

Efecto de un aro sobre la socavación en pilas circulares

Aspects of collar effect on circular piers scour

Moncada, Alix; Aguirre-Pe, Julián; Bolívar, Juan y Flores, Edgar
Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA).
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
e-mail: alix@ula.ve

Recibido: 25-11-2005

Revisado: 15-02-2007

Resumen

En este trabajo se hace un estudio experimental con el fin de analizar el efecto que tiene la colocación de un aro alrededor de una pila circular como dispositivo para controlar la profundidad de socavación. Se llevaron a cabo experimentos utilizando una pila de sección circular de 7.3 cm de diámetro y dos aros de diferente tamaño. En la primera etapa se colocó alrededor de la pila un aro de 14.6 cm de diámetro y, posteriormente, se empleó un aro de 21.9 cm. El aro se ubicó en diferentes posiciones respecto al nivel del fondo. En cada experimento se midió el perfil del fondo erosionado, aguas arriba y aguas abajo de la pila. Esto permitió determinar la profundidad de socavación máxima y estudiar la influencia del tamaño del aro y de su ubicación sobre el tamaño y la forma del foso de socavación. A partir de la información experimental se muestra que los perfiles del foso socavado son de naturaleza similar e independientes del tamaño del aro y de su ubicación. Se encuentra que cuando el aro se coloca a nivel del fondo se produce la menor profundidad de socavación. También se obtiene que la profundidad de socavación se reduce cuando el diámetro del aro se incrementa. Los resultados se contrastan con la poca información disponible en estudios previos.

Palabras claves: Socavación en pilas de puentes, fosos de socavación, aro como dispositivo de protección contra la socavación.

Abstract

In this paper an experimental study in order to analyze the effect of using a collar around a circular pier as device for controlling the depth of scour was made. Experiments were conducted using a circular pier of 7.3 cm diameter and two collars of different size. In the first stage a collar of 14.6 cm diameter was placed around the pier and, subsequently, a collar of 21.9 cm was used. The collar was placed at different positions with regard to the bed level. In each experiment the profile of the scoured bed, upstream and downstream of the pier was measured. This allowed to determine the maximum scour depth and to study the influence of the size and the position of the collar on the size and form of the scour hole. From the experimental information it is showed that the profiles of the scoured holes are similar in nature independently of the size and the position of the collar. It is found that when the collar is placed at the bed level the minimum depth of scour is produced. It is also obtained that the scour depth is reduced when the diameter of the collar is increased. The results are contrasted with the available little information in previous studies.

Key words: Scour at bridge piers, scour holes, collar as device for scour protection.

1 Introducción

Una causa principal, de gran interés, relacionada con la estabilidad de las fundaciones de los puentes es la ocurrencia de la erosión alrededor de las pilas. La formación de huecos de socavación local alrededor de pilas de puentes es un problema casi inevitable en fondos de cauces aluviales. Los ingenieros deberían tomar precauciones en el diseño

para evitar que este fenómeno amenace la integridad del puente. La socavación local en pilas de puentes se puede definir como una disminución local en la elevación del fondo alrededor de la pila. Esta disminución es originada por la separación de la capa límite tridimensional en la pila, que causa erosión del material del fondo por la estructura del flujo local, el cual está caracterizado por un alto nivel de turbulencia y verticidad.

El mecanismo de socavación en pilas es bien conocido. Se forman altas velocidades en los costados de las pilas cuando el flujo se acelera al pasar alrededor del cilindro. Algunos investigadores han mostrado que la socavación se inicia en los costados, creando dos pequeños fosos de socavación que crecen hacia aguas arriba, uniéndose eventualmente en la nariz de la pila. La distribución vertical de velocidad en el flujo de un canal abierto está caracterizada por la condición de no deslizamiento en el fondo del canal. Cuando el flujo se aproxima a la pila se forma un plano de estancamiento. Debido al perfil vertical de velocidad, se forma un gradiente de presión vertical a lo largo del plano de estancamiento en la pila. Este gradiente produce un flujo hacia abajo en frente de la pila, el cual es la causa principal de la erosión en pilas de puentes. Este actúa como un chorro vertical que erosiona el material del fondo.

Los métodos de ingeniería tradicionales que tratan con problemas de socavación local no son muy sofisticados. Estos incluyen la colocación de una capa de material granular grueso o de rocas alrededor de la fundación de la pila, con el fin de aumentar la capacidad del material del fondo para resistir la erosión. En algunos casos, se colocan acolchados flexibles en la base de la pila o se pegan collares rígidos en la pila para reducir el potencial de los agentes erosivos que socavan el material del fondo. El aro o collar protege las partículas de sedimento erosionadas por el flujo hacia abajo.

En este trabajo se examina el efecto de usar un aro alrededor de la pila como dispositivo para controlar la profundidad de socavación. Se realizaron experimentos con aros de diferente diámetro, ubicados en diferentes posiciones. Se encuentra que el aro puede ser útil para proteger la pila contra la socavación, especialmente cuando la velocidad no perturbada del flujo sea lo suficientemente pequeña para que no ocurra transporte general de sedimento. De lo contrario, éste pierde su efectividad.

2 Antecedentes

Hay dos propuestas básicas que proporcionan protección a la fundación de un puente. 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 o de piedras sueltas 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 colocando una placa prolongada en la base o collar alrededor de la pila y a nivel del fondo.

Maza y Sánchez (1966) 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.

El uso de piedras para la protección contra la socavación tiene una larga tradición en ingeniería de costas y de ríos. Breusers et al. (1977) recomendaron el uso de cantos rodados con una velocidad crítica de iniciación del movimiento, U_c , de dos veces la velocidad de la crecida extrema alrededor de la pila. Esto es porque la socavación en pilas de puentes comienza en aproximadamente la mitad de U_c en condiciones de flujo normal. Hoy se colocan normalmente filtros debajo del material de piedras sueltas. El objetivo de la colocación de un filtro invertido es prevenir la filtración de las partículas de sedimento que están por debajo, a través de vacíos de las piedras sueltas.

