

EROSIÓN LOCAL EN ESTRIBOS DE PUENTES – ESTUDIO EXPERIMENTAL

José Daniel Brea, Pablo Daniel Spalletti, Luis Aníbal Rodríguez

Laboratorio de Hidráulica. Instituto Nacional del Agua
Casilla de Correo 46, Apto. Ezeiza, Buenos Aires - CP 1802 - TE: 011 44800457
E-mail: dbrea@ina.gov.ar, pspallet@ina.gov.ar, lrodriguez@ina.gov.ar - Web: <http://www.ina.gov.ar>

RESUMEN

Los procesos erosivos en estribos en puentes de llanura, en los cuales los terraplenes de aproximación ocupan parte del cauce de los ríos, y que durante las crecidas son sometidos a la acción de corrientes de duraciones y magnitudes considerables, están siendo estudiados en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) mediante la utilización de un modelo físico a fondo móvil. El objeto de este estudio es determinar, para distintas condiciones geométricas del estribo y su terraplén, la forma en que se desarrollan los procesos de erosión local, debida a los vórtices inducidos por la estructura, y los procesos de erosión por contracción en planta. El modelo físico consiste en un canal de 8,40 metros de ancho y 30 metros de largo, con un tramo en la dirección longitudinal de 8 metros a fondo móvil con arena, en el que se emplazaron las estructuras estudiadas. Se muestran los resultados de los ensayos para estribos verticales y extremo redondeado, con su eje longitudinal ubicado perpendicularmente a la dirección de flujo. Las longitudes de terraplén adoptadas fueron de 5.15 y 3.15 metros, y se estudiaron para diversas condiciones de caudales y tirantes. A partir de los resultados obtenidos se realizaron comparaciones respecto a otras investigaciones realizadas en el tema, y a las fórmulas y metodologías tradicionales de cálculo utilizadas para la determinación de la profundidad de las fosas de erosión en estribos de puentes.

ABSTRACT

The erosive processes in abutments in plain bridges, in which the approach embankments occupy part of the channel of the rivers, are being studied in the Hydraulic Laboratory of the National Institute of Agua (INA) by means of the use of a physical model with moving bed. The object of this study is to determine, for different geometric conditions of the abutment and their embankment, the form in which the processes of local erosion are developed, due to the vortices induced by the structure and the processes of erosion by contraction in plant. The physical model consists of a channel 8.40 meters wide and 30 meters in length, with an 8 meters part in the lengthwise direction of movable bed, conformed by sand, in which the studied structures were located. In the present paper, the results of the tests for a vertical, rounded end abutment are presented, with their longitudinal axis located perpendicularly to the flow direction. The adopted embankment lengths were 5,15 and 3,15 meters, and different discharges and water levels conditions were studied. From the obtained results, comparisons with other investigations in the subject, and with traditional formulas and methodologies used in the calculation of maximum scour depth in bridge abutments, were made.

INTRODUCCIÓN

En cauces fluviales, la presencia de puentes presenta un condicionamiento geométrico al escurrimiento en el río al ocasionar un estrechamiento de la sección mojada, sobre todo en condiciones de crecida. En esta situación, la condición de borde impuesta por la estructura da lugar a la formación de un esquema de flujo complejo que se materializa en un marcado cambio en las zonas del lecho del río afectadas por el campo de velocidades resultante.

Estos cambios morfológicos observados en las cercanías de los puentes durante y tras el pasaje de una crecida, son función de las condiciones geométricas y morfológicas del

cauce y del valle de inundación, de la localización en planta y ancho de la obra, y de las características de las pilas y estribos.

La complejidad del fenómeno, y la cantidad de variables que se ven involucradas, hacen imposible en la práctica tratarlo en su conjunto mediante formulaciones matemáticas, siendo necesario abordar el problema a través de mediciones en prototipo o mediante modelación física.

Igualmente, para el tratamiento de este tipo de problemas de manera analítica, se realizan simplificaciones que permiten evaluar las erosiones mediante expresiones matemáticas sencillas de carácter empírico, distinguiendo dos tipos de erosión, que sumadas dan la socavación total esperable. Una es la generalizada, debida fundamentalmente a la contracción del flujo que imponen los estribos en conjunto con los terraplenes que avanzan dentro de los valles de los ríos y la otra es la local, que se desarrolla en torno a los elementos que se interponen a la corriente (Spalletti, 2004).

En el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) y en el marco del Proyecto “Desarrollo de Metodologías para el Diseño Hidráulico de Estructuras Viales” de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, se han realizado una serie de ensayos mediante la utilización de un modelo físico a fondo móvil, con el objeto de estudiar, para distintas condiciones geométricas del estribo y su terraplén, la forma en que se desarrollan los procesos de erosión local debida a los vórtices inducidos por la estructura, y de erosión por la contracción en planta.

El presente trabajo constituye un avance en el estudio general de los procesos de erosión que se desarrollan en cercanías de estribos de puentes localizados en valles de inundación, tanto desde un punto de vista conceptual, como del desarrollo de metodologías y expresiones de cálculo que permitan la cuantificación de los fenómenos.

CONSIDERACIONES GENERALES

El fenómeno de erosión localizada se caracteriza por la pérdida de material en cercanía de una estructura hidráulica la cual presenta una obstrucción al flujo normal. Según diversos autores, al hablar de este tipo de erosión se consideran, de acuerdo a sus características, una erosión general y una local (Hoffmans, 1997)

Es así que la erosión que puede observarse en la sección de un río, dentro de un tramo recto y en coincidencia con la ubicación de un puente, será la superposición de una componente general, definida como los descensos del lecho en un tramo de río de gran longitud, y una debida a la contracción impuesta por la estructura.

La erosión por contracción, definida como la remoción de material del lecho debida a la disminución del área de pasaje se da en la misma zona donde se producen los fenómenos de erosión local, debida a los vórtices inducidos por las obstrucciones impuestas al flujo.

La curvatura del flujo en la zona de aproximación al estribo causa una corriente secundaria que forma un vórtice horizontal principal, similar al que se desarrolla en una curva de un río (Raudkivi, 1985), y que a su vez induce un vórtice secundario pero de

menor poder erosivo (Hoffmans, 1997). Aguas abajo del estribo se presenta una zona de separación en correspondencia con la zona de desaceleración en la que las líneas de escurrimiento comienzan a ser divergentes, desarrollándose allí un tren de vórtices verticales que divide al flujo principal de una zona de aguas muertas.

La necesidad de realizar estimaciones sobre el valor de socavación al pie de obras fluviales llevó al desarrollo de metodologías de cálculo basadas generalmente en métodos empíricos desarrollados en laboratorios y mediante pocos relevamientos de campo que calculan la erosión generalizada, por contracción de flujo y locales como una sola, sin discretizar entre los distintos procesos que les dan origen y aún cuando se desarrollan en distintas escalas de tiempo (FHA, 1995; Hoffmans, 1997).

