

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**EROSIÓN LOCAL EN ESTRIBOS VERTICALES – APLICACIÓN
SIMULTÁNEA DE MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS**

Pablo Spalletti, Patricia Rut Jaime, José Daniel Brea y Luis Rodríguez

Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del agua, Argentina

pspallet@ina.gov.ar, pjaime@ina.gov.ar, dbrea@ina.gov.ar, lrodriguez@ina.gov.ar

RESUMEN:

En el presente trabajo se presenta el análisis del escurrimiento en torno a un sistema caracterizado por un terraplén y un estribo de un puente, diferenciando la forma en que se desarrollan los procesos de erosión por contracción y local. Para ello se compararon las observaciones en un modelo físico desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica del INA en un canal de 8,40 metros de ancho con el que se obtiene la erosión total debida a los distintos tipos de socavación antes citados, con los resultados de un modelo matemático bidimensional integrado en vertical (RMA2 con el módulo SED2D), en el que no pueden determinarse los procesos erosivos debidos a los vórtices inducidos por el estribo. Se han realizado ensayos con tres grados de contracción, tres caudales y dos tirantes. Tanto la construcción y operación del modelo físico como la implementación del modelo matemático están incluidas en el desarrollo de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina.

ABSTRACT:

In the present paper the analysis of the flow around a bridge abutment appears, differentiating the way in which to the processes of contraction erosion and local erosion are developed. In order to make these studies, observations in a physical model developed in a channel 8,40 meters wide located in the Laboratory of Hydraulics in the INA in which the total erosion is obtained due to the different types of scour before mentioned, were compared with the results of a bidimensional mathematical model integrated in vertical (RMA2 whit the SED2D module), in which the erosive processes due to the vortices induced by the abutment cannot be determined. Experiences with three contractions, three discharges and two flow depths, were made. As much the construction and operation of the physical model as the implementation of the mathematical model, are included in the development of an investigation project financed by the National Agency of Scientific and Technological Promotion of Argentina.

PALABRAS CLAVES:

Erosión local, estribos.

INTRODUCCIÓN

La erosión en estribos de puentes y en sus terraplenes de aproximación se corresponde con procesos que si bien ocurren en forma simultánea, para poder proceder a su estudio, se tipifican de acuerdo a sus causas y a sus escalas de tiempo como: erosión generalizada, erosión por contracción y erosión local debida al flujo tridimensional y vórtices inducidos por el terraplén y el estribo.

La complejidad de estos fenómenos es evidente y por ello el estudio de los procesos erosivos se ha basado históricamente en estudios experimentales a partir de los cuales han sido desarrolladas y publicadas las expresiones de cálculo (Melville, 1992; Lim, 1997; Kothiyari - Ranga Raju, 2001; Richardson, 2002). Estas experiencias en general se han realizado para estribos verticales, con las limitaciones propias de las condiciones de ensayo, tanto en relación a las escalas de los modelos, los materiales granulares que conforman el lecho y los parámetros hidráulicos posibles de ensayar en canales de laboratorio.

Los estudios de referencia consideran como valor de erosión local, directamente a la observada en las experiencias sin tener en cuenta que la misma incluye tanto los efectos de contracción del flujo como los debidos a los flujos tridimensionales inducidos por las estructuras.

En el presente trabajo se analizaron escurrimientos en torno a un sistema caracterizado por un terraplén y un estribo de un puente, diferenciando la forma en que se desarrollan los diferentes tipos de erosión, para lo cual se compararon las observaciones en un modelo físico, con el que se obtiene la erosión total, con los resultados de un modelo matemático bidimensional integrado en vertical, en el que no pueden determinarse los procesos erosivos debido al flujo tridimensional.

Tanto la construcción y operación del modelo físico como la implementación del modelo matemático están incluidas en el desarrollo de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina. En dicho proyecto está prevista la realización de ensayos para diversas condiciones de funcionamiento hidráulico y diferentes configuraciones de estribo, tanto respecto del grado de contracción del flujo como de la inclinación de los taludes. En este trabajo, y dado que el proyecto global se encuentra en plena ejecución, se muestran los resultados para el caso de estribo vertical.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

El modelo físico fue implementado en un canal ubicado en la Nave 6 del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua de Argentina, de 8,40 metros de ancho y 30 metros de largo, con un tramo de 8 metros de longitud a fondo móvil con arena de $370\ \mu\text{m}$ y σ de 1.55, donde se coloca la estructura que representa al terraplén y al estribo, de longitud variable, 35 centímetros de ancho y nariz redondeada.

