

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**CUANTIFICACIÓN DE EFECTOS DE ESCALA DE MODELO FÍSICO
DURANTE EL ESTUDIO DE FORMACIÓN DE VÓRTICES EN TOMAS DE
AGUA MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA**

Sabarots Gerbec, M.^a, Menéndez A. N.^a y Badano N.^a

*^aLaboratorio de Hidráulica, INA, Aut. Ezeiza-Cañuelas Tramo J.Newbery km 1,620, Ezeiza, Prov. Buenos Aires,
Argentina
msabgber@gmail.com*

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 – efectos de escala*

INTRODUCCIÓN

En las obras de toma, el flujo muestra una tendencia a formar vórtices. Dependiendo de la intensidad de los mismos, esto puede conducir a que entre aire en el sistema, con los consiguientes inconvenientes.

Este problema se suele estudiar con modelación física. Ahora bien, en general se espera que el tipo de vórtice que se producirá en el prototipo sea de mayor intensidad que el observado en el modelo físico, ya que este está sujeto a efectos de escala (la tensión superficial no está escalada, es decir, no se respeta la escala de Weber). En consecuencia, un buen diseño de la obra de toma en el modelo físico no garantiza un buen funcionamiento en el prototipo, por lo cual hay que tomar márgenes de seguridad en base a la experiencia.

Para atender esta dificultad con mayor precisión y especificidad, se plantea el uso de modelación numérica en base a técnicas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). La estrategia consiste en efectuar simulaciones numéricas tanto a escala de modelo físico como a escala de prototipo. La primera (que reproduce los efectos de escala) sirve para validar la técnica de modelación numérica, mientras que la segunda (libre de los efectos de escala) provee la respuesta esperable en el prototipo.

Esta estrategia se ilustra mediante su aplicación al problema del diseño de las obras de toma para los reservorios de re-aprovechamiento de agua (tinajas) del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá.

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,

$$\nabla \bar{U} = 0 \quad [1]$$

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

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \alpha) = 0 \quad [3]$$

donde U representa el campo de velocidades compartido por los dos fluidos, α la fracción de volumen, p el campo de presiones, μ la viscosidad dinámica, μ_t la viscosidad turbulenta, ρ la masa específica, g la aceleración de la gravedad, k la energía cinética turbulenta e $I \equiv \delta_{ij}$. El último término del lado derecho de la ecuación [3] representa los efectos de la tensión superficial (Brackbill et al., 1992), siendo κ la curvatura promedio de la superficie libre. La fracción de volumen α 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 (Beriverović 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 calculo contaba con aproximadamente 900 mil elementos de 7mm de lado en las tres direcciones. Los resultados obtenidos con OpenFOAM fueron satisfactorios al comparar con las mediciones (Figura 1).

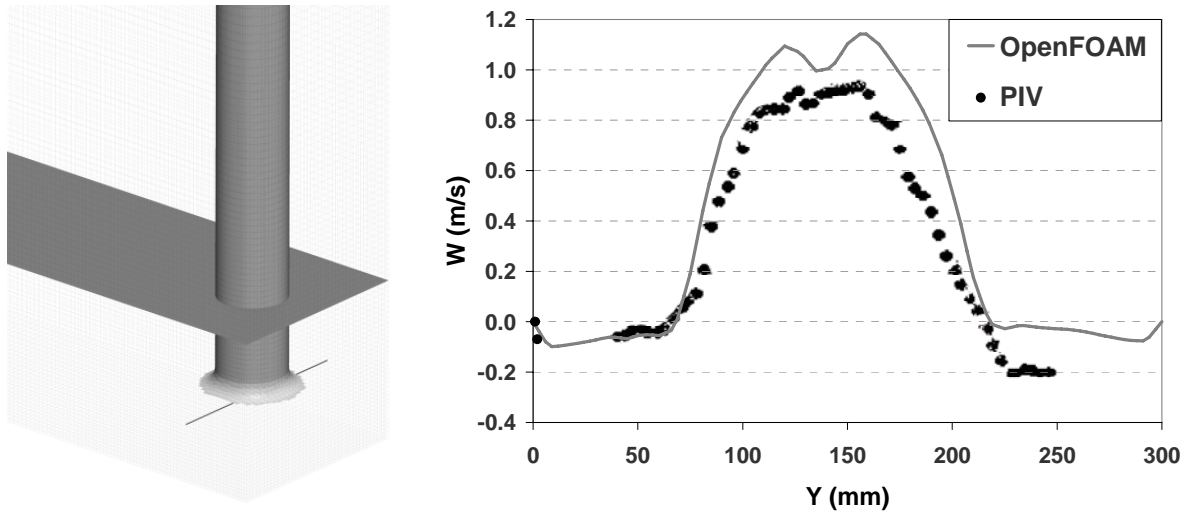


Figura 1.- Ubicación de transecta y comparación de la velocidad vertical

Una segunda validación consistió en una comparación cualitativa con las observaciones efectuadas en el modelo físico de las tinajas, donde se formaron vórtices del tipo 6 según la clasificación del Alden Research Laboratory (ARL) (Hecker, 1981).