Posey (1974) realizó ensayos empleando cilindros circulares transparentes de diferente diámetro, que conducen a porcentajes de contracción del ancho del canal diferentes. Concluyó 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. Posey (1974) indica que el tamaño debería escogerse en relación a la forma de la pila, porcentaje de contracción, y número de Froude del flujo de aproximación. Encontró que el uso de un filtro para la protección contra la socavación en los experimentos del modelo es muy eficiente. Sin embargo, es difícil colocar los filtros exactamente con las especificaciones requeridas en agua profunda.

Aunque la piedra picada es lo más comúnmente empleado contra la socavación alrededor de pilas de puentes, existen pocos estudios sobre el desempeño de la piedra picada bajo condiciones de fondo vivo. Lauchlan y Melville (2001) realizaron un estudio experimental en el cual consideran los mecanismos de falla, estabilidad, y los efectos del nivel de colocación de la piedra picada en pilas de puentes. Bajo condiciones de agua clara, la piedra picada está sujeta a esfuerzo cortante, zarandeo, 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. Realizaron experimentos para determinar la capacidad de la piedra picada para proteger las pilas de puente bajo un amplio rango de condiciones de flujo. Lauchlan y Melville (2001) también investigaron los efectos de colocar la capa de piedra picada en lo profundo, dentro del fondo de sedimento, antes que a nivel con la superficie del lecho. Encontraron que cuando la velocidad del flujo se incrementa, la capacidad de la piedra picada para proteger una pila disminuye asintóticamente hasta que la profundidad de socavación en la capa de piedra picada alcance la de una pila no protegida equivalente. También encontraron que cuando el nivel de colocación era más profundo menor era la piedra picada expuesta por desestabilización de las formas de fondo y se lograba la mejor protección contra la socavación local. Propusieron una ecuación de predicción para el tamaño de la piedra picada en la pila, que incluye un parámetro para considerar el nivel

de colocación. Lauchlan y Melville (2001) 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. Los mecanismos de falla de borde, esfuerzo cortante y zarandeo juegan papeles secundarios.

Algunas investigaciones han mostrado que la colocación de un collar o cajón alrededor de la pila de un puente puede reducir la profundidad de socavación. El collar tiene el efecto de proteger las partículas de sedimento erosionadas por el flujo hacia abajo. Según refiere Chiew (1992), Chiew en 1984 condujo experimentos sobre socavación en condición de fondo vivo usando una pila con un cilindro pegado en la base. Debido al desplazamiento de las dunas que pasan las pilas del puente, el nivel del fondo se reduce en la garganta de las dunas, exponiendo el cajón al flujo periódicamente. Chiew en 1984 afirma que las profundidades de socavación de equilibrio son esencialmente las mismas para una pila sencilla y para una pila con cajón. Esto es, el cajón pierde su efecto de protección donde hay transporte de sedimento general con características de un fondo que se mueve. Chiew (1992) realizó experimentos usando una pila cilíndrica de 32 mm de diámetro para estudiar los efectos de un collar sobre la socavación en pilas de puentes. El material del fondo consistió de una arena uniforme con un tamaño de partícula medio de 0.33 mm. La profundidad del flujo era 18 cm. Chiew (1992) encontró que un collar puede reducir la profundidad de socavación significativamente. Cuando el collar era colocado bajo el nivel del fondo, el desarrollo de la socavación se detenía cuando la base del hueco de socavación coincidía con la superficie del collar. En general, el uso de collares parece ser efectivo, especialmente cuando la velocidad no perturbada sea suficientemente pequeña para que no haya transporte de sedimento general. Sin embargo, cuando ocurre transporte de sedimento general, la mínima elevación de una forma de fondo que migra puede exponer la pila debajo del collar. Bajo tal condición, éste pierde su efectividad.

3 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. El canal tiene un tramo de paredes de vidrio que permite visualizar el flujo y el proceso de socavación, en el cual se ubicó la sección de estudio. Se usó arena uniforme con diámetro medio d_{50} de 1.4 mm como material de fondo. Se empleó una pila circular de diámetro $D = 7.3$ cm y 40 cm de alto. Se emplearon dos aros de 14.6 y 21.9 cm de diámetro. En los experimentos la pila se ubicaba en la parte central del canal. Seguidamente se colocaba el material no cohesivo, se enrasaba y se nivelaba cuidadosamente hasta obtener una superficie uniforme. Se colocaba una alfombra para cubrir el material y proteger el fondo del canal antes de lograr la profundidad de flujo deseada. Luego se abría la

llave lentamente hasta alcanzar la profundidad de flujo requerida. Dicha profundidad era controlada por una compuerta de aguas abajo. Se esperaba un tiempo prudencial hasta que se estabilizara el flujo con la profundidad deseada. Inmediatamente se quitaba la alfombra de manera de no perturbar el fondo granular. Alcanzado el estado de equilibrio, el cual ocurría en aproximadamente 3 horas, se cerraba la llave y se esperaba un cierto tiempo hasta que escurrea totalmente el agua de la sección de estudio. Luego, se procedía a medir el foso de socavación aguas abajo y aguas arriba de la pila. Posteriormente, se repetía todo el procedimiento para una nueva profundidad de flujo.

Los experimentos se realizaron con diferentes profundidades de flujo. Se llevaron a cabo 8 experimentos sin aro, que corresponden a los de referencia. Estos experimentos permitirán hacer las comparaciones con los resultados del método que se quiere implementar para disminuir la profundidad en el foso de socavación.

Para estudiar el efecto del aro sobre la profundidad de socavación se colocó un aro alrededor de la pila. En primer lugar se empleó el aro de diámetro $W = 14.6$ cm. Se varió la posición del aro para cada profundidad de flujo ensayada. El aro se ubicó en posiciones $Y_d = -6, -3, 0, 3, 6$ y 9 cm respecto al fondo. 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. Se repitió el proceso para cada profundidad de flujo alcanzada en la etapa experimental, en la cual la pila no tenía el aro de protección. Con este aro se realizaron 29 experimentos. En la Fig. 1 se observa la pila con el aro de protección.



