



ESTUDIO DE EROSIÓN LOCAL EN PILAS CUADRADAS

Juan Manuel Serra, José Daniel Brea y Pablo Spalletti

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina
AU Ezeiza-Cañuelas, Tramo J. Newbery Km 1,620 (1804) - Ezeiza - Buenos Aires - Argentina
E-mail: serrajuanmanuel@gmail.com - dbrea@ina.gov.ar – pspallett@ina.gov.ar

RESUMEN

Los procesos erosivos en torno a pilas cuadradas, con separaciones del flujo bien desarrolladas en sus aristas vivas, son complejos y por ello difíciles de predecir, lo que se suma a la escasez de información relativa a este tema. Por ello, los estudios en modelo físico constituyen herramientas útiles para mejorar el conocimiento de este tipo de fenómenos. En este trabajo, se presentan los ensayos realizados en modelos físicos a fondo móvil de erosión local en pilas cuadradas que se han llevado a cabo en los últimos años en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua. Para las citadas experiencias se caracterizan los procesos erosivos locales, se analiza la evolución temporal de la erosión en puntos de referencia, se describen las fosas de erosión desarrolladas durante los ensayos y se comparan las socavaciones máximas registradas en los modelos con las obtenidas a través de las fórmulas de estimación más utilizadas. Además, se han comparado los ensayos realizados con estudios de erosión para pilas circulares. Los ensayos que se presentan en el trabajo han sido desarrollados en el marco de prácticas profesionales, con la colaboración de estudiantes avanzados como Marina Bermúdez, Andrés Graisaro y Germán Ziñak, entre otros.

ABSTRACT

The erosive processes around square piers, with well developed flow separations in their sharp edges, are complex and therefore difficult to predict, adding to the few information on this topic. So, physical model studies are useful tools to improve the understanding of such phenomena. In this paper, physical model tests made under mobile bottom conditions to estimate local scour at square piers, that have taken place in recent years at the Hydraulics Laboratory of the Water National Institute, are presented. Erosion processes around these structures were characterized, temporal evolution of erosion in reference points were analyzed, scour holes during the course of testing were described and the maximum registered local erosions were compared with the values from the most usual equations to estimate them. A comparative analysis between the tests made with square piers and other experiences from literature with circular ones, was also presented. Experiences presented in this paper have been developed in the context of professional practice, with the collaboration of advanced students as Marina Bermúdez, Andrés Graisaro and Germán Ziñak, among others.

INTRODUCCIÓN

Los procesos erosivos en torno a pilas cuadradas, con separaciones del flujo bien desarrolladas en sus aristas vivas, son complejos y por ello difíciles de predecir, lo que se suma a la escasez de información relativa a este tema (Diab et al., 2009; Dey, 2005). Por lo tanto, los estudios en modelos físicos constituyen herramientas útiles para mejorar el conocimiento de este tipo de fenómenos.

El objetivo de este trabajo es presentar los estudios con modelos físicos a fondo móvil de erosión local en pilas cuadradas que se han realizado en los últimos años en la Nave 6 del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua y, a través de ellos, caracterizar los procesos erosivos en torno a este tipo de elementos, analizar la evolución temporal de la erosión en puntos de referencia, describir las fosas de erosión durante el desarrollo de las experiencias y comparar las socavaciones máximas registradas en los ensayos con las obtenidas a través de las fórmulas de estimación más utilizadas.

En ese sentido, se cuenta con ensayos en canales con lechos de arena y carbón mineral, trabajando en algunos casos con pilas aisladas, y en otros, con dos pilas alineadas a la corriente.

Las experiencias que se presentan en el trabajo han sido desarrolladas en el marco de prácticas profesionales, con la colaboración de estudiantes avanzados como Marina Bermúdez (2010), Andrés Graisaro y Germán Ziñak, entre otros.

DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES Y DE LOS ENSAYOS

Los ensayos se realizaron en dos canales de 30 metros de largo y 1 metro de profundidad, uno de 2 metros de ancho y el otro de 2,50 metros, localizados en la Nave 6 del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua. Ambos dispositivos disponen de una capacidad de bombeo de aproximadamente 500 litros por segundo.

