

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

**AVANCES EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FENÓMENO DE
SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS**

Gabriel Usera, Christian Chreties, Mariana Mendina, Gonzalo Simarro y Luis Teixeira.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay.

Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación, Universidad de Castilla-La Mancha, España.

gusera@fing.edu.uy, chreties@fing.edu.uy, mmendina@fing.edu.uy, gonzalo.simarro@uclm.es, luistei@fing.edu.uy.

RESUMEN:

Se presenta el desarrollo y resultados de la simulación numérica del flujo turbulento en un canal en presencia de un grupo de seis pilas. El modelo implementado combina un modelo LES de turbulencia y un modelo VOF de flujo a superficie libre sobre la base del modelo *caffa3d.MB* para flujos tridimensionales.

Se discute la comparación cualitativa y cuantitativa de los resultados numéricos con observaciones experimentales, mostrándose congruencias promisorias y algunas dificultades que requieren mayor atención derivadas del acople entre los modelos de turbulencia y de superficie libre.

ABSTRACT:

The development and results from the numerical simulation of turbulent flow in an open channel with six piles are presented. The base model *caffa3d.MB* has been enhanced for this purpose with an LES turbulence model and a VOF model for free surface flows.

Qualitative and quantitative comparisons with experimental observations show encouraging agreement, while some difficulties are identified, that require further research, related to the coupling between both models near the free surface.

PALABRAS CLAVES:

Simulación Numérica, Socavación en Grupos de Pilas.

INTRODUCCIÓN

La socavación local alrededor de estructuras (pilas, grupos de pilas, estribos de puentes) emplazadas en lechos erosionables, es uno de los principales problemas prácticos en relación a la estabilidad de las mismas. Los procesos de socavación local alrededor de estructuras están caracterizados por una hidrodinámica compleja (flujo tri-dimensional no estacionario con desarrollo y desprendimiento de estructuras vorticosas de diferentes escalas) combinada con la erosión y transporte de sedimento desde aguas arriba de la estructura hacia aguas abajo. Esta complejidad ha llevado a la comunidad científica a abordar el problema esencialmente mediante modelación física, dejando de lado los tratamientos de tipo teóricos. Es así que en los últimos 20 años de desarrollo del tema se han realizados muchos trabajos experimentales con el fin de avanzar en la comprensión física del fenómeno y determinar formulaciones de diseño de las fundaciones (Melville and Coleman (2000), Sumer and Fredsoe (2002), Dey and Raikar (2007), Unger and Hager (2007)). La comprensión del fenómeno de erosión local en torno a pilas, requiere el conocimiento cualitativo y cuantitativo del flujo durante el proceso erosivo así como de las estructuras vorticosas de mayor escala, responsables de la puesta en movimiento y transporte del sedimento (Kirkill, 2009). Sin embargo, en la actualidad, no es posible mediante procedimientos experimentales, visualizar todo el campo de flujo alrededor de las pilas y estribos de puentes, u obtener información precisa sobre el flujo y los estadísticos de turbulencia cerca del lecho (por ejemplo: distribución de la tensión de corte media e instantánea, fluctuaciones de presión etc.) (Kirkill, 2009). Para avanzar en ese sentido, la comunidad científica viene trabajando en forma incipiente, hacia un abordaje numérico de simulación del flujo, que permita combinar los resultados de las técnicas experimentales más avanzadas (ADV, PIV, etc.) con la simulación numérica de alta resolución. Los resultados conseguidos mediante simulación numérica más auspiciosos se obtienen utilizando mallas suficientemente finas para la integración de las ecuaciones a través de la sub-capas viscosa. Los modelos numéricos que utilizan los métodos de resolución de turbulencia tipo LES y aquellos híbridos RANS-LES (Rodi 1997; Spalart 2000; Tokyay and Constantinescu 2006; McCoy et al. 2008) vienen resultando mas exitosos para predecir los flujos divididos provocados por la pila y la fosa y los flujos dominados por estructuras turbulentas coherentes no estacionarias de gran escala, frente a la clásica aproximación RANS. Sin embargo, el conocimiento del flujo medio y los estadísticos de la turbulencia (obtenidos a través de simulación numérica) es en muchos casos insuficiente para la comprensión de todo el proceso, especialmente debido a la diferencia de escalas temporales entre las estructuras turbulentas de mayor dimensión y las escalas de variación de la batimetría de la fosa. Por lo tanto, a pesar de que se ha avanzado en el tema, el problema de caracterización numérica del flujo en torno a una pila continúa abierto desde el punto de vista científico.

