

Experimental study about scour protection at circular piers

**Alix T. Moncada M., Julián Aguirre Pe, Juan C. Bolívar P.
and Edgar J. Flores N.**

*Laboratorio de Hidráulica, Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA), Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
alix@ula.ve, aguirrej@ula.ve*

Abstract

In this paper an experimental study of scour around a pier is carried out. The effect produced by a collar around a circular pier and by the perforation of a slot as devices for controlling the depth of scour was analyzed. Uniform sand with mean diameter of 1.4 mm and a circular pier of 7.3 cm diameter were used. Firstly, two collars of 14.6 and 21.9 cm diameter were employed. The collar was placed around the pier at different positions with regard to the bed level. Subsequently, a slot of 1.8 cm thickness and variable length was perforated at the pier. Finally, experiments were carried out to study the effect produced by the combination of a collar and a slot. It is found that when the collar is placed at the bed level the minimum depth of scour is produced. It is obtained that the scour depth is reduced when the diameter of the collar is increased. For the case of the slot, it is found that the most favorable location to decrease the local scour is obtained by placing the slot near the bed. On the other hand, it is obtained that when the length of the slot increases, the scour depth decreases. For the combination of collar and slot, the scour depth was reduced altogether.

Key words: Erosion, local scour, scour at bridge piers, scour holes, collar and slot as devices for scour protection.

Estudio experimental sobre protección contra la socavación en pilas circulares

Resumen

En este trabajo se hace un estudio experimental con el fin de analizar el efecto que tiene un aro alrededor de una pila circular y la perforación de una ranura como dispositivos para controlar la profundidad de socavación. Se usó arena uniforme con diámetro medio de 1.4 mm y una pila circular de 7.3 cm de diámetro. En primer lugar, se emplearon aros de 14.6 y 21.9 cm de diámetro. El aro se ubicó alrededor de la pila en diferentes posiciones respecto al nivel del fondo. Posteriormente, se perforó una ranura en la pila de 1.8 cm de espesor y longitud variable. Finalmente, se realizaron experimentos para estudiar el efecto que produce la combinación de aro y ranura. Se encontró que cuando el aro era colocado a nivel del fondo se producía la menor profundidad de socavación. Se obtuvo que la profundidad de socavación se reduce cuando el diámetro del aro se incrementa. Para el caso de la ranura, se encontró que la posición más favorable para disminuir la socavación local es colocándola cerca del fondo. Por otro lado, se obtuvo que al aumentar la longitud de la ranura, la profundidad de socavación disminuye. Para la combinación de aro y ranura, se logró reducir totalmente la profundidad de socavación.

Palabras clave: Erosión, socavación local, socavación en pilas de puentes, fosos de socavación, aro y ranura como dispositivos de protección contra la socavación.

Introducción

La formación de fosos de socavación alrededor de pilas de puentes es un problema casi inevitable en fondos de cauces aluviales. La socavación local en pilas se puede definir como una disminución local en la elevación del fondo alrededor de la pila, originada por la separación de la capa límite tridimensional en la pila, que erosiona el material del fondo por la estructura del flujo local, caracterizado por un alto nivel de turbulencia y vorticidad.

En este trabajo se examina el efecto de usar un aro alrededor de la pila y de la perforación de una ranura como dispositivos para controlar la profundidad de socavación. Se llevaron a cabo ensayos con aros de diferente diámetro, ubicados en diferentes posiciones. La ranura se ubicó cerca del fondo y cerca de la superficie con el fin de investigar los efectos de ambas disposiciones sobre la profundidad de socavación. Se realizaron algunos experimentos combinando la ranura y el aro. Se encuentra que el aro puede ser útil para proteger la pila contra la socavación, especialmente cuando la velocidad no perturbada del flujo es lo suficientemente pequeña para que no ocurra transporte de sedimento. De lo contrario, éste pierde su efectividad. En la práctica, una ranura puede causar problemas si hay escombros en el flujo, ya que éstos pueden bloquearla parcialmente, por lo tanto, reducen su eficiencia. Adicionalmente, el ancho y la longitud de la ranura se deben considerar en el diseño estructural de la pila, puesto que la concentración de esfuerzos causada por los efectos de vibraciones puede afectar la estructura.

Métodos Tradicionales de Protección contra la Socavación Local en Pilas

Hay dos propuestas básicas que proporcionan protección a la fundación de un puente y permiten resolver problemas de socavación local. La primera consiste en aumentar la capacidad del material del fondo para resistir la erosión. Esto se alcanza normalmente colocando una capa de protección de materiales granulares gruesos en la base de la pila. La segunda consiste en reducir la potencia de los agentes erosivos, es

decir, el flujo hacia abajo y el vórtice de herradura, que erosionan el material del fondo. Esto se logra generalmente colocando una placa prolongada, o collar, en la base alrededor de la pila y a nivel del fondo. También se puede perforar una ranura a través de la pila. Cuando una ranura se coloca cerca del fondo, el flujo próximo a la capa límite del fondo se acelera a través de la ranura como un chorro horizontal. Puesto que el flujo hacia abajo en la pila es perpendicular al chorro, éste desvía el flujo lejos del fondo, reduciendo su potencial de erosión. Una ranura cerca de la superficie permite que el agua en la superficie pase a través de la ranura, creando un efecto similar al de una profundidad de flujo menor.

Maza y Sánchez [1] proponen un método de protección contra la socavación local, basado no sólo en sus propios resultados, sino también, en la teoría sobre las condiciones críticas para la iniciación del movimiento y la resistencia hidráulica del lecho. Proponen un mecanismo de protección que consiste en sustituir las partículas del lecho por material de un diámetro mayor, el cual es más resistente a la erosión. Breusers *et al.* [2] recomendaron el uso de cantos rodados con una velocidad crítica de iniciación del movimiento de dos veces la velocidad de la crecida extrema alrededor de la pila. Hoy se colocan normalmente filtros debajo del material de piedras sueltas. Posey [3] encontró que las pilas de puentes en material erosionable se pueden proteger contra la socavación desde abajo por medio de un filtro invertido que se extiende una distancia de 1,5 a 2,5 diámetros de la pila en todas las direcciones desde el frente de la pila. Sin embargo, es difícil colocar los filtros con las especificaciones exactas en el caso de agua profunda. Posey [3] concluyó que los intersticios en una capa de protección deberían ser suficientemente pequeños para prevenir que el material más fino se escape desde abajo, pero suficientemente grandes para no permitir que el flujo de agua ascendente cree una fuerza de sustentación demasiado grande. El tamaño debería escogerse en función de la forma de la pila, porcentaje de contracción, y el número de Froude del flujo de aproximación.