Fig. 1. Pila con el aro colocado a nivel del fondo

Así, alcanzada la profundidad de flujo deseada en cada experimento se retira la alfombra. El fondo totalmente plano comienza a ser afectado por el fenómeno de socavación local, tanto aguas arriba como aguas abajo de la pila, como se muestra en la Fig. 2.

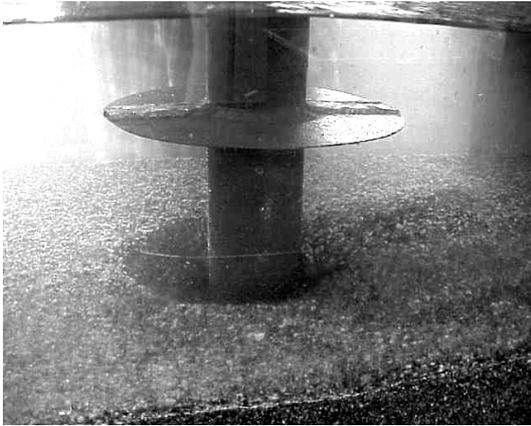


Fig. 2. Desarrollo del fenómeno de socavación local al pie de la pila

Finalizado el experimento, se deja escurrir el agua de la sección de estudio y, posteriormente, se mide el foso de socavación. En la Fig. 3 se observa el foso que se produce aguas arriba y aguas abajo de la pila para un experimento típico.



Fig. 3. Foso de socavación

Este procedimiento se repitió empleando un aro de diámetro $W = 21.9$ cm. Con este aro se realizaron 21 experimentos.

4 Presentación y análisis de resultados

En este estudio experimental se analiza el efecto que produce la colocación de un aro alrededor de una pila circular, empleado como dispositivo para disminuir la profundidad de socavación local. En primer lugar, se realizaron 8 experimentos de referencia (pila sin aro) con profundidades de flujo Y_n entre 0.1211 y 0.1907 m, y caudal Q entre 0.0186 y 0.0378 m^3/s . En la Tabla 1 se presentan los resul-

tados experimentales, en la cual V es la velocidad media del fluido e Y_{sm} corresponde a la profundidad de socavación máxima.

Tabla 1. Socavación local en pila sin aro

Exp.	Q (m^3/seg)	V (m/s)	Y_n (cm)	Y_{sm} arriba (cm)	Y_{sm} abajo (cm)
1	0.0378	0.3966	19.07	8.40	8.11
2	0.0374	0.4038	18.51	7.81	7.74
3	0.0327	0.3700	17.65	8.90	7.34
4	0.0286	0.3619	15.78	6.25	3.82
5	0.0266	0.3742	14.24	9.60	4.51
6	0.0246	0.3531	13.91	6.03	5.57
7	0.0192	0.3126	12.31	8.66	5.20
8	0.0186	0.3073	12.11	4.10	6.56

Con la finalidad de estudiar el efecto que produce la colocación de un aro de 14.6 cm de diámetro alrededor de la pila, ubicado a diferentes posiciones, sobre la profundidad de socavación, se realizaron 29 experimentos con profundidades Y_n entre 0.1184 m y 0.1954 m y caudal entre 0.01520 y 0.03836 m^3/s . En la Tabla 2 se presentan los resultados experimentales.

Tabla 2. Socavación local en pila con aro de diámetro $W = 14.6$ cm

Exp.	Q (m^3/seg)	V (m/s)	Y_d (cm)	Y_n (cm)	Y_{sm} arriba (cm)	Y_{sm} abajo (cm)
1	0.02555	0.35655	0	14.33	2.41	1.23
2	0.03571	0.37607	0	18.99	3.76	1.04
3	0.03167	0.40036	0	15.82	2.23	0.88
4	0.01575	0.25911	0	12.16	0.3	0
5	0.02713	0.37234	0	14.57	1.99	.58
6	0.01616	0.27302	3	11.84	1.11	-1
7	0.02620	0.37085	3	14.13	4.55	1.35
8	0.02837	0.35601	3	15.94	7.38	3.0
9	0.03816	0.40209	3	18.98	6.99	2.5
10	0.03566	0.37636	3	18.95	5.82	1.45
11	0.01838	0.29471	6	12.47	2.21	-0.72
12	0.02788	0.38063	6	14.65	5.82	0.82
13	0.02973	0.37470	6	15.87	5.39	1.41
14	0.03479	0.36450	6	19.09	5.8	1.29
15	0.02207	0.32126	9	13.74	2.9	-0.21

Tabla 2. Socavación local en pila con aro de diámetro $W = 14.6$ cm (Continuación)

Exp.	Q (m ³ /seg)	V (m/s)	Y _d (cm)	Y _n (cm)	Y _{sm} arriba (cm)	Y _{sm} abajo (cm)
16	0.01684	0.26645	9	12.64	1.67	-0.83
17	0.02842	0.35680	9	15.93	5.24	1.37
18	0.03527	0.36552	9	19.3	4.98	1.04
19	0.02460	0.33173	9	14.83	2.8	-0.44
20	0.02555	0.34996	9	14.6	4.54	0.59
21	0.01520	0.23697	-3	12.83	0.43	0.37
22	0.02096	0.28425	-3	14.75	2.45	-0.97
23	0.02585	0.32456	-3	15.93	3.06	-0.04
24	0.03836	0.39259	-3	19.54	2.93	1.18
25	0.01598	0.24789	-6	12.89	0.59	0.06
26	0.02203	0.29810	-6	14.78	2	-0.47
27	0.02624	0.32971	-6	15.92	3.25	-0.14
28	0.03265	0.33924	-6	19.25	4.8	1.09
29	0.03561	0.37192	-6	19.15	4.88	3.17

En la Fig. 4a se ilustran los perfiles de socavación para diferentes posiciones del aro. Se observa que los fosos de socavación en los cuales se emplea el aro como dispositivo de protección son de menor tamaño. Se muestra que para una profundidad de agua $Y_n = 14.75$ cm aproximadamente la profundidad de socavación aguas arriba de la pila se reduce considerablemente con la ubicación del aro en cuatro posiciones diferentes: $Y_d = -6, -3, 0$ y 9 cm. También se observa que el aro produce un mayor efecto cuando se ubica a nivel del fondo o por debajo de éste.