Como caso particular de la modelación numérica del fenómeno de socavación local en pilas, se identifica la modelación del flujo en la condición de inicio de movimiento del sedimento. Este caso constituye la etapa inicial del proceso de socavación y tiene la simplicidad (respecto al proceso general) que ocurre siempre para fondo plano, i.e. no hay transporte de sedimento. El poder modelar numéricamente el inicio de movimiento del sedimento para el fenómeno de socavación local cobra vital importancia, no solamente en la comprensión del fenómeno sino también como herramienta para el diseño de protecciones de enrocado.

El objetivo general de este trabajo es avanzar en la modelación numérica del fenómeno de socavación local de estructuras. Para ello se implementó un modelo numérico del flujo a superficie libre en un canal provisto en el fondo de sedimento no cohesivo, donde se emplaza un grupo de pilas de sección circular dispuestas en tandem 3x2. Específicamente se pretende evaluar la modelación numérica del flujo para las condiciones de inicio de movimiento del sedimento del lecho en el caso del grupo de pilas definido. La evaluación de la modelación se realizó comparando los resultados de las simulaciones (posición donde ocurre el inicio de movimiento, campo de

velocidades, campo de tensiones de corte) con los resultados de mediciones efectuadas en un canal de laboratorio utilizando ADV.

METODOLOGÍA-PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de hidráulica fluvial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Específicamente, se utilizó un canal de pendiente variable de 30 m de longitud, 75 cm de ancho y 60 cm. de altura de trabajo especialmente diseñado para estudios de erosión local en estructuras fluviales. En la parte central del canal (20 m aguas abajo del comienzo del mismo), donde se ubica la estructura a estudiar, la profundidad del canal es mayor a los efectos de analizar el fenómeno de erosión local. Dicha instalación está equipada con un sistema de alimentación y recirculación de sedimento controlado por un PLC central.

Se utilizó un grupo de pilas construido en PVC y relleno de hormigón a efectos de asegurar la estabilidad estructural de la pieza. El diámetro individual de las pilas es 6.3 cm., la separación entre ejes $G=3$, el número de pilas en dirección al flujo $n=2$ y el número de pilas ortogonales al flujo $m=3$. El nivel de agua se sitúa por debajo del cabezal. De acuerdo a la separación $G=3$, el efecto de grupo es no-despreciable en el proceso erosivo (Ataie-Ashtiani, 2006).

El caudal circulante es controlado utilizando caudalímetros electromagnéticos, cuya precisión es de 1.1 %, mientras que el calado en el canal es controlado mediante una compuerta abatible ubicada aguas abajo.

El lecho del canal está constituido por una capa de sedimento no cohesivo y de granulometría uniforme. Se implementaron 4 diferentes tamaños de sedimento del lecho: 1.6, 5, 7 y 11.1 mm de diámetro medio, completando un total de 16 ensayos de inicio de movimiento. Los ensayos consistieron en fijar un caudal circulante, disminuir el calado en el canal operando la compuerta lentamente hasta encontrar la condición de inicio de movimiento del sedimento. Para esta condición fue registrado el caudal circulante, el calado obtenido, la ubicación donde ocurre el inicio de movimiento y el perfil de velocidades utilizando ADV a una distancia D del lateral de la primer fila de pilas; esto último para el caso de 11.1 mm de tamaño medio de sedimento.

METODOLOGÍA-MODELACIÓN NUMÉRICA

El modelo numérico implementado para este caso de estudio se basa en el modelo *caffa3d.MB* desarrollado recientemente en conjunto por el IMFIA y el ECOMMFIT (Usera et al, 2008), el cual consiste en una implementación del método de volúmenes finitos para las ecuaciones acopladas de balance de masa y cantidad de movimiento de un fluido viscoso incompresible. A este modelo se le han acoplado un modelo de turbulencia de grandes vórtices y un modelo VOF para flujos a superficie libre. Éste último sigue los lineamientos del método CICSAM propuesto por Ubbink e Issa (Ubbink e Issa, 1999).

La modelación del flujo turbulento se basa en un modelo LES con la parametrización de sub grilla de Smagorinsky y el desarrollo de la capa límite turbulenta se ha controlado mediante la introducción de un modelo de rugosidad para el fondo del canal, adaptando la propuesta de Fischer-Antze (Fischer-Antze et al 2001).

El dominio de cálculo se representa en la figura 1, tomando como referencia el tirante h de agua que circula en el canal, para el cual se ha adoptado el valor $h=0.15\text{m}$ correspondiente a uno de los

ensayos experimentales realizado, para el cual el caudal de circulación fue de $Q=0.060 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando en una velocidad media $U_0=0,53\text{m/s}$ y un número de Froude global $Fr=0,44$. El número de Reynolds respecto del tirante es $Re=8 \times 10^4$.