Según Lauchlan y Melville [4], bajo condiciones de agua clara, la piedra picada en pilas de puentes está sujeta a esfuerzo cortante, zaran-

deo, y falla de borde. Bajo condiciones de fondo vivo, se hace importante un cuarto mecanismo de falla. Se trata de la desestabilización por avance de las formas de fondo cuando pasan la pila. Lauchlan y Melville [4] también investigaron los efectos de colocar la capa de piedra picada en lo profundo, dentro del fondo de sedimento, antes que a nivel del lecho. Encontraron que cuando el nivel de colocación era más profundo menor era la piedra picada expuesta por la desestabilización causada por las formas de fondo y se lograba mejor protección contra la socavación local. Lauchlan y Melville [4] afirman que la desestabilización de las capas de piedra picada que protegen las pilas de puentes por el avance de las formas de fondo que pasan la pila es el modo de falla dominante bajo condiciones de fondo vivo. Chiew [5] realizó experimentos con una pila cilíndrica de 32 mm de diámetro. El material del fondo era arena uniforme con tamaño de partícula de 0,33 mm. La profundidad del flujo era 180 mm. Estudió los efectos de un collar, una ranura, o una combinación de ambos sobre la socavación en pilas de puentes. Según Chiew [5], los experimentos mostraban que aquéllos eran muy efectivos y reducían la profundidad de socavación significativamente. Colocando una ranura con ancho igual a 1/4 del diámetro de la pila cerca de la superficie o del fondo, era posible reducir la socavación en agua clara hasta en un 20%. Una ranura con ancho igual a la mitad del diámetro de la pila colocada cerca de la superficie del agua podía reducir la profundidad de socavación en agua clara hasta en un 30%. El estudio de Chiew [5] mostró que cuando una ranura era colocada cerca del fondo en combinación con un aro, dicha combinación era capaz de eliminar la socavación totalmente. Kumar *et al.* [6] realizaron experimentos empleando una pila con una ranura que se prolongaba dentro del foso de socavación para diferentes valores del ángulo del flujo de aproximación con el eje de la ranura. Encontraron que la profundidad de socavación se incrementa con el ángulo de ataque. Kumar *et al.* [6] concluyen que una ranura es efectiva para reducir la socavación, particularmente si la ranura se prolonga dentro del lecho. Sin embargo, afirman que la ranura es ineficiente si el flujo de aproximación no está en la dirección de la ranura.

Instalación Experimental

El estudio experimental se desarrolló en un canal de 8,5 m de longitud, 0,50 m de ancho y 0,50 m de profundidad. Se usó arena uniforme con diámetro medio d_{50} de 1,4 mm como material de fondo. Se empleó una pila circular de 7,3 cm de diámetro. El material no cohesivo se enrasaba y se nivelaba hasta obtener una superficie uniforme. Se colocaba una alfombra para proteger el fondo del canal antes de lograr la profundidad del flujo deseada. Luego se abría la llave hasta alcanzar la profundidad del flujo, la cual era controlada por una compuerta de aguas abajo. Se esperaba un tiempo prudencial hasta que se estabilizara el flujo. Inmediatamente se removía la alfombra sin perturbar el fondo. Alcanzado el estado de equilibrio, se cerraba la llave y se esperaba hasta que escurriera totalmente el agua. Luego, se procedía a medir el foso de socavación aguas abajo y aguas arriba de la pila. Se llevaron a cabo 8 experimentos con la pila sin protección. El caudal se midió mediante un vertedero de pared delgada.

Para estudiar el efecto del aro sobre la profundidad de socavación Y_s , en primer lugar se colocó alrededor de la pila un aro de diámetro $W = 14,6$ cm. Se empezó colocando el aro a nivel del fondo, y luego se movió hasta alcanzar las posiciones de -6 cm y 9 cm por debajo y por arriba, respectivamente. Con este aro se realizaron 29 experimentos. Alcanzada la profundidad del flujo deseada se retiraba la alfombra. Se observaba que el fondo totalmente plano comenzaba a ser afectado por el fenómeno de socavación alrededor de la pila, como se muestra en la Figura 1. Finalizado el experimento, se dejaba escurrir el agua y, posteriormente, se medía el foso de socavación. En la Figura 2 se observa el foso que se produce alrededor de la pila para un experimento típico.

Este procedimiento se repitió empleando un nuevo aro de diámetro $W = 21,9$ cm, con el cual se realizaron 21 experimentos. En cada experimento se midió el perfil del fondo erosionado aguas arriba y aguas abajo de la pila. Esto permitió determinar la socavación máxima y estudiar la influencia del tamaño del aro y de su ubicación sobre el tamaño y la forma del foso de socavación.

Posteriormente, se estudió la posibilidad de perforar una ranura en la pila con la finalidad de examinar su efecto sobre la profundidad de socavación Y_s . Se usó la pila con las dimensiones indicadas, en la cual se perforó una ranura con ancho igual a $1/4$ del diámetro de la pila y largo variable, en segmentos de 2 cm, hasta alcanzar la profundidad del flujo Y_n . Los experimentos se realizaron con una profundidad Y_n constante de aproximadamente 14,44 cm. La longitud de la ranura se varió desde la superficie del agua y desde



Figura 1. Desarrollo del fenómeno de socavación local al pie de la pila.



Figura 2. Foso de socavación.

el fondo. En la Figura 3 se observa la pila con la ranura. Se llevaron a cabo 7 experimentos variando el largo de la ranura desde la superficie hacia el fondo y 6 experimentos desde el fondo hacia la superficie del agua. Alcanzado el estado de equilibrio se cerraba la llave y se dejaba escurrir el agua. Se obtiene un foso de socavación como se muestra en la Figura 4.

Finalmente, se realizó una combinación con el aro y la ranura para estudiar el efecto que dicha combinación produce sobre la profundidad



Figura 3. Pila con la ranura cerca del fondo.



Figura 4. Foso de socavación local.

de socavación. Para ello, se utilizó la pila con la ranura de dimensiones indicadas y se empleó el aro de diámetro $W = 14,6$ cm ubicado a nivel del fondo.