Se realizaron cuatro ensayos en los cuales el lecho estuvo constituido por arena y otro utilizando carbón mineral como material móvil. Tres de las experiencias con arena se realizaron analizando una pila cuadrada de 20 centímetros de lado con diferentes condiciones de relación tirante-ancho de pila, utilizando el canal de 2,50 metros. En el cuarto ensayo con arena, se estudiaron en el canal de 2 metros de ancho, dos pilas cuadradas de 20 centímetros de lado, separadas una distancia de 30 centímetros (50 centímetros entre ejes) y alineadas con la dirección de la corriente.

En la Figura 1 se muestra el armado del modelo de dos pilas cuadradas alineadas con la corriente.



Figura 1.- Montaje de estructura

El quinto ensayo que se presenta en el trabajo, se corresponde con el estudio de una pila cuadrada, también de 20 centímetros de lado, en el cual el fondo del lecho móvil se materializó con carbón mineral de peso específico del orden de 1430 Kg/m³, con un d_{50} igual a 170 μm . Este ensayo se hizo en el canal de 2 metros de ancho.

En la Figura 2 se presentan las curvas granulométricas de los materiales utilizados como fondo. En la misma, se observa que la arena utilizada en el ensayo de dos pilas cuadradas es más uniforme y con un d_{50} algo inferior, a la correspondiente al lecho móvil en los ensayos de una pila.

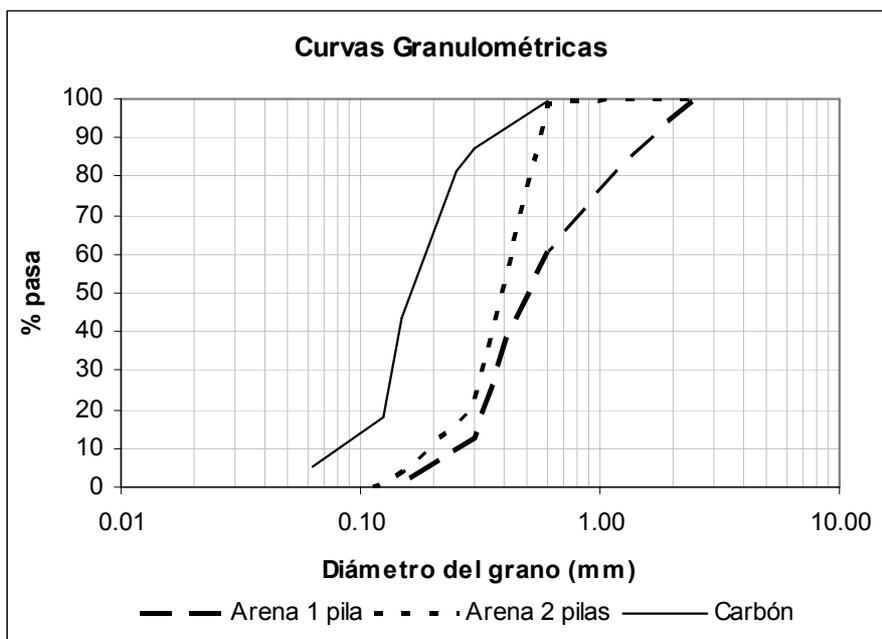


Figura 2.- Curvas granulométricas - materiales del lecho móvil

En las experiencias desarrolladas, las velocidades se registraron utilizando un Velocímetro Acústico Doppler (ADV). Para medir las erosiones en torno de las estructuras estudiadas, se utilizó un equipo ultrasónico desarrollado en el Instituto (Izquierdo, 2010).

En la Tabla 1 se resumen las condiciones hidráulicas de cada ensayo, indicando además la relación entre la velocidad del escurrimiento y la velocidad crítica de inicio de movimiento de las partículas del lecho.