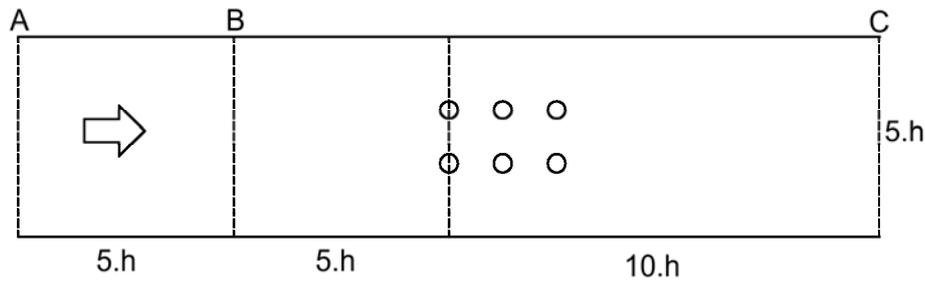


Figura 1.- Esquema del dominio de cálculo.

Así el ancho del canal es igual a $5h$ por lo cual deben esperarse efectos tridimensionales significativos en el flujo turbulento desarrollado en el canal. Se ha considerado una longitud total del dominio de cálculo de $20.h$. El primer tramo de longitud $5.h$, entre las secciones A y B, oficia de 'caja periódica' para el desarrollo del flujo turbulento de capa límite, habiéndose aplicado condiciones de borde periódicas que asocian las fronteras A y B. El flujo que ingresa a la porción restante del dominio, a través de la frontera B, es tomado de esta zona previa de preparación. Este esquema permite reducir el dominio de cálculo necesario para desarrollar las propiedades turbulentas del flujo, si bien puede introducir otras dificultades, especialmente en el caso de flujos subcríticos como el aquí considerado. Finalmente para la condición de borde de salida, a través de la frontera C, se ha aplicado una condición de flujo abierto, fijada la presión estática para mantener la referencia de tirante en el canal. Las fronteras sólidas han sido tratadas con condiciones de borde de no deslizamiento, incorporando un modelo de rugosidad para el fondo del canal.

Como se mencionó anteriormente el grupo pilas, tiene diámetro individual $d=0,063\text{m}$ está centrado en el eje del canal y tiene una separación entre ejes de pilas de $3.d$.

Se ha adoptado una malla estructurada por bloques, ajustada a la geometría de las pilas y de las fronteras del canal, siendo el paso de malla en las paredes de las pilas y el fondo del canal de 0.8 mm , expandiéndose luego hacia la zona interna del flujo con un paso de malla medio de 5 mm , para un total de 6.7×10^6 celdas de cálculo agrupadas en 43 bloques de malla. La topología de la malla ha sido diseñada de manera de minimizar la no-ortogonalidad de la misma, especialmente en la zona cercana a las pilas donde la cuadrícula debe deformarse para adaptarse al contorno de las pilas. La Figura 2 presenta un detalle de la malla en esta zona, mientras que la Figura 3 presenta una vista tridimensional de la misma. En ambos casos se han coloreado con distintos colores los bloques de malla a los efectos de visualizar la topología de la misma.

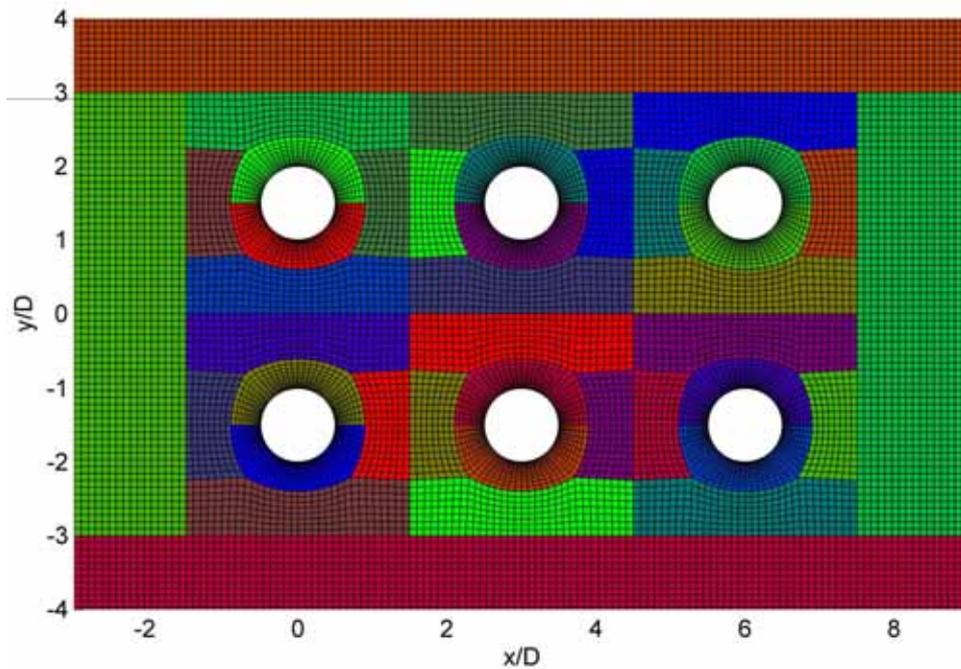


Figura 2.- Detalle de una sección horizontal de la malla de cálculo estructurada por bloques, en la zona cercana a las pilas.

