

ESTUDIO DE EROSIÓN LOCAL EN GRUPOS DE PILAS CUADRADAS

STUDY OF LOCAL SCOUR AT SQUARE PIERS GROUP

Martín Puricelli¹, Pablo Spalletti² y Agnes Paterson¹

Resumen

Con el objeto de realizar experiencias relativas a la erosión local en grupo de pilas, para los casos menos estudiados pero de aplicación práctica, se trabajó con dos pilas de sección cuadrada. Se realizaron ensayos a fondo móvil en un canal de 2 metros de ancho en condiciones de agua clara, sin transporte de sedimento aguas arriba de estas estructuras para evitar las complejidades propias de las formas de fondo. Se exploraron una variedad de condiciones experimentales con diferentes tirantes (entre 30 y 50 cm), espaciamiento entre pilas y la configuración de las mismas. Las pilas tienen 20 cm de lado. En un caso, ambas pilas están alineadas a la corriente y en el segundo caso que denominamos al tresbolillo, las pilas están desplazadas lateralmente una respecto de la otra. En este trabajo se analizan las erosiones máximas medidas, el campo de velocidades alrededor de las pilas y el relevamiento batimétrico del lecho del canal. Las erosiones máximas medidas se compararon con diferentes fórmulas de predicción. Se estudió la evolución temporal de la erosión comparándola con ensayos similares de larga duración pero con una única pila, analizándose también el ajuste de formulaciones predictivas del avance de la socavación en el tiempo.

En todos los casos se observó una dependencia de la erosión máxima respecto de la separación entre pilas para los grupos de pilas alineadas. Esta erosión es sobreestimada con la fórmula del HEC-18 para la geometría en tresbolillo. Estos efectos de conjunto para las pilas alineadas se manifiestan desde los primeros minutos de las experiencias. Para la geometría en tresbolillo se observó un cambio en la curvatura de la evolución temporal de la erosión que se puede asociar justamente a estos efectos de conjunto.

Palabras Claves: Pilas cuadradas, sedimento granular, Grupos de pilas, Erosión, Evolución, Velocidades.

Abstract

The task in this investigation was to perform experiences concerning local scour development around two square piers related with those less studied cases and with practical appliances. The experiments are carried out under clear-water conditions in a two meters wide and thirty meters long channel. A variety of conditions including different flow depths, pier spacing and pier spatial configurations are considered to have significant influence on the development of the scour hole. In one configuration, both piers are aligned with the flow and in the second one, call staggered, piers are laterally displaced relative to one another.

Experimental measurements of the maximum depth and the morphology of the bed channel are performed. The maximum scour measured is compared with the prediction of different formulas. The temporal evolution of erosion at a characteristic point is compare to similar long-term tests with a single pier. In all cases a dependency of the maximum scour on the separation between the piers were observed in the aligned configuration. This erosion is overestimated with HEC-18 formula for the staggered geometry. Data show that group effects are manifested since the first minutes of the experiences in the aligned configuration. For the staggered geometry, a change was observed in the curvature of the temporal evolution of scour that can be associated to group effects.

Key Word: Square Piles, Granular sediment, Piers group, Scour, Evolution, Velocity.

INTRODUCCIÓN

La erosión local en las estructuras de los puentes es una de las causas principales del colapso de los mismos (Qiping, 2005). Los fenómenos que gobiernan estos procesos de erosión local son conceptualmente conocidos pero aún son necesarios estudios cuantitativos debido a la complejidad de las mutuas interacciones entre fluido, estructura y sedimento.

Si bien en la bibliografía pueden encontrarse una cantidad considerable de estudios de socavación local en estructuras (Breusers, 1991), no hay un criterio único para la estimación de la evolución temporal de los procesos y de las erosiones máximas (Melville, 1999). Los distintos autores sugieren una cantidad numerosa e incluso excesiva de ecuaciones de pre-

¹ Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires (UBA). Argentina
Au. Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery Km 1,620 Teléfono: (54 11) 4480-4500 int. 2353 / 2338
E-mail: martinpuricellivil@gmail.com

² Laboratorio de Hidráulica. Programa de Hidráulica Fluvial – Instituto Nacional del Agua (INA). Argentina

dicción de la socavación en estructuras interpuestas en corrientes de agua (Melville, 2000).

Los estudios para grupos de pilas, que en su mayoría están basados en experiencias con eventuales efectos de escala, han sido desarrollados con elementos de sección circular, privilegiando la alineación y simetría del conjunto (Coleman, 2005).

En las aplicaciones prácticas, la propia complejidad del fenómeno se suma a las incertidumbres relativas a las características de la crecida, a los procesos constructivos del puente y al material del lecho que son propias de cada río y cada cruce.

