

Fig. 9: Velocidad en el cauce principal

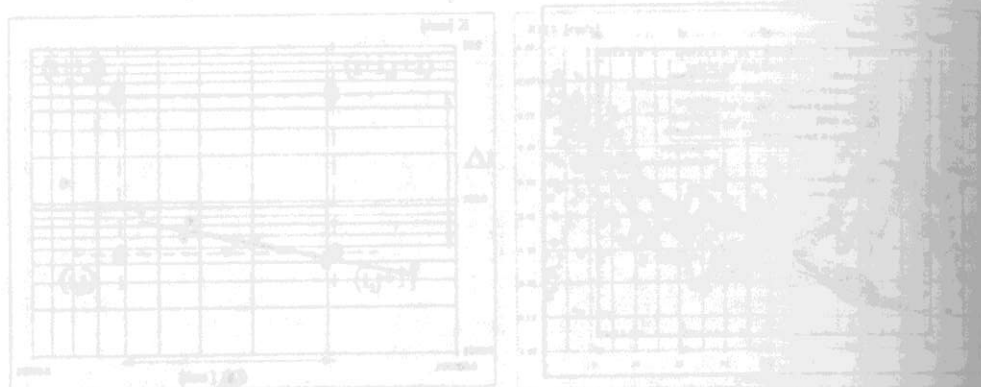


Fig. 10: Velocidad en el cauce principal

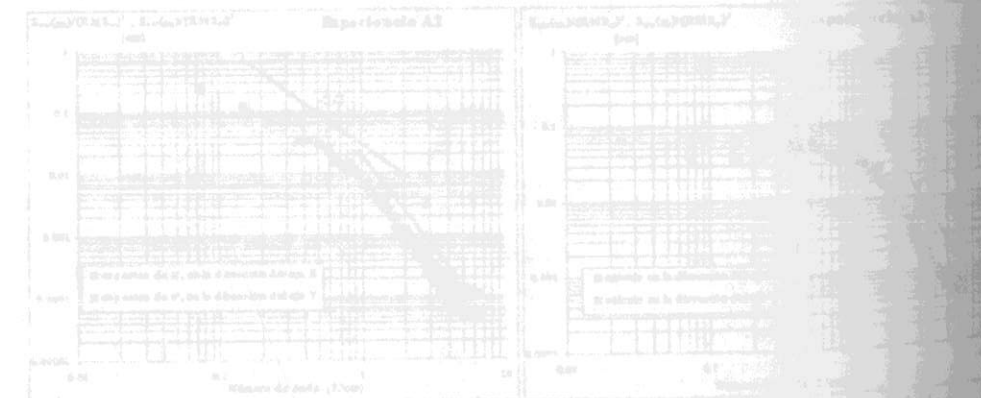


Fig. 12: Espectros promedio de las fluctuaciones de la velocidad

Fig. 13: Espectros promedio de las fluctuaciones de la velocidad

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL ESCURRIMIENTO EN UN CAUCE COMPUESTO EN PRESENCIA DE UNA CONTRACCIÓN BRUSCA Y UN ESPIGÓN

N. RIVIÈRE¹
S. PROUST²
R. MOREL³

RESUMEN

Se estudia el funcionamiento de obstáculos bruscos utilizados para deflectar un caudal de crecida hacia el cauce principal. Tales obstáculos han sido estudiados intensivamente en canales rectangulares, pero su interacción con la dinámica del cauce principal y de la planicie de inundación no se entiende completamente, en el caso de escurrimiento en cauces compuestos. Investigaciones experimentales en un modelo de cauce compuesto, de alrededor de 3 m de ancho y 13 m de largo, proveen los campos de velocidades y las profundidades de escurrimiento en torno a un espigón, y también en el caso de una convergencia brusca. Los resultados muestran influencias diferentes de estos dos obstáculos en la interfaz entre el escurrimiento en el cauce principal y la planicie de inundación. La convergencia actúa principalmente sobre la parte de aguas arriba del escurrimiento, mientras que el espigón modifica fuertemente el escurrimiento hacia aguas abajo. Un resultado sorprendente es que, detrás del espigón, la longitud de la zona de recirculación parece no verse afectada por la presencia de una velocidad mayor en el cauce principal, que aquella que se tiene sobre la planicie de inundación.