Las simulaciones numéricas se inician a partir del reposo, acelerándose el flujo mediante la introducción de una fuerza de masa horizontal que hace las veces de gradiente de presiones o efecto de la gravedad en presencia de una ligera pendiente en el canal. Durante una etapa inicial del cálculo se desarrollan las propiedades turbulentas del flujo, y luego se prosigue el mismo para obtener valores instantáneos y estadísticos del flujo.

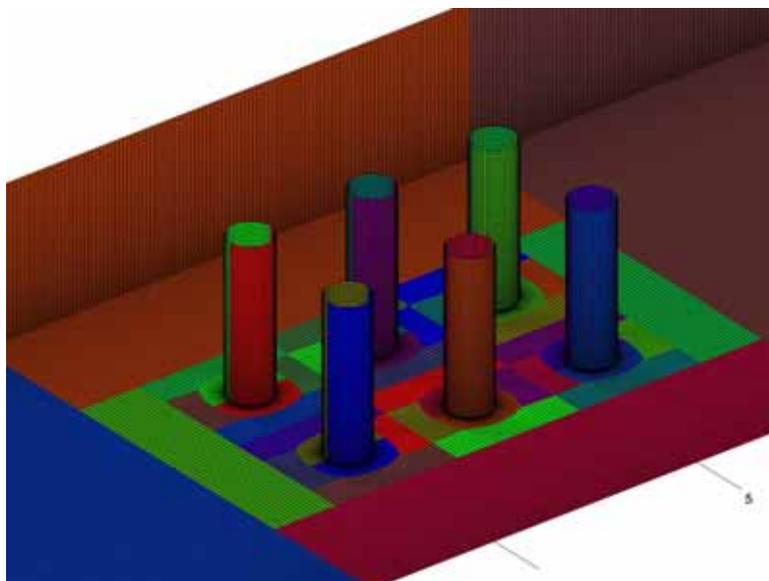


Figura 3.- Vista tridimensional de la malla de cálculo, en la zona cercana a las pilas.

RESULTADOS

En la Figura 4 se presenta una fotografía de uno de los ensayos de inicio de movimiento del sedimento en torno a grupos de pilas realizado. Por su parte, en la Figura 5, se presenta el resultado de la simulación numérica efectuada, imponiendo las mismas condiciones de flujo que en el ensayo. El resultado de la modelación es auspicioso en cuanto a la adecuada representación de la superficie

libre en la zona de las pilas, especialmente en relación con la sobre-elevación del nivel aguas arriba de las pilas de la primer fila del grupo, si bien no se dispone de una contrastación cuantitativa en este aspecto.



Figura 4.- Sobre-elevación y aspecto de la superficie libre registrada durante modelación física.

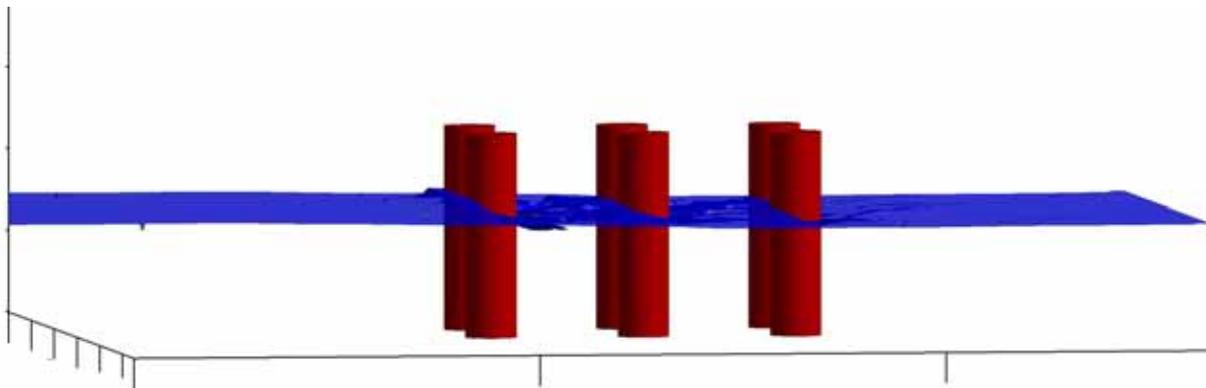


Figura 5.- Sobre-elevación y aspecto de la superficie libre obtenida de la modelación numérica para las mismas condiciones hidrodinámicas ensayadas.