El estudio de los procesos erosivos locales, debidos a la generación de vórtices, resulta más complejo pues la zona donde se producen coincide con la de mayor contracción al flujo con lo cual ambos fenómenos se superponen. Por otro lado, los vórtices y su capacidad erosiva se ven afectados por las características geométricas del estribo, del cauce y del valle de inundación, con lo cual los cambios en el lecho inducen cambios en el patrón del flujo en correspondencia con el puente.

Las expresiones más utilizadas para la estimación de la erosión local en estribos se han obtenido, en general, a partir de información compilada de ensayos de laboratorio en canales rectangulares (Melville, 1992; Lim, 1997; Kothyari - Ranga Raju, 2001; Richardson, 2002). La mayor parte de los datos disponibles se corresponden con ensayos para estribos de pared vertical, habiendo adicionalmente algunos para estribos conformados por paredes verticales con muros guía (wing wall) y unos pocos para estribos de sobrepaso o no verticales indicados como spill-through en la literatura anglosajona (Liu, 1961; Wong, 1982; Tey, 1984; Dongol, 1994; Kuhnle, 1999).

En el Proyecto general en el que se engloban los ensayos realizados hasta el momento, para separar las componentes local y por contracción se planteó la construcción de un modelo físico a fondo móvil donde se estudió la erosión por contracción y localizada al pie del estribo de manera conjunta. Al mismo tiempo, se implementó un modelo numérico bidimensional mediante el cual es posible estudiar y cuantificar sólo los procesos erosivos debidos a la contracción del flujo. De la comparación de ambas modelaciones, será posible evaluar la erosión localizada en forma aislada.

Si bien el esquema de ensayos se está llevando a cabo actualmente, al disponer ya de los datos de ensayos para 2 configuraciones completas se muestran en este trabajo estos resultados y las primeras conclusiones al respecto.

DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en un canal de 8,40 metros ancho y 30 metros de longitud que presenta un tramo de 8 metros de longitud constituido en fondo móvil (arena) limitado aguas arriba y abajo por zonas a fondo fijo (cemento). En el sector a fondo móvil se coloca la estructura que representa al terraplén y al estribo, cuyo ancho es de 35 centímetros (Figura 1).

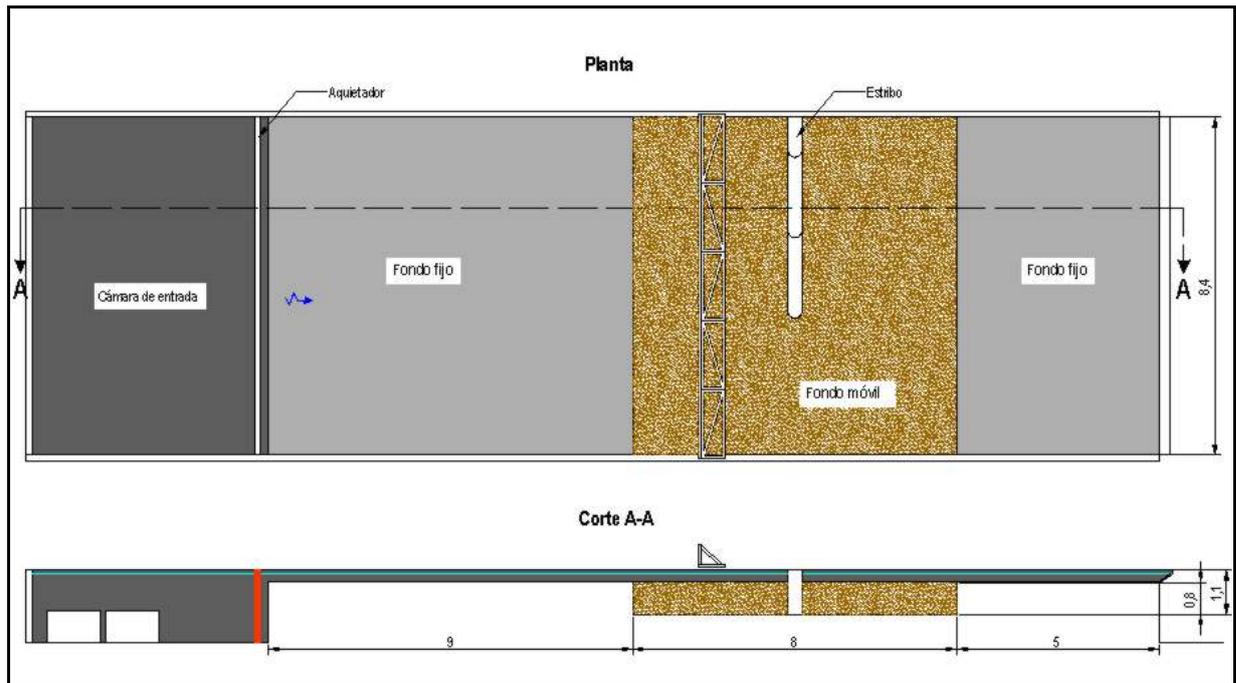


Figura 1 - Esquema del canal de ensayos

Para el material empleado en la zona de fondo móvil (aproximadamente 54 m³) se utilizó arena de construcción disponible en la zona, la que fue adquirida en tres partidas, siendo los materiales muy similares y presentando un D₅₀ promedio de 370 μ y una desviación estándar de 1.55.

Los distintos estribos se componen de uno o más tramos que se ensamblan dentro del canal para lograr la longitud de terraplén deseado. Se dispone de 2 tramos de 2 metros y uno más corto que conforma la nariz del estribo, con una longitud de 1,15 metros. Cada tramo es de 1,10 metros de altura, 0,35 metros de ancho, de estructura metálica y recubiertos con chapa. La nariz del estribo, montada en el tramo más corto se realizó en acrílico transparente, de forma redondeada y hueca para poder observar el proceso de remoción de sedimentos. Todas las secciones se fijan al fondo con la utilización de bulones.



Figura 2 - Modelo Físico luego de concluidos dos ensayos. Conformación final del fondo móvil erosionado.

Respecto del plan de ensayos, está previsto llevar a cabo el estudio del funcionamiento hidráulico y morfológico en torno a estructuras con 3 inclinaciones de los paramentos que conforman el talud y el estribo (vertical, 1:1 y 1:2), con 3 grados de contracción

(5.25, 3.25 y 1.25 metros). Para cada una de estas 9 configuraciones geométricas se han programado ensayos bajo tres condiciones de caudal y dos tirantes, lo que da un total de 54 experiencias. Para cada longitud de terraplén se programaron ensayos bajo tres condiciones de caudales y dos tirantes. Los parámetros adoptados para cada ensayo se describen en la Tabla 1.