Con el objeto de realizar experiencias que constituyan un avance en el conocimiento en casos de aplicación práctica pero que han sido poco estudiados, se trabajó con dos pilas de sección cuadrada con diferentes configuraciones espaciales. Esta tipología suele ser empleada en obras de menor envergadura que no ameritan estudios físicos. Por un lado, las aristas vivas producen una separación del flujo y zonas de estancamiento que modifican la estructura tridimensional del escurrimiento respecto al que se desarrolla en torno a elementos de sección circular. Por otro lado, el análisis del efecto de conjunto de las pilas permite estudiar las diferencias de los procesos erosivos respecto de la pila aislada.

METODOLOGÍA

Para la ejecución de los ensayos se utilizó un canal de 2 metros de ancho, 1 metro de altura y 30 metros de longitud, localizado en la Nave 6 del Laboratorio de Hidráulica (LH) del Instituto Nacional del Agua (INA, Argentina).

Los ensayos se realizaron en condiciones de agua clara con una velocidad del flujo cercana a la de inicio de movimiento del sedimento del lecho para estudiar el fenómeno erosivo en una condición lo más cercana posible a su máxima intensidad.

Los ensayos tuvieron una duración de entre 6 y 10 hs cada uno sin llegar a la condición de equilibrio del proceso erosivo. En consecuencia en estos ensayos no se llega a la erosión máxima alcanzable.

El dispositivo cuenta con una capacidad de bombeo del orden de los $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. El agua ingresa al canal mediante un dispositivo aquietador ubicado en un extremo del mismo, que uniformiza el escurrimiento, escurre por el canal de ensayo y desemboca en una cisterna configurándose un circuito hidráulico cerrado. En su tramo medio, el canal cuenta con un segmento de 5 metros de longitud, 2 metros de ancho y 50 centímetros de espesor, con material granular constituido por arena tamizada con diámetros característicos de $d_{16}=0.24\text{mm}$, $d_{50}=0.37\text{mm}$ y $d_{84}=0.51\text{mm}$. Aguas arriba y abajo del segmento de canal a fondo móvil, el modelo se completa con sendos fondos fijos constituidos por carpetas de cemento que forman un plano horizontal único con el lecho de arena. Aguas abajo se encuentra una trampa de arena para rete-

ner el posible material arrastrado, y una compuerta manual rebatible para regular el tirante.

Antes de comenzar cada ensayo, fue necesario restituir el lecho a su condición inicial. Para ello se realizó una limpieza general del fondo retirando el material extraño, luego se alisó el mismo dejándolo a nivel con las carpetas de cemento mencionadas. Esta operación se repitió para cada nuevo ensayo. El material de aporte necesario para la nivelación se obtuvo de la trampa de arena donde se encontraba sedimento de la misma granulometría. Las características del mismo fueron tales que no hubo riesgo de posible disgregación en distintas fracciones de la granulometría inicial. En la Figura 1 se puede observar la condición inicial del fondo antes de los ensayos.



Figura 1. Condición inicial del lecho del canal en la configuración de pilas alineadas al flujo.

Para el registro de profundidades se utilizó un equipo ultrasónico (Micro-Eco) desarrollado en el INA, (Iz-

quierdo et al., 2010), y para la medición del campo de velocidades un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Sontek. También se midieron velocidades en forma simultánea con el ADV y con un mini-molinete Ott durante la puesta en régimen de las experiencias.

Finalizada la puesta en régimen, se colocó en primera instancia el Micro-Eco que relevó durante todo el ensayo la evolución temporal de la erosión en un punto característico. El mismo se ubicó a 5 cm del vértice izquierdo de la cara frontal de la pila de aguas arriba, alineada con ésta y desplazada en dirección transversal al flujo. Posteriormente se deja evolucionar al fenómeno erosivo en las condiciones citadas por el término de unas dos horas. Luego se realizó la medición del campo de velocidades.

Para minimizar el efecto de la contracción de la corriente en el flujo tridimensional desarrollado en torno a las estructuras estudiadas, se trabajó con pilas de sección cuadrada de 20 cm de lado, correspondiente al 10% del ancho del canal. El dispositivo experimental permitió trabajar con tirantes de hasta 50 cm, adoptándose en las experiencias valores de 30, 40 y 50 cm.

Se estudiaron dos configuraciones geométricas alineadas a la corriente, la primera con una separación entre las caras de los dos elementos del orden del menor tirante (30 cm), para la que son esperables mayores efectos de conjunto (Serra, 2011), y una segunda aumentando dicha separación a 50 cm. El Departamento de Hidráulica de la Universidad de Buenos Aires (UBA, Argentina), propuso utilizar una geometría en tresbolillo, y de esa forma quedó establecida la tercera disposición geométrica. En la Tabla 1 se resumen las condiciones geométricas y los parámetros hidráulicos de los ensayos realizados.