La figura 6 presenta la distribución de tensión rasante media en el fondo del canal, considerando tanto la tensión viscosa directa como el aporte del modelo de rugosidad. El valor de la tensión rasante se ha normalizado respecto de la tensión de Shields para el tipo de lecho utilizado en los experimentos, la cual se estimó en $Sh=9.9 \text{ N/m}^2$. Se observa que los máximos locales de tensión rasante media se producen en las zonas frontal-lateral de las pilas, coincidiendo con las zonas habituales de inicio del proceso de socavación. En estas zonas la tensión rasante supera la tensión de Shields. Los puntos marcados en la figura 7, en el lateral de la primera fila de pilas, corresponden a ubicaciones laterales a distancia D y $D/2$ del lateral de la pila, para las cuales se presentan perfiles medios de velocidad en la siguiente figura. En particular se tienen datos obtenidos de ensayos con ADV para la ubicación a distancia D del lateral de la pila.

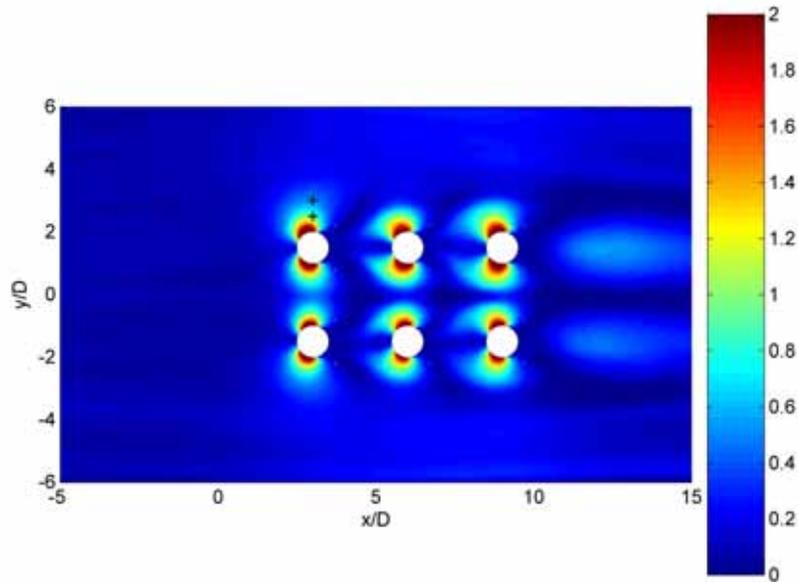


Figura 6.- Distribución de tensión rasante media total en el fondo del canal, normalizada respecto de la tensión de Shields para el inicio de movimiento. Los puntos indicados en el exterior de la primera pila corresponden a la ubicación de los perfiles (rojo) y (magenta) de la figura 6.

En la figura 7 se reproducen perfiles de velocidad longitudinal media corriente arriba del grupo de pilas (azul) y en las dos posiciones laterales indicadas en la figura 6, a distancia D (magenta) y $D/2$ (rojo) del lateral de la pila. Se representan así mismo los valores disponibles de los ensayos con ADV, para profundidades de $z=1,7$ cm y $z=5,3$ cm, a distancia D de la pila, para la velocidad longitudinal media, así como del rango rms. Se observa un desarrollo razonable del perfil de capa límite no perturbada (azul), así como una buena congruencia del perfil de velocidades en el lateral de la pila, a distancia D de la misma, con los valores experimentales disponibles.