El sector con fondo móvil está limitado aguas arriba y abajo por zonas a fondo fijo constituidas por carpetas de cemento (Figura 1). La máxima capacidad de bombeo de la instalación experimental supera los 500 litros/s y pueden ensayarse tirantes hasta de 30 centímetros.

En la Tabla 1 se indican las experiencias efectuadas en el modelo físico en donde se describen las condiciones de ensayo en cada caso (caudal, tirante y tiempo de ensayo), así como el máximo valor de erosión registrado.

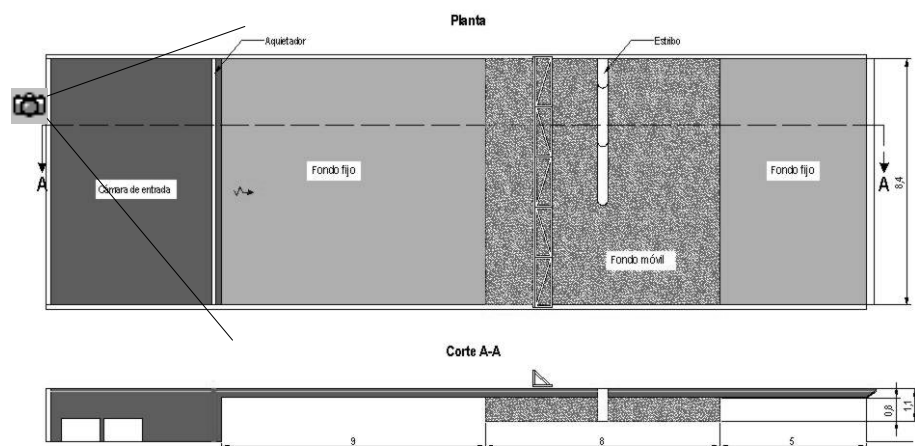


Figura 1.- Esquematización y vista general del modelo físico desde aguas arriba.

Tabla 1.- Descripción del programa de ensayos.

Tipo de estribo	Longitud estructura (contracción) [m]	Caudal [l/s]	Tirante [cm]	Erosión Máx [cm]	Tiempo [hs]
Vertical	5.25	200	15	27.2	18
		200	25	11.0	17
		270	15	38.2	15
		300	25	24.4	19
		385	15	41.0	17
		385	25	40.2	19
	3.25	200	15	9.2	19
		200	25	3.5	18
		300	15	22.1	19
		300	25	7.2	21
		400	15	35.6	23
		400	25	17.6	20
	1.25	400	15	32.1	20
		400	25	3.0	20

El modelo hidrodinámico utilizado es el código bidimensional de elementos finitos RMA2 (USACE, 2003a) para simulaciones numéricas a fondo fijo. El mismo se acopla a la rutina SED2D para cálculos a fondo móvil (USACE, 2003b). El RMA2 originalmente desarrollado por el U.S:

Army Corps of Engineers, resuelve las ecuaciones integradas en la vertical de Navier Stokes, previamente promediadas en el sentido de Reynolds. El SED2D resuelve la conocida ecuación de transporte de un escalar pasivo, acompañado de un cálculo sencillo para el recrecimiento o decrecimiento de la cota del lecho según sea el signo del término fuente presente en la ecuación de transporte. Las ecuaciones que gobiernan el problema analizado, escritas en forma no conservativa, son:

$$\nabla \cdot \bar{u}h = 0 \quad [1]$$

$$\bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -g\nabla h - g\nabla \eta - \frac{\tau_b}{\rho h} + \nu_t \nabla^2 \bar{u} \quad [2]$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (\varepsilon \nabla c) + \frac{c - c_e}{t_c} \quad [3]$$

donde $\bar{u} = (u, v)$ es el campo de velocidades de componentes u y v en las direcciones cartesianas x e y , respectivamente, h es la profundidad local del agua, η es la elevación local del lecho, g es la aceleración de la gravedad, ν_t es el coeficiente de viscosidad de remolino, ρ es la densidad del agua, c es la concentración en peso por unidad de volumen de sedimento transportado en suspensión, c_e es la llamada concentración de equilibrio o saturación que define la capacidad de transporte de la corriente calculada a través de fórmula de Ackers-White (1973), ε es el coeficiente de dispersión mecánica (difusividad), t_c es el tiempo característico o constante de relajación del desbalance entre la concentración actual y la de equilibrio, ∇ es el operador gradiente bidimensional y τ_b es la tensión de corte del lecho, modelada con una relación de cierre del tipo Manning, siendo n el coeficiente de rugosidad de Manning:

$$\tau_b = \rho g n^2 \bar{u} \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad [4]$$

