

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**DETECCIÓN DE VÓRTICES EN DÁRSENAS DE BOMBEO
MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA**

Cecilia Lucino, Sergio Liscia y Gonzalo Duró

Laboratorio de Hidromecánica – Área Departamental Hidráulica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, clucino@ing.unlp.edu.ar; soliscia@ing.unlp.edu.ar; gzduro@gmail.com

RESUMEN:

El trabajo tiene como finalidad verificar la capacidad de un modelo matemático comercial de fluidodinámica computacional (CFD) para predecir la formación de vórtices en una dársena de bombeo. Se propone identificar vórtices de distinto origen e intensidad en una dársena de bombeo de geometría sencilla, de la cual se cuenta con resultados experimentales de las mismas condiciones de operación. Las velocidades calculadas muestran tendencias y magnitudes similares a las medidas, mientras que los valores máximos de vorticidad calculados resultan varios órdenes mayores que los medidos, lo cual se explica por las características de la medición en modelo físico.

La modelación predice la presencia de vórtices superficiales cuya ocurrencia fue detectada en el modelo físico de referencia, pero además detecta vórtices de pared y de fondo que no fueron registrados en el trabajo de referencia. La representación de la vorticidad total, expresada por su valor absoluto, y seleccionada como superficie equipotencial, resulta ser una herramienta de visualización muy útil para realizar un seguimiento de la ubicación, trayectoria y variación temporal de los vórtices concentrados.

ABSTRACT:

The present work is aimed at verifying the ability of a commercial computational fluid dynamic (CFD) mathematical model to predict the formation of vortices in a pump basin. It was intended to identify vortices of diverse origin and intensity in a geometrically simple pump basin of which experimental results under the same operating conditions are known. Calculated velocities correlate well to trends and magnitudes of measured ones, whereas the maximum values of vorticity calculated are several orders of magnitude higher than those measured, which is explained by the characteristics of measurement in the physical model.

Model results predict the presence of surface vortices which were seen in the reference physical model, but also wall vortices and bottom vortices which were not reported in the reference work under the same working conditions. For lower submergences, the presence of the bottom vortex in the physical model is inferred from the cavitation of its core. The representation of total vorticity, in terms of its absolute value, and selected as an equipotential surface, may turn into a very useful tool to visualize and follow the actual location, trajectory and time variation of concentrated vortices.

PALABRAS CLAVES:

Vórtices, dársenas de bombeo, ingreso de aire

INTRODUCCIÓN

La experiencia en ensayos en modelo físico de instalaciones de bombeo en el Departamento de Hidráulica (Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata) permite dar cuenta del tiempo y recursos que insume la verificación de un diseño en estos modelos. Es indudable la conveniencia de avanzar en el diagnóstico de los problemas de diseño antes de llevarlo a la etapa de verificación en modelo físico.

Con el correr de los años las instalaciones han llegado a dimensiones de obra y magnitudes tales de los caudales bombeados, que los déficits en el diseño traen consecuencias de mayor relevancia a nivel hidrodinámico por su escala. Es así que la modelación CFD (fluidodinámica computacional) emerge como una herramienta útil en distintas etapas del proyecto de una Estación de Bombeo, especialmente a partir del avance en la capacidad y tiempo de procesamiento de las *workstation* (sistemas de computación independiente de gran poder de cálculo y con alta capacidad gráfica).

La aparición de vórtices en las dársenas de bombeo y sus consecuencias negativas para la instalación, es tal vez el problema más común encontrado en este tipo de instalaciones y a la vez el más complejo de resolver, especialmente cuando se trata de estaciones de bombeo con múltiples bombas y con flujo de ingreso muy condicionado por imposiciones del contexto (curvas bruscas, secciones reducidas, etc.).

Para avanzar en este sentido, el trabajo se propone verificar los resultados de la aplicación del software FLOW-3D[®] a una geometría de dársena simple, y dejar planteadas conclusiones y propuestas de estudios necesarios para aprovechar las posibilidades que ofrece este modelo.

OBJETIVOS

El trabajo tiene como finalidad la validación del modelo matemático CFD de uso comercial FLOW-3D[®] para la representación e identificación de vórtices de distinto origen e intensidad en una dársena de bombeo de geometría sencilla, de la cual se cuenta con resultados experimentales de las mismas condiciones de operación.

METODOLOGÍA

Modelo CFD

El software FLOW-3D[®], desarrollado por Flow Science Inc. de Estados Unidos, es un programa de simulación de flujos basado en la resolución numérica por volúmenes finitos de las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Consta también de varios módulos complementarios para la resolución de distintos problemas tales como el transporte de sedimentos, cuerpos sólidos en movimiento, escurrimiento en medios porosos, etc. El modelo representa la ubicación de la superficie libre mediante el método VOF (volume of fluid) y posee el método FAVOR[®] para la determinación de los contornos sólidos.

Para la simulación de la dársena se utilizaron tres mallas de celdas cúbicas conectadas entre sí. En primer lugar se dispuso una malla de celdas de ocho milímetros de lado en la zona del canal de aproximación a la bomba. Luego se colocó una malla de celdas de cuatro milímetros de lado en la zona de la bomba donde era de interés el análisis más detallado del escurrimiento. Por último, se ubicó una malla de celdas también de 4 mm de lado en la parte superior de la bomba para imponer la condición de borde del caudal objetivo. A modo de aclaración, sólo se utilizó una malla de 4 mm. en el entorno de la bomba con el fin de disminuir la cantidad de celdas totales, ya que el número de éstas tiene una influencia directa con el tiempo de corrida de la simulación.

