

# MODELACION HIDRODINAMICA DE VORTICES SUPERFICIALES MEDIANTE REFINAMIENTO DINAMICO DE MALLA

*Sabarots Gerbec, M.<sup>a,b</sup>, Menéndez A. N.<sup>a,b</sup> y Badano N.<sup>a,b</sup>*

<sup>a</sup>Laboratorio de Hidráulica, INA, Aut. Ezeiza-Cañuelas Tramo J.Newbery km 1,620, Ezeiza, Prov. Buenos Aires, Argentina, [msabger@gmail.com](mailto:msabger@gmail.com), <http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm>

<sup>b</sup>Laboratorio de Modelación Matemática (LaMM), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214, C1127AAR Buenos Aires, Argentina, [msabger@gmail.com](mailto:msabger@gmail.com)

**Keywords:** Instructions, AMCA style, Computational Mechanics, article.

**Resumen.** El tipo de vórtice que se produce en una obra de tema suele ser de mayor intensidad en el prototipo que en el modelo físico, ya que este está sujeto a efectos de escala. Se plantea el uso de modelación numérica en base a técnicas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para predecir la respuesta del prototipo libre de los efectos de escala del modelo físico. La metodología se ilustra esta estrategia mediante su aplicación al caso del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá. Se observa que la vorticidad extrema resulta algo mayor en el prototipo, aunque ese incremento es relativamente leve. Este procedimiento otorga mayor certidumbre a la verificación de la condición de diseño (ausencia de entrada de aire).

## **ABSTRACT:**

The vortex type that occurs in an intake structure is usually of higher intensity in the prototype than in the physical model, due to scale effects. Numerical simulation, using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques, is proposed to predict the prototype response free of scale effects. The methodology is illustrated through its application to the case of the Third Set of Locks of Panama Canal. It is observed that extreme vorticity is somewhat higher in the prototype, though the increment is relatively weak. This procedure leads to higher certainty to the verification of the design condition (absence of air entrainment).

**PALABRAS CLAVES:** *vórtices – OpenFOAM – refinamiento dinamico de malla*

## INTRODUCCIÓN

El fenómeno de entrada de aire en estructuras hidráulicas debido a estructuras de vórtices coherentes ha sido tradicionalmente abordado desde el estudio de modelos físicos. Sin embargo, el enfoque de este problema desde la modelación numérica amplía los alcances del estudio.

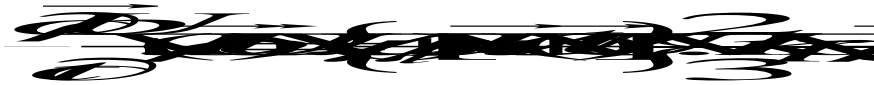
Los efectos de escalas son inherentes a la modelación física, en el caso de la entrada de aire debida a vórtices, la tensión superficial. Si no se cuenta con un modelo físico de dimensiones lo suficientemente generosas, se pueden obtener resultados erróneos si se extrapolan los resultados a escala de prototipo.

En el presente trabajo se aborda el problema mediante la herramienta de CFD de código abierto OpenFOAM. Específicamente se estudió la entrada de aire a los recintos de recuperación de agua del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá. Para esto, fue necesario una modificación en el código fuente del *solver interFoam* (provisto por OpenFOAM) que permitiera un tratamiento minucioso de la zona donde se genera la estructura del vórtice.

## ECUACIONES DE GOBIERNO

Para la modelación numérica se adoptó un tratamiento tipo LES (Large Eddy Simulation), que resuelve explícitamente las mayores escalas turbulentas. Se utilizó el solver *interFoam* provisto por OpenFOAM. Para el tratamiento de la superficie libre se seleccionó el método VOF (Volume of Fluid) convencional (Hirt y Nicholls, 1981). Para un sistema de dos fluidos Newtonianos e incompresibles (agua y aire), las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, incorporando la hipótesis de viscosidad turbulenta de Boussinesq, son entonces resueltas simultáneamente con una ecuación de transporte para la fracción de volumen de una fase,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = \epsilon \quad (1)$$



(2)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = \epsilon \quad (3)$$

donde  $\mathbf{U}$  representa el campo de velocidades compartido por los dos fluidos,  $\alpha$  la fracción de volumen,  $p$  el campo de presiones,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $\mu_t$  la viscosidad turbulenta,  $\rho$  la masa específica,  $\mathbf{g}$  la aceleración de la gravedad,  $k$  la energía cinética turbulenta e  $\mathbb{I} \equiv \delta_{ij}$ . El último término del lado derecho de la ecuación (3) representa los efectos de la tensión superficial (Brackbill et al., 1992), siendo  $\kappa$  la curvatura promedio de la superficie libre. La fracción de volumen  $\alpha$  puede asumir valores entre 0 y 1, correspondiendo el primero a una celda totalmente ocupada por agua, y viceversa. La densidad y la viscosidad dinámica se calculan mediante promedios ponderados,

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (5)$$

donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia a la fase agua y aire, respectivamente (Berberović et al., 2009).