Tabla 1 - Descripción del programa de ensayos

Tipo de estribo	Longitud del terraplén [m]	Caudal [l/s]	Tirante [h]	Ensayo
Vertical Talud 1:1 Talud 2:1	5.25	200	15	E1Q200H15
		200	25	E1Q200H25
		270	15	E1Q270H15
		300	25	E1Q300H25
		385	15	E1Q385H15
		385	25	E1Q385H25
	3.25	200	15	E2Q200H15
		200	25	E2Q200H25
		300	15	E2Q300H15
		300	25	E2Q300H25
		400	15	E2Q400H15
		400	25	E2Q400H25
	1.25	200	15	E3Q200H15
		200	25	E3Q200H25
		300	15	E3Q300H15
		300	25	E3Q300H25
		400	15	E3Q400H15
		400	25	E3Q400H25

Durante las experiencias se miden las velocidades de flujo en los puntos de una grilla definida cada 50 centímetros como máximo en los lugares más alejados del estribo y cada 25 centímetros en la zona cercana al mismo mediante el empleo de un velocímetro doppler acústico (Micro ADV) marca SonTek que permite obtener las componentes de velocidades instantáneas en las tres coordenadas cartesianas x, y, z con una frecuencia de adquisición de 50Hz.

Las mediciones en general se realizaron a una profundidad de 0,6 del tirante desde la superficie del agua y, en los puntos coincidentes con la fosa de erosión, donde el instrumento lo permitía, se tomaron registros también a 0,8 y a 0,2 del tirante. En el sector cercano al estribo y en la sección contraída en coincidencia con el eje del terraplén, se registraron las velocidades al comienzo de cada ensayo, en coincidencia con el inicio de los procesos erosivos, y al final del mismo, donde la socavación tiende a la configuración de equilibrio para las condiciones de ensayo. De esta manera es posible hacer un análisis respecto de la evolución de la erosión total y determinar las estructuras de flujo vorticosas formadas y su variación en el tiempo al evolucionar el lecho del modelo a medida el sedimento es removido.

Una vez concluido cada ensayo, se procede al relevamiento de la zona a fondo móvil mediante el empleo de un nivel óptico y mira. En la zona donde se desarrollan los mayores cambios en la conformación del lecho se densifica la grilla de medición tomándose valores de la cota de fondo cada 10 centímetros. Los relevamientos en general comprenden aproximadamente 350 puntos medidos en la zona a fondo móvil.

Con la planialtimetría resultante se genera el modelo digital de terreno empleando un sistema de información geográfica (GIS) y en el mismo se vuelcan también los puntos donde se midieron velocidades. De este procesamiento resultan para cada ensayo, archivos que contienen la totalidad de la información recolectada en el mismo de manera de poder evaluar en forma conjunta la interacción de los diversos procesos que intervienen en la formación de la fosa erosiva.

RESULTADOS

De la totalidad de ensayos previstos en el marco del estudio global, hasta el momento se han realizado los correspondientes al estribo vertical, con las contracciones impuestas por los terraplenes de 5,25 metros y 3,25 metros de largo con lo que se disponen de doce experiencias completas. La duración de cada experiencia fue del orden de las 20 horas.

Se procesaron las velocidades medidas con el ADV para obtener, en términos de velocidades medias, el campo de velocidades en el plano horizontal y la distribución de velocidades verticales en planta, correspondientes al inicio de cada ensayo (cuando aún no se produjo erosión) y al final cuando la fosa ya se encuentra desarrollada.

Graficando la planta con las isotáqueas para cada uno de los ensayos realizados hasta el momento, se aprecian las zonas en torno al estribo donde se tienen las máximas velocidades, y la forma en que se produce la separación del flujo aguas abajo de la estructura, para cada una de las condiciones estudiadas, determinando un sector de aguas muertas, que presenta una lenta recirculación en forma de un gran vórtice de eje vertical.

En las Figuras 3 y 4 se muestran las distribuciones de velocidades horizontales (V_{xy}) obtenidas de los ensayos llevados a cabo con máximo caudal (del orden de los 400 l/s), con 25 centímetros de tirante, a modo de ejemplo.

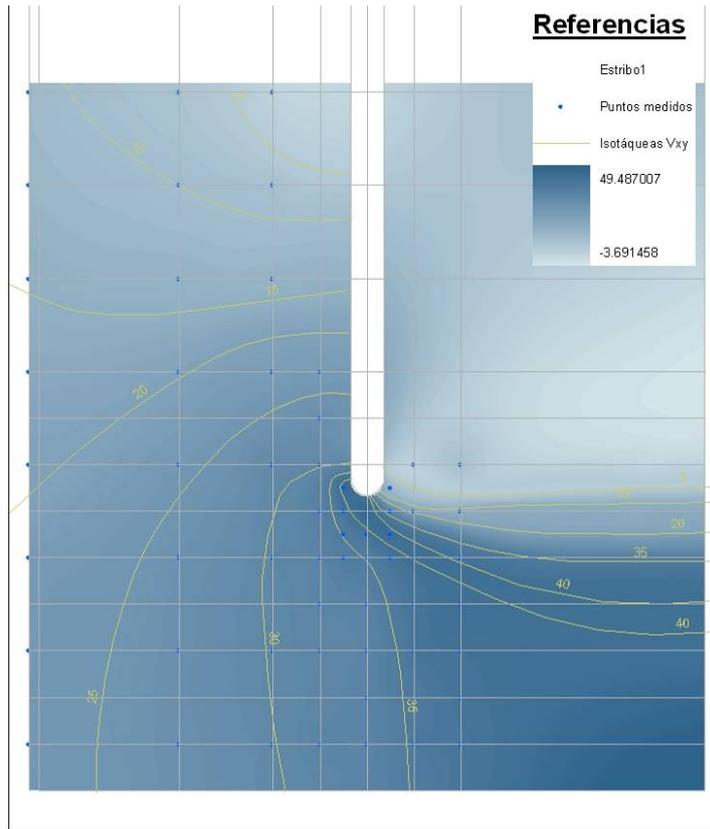


Figura 3 - Distribución de velocidades de escurrimiento horizontales para el Ensayo con 5.25 metros de contracción, caudal de 385 l/s y un tirante de 25 cm.