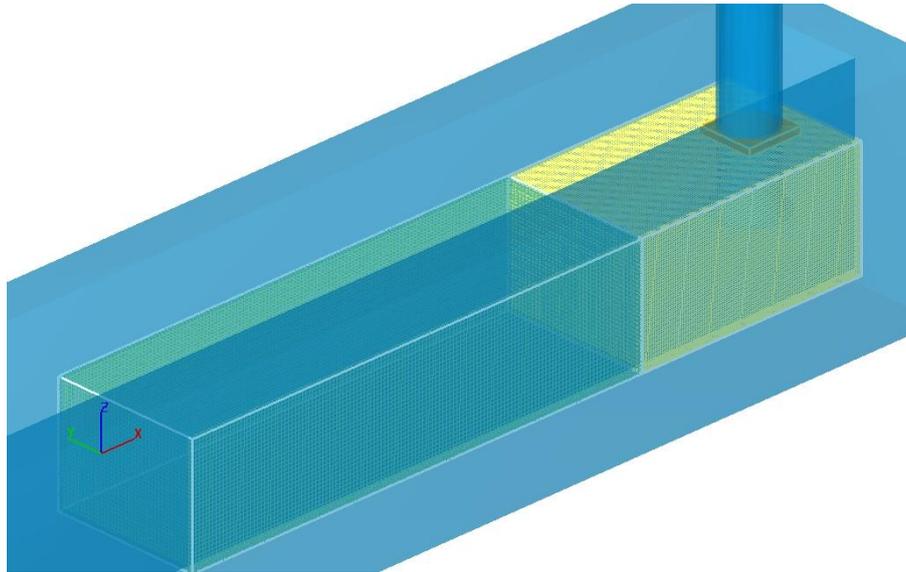


Figura 1.- Mallas utilizadas en la modelación

En suma, la cantidad de celdas de las mallas son 167680 para la de 8mm, 655360 para la de 4mm y 3600 para la otra de 4mm dispuesta para imponer la condición de borde.

La longitud modelada del canal se estableció observando previamente cuál era la mínima distancia en la que se desarrollaba totalmente la capa límite antes de la llegada del flujo a la bomba, ya que el flujo en el ingreso al dominio posee una distribución de velocidades uniforme en el espacio.

La condición de borde a la entrada del dominio consistió en un nivel de energía total igual al nivel de agua buscado en la dársena más 3 milímetros. Esto último considera la pérdida de energía hasta la llegada a la bomba.

La condición de borde de aguas abajo se estableció como un caudal saliente constante en el tiempo (ubicada en la cara superior de la malla anaranjada de la **Figura 1**). Se consideró al fluido como monofásico y el agua se consideró incompresible, con una temperatura de 20°C. Los modelos físicos activados fueron el de gravedad y el de turbulencia. La aceleración de gravedad fue de 9.81 m/s² y el modelo de turbulencia empleado fue el de grandes vórtices (LES o Large Eddy Simulation). Se utilizó un tercer orden para aproximar la advección de la cantidad de movimiento y el método de advección del VOF fue el Split Lagrangian.

Observación de vórtices

El aspecto de interés prioritario en esta indagación ha sido explorar las posibilidades de la simulación CFD para identificar los diferentes tipos de estructuras vorticosas que aparecen en una dársena de bombeo.

El flujo a superficie libre, confinado en la geometría de una dársena típica de bombeo, presenta ciertas particularidades. Por un lado se encuentra la interfase agua-aire, restringida por la forma de los contornos físicos de las paredes que le imprimen cambios de dirección y por la propia bomba, que se presenta como un obstáculo para la porción del flujo superficial que no es conducido en forma directa a la aspiración sino que se dirige hacia el espacio ubicado detrás de la bomba. En ciertas condiciones, el flujo se organiza en forma de vórtices superficiales, en forma de estructuras coherentes, con distintos grados de estabilidad, dependiendo de la sumergencia y de las características de flujo de aproximación.

Por otra parte, el flujo sumergido se ve sometido a los cambios de dirección y magnitud de la velocidad impuestos por el bombeo y la geometría de los contornos sólidos, y en este proceso, en

el cual se inducen localmente flujos con componentes de circulación, la capa límite de las superficies de contacto provee vorticidad adicional al flujo, formando vórtices de pared y de fondo que llegan a ser muy estables. A diferencia de los superficiales, la presencia de estos vórtices sumergidos no depende en forma directa de la sumergencia, aunque sí se ha medido que el aumento de la velocidad del flujo (que puede darse con menor sumergencia a igual caudal) puede llevar a estados de cavitación a los vórtices de fondo (Iwano, 2002). El grado de depresión local que alcanzan los vórtices de fondo cuando se alcanzan velocidades límites conlleva la aparición de la cavitación en su núcleo, que ingresa a la aspiración con consecuencias negativas para la bomba.

En diseños de geometrías complejas se combinan efectos provenientes de la ausencia de uniformidad en el perfil de velocidades del flujo de aproximación, con factores propios de la geometría, sumergencia y guiado del flujo en el entorno de la propia bomba. En estos casos, resulta complejo analizar los múltiples factores que se superponen para dar como resultado un funcionamiento ineficiente del conjunto y resulta laborioso y costoso buscar medidas correctivas. Por esta razón se propone explorar técnicas de visualización de estructuras vorticosas en una geometría sencilla, de la que se tienen datos experimentales para validar sus resultados.

Ensayo de referencia

Se tomó como referencia el ensayo en modelo físico presentado por Matsui (2006) y Okamura (2007) que consta de una geometría sencilla, con la bomba implantada con una excentricidad del 3% del ancho de la dársena respecto al eje geométrico de la misma (**Figura 2**). El trabajo documenta la comparación de valores medidos y observados con resultados numéricos utilizando diferentes códigos de cálculo. La medición se realizó utilizando la técnica PIV (Particle Image Velocimeter). Se presentan valores de velocidad, vorticidad, permanencia y ubicación de los vórtices. De la publicación mencionada se han tomado solamente los datos medidos en el modelo físico, dejando de lado la comparación con otras simulaciones por cuestiones de limitaciones en el alcance de este trabajo.