¹Profesor Asist., Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique-Composante INSA, Villeurbanne, Francia.

²Ingeniero, CEMAGREF, Lyon, Francia.

³Profesor, LMFA-Composante INSA, Villeurbanne, Francia.

1. INTRODUCCIÓN

Los espigones son obstáculos que tienen un extremo anclado a la ribera, mientras que el otro está ubicado en la corriente. Actúan como una presa parcial, no simétrica, y son usados con variados fines. Por ejemplo, crean una zona de recirculación lenta, en la cual puede ocurrir depositación, y también promueven socavación local, cerca de su cabezo. En este trabajo, se enfoca la atención sobre un tercer efecto, la regularización de un cauce a lo largo de una dirección deseada. De hecho, el objetivo principal de ubicar un espigón en un cauce compuesto será el deflectar un caudal de crecida hacia el cauce principal, para proteger la zona ubicada hacia aguas abajo.

Hay numerosos estudios del escurrimiento en torno a obstáculos en cauces rectangulares, que muestran que la longitud de la zona de recirculación puede variar, dependiendo de las condiciones del escurrimiento. Babarutsi et al. (1989), en el caso de un ensanchamiento brusco, pusieron en evidencia dos regímenes asintóticos: escurrimiento de aguas someras, o poco profundas, y escurrimiento de aguas profundas. Esta distinción se basa en el número de fricción del lecho, adimensional, $S = f.d/(8h)$ donde f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, que puede ser calculado con la fórmula de Colebrook, d es el ancho del ensanchamiento, y h es la profundidad del escurrimiento. En este estudio, f fue calculado a partir de los coeficientes de Strickler k , observados experimentalmente en el modelo hidráulico. En el régimen de aguas someras ($S > 0.1$), la longitud de recirculación L no depende de la longitud del espigón, y se tiene: $L = 0.3h/f$. En el régimen de aguas profundas ($S > 0.05$), depende sólo del ancho del ensanchamiento o de la longitud del espigón d , $L = 8.d$. Sin embargo, se espera que la longitud de recirculación se vea influida sólo levemente por la forma que tenga el obstáculo. Francis et al. (1968) muestran que, en un ducto rectangular, la influencia de un obstáculo ancho es igual a su proyección perpendicular a la dirección del escurrimiento libre, siempre que su ángulo de inclinación medido desde la ribera esté en el rango entre 60° y 150° . Sin embargo, el ancho del obstáculo influencia los efectos que éste tenga sobre el escurrimiento. Molinas y Hafez (2000) indican que, debido a su gran anchura, un machón favorece el redireccionamiento del escurrimiento en forma paralela a las riberas. La zona de recirculación es más pronunciada hacia aguas abajo de espigones.