La malla de cálculo también fue construida con SnappyHexMesh, teniendo elementos de 1cm de lado en las direcciones horizontales y 0.5 cm en la vertical (unidades de Modelo Físico). La cantidad total de elementos resultó 1.1 millones, con una alta resolución en la entrada a la toma. Adicionalmente, 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 cuando el valor de $\omega_z^2 * \alpha * d^2$ supera un límite especificado, donde ω_z es la componente vertical de la vorticidad y d es la distancia a la pared inmediata, Figura 2.

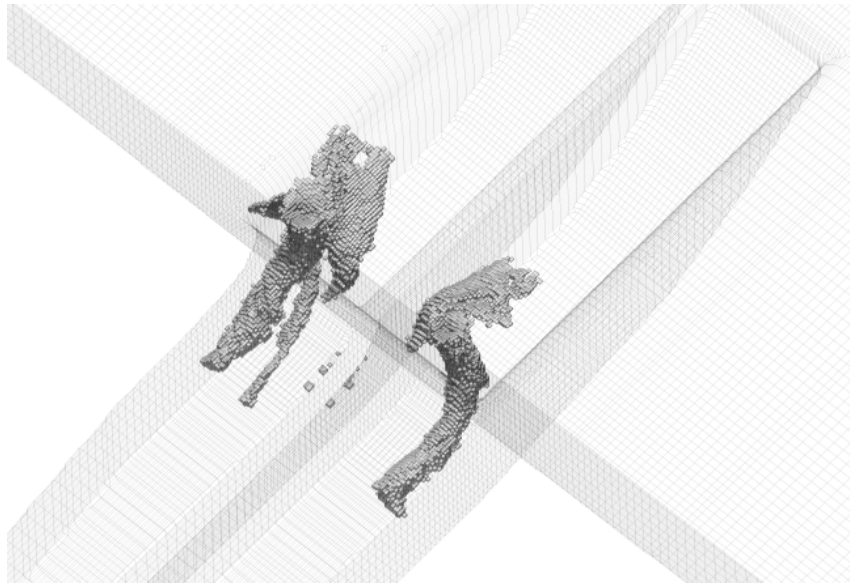


Figura 2.- Refinamiento de la malla en la zona de mayor vorticidad

El modelo reprodujo satisfactoriamente la presencia de vórtices con entrada de aire, Figura 3.

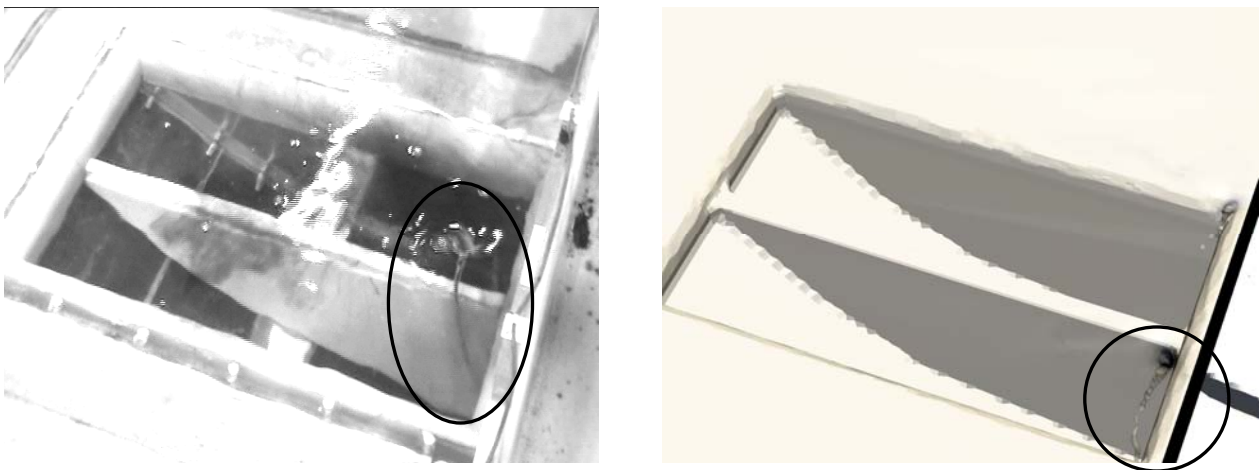
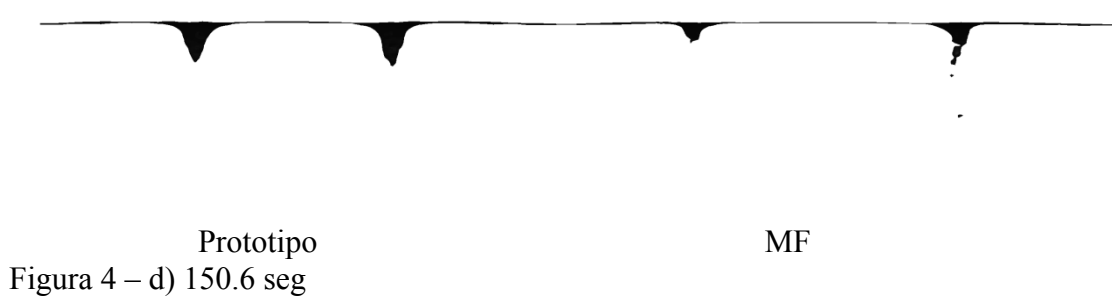