Tabla 1.- Condiciones de ensayo

En.	Sep. Long. [cm]	Sep. Trans. [cm]	U/Uc* [1]	Dur. [min.]	Esquema Geométrico
A	30	0	95	265	
B	30	0	95	323	
C	30	0	90	358	
D	30	0	95	422	
E	50	0	95	361	
F	50	0	95	356	
G	50	0	95	358	
H	30	20	95	522	
I	30	20	95	351	
J	30	20	95	588	

(*)Porcentaje propuesto para cada ensayo

Se evitó incluir en el análisis los efectos de las formas de fondo que aportan complejidad a la fase experimental e influyen la erosión máxima. Para ello se utilizó una velocidad de aproximación del 95% de la velocidad de inicio de movimiento, calculando ésta última mediante la parametrización de Van Rijn (1993). Este método, ampliamente difundido, es dimensionalmente compatible. Se considera el peso sumergido y la granulometría del sedimento, así como la velocidad del fluido y su viscosidad. Se puede observar la velocidad crítica para cada tirante en la Tabla 2.

Tabla 2.- Velocidades de inicio de movimiento.

Tirante [cm]	U _c [cm/s]	95 % U _c / 90% U _c
30	27.6	26.2 / 24.8
40	28.6	27.2 / 25.7
50	29.3	27.8 / 26.3

RESULTADOS

En las 10 experiencias realizadas se midió la batimetría final del lecho, el campo de velocidad en torno a las pilas y la evolución temporal de la erosión en un punto característico localizado en la zona de mayor socavación local.

En la Figura 2 y 3 se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los resultados correspondientes al Ensayo J. En la figura 2, se representa el campo de velocidades medido. La longitud de las flechas rojas es proporcional a la componente horizontal de la velocidad. Puede observarse en amarillo la zona del flujo que presenta velocidades ascendentes.

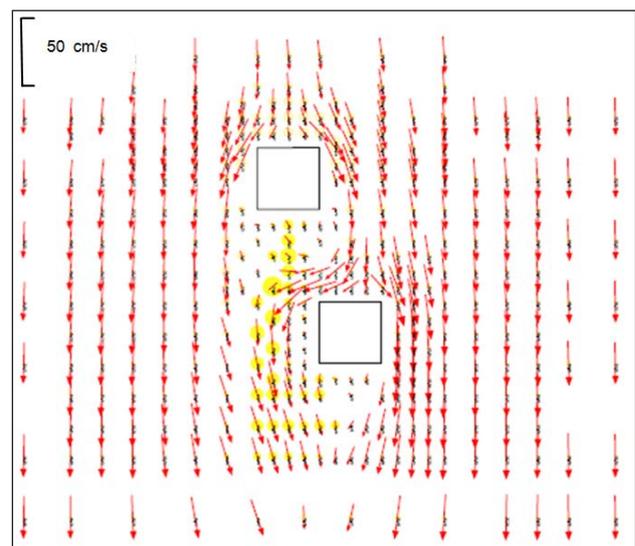


Figura 2. Campo de velocidades para el Ensayo J

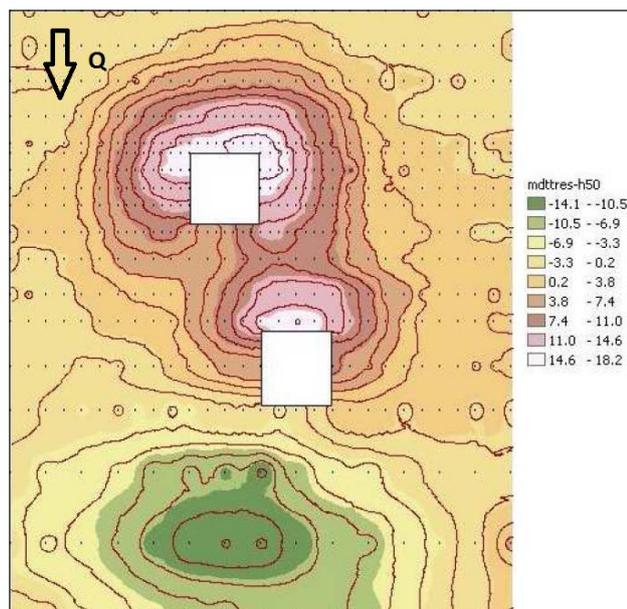


Figura 3. Lecho final para el Ensayo J

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las condiciones de ensayo y de los resultados obtenidos, donde: “d” es la separación entre pilas medida entre caras enfrentadas, “h” el tirante, “b” el ancho de pila, “U_m” es la velocidad media del flujo, “U_c” la velocidad crítica de inicio del movimiento, “d_{se}” la máxima erosión en la pila de aguas arriba, “d_{sp}” la máxima erosión en la pila de aguas abajo y “d_{sa}” la altura del depósito aguas abajo de las pilas, según se muestra en la figura 4.