## VALIDACION

Con el fin de validar cuantitativamente el solver, se tomaron como referencia los resultados experimentales obtenidos por Matsui (2006) y Okamura (2007). El problema consiste en una dársena de bombeo a nivel y caudal constante, en la que se midieron con PIV las tres componentes de la velocidad a lo largo de una transecta por debajo del tubo de aspiración, Figura 1.

La malla de cálculo fue construida mediante la utilidad SnappyHexMesh de OpenFOAM, que permite obtener una grilla regular, lo cual resulta conveniente cuando se aplica la técnica VOF. La malla de cálculo contaba con aproximadamente 900 mil elementos de 7mm de lado en las tres direcciones (Figura 1). Los resultados obtenidos con OpenFOAM fueron satisfactorios al comparar con las mediciones (Figura 2).

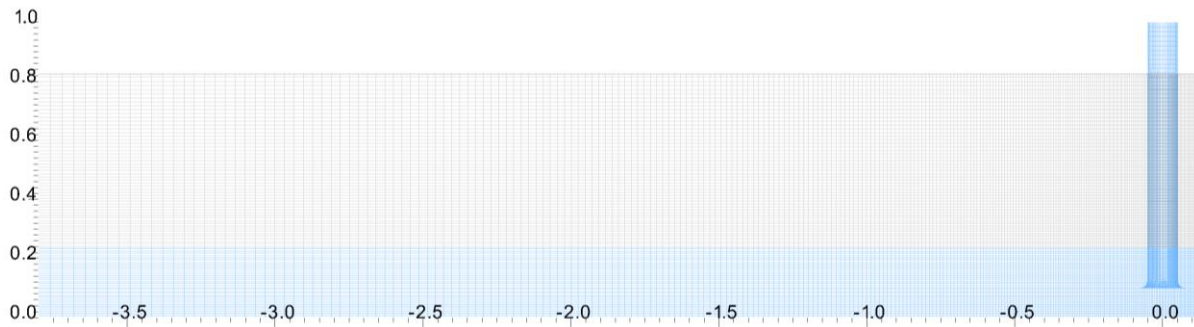


Figura 1: Geometría y malla de la dársena

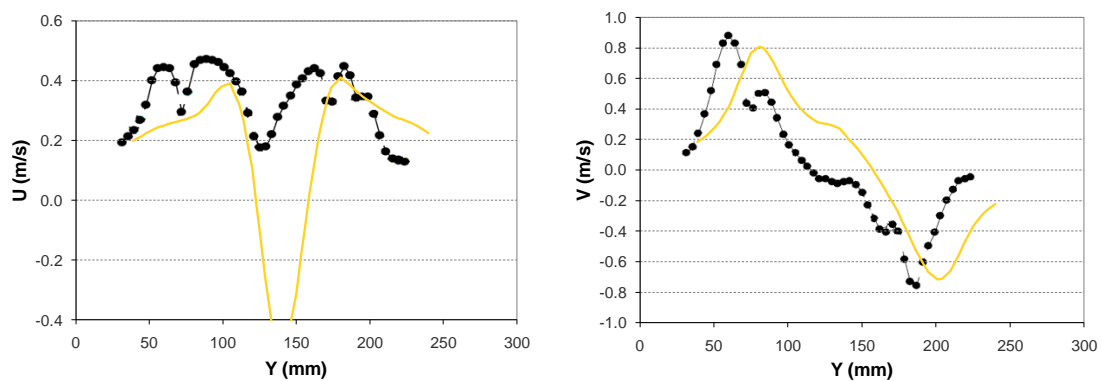


Figura 2- a: Componentes X e Y de la velocidad

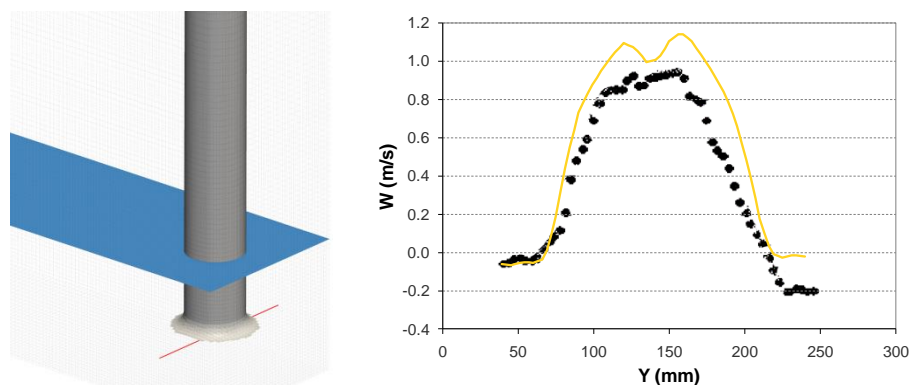


Figura 2- b: Ubicación de transecta y comparación de la velocidad vertical