Figura 3.- Comparación cualitativa entre modelo físico (izquierda) y numérico (derecha)

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 4 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.



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 5.

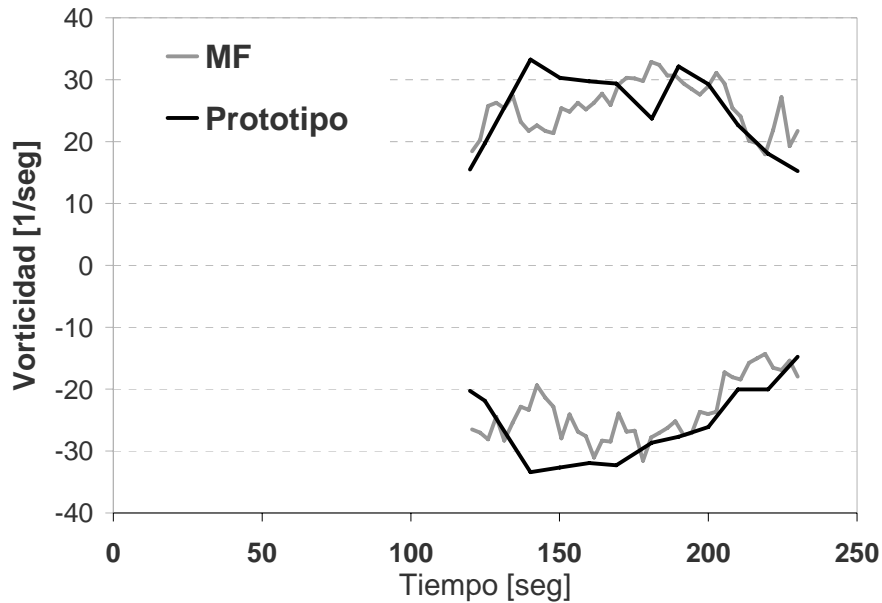


Figura 5.- Comparación de vorticidad extrema para modelo físico (MF) y prototipo en función del tiempo

EVALUACION DE ALTERNATIVAS

Entre las alternativas propuestas para evitar la entrada de aire en la toma, se estudió con el modelo numérico la que presentaba mayor eficiencia en los ensayos del modelo físico, consistente en la incorporación de espigones en los laterales de la toma, con el fin de lograr un patrón de escurrimiento orientado hacia la toma, Figura 6.

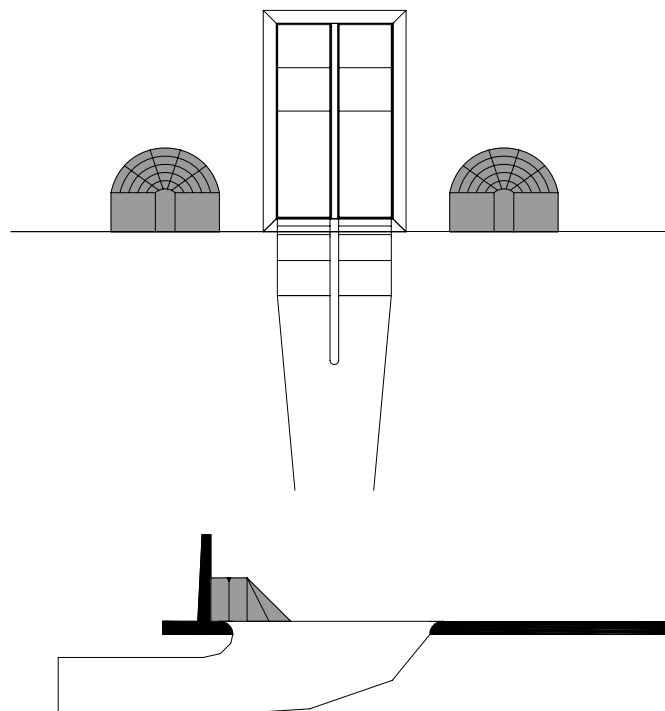


Figura 6.- Alternativa con espigones anti-vórtices

Para esta simulación no se implemento el refinamiento dinámico de la malla a fin de reducir el

costo computacional (Figura 7). Esto implica valores de vorticidad extrema menores respecto de los que se obtendrían con una discretización mas fina, ya que son promediados sobre celdas de cálculo más grandes.