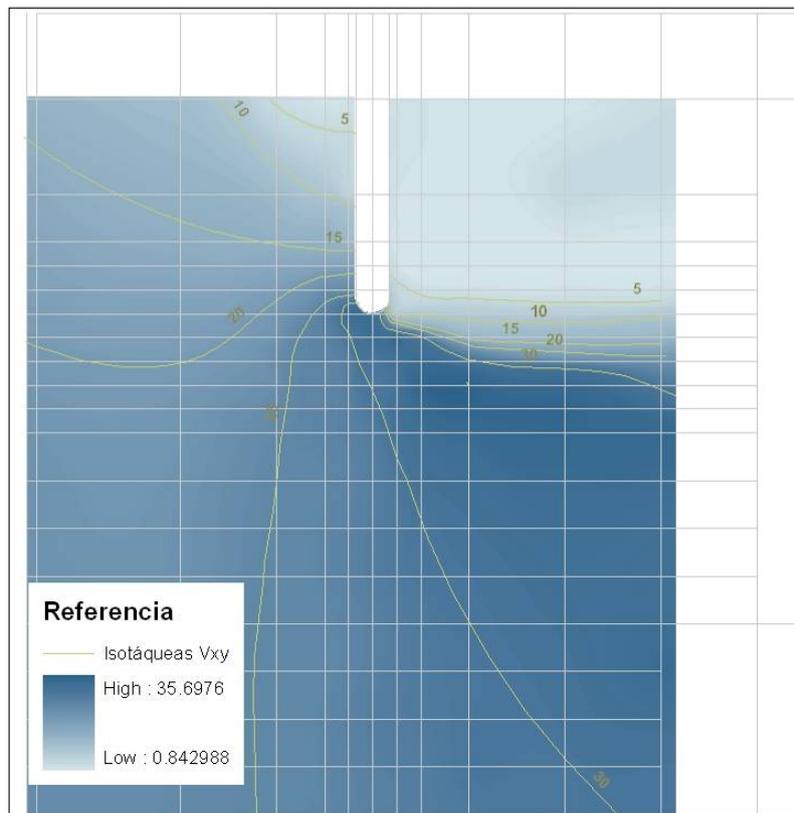


Figura 4 - Distribución de velocidades de escurrimiento horizontales para el Ensayo con 3.25 metros de contracción, caudal de 400 l/s y un tirante de 25 cm.

La distribución en planta de velocidades verticales, para cada ensayo, deja ver la presencia del vórtice de eje horizontal primario responsable de la mayor erosión localizada al pie del estribo. Se observa una distribución de velocidades verticales con una zona aguas arriba del estribo en inmediatamente sobre el mismo, donde las velocidades son descendentes esto coincide en planta con el inicio la fosa de erosión registrada al final de cada ensayo. Aguas abajo del estribo, se observan velocidades ascendentes en coincidencia con el borde de la fosa con lo que queda definida la zona de flujo turbulento en rotación espiral que conforma el vórtice. Se muestra a continuación, en Figuras 5 y 6, la distribución de velocidades verticales (V_z) para algunos de los ensayos realizados.

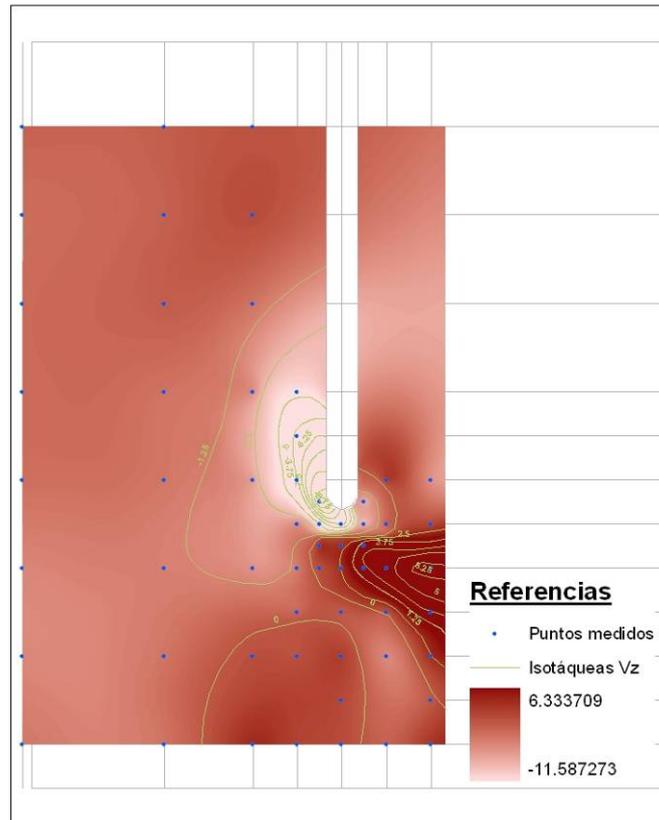


Figura 5 - Distribución de velocidades de escurrimiento verticales para los Ensayo con 5.25 metros de contracción, caudal de 385 l/s y un tirante de 25 cm.

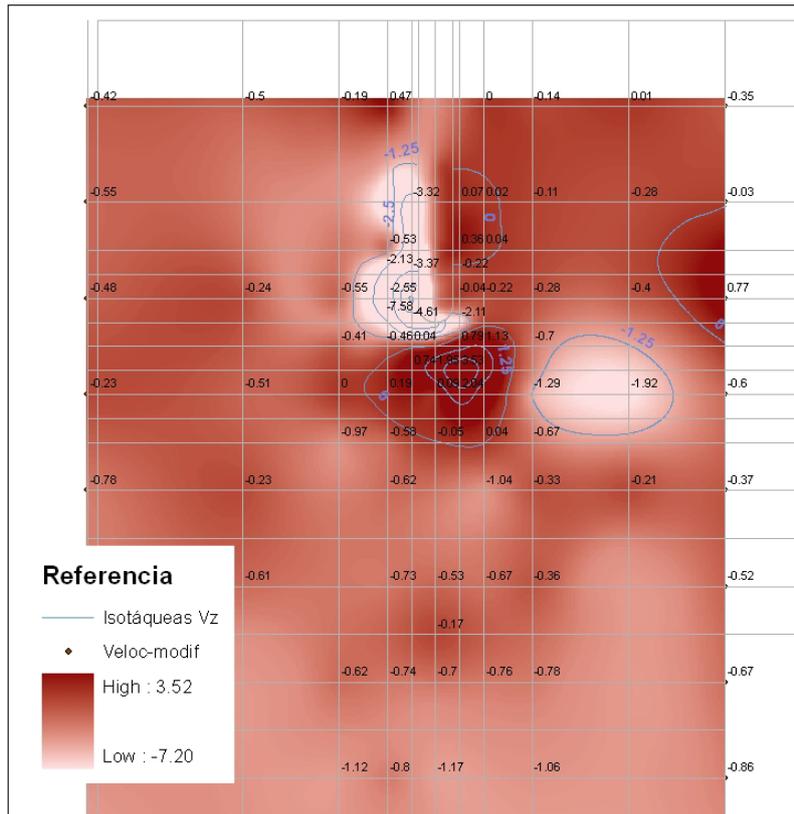


Figura 6 - Distribución de velocidades de escurrimiento verticales para los Ensayo con 3.25 metros de contracción, caudal de 400 l/s y un tirante de 25 cm.