El sistema de ecuaciones [1]-[3] es resuelto mediante la formulación totalmente implícita de Galerkin del Método de Residuos Ponderados.

La discretización espacial utilizada en la modelación está basada en elementos cuadrados y triangulares previendo una representación detallada en la zona correspondiente a las proximidades del estribo. En la Figura 2 se presenta una planta del modelo con la indicación de los nodos de la malla implementada, indicándose también la localización del estribo y la zona en que se comparan los resultados del modelo matemático con los del físico.

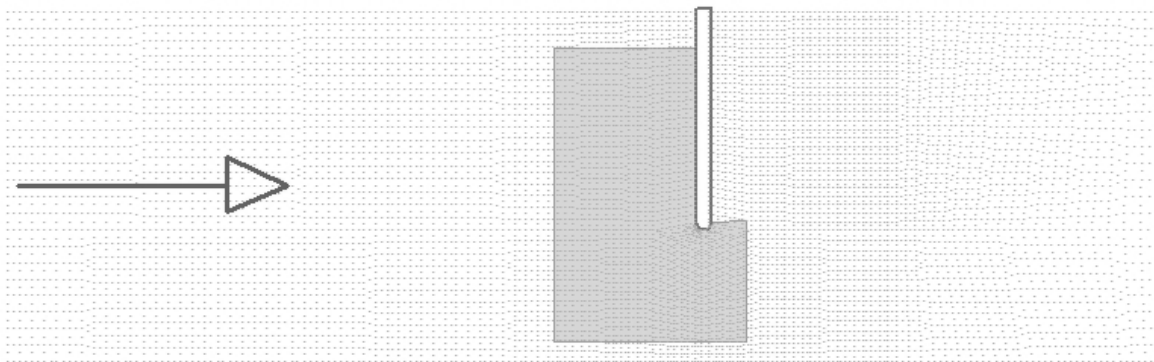


Figura 2.- Planta del modelo numérico implementado. Indicación de la zona próxima al estribo donde se comparan los resultados del modelo matemático y del físico.

Para la descripción del material granular del lecho mediante el modelo matemático, se adoptó un diámetro característico D_{50} de $370\text{ }\mu\text{m}$.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En primera instancia, para las condiciones de ensayo en que la erosión local no era significativa se ajustaron los parámetros de intercambio turbulento del modelo matemático que definen las características del flujo en torno a la estructura, comparando los campos de flujo obtenidos en ambos modelos. En la Figura 3 se presenta una planta con las isotáqueas en torno al estribo y en la zona de aproximación, para una de las situaciones de análisis, en la que puede apreciarse un alto grado de concordancia en los campos de flujo obtenidos del modelo físico y de la modelación matemática.

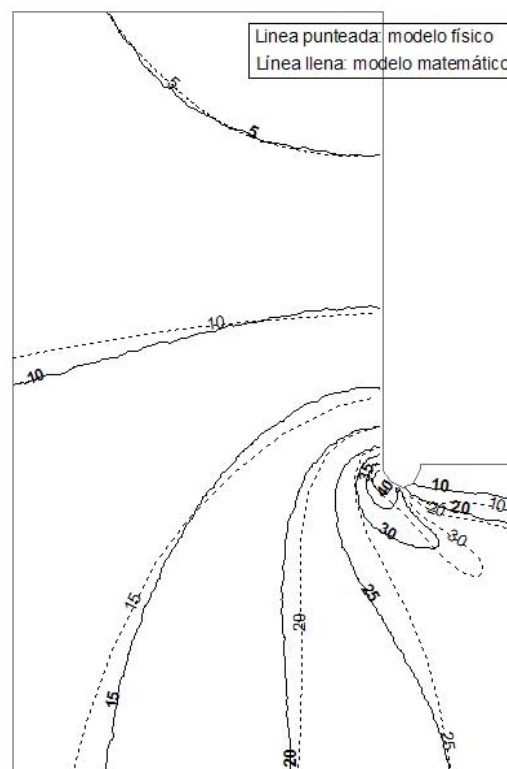


Figura 3.- Comparación de isotáqueas obtenidas de los ensayos en el modelo físico y en el numérico.
Ensayo: Q=200 lt/s, h=25 cm, contracción 5,25 m.

