes finitos. Se realizó un modelo a dos fases (aire-agua), con modelo de cierre  $k\omega$ SST (Menter et alri, 2003), en una geometría simplificada 2D. Cabe destacar que se consideraron a ambas fases con densidad constante. En la Fig. 2 se muestra un gráfico del canal modelado.

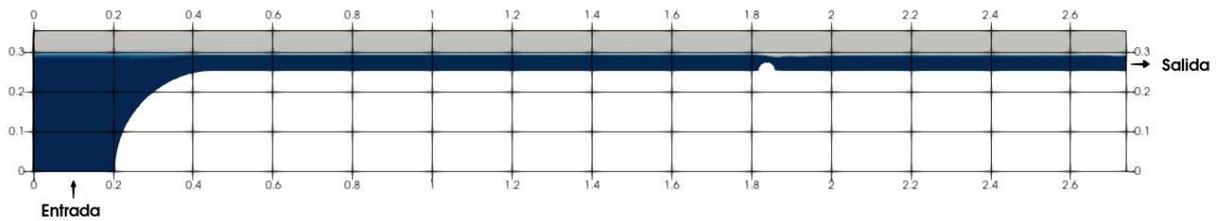


Figura 2- Esquema del canal modelado con sus dimensiones en metros.

### Dominio Geométrico y Discretización

En cuanto a la generación de mallas, se realizó un modelo 2D donde el ancho del canal (0,08m), no tiene subdivisiones en celdas. Se supone que el canal modelado es una faja de flujo, por lo que los efectos de las paredes se desprecian y se han seteado con la condición “empty”. Esto sería similar a suponer que estamos trabajando con un canal de ancho infinito en el cual, en la zona central, la influencia de las paredes es despreciable. Es por esto que sólo se tienen en cuenta los efectos de fricción en el fondo y en el obstáculo. En las otras dos direcciones, se realizó un refinamiento gradual, teniendo mayor resolución en la zona donde se encuentra la macrorrugosidad, como se muestra en la Fig. 3.

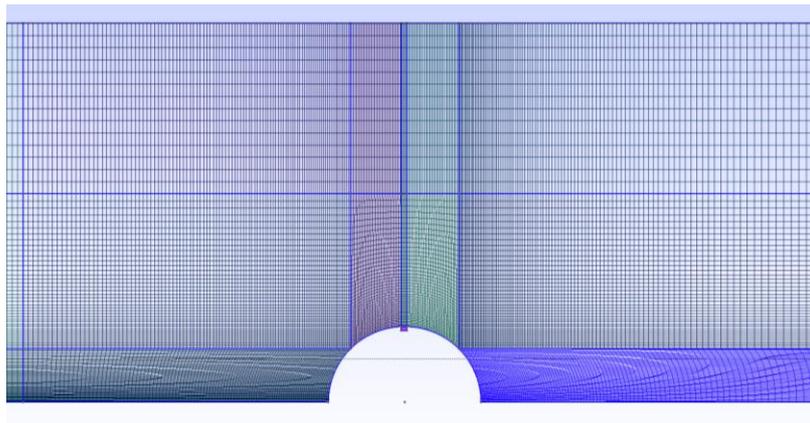


Figura 3- Mallado progresivo

En el caso modelado hay presencia de un resalto hidráulico, que característicamente presenta una posición fluctuante. Experimentalmente, esto se mide lateralmente y se termina comparando el promedio de estas posiciones, con el promedio de las posiciones en el modelo. Es por esto que se consideró menester realizar un modelo 2D para poder tener un mejor ajuste de los parámetros del mismo, previa a la modelación en 3D.

Para definir el tamaño de las celdas se realizó un análisis de convergencia. Para este, se plantearon las mallas con distintos tamaños de celda en las direcciones ‘x,y’ pero con la misma profundidad (dirección z en todos los mallados es de 0,08m de profundidad); se verificó que el tamaño de longitud de celda sea mayor al menos en un 30% entre malla y malla. Ver Ec. (1) y (2):

$$r = \frac{\sqrt{(\text{áreamayor})}}{\sqrt{(\text{áreamedia})}} \quad (1)$$

$$r = \frac{\sqrt{(\text{áreamedia})}}{\sqrt{(\text{áreamenor})}} \quad (2)$$

Donde: *área mayor* es el área que resulta de dividir el volumen más grande de celda usado (el mallado de menor resolución) por el espesor de 0,08m ya que el modelo es bidimensional; *área media* es el área que resulta de dividir el volumen de celda del mallado intermedio (el de media resolución) por el espesor del modelo; *área menor* es la menor área que resulta de dividir el menor volumen de celda utilizado (mallado de mayor resolución) por el espesor del modelo.