En relación al esfuerzo de corte sobre el lecho, Molinas et al. (1998) distinguen dos maneras de las cuales un obstáculo puede aumentarlo: por contracción del escurrimiento y por la estructura del obstáculo por sí misma. Puede verse, en este efecto estructural, la fuerte desviación de los vectores de velocidad con respecto a la dirección del escurrimiento libre, así como la modificación de los perfiles de velocidad vertical. Babarutsi et al. (1996) distinguen dos efectos que generan turbulencia: la turbulencia generada en el lecho, que corresponde a pequeños vórtices, y la turbulencia generada por corte en la interfaz de la zona de recirculación, que produce vórtices de mayor tamaño. Tomar en cuenta estos fenómenos en modelos numéricos es aún difícil. Es común predecir el comportamiento de crecidas con simulaciones numéricas en dos dimensiones, promediadas sobre la vertical. Sin embargo, Tingsanchali et Maehswaran (1990) muestran que es necesario, al usar un modelo bidimensional k - ϵ , introducir factores de corrección para tomar en cuenta la fuerte curvatura de las líneas de corriente, de manera de considerar los efectos tridimensionales que ocurren en la vecindad del obstáculo y que afectan fuertemente el esfuerzo de corte (Molinas y Hafez, 2000). Estos resultados muestran la fuerte influencia que puede tener el modelo de turbulencia que se elija, sin embargo, Babarutsi et al. (1996) indican que tal elección tiene poco efecto sobre el campo de velocidades, en el límite de aguas someras. Al usar simulaciones con modelos tridimensionales, todavía se dan algunos problemas. Mayerle et al. (1995) compararon seis modelos distintos de turbulencia, y encontraron una fuerte influencia de la viscosidad turbulenta sobre la longitud de recirculación y la pendiente de la superficie libre. Explican las discrepancias entre las modelaciones y experimentos realizados en la vecindad de obstáculos, sobre la base de la invalidez de la

hipótesis de presión hidrostática. Ouillon and Dartus (1997) piensan que tales discrepancias se deben más bien a que no es válido suponer que la superficie libre se comporta como placa rígida.

En cauces compuestos, un efecto de corte muy importante se ubica también en la interfaz entre los dos tipos de lecho (Knight et al., 1984), con múltiples transferencias de caudales y de momentum (véase por ejemplo Bousmar y Zech, 1999). De hecho, Sturm y Janjua (1994) muestran la necesidad de tomar en cuenta el fuerte gradiente de velocidad existente entre el cauce principal y la planicie de inundación, para estudiar la influencia que tiene un machón. Sin embargo, ellos se interesan en la socavación y limitan sus resultados a la parte de aguas arriba del escurrimiento. El presente trabajo estudia la interacción completa entre la hidráulica en un cauce compuesto y la presencia de un obstáculo.

2. CONDICIONES EXPERIMENTALES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Se llevaron a cabo experimentos en un cauce compuesto de longitud $L = 13$ m, ancho total $B = 2.97$ m (fig. 1), y pendiente 0,0019. Este modelo se usó primero para reproducir la dinámica en un río real, y presenta una leve curvatura con un radio aproximado de giro de 25 m. El lecho se construyó en concreto, el cual fue corrugado en forma distinta para el cauce principal y la planicie de inundación. Los coeficientes de Manning-Strickler fueron medidos separadamente: Los valores son $K_{cp} = 84$ en el cauce principal y $K_{pi} = 76$ en la planicie de inundación. La profundidad en el cauce principal es de 0.16 m, y su ancho en el fondo es $B_{cp} = 0.7$ m. Está separado de la planicie de inundación por un talud inclinado con un ángulo de 32° con la vertical. El ancho de la planicie de inundación es $B_{pi} = 2.17$ m. Un estanque de quietamiento precede la entrada al cauce compuesto, y se calma el flujo con barreras de ladrillo y grillas en forma de panal de abeja. Debido a que la razón L/B es baja, se intentó cuidadosamente que, en la entrada al cauce, la razón de las descargas q_{cp}/q_{pi} fuese cercana a aquella correspondiente a un escurrimiento uniforme. Para este propósito, se separó las entradas a las dos partes del cauce aguas arriba, a la salida del estanque de quietamiento. Se ubicó un vertedero de pared delgada a la entrada de la planicie de inundación, de manera de limitar la descarga q_{pi} en comparación con q_{cp} , para una cierta altura de agua en el estanque. En el final de aguas abajo, una compuerta de clapeta inclinable se usó para obtener una profundidad constante del agua, en ausencia de obstáculos, la que fue medida por tres pies de metro en ubicaciones fijas (fig. 1).