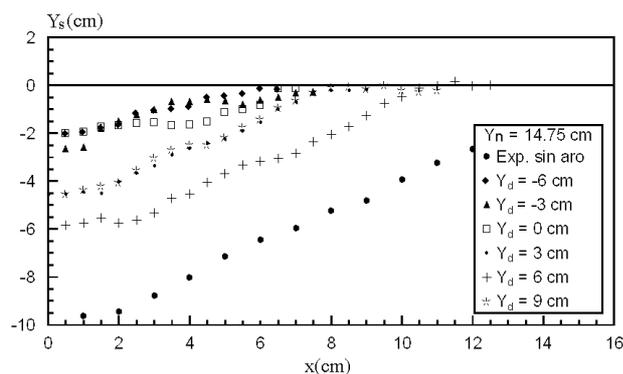


Fig. 4a. Perfiles de socavación para $Y_n = 14.75$ cm e Y_d variable

Los perfiles de socavación obtenidos para $Y_n = 12.10$ y 15.84 cm aproximadamente, también mostraron mayor efectividad del aro colocado a una altura $Y_d = -6, -3$ y 0 cm, logrando una menor profundidad de socavación cuando

el aro se ubica en $Y_d = 0$ cm, es decir, a nivel del terreno. Con una profundidad promedio $Y_n = 19.10$ cm la mayor efectividad del aro se alcanza cuando éste está ubicado en $Y_d = -3$ cm, logrando disminuir notablemente la socavación en comparación con las otras posiciones. En la Fig. 4b se observa que a pesar de que la profundidad de agua Y_n es mayor, el efecto del aro ubicado a nivel del fondo y por debajo de éste es importante, logrando disminuir significativamente la socavación aguas arriba de la pila. También se observa que con el simple hecho de colocar un aro en la pila se logra reducir notablemente la profundidad de socavación.

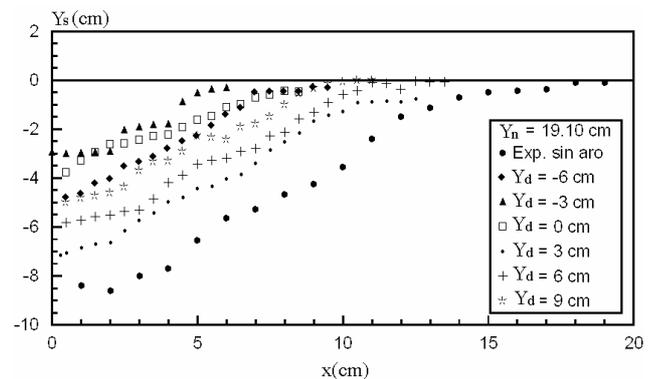


Fig. 4b. Perfiles de socavación para $Y_n = 19.10$ cm e Y_d variable

Analizando la relación entre la profundidad de socavación máxima obtenida con el aro $Y_{sm(arro)}$ y la profundidad de socavación máxima en los experimentos de referencia $Y_{sm(ref)}$, manteniendo constante la profundidad de flujo Y_n , se construye la Fig. 5 en la que se puede apreciar que las curvas tienen la misma tendencia. En la Fig. 5 se incorporan los resultados de Chiew (1992) y los resultados que refiere Chiew (1992), obtenidos por Ettema en 1980. De esta forma, comparando las curvas obtenidas en el presente estudio y la obtenida por Chiew (1992), claramente se observa que la tendencia es la misma. Los puntos experimentales de Chiew (1992) corresponden a valores mayores que los del presente estudio, ya que Chiew (1992) empleó como material de fondo arena con $d_{50} = 0.33$ mm, lo que conduce a profundidades de socavación mayores.

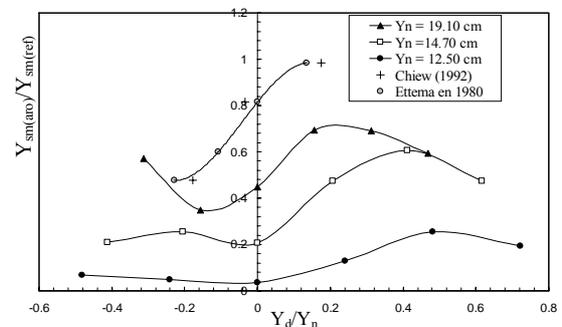


Fig. 5. Comportamiento de $Y_{sm(arro)} / Y_{sm(ref)}$ en función de Y_d / Y_n

En la Fig. 5 se observa claramente el efecto del dispositivo de protección. Así, se puede afirmar que el aro resulta más efectivo cuando se encuentra en el lecho. Sin embargo, la efectividad es un poco mayor en algunos casos cuando éste está por debajo.

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 de manera clara 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 donde se produce la mitad de la profundidad de socavación máxima Y_{sm} . Así, se obtiene una serie de perfiles adimensionales; un perfil para cada profundidad Y_n y diferentes posiciones Y_d . Se observa que todos ellos tienen la misma forma, como se ilustra en la Fig. 6, para la profundidad promedio $Y_n = 19.10$ cm. Aún variando la posición del aro se observa la misma tendencia. Esto indica que los perfiles de socavación son semejantes.