Con los puntos del relevamiento del fondo móvil erosionado se genera el modelo digital de terreno (MDT) correspondiente a cada ensayo en el cual se puede apreciar la morfología final del lecho para las distintas condiciones de ensayo y por diferencia obtener la cantidad de material removido por el escurrimiento durante el tiempo de ensayo. Se hace notorio, en los casos expuestos, la formación de una fosa principal, coincidente con el vórtice primario, y de una segunda fosa, de menor profundidad, producida por la presencia de una estructura de flujo secundaria, de menor energía.

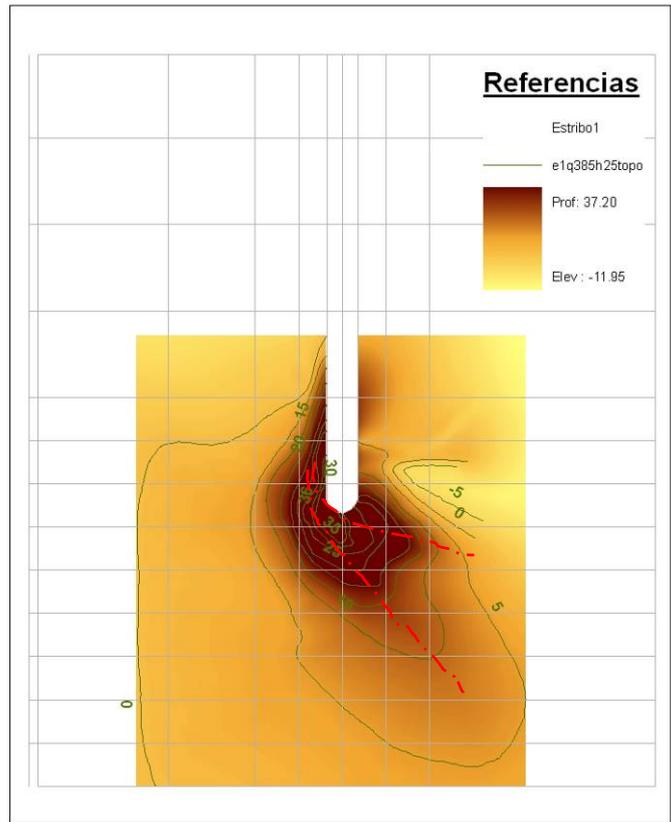


Figura 7 - Fondo móvil erosionado resultante de el Ensayo con 5.25 metros de contracción, caudal de 385 l/s y un tirante de 25 cm

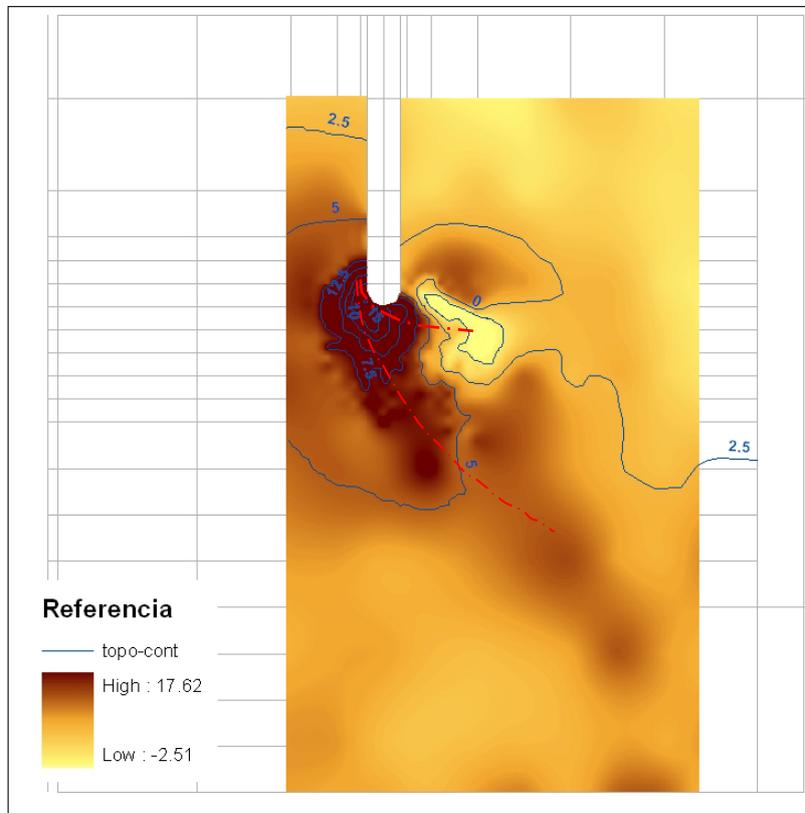


Figura 8 - Fondo móvil erosionado resultante de el Ensayo con 3.25 metros de contracción, caudal de 400 l/s y un tirante de 25 cm

En este sentido, queda a la vista, más aún en los ensayos de mayor caudal, la existencia de los vórtices de eje horizontal por la forma final del lecho donde se aprecia el efecto de más de una corriente helicoidal en la formación de surcos los cuales corresponden en planta a la ubicación del eje de rotación del flujo local alrededor de la estructura. El hecho de que sean de profundidades diferentes y decrecientes a medida que se alejan del estribo, pone de manifiesto la disminución de la capacidad erosiva en la misma dirección (Bateman, 2002).

La erosión máxima encontrada para cada ensayo se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 - Registros de erosión máxima.

Ensayo	Erosión Máxima [cm]	Horas de ensayo
E1Q200H15	27.2	18
E1Q200H25	11.0	17
E1Q270H15	38.2	15
E1Q300H25	24.4	19
E1Q385H15	41.0	17
E1Q385H25	40.2	19
E2Q200H15	9.2	19
E2Q200H25	3.5	18
E2Q300H15	22.1	19
E2Q300H25	7.2	21
E2Q400H15	35.6	23
E2Q400H25	17.6	20

La erosión máxima para cada contracción, y agrupada según el tirante de ensayo, se muestra en la Figura 9 donde se aprecia una tendencia de crecimiento de la socavación máxima en función del caudal de ensayo claramente marcada, y una linealidad entre la máxima erosión registrada y el valor del caudal de ensayo, considerando las experiencias realizadas para las mismas condiciones de tirante y grado de contracción.