Las alturas de la superficie libre se midieron con estos pies de metro. La precisión es de ± 0.3 mm, pero podía llegar a ser ± 1 mm en las zonas con altas perturbaciones (en la vecindad de los obstáculos e inmediatamente aguas abajo del estanque de quietamiento). Las mediciones de velocidad se hicieron utilizando un correntómetro miniatura con una hélice de 1 cm de diámetro. Las desviaciones de la velocidad con respecto a la dirección longitudinal (eje x) se determinaron utilizando una veleta miniatura, con una precisión de $\pm 5^\circ$. Las velocidades promedios en la vertical se obtuvieron a partir de cuatro medidas en cada vertical, en el cauce principal, y tres medidas en cada vertical para la planicie de inundación. Un mínimo de 14 perfiles verticales fueron obtenidos en cada sección transversal, para establecer la distribución de velocidad promediada en la vertical. Las velocidades resultantes, promediadas en la vertical, fueron luego integradas, para obtener los caudales en cada sección transversal. Éstos estuvieron en un rango entre $-1/+6\%$ de las descargas medidas con un sistema electromagnético de aforo, ubicado en la cañería de entrada al estanque. Las mediciones se efectuaron sobre rieles orientados perpendicularmente a la dirección del cauce. En tal caso, el sistema de coordenadas xyz es tal que el eje x es siempre paralelo al lado derecho de la planicie de inundación.

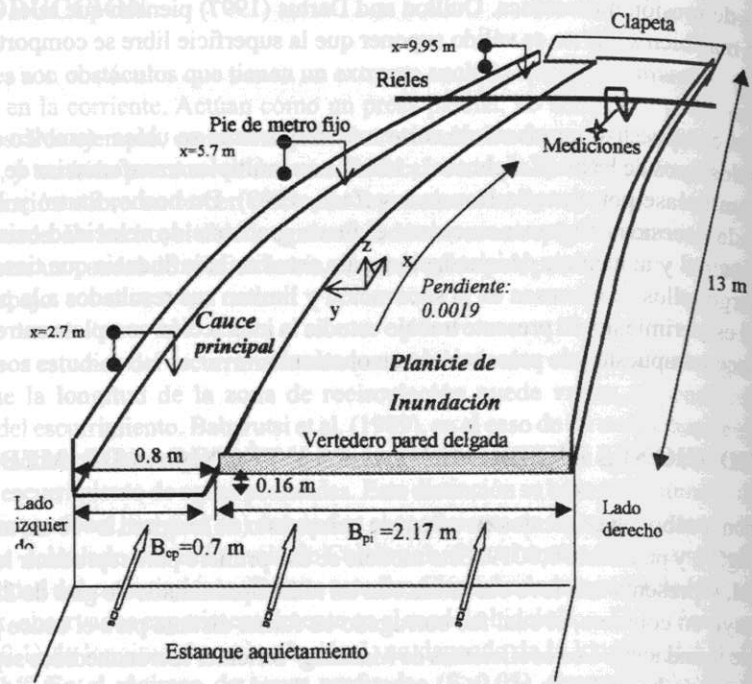


Fig. 1. Condiciones experimentales

El primer obstáculo que se construyó fue un espigón, con una longitud $L_g = 143$ cm (aprox. $2B_{pi}/3$). El segundo obstáculo fue una convergencia brusca con una longitud de 350 cm, y con un ancho en proyección de 143 cm (figura 2). Sin embargo, se espera que el efecto sobre el escurrimiento sea diferente al del espigón; de hecho, Francis et al. (1968) indican que un obstáculo inclinado tiene un efecto equivalente a su proyección perpendicular a la dirección del escurrimiento libre, siempre que su ángulo con respecto a la ribera esté entre 60° y 150° .

La descarga utilizada durante los experimentos fue de 150 L/s. La profundidad promedio correspondiente, en el cauce principal, fue $h=19.95$ cm en la sección donde estaba ubicado el espigón (en $x = 5.9$ m), pero esto en ausencia de obstáculos. La situación corresponde a un escurrimiento turbulento hidráulicamente rugoso.