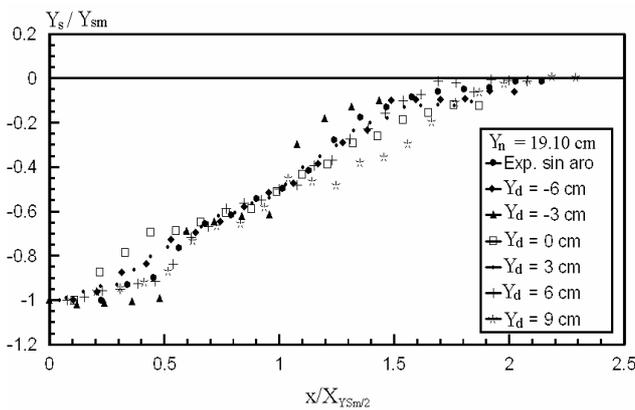


Fig. 6. Perfiles adimensionales para la profundidad $Y_n = 19.10$ cm y diferentes posiciones del aro Y_d

Para cuantificar la efectividad del aro de protección en cada uno de los experimentos, se empleó la Ec. 1, la cual relaciona la profundidad de socavación en la pila sin y con el dispositivo de protección

$$\text{Efectividad}(\%) = \left(\frac{Y_{sm(\text{ref})} - Y_{sm(\text{aro})}}{Y_{sm(\text{ref})}} \right) 100 \quad (1)$$

A partir de los resultados obtenidos, se presenta la Fig. 7, donde se relaciona la efectividad con la posición del aro Y_d , para las diferentes profundidades Y_n . La efectividad varió entre 30.71 % para $Y_d = 3$ cm y 65.12 % para $Y_d = -3$ cm con la profundidad $Y_n = 19.10$ cm. Para dicha profundidad e $Y_d = 0$ cm, la efectividad era de 55.24%. Para la profundidad media $Y_n = 14.24$ cm, la efectividad varió entre 39.38% para $Y_d = 6$ cm y 79.27% para $Y_d = 0$ cm. También

se obtuvo que la efectividad varía entre 74.48% para $Y_d = 6$ cm y 96.54 % para $Y_d = 0$ cm con la profundidad promedio $Y_n = 12.31$ cm. Así, se puede afirmar que el mayor efecto del aro contra la socavación se logra ubicándolo en $Y_d = 0$, es decir, a nivel del lecho. Además, se encuentra que el efecto del aro es mayor cuando la profundidad del flujo Y_n es menor. Por otro lado, se observa que para los valores de Y_d iguales o menores a cero, la efectividad lograda es mucho mayor que cuando el aro se encuentra por arriba del fondo.

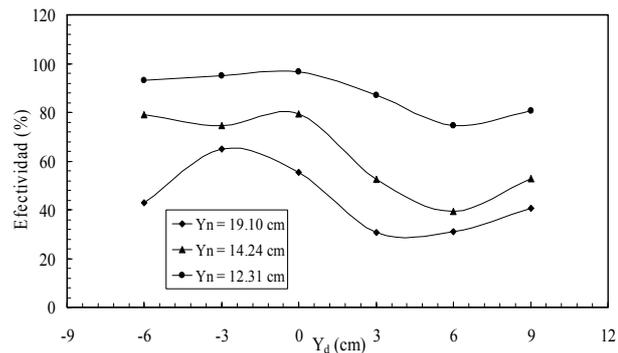


Fig. 7. Efectividad del aro de diámetro $W = 14.6$ cm

Para las posiciones del aro por encima del lecho la efectividad del dispositivo es un poco menor, aunque no deja de ser significativa. En efecto, para $Y_d = 3$ cm la efectividad del aro está entre 30.71 % y 87.18 %, para $Y_d = 6$ cm, entre 30.95 % y 74.48 %. De igual forma, para $Y_d = 9$ cm se tiene que la efectividad del aro está entre 40.71 % y 80.72 %. Los límites inferior y superior corresponden a las profundidades de agua promedio $Y_n = 19.10$ cm e $Y_n = 12.31$ cm, respectivamente.

Con el fin de estudiar el comportamiento de algunos parámetros adimensionales, antes y después de proteger la pila, se realizaron gráficos adimensionales que representan la relación Y_{sm}/D en función del Número de Reynolds de la pila, el número de Froude, el número de Froude densimétrico y de la relación Y_n/D . Se encontró que a medida que el Número de Reynolds aumenta, la profundidad de socavación se incrementa. Por otro lado se obtuvo que, para un mismo valor de este parámetro, la profundidad de socavación es menor cuando el aro está ubicado en $Y_d = 0$ cm, mientras que para las posiciones del aro por arriba del lecho la socavación tiene un comportamiento similar al que se observó en los perfiles dimensionales.

En la Fig. 8 se muestra el parámetro Y_{sm}/D contra el número de Froude densimétrico F_{d_s} , dado por $V/(\Delta g D_{50})^{1/2}$, donde g es la aceleración de gravedad y Δ es la densidad relativa sumergida. Se puede observar que la socavación al pie de la pila disminuye cuando el aro de protección se coloca a una altura $Y_d = -6$ y 0 cm, logrando una mayor efectividad cuando se ubica a nivel del fondo. Se observa que para $Y_d = 0$ cm la profundidad Y_{sm} es menor en casi todo el

rango experimental de F_d . Con respecto al comportamiento de Y_{sm}/D , en función de F_d , se observa que a medida que éste aumenta, se produce un incremento en Y_{sm}/D .