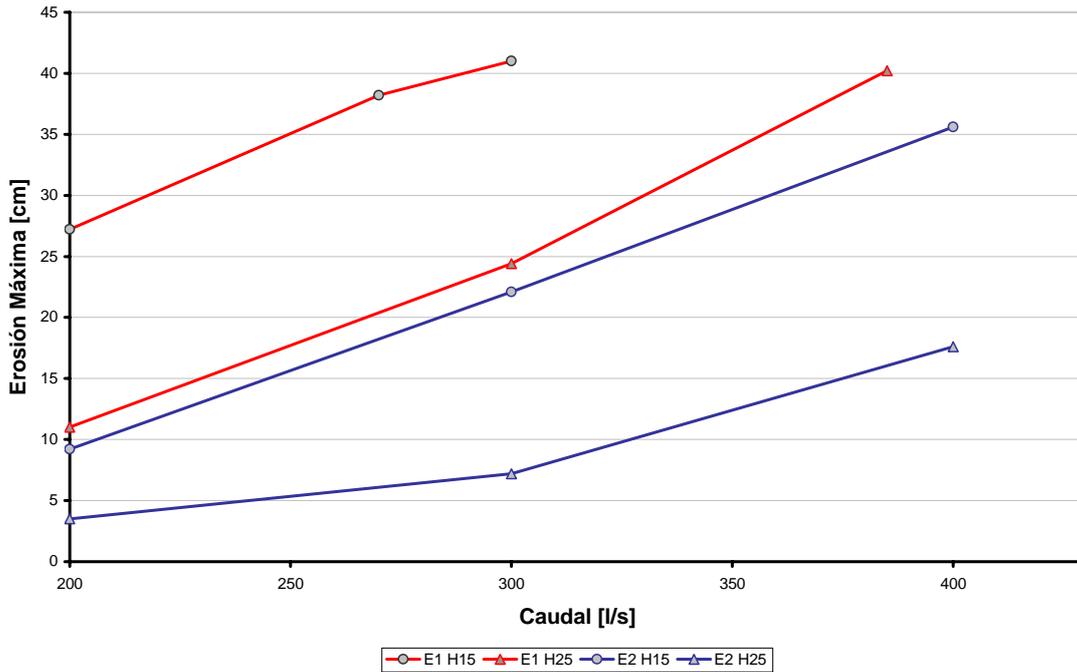


Figura 9 - Erosiones máximas registradas en función del caudal y del grado de contracción.

COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS Y FÓRMULAS DE CÁLCULO

Se compararon los resultados obtenidos experimentalmente en este estudio con los predichos por expresiones obtenidas por otros autores. En este contexto se evaluaron las expresiones de Melville, Lim, Froehlich y Liu.

Las expresiones propuestas por estos investigadores, y que se emplearon en el presente trabajo, son:

- Liu (1961)

$$d_{se} = K_L \cdot d_1 \left(\frac{L}{d_1} \right)^{0,4} F_1^{1/3} \quad (1.1)$$

Donde “ d_{se} ” es la profundidad máxima de socavación en la condición de equilibrio, F_1 el número de Froude del flujo de aproximación, d_1 el tirante líquido en la zona no perturbada, L la longitud del terraplén-estribo y K_L es un factor de forma que para muros verticales toma un valor de 2,15.

- Froehlich (1989)

En la fórmula el parámetro que se suma a la derecha, la convierte en una envolvente de los datos utilizados por el autor correspondiéndose de esta manera con una condición de máxima.

$$\frac{d_{se}}{d_1} = 0,78 \cdot K_s \cdot K_\theta \cdot (F_1)^{1,16} \cdot \left(\frac{L}{d_1} \right)^{0,63} \cdot \left(\frac{d_{50}}{d_1} \right)^{-0,43} \cdot (\sigma_g)^{-1,87} + 1 \quad (1.2)$$

Donde d_{50} es el tamaño medio de las partículas que componen el lecho, “ K_s ” y “ K_θ ” son factores de forma y de orientación respectivamente y σ_g es la desviación estándar de la

distribución granulométrica del material del lecho. El resto de las variables son las mismas que en la expresión de Liu.

- Melville (1992)

Esta fórmula fue propuesta para ser utilizada en el diseño de obras y fue obtenida mediante una envolvente de los registros existentes de ensayos para la condición de movimiento incipiente, que se corresponde con la situación de máxima socavación esperable.

$$\begin{aligned}
 d_{se} &= 2 \cdot K_s \cdot L & 1 \leq L/d_1 \leq 25 \\
 d_{se} &= 2 \cdot K_s^* \cdot K_\theta^* \sqrt{L \cdot d_1} & L/d_1 < 1 \\
 d_{se} &= 10 \cdot K_\theta \cdot d_1 & L/d_1 > 25
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Donde como se indicara “Ks” y “K_θ” son factores de forma y de orientación respectivamente y “K_s^{*}” y “K_θ^{*}” son los factores anteriores pero ajustados en función de los experimentos realizados por el autor.

- Lim (1997)

$$\frac{d_{se}}{d_1} = K_s \left\{ 2 \left(\frac{u_{*1}}{u_{*c}} \right)^{0,75} \left[0,9 \left(\frac{L}{d_1} \right)^{0,5} + 1 \right] - 2 \right\} \tag{1.4}$$

Donde K_s es el factor de forma del estribo dado por Melville, u₁^{*} es la velocidad de corte del flujo de aproximación y u_c^{*} la velocidad de corte crítica.

En las Figuras 10, 11, 12 y 13 se han graficado las relaciones adimensionales entre las máximas socavaciones y el tirante, medidas en el modelo y calculadas respectivamente con las fórmulas de Liu, Froehlich, Melville y Lim.

En las citadas figuras también se han incorporado los resultados de otras series de datos experimentales obtenidos de referencias bibliográficas (Melville 1995, Lim 1997 y Bateman 2002) correspondientes a ensayos de laboratorio efectuados por Liu (1961), Dongol (1994), Rajaratnam (1983), Lim (1997) y Bateman (2002).

Las características de estos ensayos es que fueron de larga duración, en general de más de 100 horas. Salvo el caso de los ensayos realizados por Bateman, cuyo canal tuvo 2,5 metros de ancho, las experiencias llevadas a cabo por los otros investigadores fueron ejecutadas en canales angostos (por ejemplo Lim utilizó un dispositivo experimental de 60 centímetros). Los tirantes utilizados por Bateman en sus ensayos fueron de sólo de 6 y 9 centímetros por lo que las relaciones entre la socavación y el tirante que obtuvo, fueron elevadas.