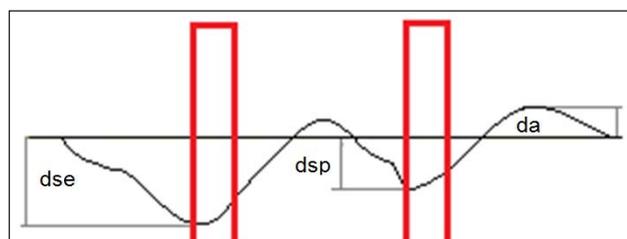


Figura 4. Nomenclatura utilizada

Tabla 3.- Resultados experimentales

En.	h [cm]	U/ U _c **	Fr	Dur. [min]	d [cm]	d _{se} /b	d _{sp} /b	d _{sa} /b
A	30	0.96	0.154	265	30	0.84	0.16	-0.13
B	40	0.95	0.153	323	30	0.85	0.12	-0.14
C	50	0.88	0.117	358	30	0.52	0.13	-0.15
D	50	0.94	0.124	422	30	0.91	0.26	-0.16
E	30	0.94	0.150	361	50	0.62	0.30	-0.12
F	40	0.91	0.131	356	50	0.54	0.24	-0.09
G	50	0.93	0.123	358	50	0.53	0.20	-0.16
H	30	0.95	0.153	522	30	0.51	0.63	-0.77
I	40	0.95	0.138	531	30	0.72	0.72	-0.75
J	50	0.95	0.126	588	30	0.85	0.81	-0.71

(*) En estas experiencias se alinearon los vértices opuestos de las pilas. (**) Porcentaje según datos de laboratorio

Se puede observar que la altura del depósito de sedimento medido en la zona detrás de la segunda pila alcanza valores semejantes para el caso de pilas alineadas, no así para los ensayos a tresbolillo, donde los valores son notoriamente superiores.

Los valores medidos de las tres variables para el ensayo C (88% U_c) son menores respecto del ensayo D (94% de U_c). Este resultado se encuentra en concordancia con la menor turbulencia y las menores tensiones de corte aplicadas sobre las partículas del sedimento en el ensayo C.

Las erosiones máximas medidas se compararon con las expresiones de predicción de Arunachalam, Coleman, Shen, Aruchalam, Richardson, HEC-18, entre otras. Sólo la ecuación del HEC-18 permite estimar la erosión máxima cuando la configuración es al tresbolillo. Se aplicaron las formulas mencionadas por que son las que mejor aproximan los resultados obtenidos por Bermúdez (2011). En la tabla 4 se pueden observar los valores de las predicciones de la erosión máxima para cada fórmula y el porcentaje de dicho valor alcanzado durante cada experiencia.

Tabla 4. Erosión máxima, predicciones de distintas fórmulas y porcentaje alcanzado en las experiencias respecto de los valores teóricos.

Ensayo	Medido [cm]	Arunachalam [cm] / [%]	Coleman [cm] / [%]	Shen [cm] / [%]	Arunachalam (1948) [cm] / [%]	Richardson [cm] / [%]	HEC-18 [cm] / [%]
A	16.8	24.6 / 68	29.9 / 56	18.3 / 92	24.0 / 70	22.7 / 74	25.0 / 67
B	17.0	29.3 / 58	40.9 / 42	16.5 / 103	27.2 / 63	25.0 / 68	27.5 / 62
C	10.3	33.4 / 31	49.6 / 21	15.6 / 66	30.3 / 34	24.1 / 43	26.5 / 39
D	18.2	33.4 / 54	50.2 / 36	15.8 / 115	30.5 / 60	24.7 / 74	27.2 / 67
E	12.3	24.6 / 50	29.7 / 41	18.0 / 68	23.8 / 52	22.4 / 55	24.7 / 50
F	10.7	29.3 / 36	39.7 / 27	16.4 / 65	27.1 / 39	23.4 / 46	25.7 / 42
G	10.6	33.4 / 32	50.1 / 21	15.8 / 67	30.4 / 35	24.6 / 43	27.1 / 39
H	10.1	-	-	-	-	-	39.0 / 26
I	14.3	-	-	-	-	-	41.3 / 35
J	18.0	-	-	-	-	-	42.9 / 42

Se observa que en la mayoría de los casos la relación entre la erosión máxima medida y la obtenida por las distintas formulas de cálculo se encuentra contenida entre el 30% y el 70%. La expresión de Shen subestimó, en algunas experiencias, los valores medidos.

Los resultados guardan coherencia con los estudios de Bermúdez (2011), donde para una pila aislada de sección cuadrada de 20 cm de lado, un tirante de 20 cm y una duración total de ensayo de 470 horas, obtuvo a las 8 horas de ensayo un 57% de la erosión máxima. Esta comparación es posible pues, para los valores utilizados, la variación del tirante no muestra mayor efecto sobre los valores máximos de la erosión para geometrías alineadas.