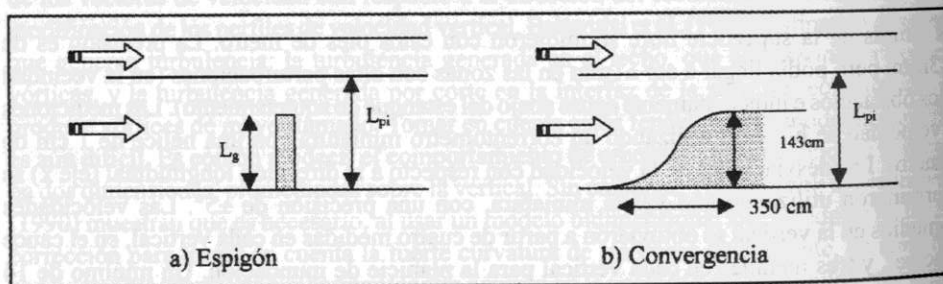


Fig. 2. Características de los obstáculos.

3. ESCURRIMIENTO SIN OBSTÁCULOS

El escurrimiento se considerará que era cercano a uniforme cuando, después de hacer un ajuste de la clapeta inclinable, las profundidades medidas en los tres pies de metro eran iguales. Sin embargo, tal criterio no era suficiente, puesto que la razón L/B no era tan alta en los experimentos, y también porque el cauce tiene una pequeña curvatura. Luego, la distribución de

velocidades tenía que ser verificada. Cerca de la entrada al cauce ($x = 2.7$ m ; $L/L_g \approx 2$), el perfil de velocidades promediadas en la vertical es casi constante para toda la sección, lo que indica que hay un exceso de descarga en la entrada hacia la planicie de inundación. Yendo 2.5 m hacia aguas abajo, el perfil muestra el gradiente característico entre el cauce principal y la planicie de inundación, pero sólo se alcanza valores aceptables después de 5.7 m ($L/L_g \approx 4$) (véase fig. 3). Sin embargo, como el objetivo de este estudio está enfocado en la interacción entre el gradiente de velocidad entre las dos regiones del escurrimiento y el obstáculo, se consideró que la configuración anterior era suficientemente satisfactoria para estos fines.

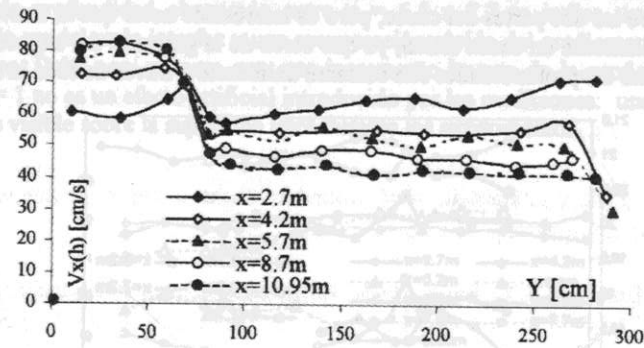


Figura 3. Evolución de los perfiles de velocidad promediados en la vertical, sin obstáculos.