Análisis Dimensional y Condiciones de Similitud

Para la combinación de un aro alrededor de la pila y la perforación de una ranura, la profundidad de socavación local Y_s es función del diámetro de la pila D , la profundidad del flujo Y_n , el diámetro medio del sedimento d_{50} , la altura k de los elementos que emergen de los contornos, la velocidad media del fluido V , el diámetro del aro W , el ancho de la ranura e , la longitud de la ranura L_r , la densidad del fluido ρ , la viscosidad cinemática ν y la aceleración de gravedad g . Así, se tiene que

$$f_1(Y_s, D, Y_n, d_{50}, V, k, W, e, L_r, \rho, \nu, g) = 0. \quad (1)$$

Haciendo uso del teorema o de Vaschy-Buckingham se obtiene que el fenómeno está caracterizado por una relación del tipo siguiente

$$\frac{Y_s}{D} = f_2\left(\frac{Y_n}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{k}{D}, \frac{W}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L_r}{D}, \mathbf{R}, \mathbf{F}\right), \quad (2)$$

donde \mathbf{R} es el número de Reynolds y \mathbf{F} es el número de Froude. Aquí, las condiciones de similitud son

$$\mathbf{R}'' = \mathbf{R}' \quad (3)$$

$$\mathbf{F}'' = \mathbf{F}' \quad (4)$$

$$i'' = i' \quad (5)$$

en las cuales se designa con una prima (') a las cantidades que conciernen al prototipo y con doble prima (") a las del modelo. En la ecuación 5, i' corresponde a los factores adimensionales de forma, tales como Y_n/D , d_{50}/D , k/D , W/D , e/D y L_r/D , los cuales definen la configuración geométrica del sistema. En estudios previos relacionados con el fenómeno de socavación local en pilas se ha encontrado que la influencia del número de Reynolds \mathbf{R} sobre Y_s/D es despreciable [7]. Por lo tanto, el fenómeno está controlado por el número de Froude \mathbf{F} y por la forma del sistema y entonces es suficiente con imponer las condiciones

$$\lambda V = \sqrt{\lambda L} \quad (\text{condición de Froude}) \quad (6)$$

$$i'' = i' \quad (\text{similitud geométrica}), \quad (5)$$

en las cuales L es la escala de longitudes y V la escala de velocidades.

Presentación y Análisis de Resultados

En primer lugar, se realizaron 8 experimentos de referencia (pila sin protección) con profundidades del flujo Y_n entre 0,1210 y 0,1907 m y caudal Q entre 0,0186 y 0,0378 m³/s. Se midió el perfil del fondo erosionado y se obtuvo la profundidad de socavación Y_s a una distancia x de la pila, y la profundidad de socavación máxima al pie de la pila Y_{sm} .

Estudio experimental usando un aro

En esta etapa se analizó el efecto que produce la colocación de un aro, alrededor de una pila circular, empleado como dispositivo para disminuir la profundidad de socavación local. El aro se ubicó en diferentes posiciones Y_d respecto al fondo. Inicialmente, se empleó un aro de 14,6 cm de diámetro. Se realizaron 29 ensayos. En la Tabla 1 se presentan los resultados experimentales.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de socavación para diferentes posiciones del aro Y_d . Se observa que los fosos de socavación desarrollados empleando el aro en la pila son de menor tamaño. Se muestra que, para $Y_n = 14,57$ cm aproximadamente, la profundidad de socavación aguas arriba de la pila se reduce considerablemente con la ubicación del aro en $Y_d = -6, -3, 0$ y 9 cm. Los perfiles de socavación para $Y_n = 12,47$ y $15,9$ cm aproximadamente, también mostraron que el efecto del aro era mayor cuando éste era colocado en $Y_d = -6, -3$ y 0 cm, logrando la menor profundidad de socavación cuando el aro se ubicaba a nivel del lecho. Para la profundidad $Y_n = 19,1$ cm aproximadamente, el mayor efecto del aro se logró cuando éste era ubicado en $Y_d = -3$ cm.

En la Figura 6 se presenta la relación entre la profundidad de socavación máxima obtenida con el aro de protección $Y_{sm(arro)}$ y la alcanzada en los experimentos de referencia $Y_{sm(ref)}$, en función

Tabla 1
Socavación local al pie de la pila con el aro de diámetro $W = 14,6$ cm

Exp.	Q (m^3/seg)	Y_d (m)	Y_n (m)	Y_{sm} arriba (m)	Y_{sm} abajo (m)	Exp.	Q (m^3/seg)	Y_d (m)	Y_n (m)	Y_{sm} arriba (m)	Y_{sm} abajo (m)
1	0,02555	0	0,1433	0,0241	0,0123	16	0,01684	0,09	0,1264	0,0167	-0,0083
2	0,03571	0	0,1899	0,0376	0,0104	17	0,02842	0,09	0,1593	0,0524	0,0137
3	0,03167	0	0,1582	0,0223	0,0088	18	0,03527	0,09	0,1930	0,0498	0,0104
4	0,01575	0	0,1216	0,0030	0	19	0,02460	0,09	0,1483	0,028	-0,0044
5	0,02713	0	0,1457	0,0199	0,0058	20	0,02555	0,09	0,1460	0,0454	0,0059
6	0,01616	0,03	0,1184	0,0111	-0,0100	21	0,01520	-0,03	0,1283	0,0043	0,0037
7	0,02620	0,03	0,1413	0,0455	0,0135	22	0,02096	-0,03	0,1475	0,0245	-0,0097
8	0,02837	0,03	0,1594	0,0738	0,0300	23	0,02585	-0,03	0,1593	0,0306	-0,0004
9	0,03816	0,03	0,1898	0,0699	0,0250	24	0,03836	-0,03	0,1954	0,0293	0,0118
10	0,03566	0,03	0,1895	0,0582	0,0145	25	0,01598	-0,06	0,1289	0,0059	0,0006
11	0,01838	0,06	0,1247	0,0221	-0,0072	26	0,02203	-0,06	0,1478	0,0200	-0,0047
12	0,02788	0,06	0,1465	0,0582	0,0082	27	0,02624	-0,06	0,1592	0,0325	-0,0014
13	0,02973	0,06	0,1587	0,0539	0,0141	28	0,03265	-0,06	0,1925	0,0480	0,0109
14	0,03479	0,06	0,1909	0,0580	0,0129	29	0,03561	-0,06	0,1915	0,0488	0,0317
15	0,02207	0,09	0,1374	0,0290	-0,0021						