En las Figuras 5 y 6 se comparan las máximas erosiones en cada pila y los depósitos máximos para las distintas configuraciones geométricas en función de la relación h/b (tirante/ancho de la pila).

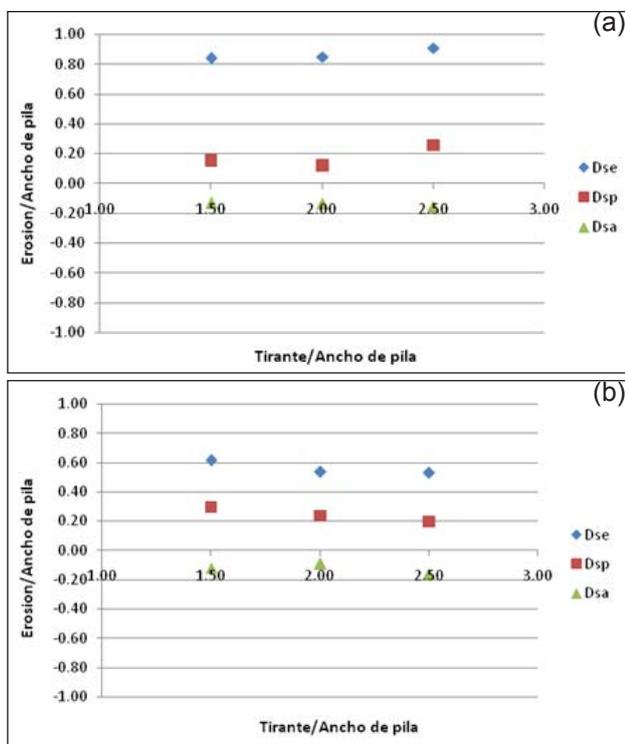


Figura 5. Variación de la erosión con el tirante para pilas alineadas. Separación de 30 cm (a) y 50 cm (b)

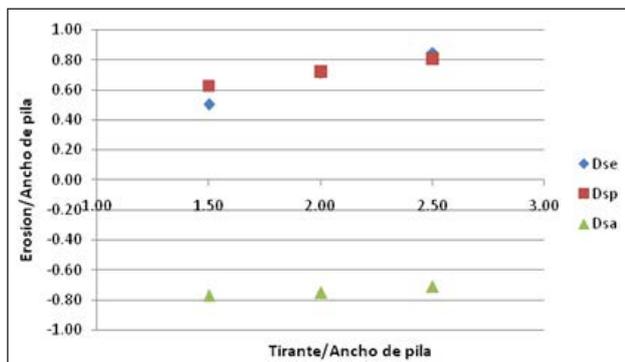


Figura 6. Variación de la erosión con el tirante para la configuración al tresbolillo

Se puede observar que en todos los casos donde las estructuras presentan alineación, existe independencia de los efectos de los procesos erosivos respecto del tirante. Dicha información concuerda con las predicciones, salvo para la formulación de Coleman. La misma describe un crecimiento casi lineal de la erosión máxima con el tirante y conduce además a una predicción algo excesiva.

Se observa que en la configuración alineada, al disminuir la separación entre pilas aumenta la erosión máxima. Para ambas separaciones de pilas, la erosión sobre la pila de aguas abajo y la altura máxima de los depósitos aguas abajo de la interferencia tienen valores de máxima similares.

En el caso de geometría en tresbolillo se observó que los valores de dse y dsp obtenidos en un mismo ensayo son comparables entre sí. En virtud de lo expresado, se estaría sobreestimando fuertemente el efecto erosivo al utilizar la propuesta del HEC-18 si se considera como estructura equivalente la proyección de las pilas sobre la sección. Estas conclusiones son válidas para los resultados de las experiencias, pudiendo estar obviándose efectos de conjunto no desarrollados al momento de finalizar estos ensayos.

Como se mencionó, se estudió también la evolución temporal de la erosión en un punto característico. Para que los datos sean comparables, se escalaron con el valor de máxima socavación medido para cada ensayo (obtenidos de la tabla 3). En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran los resultados agrupados por configuración geométrica.

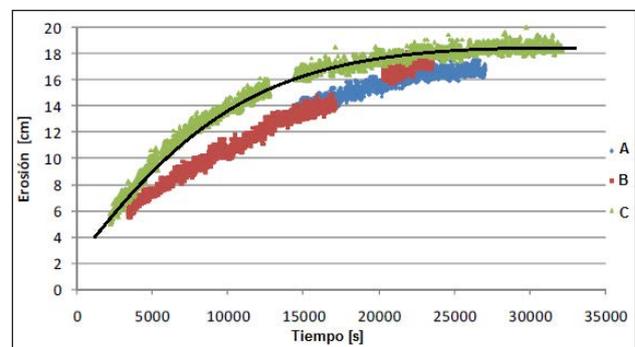


Figura 7. Evolución temporal de la erosión. Pilas alineadas separadas 30 cm.

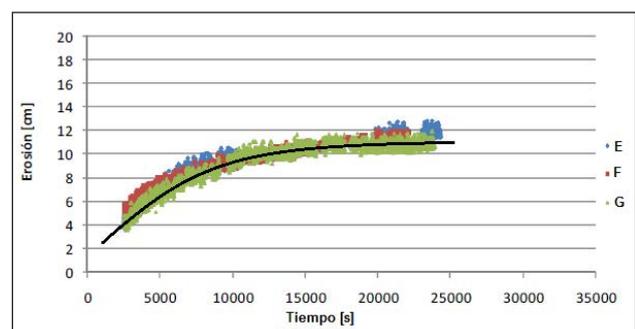


Figura 8. Evolución temporal de la erosión. Pilas alineadas separadas 50 cm.

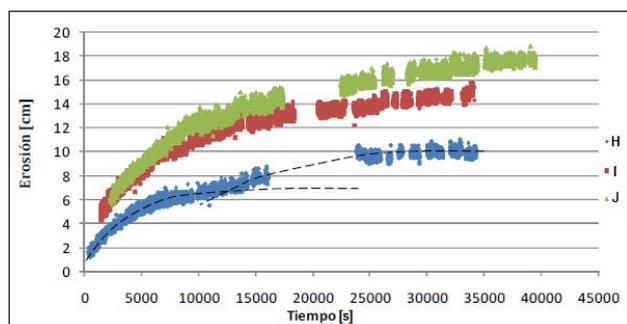


Figura 9. Evolución temporal de la erosión. Pilas al tresbolillo separadas 30 cm.

Los puntos medidos correspondientes a la erosión en función del tiempo en los ensayos con geometrías alineadas y separaciones entre elementos de 30 y 50 centímetros (Figuras 7 y 8) se pueden ajustar mediante una curva exponencial. Aun así, la velocidad en la que se producen estas profundizaciones es diferente entre las dos geometrías, siendo más rápida en el primer caso.

Al estudiar la configuración al tresbolillo se observa, en particular para el tirante de 30 cm, un cambio en la dinámica del proceso erosivo que se manifiesta como un punto de inflexión en la curva de evolución temporal (a los 10.000 segundos aproximadamente). Este resultado es importante porque muestra en qué momento la erosión es influenciada por el efecto de conjunto. El primer tramo en la curva se asocia con el desarrollo de la erosión en correspondencia con la pila de aguas arriba que está próxima al punto de medición. El cambio de curvatura puede relacionarse a un cambio del patrón erosivo debido ya a la erosión del conjunto de los elementos que conforman el grupo de pilas. Para esta serie es notoria la dependencia de los resultados respecto del tirante. Puede observarse que el primer tramo de la curva punteada de la figura 9 es similar a la dibujada en la figura 8, mientras que el segundo tramo tiene un desarrollo similar a la línea negra observada en la figura 7. Ello

lleva a considerar que para el caso alineado, en la serie con separación de 30 cm se están observando efectos de conjunto desde un comienzo del ensayo, mientras que para la serie de mayor separación dichos efectos no se han observado en el tiempo ensayado.

Se dispuso de la evolución temporal de la socavación en el mismo punto para los ensayos presentados y para los de Bermudez (2011), donde se registraron las profundidades en el tiempo para una pila cuadrada. La comparación de resultados es válida ya que el mayor porcentaje de erosión suele alcanzarse en las primeras horas del ensayo, convergiendo el resultado de forma asintótica a un valor final a través del tiempo. En sus experiencias, Bermudez considera que se ha llegado al valor final de la erosión. Se busca comparar el comportamiento de la evolución temporal de la erosión y determinar posibles comportamientos asociados al efecto de grupo. La suma de la duración total de los ensayos en horas fue similar para las dos investigaciones, realizando Bermudez 3 ensayos de larga duración contra los 10 ensayos de corta duración de la presente investigación.

En la Figura 10 se muestran las mediciones de evolución temporal del lecho para las geometrías alineadas junto con las mediciones del ensayo de Bermúdez y los valores obtenidos de la ecuación de Melville (1999) considerando como valor último de equilibrio aquel obtenido por Bermúdez al finalizar su ensayo. Para ajustar la ecuación de Melville es necesario calcular el tiempo teórico necesario para alcanzar el equilibrio, que según las expresiones del citado autor, para las condiciones de la experiencia de Bermúdez es de 330 horas, mientras que el ensayo tuvo una duración de 470 horas. Por ello se consideró razonable adoptar el valor último del ensayo como el de equilibrio. Se encontró que la curva de Melville es una envolvente de los resultados de Bermúdez, con una pendiente similar a la de los resultados de la pila unitaria, desde aproximadamente los 500 minutos de ensayo.

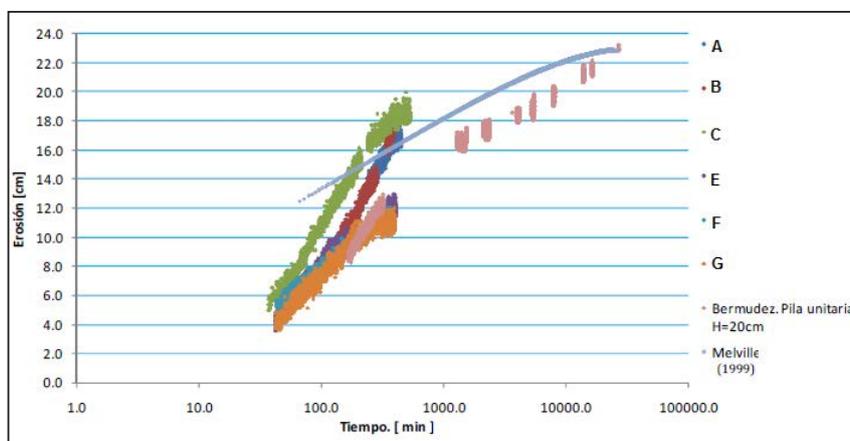


Figura 10. Comparación de la evolución temporal de la erosión para distintas experiencias.

Las mediciones pueden considerarse Tomando los primeros tramos de estas las pendientes de las curvas de la evolución temporal de la erosión son mayores para las experiencias con separación de 30 cm entre pilas. Ello se corresponde con una tasa de socavación más rápida, consecuencia de la superposición de la erosión propia de la pila de aguas arriba y la formación de la fosa en torno al conjunto de elementos.

Para la separación de 50 cm el efecto del conjunto es menor, alineándose las mediciones con los resultados del ensayo de larga duración para una pila aislada. Esto pone de manifiesto que, al menos en las primeras horas de ensayo, el efecto del conjunto no es significativo como para aumentar notoriamente la socavación local máxima en la pila frontal.

En todos los ensayos realizados con las pilas alineadas, se observó una alta simetría en la batimetría obtenida. Esto implica que el flujo de aproximación en el canal de ensayo fue prácticamente simétrico, por lo que puede decirse que es factible en estos casos adoptar la condición de simetría para la medición del campo de velocidades. En la serie con separación de 50 cm se observó que en el frente de la pila de aguas arriba el patrón de la fosa de erosión es semejante a la serie alineada con separación de 30 cm, con los valores máximos en cercanías de los vértices frontales. Sin embargo la fosa que se forma en torno a la pila de aguas arriba tiene un comportamiento relativamente independiente de aquella que se desarrolla en la pila de aguas abajo, existiendo una zona de depósitos intermedia. Por lo tanto, la forma de la fosa de erosión en cercanías de la pila de aguas arriba presenta una mayor similitud con aquella que se tiene en una pila aislada. Para los ensayos con separación de elementos de 30 cm se apreció que el desarrollo en planta de la fosa de erosión de aguas arriba es tal que alcanza a la pilas de aguas abajo, es decir que tiende a no formar depósitos con cota superior al lecho original, entre pilas. La ubicación del punto de máxima erosión de la pila de aguas abajo se encuentra siempre sobre la cara frontal al escurrimiento y no en los vértices como ocurre en la de aguas arriba.

Para el caso de geometría al tresbolillo, los depósitos entre pilas son prácticamente nulos. La fosa de erosión en torno a la pila de aguas abajo se desarrolla en forma aproximadamente simétrica respecto de ésta, mientras que los depósitos aguas abajo del conjunto se ubican sobre el eje del canal, con una ligera desviación hacia la margen derecha. Se observó que las fosas de erosión asociadas a cada pila están en mutua interacción, induciendo un notorio efecto de conjunto. Se confirma así la existencia de una fosa única, según se aprecia en la Figura 11 donde se muestra un perfil realizado a 10 cm del eje del canal sobre margen izquierda en coincidencia con el eje de la pila de aguas abajo. Las dos fosas están en proceso de unión e interferencia.

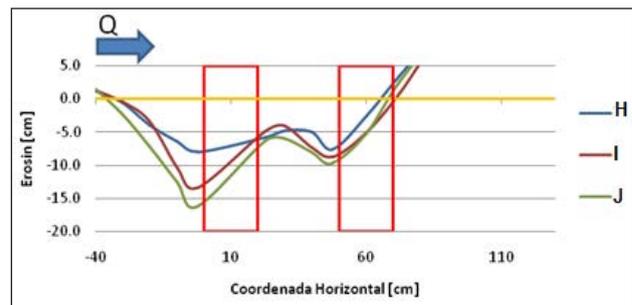


Figura 11. Perfil de la batimetría, pasante por el eje de la pila de aguas abajo.

Al estudiar el campo de velocidades del flujo, se encontró que la principal diferencia entre las series de ensayos con distintas separaciones entre elementos alineados, reside en la ubicación del flujo ascendente entre pilas. Para distancias mayores entre elementos se observa que al aumentar el tirante, el flujo ascendente se desplaza hacia las cercanías de la pila trasera. Para la geometría en tresbolillo, en la pila de aguas abajo se observaron velocidades ascendentes sobre la cara de margen derecha y velocidades descendentes sobre la cara de margen izquierda. Las mayores velocidades en el plano horizontal están en correspondencia con la cara de margen izquierda, siendo estos efectos más notorios para los ensayos con tirantes mayores.

CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos para estudiar la erosión local en grupos de pilas cuadradas, y se compararon las mediciones con ecuaciones de predicción de la profundidad máxima desarrolladas por diversos autores. De la selección efectuada, sólo las formulaciones de Richardson y del HEC-18 tienen en cuenta la geometría de sección cuadrada. Con esas dos formulas, los valores predichos estuvieron dentro del orden de magnitud esperable para los grupos alineados. La estimación con la fórmula del HEC-18 para la geometría al tresbolillo fue claramente mayor a los valores registrados, ya que el cálculo se basa en el ancho equivalente. Esto implica que no se considera la influencia del flujo entre pilas, con lo cual se está ante una estimación por exceso de las erosiones máximas. Para subsanar esto, se podría reducir el ancho equivalente utilizado. Los resultados arrojan valores de reducción del orden de un 30 a 40%, pero son totalmente estimativos, debiéndose abordar mayores estudios al respecto.

Para las geometrías con pilas alineadas a la corriente, no se apreciaron efectos significativos del tirante en las máximas socavaciones. Si se observó dependencia de la erosión máxima respecto de la separación entre pilas. Para la configuración en tresbolillo, se constató dependencia del fenómeno erosivo respecto del tirante.

Los ensayos realizados fueron del orden de las 8 horas. El tiempo adoptado se correspondió con las

limitaciones prácticas del dispositivo experimental y del tiempo para la realización del trabajo de tesis de grado, en que esta investigación se enmarca. De la comparación con ensayos de larga duración, del orden de las 400 horas, se desprende que la erosión máxima medida para los tiempos de ensayo del presente estudio estaría en el orden del 60% de la erosión máxima esperada.

Se encontró que para una separación entre pilas de 30 cm existen efectos de conjunto que se manifiestan desde los primeros minutos de las experiencias, no observándose dicha influencia cuando la separación es de 50 cm, al menos durante el tiempo de ensayo. Esto puede deberse a una interacción más temprana de las fosas de erosión si la separación entre pilas es menor. Para la geometría al tresbolillo, el efecto de interacción entre ambas fosas de erosión se observa en el quiebre que presenta aproximadamente a las 4 hs de iniciado el ensayo en la curva de evolución temporal de erosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bermúdez Badía, M. (2011) "Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas. Influencias de la anchura de la pila". 711-*TES-CA-5294*. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991) "Scouring". IAHR Hydraulic Design Manual 2, Balkema Rotterdam, The Netherlands.

Coleman, S.E., (2005) "Clearwater Local Scour at Complex Piers". *Journal of Hydraulic Engineering* 131(4):330-334

Istiarto, I. (2001). "Flow around a cylinder in a scoured channel bed". École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.

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.

Melville, Bruce W.; Chiew, Yee-Meng. "Time Scale for Local Scour At Bridge Piers". *Journal Of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1999, January.

Melville, B. W. and Coleman, S.E, (2000) "Bridge Scour". Water Resources publications LLC, Colorado, U.S.A.

Quiping, Yang.(2005) "Numerical investigation of scale effects on local scour around a bridge pier". The Florida State University. FAMU-FSU College of Engineering.

Raudkivi, A.J. (1985). "Estudio de sedimentos finos y cohesivos". Curso latinoamericano de mecánica fluvial. Laboratorio de Hidráulica Aplicada – INCYTH. Buenos Aires, Argentina.

Serra, J.M.; Spalletti, P. y Brea, J.D. (2011) "Estudio de Erosión Local en Pilas Cuadradas". Quinto Simposio Regional de Hidráulica de Ríos, Santiago del Estero, Argentina, Noviembre 2011.

Van Rijn, Leo C. (1993) "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas", Amsterdam: Aqua publications.

Agradecimiento.

A mis tutores, Agnes Paterson y Pablo Spalletti, que me brindaron su apoyo, su guía y su tiempo de forma totalmente desinteresada. Al personal del Instituto Nacional del Agua y su buena voluntad. A Martín Irigoyen que me brindó su ayuda y una grata compañía, y a mi novia que me acompañó y estuvo a mi lado durante todos estos años.