## APLICACION

Estudiando los efectos de escala en la entrada de aire en la toma de la Tina, se procedió a realizar una segunda validación que consistió en comparar cualitativamente con las observaciones efectuadas en el modelo físico de las tinas, donde se formaron vórtices del tipo 6 según la clasificación del Alden Research Laboratory (ARL) (Hecker, 1981).

Al igual que en el caso de la darsena de bombeo, para la modelación de la Tina, se utilizó la utilidad SnappyHexMesh. Inicialmente se malla bloques con dimensiones que permitan contener la geometría definitiva de la estructura hidráulica. El tamaño de los elementos en la proximidad a la toma es de 1cm de lado en las direcciones horizontales (paralelas a la superficie libre) y 0.5cm en la vertical (unidades de Modelo Físico). La geometría detallada de la toma se generó en el soft GMSH y bajo un formato de malla stl. Finalmente, mediante SnappyHexMesh se eliminan de la malla de bloques los elementos que no forman parte de la geometría, como se ve en la Figura 3

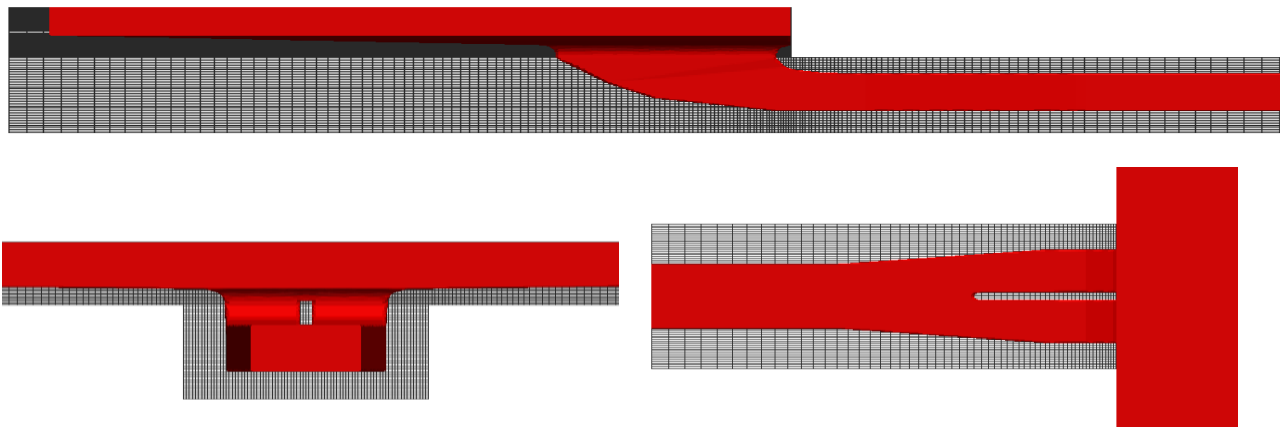


Figura 3: Malla de la tina con bloques antes y despues (rojo) de SnappyHexMesh

La malla resultante tiene 1127064 hexaedros, con una alta resolución en la entrada a la toma (Figura 4).