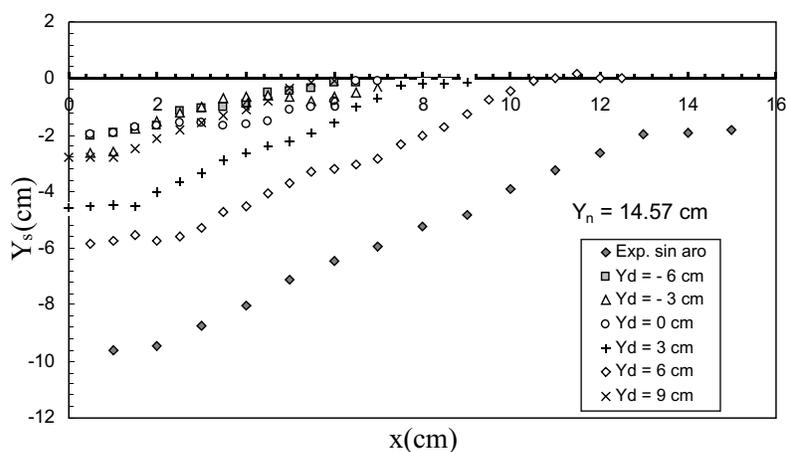


Figura 5. Perfiles de socavación para $Y_n = 14,57$ cm e Y_d variable.

de Y_d/Y_n . Se incorporan los resultados de Chiew [5] y los Ettema en 1980, referidos por Chiew [5], los cuales muestran tendencia similar en el rango experimental considerado. Sin embargo, los valores de $Y_{sm(arro)}/Y_{sm(ref)}$ son mayores, ya que Chiew [5] usó arena de menor diámetro.

Así, se puede observar que el efecto del aro es mayor cuando éste se coloca a nivel del lecho, posición en la cual se reduce considerablemente la profundidad de socavación. Sin embargo, en algunos casos, la efectividad es un poco mayor cuando el aro está por debajo. Para cuantificar la

efectividad del aro de protección se emplea la ecuación 7, que relaciona la reducción de la profundidad de socavación respecto a la profundidad de socavación obtenida sin el dispositivo de protección

$$\text{Efectividad}(\%) = \left(\frac{Y_{sm(ref)} - Y_{sm(aros)}}{Y_{sm(ref)}} \right) 100 . \quad (7)$$

En la Figura 7 se relaciona la efectividad con la posición del aro Y_d , para diferentes profundidades Y_n . Así, se puede afirmar que el mayor efecto del aro se logra colocándolo a nivel del lecho. Sin embargo, para valores de Y_d por debajo del lecho, la efectividad también es alta. Para el aro ubicado por encima del lecho, la efectividad es un poco menor, aunque no deja de ser signifi-

cativa. Además, se observa que el efecto del aro es mayor cuando la profundidad del flujo Y_n es menor.

Posteriormente, se empleó un aro de mayor diámetro, $W = 21,9$ cm, con el fin de estudiar el efecto del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación. Se realizaron 21 ensayos. En la Tabla 2 se presentan los resultados experimentales. Se encontró que la socavación producida aguas arriba de la pila era considerablemente mayor cuando la pila no era protegida con el aro. Es necesario recalcar que para el aro de mayor tamaño, $W = 21,9$ cm, no se produjo erosión alrededor de la pila, cuando éste era colocado a nivel del lecho.

A partir de la ecuación 7 también se determinó la efectividad alcanzada con el aro de mayor

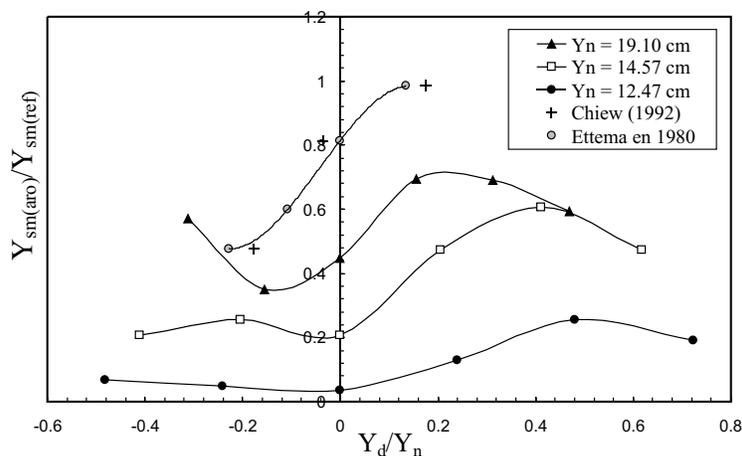


Figura 6. Comportamiento de la relación $Y_{sm(aros)}/Y_{sm(ref)}$ en función de Y_d/Y_n .

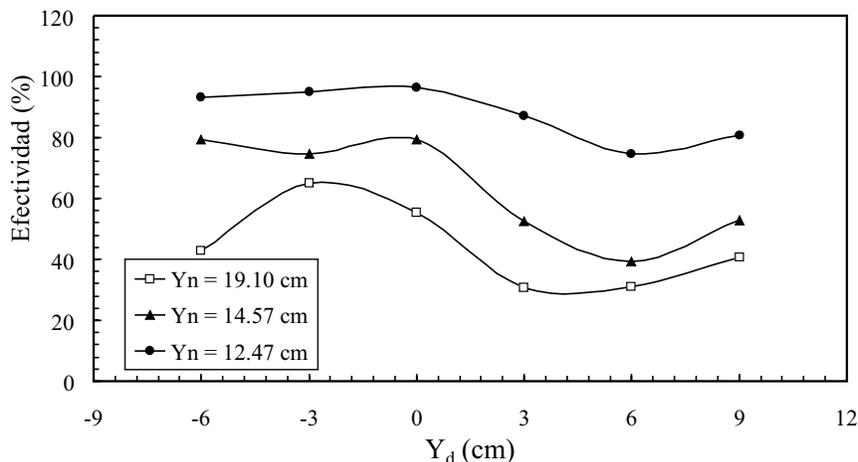


Figura 7. Efectividad del aro de 14,6 cm de diámetro.