Tabla 1.- Condiciones hidráulicas de los ensayos

Ensayo	Lecho	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Froude	U/Uc
1-1pila	Arena	0,10	0,226	0,16	0,95
2-1pila	Arena	0,15	0,239	0,17	0,95
3-1pila	Arena	0,20	0,248	0,18	0,95
4-2pilas	Arena	0,22	0,236	0,17	0,90
5-1pila	Carbón	0,20	0,150	0,11	0,93

EROSIÓN LOCAL

Para estimar las erosiones máximas que pueden desarrollarse en pilas suele utilizarse la expresión (1) del HEC-18 (2001).

$$\frac{S}{h} = 2.0K_1K_2K_3K_4 \left[\frac{a}{h} \right]^{0.65} Fr^{0.43} \quad (1)$$

Donde “S” es la socavación máxima calculada, “h” el tirante aguas arriba de la pila, “a” el ancho de la pila, “Fr” el número de Froude, “K₁” factor de corrección por la forma de la nariz de la pila, “K₂” factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo, “K₃” factor de corrección por condición de forma de fondo y “K₄” factor de corrección por tamaño del material del lecho.

En la Tabla 2 se muestra la comparación entre erosiones máximas observadas en los ensayos y las estimadas con la fórmula del HEC-18.

Tabla 2.- Comparación entre las erosiones máximas observadas y calculadas

Ensayo	Lecho	Tirante (m)	S/a	S _{medida} (m)	S _{HEC 18} (m)
1-1pila	Arena	0,10	0,60	0,136	0,173
2-1pila	Arena	0,15	0,70	0,140	0,205
3-1pila	Arena	0,20	0,95	0,190	0,230
4-2pilas	Arena	0,22	1,03	0,206	0,233
5-1pila	Carbón	0,20	1,03	0,206	0,185

Se aprecia que para los ensayos realizados con fondo de arena, las erosiones calculadas mediante la expresión del HEC-18 son mayores que las medidas en los ensayos con el equipo ultrasónico. En el caso del ensayo realizado con lecho de carbón, la erosión estimada es un 10 % menor que la observada.

En la Figura 3 se presentan las relaciones entre erosión máxima/ancho de pila (S/a) y tirante/ancho de pila (h/a) para las tres experiencias llevadas a cabo en arena con una pila cuadrada, en forma comparativa con los valores que adoptaría la ecuación del HEC-18 considerando un Froude de 0,17 (valor medio de los ensayos). Se aprecia que a medida que aumenta la relación h/a , la relación S/a crece. La fórmula del HEC-18, que usualmente es utilizada para definir las máximas socavaciones en torno a este tipo de estructuras, envuelve a las mediciones de los ensayos.

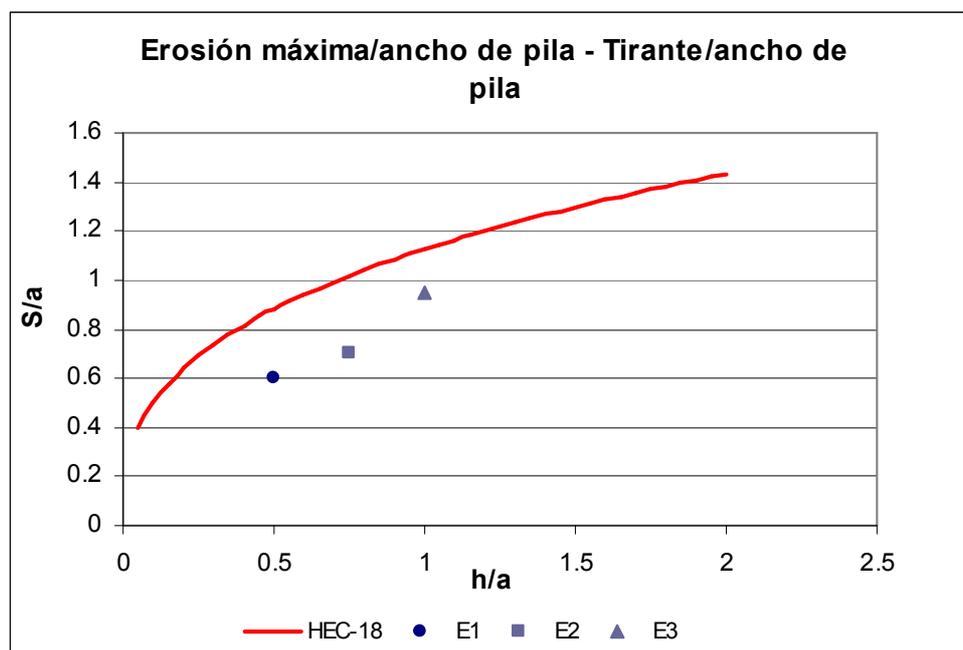


Figura 3.- Valores de S/a en función de h/a , para ensayos de una pila cuadrada en arena