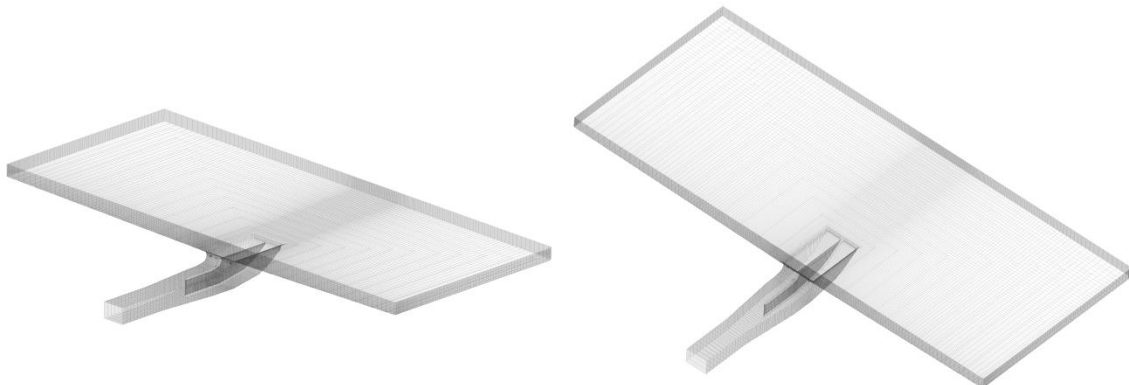


Figura 4: Vistas de la malla de la Tina

Resultados preliminares demostraron no captar adecuadamente la depresión de la superficie libre debido a la presencia de vórtices coherentes. Para poder simular la entrada de aire en la conducción, la solución consiste en disminuir el tamaño de elementos, lo que implica un incremento de la cantidad de celdas y como consecuencia un mayor costo computacional.

A fin de reducir los tiempos de corrida y poder tener una buena representación del fenómeno, se llevó a cabo una densificación automática de celdas en las cercanías de la toma. Utilizando un mecanismo de refinamiento dinámico consistente en una subdivisión de las celdas en 8 elementos se logra incrementar el número de elementos solo en una zona específica. Se introdujo solo un grado de refinamiento, aunque es posible una densificación mayor, Figura 5, Jasak, (2000).

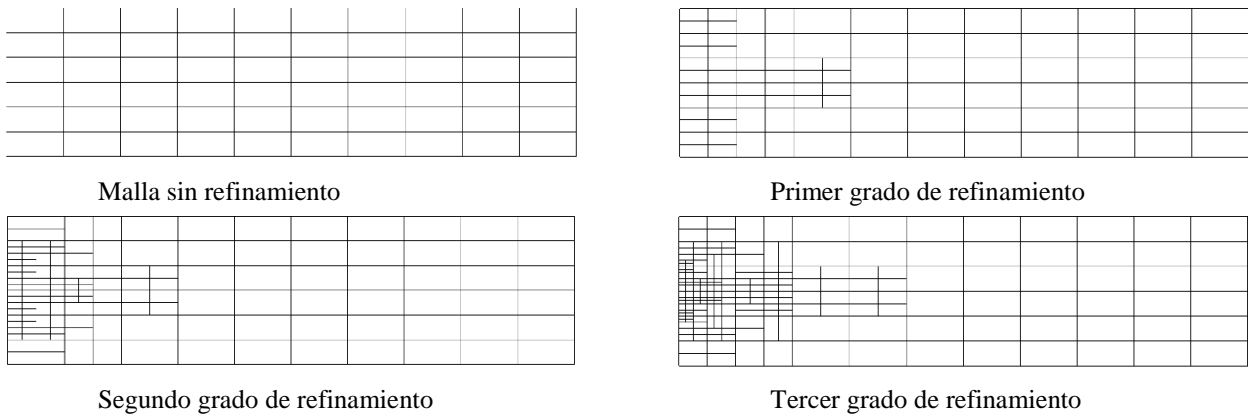


Figura 5: Grados de refinamiento

Ademas del grado de refinamiento es necesario indicar un criterio que determine donde hacerlo. Para eso se define un umbral de valores de un campo. En este sentido se modifico el codigo original de OpenFOAM para calcular un nuevo campo al que se llamo filtro ( $ff$ ). La eleccion de las variables usadas para calcular  $ff$  responde a:

- Conciderar solo la componente vertical de la vorticidad en valores absolutos
- Necesidad de refinar solo en celdas ocupadas por agua (como se indico mas arriba,  $\alpha=1$  si es agua)
- Solo se busca refinar en la estructura coherente del vortice, no inmediatamente cerca de las paredes verticales (donde  $\omega_z$  adquiere valores altos )

De esta forma, se propusieron algunas alternativas:

$$ff_1 = \omega_z^2 * \alpha \tag{6}$$

$$ff_2 = \omega_z^2 * \alpha * d^2 \tag{7}$$

$$ff_3 = (\omega_z^2 * \alpha * d^2) / U^2 \tag{8}$$

donde  $\omega_z$  es la componente vertical de la vorticidad,  $\alpha$  es la fraccion de agua en la celta,  $U$  la magnitud del vector velocidad y  $d$  es la distancia a la pared inmediata.