4. RESULTADOS ESPERIMENTALES

4.1 Convergencia brusca

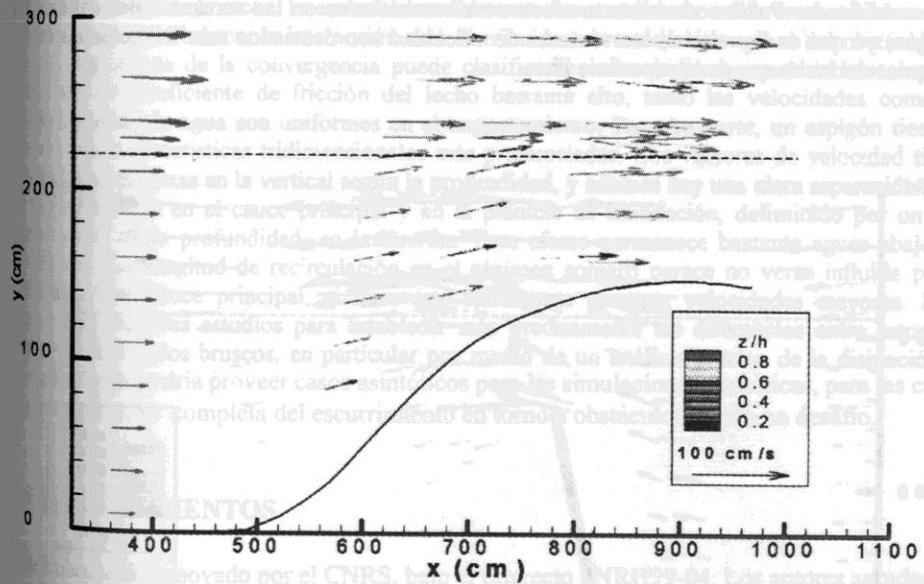


Fig. 4. Campo de velocidades en torno a la convergencia brusca

En la figura 4 se dan los campos de velocidad en el caso de convergencia brusca. Aguas arriba, el perfil de velocidad exhibe el fuerte gradiente que puede esperarse entre el cauce principal y la planicie de inundación. Este gradiente de velocidad disminuye a medida que la sección transversal decrece debido a la convergencia. En la garganta, la velocidad en la planicie de inundación es comparable con aquella en el cauce principal. El número de fricción del lecho, basado en la profundidad promedio en la planicie de inundación, es alrededor de $S = 0.5$, lo cual corresponde a un escurrimiento somero, fuertemente influido por los esfuerzos de corte en el lecho. La velocidad se incrementa fuertemente, y la influencia principal parece ser aquella de la convergencia. El leve incremento en profundidad para la razón $y/L_g \approx 1$ (fig.5) corresponde al cambio de dirección en los vectores de velocidad. Muestra que existe algún tipo de independencia entre las dos partes del cauce, pero es interesante notar que la convergencia actúa como si hubiese solamente un cauce único, ya que cerca de la garganta del angostamiento, tanto las velocidades como las profundidades son bastante uniformes a través de toda la sección.

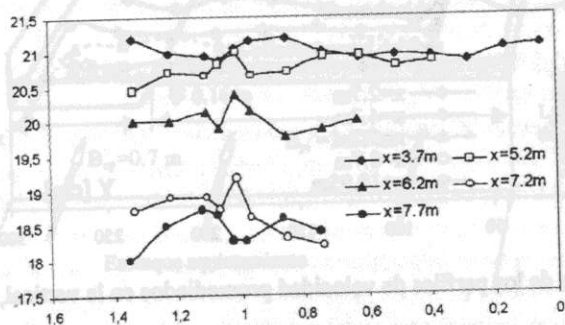


Fig. 5. Profundidad del agua en secciones transversales en torno a la convergencia brusca.

4.2 Espigón

El campo de velocidades en torno al espigón es bastante diferente que en la situación con convergencia. Los gradientes transversales entre los escurrimientos sobre las dos partes del cauce se ven sólo levemente modificados, hasta que se alcanza la vecindad del obstáculo. El caudal de crecida es redireccionado más fuertemente hacia el cauce principal, cuyo escurrimiento se ve por ende modificado. Pueden visualizarse efectos tridimensionales en las cercanías del cabezo del espigón, ya que en la vertical, los vectores de velocidad son desviados más fuertemente en las cercanías del lecho que de la superficie libre.