Con el objeto de evaluar si las máximas profundizaciones registradas se corresponden con la socavación máxima posible, es decir si al final de cada ensayo se ha alcanzado o no el equilibrio de la fosa de erosión, se estudió mediante el equipo ultrasónico la evolución temporal de la erosión, registrándose las distancias entre el pelo de agua y el fondo durante el ensayo, en un punto característico, ubicado a 5 centímetros del vértice de aguas arriba, hacia la pared del canal, y otros 5 centímetros hacia aguas arriba, para los primeros tres ensayos. En el caso de dos pilas alineadas a la corriente (Ensayo 4) el registro se efectuó en cercanías de la pila de aguas arriba en correspondencia con el perfil frontal de la pila y a 5 cm del vértice hacia la pared. Las Figuras 4, 5, 6 y 7 muestran como se produce en el tiempo, la profundización del lecho en el punto de control para los ensayos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

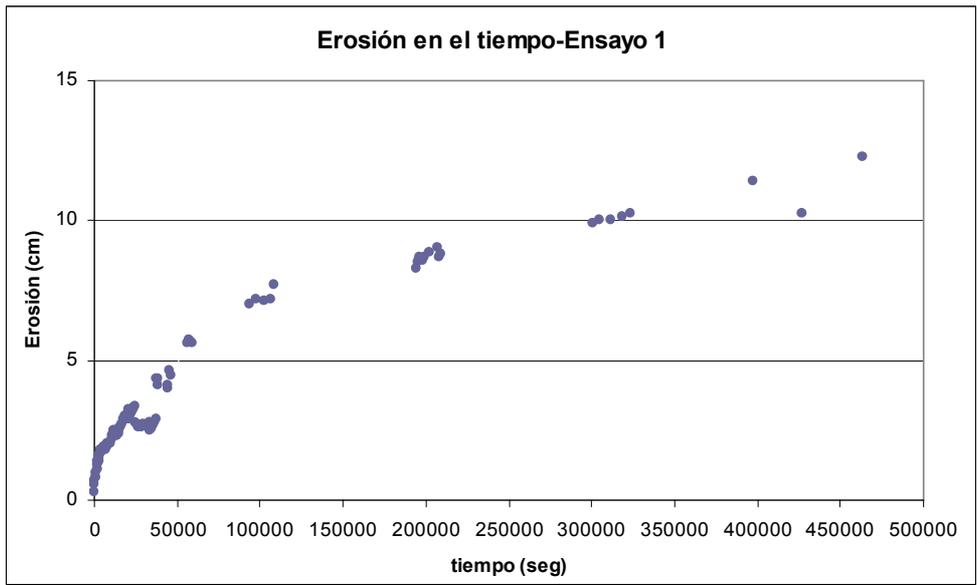


Figura 4.- Erosión en punto característico en el tiempo-Ensayo 1

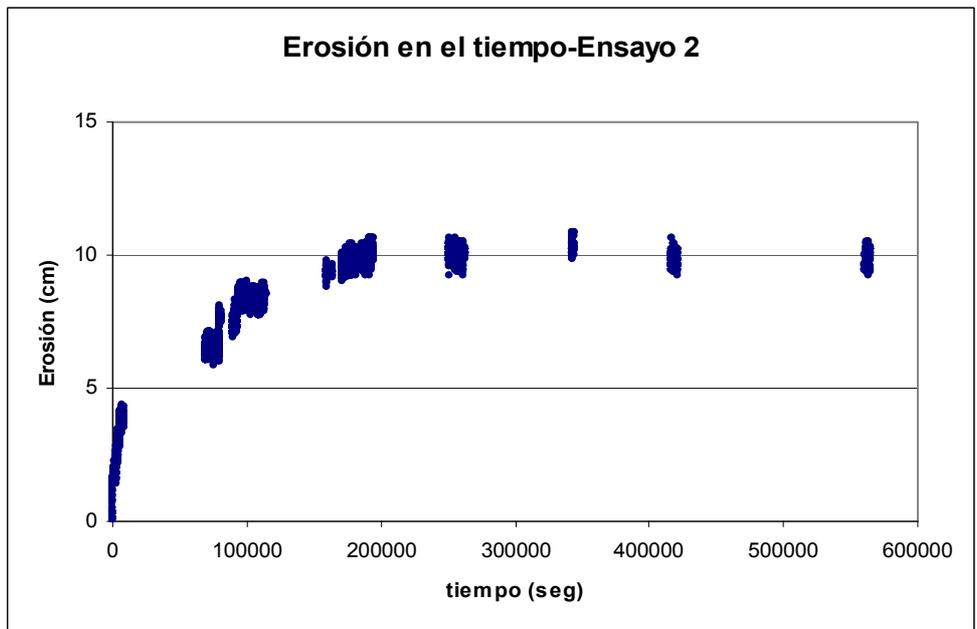


Figura 5.- Erosión en punto característico en el tiempo-Ensayo 2

Los rombos que se indican en la Figura 6 corresponden a las erosiones registradas en el punto de referencia del Ensayo 5, con lecho de carbón mineral, a 20 horas y 180 horas, tiempo en el cual finalizó la experiencia.

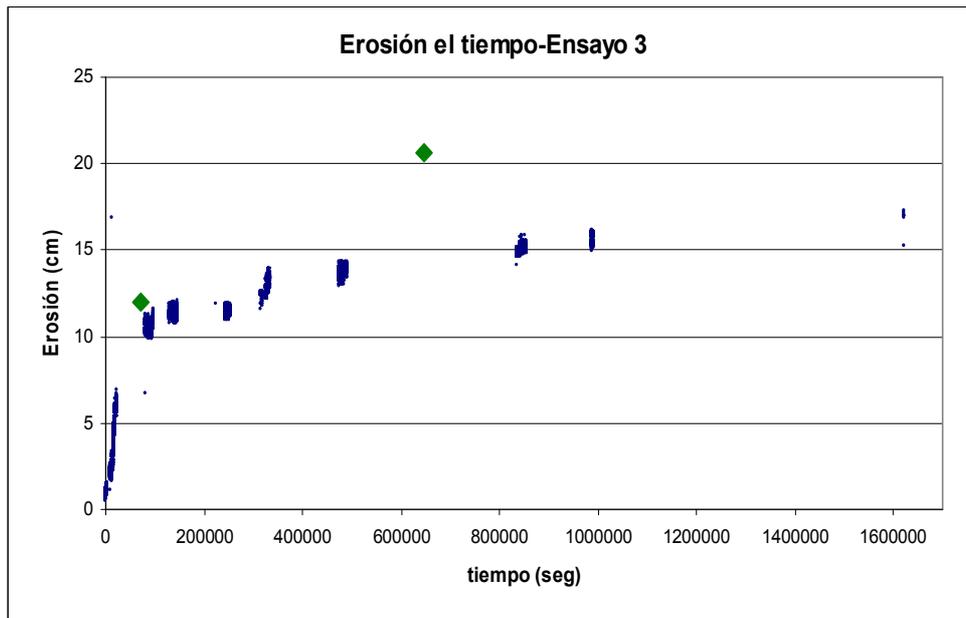


Figura 6.- Erosión en punto característico en el tiempo-Ensayo 3 y erosión en dos instantes-Ensayo 5