Cabe aclarar que los volúmenes tomados son los menores volúmenes de celdas de cada mallado, esto es para poder comparar los resultados obtenidos en distintos modelos de turbulencia y formas de mallar. Estos volúmenes corresponden a los contiguos o colindantes al hemisilindro, que es donde las mallas poseen mayor refinamiento. En estos casos se verificó que el Error Relativo sea menor al 10% para asegurar la independencia de los resultados respecto del mallado.

### Solver

El solver utilizado para realizar la modelación es interFoam de OpenFOAM(R), que utiliza el método de volúmenes finitos. Este resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para dos fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles. Es decir, las propiedades de los materiales son constantes, excepto en la interfase.

La ecuación de continuidad está dada por (ver Ec. (3)):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

La ecuación de cantidad de movimiento usada está dada por (ver Ec.(4)):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tij}) + \rho g_i + f_{\sigma i} \quad (4)$$

donde:

$u$  es la velocidad;  $g_i$  la gravedad;  $p$  la presión;  $\tau_{ij}$  la tensión viscosa;  $\tau_{tij}$  la tensión turbulenta;  $f_{\sigma i}$  es la tensión superficial y  $\rho$  es la densidad.

La densidad es definida como (ver Ec. (5)):

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (5)$$

donde  $\alpha$  toma valor de 1 o 0 dependiendo de la fase en la que está, y valores entre 0 y 1 en la interfase.

La tensión superficial se modela como una fuerza continua como (ver Ec. (6)):

$$f_{\sigma i} = \sigma k \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (6)$$

donde  $\sigma$  es la constante de tensión superficial y  $k$  la curvatura, dada por (ver Ec. (7)):

$$k = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (7)$$

Para la interfase se debe resolver una ecuación adicional para  $\alpha$  (ver Ec. (8)):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

## Modelo de Cierre

Con respecto al modelo de cierre, se optó por utilizar  $k\omega$ SST (Menter et al., 2003) donde SST es por Transporte por Esfuerzo Cortante, (en inglés Shear Stress Transport). Este combina los modelos  $k-\varepsilon$  y el modelo  $k-\omega$ . En las zonas cercanas a la pared, utiliza el modelo  $k-\omega$  y fuera de la capa límite  $k-\varepsilon$ . El modelo resuelve dos ecuaciones de conservación: una para la energía cinética turbulenta y otra para la tasa específica de disipación. El modelo que se utilizó es el propuesto por Menter y Esch (2001), pero con los coeficientes actualizados presentados en The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (<http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>) y por Menter et. al., (2003). El término adicional  $F_3$  (Hellsten A., 1997) para paredes rugosas es igual a cero.

## ESCENARIOS MODELADOS

En el modelo a dos fases (aire-agua), se consideraron los fluidos como isotérmicos e incompresibles, para el agua, la densidad adoptada es de  $1000 \text{ kg/m}^3$  y la viscosidad cinemática de  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ; para el aire, la densidad adoptada es de  $1 \text{ kg/m}^3$  y la viscosidad cinemática de  $1,48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . En todos los escenarios se buscó trabajar con un número de Reynolds de aproximadamente 5000, ya que este valor era el obtenido en el canal experimentalmente. Se establecieron como condiciones generales de borde: un valor de velocidad fijo en el ingreso y un valor fijo o perfil de velocidad para la salida; para los parámetros de turbulencia  $k$ ,  $\omega$  y  $\nu_t$  se establecieron valores característicos según la velocidad de ingreso; en las fronteras que son pared se establecieron funciones de pared propias de OpenFOAM® (“nutkWallFunction”, “kqRWallFunction” entre otras), y se fijó la velocidad en la pared igual a cero; en la salida en general se utilizó la condición gradiente cero; en cuanto a la propiedad “alpha.water”, que representa la fase agua del modelo, se utilizó valor fijo a la entrada y gradiente cero a la salida. El objetivo de la condición de borde a la salida es imponer una velocidad constante en la sección, alejada de la zona del obstáculo tal que, para un caudal y una sección determinada, dé como resultado el tirante subcrítico deseado según lo observado en los experimentos. La condición de velocidad es acompañada con la condición fixedFluxPressure que establece un gradiente de presión para lograr un flujo constante en la sección de salida (indicado con la velocidad de salida). Esta condición permite simplificar la sección de salida para un modelo 2D, ya que no es necesario reproducir exactamente la geometría de salida del canal experimental.