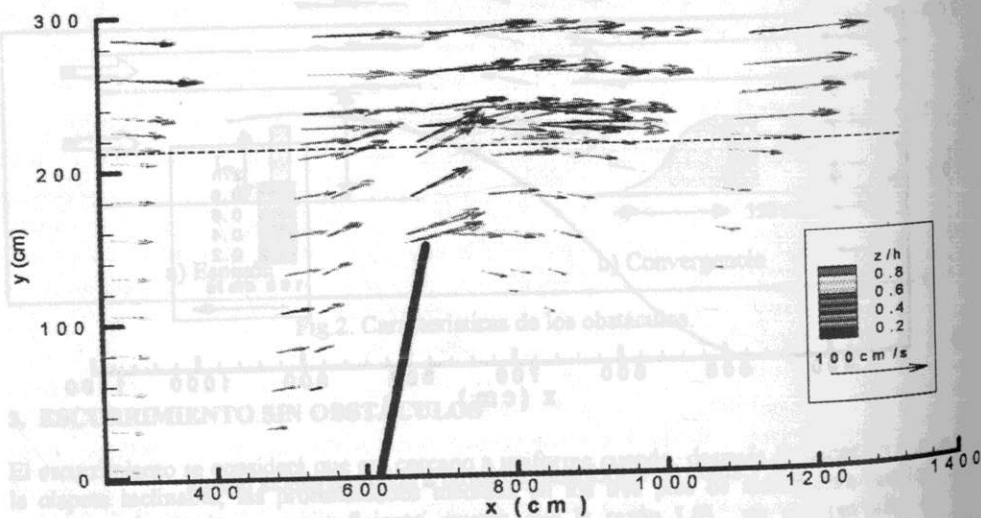


Fig. 6. Campo de velocidades en torno al espigón de 1.43 m de largo

El número de fricción del lecho se evalúa a partir de las características del escurrimiento sobre la planicie de inundación, justo en la sección del obstáculo. Para $h = 0.19$ m (a 3 cm del lecho de la planicie de inundación - véase fig.7), $S = fL_g/(8h) = 0.11$. Esto debiera corresponder a un régimen somero o poco profundo. La longitud de recirculación se calcula tal como lo propone Babarutsi et al. (1989) para un ensanchamiento brusco, esto es: $L_r = 0.3h/f = 3.1$ m. L_r fue medido experimentalmente, introduciendo aserrín dentro del escurrimiento, y se estimó que estaba en torno a los 2.8 m. Esto muestra que, a pesar de que hay una alta velocidad de escurrimiento en la planicie de inundación, la longitud de recirculación sigue siendo comparable a aquella que se obtiene en un cauce rectangular. De hecho, se recupera un fuerte gradiente de velocidades rápidamente aguas abajo del espigón. El incremento brusco en los perfiles transversales de profundidad observado entre $x = 6.5$ a 7.7 m indica una limitación de la transferencia de caudal en la interfaz y una recuperación rápida del gradiente típico entre las dos zonas del cauce. Debe aquí notarse que este incremento brusco de la profundidad en torno al valor de $y/L_g = 1$ no es un efecto artificial introducido por las mediciones: una onda estacionaria era claramente visible sobre la superficie libre durante los experimentos.

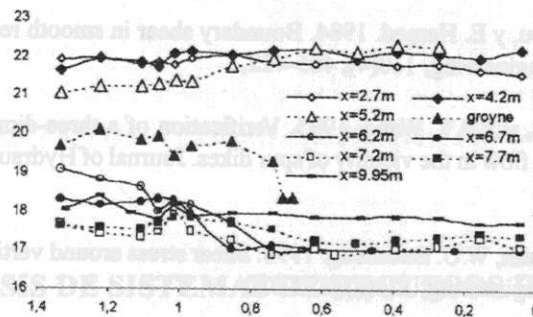


Fig. 7. Perfil transversal de las profundidades del escurrimiento, espigón de 1.43 m