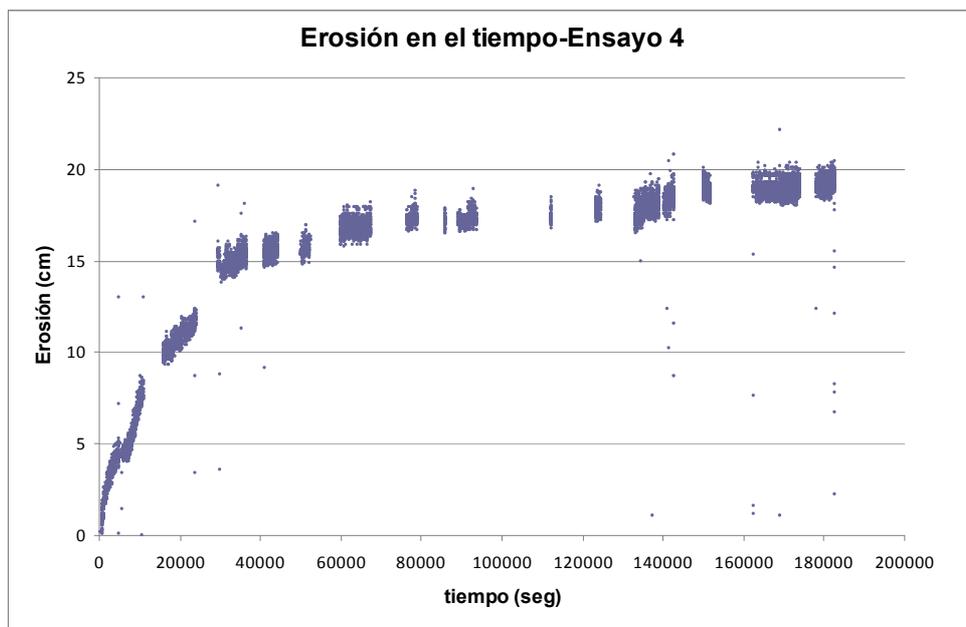


Figura 7.- Erosión en punto característico en el tiempo-Ensayo 4

En las figuras se puede ver que transcurrido cierto tiempo el proceso de erosión tiende a estabilizarse, aunque en algunas de las situaciones analizadas parece no haberse alcanzado la condición final de equilibrio. De todas formas, los ensayos pueden considerarse de larga duración, más aún teniendo en cuenta las dimensiones de las instalaciones experimentales, habiéndose realizado 128 horas de ensayo para la experiencia 1, de 157 para la 2, de 450 horas para el Ensayo 3 y de 69 horas para el 4. La determinación de la máxima socavación medida, presentada en la Tabla 2, se realizó al final de cada Ensayo. Vale aclarar que la posición donde se registró la socavación máxima en cada experiencia, pudo no coincidir con el punto que se tomó como referencia para estudiar la evolución temporal de la erosión.

Con el objeto de exponer cómo varía en el tiempo la fosa de erosión en torno a los elementos que se estudian, en la Figura 8 se muestran las fosas de erosión en torno a las dos pilas cuadradas a una hora y media y a sesenta y nueve horas de haberse iniciado el ensayo, tiempo en que finalizó la experiencia. En las imágenes se presenta el punto que se tomó como referencia para estudiar la evolución temporal de la erosión. La erosión registrada en el punto de control a una hora y media de haber iniciado el ensayo es igual a 7,70 centímetros y al final del ensayo (69 horas) la socavación medida es igual a 19,5 centímetros.