Se reproducen los resultados de una primera etapa, que es la correspondiente al siguiente estado ensayado: caudal bombeado de 1 m³/min y tirante de 230mm. También se presentan las primeras observaciones del funcionamiento con un tirante de 150 mm, con el objetivo de anticipar las tendencias que arroja la simulación y su coincidencia con los valores medidos.

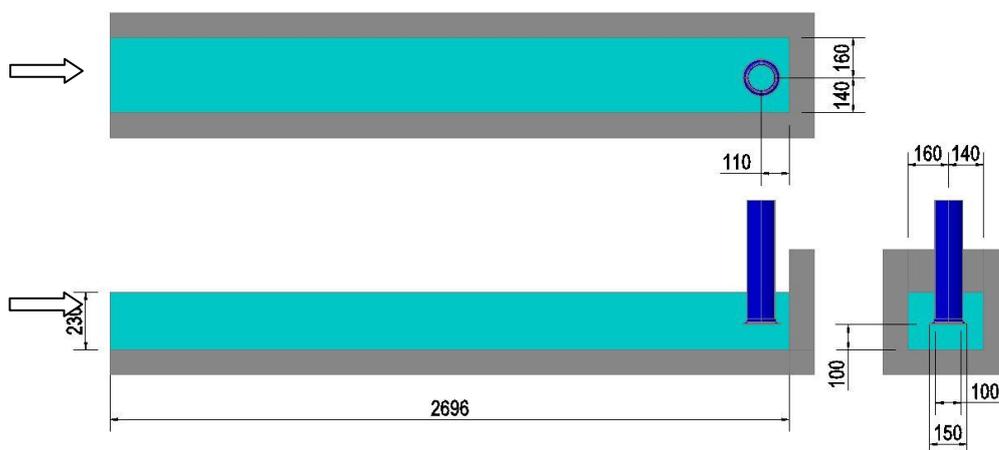


Figura 2.- Geometría del modelo físico de referencia (Matsui, 2007)

Las condiciones de borde utilizadas fueron: nivel de agua constante igual a 230mm en el ingreso, y en la sección superior de la bomba, un caudal de impulsión constante de 1 m³/min.

El tiempo de cálculo plantea una restricción concreta por lo cual debe procurarse encontrar un tamaño de malla que represente los fenómenos que se espera analizar con un tiempo de procesamiento razonable. Para este fin, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Se realizaron dos simulaciones en forma consecutiva: la primera con una malla estructurada de celdas cúbicas de 8 milímetros de lado para llegar al estado de régimen normal. De esta simulación se tomó el perfil de velocidades como condición inicial en el ingreso para una segunda etapa de simulación con una malla de 4 mm de lado, de 60 s de duración. A partir de esta corrida se realizó el post-procesamiento de datos y se obtuvieron resultados que se presentan más adelante.
- b) Se realizó una simulación de 400 s con malla de 8 mm para apreciar la variación temporal de la vorticidad en el entorno de la bomba. El post procesamiento de los datos en forma de animación permitió comparar la ubicación de los vórtices observada en modelo físico respecto de la simulada.

RESULTADOS OBTENIDOS

Comparación de velocidades y vorticidad

En las **Figuras 3, 4 y 5** se presentan velocidades calculadas en una sección de referencia de la cual se tienen datos de medición en modelo físico. Los resultados presentados corresponden a: malla de 2mm (valores promediados de 5 s), malla de 4 mm (valores instantáneos), malla de 4 mm (promedio de 60 segundos) y valores medidos en modelo físico. Los resultados que se presentan corresponden a una sección ubicada a 85 mm del fondo, sobre una transecta que pasa por el eje de la bomba, indicada en la **Figura 7** sobre una salida del modelo que muestra en planta los vectores de la velocidad absoluta en la misma sección de referencia. Respecto a los dos tamaños de malla, debe tenerse en cuenta que con la malla de 2mm se tienen datos de un lapso de sólo 13s al comparar estos valores con los correspondientes a la malla de 4 mm, con la que se han obtenido 60 s de simulación.

Las tendencias de las velocidades calculadas y medidas son coincidentes, en general también tienen bastante coincidencia sus magnitudes. Se aprecia que la simulación con malla de 4 mm reproduce la misma tendencia que la de 2 mm, pero arroja magnitudes amplificadas (se debe recordar que con 2mm sólo se tiene representado el valor medio de 5 s). Para la sección en estudio, la velocidad u calculada (dirección X positiva en el sentido del flujo medio en la dársena) presenta una diferencia con la medida, que tiene consecuencias en la representación de los vórtices pegados al piso. En los valores calculados, la inversión de sentido de la velocidad en esta dirección es compatible con la formación de dos vórtices pegados al fondo, que ingresan a la bomba, girando en sentido opuesto. La existencia de este fenómeno no consta en el artículo de referencia. En la **Figura 6** se presenta la vorticidad en el eje Z para la misma transecta. Pueden apreciarse que los valores calculados resultan significativamente mayores que los medidos, especialmente para la simulación con malla de 4 mm. Una explicación es que la técnica utilizada en la medición (PIV) considera valores medios de la velocidad, en lugar de instantáneos (Nagahara, 2003). En la **Figura 8** se han superpuesto las componentes u y v con la vorticidad a fin de apreciar claramente el núcleo del vórtice. Aún cuando la formación de dos vórtices que se interfieren entre sí distorsiona sus perfiles de velocidades, es apreciable en el de mayor intensidad (negativa) el comportamiento de vórtice forzado en el núcleo y de vórtice libre a partir de un radio de 1,5 cm aproximadamente.