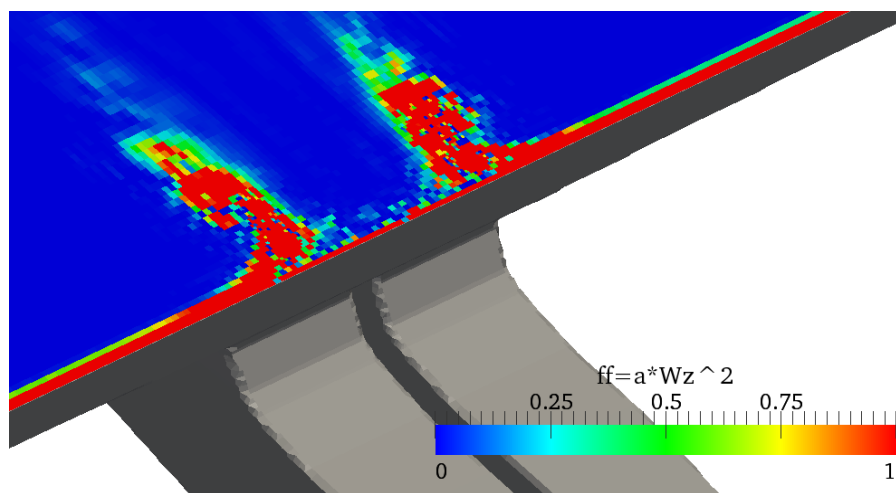


Figura 6 -a: Campo  $ff_1$  proximo a la superficie libre

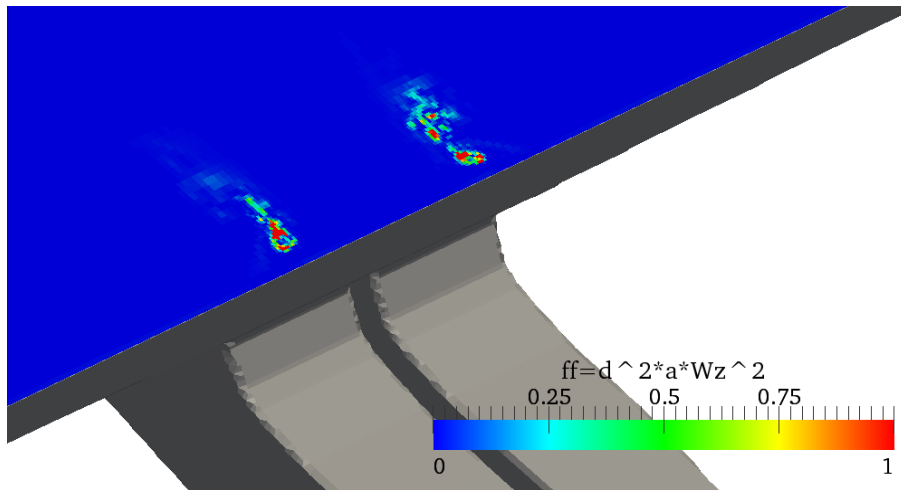


Figura 6 -b: Campo  $ff_2$  proximo a la superficie libre

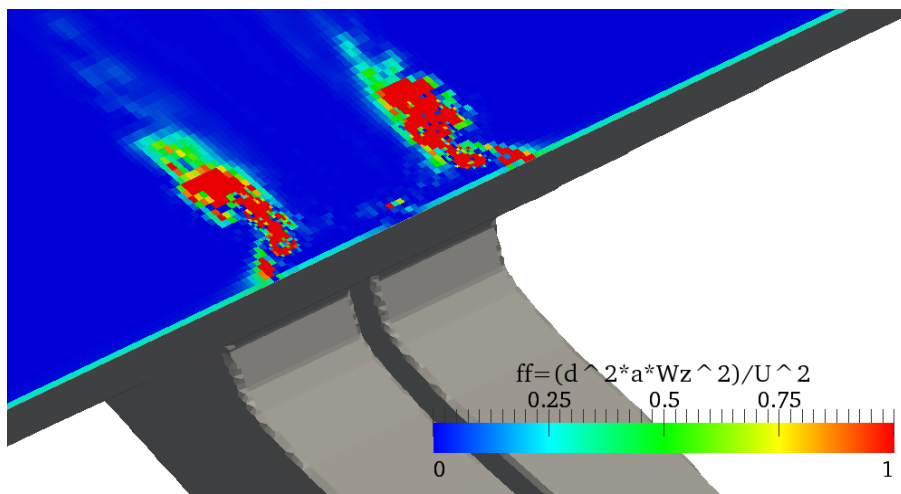


Figura 6 -b: Campo  $ff_3$  proximo a la superficie libre

De la eveluacion cualitativa del campo  $ff$ , Figura 6 , se descarto el  $ff_1$  por incluir una mayor zona que la de estudio. Algo similar ocurre con el  $ff_3$  (aunque en menor media) y con la ventaja de resultar ser adimensional. Finalmente se opto por el  $ff_2$ , resultando la zona de refinamiento como se muestra en la Figura 7.