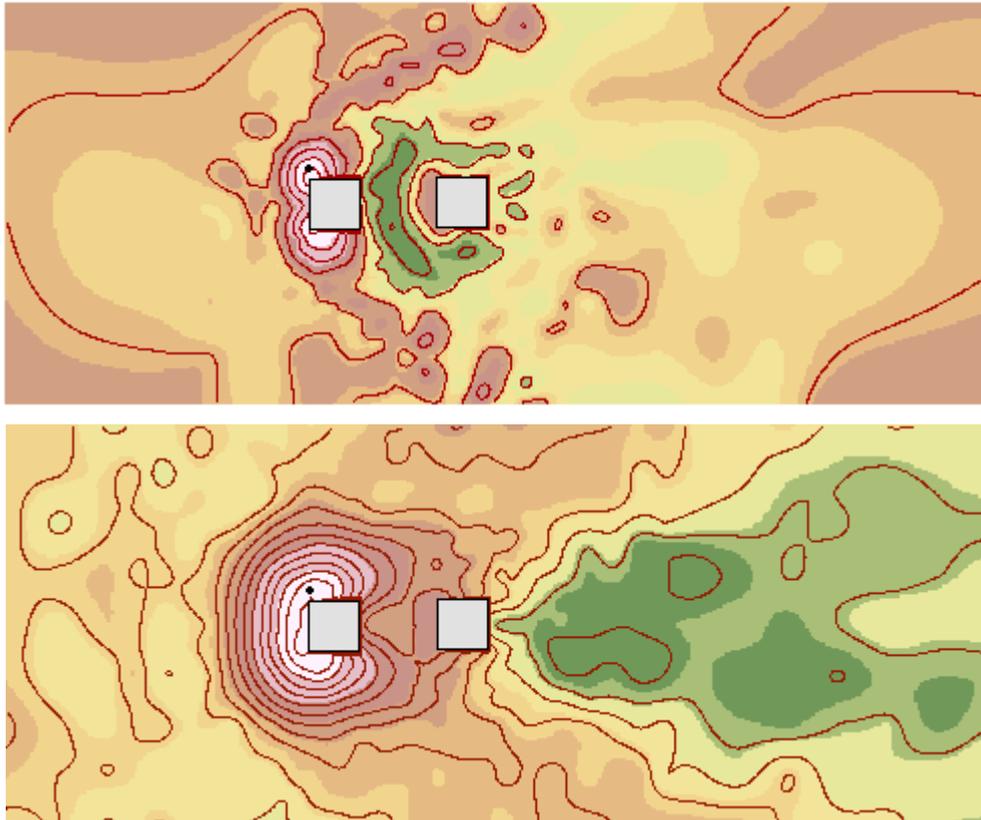


Figura 8.- Fosas de erosión. Imagen superior luego de 1,5 hs. Imagen inferior luego de 69 hs de iniciado el ensayo

En la imagen superior de la Figura 8, se observa que las máximas erosiones se registran en los vértices del lado de aguas arriba de la pila frontal y entre las dos pilas se desarrolla una zona de deposición de material de fondo. También se pueden apreciar las erosiones producidas al costado de las pilas hacia aguas abajo a causa de la separación del flujo por interposición del elemento en estudio, que son de menor magnitud que las registradas en los vértices de la pila frontal.

En la imagen inferior, se presenta la fosa final de erosión. En ella se ve que la fosa de socavación se ha desarrollado en la totalidad del frente de la pila cuadrada de aguas arriba, y la zona de deposición de material se traslada hacia aguas abajo de las dos pilas, quedando un área de menor erosión entre las dos pilas respecto de la pila frontal.

COMPARACIÓN ENTRE LA SOCAVACIÓN MÁXIMA EN UNA AISLADA Y DOS PILAS

Las interacciones que se producen en un grupo de pilas modifica la fosa de erosión respecto de una pila simple. Los estudios realizados por Raudkivi (1985) en grupo de dos pilas circulares marcan que hay una pronunciación de la profundidad de erosión en la cara aguas arriba de la pila frontal y una disminución de la erosión en la pila trasera.

Comparando los Ensayos 3 y 4, la socavación en la pila frontal de la experiencia con dos pilas cuadradas es un 8 % mayor que la registrada en la pila del Ensayo 3. También se observó que hubo una marcada disminución de la erosión en la cara delantera de la pila trasera respecto de la erosión observada en una pila simple.

En la Figura 9 se presentan las relaciones entre profundidad de erosión para dos pilas respecto de una pila simple en función de la relación espacio entre pilas/dimensión de las pilas, obtenidas a partir de las experiencias realizadas por Raudkivi para pilas circulares. En color rojo se indican los puntos que se obtuvieron de comparar los Ensayos 3 y 4.