Fórmula Liu

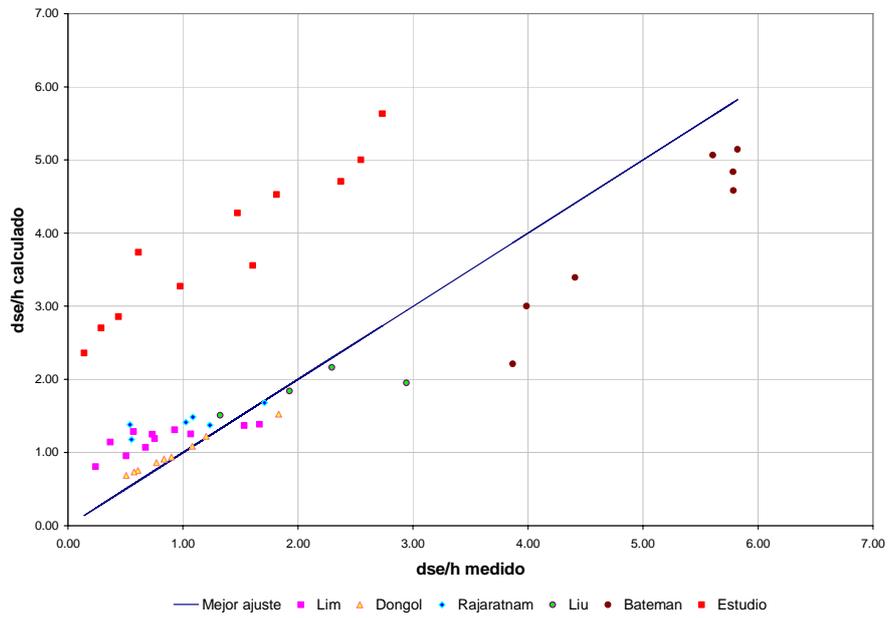


Figura 10 - dse/h medido vs calculado con la fórmula de Liu.

Fórmula Froehlich envolvente

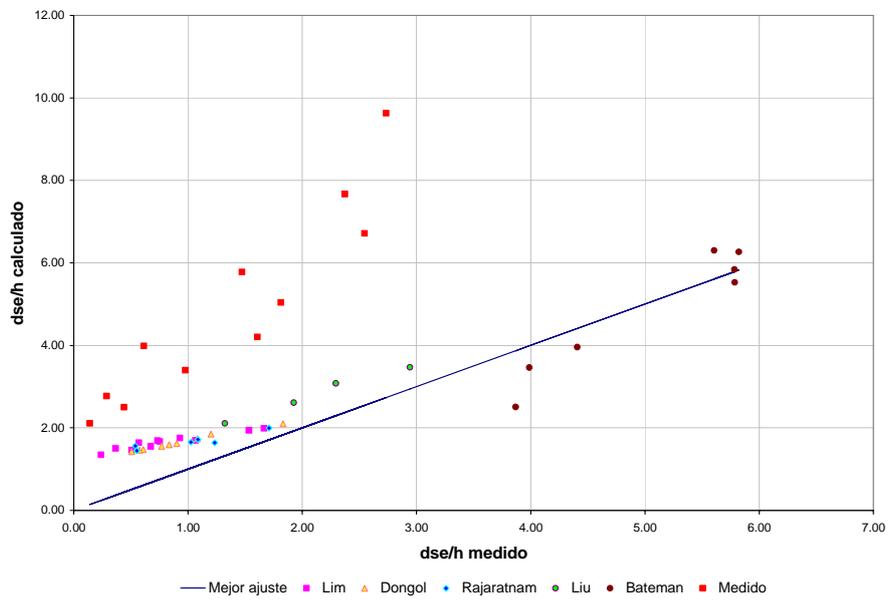


Figura 11 - dse/h medido vs calculado con la fórmula de Froehlich.

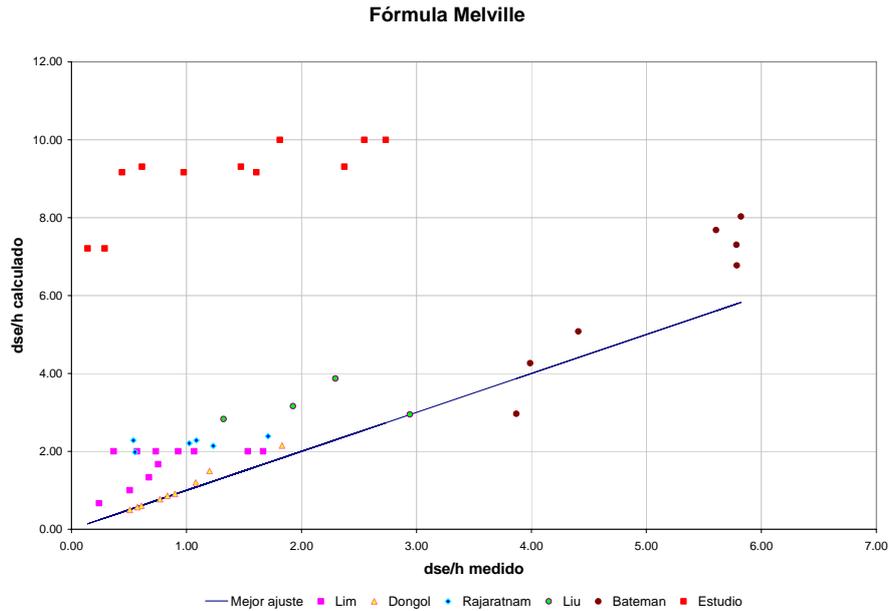


Figura 12 - dse/h medido vs calculado con la fórmula de Melville.

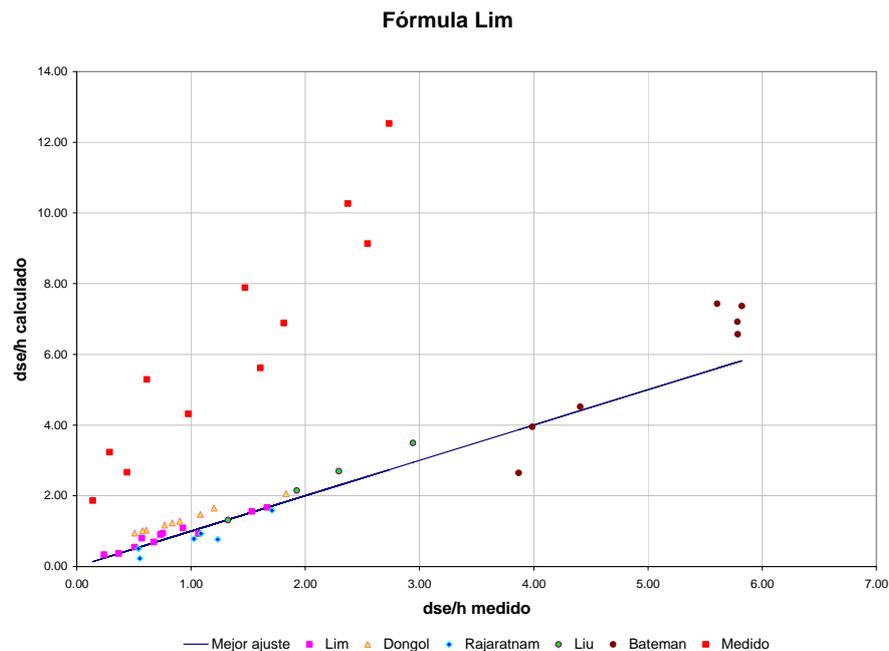


Figura 13 - dse/h medido vs calculado con la fórmula de Lim.

