

## MODELACION HIDRODINAMICA DE VORTICES SUPERFICIALES MEDIANTE REFINAMIENTO DINAMICO DE MALLA

Martín Sabarots Gerbec<sup>a,b</sup>, Angel N. Menéndez<sup>a,b</sup> y Nicolás D. Badano<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://www.ina.gob.ar/>

<sup>b</sup>Laboratorio de Modelación Matemática (LaMM), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214, C1127AAR Buenos Aires, Argentina, <http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/>

**Palabras clave:** vórtices – OpenFOAM – VOF – refinamiento dinámico

**Resumen.** El tipo de vórtice que se produce en una obra de toma suele ser de mayor intensidad en el prototipo que en el modelo físico, ya que la tensión superficial no está en general a escala en estos últimos. Se plantea el uso de modelación numérica en base a técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para predecir la respuesta del prototipo libre de los efectos de escala del modelo físico. La metodología se ilustra mediante su aplicación al caso del *Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá*. Se implementa una técnica de refinamiento dinámico de malla a fin de mejorar la resolución de los vórtices en formación de manera computacionalmente eficiente. Luego de validar los resultados de la simulación a pequeña escala por comparación con un modelo físico existente, se comparan los mismos con los resultados simulados a escala real. 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).

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

Los efectos de escala son inherentes a la modelación física. En el caso de la formación de vórtices, la tensión superficial, que juega un rol estabilizante, tiene un efecto relativo más grande a pequeña escala. Esto disminuye la intensidad de los vórtices, y de la entrada de aire asociada, observados en modelos físicos. Si no se cuenta con un modelo físico de dimensiones lo suficientemente generosas, pueden obtenerse resultados erróneos al extrapolar a escala de prototipo.

En este trabajo se aborda el problema mediante la herramienta de CFD de código abierto OpenFOAM®. Específicamente se estudió la formación de vórtices y entrada de aire durante el vaciado de los recintos de recuperación de agua del *Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá*, denominados tinas. Para esto fue necesaria una modificación del código fuente del *solver interFoam* (provisto por OpenFOAM®), para permitir un tratamiento detallado de la zona donde se genera la estructura del vórtice.

2 ECUACIONES DE GOBIERNO

Para la modelación numérica se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes con un tratamiento tipo *Large Eddy Simulation* (LES) que resuelve explícitamente las mayores escalas turbulentas. Para el tratamiento de la superficie libre se seleccionó una variante del método *Volume of Fluid* (VOF) 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,

$$\nabla \bar{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = \nabla \cdot \{ (\mu + \mu_t) [\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^t] \} - \nabla \cdot \frac{2}{3} \kappa I - \nabla p + \rho \bar{g} + \sigma \kappa \nabla \alpha \tag{2}$$

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

donde  $\bar{U}$  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 y  $\bar{g}$  la aceleración de la gravedad. El último término del lado derecho de la ecuación (2) representa los efectos de la tensión superficial (Brackbill et al., 1992), siendo  $\kappa$  la curvatura promedio de la superficie libre y  $\sigma$  la tensión superficial. La fracción de volumen  $\alpha$  puede asumir valores entre 0 y 1, correspondiendo el primero a una celda totalmente ocupada por aire, y viceversa. La densidad y la viscosidad dinámica se calculan mediante promedios ponderados,

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \tag{4}$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \tag{5}$$

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

Como código numérico se utilizó el *solver interFoam* provisto por OpenFOAM®, que implementa las ecuaciones antes descritas.

Con el fin de validar cuantitativamente el *solver interFoam*, se tomaron como referencia los resultados experimentales obtenidos por Matsui et al. (2006) y Okamura et al. (2007). El problema consiste en una dársena de bombeo a nivel y caudal constante.

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 de la velocidad obtenidas mediante *Particle Image Velocimetry* (PIV) a lo largo de una transecta por debajo del tubo de aspiración (Figura 2).