Una vez ajustados los parámetros del modelo matemático de forma tal de asegurar una adecuada representación del campo de flujo bidimensional en planta en torno a la estructura, se procedió a analizar tanto el campo de velocidades como el desarrollo de los procesos de erosión y depósito en el entorno del estribo, para el resto de las condiciones de funcionamiento evaluadas.

A partir de la nivelación del fondo en el modelo físico tras los ensayos, cuya duración fue del orden de las 20 horas, se procedió a digitalizar las batimetrías resultantes, lo que permitió construir modelos digitales de las configuraciones finales del lecho móvil. En la Figura 4 se muestra el aspecto del modelo tras una de las experiencias. Los valores máximos de erosión en cada fosa en torno a la estructura ya se han presentado en la Tabla 1.



Figura 4.- Configuración final del fondo móvil.
Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.

A partir de la implementación del módulo morfológico del modelo matemático, se determinó la conformación del fondo resultante para las diversas condiciones de análisis, volcándose también dicha información a modelos digitales.

Operándose con los resultados de ambos modelos se calculó la diferencia entre ambos, la que se asoció con los procesos que no pueden evaluarse en un modelo bidimensional integrado en la vertical, pero que sí afectan los resultados del modelo físico, como ser los fenómenos asociados al flujo tridimensional inducido por la estructura. En la Figura 5, a modo de ejemplo, se presenta esquemáticamente la forma en que se procesaron los resultados (modelos digitales del lecho obtenidos con ambos modelos) para en ensayo con $Q=385$ litros/s, $h=25$ centímetros y contracción de 5,25 metros, coincidente con el correspondiente a la vista presentada en la Figura 4.

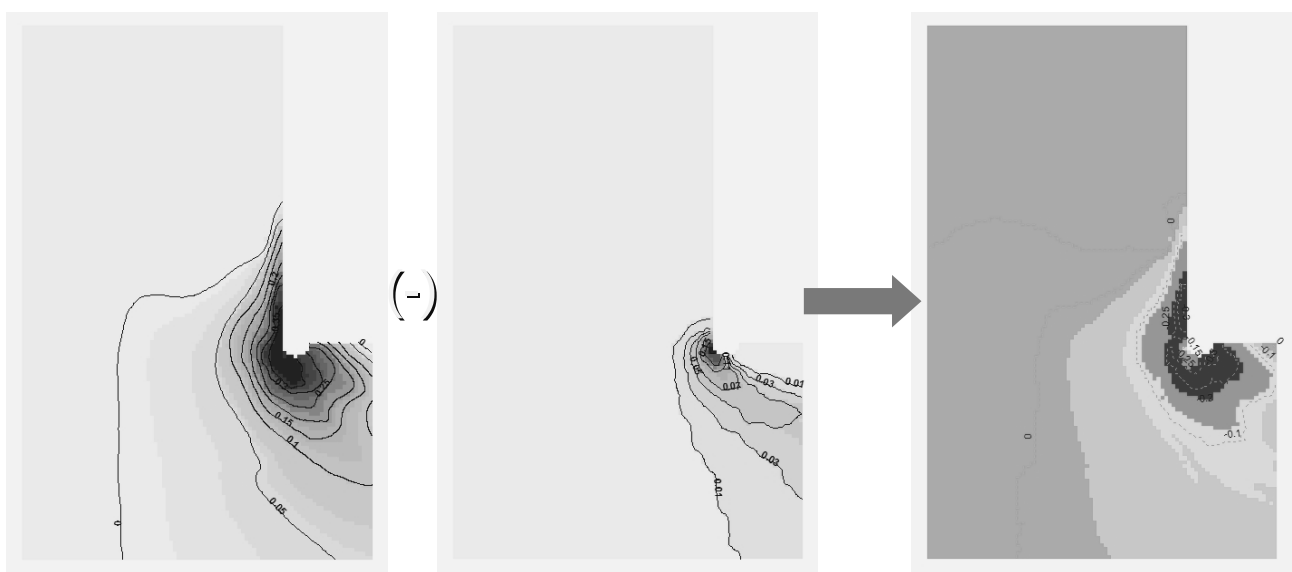


Figura 5.- Operación entre modelos digitales.
Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.