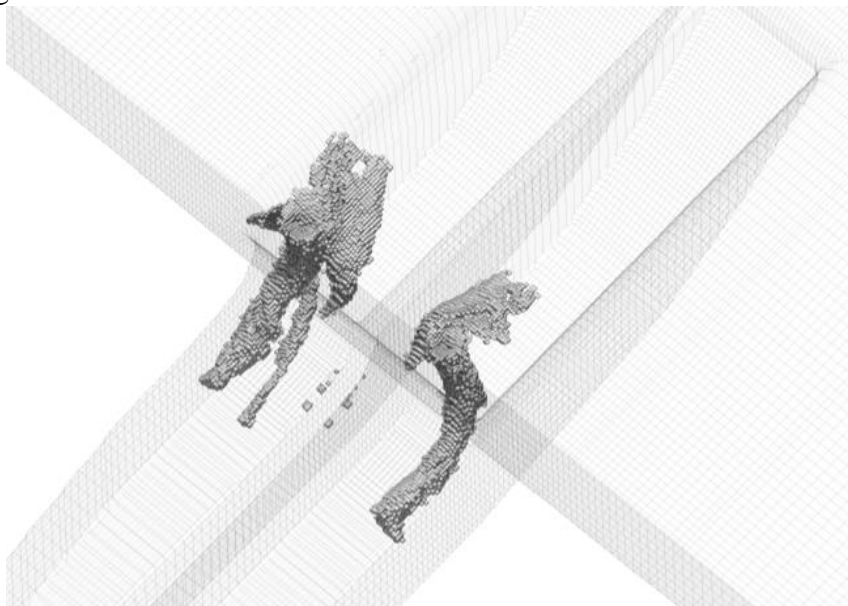


Figura 7: Refinamiento de la malla en la zona de mayor vorticidad

El proceso de refinamiento dinámico incorpora alrededor de 8000 (Figura 8) celdas a la malla original de 1.1 millones, es decir que con un 1% de incremento de celdas se puede obtener una solución cualitativamente mejor del fenómeno.

Las simulaciones se realizaron en el Cluster Beowulf que dispone de 64 procesadores con 4 GB de memoria RAM por procesador, conectividad Gigabit Ethernet, perteneciente al Grupo de Investigaciones en Sistemas Energéticos Primarios, Facultad de Ingeniería, UBA.

El tiempo de corrida fue aproximadamente 10 días para poder simular 20 segundos en la corrida a escala de modelo físico.

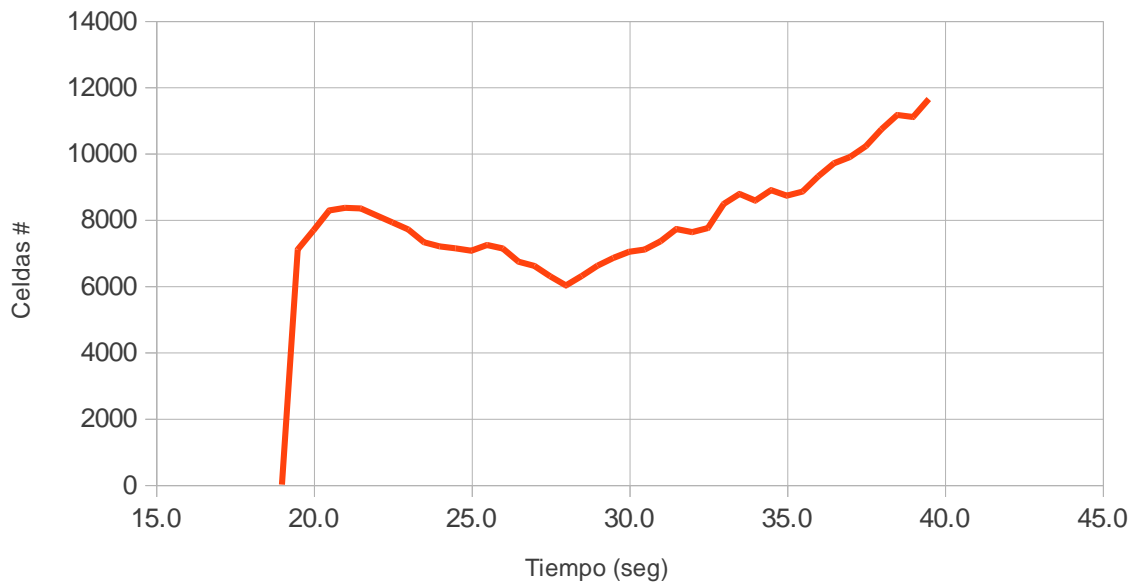


Figura 8: Cantidad de celdas incorporadas a lo largo de la corrida

El modelo reprodujo satisfactoriamente la presencia de vórtices con entrada de aire (Figura 9).