Para mejorar el ajuste se realizaron distintas versiones donde se fueron variando los valores de velocidad al ingreso (para obtener el caudal medido experimentalmente), a la salida del canal y el valor de la rugosidad del fondo (Bump). La macrorrugosidad utilizada en el modelo físico se construyó con una impresora 3D. La misma no es un hemisilindro geoméricamente perfecto, presenta una pequeña discontinuidad, además de una determinada textura propia de los hilos de impresión. Es por esto que, en este trabajo se realizaron múltiples versiones, para ver cuál sería la forma más adecuada para representarlo. Se planteó en algunas versiones colocarle al Bump una altura de rugosidad, y en otras el fondo liso con una pequeña discontinuidad en la superficie del hemisilindro para poder simular mejor el flujo observado experimentalmente. En la Tabla N°1 se resumen las principales variables consideradas, para distintas versiones, donde:  $Q$  es el caudal de fase agua;  $V_s$  es la velocidad impuesta a la salida;

$h_{min}$  es el tamaño mínimo característico de los elementos 2D, calculado como la raíz del área mínima de celda, proporcionada por OpenFOAM®.

Versión N°	Bump	Q [l/s]	Vs [m/s]	h_min [mm]
Experimental.	3D	0,4030	0,1399	0,13
1	Liso	0,4030	0,1399	$3,16 \times 10^{-4}$
2	Liso	0,4477	0,1399	$3,16 \times 10^{-4}$
3	Liso	0,4274	0,1469	$3,16 \times 10^{-4}$
4	0,4mm	0,4030	0,1399	$3,11 \times 10^{-4}$
5	0,1mm	0,4030	0,1399	$3,11 \times 10^{-4}$
6	0,068224mm	0,4030	0,1399	$3,11 \times 10^{-4}$
7	0,068224mm	0,4030	0,1399	$2,44 \times 10^{-4}$
8	Discontinuidad	0,4030	0,1399	$4,74 \times 10^{-4}$
9	Discontinuidad	0,4030	0,1329	$2,08 \times 10^{-4}$
10	Discontinuidad	0,4322	0,1399	$2,08 \times 10^{-4}$

Tabla N°1 – Versiones modeladas

Se tomaron como referencia para validar el modelo, 10 secciones a lo largo del eje central del canal para comparar los perfiles de velocidad media experimentales y numéricos. También se comparó la geometría que adopta la superficie libre. El solver utilizado modela flujos en estado transitorio; sin embargo, los resultados que se muestran a continuación se consideran estacionarios ya que se toman en un paso de tiempo tal que las variables no cambian. Se utilizó la opción “adjustTimeStep” de OpenFOAM®, para asegurar que el paso de tiempo de cálculo en la simulación cumpla con un número de Courant menor o igual a 0,4. Esto resultó en pasos de tiempo de aproximadamente 0,001 segundos, que se consideraron apropiados para la estabilidad del cálculo. El ajuste de los distintos parámetros de versión a versión, se realizó barriendo el intervalo de incerteza de las mediciones experimentales, y explorando cuál sería la mejor configuración de fondo para la macrorrugosidad. A continuación, se muestran los resultados del caso que mejor ajustó, es decir que tuvo menor error relativo respecto a los resultados experimentales.

## COMPARACIÓN RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

En la última versión modelada, con fondo liso y una discontinuidad en la superficie del hemicilindro, el flujo separó en la misma zona que se observa experimentalmente con PIV. En la Fig. 4 se muestran los perfiles de velocidad experimentales y numéricos en el punto de inicio de la macrorrugosidad (1), en su centro (2), en su punto de fin (3) y 14cm aguas abajo de la misma (4).