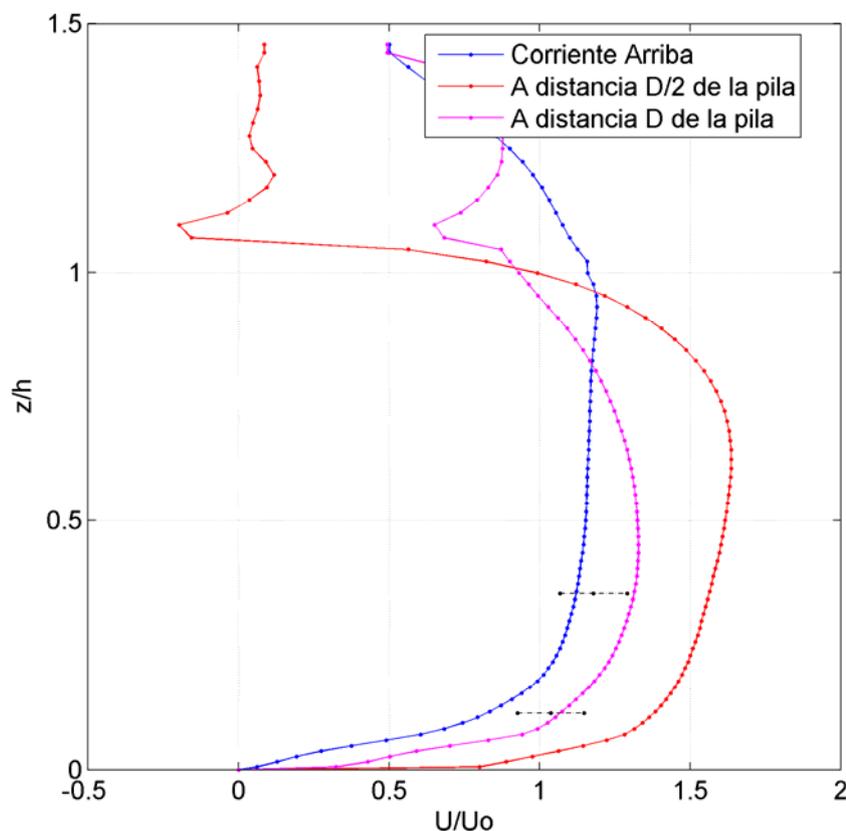


Figura 7.- Perfiles medios de velocidad en el eje del canal, corriente arriba de las pilas (azul), y en el lateral de la primera pila, a distancia $D/2$ (rojo) y distancia D (magenta) hacia el lateral del canal. En negro puntos de medida experimental a $z=1,7\text{cm}$ y $z=5.3\text{ cm}$, en el lateral de la pila a distancia D de la misma (corresponde a perfil magenta).

La estructura turbulenta del flujo de capa límite, queda en evidencia en la figura 8, donde se representa el campo de módulo de velocidad instantáneo en una sección horizontal a distancia $z/h=0.05$ del fondo del canal. Se observa la formación de estructuras longitudinales propias de la capa límite. Vale la pena aquí recordar que las propiedades turbulentas del flujo no están siendo impuestas en forma externa a través de las condiciones de borde, sino que las mismas resultan de la inestabilización y desarrollo intrínseco de la simulación a partir de la caja periódica establecida en el primer tramo del dominio de cálculo, para lo cual tiene un papel preponderante el modelo de rugosidad adoptado para el fondo del canal.

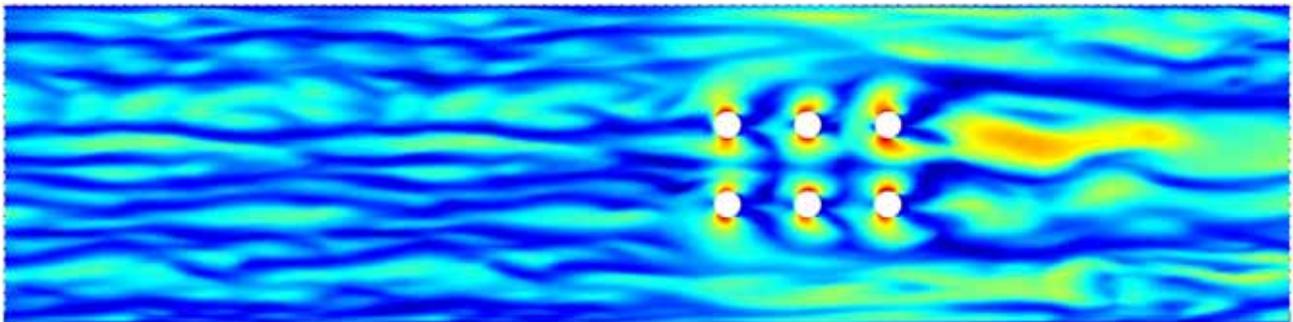


Figura 8.- Distribución instantánea de velocidades en una sección horizontal a cota $z/h=0.05$, donde se observa la presencia de estructuras turbulentas.

La figura 9 reproduce un campo instantáneo de presiones en el fondo del canal, observándose presiones máximas relativas en los frontales de las pilas, seguidos de mínimos relativos en las zonas lateral-frontal, donde se habían observado los máximos de tensión rasante media. Estas zonas coinciden habitualmente con el comienzo de la socavación. Se observa que la depresión es algo más severa en la última fila de pilas. Así mismo se observa una tendencia descendente en la distribución de presiones que se acentúa a partir de la primera fila de pilas, reflejando cierto efecto de bloqueo del grupo de pilas lo que provoca un ligero represamiento del flujo en el canal.