El mismo procesamiento se efectuó para otras situaciones ensayadas, obteniéndose modelos digitales de la diferencia de niveles de lecho, que se asocian a los procesos tridimensionales en torno a la estructura conformada por el terraplén de aproximación y el estribo.

La no linealidad debida a que el desarrollo inicial de la fosa de erosión por la acción local induce un cambio en el flujo en torno al estribo (Scacchi, 2002), trató de tenerse en cuenta mediante el ajuste del modelo numérico, aunque este efecto pierde significación al final de los ensayos cuando los procesos tienden a su equilibrio, que es la condición en la cual se realizó la comparación de los resultados de ambos modelos.

Para analizar la forma en que se desarrolla el vórtice de eje horizontal generado aguas arriba del estribo por la curvatura del flujo en la zona de aproximación y cuya esquematización se indica en la Figura 6, se evaluó la componente de la velocidad en la vertical registrada en los puntos de medición en el modelo físico.

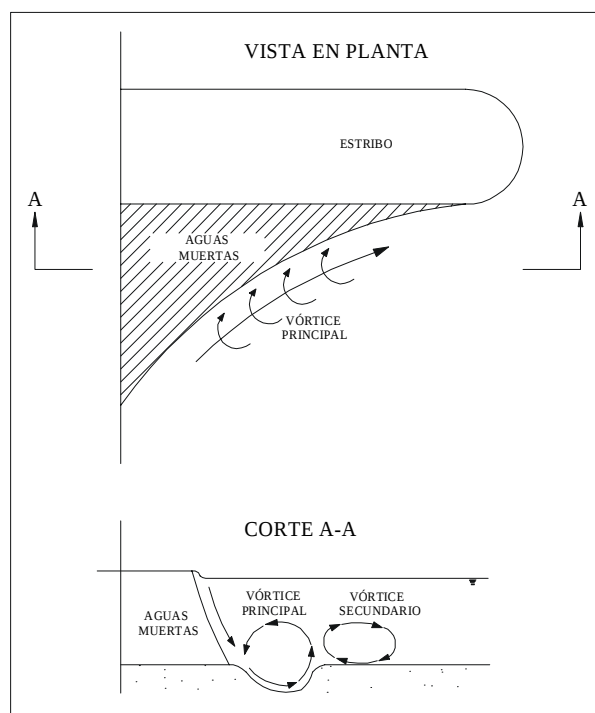


Figura 6.- Esquema del desarrollo de vórtices al pie de estribos.

De esta manera para dos condiciones de ensayo características (caudales bajos y altos) se generaron las Figuras 7 y 8, en las que se indican las isotáqueas de la velocidad en la vertical y donde se destacan los sectores del modelo con velocidades descendentes y ascendentes, a partir de donde es posible estimar la posición y el desarrollo de la corriente helicoidal responsable de los procesos de erosión local en torno a la estructura.

Si bien los registros presentados se corresponden con un estado de avance de las experiencias en que la fosa de erosión se ha desarrollado prácticamente en su totalidad, donde el flujo helicoidal inducido por la estructura ha perdido intensidad respecto de su situación al inicio de los ensayos, permiten caracterizar el flujo en torno a la estructura, con una zona localizada con flujo descendente en cercanías de la nariz del estribo y aguas arriba del eje del mismo, que es donde se presentan también los máximos valores de erosión en la fosa de socavación.

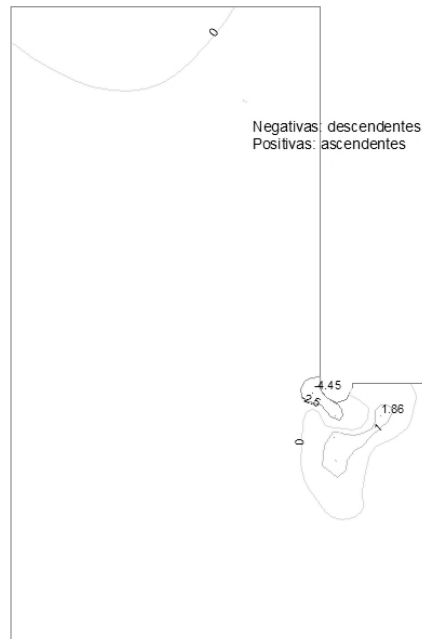


Figura 7.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico. $Q=200$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.