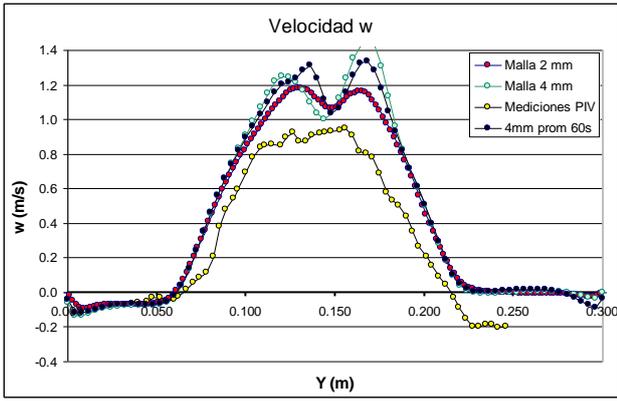


Figura 3.- Velocidad en Z (sección Z=0.85 m)

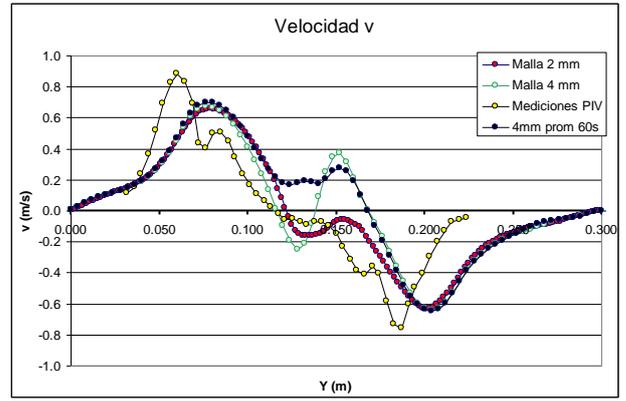


Figura 4.- Velocidad en Y (sección Z=0.85 m)

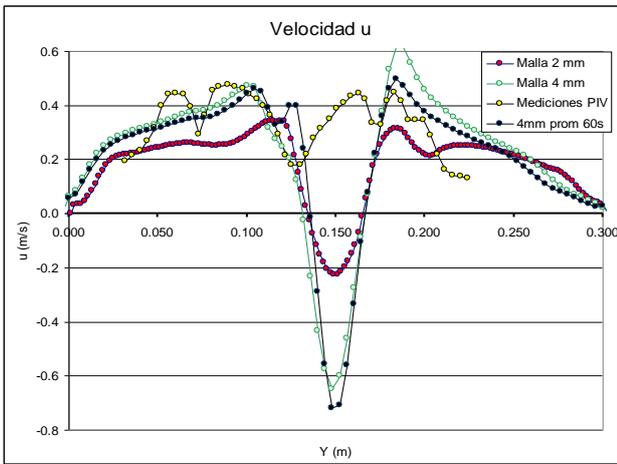


Figura 5.- Velocidad en X (sección Z=0.85 m)

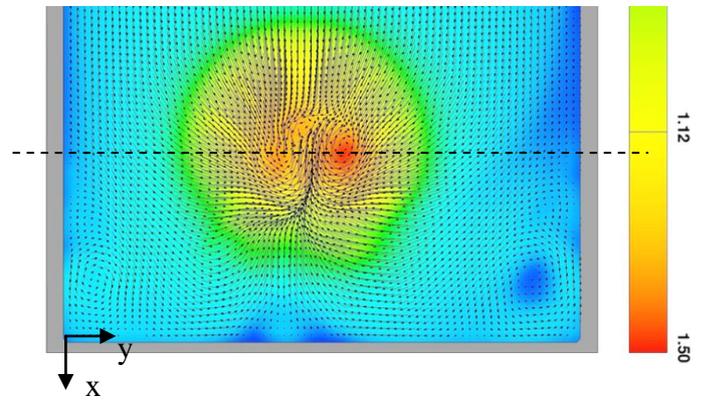


Figura 6.- Magnitud de la velocidad absoluta en la sección Z=0.85 m

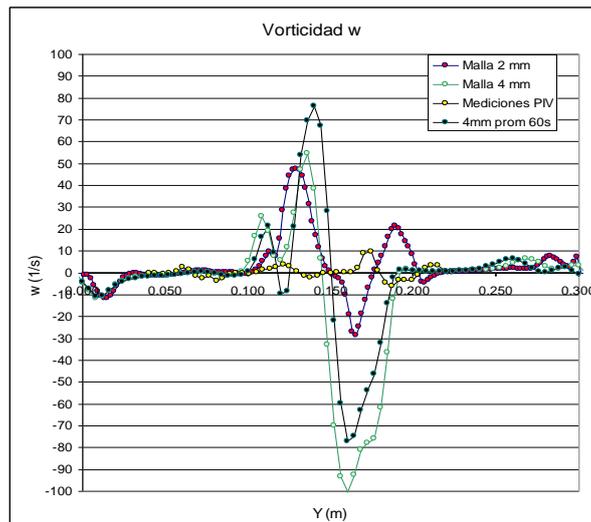


Figura 7.- Vorticidad en Z (sección Z=0.85 m)