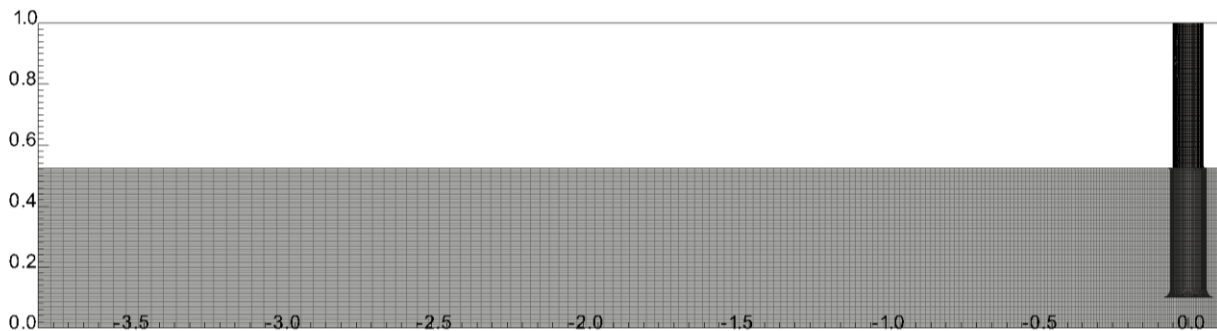


Figura 1: Geometría y malla de la dársena

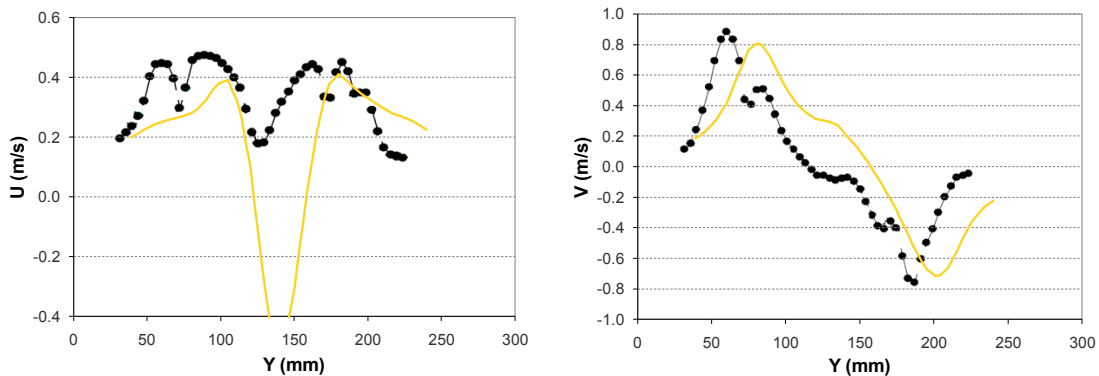


Figura 2– a: Componentes X e Y de la velocidad (simulación numérica en amarillo)

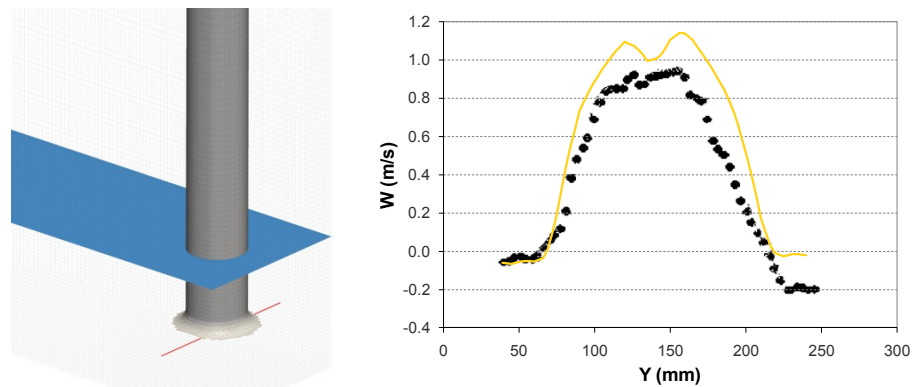


Figura 2– b: Ubicación de transecta y comparación de la velocidad vertical

## 4 APLICACIÓN

M. SABAROTS GERBEC, A.N. MENENDEZ, N.D. BADANO

A fin de estudiar los efectos de escala en la entrada de aire en la toma de la tina del *Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá* (Figura 3) se procedió a realizar una segunda validación, que consistió en comparar cualitativamente el modelo numérico con las observaciones efectuadas en el modelo físico de las tinas, construido en Lyon, Francia. En este modelo físico se detectó la formación de vórtices del tipo 6 según la clasificación del Alden Research Laboratory (ARL) (Hecker, 1981).

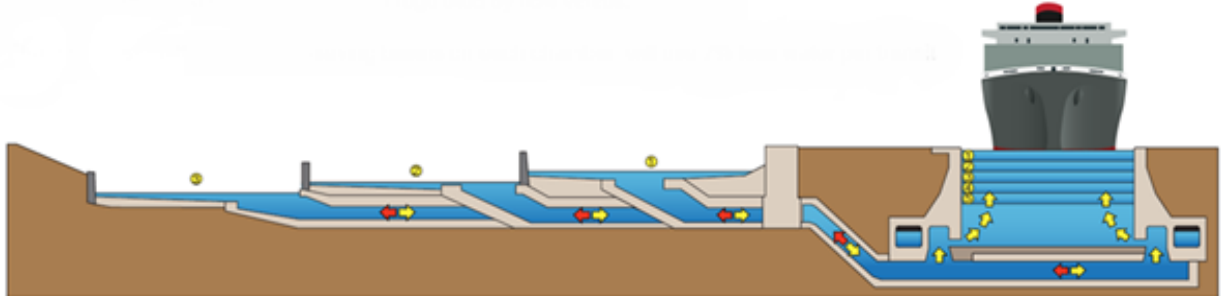


Figura 3: Sistema de llenado y vaciado de las tinas (izquierda) hacia la esclusa (derecha)

Al igual que en el caso de la dársena de bombeo, para la modelación de la Tina, se utilizó la utilidad *snappyHexMesh* para generar la malla base de cálculo. El procedimiento de generación de la malla comienza construyendo bloques con discretización estructurada de dimensiones que permitan contener la geometría definitiva de la estructura hidráulica. El tamaño de los elementos en la proximidad de 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 con el software GMSH y bajo un formato de malla “stl” (STereoLithography). 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 4.