diámetro. Se obtuvo una efectividad de 100% para $Y_n = 19,03$ cm e $Y_d = 0$ cm y de 72,86% para $Y_d = -3$ cm. Para $Y_n = 14,52$ cm, la efectividad lograda fue de 100% para $Y_d = 0$ cm y de 82,08% para $Y_d = -3$ cm. Además, se obtuvo que para $Y_n = 12,64$ cm, la efectividad fue de 100% para $Y_d = 0$ cm y de 93,53% para $Y_d = -6$ cm. Se concluye que el mayor efecto del aro se logra colocándolo a nivel del lecho. Sin embargo, la efectividad del aro también es significativa cuando éste se encuentra por debajo. Para posiciones del aro por encima del lecho, el efecto del aro como dispositivo de protección se reduce. En la Figura 8 se compara

la efectividad alcanzada con los aros de diferente diámetro para la profundidad de agua $Y_n = 19,1$ cm aproximadamente. En la Figura 9 se ilustran varios perfiles de socavación desarrollados con los aros de diferente diámetro para una profundidad del flujo y posición del aro constantes. Así, se puede afirmar que si el diámetro del aro es mayor, menor será la profundidad de socavación al pie de la pila, y el aro puede ser capaz de reducir totalmente la profundidad de socavación. Para profundidades pequeñas de agua, la profundidad de socavación al pie de la pila es muy reducida y con ambos aros se alcanzan efectividades si-

Tabla 2
Socavación local al pie de la pila con el aro de diámetro $W = 21,9$ cm

Exp.	Q (m^3/seg)	Y_d (m)	Y_n (m)	Y_{sm} arriba (m)	Y_{sm} abajo (m)	Exp.	Q (m^3/seg)	Y_d (m)	Y_n (m)	Y_{sm} arriba (m)	Y_{sm} abajo (m)
1	0,01710	0	0,1296	0	0	12	0,02642	0,09	0,1410	0,0486	0,0150
2	0,02451	0	0,1478	0	0	13	0,03470	0,09	0,1850	0,0653	0,0327
3	0,02655	0	0,1572	0	0	14	0,01448	-0,03	0,1287	0,0103	0,0051
4	0,03532	0	0,1801	0	0,0092	15	0,02191	-0,03	0,1486	0,0172	0,0064
5	0,01699	0,03	0,1254	0,0122	-0,0097	16	0,02717	-0,03	0,1625	0,0224	0,0045
6	0,02481	0,03	0,1394	0,0317	0,0043	17	0,03200	-0,03	0,1945	0,0228	0,0066
7	0,03527	0,03	0,1885	0,0617	0,0215	18	0,01553	-0,06	0,1286	0,0056	0,0021
8	0,01772	0,06	0,1233	0,0132	-0,0076	19	0,02224	-0,06	0,1499	0,0343	0,0048
9	0,02664	0,06	0,1442	0,0551	0,0142	20	0,02598	-0,06	0,1594	0,0287	0,0046
10	0,03518	0,06	0,1963	0,0509	0,0130	21	0,03308	-0,06	0,1974	0,0465	0,0112
11	0,01892	0,09	0,1229	0,0252	-0,0048						

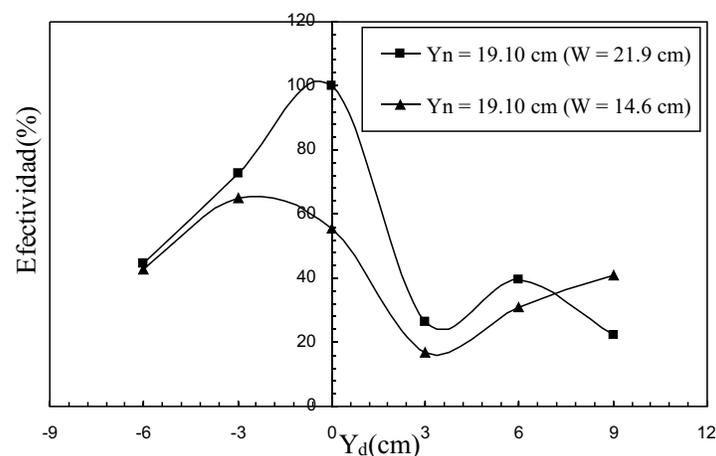


Figura 8. Efectividad con aros de diferente diámetro para $Y_n = 19,10$ cm.

milares. Bajo estas condiciones, el tamaño del aro tiene poca influencia sobre su efectividad.

Para estudiar la semejanza en los perfiles de socavación, se analizaron los perfiles adimensionales aguas arriba de la pila, zona en la cual se generan los mayores fosos de socavación, y donde se aprecia claramente la variación de la socavación en función de la profundidad del flujo Y_n y de la posición del aro Y_d . Se graficó Y_s/Y_{sm} contra $x/X_{Y_{sm}/2}$, en la cual Y_s es la profundidad de socavación a una distancia x de la pila y $X_{Y_{sm}/2}$ es el valor de x en la cual se produce la mitad de la profundidad de socavación máxima Y_{sm} . Se incluyeron todos los perfiles de los fosos de socavación desarrollados al pie de la pila sin aro y los obtenidos empleando los aros de 14,6 y 21,9 cm de diámetro. Se observa que todos los perfiles tienen la misma forma como se ilustra en la Figura 10, aun variando la posición del aro Y_d , la profundidad

del flujo Y_n y el tamaño del aro. Así, se muestra que los perfiles de socavación son de naturaleza similar e independientes del tamaño y la posición del aro. A partir de la información experimental, se obtiene una ecuación empírica que se ajusta a todos los puntos medidos, dada por

$$\frac{Y_s}{Y_{sm}} = \exp\left(-0,693\left(\frac{x}{X_{Y_{sm}/2}}\right)^2\right), \tag{8}$$

con un error medio de 10,67% para el aro de 14,6 cm de diámetro y de 10,73% para el aro de 21,9 cm.