5. CONCLUSIONES

Se estudiaron experimentalmente los escurrimientos en cauces compuestos en presencia de dos tipos de obstáculos bruscos. Los resultados muestran comportamientos diferentes: en el caso de una convergencia brusca, la interacción está distribuida sobre toda la longitud del obstáculo. El efecto dominante de la convergencia puede clasificarse como bidimensional debido a que, a pesar de un coeficiente de fricción del lecho bastante alto, tanto las velocidades como las profundidades de agua son uniformes en el angostamiento. Por otra parte, un espigón tiene un efecto con características tridimensionales más pronunciadas. Los vectores de velocidad tienen direcciones distintas en la vertical según la profundidad, y además hay una clara separación entre el escurrimiento en el cauce principal y en la planicie de inundación, delimitado por un leve incremento de la profundidad, en la interfaz. Este efecto permanece bastante aguas abajo del obstáculo. La longitud de recirculación en el régimen somero parece no verse influida por la presencia del cauce principal, si bien éste claramente presenta velocidades mayores. Debe ejecutarse mayores estudios para establecer más precisamente las diferencias entre estos dos tipos de obstáculos bruscos, en particular por medio de un análisis preciso de la disipación de energía. Esto podría proveer casos asintóticos para las simulaciones numéricas, para las cuales una descripción completa del escurrimiento en torno a obstáculos es aún un desafío.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el CNRS, bajo el proyecto PNRH99-04. Los autores agradecen a la Embajada de Francia en Chile, que patrocinó a N. Rivière a través del programa Egide, y también al profesor Claudio Meier de la Universidad de Concepción quien tradujo este artículo.

REFERENCIAS

Babarutsi, S., J. Ganoulis, y V.H. Chu. 1989. Experimental investigation of shallow recirculating flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(7), 906-924.

Babarutsi, S., M. Nassiri, y V.H. Chu. 1996. Computation of shallow recirculating flow dominated by friction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(7), 367-372.

Bousmar D. y Y. Zech. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 696-706.

Francis, J.R.D., A.B. Pattanak, y S.H. Wearne. 1968. Observations of flow patterns around some simplified groyne structures in channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, England, 829-846.

Knight D., D. Demetriou, y E. Hamed. 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4), 405-422.

Mayerle, R., F.M. Toro, y S.S.Y. Wang. 1995. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 243-256.

Molinas, A., K. Kheireldin, W.U. Baosheng. 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8), 822-830.

Molinas, A., y Y. Hafez. 2000. Finite element surface model for flow around vertical wall abutments. *Journal of Fluids and Structures*, 14(5), 711-733.

Ouillon, S., y D. Dartus. 1997. Three-dimensional computation of flow around a groyne. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(11), 962-970.

Sturm, T.W., y N.S. Janjua. 1994. Clear-water scour around abutments in floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 956-972.

Tingsanchali, T., y S. Maheswaran. 1990. 2-D depth-averaged flow computation near groyne. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (1), 71-86.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS DE BOMBEO EN SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AGUA MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO COMBINADO

ALDO SOTELO¹

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Alto costo que implica la operación de estaciones de bombeo en sistemas de agua, resulta más que interesante lograr la reducción de dichos costos mediante una herramienta informática innovadora. Esta herramienta buscará lograr los ahorros a través de la optimización de la programación de bombeo. Varios enfoques ya han sido presentados, demostrándose que pueden lograrse ahorros. El presente trabajo utiliza un modelo hidráulico simplificado y propone reemplazar la programación óptima de bombeo mediante una técnica de Computación Evolutiva, específicamente: *Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo*. Para ese efecto, fue utilizado el método: *el Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*, combinado con un heurístico de factibilidad basado en la hidráulica de este problema. Este método optimizará simultáneamente cuatro objetivos: el costo de la energía eléctrica, el costo de mantenimiento de las bombas, la potencia máxima alcanzada (con el costo del sistema eléctrico y la potencia reservada) y el desnivel en el inicio y el final del periodo de optimización. Resultados experimentales muestran las ventajas de usar el SPEA sobre los métodos hoy utilizados por los especialistas en distribución de agua.

¹ Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción, San Pedro de Asunción, Paraguay.

² Instituto de Investigación, Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción, San Pedro de Asunción, Paraguay.