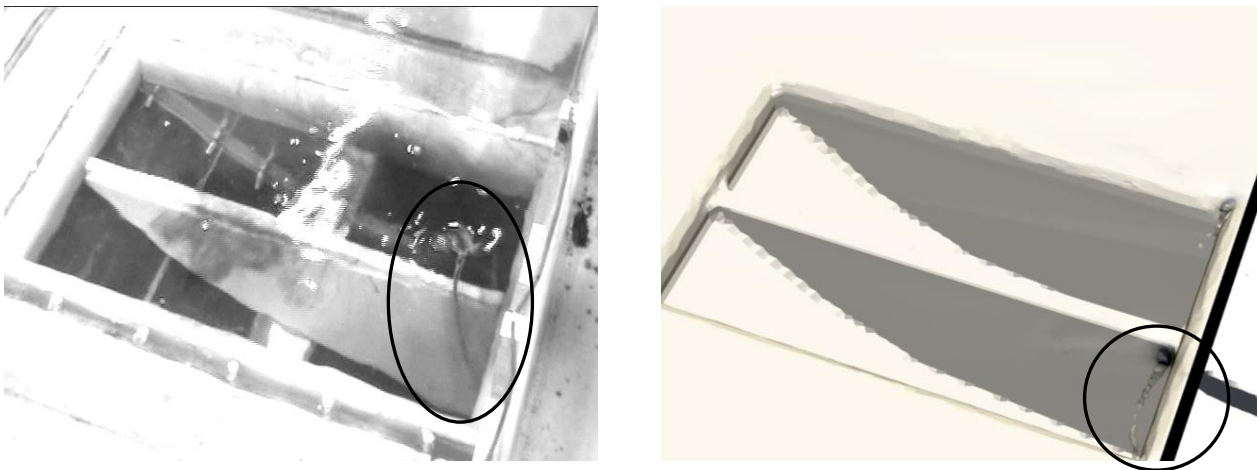


Figura 9: Comparación cualitativa entre modelo físico (izquierda) y numérico (derecha)

## EVALUACION DE LOS EFECTOS DE ESCALA

Para el análisis de los efectos de escala en las tinas, se tomó el caso de Vaciado de la Bottom WSB, con simulaciones a escala de modelo físico (1:30) y de prototipo. La estrategia de refinamiento dinámico de la malla fue aplicada en ambos casos.

La comparación de resultados fue cualitativa y cuantitativa. En principio, la Figura 10 muestra un corte vertical de la superficie libre ( $\alpha = 0.5$ ), donde se manifiesta la evolución de los dos vórtices a lo largo del tiempo (en escala temporal de prototipo). Se observa que los vórtices del Prototipo tienen una intensidad mayor (mayor depresión de la superficie libre, implica mayor entrada de aire) que el caso del modelo físico, lo cual resulta consistente de acuerdo con la bibliografía.