Estudio experimental perforando una ranura

En esta sección se presentan los resultados obtenidos perforando una ranura en la pila como

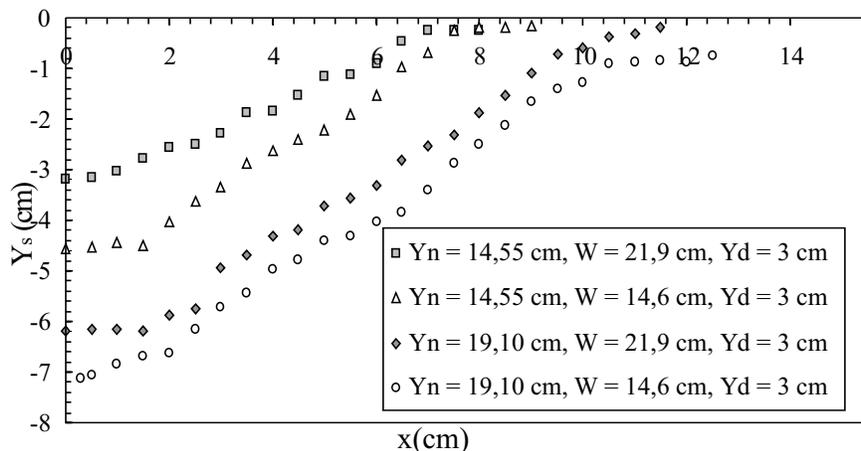


Figura 9. Influencia del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación.

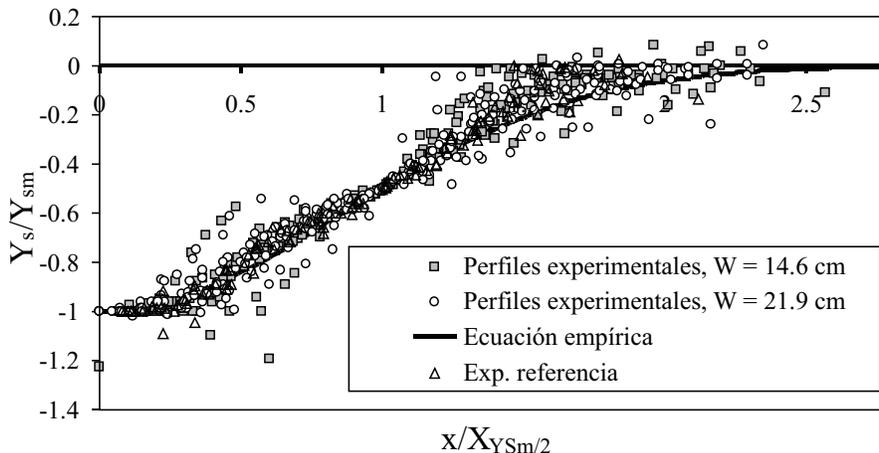


Figura 10. Perfiles adimensionales con y sin el aro de protección, para Y_n e Y_d variables.

método de protección contra la socavación. La ranura se ubicó tomando dos puntos de referencia: desde el fondo y desde la superficie. En total, se realizaron 13 experimentos para una profundidad del flujo Y_n constante de 14,44 cm aproximadamente. En la Tabla 3 se presentan los resultados experimentales, en la cual L_r es la longitud de la ranura y Y_{smr} es la socavación máxima obtenida con la ranura.

En las Figuras 11a y 11b se presentan los perfiles que describen el foso de socavación. Los ensayos se realizaron variando la longitud L_r para una profundidad constante $Y_n = 14,44$ cm aproximadamente.

En las Figuras 11a y 11b se puede observar que cuando la longitud de la ranura L_r es mayor,

el foso de socavación es menor. Los fosos de socavación obtenidos perforando la ranura en la pila son de menor tamaño que el desarrollado al pie de la pila sin protección. En la Figura 11a se observa que cuando la longitud L_r se varía desde el fondo hacia la superficie, el tamaño de los fosos de socavación es aún menor. En las Figuras 12a y 12b se muestran gráficos para la longitud L_r variando desde la superficie hacia el fondo y $e/D = 0.25$, donde e es el ancho de la ranura y D el diámetro de la pila. En la Figura 12a se relaciona $Y_{smr}/Y_{sm(ref)}$ con Y_{ef}/D , en la cual Y_{ef} es la profundidad del flujo efectiva, $Y_{ef} = Y_n - L_r$. En la Figura 12b se grafica $Y_{smr}/Y_{sm(ref)}$ en función de L_r/D . En las Figuras 12a y 12b se incorpora la información de Chiew [5]. Se muestra que la tendencia es

Tabla 3
Socavación local al pie de la pila perforándole una ranura

Longitud L_r variable desde la superficie hacia el fondo					Longitud L_r variable desde el fondo hacia la superficie				
Exp.	Q (m^3/seg)	L_r (m)	Y_{smr} arriba (m)	Y_{smr} abajo (m)	Exp.	Q (m^3/seg)	L_r (m)	Y_{smr} arriba (m)	Y_{smr} abajo (m)
1	0,026595684	0,1244	0,0361	-0,0018	1	0,027169464	0,1444	0,0141	-0,0010
2	0,026727737	0,1044	0,0344	-0,0011	2	0,026595684	0,1244	0,0112	-0,0042
3	0,026904142	0,0844	0,0406	0,0003	3	0,026860005	0,1044	0,0247	0,0010
4	0,026595684	0,0644	0,0384	0,0019	4	0,02734682	0,0844	0,0384	0,0077
5	0,026948303	0,0444	0,0503	0,0059	5	0,026992487	0,0644	0,0334	0,0040
6	0,026551715	0,0244	0,0485	0,0080	6	0,025895047	0,0444	0,0329	0,0026
					7	0,02734682	0,0244	0,0325	0,0041

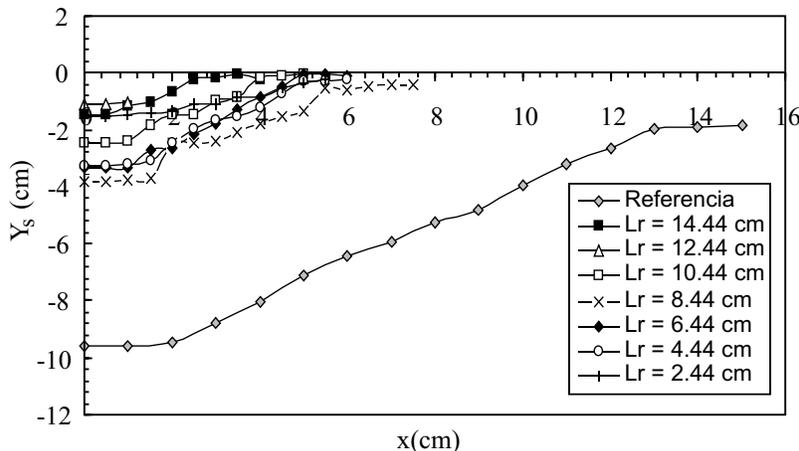


Figura 11a. Perfiles de socavación con L_r variando desde el fondo hacia la superficie.