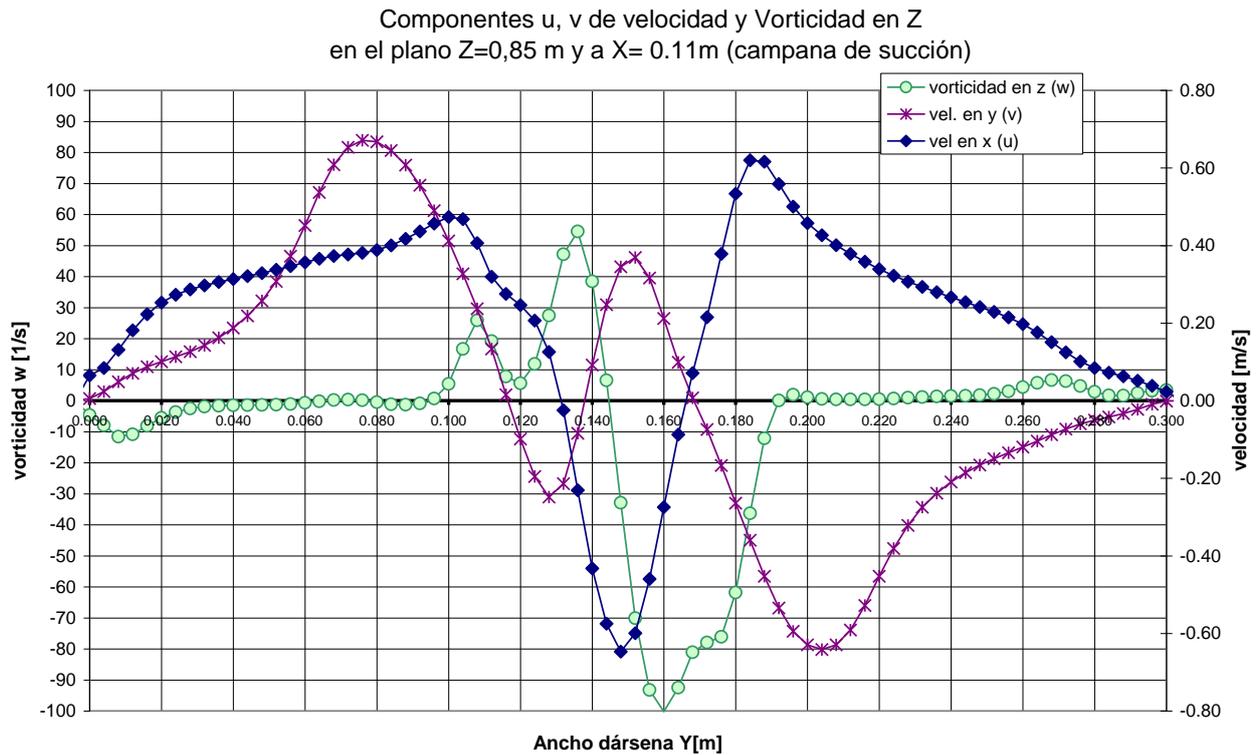


Figura 8.- Componentes de velocidad asociadas a la vorticidad en la sección Z=0.85 m

Comparación cualitativa de distinto tipo de vórtices

Los resultados obtenidos en CFD se analizaron con distintos recursos de representación: líneas de corriente, vorticidad, magnitud de la velocidad y observación de la depresión de la superficie libre.

Para evaluar la tendencia a la formación de vórtices con potencial ingreso de aire desde la superficie libre en el entorno de la bomba, los indicadores considerados son: la magnitud de la vorticidad, su permanencia en forma de estructura coherente en el tiempo y el gradiente de velocidades en la trayectoria helicoidal hacia la bomba.

Aún cuando no sean detectables a simple vista en el modelo físico, los vórtices de superficie y sumergidos pueden apreciarse en la simulación proponiendo una forma de representación adecuada para captar su estructura. Los vórtices que se desea identificar son estructuras coherentes, cuya vorticidad en magnitud se destaca por sobre los valores medios de la vorticidad distribuida. A partir de esta noción, se propuso representar superficies equipotenciales de este indicador (en valor absoluto o en una dirección que se quiere observar), hasta lograr que los vórtices queden aislados, pudiendo así discriminar mejor su estructura y permanencia.

En el modelo físico, para el caso estudiado se registró la presencia de un vórtice de superficie con una permanencia del 70 % del tiempo (**Figuras 9 y 10**) ubicado entre la bomba y la pared del fondo, hacia la derecha (si se mira en el sentido del escurrimiento). Siguiendo el criterio de visualización descrito, en la simulación CFD se encontró que la mayor vorticidad organizada a nivel superficial, expresada por en la dirección Z de la misma, se da en la misma ubicación que la observada en los ensayos (**Figura 11**). Sobre su estructura puede apreciarse con graduación de colores la variable elegida de representación, que en este caso es el gradiente de velocidades hacia la aspiración (velocidad en Z), que hace esperable que para cierta intensidad pueda incorporar aire. Se aprecia también otro vórtice, aunque de menor intensidad, en la esquina izquierda, que no parece haberse detectado en el modelo físico (**Figuras 12 y 13**). Se representa también la trayectoria de las partículas de agua que llegan al vórtice de superficie con líneas de corriente, buscando “sembrar” los trazadores en sitios adecuados para que lleguen a las áreas de interés (**Figura 14**). La intensidad

de la vorticidad y la depresión de la superficie libre en forma permanente y estable indican el potencial ingreso de aire, aunque el modelo no lo representa en su magnitud real, aspecto que será indagado en una etapa siguiente de estudios.

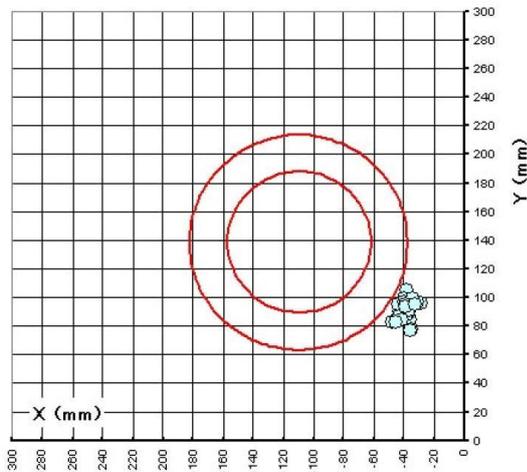


Figura 9.- Ubicación del vórtice superficial en planta (Matsui, 2007)