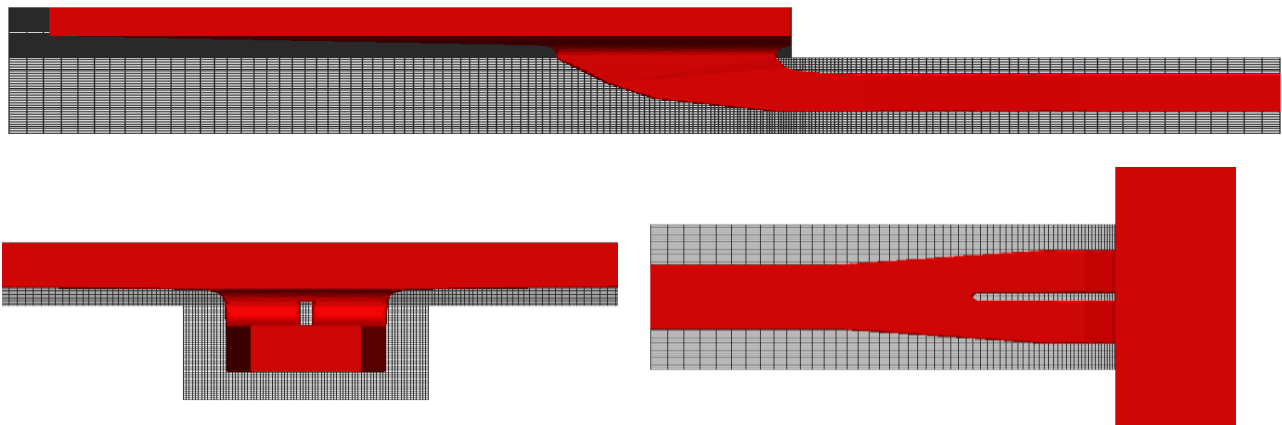


Figura 4: Malla de la tina con bloques (gris grillado) antes y después de SnappyHexMesh (rojo)

La malla básica resultante tiene 1127064 hexaedros, con una alta resolución en la entrada a la toma (Figura 5).