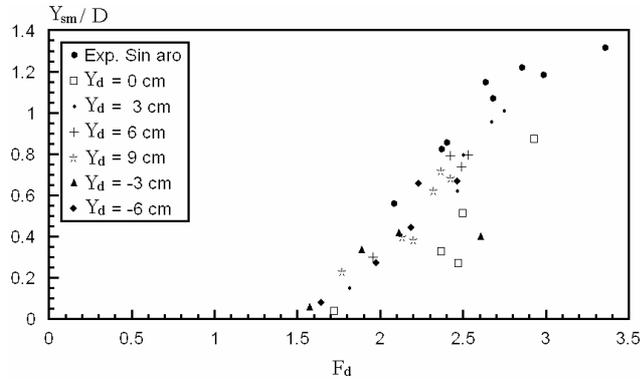


Fig. 8. Relación entre Y_{sm}/D y el número de Froude densimétrico F_d

El número de Froude F varió entre 0.2 y 0.42. Se obtuvo que para un valor constante de F , la relación Y_{sm}/D disminuye para posiciones del aro por debajo o a nivel del lecho, es decir, Y_{sm} es menor cuando el aro está enterrado o a nivel del fondo. También se encontró que la posición óptima del aro es para $Y_d = 0$, es decir, a nivel del fondo.

Analizando el parámetro adimensional Y_{sm}/D en función de Y_n/D , para todas las posiciones del aro Y_d , se obtiene que al aumentar la profundidad de flujo Y_n la profundidad de socavación máxima Y_{sm} también se incrementa. El análisis también mostró que para velocidades grandes la socavación es mayor.

Posteriormente, se aumentó el tamaño del aro a un diámetro igual a $W = 21.9$ cm, con el fin de estudiar el efecto del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación. Se mantuvieron las condiciones de flujo alcanzadas en los experimentos anteriores. Se realizaron 21 experimentos con profundidades Y_n entre 12.29 y 19.74 cm y caudal entre 0.01448 y 0.03532 m^3/s . En la Tabla 3 se presentan los resultados experimentales.

Tabla 3. Socavación local en pila con aro de diámetro $W = 21.9$ cm

Exp.	Q (m ³ /seg)	V (m/s)	Y _d (cm)	Y _n (cm)	Y _{sm} arriba (cm)	Y _{sm} abajo (cm)
1	0.01710	0.26397	0	12.96	0	0
2	0.02451	0.33170	0	14.78	0	0
3	0.02655	0.33781	0	15.72	0	0
4	0.03532	0.39224	0	18.01	0	0.92
5	0.01699	0.27099	3	12.54	1.22	-0.97
6	0.02481	0.35599	3	13.94	3.17	0.43
7	0.03527	0.37425	3	18.85	6.17	2.15
8	0.01772	0.28738	6	12.33	1.32	-0.76

Tabla 3. Socavación local en pila con aro de diámetro $W = 21.9$ cm (Continuación)

Exp.	Q (m ³ /seg)	V (m/s)	Y _d (cm)	Y _n (cm)	Y _{sm} arriba (cm)	Y _{sm} abajo (cm)
9	0.02664	0.36948	6	14.42	5.51	1.42
10	0.03518	0.35840	6	19.63	5.09	1.30
11	0.01892	0.30794	9	12.29	2.52	-0.48
12	0.02642	0.37475	9	14.10	4.86	1.50
13	0.03470	0.37509	9	18.50	6.53	3.27
14	0.01448	0.22495	-3	12.87	1.03	0.51
15	0.02191	0.29483	-3	14.86	1.72	0.64
16	0.02717	0.33439	-3	16.25	2.24	0.45
17	0.03200	0.32900	-3	19.45	2.28	0.66
18	0.01553	0.24156	-6	12.86	0.56	0.21
19	0.02224	0.29668	-6	14.99	3.43	0.48
20	0.02598	0.32600	-6	15.94	2.87	0.46
21	0.03308	0.33512	-6	19.74	4.65	1.12

En esta etapa de análisis también se obtuvieron los perfiles dimensionales y adimensionales, los cuales servirán de comparación para determinar el efecto del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación.

En la Fig. 9 se presentan los perfiles dimensionales Y_s contra x con el aro ubicado en las posiciones $Y_d = -6, -3, 3, 6$ y 9 cm, ya que para $Y_d = 0$ cm no se produjo socavación. También se incluye el experimento de referencia para la profundidad de agua promedio $Y_n = 14.70$ cm. Se puede observar que la socavación producida aguas arriba de la pila es considerablemente mayor cuando la pila no se protege con el aro. Para la profundidad de flujo $Y_n = 14.70$ cm, la socavación se reduce significativamente cuando el aro se ubica a una altura $Y_d = -3$ cm e $Y_d = -6$ cm, como se puede observar en la Fig. 9. Sin embargo, vale la pena recalcar que para el aro de mayor tamaño no se produjo erosión cuando éste era colocado a nivel del lecho.

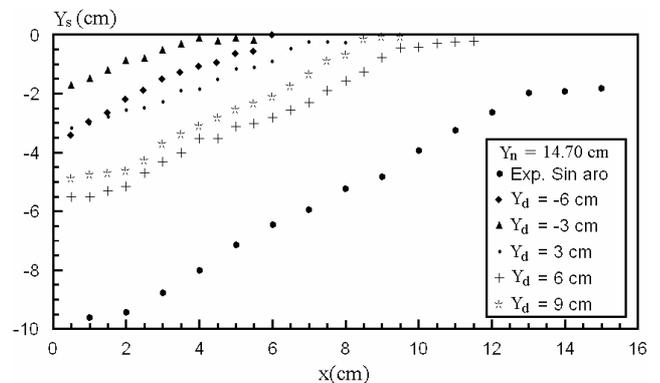


Fig. 9. Perfiles de socavación para $Y_n = 14.70$ cm e Y_d variable

Considerando la relación entre la profundidad de socavación máxima obtenida con el dispositivo de protección $Y_{sm(arro)}$ y la profundidad de socavación máxima en los experimentos de referencia $Y_{sm(ref)}$, manteniendo constante la profundidad Y_n , se construye la Fig. 10. En esta gráfica se incorporan los resultados que refiere Chiew (1992), obtenidos por Tanaka y Yano en 1967. Los puntos experimentales referidos por Chiew (1992) corresponden a posiciones del aro por encima del fondo, es decir para $Y_d \geq 0$. Además, se observa que el rango experimental de Tanaka y Yano en 1967 para Y_d/Y_n es muy pequeño. Sin embargo, se observa que cuando el aro se ubica por arriba y alejado del fondo la profundidad de socavación es un poco mayor.