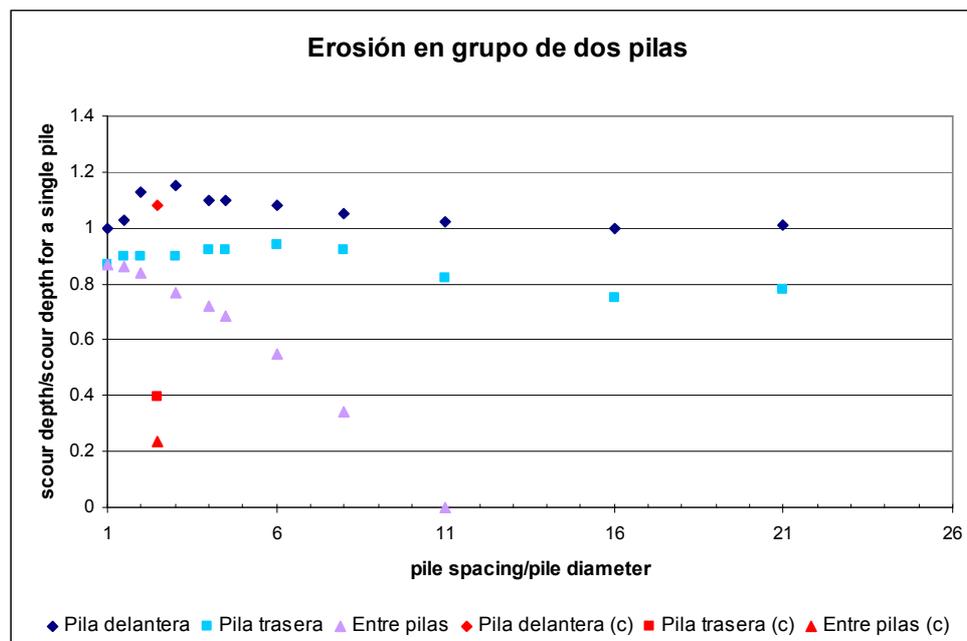


Figura 9.- Profundidad de erosión en grupo de dos pilas respecto de una pila simple

En el gráfico se ve que los puntos rojos correspondientes a los ensayos de pilas cuadradas están por debajo de las líneas de tendencia para grupo de dos pilas circulares. La interpretación de este fenómeno es que las pilas cuadradas con sus aristas vivas producen una separación del flujo más marcada que en pilas circulares, por lo que los efectos de la corriente son menores aguas abajo de la pila cuadrada delantera, produciendo una erosión menor, en relación a las circulares, tanto en la pila trasera como en el espacio entre elementos. Por la superposición de efectos se tiene entonces que la socavación máxima en la pila delantera relativa a la pila aislada es menor para elementos cuadrados, si se compara con lo que ocurre en pilotes de sección circular.

CONCLUSIONES

Se han presentado una serie de experiencias para estudiar erosión local en pilas cuadradas, en las que para poder realizar comparaciones, se han analizado los procesos para situaciones de U_c/U cercanas a 1, variando un parámetro hidráulico y/o geométrico por vez.

Más allá del análisis de las máximas socavaciones locales observadas en cada situación, se prestó especial atención a la evolución temporal de la fosa de erosión, registrándose durante los ensayos el desarrollo de los procesos en puntos característicos, perfiles del lecho en torno a las pilas para diferentes tiempos de ensayo y hasta relevándose la totalidad del lecho móvil al final de los ensayos y a las pocas horas de iniciadas las experiencias.

Vale mencionar que los ensayos tuvieron duraciones del orden de los días, de forma tal que las erosiones sean lo más cercanas, dentro de las posibilidades prácticas de las instalaciones, a las máximas esperables.

De los resultados de las experiencias surge cómo las socavaciones locales están condicionadas por parámetros hidráulicos y geométricos. Otra cuestión que surge de los ensayos, es la forma en que las fosas de erosión van cambiando su configuración geométrica a medida que se desarrollan los procesos, poniendo de manifiesto lo cambiante que puede ser la forma de las hoyas debidas a erosión local en torno a las estructuras, a medida que escurre una crecida en un caso de prototipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dey, S.; Barbhuiya, A. K. (2005): "Flow Field at a Vertical-Wall Abutment", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 131. No. 12, December, 2005.

Diab, R.; Link, O.; Zanke, U. (2009): "Experimental Investigation of 3D Flow Field around Square Pier", *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*.

Izquierdo, J. M.; Tatone, G. (2010): "Equipo Ultrasónico para Estudio de Erosión en Modelos Físicos", *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, Noviembre 2010.

Richardson, E.V. & Davis, S.R. (2001). *Evaluating Scour at Bridges*, *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18)*, Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington DC, USA.

Raudkivi, A. J. (1985): "Estudio de sedimentos finos y cohesivos", *Curso Latinoamericano de Mecánica Fluvial*, Buenos Aires, Argentina, Agosto 1985.

Bermúdez, M. (2010): "Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas".



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRÁULICA