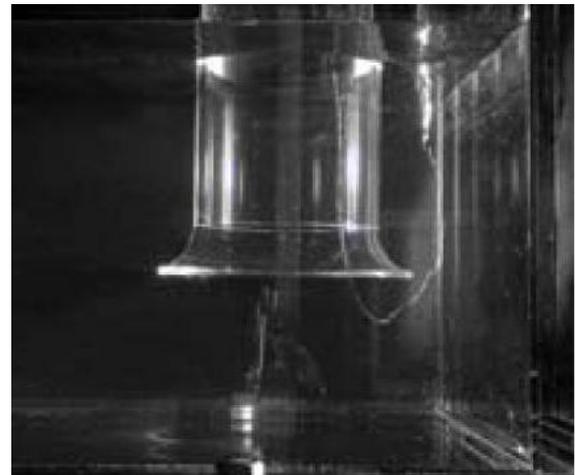


Figura 10.- Ensayo en modelo físico: Vórtice superficial con entrada de aire (Matsui, 2007)

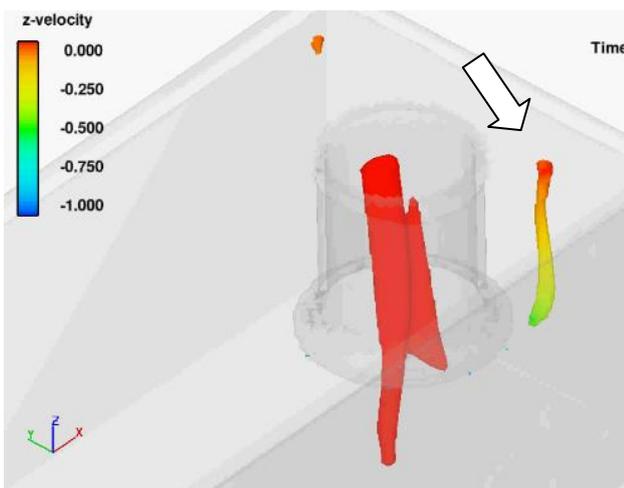


Figura 11.- Velocidad en Z en superficies de isovorticidad en Z (60 1/s)

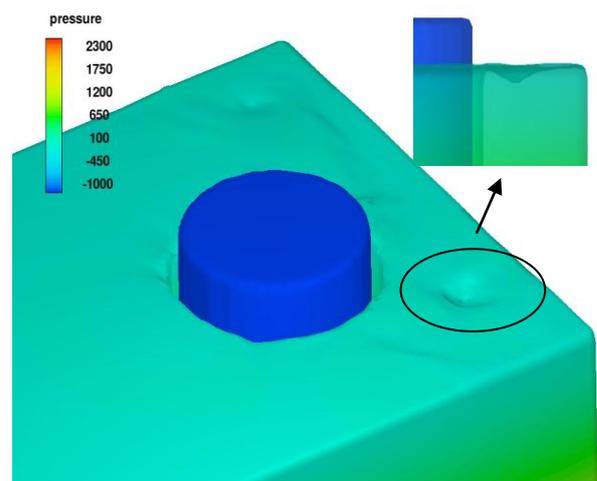


Figura 12.- Depresión en la superficie libre

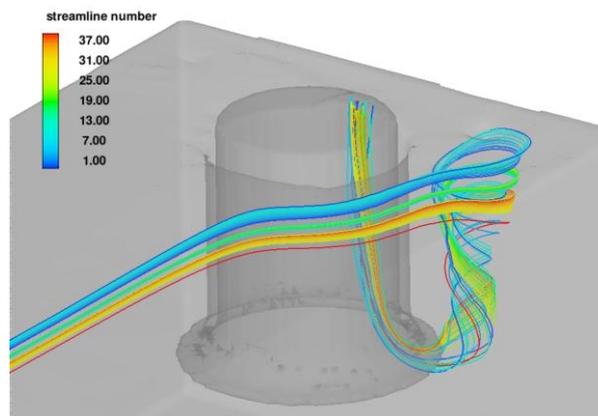


Figura 13.- Líneas de corriente en vórtice superficial

La modelación matemática predijo también la presencia de vórtices sumergidos, de pared y de fondo, que no fueron descriptos en la publicación de referencia para el caso simulado. Cabe aclarar que en los ensayos en modelo físico que siguieron al que se presenta aquí, se dispusieron condiciones de sumergencia menores, que provocaron la aparición de un vórtice sumergido cavitante de fondo, por lo que puede inferirse que el vórtice ya existía en las condiciones previas de mayor sumergencia, pero no se había detectado. En la **Figura 14** se aprecia la traza del vórtice detectado, ubicado sobre la pared derecha. El mismo se aprecia a través de las líneas de corriente en la **Figura 15**.