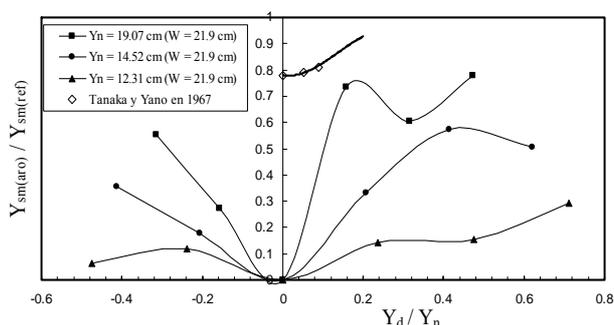


Fig. 10. Comportamiento de $Y_{sm(arro)}/Y_{sm(ref)}$ en función de Y_d/Y_n

En la Fig. 10 se observa el efecto del aro de protección de diámetro $W = 21.9$ cm. Así, también se puede afirmar que el aro de mayor tamaño resulta más efectivo cuando se encuentra en el lecho, donde se obtiene 100 % de efectividad para las diferentes profundidades de agua. El análisis de las Figs. 5 y 10 determinan el efecto del aro sobre la profundidad de socavación máxima para las diferentes posiciones Y_d .

Haciendo uso de la Ec.1 también se obtiene la efectividad del aro de diámetro $W = 21.9$ cm para cada uno de los experimentos. A partir de los resultados obtenidos se presenta la Fig. 11, donde se muestra la efectividad para las diferentes posiciones del aro Y_d . La efectividad, para la profundidad promedio $Y_n = 19.07$ cm aproximadamente, varió entre 22.26% para $Y_d = 9$ cm y 100 % para $Y_d = 0$ cm, mientras que para $Y_d = -3$ cm la efectividad es del 72.86%. Para Y_n promedio igual a 14.24 cm, la efectividad varió entre 42.60% para $Y_d = 6$ cm y 100% para $Y_d = 0$ cm, mientras que para $Y_d = -3$ cm, la efectividad es del 82.08%. Además, se obtiene que para la menor profundidad promedio $Y_n = 12.21$ cm, la efectividad es del 70.90% para $Y_d = 9$ cm y 100% para $Y_d = 0$ cm, mientras que para $Y_d = -6$ cm es del 93.53%.

Se concluye que el mayor efecto del aro se logra colocándolo a nivel del fondo. Sin embargo, vale la pena recalcar que la efectividad del dispositivo también es alta cuando éste se encuentra ubicado por debajo. Para las posiciones del aro por encima del lecho la efectividad del dispositivo es un poco menor, aunque no deja de ser significativa.

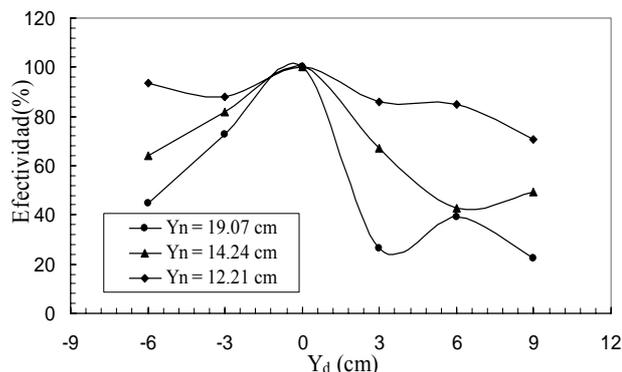


Fig. 11. Efectividad del aro de diámetro $W = 21.9$ cm

Por otra parte, el tamaño del aro es una variable que influye de manera directa sobre la profundidad de socavación. En la Fig. 12 se compara la efectividad alcanzada con los aros de diferente diámetro para la profundidad de agua de $Y_n = 19.07$ cm aproximadamente.

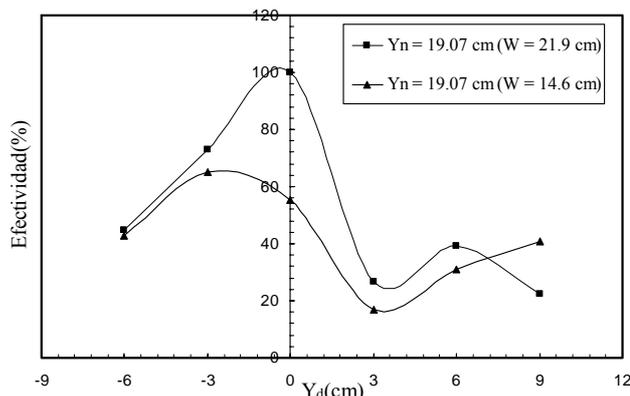


Fig. 12. Efectividad alcanzada con aros de diferente diámetro

En la Fig. 12 se observa que al utilizar el aro de mayor diámetro se alcanza una mayor efectividad. La curva para $W = 21.9$ cm está por encima de la curva para $W = 14.6$ cm, en la mayor parte del rango experimental de Y_d . Para $Y_n = 14.57$ cm se obtuvo que la tendencia de las curvas es muy similar, es decir, la efectividad del aro de mayor diámetro supera en gran medida la efectividad alcanzada con el aro de diámetro menor, con excepción de los puntos extremos de la curva. Cuando se trabaja con profundidades de agua pequeñas, $Y_n = 12.65$ cm, la profundidad de socavación al pie de la pila es muy reducida, por lo que con ambos aros se alcanzan efectividades similares.

En definitiva, se obtiene que a mayor tamaño del aro la profundidad de socavación es menor. Con el fin de mostrar claramente la influencia del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación se presenta la Fig. 13, en la cual se muestran varios perfiles desarrollados con aros de diferente diámetro para la profundidad de flujo y posición del aro constantes.