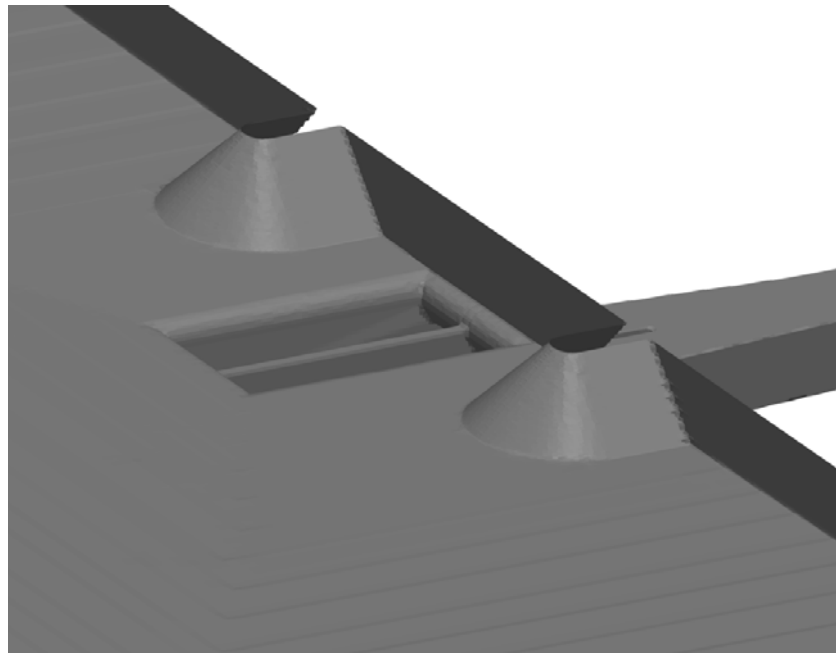


Figura 7.- Representación de la alternativa anti-vórtices

El modelo numérico reprodujo correctamente la tendencia a una disminución drástica de la vorticidad respecto del diseño original, tal como se observó en el modelo físico. Su aplicación al prototipo indicó que tampoco en este caso se esperan incrementos significativos de la vorticidad extrema, respecto de la observada en el modelo físico, Figura 8.

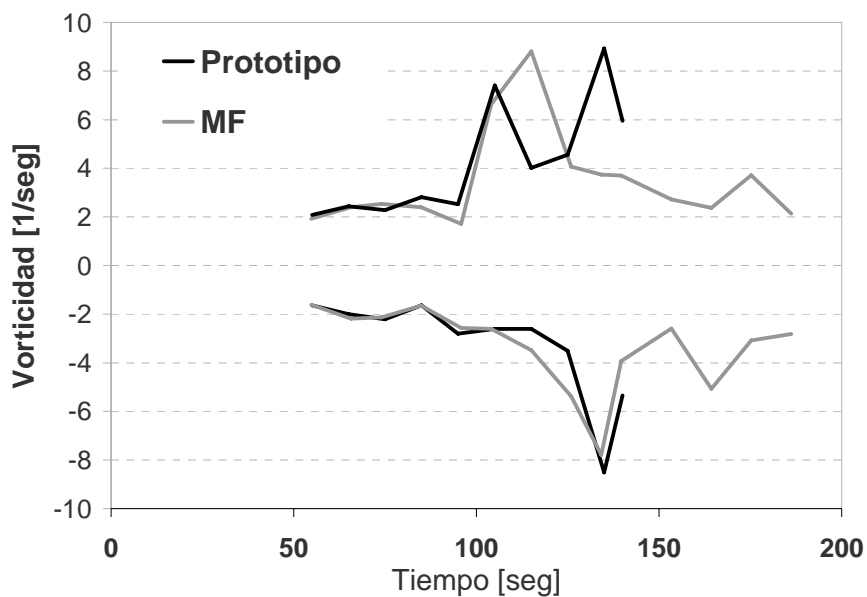


Figura 8.- Comparación de vorticidad extrema para la Alternativa

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 BIBLIOGRAFICAS

Anwar O., (1966). "Formation of a Weak Vortex". Journal of Hydraulic Research, Vol. 4, No. 1, 1966.

Anwar H., Weller O.J., Amphlett M. (1977). "Similarity of Free-Vortex at Horizontal Intake". ACSE – Vol.....

Hecker G.E. (1981). "Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices". ACSE – Vol.....

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.