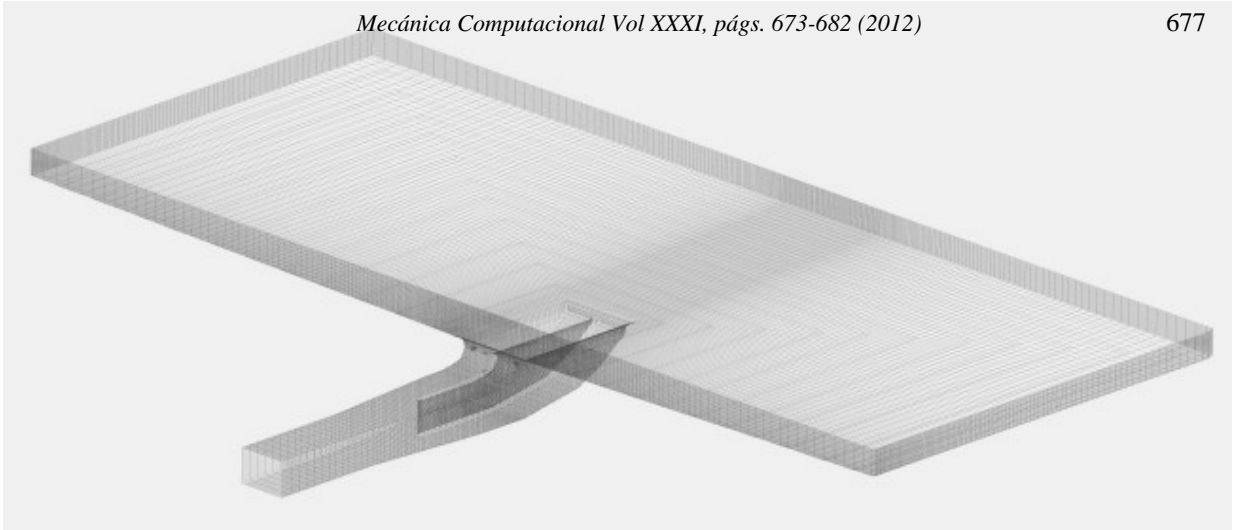


Figura 5 - a: Vistas de la malla de la Tina

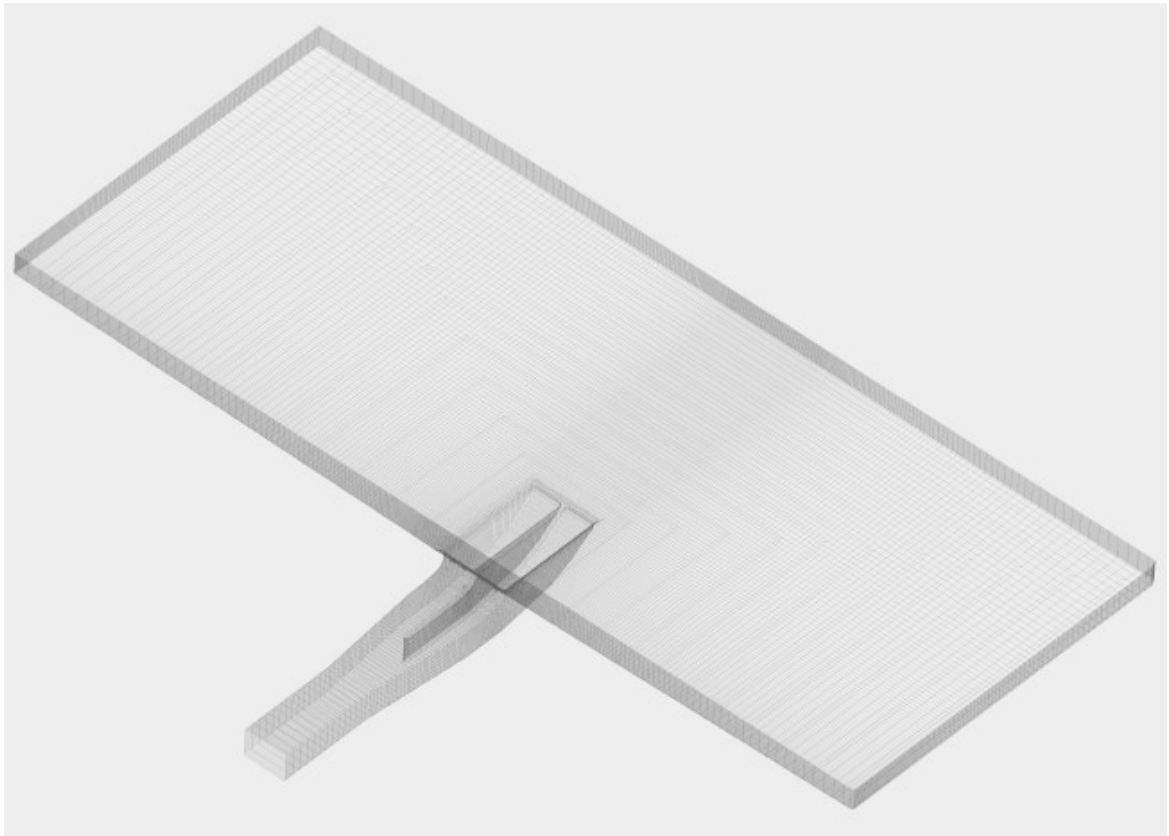


Figura 5 - b: Vistas de la malla de la Tina

Resultados preliminares demostraron que con la malla básica utilizada no se representa adecuadamente la depresión de la superficie libre debida a la presencia de vórtices coherentes. Esto se debe a que los vórtices coherentes se generan cuando la vorticidad se concentra en zonas relativamente pequeñas, por lo que es necesario contar con una malla con suficientemente densidad para representar bien fenómenos de esa escala. Por lo tanto, 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 cálculo y poder tener una buena representación del fenómeno, se llevó a cabo una densificación automática de las celdas en las cercanías de la toma, en las zonas

donde se evidencia la aparición de vórtices. Se utilizó un mecanismo de refinamiento dinámico consistente en una subdivisión de las celdas hexaédricas de la malla básica en 8 elementos (Figura 6, Jasak, (2000)). De esta manera se logra incrementar el número de elementos solo en una zona específica, conservando la eficiencia computacional. Se introdujo solo un grado de refinamiento, aunque es posible una densificación mayor.