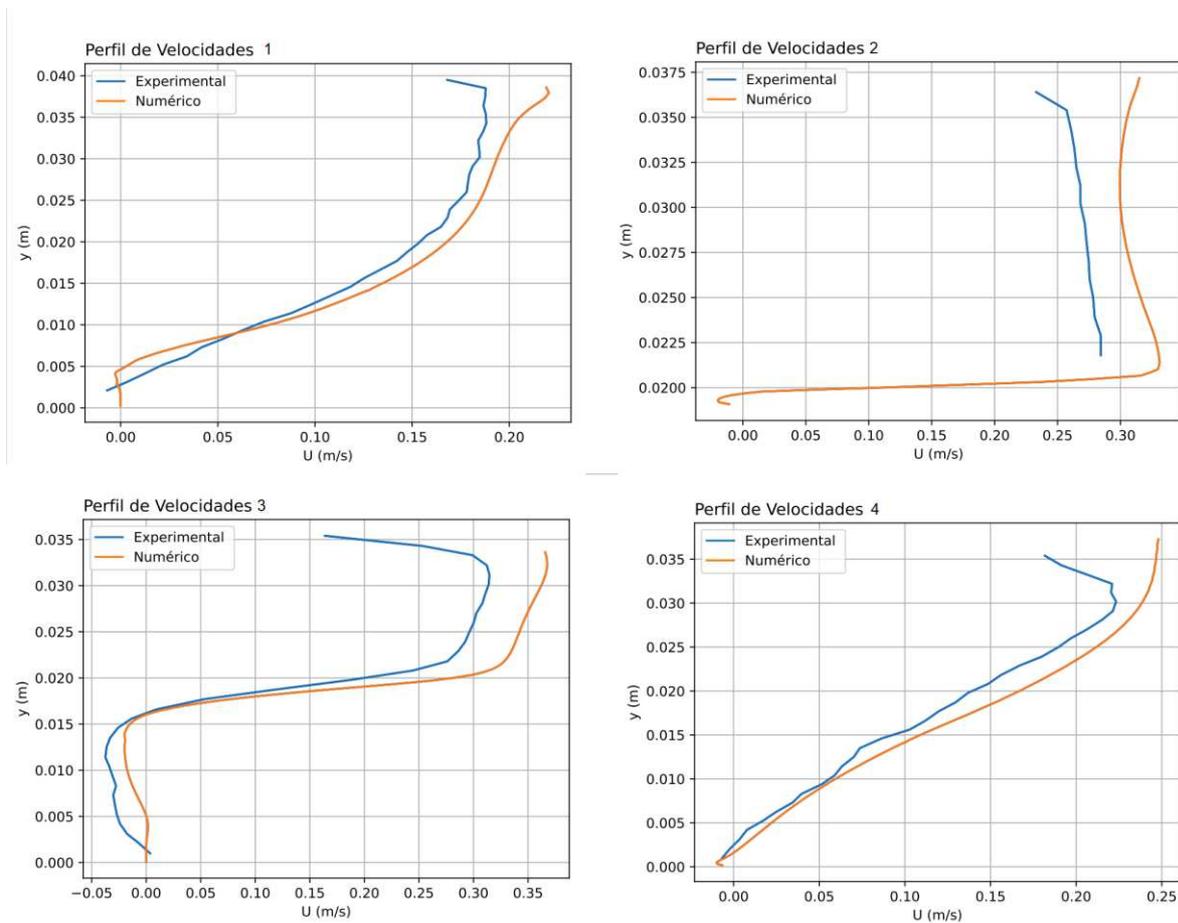


Figura 4- Perfiles de velocidad

La hidrodinámica, merece un análisis de dos aspectos: la forma y magnitud de los perfiles de velocidad. En cuanto a la forma, podemos decir que el modelo numérico logró reproducir lo observado experimentalmente con PIV. En lo que concierne a la magnitud de los perfiles de velocidad, se obtuvieron discrepancias mayores al error aceptable para este tipo de casos. Se espera poder mejorar este aspecto incorporando modelos de turbulencia que se ajusten mejor al número de Reynolds con el que se está trabajando.

Por otra parte, en la superficie libre, aún debe ajustarse la posición del resalto. En el modelo numérico aparece una depresión del tirante de agua justo donde termina la macrorrugosidad que experimentalmente no se observa (ver Fig. 5).