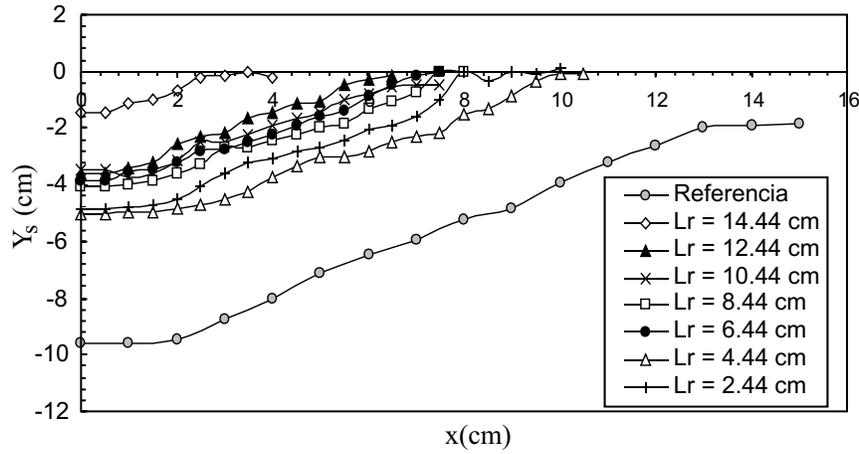


Figura 11b. Perfiles de socavación con L_r variando desde la superficie hacia el fondo.

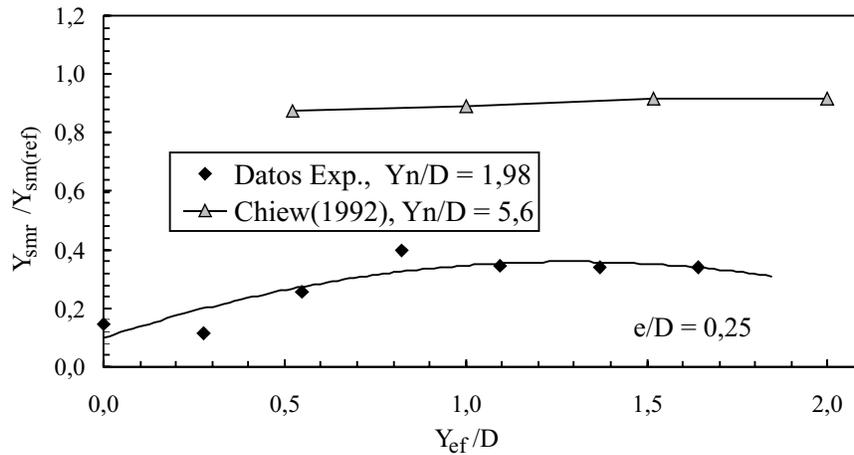


Figura 12a. Relación entre $Y_{smr}/Y_{sm(ref)}$ e Y_{ef}/D .

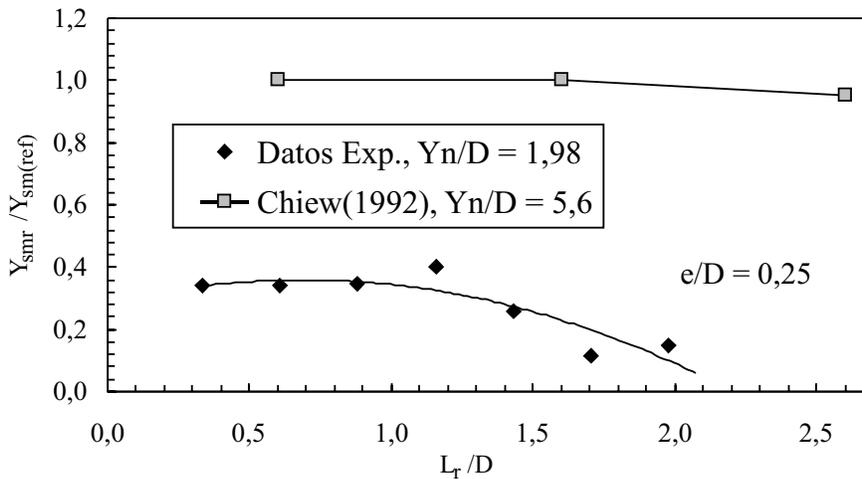


Figura 12b. Relación entre $Y_{smr}/Y_{sm(ref)}$ y L_r/D .

similar. Sin embargo, se observa que los valores aquí obtenidos son menores, ya que la relación Y_n/D es menor y el diámetro del sedimento es mayor.

En las Figuras 12a y 12b se puede apreciar que la profundidad de socavación se reduce cuando la longitud de la ranura se incrementa, es decir, si Y_{ef} es menor. En otras palabras, la reducción efectiva en la profundidad del flujo de aproximación causa una disminución en la profundidad de socavación. Esto confirma la influencia de la profundidad del flujo sobre la profundidad de socavación. Se debe indicar que las menores profundidades de socavación ocurrieron cuando la ranura era ubicada desde el fondo hacia la superficie.

En la Figura 13 se muestra que la forma de los perfiles de socavación no cambia, es decir, los

perfiles son independientes del tamaño y ubicación de la ranura. Se obtiene una ecuación empírica que se ajusta a todos los puntos experimentales, la cual también está dada por la ecuación 8, que entrega un error medio de 9,28% para la longitud L_r variando desde la superficie hacia el fondo y de 12.47%, en caso contrario. Esto indica que la forma de los perfiles del foso de socavación no cambia cualquiera sea el dispositivo empleado en la pila como método de protección.