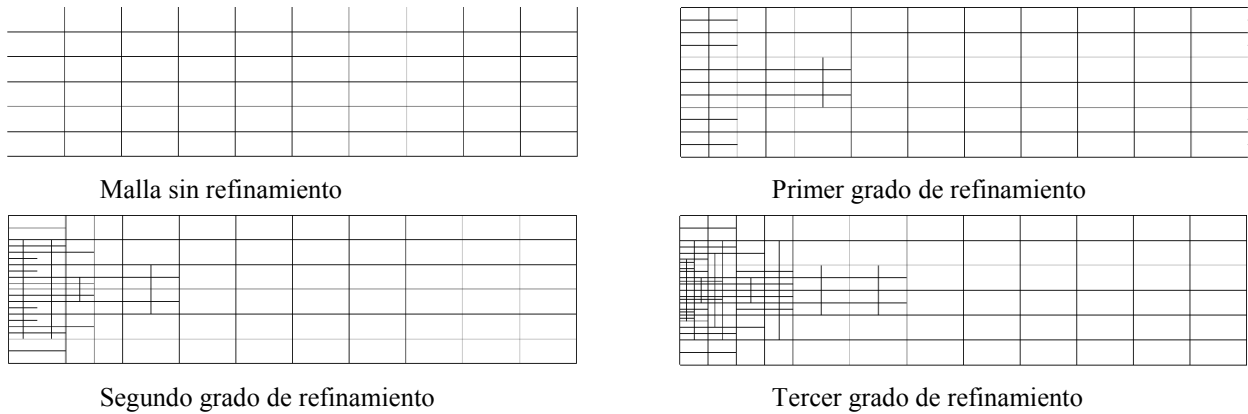


Figura 6: Grados de refinamiento

Además del grado de refinamiento, es necesario indicar al algoritmo un criterio que determine donde aplicarlo. La zona a refinar se define como aquella donde se supera un umbral de un determinado campo arbitrario. Se modificó el código original del modelo para definir un nuevo campo al que se llamo filtro ( $ff$ ). La elección de las variables usadas para calcular  $ff$  responde:

- Considerar solo la componente vertical de la vorticidad en valores absolutos
- Necesidad de refinar solo en celdas ocupadas por agua
- Solo se busca refinar en la estructura coherente del vórtice, no inmediatamente cerca de las paredes verticales (donde  $\omega_z$  adquiere valores altos )