En las Figuras anteriores se aprecia que los puntos correspondientes al presente estudio se ubican por encima de la línea de mejor ajuste (línea a 45°), lo que indica que las ecuaciones sobreestiman la erosión esperable. Con la formulación dada por Melville se tiene la mayor estimación en exceso. Se recuerda que la misma fue obtenida como una envolvente de máximos, para la condición crítica de inicio de movimiento, y definiendo a los terraplenes como estribos largos, cortos e intermedios.

El hecho de que los valores calculados con las fórmulas resulten mayores a los registrados en los experimentos realizados en el Laboratorio de Hidráulica del INA,

puede relacionarse con las condiciones particulares con que se realizaron los ensayos, como ser, entre otras:

La escala del modelo: los ensayos presentados en el presente trabajo han sido realizados en un modelo físico de grandes dimensiones, mientras que los experimentos disponibles en la bibliografía específica, y sobre los que se han basado los autores de las fórmulas para hacer las regresiones, han sido en general realizados en canales de pequeñas dimensiones, pudiendo estar afectados por ciertos factores de escala.

La duración de los ensayos: como se indicara los ensayos realizados tuvieron una duración aproximada de 20 horas, pudiendo ser insuficiente como para alcanzar la configuración final de equilibrio de la fosa de erosión. Esta limitación fue impuesta por la imposibilidad de tener en funcionamiento el sistema de bombeo por tiempos prolongados, con un caudal circulante muy elevado que requiere para algunos de los ensayos el funcionamiento simultáneo de 8 bombas. Por otro lado, para las dimensiones que presenta el canal, las tareas de conformación del lecho, operación y relevamiento del fondo una vez finalizado el ensayo, entre otras, implican un tiempo total para cada experiencia superior a una semana.

La forma del estribo: los ensayos se han realizado interponiendo a la corriente un terraplén vertical con un estribo extremo con forma redondeada. Estos se han comparado con experiencias con contracciones de muros verticales, los que en general se materializan en los esquemas experimentales mediante placas de aristas vivas. Esta diferencia puede ser significativa en la determinación del valor de la socavación máxima.

CONCLUSIONES

Se han presentado las tareas experimentales llevadas a cabo hasta el momento en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, correspondientes a un estudio que se está realizando en el marco del Proyecto “Desarrollo de Metodologías para el Diseño Hidráulico de Estructuras Viales”, los que consisten en 12 ensayos en modelo físico a fondo móvil para el estudio de estribos de puentes, habiéndose descrito el dispositivo experimental estudiado y las técnicas de medición empleadas.

Al disponerse ya de una serie completa de ensayos para el terraplén constituido por muros verticales y dos longitudes del mismo, se han analizado los resultados obtenidos, presentándose gráficos con los registros de velocidades y conformación del lecho al final del ensayo. También se han comparado los valores de la máxima socavación registrados en las experiencias, con los obtenidos a partir de fórmulas que habitualmente se utilizan para el diseño de estribos, poniéndose de manifiesto la sobreestimación que estas ecuaciones en general hacen de los fenómenos esperables.

En función del campo de velocidades resultante para cada ensayo, se identificaron las estructuras de flujo tridimensional producidas por la obstrucción impuesta por la estructura formada por el terraplén y estribo, lo cual permite, para experiencias posteriores, lograr un relevamiento más detallado de las velocidades en estas zonas para la correcta descripción de los fenómenos estudiados.

Por último es interesante destacar que las tareas descriptas en el presente trabajo son parte de un estudio general, que constituirá un avance en el estudio de los procesos de erosión que se desarrollan en cercanías de estribos de puentes localizados en valles de inundación, tanto desde un punto de vista conceptual, como del desarrollo de metodologías y expresiones de cálculo que permitan la cuantificación de estos fenómenos.

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{se} :	profundidad máxima de socavación en la condición de equilibrio
F_1 :	número de Froude del flujo de aproximación
d_1 :	tirante líquido en la zona no perturbada
L :	longitud del terraplén-estribo
K_L :	factor de forma que para muros verticales toma un valor de 2,15
d_{50} :	tamaño medio de las partículas que componen el lecho
K_s :	factor de forma
K_θ :	factor de orientación
σ_g :	desviación estándar de la distribución granulométrica del material del lecho
K_s^* :	factor de forma ajustado
K_θ^* :	factor de orientación ajustado
K_s :	factor de forma del estribo dado por Melville
u_{*1} :	velocidad de corte del flujo de aproximación
u_{*c} :	velocidad de corte crítica

REFERENCIAS

Bateman, A.; Bertram, A.; Roca, M. (2002). “Estudio Experimental de la Erosión Local en Estribos de Puente”. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – La Habana. Cuba.

Federal Highway Administration (2001). “Evaluating Scour at Bridges”. Hydraulic Engineering Circular N° 18.

Dongol, D.M.S., (1994). “Local scour at bridge abutments”. Rep. N° 544, School of Engrg., Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.

Hoffmans, G. J. C. M. and Verheij, H. J. (1997). “Scour Manual”. Editorial Balkema.

Kothyari, U.C.; Ranga Raju K.G. (2001). “Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutments”. Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, No. 4.

Kuhnle, R.a.; Alonso, C.V.; Douglas Shields Jr, F., (1999). “Geometry of Scour Holes Associated with 90° Spur Dikes”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, No. 9, September 1999.

Lim, S.Y. (1997). “Equilibrium Clear-Water Scour Around an Abutment”. Journal of Hydraulic Engineering, March 1997.

Lim, S.Y.; Cheng N.S. (1998). “Prediction of Live-Bed Scour at Bridge Abutments”. Journal of Hydraulic Engineering, June 1998.

Liu, H.K.; Chang, F.M.; Skinner, M.M.; (1961). "Effect of bridge construction on scour and backwater". CER 60-HKL 2, Colorado State Univ., Civ. Engrg. Section, Ft. Collins, Colo.

Melville, B.W. (1992). "Local Scour at Bridge Abutments" Paper and Discussion. Journal of Hydraulic Engineering, April 1992.

Melville, B.W. (1995). "Bridge Abutments Scour in Compound Channels". Journal of Hydraulic Engineering, December 1995.

Richardson E.V. (2002). "United States Practice for Bridge Scour Analysis".

Spalletti, P.; Brea, J. D.; Loschacoff, S. (2004). "Erosiones en Estribos no Verticales". XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica - São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil

Tey, C.B. (1984). "Local scour at bridge abutments". Rep. N° 329, School of Engrg., Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.

Wong, W.H.; (1982). "Scout at bridge abutments". Rep. N° 275, School of Engrg., Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.