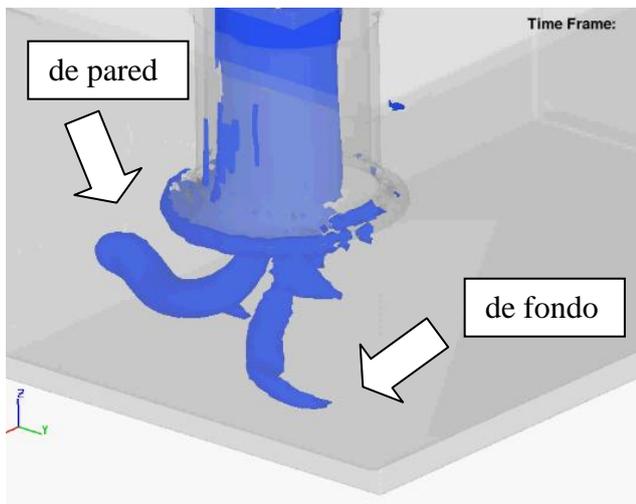


Figura 14.- Vórtices pegados a la pared y al piso

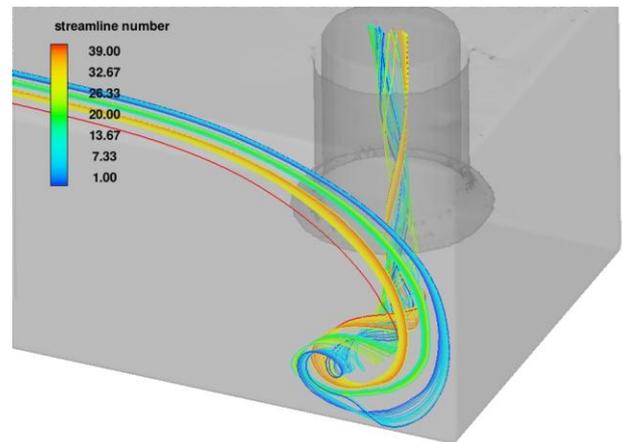


Figura 15.- Líneas de corriente en vórtice pegado a la pared

La coexistencia de los tres tipos de vórtice mencionados se da en la imagen instantánea de la **Figura 16**.

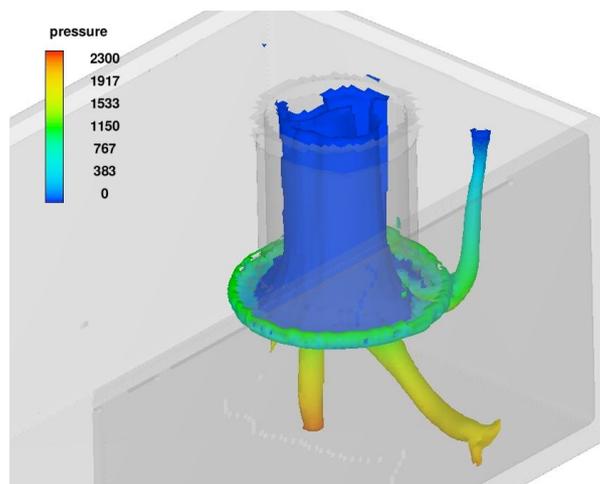


Figura 16.- Vórtices de pared, de fondo y superficial

Resultados con menor sumergencia

Se presentan algunos resultados de la simulación con igual caudal ($1 \text{ m}^3/\text{min}$) y 150 mm de tirante de los cuales se tienen observaciones cualitativas en modelo físico. En la **Figura 17** se

presenta la fotografía publicada en el artículo de referencia para la situación de menor sumergencia, donde se aprecian claramente los vórtices de superficie y de fondo (documentando que éste último tiene un núcleo cavitante). En la **Figura 18** (izq.) se presenta una imagen instantánea de la simulación de la superficie libre en la cual los vórtices superficiales tienen la misma ubicación que los observados (der). Nótese que la simulación propuesta no puede deprimir el núcleo lo suficiente como para que se forme un flujo de aire hacia la aspiración de la bomba.

Para esta condición de funcionamiento el cálculo muestra que los vórtices son inestables y su ubicación es variable en el tiempo, tal como lo observado en las mediciones. También se observa que la depresión superficial del vórtice de esquina (pared izquierda) desaparece, probablemente debido a la agitación del flujo en esta zona producto de la mayor velocidad y perturbación general del escurrimiento. El mapeo de todas las ubicaciones de los vórtices registradas en el ensayo se muestra en la **Figura 18** (der.).

El vórtice de fondo obtenido por simulación es inestable en su ubicación. La **Figura 19** muestra la imagen instantánea del campo de presiones en la sección $Z= 0.85$ m con la menor sumergencia, donde se puede apreciar la depresión, aunque los valores no alcanzan la presión de vapor.

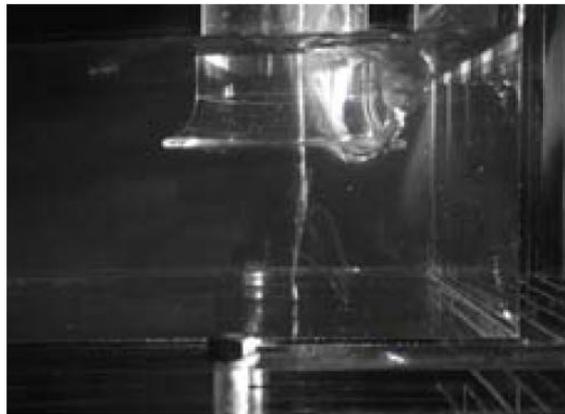


Figura 17.- Vórtices de superficie y de fondo en el ensayo con menor sumergencia (Matsui, 2007)

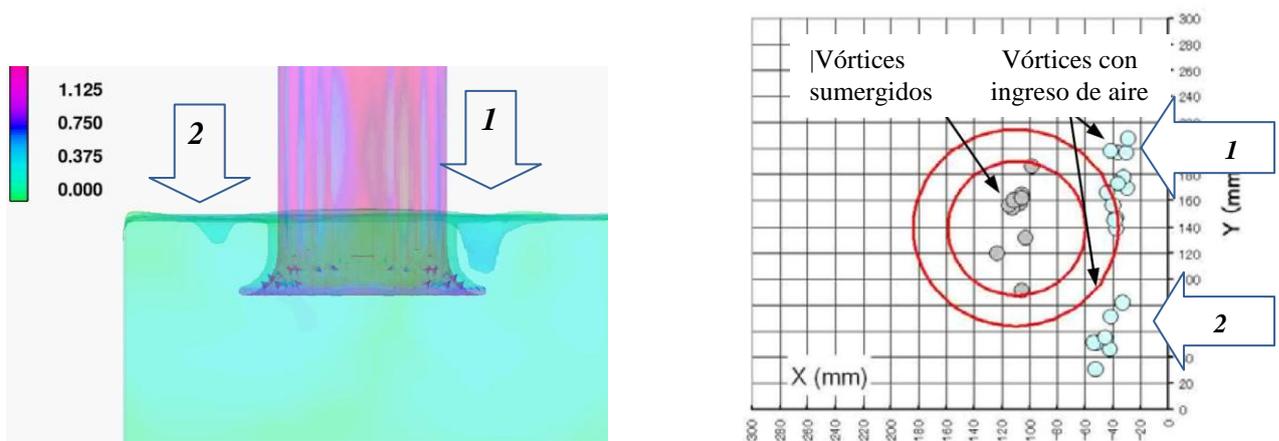


Figura 18.- Depresiones superficiales CFD (izq.). Mapeo de vórtices de superficie y de fondo en el ensayo (Matsui, 2007) (der.)