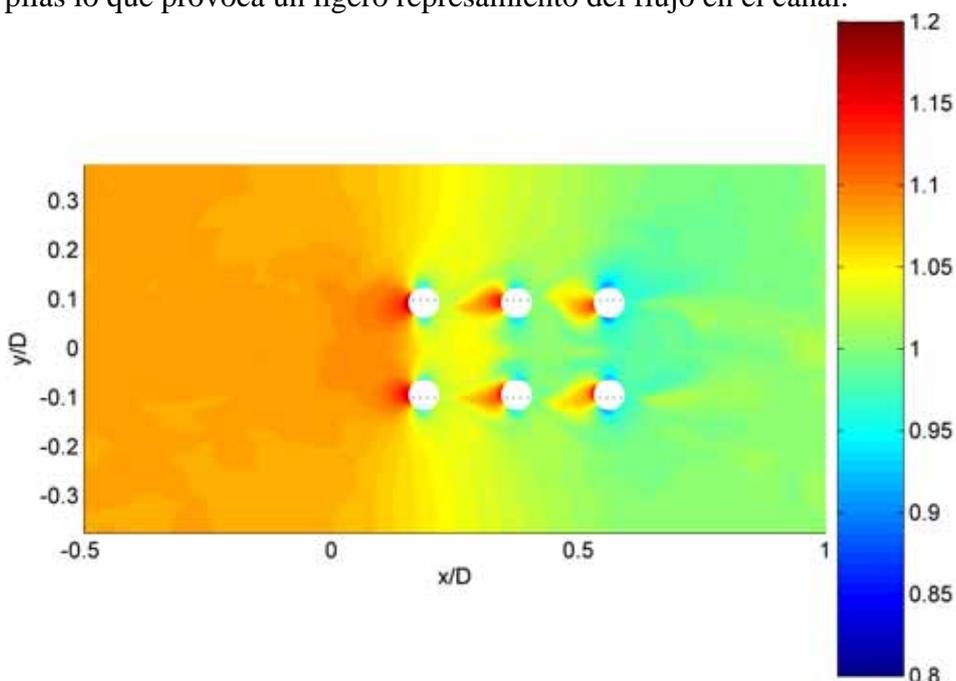


Figura 9.- Distribución instantánea de presiones ($p/\rho gh$) en el fondo del canal.

Finalmente las figuras 10 y 11 presentan campos medios de vectores velocidad en secciones transversales del canal corriente arriba de las pilas (figura 10) y corriente abajo de las mismas (figura 11). Se hace notar que en la figura 10 se ha aplicado un factor de amplificación $FS=4$ a los efectos de hacer visible el campo de velocidades. En esta figura 10, correspondiente a una sección corriente arriba de las pilas, el campo observado corresponde al desarrollo de flujos turbulentos secundarios. En cambio, el campo presente en la figura 11, corriente abajo del grupo de pilas, corresponde a las estructuras de gran escala originadas en la estela de las pilas. Por esta razón se trata de un campo de mayor intensidad y con una organización más definida.

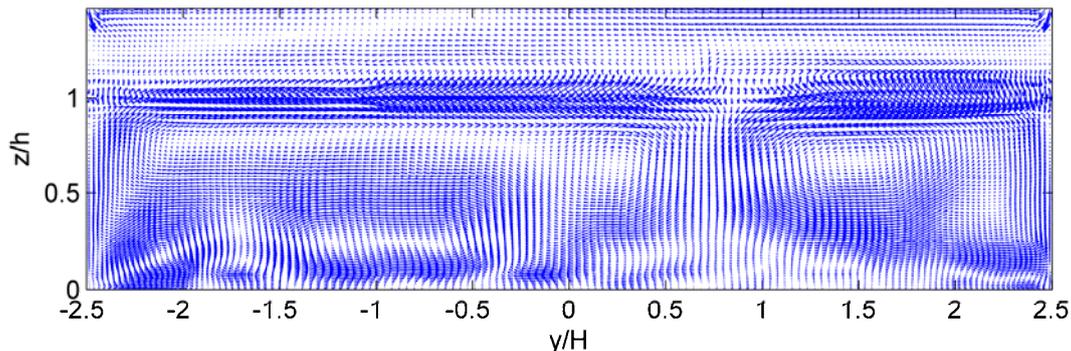


Figura 10.- Campo medio de velocidad transversal en una sección corriente arriba de las pilas. Factor de escala $FS=4$.

El campo de flujos secundarios que se observa en la figura 10 carece de simetría y tampoco tiene el desarrollo esperado para esta geometría. Se observa además una zona de corrientes espureas relativamente intensas cerca de la superficie libre ($z/h=1.0$). Estas observaciones sugieren que el acople entre el modelo LES de turbulencia y el modelo VOF de superficie libre no es del todo satisfactorio, produciéndose una distorsión apreciable de las estructuras turbulentas más débiles. Este aspecto de la simulación requiere mayores esfuerzos de investigación para asegurar resultados cuantitativos confiables, a pesar de los resultados cualitativos auspiciosos referidos anteriormente.