En la Figura 14 se muestra la efectividad de la ranura en función de su longitud L_r , para una misma profundidad Y_n . Cuando la longitud L_r se varió desde la superficie hacia el fondo se lograron efectividades entre 47,60 y 85,31%, mientras que, en caso contrario, se obtuvieron efectividades entre 60,00 y 88,33%. En la Figura 14 se muestra que se logra una mayor efectividad

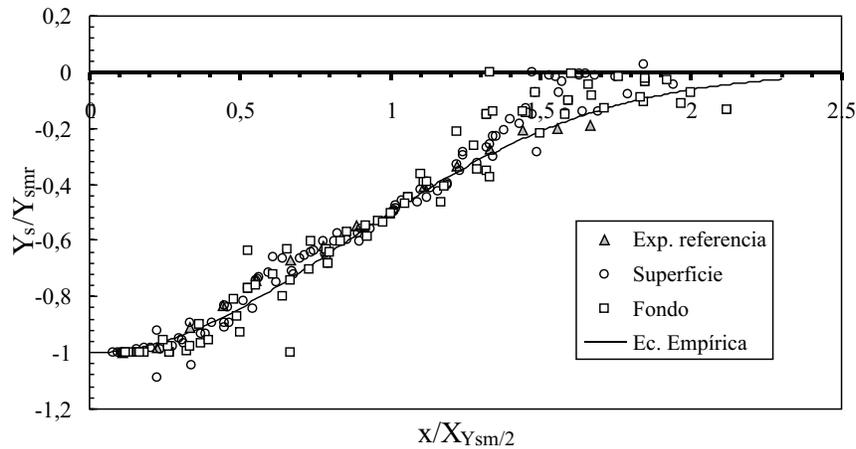


Figura 13. Perfiles adimensionales de los fosos de socavación.

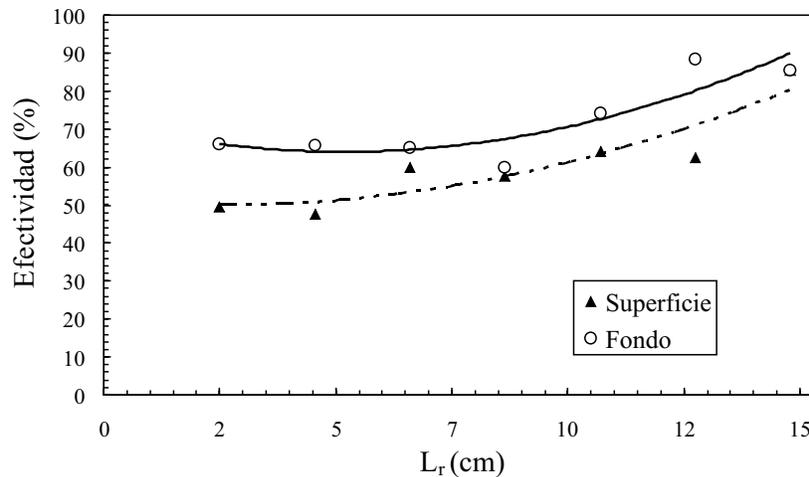


Figura 14. Efectividad de la ranura para $Y_n = 14,44$ cm y L_r variable.

cuando la longitud de la ranura se varía desde el fondo hacia la superficie. Ambas curvas tienen la misma tendencia. A medida que la longitud de la ranura L_r aumenta la efectividad es mayor.

Finalmente, para analizar el efecto del aro combinado con la ranura, se realizaron 7 experimentos con valores de caudal entre 0,02555 y 0,02673 m³/s y una profundidad de flujo constante de aproximadamente 14,44 cm. Se empleó el aro de 14,6 cm de diámetro ubicado en el fondo. Se varió la longitud de la ranura L_r , desde el fondo hacia la superficie, cada 2 cm entre 2,44 y 14,44 cm. No ocurrió socavación alrededor de la pila. Esto indica que la efectividad de la combinación aro y ranura es de 100% independientemente de la longitud de la ranura.

Conclusiones

1. Se obtiene que usando el aro de 14,6 cm de diámetro, ubicado a nivel del lecho, se logra reducir la profundidad de socavación entre 55,24% y 96,54% dependiendo de la profundidad de flujo, siendo ésta la posición óptima. La socavación se reduce considerablemente cuando se utiliza el aro de 21,96 cm de diámetro ubicado en el lecho, logrando disminuir la profundidad de socavación en un 100%. Para posiciones del aro por debajo del lecho, la efectividad del aro también es significativa, en ambos casos. El efecto del aro como dispositivo de protección se reduce cuando éste se ubica por encima del lecho. Se obtiene que la efectividad del aro de 21,9 cm de diámetro es mayor. Esto indica que si el diámetro del aro es mayor, menor será la profundidad de socavación al pie de la pila.

2. Se encuentra que la ranura logra disminuir la profundidad de socavación considerablemente. Para la longitud de la ranura variable desde la superficie hacia el fondo, la efectividad varió entre 47,60% y 85,31%, mientras que, en caso contrario, la efectividad estuvo entre 60,00% y 88,33%. Así, se obtiene que el lugar óptimo para colocar la ranura es cerca del fondo. Además, se concluye que a mayor longitud de ranura, la profundidad de socavación es menor.

3. Se obtiene que la forma de los fosos de socavación es muy similar aún cuando se varía la profundidad de flujo, la posición y el tamaño del aro. La forma de los perfiles tampoco depende de

la longitud y posición de la ranura. Esto indica que la forma de los perfiles del foso de socavación no cambia cualquiera sea el dispositivo empleado en la pila como método de protección.

4. Para la combinación entre el aro de menor tamaño, ubicado en el fondo, y la ranura, con longitud variable desde el fondo, se logró reducir la profundidad de socavación en su totalidad.

Agradecimiento

Los autores agradecen al "Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico" de la Universidad de los Andes por su apoyo financiero a través de Programa CVI-ADG-I-07-95C.

Referencias Bibliográficas

1. Maza, A. J. y Sánchez, J. L.: "Socavación y protección al pie de pilas de puente". II Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Caracas, Venezuela. Vol. 1 (1966), 91-107.
2. Breusers, H. N. C., Nicollet, G., y Shen, H. W.: "Local scour around cylindrical piers". Journal of Hydraulic Research. Vol. 15, No. 3 (1977), 211-252.
3. Posey, C. J.: "Tests of scour protection for bridge piers". Journal of the Hydraulics Division, ASCE. Vol. 100, No. HY12 (1974), 1773-1783.
4. Lauchlan, C. S. y Melville, B. W.: "Riprap protection at bridge piers". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 127, No. 5 (2001), 412-418.
5. Chiew, Y. M.: "Scour protection at bridge piers". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 118, No. 9 (1992), 1260-1269.
6. Kumar, V., Ranga Raju, K. G., y Vittal, N.: "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 125, No. 12 (1999), 1302-1305.
7. Jain, S. C. y Fischer, A. M.: "Scour around bridge piers at high flow velocities". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY11 (1980), 1827-1841.

Recibido el 05 de Mayo de 2006

En forma revisada el 07 de Mayo de 2007