Figura 8.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico. $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.

Si se superponen los registros de velocidades en vertical con las diferencias entre las conformaciones del lecho al final de los ensayos para el modelo físico y numérico (Figuras 9 y 10), se observa que hay un alto grado de concordancia entre máximas diferencias con la localización de la corriente helicoidal.

En dichas figuras se indican también líneas tentativas de la posición del eje del flujo helicoidal, a partir de los registros de velocidades verticales y la erosión local debida a los procesos tridimensionales que no pueden representarse con el modelo matemático bidimensional.

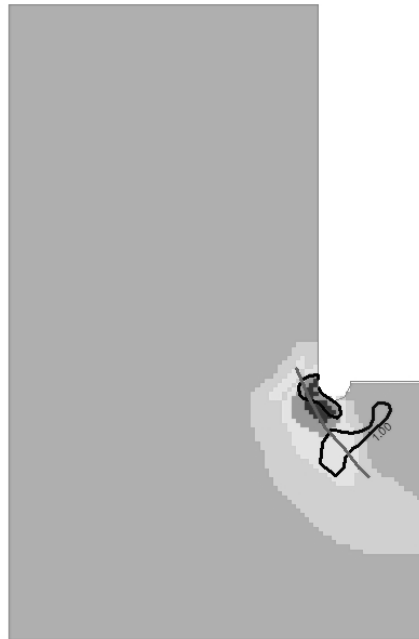


Figura 9.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico y diferencias en el lecho con ambos modelos.
 $Q=200$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.

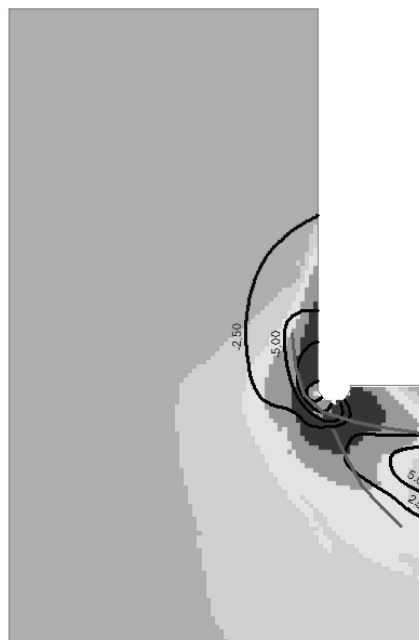


Figura 10.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico y diferencias en el lecho con ambos modelos.
 $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm, contracción 5,25 m.

Adicionalmente, más allá de las componentes verticales de la velocidad, otro elemento que permite caracterizar el flujo helicoidal de eje horizontal generado aguas arriba del estribo, es la componente de la velocidad en el plano horizontal en puntos característicos del modelo físico sobre una misma vertical. En cada ensayo se registraron las componentes de la velocidad mediante un ADV en más de 100 verticales, midiéndose en algunas de ellas a distintas profundidades, tomándose registros en algunos de dichos puntos al comienzo y al final de los ensayos.

Así, por ejemplo, para el ensayo con 385 lt/s y 15 cm de tirante y 5,25 metros de contracción, en un punto localizado 25 cm aguas arriba del eje del terraplén y a 10 cm a la izquierda de la punta de la nariz del estribo, el ángulo de los vectores velocidad en el plano horizontal (V_{xy}) durante los

registros con ADV, respecto al eje del canal, en dos diferentes alturas en la misma vertical (0,4 y 0,6 de la profundidad), son los indicados en la Figura 11, pudiéndose apreciar una diferencia en el ángulo del vector velocidad. Asumiendo que la dirección del media del escurrimiento en dicha vertical se corresponde con una situación intermedia entre los valores medios de los registros, se tiene una componente de la velocidad en el plano horizontal normal a la dirección del flujo que puede componerse con la velocidad vertical.