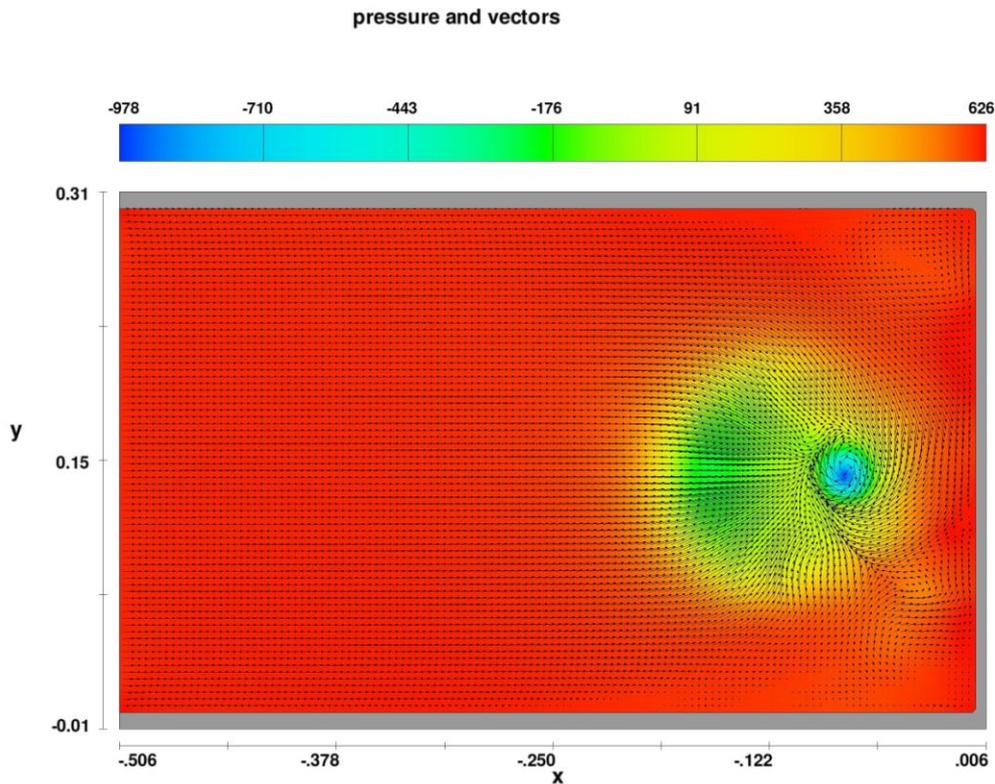


Figura 19.- Depresión en el vórtice de fondo

CONCLUSIONES

Los datos presentados permiten plantear algunas conclusiones acerca de la aplicación del modelo FLOW-3D[®], al flujo en una dársena de bombeo para detectar vórtices, utilizando la simulación LES (Large Eddy Simulation). Este modelo ha sido sugerido en la bibliografía (Tokuyay, 2005) frente a otros como el Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), que no representa en forma realista los fenómenos altamente inestables e intermitentes. Los resultados numéricos demuestran la eficacia del modelo en identificar los vórtices observados en los ensayos en modelo físico. Se verifica que la mayor vorticidad de cálculo es coincidente con la observación de vórtices con ingreso de aire. Los vórtices sumergidos pegados al piso de la dársena alcanzan los mayores valores de vorticidad y sugieren la posible formación de cavitación en el caso de menor sumergencia, hecho constatado en los ensayos. Por otra parte, se encontró que la representación de las superficies equipotenciales de alta vorticidad es una herramienta útil para la apreciación de la estructura de los vórtices superficiales, de pared y de fondo.

Utilizar fluido monofásico en lugar de bifásico tiene la ventaja de consumir menor tiempo de cálculo, de allí que hay autores que proponen la aplicación de técnicas de post procesamiento basadas en modelos teóricos de vórtices (Iwano, 2002; Chen, 2007) para inferir si se dan las condiciones para la existencia de aire o vapor de agua en el núcleo de los vórtices a partir del cálculo con fluido monofásico. La conveniencia de estas alternativas de post procesamiento frente a la simulación como fluido bifásico será objeto de análisis en una etapa siguiente de los estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen Y., Wu Ch., Ye M., Ju X. (2007) Hydraulic Characteristics of Vertical Vortex at Hydraulics Intakes Journal of Hydrodynamics, Ser.B, 2007,19(2):143-149.

Iwano, R., Shibata T. (2002). "Numerical prediction method of submerged vortex and its application to the flow in pump sumps and without a baffle plate". *Proceedings of the 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. Honolulu, Hawaii,

Matsui J., K. , Okamura T. (2006). "CFD Benchmark and a Model Experiment on the Flow in a Pump Sump". *Proceedings of 23rd IAHR XXIX Symposium*, Yokohama, Japan.

Nagahara, T., Sato T., Okamura T. (2003), "Measurement of the Flow around the Submerged Vortex Cavitation in a Pump Intake by Means of PIV", Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan. P 1-7

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.

Tokyay, T. and Constantinescu, S.G. (2005), "Large Eddy Simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry. II: Investigation of dynamics of coherent structures", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE.