

EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTE COMPLEJAS

Pablo Spalletti y José Daniel Brea

Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina
E-mail: pspallet@ina.gov.ar - dbrea@ina.gov.ar

RESUMEN

Con el objeto de estimar la erosión local en las pilas del puente Goya-Reconquista proyectado sobre el río Paraná, las que están conformadas por grupos numerosos de pilotes, se llevaron a cabo una serie de ensayos en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, en un canal de 30 metros de largo, 2 de ancho y 1 de profundidad, con carbón mineral como material en el lecho móvil. Debido a la escasez de información relativa a la erosión en pilas compuestas por múltiples elementos, especialmente cuando están construidas o proyectadas en grandes ríos, los resultados obtenidos para grupos de entre 9 y 46 pilotes no sólo son importantes para evaluar la forma de las fosas de erosión y las socavaciones máximas para las condiciones geométricas e hidráulicas estudiadas, sino que son únicos en el análisis de este tipo de problemas.

ABSTRACT

Experiments to study the local erosion at the pile groups projected for the Goya-Reconquista bridge in the Paraná river, were carried out in the Hydraulics Laboratory of the National Institute of Water, in a 30 meters long, 2 meters wide and 1 meter height flume, with coal as movable bed material. Due to the absence of information about scour at piers composed by multiple piles, especially when they are constructed or projected in very large rivers, the obtained results for groups ranging from 9 to 46 piles are not only important to evaluate the shapes of the scour holes and the maximum scour depth for the studied geometrical and hydraulic conditions, but also unique in the analysis of this kind of problems.

INTRODUCCIÓN

La construcción de pilas de puentes mediante grupos múltiples de pilotes, es una técnica usual en obras sobre grandes ríos. Los procesos erosivos en este tipo de estructuras son complejos y por ello difíciles de predecir, lo que se suma a la escasez de estudios relativos a esta problemática. Por ello, son usualmente necesarios modelos físicos para estudiar estos fenómenos.

El objetivo de este trabajo es, a través de los estudios llevados a cabo en modelos físicos a fondo móvil en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, caracterizar los procesos erosivos en los grupos de pilotes proyectados en el puente Goya-Reconquista, y explicar algunos de los aspectos característicos y propios de estos procesos.

Se analiza también el contraste entre la máxima socavación obtenida de las experiencias y las fórmulas de predicción de la máxima erosión local en grupos de pilotes, usualmente usadas.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en un canal de 30 metros de largo, 2 metros de ancho y 1 metro de altura, que cuenta con una capacidad de bombeo del orden de los 500 litros por segundo. En él, se definió un segmento de 5 metros de longitud, 2 metros de ancho y 50 centímetros de espesor con material granular, para constituir el fondo móvil, donde se fueron colocando las

estructuras a ensayar. Aguas arriba y abajo del segmento de canal a fondo móvil, el modelo se completa con fondos fijos constituidos por carpetas de cemento cuyas cotas coinciden con la inicial del lecho de carbón. En el extremo de aguas abajo se tiene una compuerta rebatible que abarca la totalidad del ancho del canal, con la que se definen los niveles de restitución y los tirantes en el modelo.

El sedimento del fondo del río Paraná es arena y aún distorsionando la escala de densidades, el material en el modelo sería tan fino que no se comportaría como granular. Por ello la necesidad de utilizar en el modelo, materiales de mayor tamaño a los dados por la condición de similitud, estaría afectando la semejanza del transporte de sedimentos y en consecuencia los procesos de erosión general y por contracción en un puente.

Sin embargo numerosas investigaciones han demostrado que los procesos de erosión local tienden a ser independientes del tamaño del material, cuando la velocidad de la corriente supera el valor crítico de inicio de movimiento ($U/U_c > 1$), es decir cuando se está en presencia de lecho vivo. Esto justifica la utilización de modelos que cumplan con la condición antes citada, para el estudio de erosiones locales (Melville, 1984).

Para cumplir con el criterio anterior, se utilizó como material granular, carbón mineral de peso específico $\gamma_s = 1430 \text{ kg/m}^3$, con un d_{50} algo inferior a $200 \mu\text{m}$. En la Figura 1 se muestra la colocación de una de las estructuras a ensayar y la preparación del fondo móvil.



Figura1.- Montaje de estructura y preparación del fondo móvil.

Se estudiaron para un ángulo de incidencia de la corriente de 0° , diez configuraciones geométricas de pilas conformadas por 46, 35, 32, 30, 28, 24, 22, 20, 18 y 9 elementos. Los grupos de 24 y 46 pilotes se evaluaron también para ángulos de ataque de 10° , 20° y 30° .

La Figura 2 muestra los esquemas geométricos correspondientes a cada una de las experiencias realizadas, indicándose también el número de ensayo, el número de pilas, el ángulo de ataque de la corriente (cuando fue distinto a 0°) y la escala utilizada.

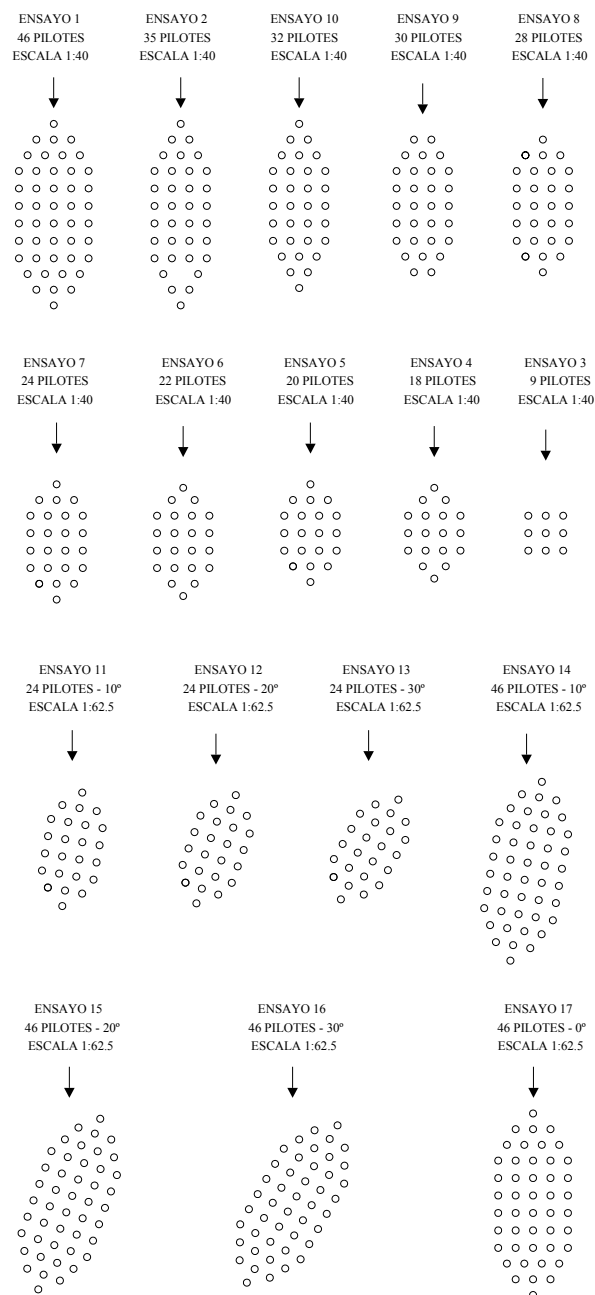


Figura 2.- Esquema geométrico de los grupos de pilotes ensayados.

Para tener en cuenta el posible efecto de las paredes del canal en el valor de la máxima socavación, se realizó el ensayo correspondiente al grupo de 46 pilotes y ángulo de ataque de 0°, con escalas de longitudes 1:40 y 1:62,5 (Ensayos 1 y 17). En las experiencias para los grupos de pilas con ángulos de incidencia distintos de 0°, se adoptó una escala de longitudes de 1:62,5.

De acuerdo al Proyecto de las obras a ensayar, cada pilote tiene un diámetro de 2 metros, siendo en general la distancia entre ejes de elementos de 2,5 veces el diámetro. Respecto de las condiciones hidráulicas se asumió una profundidad media en el río de 20 metros. De esta

forma, y para las escalas de longitudes utilizadas, los elementos en el modelo tuvieron un diámetro de 0,05 ó 0,032 metros y los tirantes al inicio de los ensayos fueron de 0,5 ó 0,32 metros.

Para el sedimento utilizado como lecho móvil en el modelo, la velocidad crítica de inicio de movimiento se encuentra entre 0,17 y 0,18 m/s para las dos escalas de trabajo, habiéndose trabajado con velocidades medias de la corriente entre 0,18 y 0,364 m/s.

Durante las experiencias se registraron velocidades mediante un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) en puntos particulares del modelo, con el objeto de caracterizar el flujo en torno a la estructura.

La duración de los ensayos fue del orden de las 7 horas y una vez finalizados se relevó el fondo, caracterizándose en detalle la fosa de erosión y la máxima socavación.

EROSIÓN LOCAL

En la Tabla 1 se resumen las condiciones hidráulicas utilizadas para cada ensayo junto con la máxima erosión local normalizada por el diámetro de un pilote individual (S/D).

De acuerdo a lo observado en los ensayos, la erosión general en todos los casos fue del orden de los 15 centímetros cuando se trabajó con escala 1:40 y de 10,5 centímetros con la escala de longitudes de 62,5. En la Tabla 1 la erosión general antes indicada fue restada a la erosión máxima para la determinación de la máxima erosión local.

Tabla 1.- Condiciones hidráulicas de los ensayos y relación S/D registrada.

Ensayo	Número de pilotes	Ángulo de ataque (°)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	S/D
3	9	0	0.5	0.364	3.020
4	18	0	0.5	0.364	3.840
5	20	0	0.5	0.364	3.920
6	22	0	0.5	0.364	3.680
7	24	0	0.5	0.364	4.380
11	24	10	0.32	0.291	4.750
12	24	20	0.32	0.291	4.969
13	24	30	0.32	0.291	5.469
8	28	0	0.5	0.364	4.420
9	30	0	0.5	0.364	5.160
10	32	0	0.5	0.364	4.500
2	35	0	0.5	0.364	4.680
1	46	0	0.5	0.364	6.640
17a	46	0	0.32	0.18	4.781
17	46	0	0.32	0.291	6.875
14	46	10	0.32	0.291	8.500
15	46	20	0.32	0.291	7.000
16	46	30	0.32	0.291	6.938

Para materiales uniformes del lecho en los que pueden desarrollarse rizos, trabajando con el mismo tirante y con una pila cilíndrica aislada, Melville (1984) mostró que si $U/U_c > 2$ la máxima profundidad de erosión local es mayor que la correspondiente a la de la condición crítica ($U/U_c=1$).

En las experiencias con 46 pilotes, ángulo de ataque de la corriente de 0° y tirante de 0.32 metros, donde en el lecho se desarrollan rizos de 2 o 3 centímetros de altura, la socavación máxima fue 1.4 veces mayor para $U > U_c$ que para la condición de inicio de movimiento.

El efecto del ángulo de la corriente se muestra en la Figura 3, tanto en las experiencias con 24 pilotes como en las de 46, donde se presentan las relaciones entre la máximas erosiones locales normalizadas con el diámetro de los pilotes individuales para cada ángulo de ataque y para las pilas alineadas a la corriente (S/D vs $S/D_{0\text{ grados}}$).

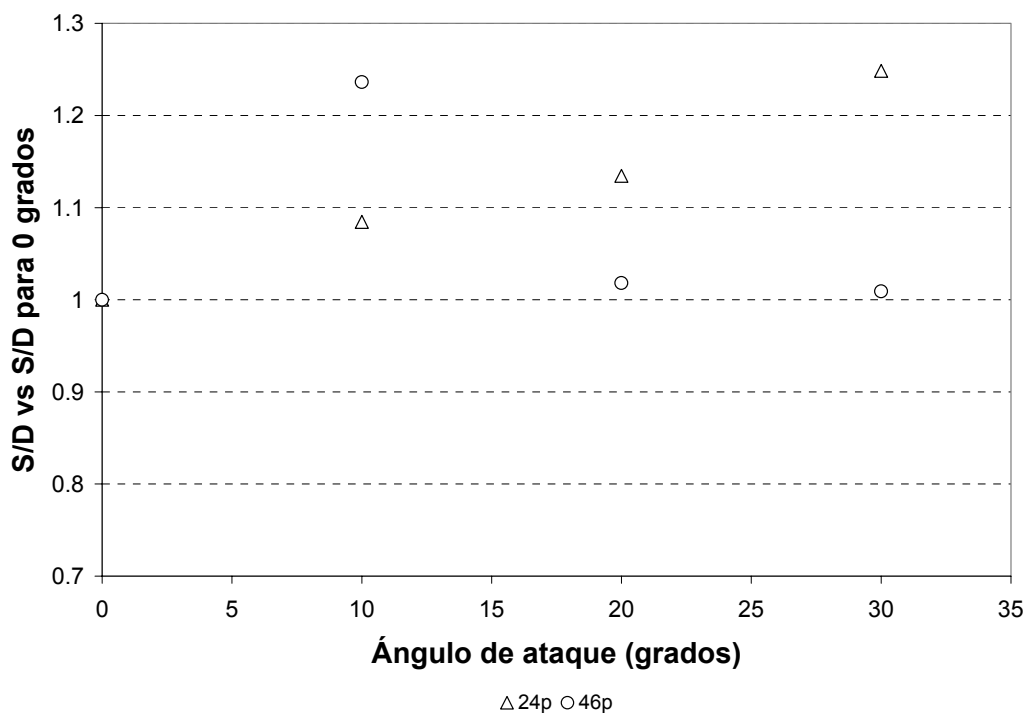


Figura 3.- Efecto del ángulo de ataque.

En la Figure 3 se aprecian diferentes tendencias para ambos grupos, lo que puede deberse a los cambios en los patrones de escurrimiento inducidos por las distribuciones complejas de elementos a medida que el ángulo de incidencia varía, generando importantes cambios en las corrientes dentro y alrededor de los grupos de pilotes y por ello la forma en que se desarrollan los procesos erosivos.

Usualmente para la estimación de la erosión local en pilas compuestas por numerosos elementos se utilizan las expresiones presentadas en la Circular HEC-18 (Richardson & Davis 2001). Para el presente caso en que el cabezal de la pila se encuentra por encima del máximo nivel de agua, la ecuación para estimar la erosión local en grupos de pilotes, es una versión modificada de la ecuación para una pila aislada, que tiene en cuenta el espaciamiento entre elementos, el número de filas y la proyección del área de los pilotes en un plano normal a la dirección de escurrimiento.

Esta ecuación es:

$$\frac{S}{h} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{D^*}{h} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (1)$$

donde S = erosión local; h = tirante aguas arriba de la pila; K_1 = factor de forma; K_2 = factor de ángulo de incidencia de la corriente; K_3 = factor de condición del lecho; K_4 = factor de corrección por acorazamiento; Fr = número de Froude; y D^* = ancho efectivo de una pila equivalente que es igual a:

$$D^* = D_{proj} K_{ps} K_m \quad (2)$$

donde D_{proj} = suma de anchos de pilotes no superpuestos; K_{ps} = coeficiente de espaciamento entre elementos; K_m = coeficiente de número de filas de pilotes alineadas, m ($K_m = 1$ para grupos de pilotes inclinados respecto a la corriente o con distribuciones de elementos alternadas).

Otros procedimientos o variaciones del método de estimación antes indicado pueden encontrarse por ejemplo en Salim & Jones (1996), Coleman (2005) y Ataie-Ashtiani & Beheshti (2006).

La Figura 4 muestra la comparación entre erosiones locales máximas observadas en los ensayos y las estimadas con la metodología del HEC-18.

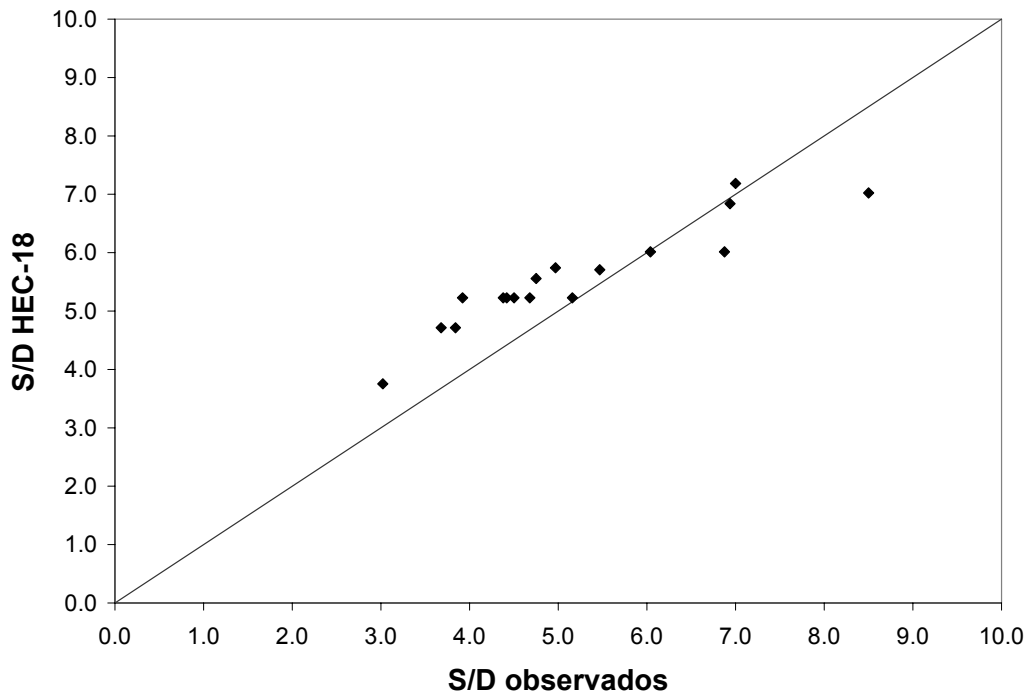


Figura 4.- Máximas erosiones locales medidas y calculadas con metodología del HEC-18.

Se aprecia una gran concordancia entre valores observados y calculados, pero con una subestimación para los valores más grandes que se corresponden con las erosiones en los

grupos más numerosos. Como esta metodología es usualmente utilizada en el diseño de estructuras, las subestimaciones deben ser evitadas.

El método de diseño presentado en el HEC-18 por Richardson & Davis (2001) para grupos de pilotes, considera K_m igual a 1 para el caso general de conjuntos de elementos sesgados o con distribuciones alternadas, pues asume que en la técnica de proyección propuesta para caracterizar el ancho de la pila equivalente está contemplado el número de filas.

Debido al déficit observado en los valores estimados para los grupos más complejos, es decir para los más numerosos y con diferentes ángulos de incidencia de la corriente, se llevó a cabo un análisis considerando el efecto del coeficiente asociado al número de filas alineadas. Los resultados se presentan en la Figura 5 pudiéndose apreciar que para ningún caso se observan subestimaciones.

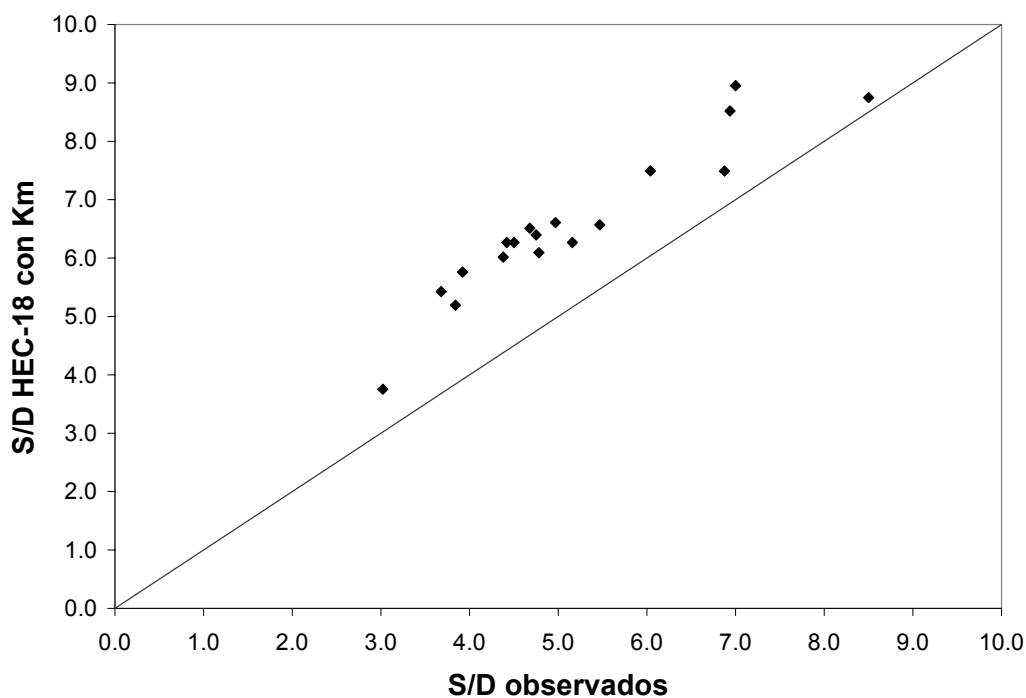


Figura 5.- Máximas erosiones locales medidas y calculadas con metodología del HEC-18 corregida.

Más allá de la capacidad de predicción de las formulaciones, que en general están basadas en datos experimentales, cuando los grupos son muy numerosos y con distribuciones complejas de elementos, pequeños cambios en las condiciones hidráulicas (como puede ser el ángulo de ataque), que en las metodologías de cálculo no tienen gran relevancia, en la realidad pueden afectar en forma notoria el campo de flujo alrededor y entre los elementos que conforman la pila y como consecuencia de ello la manera en que se desarrollan los procesos erosivos.

Esto puede apreciarse en los resultados de las experiencias, si se analizan los sitios donde se observan las máximas erosiones locales o los patrones de las fosas de erosión. La Tabla 2 muestra, para cada ensayo, la posición relativa de la máxima socavación local respecto del grupo de pilotes, donde se puede apreciar que para los grupos con menos elementos (hasta 32) alineados con la corriente, las máximas profundidades de erosión se ubican en la zona interior de los grupos excepto para el caso de 30 pilotes, el cual es el único caso en que en la fila

frontal hay dos elementos en lugar de uno (Figura 2). Esto pone de manifiesto que pequeñas diferencias en las condiciones geométricas pueden inducir cambios significativos en el patrón de escurrimiento y en la fosa de erosión local.

Table 2.- Positions of maximum scour depth at pile groups.

Número de pilotes	Diámetro D (m)	Ángulo de ataque (°)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Posición de la máxima erosión en la fosa
9	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
18	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
20	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
22	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
24	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
24	0.032	10	0.32	0.291	Dentro del grupo
24	0.032	20	0.32	0.291	Dentro del grupo
24	0.032	30	0.32	0.291	Fuera del grupo
28	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
30	0.05	0	0.5	0.364	Fuera del grupo
32	0.05	0	0.5	0.364	Dentro del grupo
35	0.05	0	0.5	0.364	Fuera del grupo
46	0.05	0	0.5	0.364	Fuera del grupo
46	0.032	0	0.32	0.18	Dentro del grupo
46	0.032	0	0.32	0.291	Fuera del grupo
46	0.032	10	0.32	0.291	Fuera del grupo
46	0.032	20	0.32	0.291	Fuera del grupo
46	0.032	30	0.32	0.291	Dentro del grupo

Como ejemplo de la influencia del ángulo de ataque en las procesos que se desarrollan en torno a las pilas conformadas por grupos de pilotes, en las Figuras 6 a 9 se presentan las configuraciones del lecho tras las experiencias con 46 pilotes, bajo las mismas condiciones hidráulicas, sesgadas 0°, 10°, 20° y 30° respecto a la dirección del escurrimiento, indicándose en cada caso el punto donde se tiene la socavación máxima dentro de la fosa de erosión local.

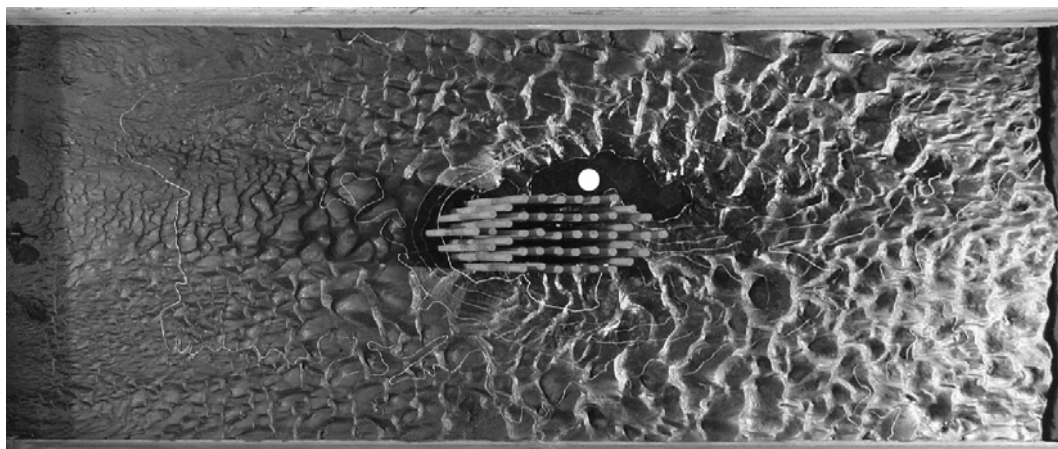


Figura 6.- Planta del modelo con la indicación del punto de mayor profundidad en blanco. 46 pilotes; tirante = 0.32 m; $U = 0.291$ m/s; ángulo = 0°.

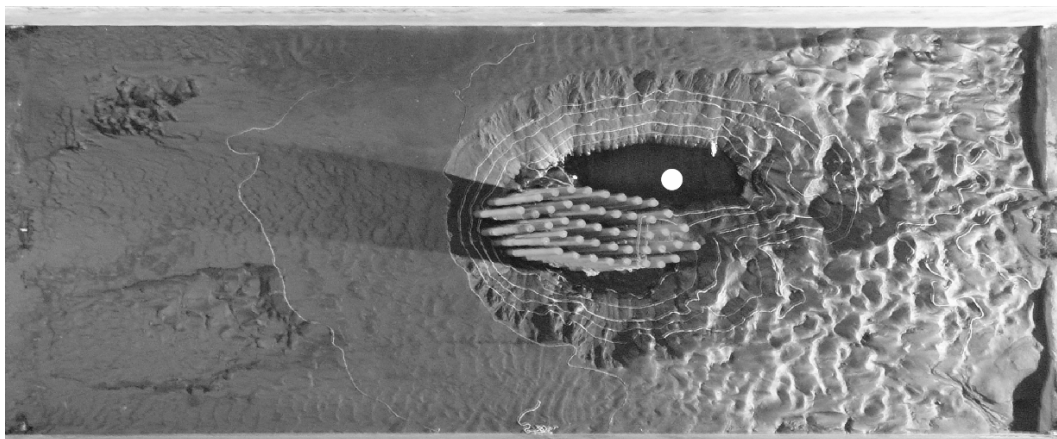


Figura 7.- Planta del modelo con la indicación del punto de mayor profundidad en blanco. 46 pilotes; tirante = 0.32 m; $U = 0.291$ m/s; ángulo = 10° .



Figura 8.- Planta del modelo con la indicación del punto de mayor profundidad en blanco. 46 pilotes; tirante = 0.32 m; $U = 0.291$ m/s; ángulo = 20° .



Figura 9.- Planta del modelo con la indicación del punto de mayor profundidad en blanco. 46 pilotes; tirante = 0.32 m; $U = 0.291$ m/s; ángulo = 30° .

CONCLUSIONES

Debido a la complejidad de los fenómenos erosivos en grupos numerosos de pilotes el uso de modelos físicos es fundamental no sólo para estimar los valores máximos de erosión local, sino que también para caracterizar los escurrimientos y la forma en que se desarrollan las

fosas de socavación. Es por ello que se realizó un estudio de este tipo para estimar los procesos en los grupos de pilas proyectados para la conexión física Goya-Reconquista.

Se realizó una comparación de los valores de erosión local observados en el modelo y los calculados mediante la fórmula de cálculo del HEC-18 usada en general para su estimación, planteándose una alternativa de corrección de la metodología original considerando el factor K_m que tiene en cuenta el número de filas que componen el grupo, aún en el caso de configuraciones con elementos alternados o inclinados respecto a la dirección de la corriente, con el objeto de evitar subestimaciones de las socavaciones locales máximas.

De los resultados de los ensayos presentados, surge la gran sensibilidad de los procesos observados frente a cambios en las condiciones hidráulicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ataie-Ashtiani, B. & Beheshti A.A. 2006. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups, *Journal of hydraulic engineering – ASCE*, October 2006: 1100-1104.

Coleman, S.E. 2005. Clearwater local scour at complex piers, *Journal of hydraulic engineering – ASCE*, April 2005: 330-334.

Melville, B.W. (1984). Live-bed scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 9, September 1984: 1234-1247.

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.

Salim, M. & Jones S. 1996. Scour around exposed pile foundations, *North American water and environment Congress '96 – ASCE*, June 1996, Anaheim, USA.