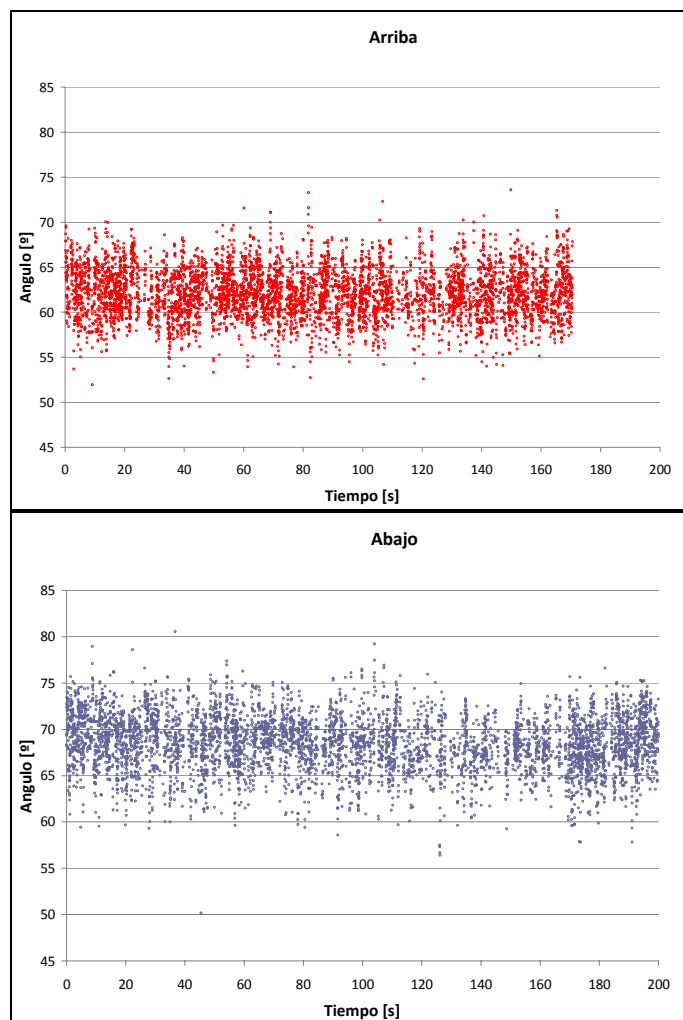


Figura 11.- Angulo de los vectores velocidades en el plano horizontal (V_{xy}), de los registros con ADV.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para estudiar los procesos erosivos en torno a estribos de puentes, basado en la aplicación simultánea de modelos físicos y matemáticos, con el objeto de evaluar la forma en que se desarrollan los diferentes tipos de erosión que tienen lugar en torno a estas estructuras.

Podría asumirse, al menos en forma preliminar hasta analizar un mayor número de condiciones de ensayo, que la estimación de la erosión por contracción estaría razonablemente bien representada mediante los resultados del modelo matemático, y que la diferencia entre los registros en el modelo físico y las estimaciones del fondo del lecho con el modelo matemático indicaría la erosión local en el estribo debida a los vórtices inducidos por la estructura.

Otro aspecto de interés de los estudios realizados hasta el momento es la cantidad de información registrada en materia de componentes de velocidad, para la definición del flujo helicoidal que se desarrolla en torno al estribo.

El análisis presentado, está previsto extenderlo a un mayor número de condiciones de ensayo, y fundamentalmente, a otras condiciones geométricas de la estructura, en particular distintas pendientes del talud de aproximación y del estribo, con el objeto de obtener expresiones para cuantificar los procesos de erosión local independizándolos de la erosión por contracción, para distintos tipos de estribos.

REFERENCIAS

- Kothyari, U.C.; Ranga Raju K.G.** (2001). "Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutments". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 4.
- Lim, S.Y.** (1997). "Equilibrium Clear-Water Scour Around an Abutment". *Journal of Hydraulic Engineering*, March 1997.
- Melville, B.W.** (1992). "Local Scour at Bridge Abutments" Paper and Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering*, April 1992.
- Richardson E.V.** (2002). "United States Practice for Bridge Scour Analysis".
- Scacchi, G.; Martín Vide, J.P., Schreider, M.** (2002). "Incidencia del Tirante y de la Erosión Local en Estribos sobre la Distribución de Caudales en Secciones de Puentes". *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica* – La Habana. Cuba.
- US Army**, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory (2003a): *Users Guide To SED2D WES* Version 4.5.
- US Army**, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory (2003b): *Users Guide To RMA2 WES* Version 4.5.