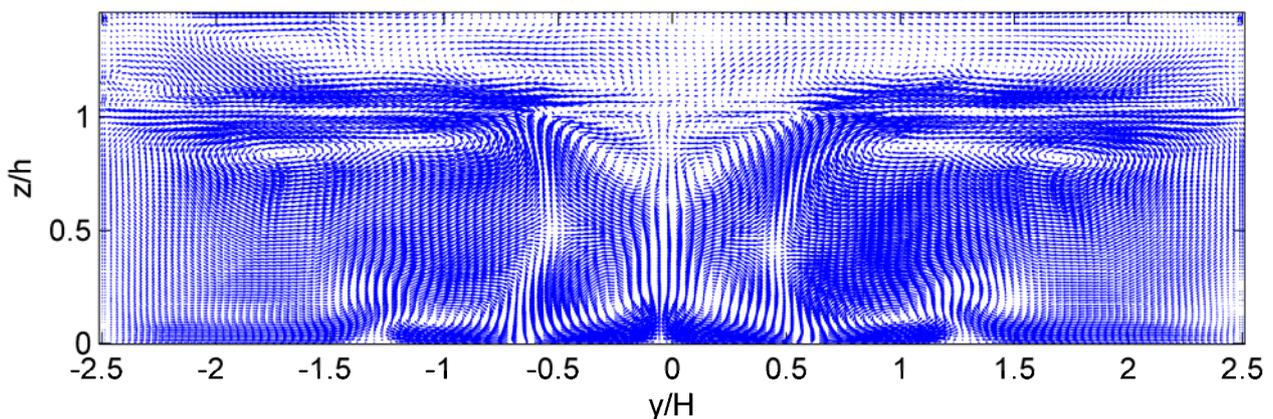


Figura 11.- Campo medio de velocidad transversal en una sección corriente abajo de las pilas. Factor de escala $FS=1$

CONCLUSIONES

Se han presentado resultados de la simulación numérica del flujo turbulento en un canal en presencia de un grupo de seis pilas, obtenidos mediante el acople de un modelo de turbulencia de grandes vórtices (LES) y un modelo de flujo a superficie libre (VOF) implementado sobre el soporte del modelo *caffa3d.MB* de volúmenes finitos para flujos tridimensionales.

El análisis preliminar de los resultados y su comparación cualitativa y cuantitativa con algunas observaciones experimentales resultan auspiciosas, si bien se han detectado también aspectos que requieren mayor atención para superar algunas dificultades en el acople de los modelos.

El tratamiento del modelo LES cerca de la superficie libre y la mitigación de las oscilaciones espurias en el campo de velocidades introducidas por el cambio abrupto de densidad en la interfase son aspectos a mejorar para obtener simulaciones numéricas aplicables al análisis de la socavación. A estos efectos deberá introducirse además un modelo de evolución del lecho, como por ejemplo el presentado en Lalli et al 2005

BIBLIOGRAFÍA

Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A. A.(2006). “Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 10, pp. 1100-1104.

Dey, S., and Raikar, R. V. (2007). “Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 4, pp. 399-413.

Fischer-Antze, T., T. Stoesser, P. Bates, N.R.B. Olsen (2001) “3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 3.

Kirkill, G. (2009). “Detached Eddy Simulation Investigation of Turbulence at a Circular Pier with Scour Hole”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 11, Noviembre 2009, pp. 888-901.

Lalli F., Esposito P. G., Piscopia R., Verzicco R., (2005) “Fluid-particle flow simulation by averaged continuous mode” *Computers & Fluids* 34, pp 1040-1061

McCoy, A., Constantinescu, S. G., and Weber, L. (2008). “Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 2, pp. 157-172.

Melville, B.W. and Coleman, E. (2000). *Bridge Scour*. Addison-Wesley Pub.Co., Reading, Mass.

Rodi, W. (1997). “Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies.” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 69, No. 71, pp. 55-75.

Spalart, P. R. (2000). “Trends in turbulence treatments.” AIAA Rep. No. 2000-2306.

Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (2002). *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 17. World Scientific, Singapore.

Tokyay, T., and Constantinescu, S. G. (2006). “Validation of a large eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 12, pp. 1303-1315.

Ubbink, O., and Issa, R. I. (1999) “A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes”. *Journal of Computational Physics* 153, 26–50

Unger, J. and Hager, W. (2007). “Downflow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers”. *Experimental Fluids*, Vol. 42, No. 1, Noviembre 2006, pp. 1-19.

Uera, G. et. al (2008). "A Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces". *Turbulence and Combustion Journal*, Vol. 81, 2008, pp. 471-495.