De esta forma, se propusieron algunas alternativas de filtro  $ff_1, ff_2, ff_3$

$$ff_1 = \omega_z^2 * \alpha \quad (6)$$

$$ff_2 = \omega_z^2 * \alpha * d^2 \quad (7)$$

$$ff_3 = (\omega_z^2 * \alpha * d^2) / U^2 \quad (8)$$

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

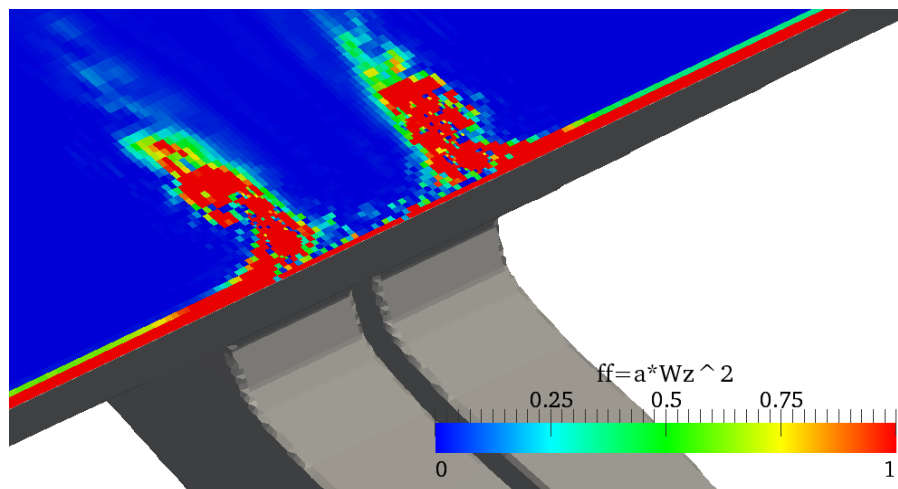


Figura 7 -a: Campo  $ff_1$  próximo a la superficie libre

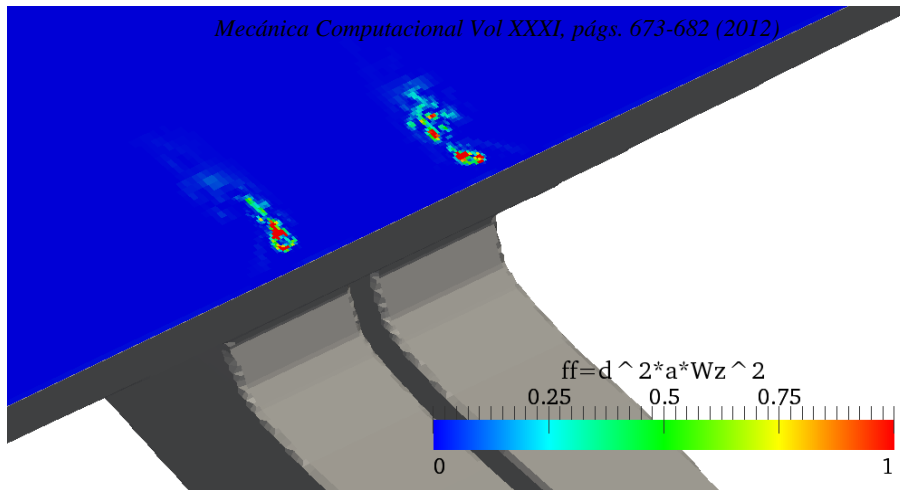


Figura 7 -b: Campo  $ff_2$  próximo a la superficie libre

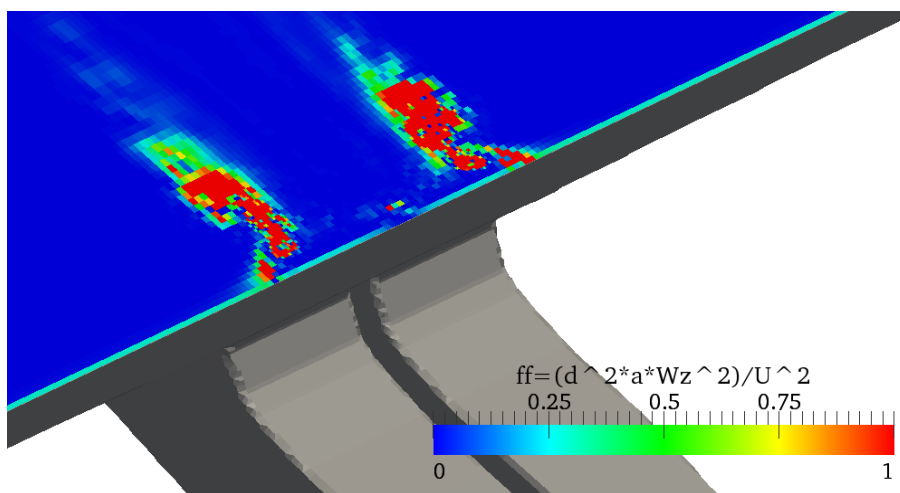


Figura 7 -c: Campo  $ff_3$  próximo a la superficie libre

Se realizó una evaluación cualitativa del campo  $ff$  (Figura 7). Se descartó el  $ff_1$  por incluir celdas próximas a las paredes. Si bien  $ff_3$  tiene la ventaja de resultar adimensional, también incluye celdas donde no se encuentra el vórtice que genera entrada de aire en la conducción. Finalmente se optó por el  $ff_2$ , resultando la zona de refinamiento como se muestra en la Figura 8.

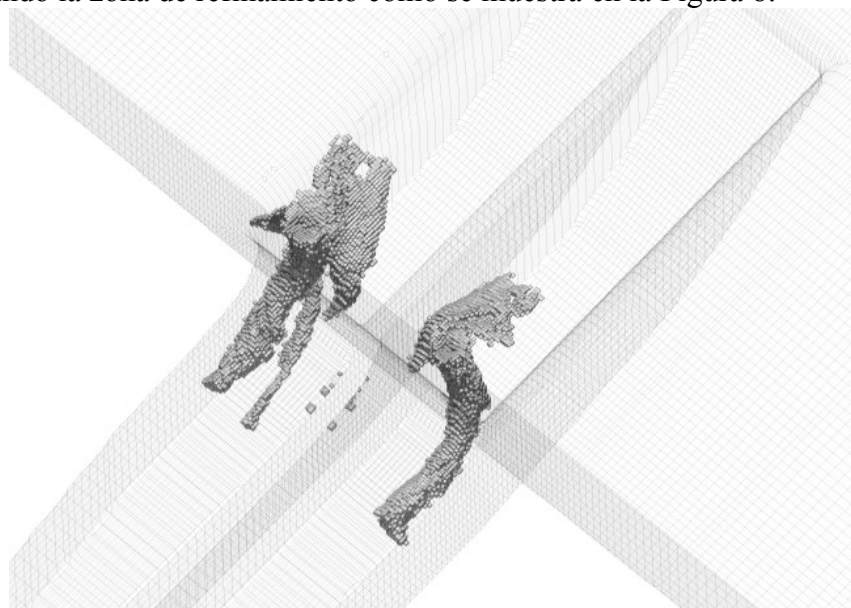


Figura 8: Refinamiento de la malla en la zona de mayor vorticidad



El proceso de refinamiento dinámico implementado incorpora alrededor de 8000 celdas (Figura 9) 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 simulación fue aproximadamente de 10 días para representar 20 segundos en la corrida a escala de modelo físico.

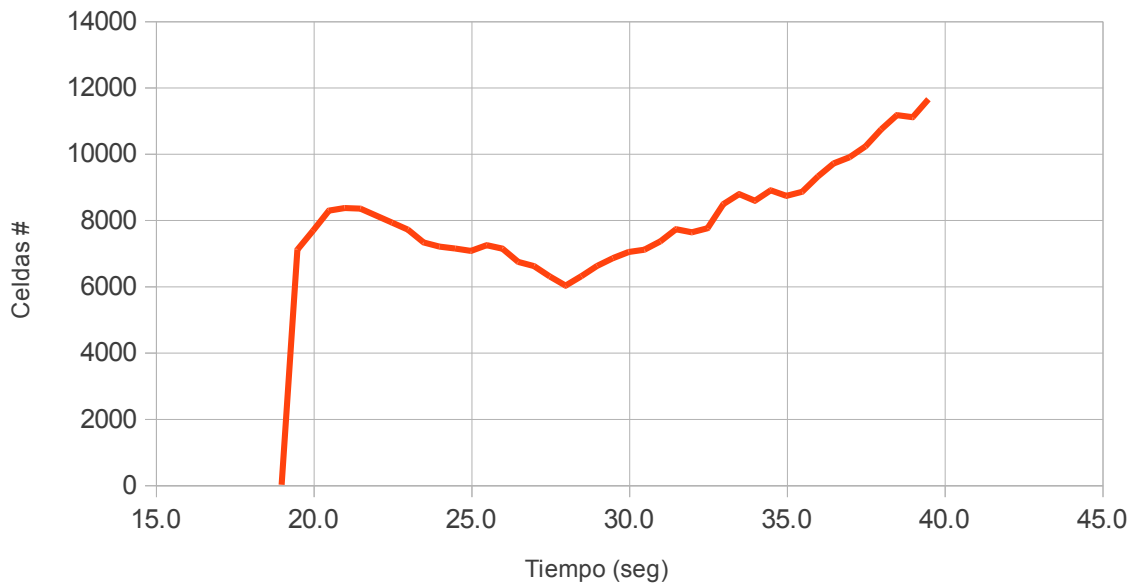


Figura 9: Cantidad de celdas incorporadas a lo largo de la corrida

El modelo, utilizando el refinamiento dinámico de la malla, reprodujo satisfactoriamente la presencia de vórtices con entrada de aire (Figura 10).

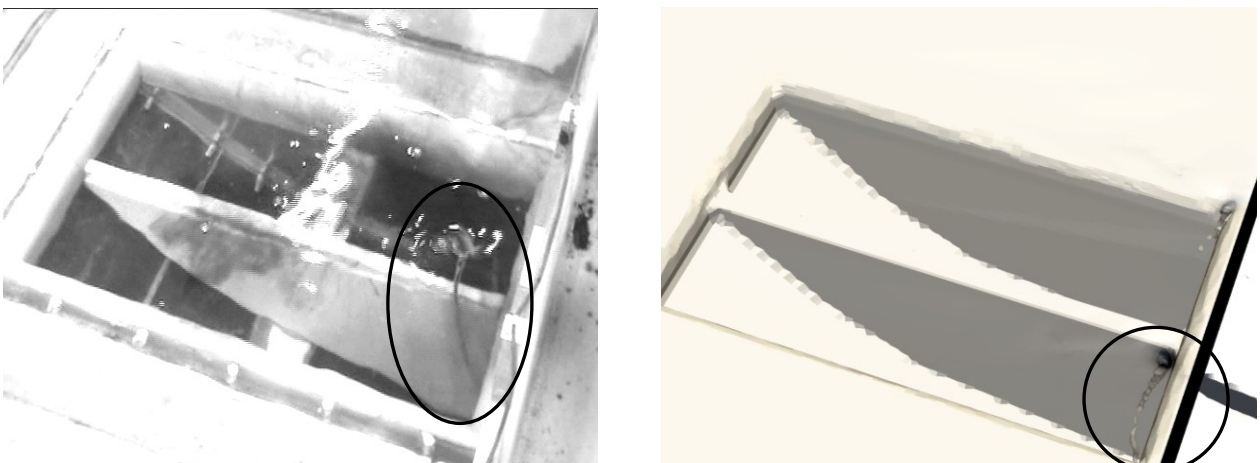


Figura 10: Comparación cualitativa entre modelo físico (izquierda) y numérico (derecha)



Para el análisis de los efectos de escala en las tinas, se tomo la situación en que la tina se vacía, simulando a escala de modelo físico (1:30) y a escala 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 11 muestra un corte vertical de la superficie libre (definida por  $\alpha = 0.5$ ), 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 (Hecker, 1981).

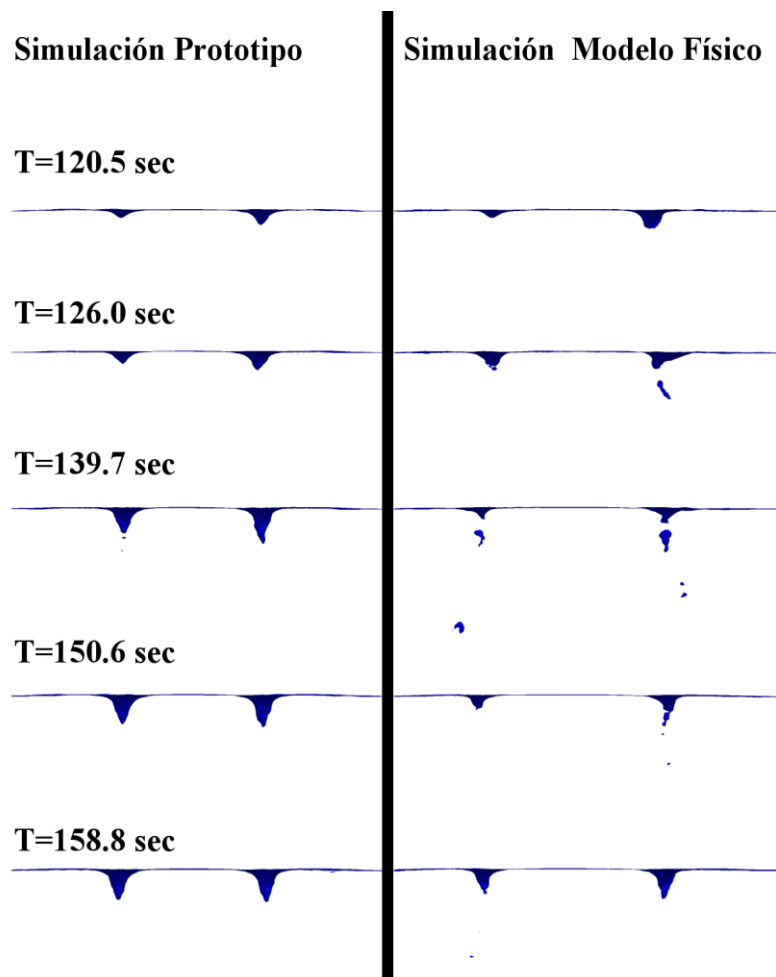


Figura 11: Evolución en el tiempo de la superficie libre cercana a la toma, Simulación de Modelo Físico y Prototipo

Además se evaluó la evolución de la componente vertical de la vorticidad para la escala de modelo físico y prototipo. Se observó una tendencia a alcanzar una vorticidad extrema más intensa en el prototipo, tal como era de esperarse, aunque el incremento es relativamente leve (Figura 12).

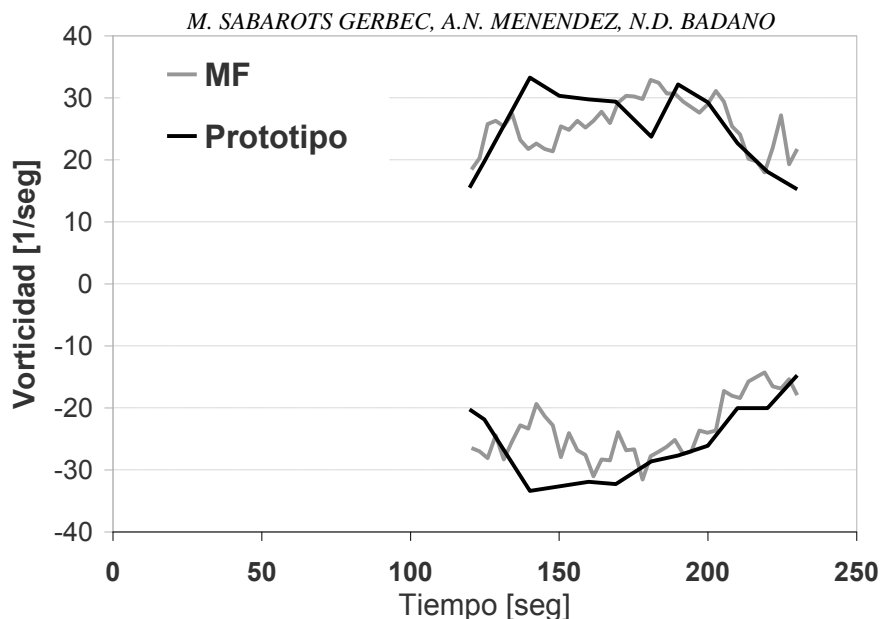


Figura 12: Comparación de vorticidad extrema para modelo físico (MF) y prototipo en función del tiempo

## 6 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. 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. Formation of a Weak Vortex. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 4, No. 1, 1966.
- Anwar H., Weller O.J., Amphlett M. Similarity of Free-Vortex at Horizontal Intake. *Journal of Hydraulic Research*, 1978
- Berverović E., Hinsberg N.P., Jakirlić S., Roisman I.V., y Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E*, 79, 2009.
- Brackbill J., Kothe D., y Zemach J. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 100:335–354, 1992.
- Hirt C.W. y Nicholls B.D. Volume of fluid (vof) method for dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39:201–225, 1981.
- Jasak H. y Gosman A. D., 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. Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 107, No. 10, October 1981
- Matsui J., Kamemoto, K. y Okamura, T. CFD benchmark and a model experiment on the flow in pump sump. *Proc. Of 23<sup>rd</sup> IAHR Symposium*, Yokohama. 2006.
- Okamura T., Kyoji K. y Matsui J. CFD Prediction and Model Experiment on Suction Vortices in Pump Sump. *Proceedings of the 9th Asian International Conference on Fluid Machinery*. Jeju, Korea, 2007.
- OpenCFD. OpenFOAM User Guide 2.1.0. <http://foam.sourceforge.net/docs/Guidesa4/UserGuide.pdf>, 2012.
- Romagnoli M., Ceretani A., y Portapila M.. Decaimiento de la turbulencia en resaltos hidráulicos. MECOM. 2010.