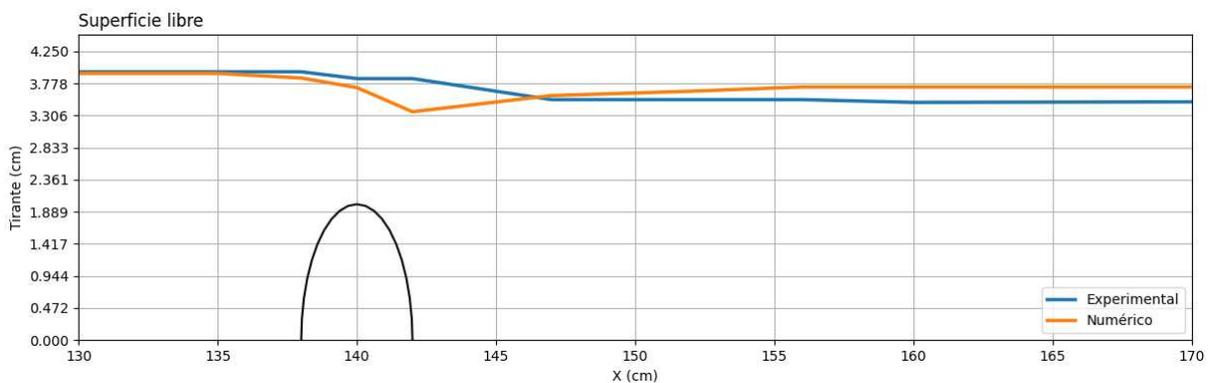


Figura 5- Superficie libre

Se cree que ajustando la posición del resalto que es donde hay mayor diferencia (~4,7mm) entre el modelo numérico y el experimental, se podrá corregir la diferencia (~2,4mm) en el tirante aguas abajo de la macrorrugosidad.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se realizó un análisis de convergencia de malla para asegurar la independencia de los resultados de la resolución de la malla. En este caso, luego de analizar los resultados para tres niveles de resolución espacial de la malla, se puede concluir que una malla con tamaño mínimo característico de  $2,08 \times 10^{-4}$  mm es adecuada. Este caso de estudio, representa un gran desafío en lo concerniente a modelación numérica con el solver interFoam y el modelo de cierre turbulento  $k\omega$ SST por trabajar con un número de Reynolds bajo (~5000). El modelo logra reproducir la forma de los perfiles de velocidad y aún se debe continuar trabajando en la magnitud de la velocidad y en la evolución de la superficie libre del agua (interfaz agua-aire), para obtener errores relativos pequeños. En este trabajo no se presentan los resultados de energía cinética turbulenta y su tasa de disipación ya que al momento del cierre del trabajo completo se están procesando esos resultados.

Sería conveniente estudiar las propiedades turbulentas del flujo (por ejemplo, energía cinética turbulenta) para avanzar en la validación del modelo. A futuro se propone mejorar el ajuste de la altura del tirante, y la magnitud de velocidad, sin perder el buen ajuste en la forma de la hidrodinámica, además de comparar y ajustar otras propiedades del flujo. Una vez logrado un buen ajuste con el modelo 2D, se pretende hacer modelo 3D, donde se incorporen también los efectos de pared.

## REFERENCIAS

- F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry (2003). "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model". *Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer*, pp. 625–632, Antalya, Turkey.
- Geuzaine, C. and Remacle. J.-F. "Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), pp. 1309-1331, 2009.
- Hellsten, A. (1997). "Some Improvements in Menter's k-omega-SST turbulence model" *29th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA-98-2554.
- Menter, F. R. & Esch, T. (2001). Elements of Industrial Heat Transfer Prediction. *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*.
- Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, & M. Tummers, Begell House, Inc., 625 - 632.
- OpenCFD. (2005). (<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>).
- OpenFOAM® (2023). (<https://www.openfoam.com/> )
- The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model (<http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html> )
- Ragessi, I. M., Márquez Damián, S., Guilleñ, N., Pozzi Piacenza, C., García, C. M. y Hillman, G. (2014). "Validación de un modelo numérico para la caracterización hidráulica de las obras de evacuación de la presa Los Molinos – Jujuy", *Mecánica Computacional Vol XXXIII*, pp. 337-347, Bariloche, Argentina.