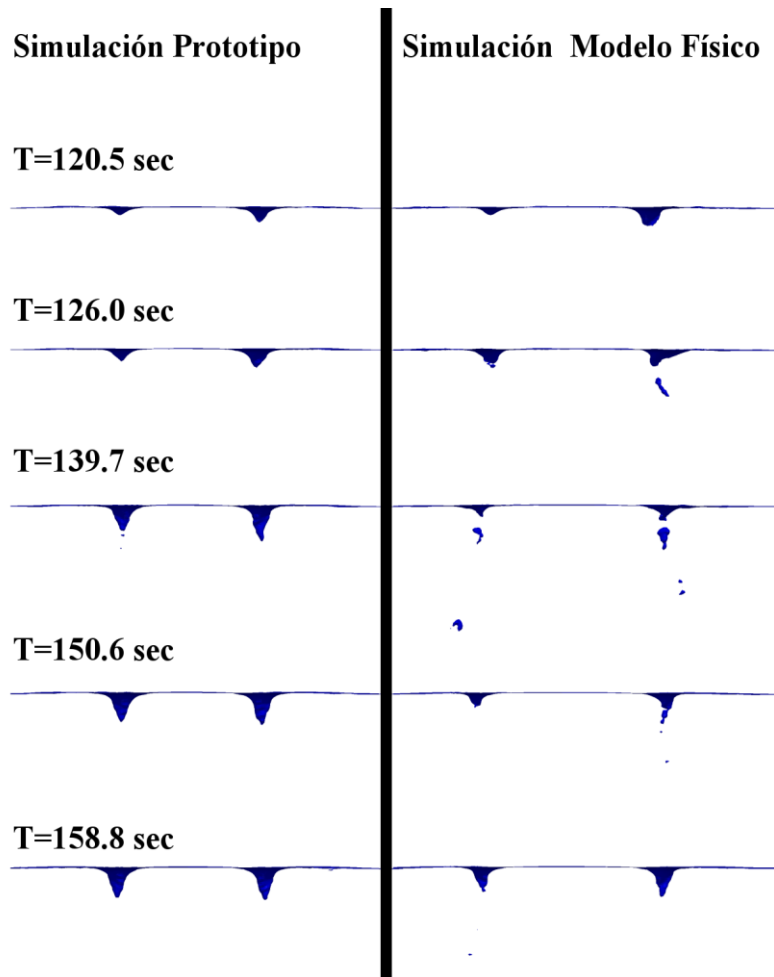


Figura 10: Evolucion en el tiempo de la superficie libre cercana a la toma, Simulacion de Modelo Físico y Prototipo

Además se evaluó cuantitativamente la evolución de la componente vertical de la vorticidad para la escala de modelo físico y prototipo. Se observó una tendencia a alcanzarse una vorticidad extrema más intensa en el prototipo, tal como era de esperarse, aunque el incremento es relativamente leve, Figura 11.



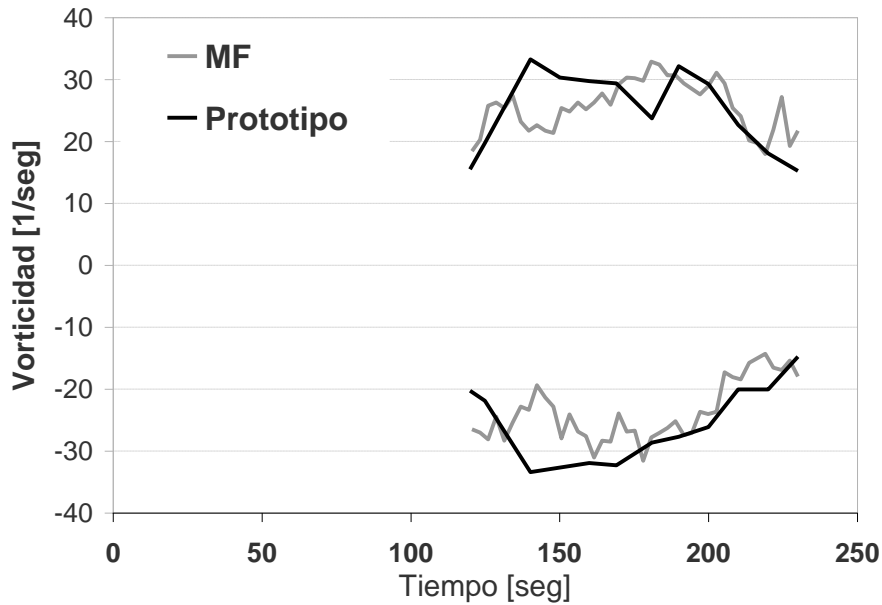


Figura 11: Comparación de vorticidad extrema para modelo físico (MF) y prototipo en función del tiempo

## CONCLUSIONES

Se ha reproducido satisfactoriamente la vorticidad observada en modelos físicos para el problema de una obra de toma, mediante un modelo numérico de tipo CFD. Su aplicación al caso del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá, tanto a escala de modelo físico como de prototipo, ha permitido cuantificar los efectos de escala, tanto para el diseño original como para la alternativa seleccionada. Se ha observado que la vorticidad extrema resulta algo mayor en el prototipo, aunque ese incremento es relativamente leve. Este procedimiento otorga mayor certidumbre a la verificación de la condición de diseño (ausencia de entrada de aire).

## REFERENCIAS

- Anwar O., (1966). "Formation of a Weak Vortex". Journal of Hydraulic Research, Vol. 4, No. 1, 1966.
- Anwar H., Weller O.J., Amphlett M. (1978). "Similarity of Free-Vortex at Horizontal Intake". Journal of Hydraulic Research, 1978
- Jasak H., Gosman A. D., (2000) Automatic resolution control for the finite-volume method, part 2: Adaptive mesh refinement and coarsening, Numerical Heat Transfer, Volume 38, Issue 3, 2000.
- Hecker G.E. (1981). "Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices". Journal of the Hydraulics Division, Vol. 107, No. 10, October 1981
- Okamura T., Kyoji K. and Matsui J. (2007). "CFD Prediction and Model Experiment on Suction Vortices in Pump Sump". Proceedings of the 9th Asian International Conference on Fluid Machinery. Jeju, Korea.