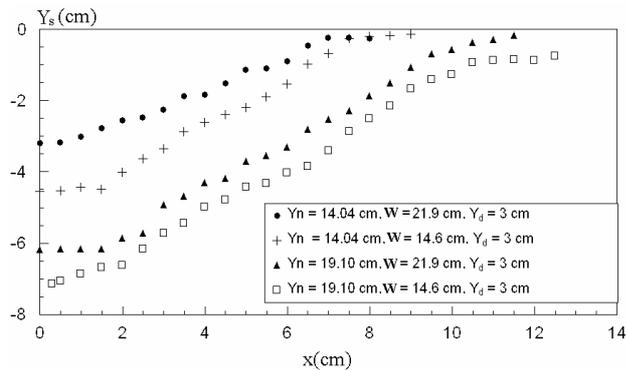


Fig. 13. Influencia del tamaño del aro sobre la profundidad de socavación

En la Fig. 14 se presentan varios perfiles adimensionales \$Y_s/Y_{sm}\$ contra \$x/X_{Y_{sm}/2}\$ con el aro de mayor diámetro ubicado en las diferentes posiciones \$Y_d\$, incluyendo el experimento de referencia. Se obtiene que los perfiles tienen la misma forma. En la Fig. 14, para \$Y_n = 19.42\$ cm aproximadamente, se muestra la semejanza en los perfiles del foso de socavación, aún variando la posición del aro.

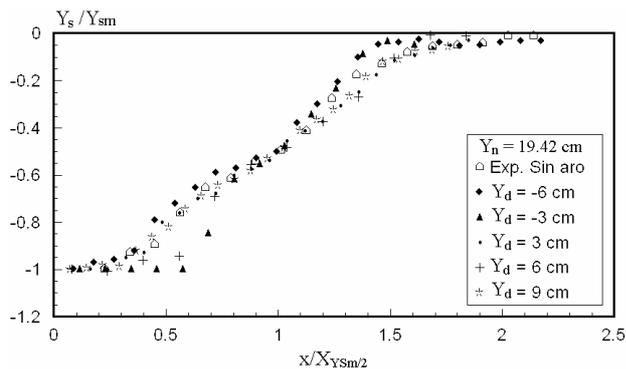


Fig. 14. Perfiles adimensionales del foso de socavación para diferentes posiciones del aro e \$Y_n = 19.42\$ cm

De igual manera, se realizó un gráfico adimensional donde se incluyeron todos los perfiles del foso de socavación obtenidos con la pila de referencia (sin aro) y los obtenidos empleando el aro de protección de diámetro \$W = 14.6\$ cm y el de \$W = 21.9\$ cm. En la Fig. 15 se observa que los perfiles de socavación son de naturaleza similar y que son independientes del tamaño y la posición del aro.

A partir de la información experimental, dada en la Fig. 15, se obtiene una ecuación empírica que se ajusta a todos los puntos experimentales. La relación empírica está dada por la siguiente ecuación

$$\frac{Y_s}{Y_{sm}} = \exp\left(-0.693\left(\frac{x}{X_{Y_{sm}/2}}\right)^2\right) \quad (2)$$

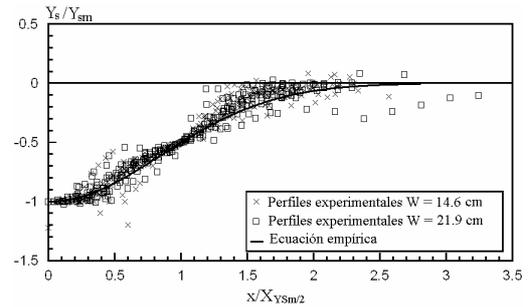


Fig. 15. Perfiles adimensionales donde se incluyen todos los experimentos con y sin dispositivo de protección

donde \$Y_s\$ es la profundidad de socavación a una distancia \$x\$ de la pila, \$Y_{sm}\$ es la socavación máxima obtenida al pie de la pila y \$X_{Y_{sm}/2}\$ es la distancia en la cual se produce la mitad de la profundidad de socavación máxima. Se obtiene que cuando \$x/X_{Y_{sm}/2}\$ se incrementa, la profundidad de socavación \$Y_s/Y_{sm}\$ se reduce. Esto indica que la socavación va disminuyendo al alejarse de la pila, hasta alcanzar el valor de cero.

En el análisis de los datos experimentales, para \$W = 21.9\$ cm, se encontró que a pesar de que el diámetro del aro se incrementa, la tendencia de los parámetros adimensionales es la misma, es decir que, a medida que el número de Froude densimétrico, el número de Reynolds de la pila y el número de Froude se incrementan la relación \$Y_{sm}/D\$ también aumenta. Así mismo, la tendencia de la mayoría de los puntos correspondientes al aro de \$W = 21.9\$ cm es estar por debajo de los del aro de \$W = 14.6\$ cm. Esto permite concluir que el aro de mayor diámetro tiene una mayor efectividad y es capaz de reducir la profundidad de socavación hasta en un 100 %. Esto indica que si el diámetro del aro es mayor, menor será la profundidad de socavación al pie de la pila.

Estudiando el comportamiento de la profundidad máxima de socavación al pie de la pila en función de la velocidad, también se obtiene que a medida que la velocidad se incrementa, la profundidad de socavación aumenta.

5 Conclusiones

- Se obtiene que para el aro de diámetro \$W = 14.6\$ cm, ubicado en \$Y_d = 0\$ cm, se logra reducir la profundidad de socavación entre 55.24 % y 96.54 % dependiendo de la profundidad de flujo. Esta es la posición óptima. La efectividad del aro también es alta cuando éste se encuentra ubicado por debajo del lecho. Así, se tiene que para \$Y_d = -3\$ cm, la efectividad estuvo entre 65.12 % y 95.03 %, y para \$Y_d = -6\$ cm entre 42.86 % y 93.19 %. De igual forma para el aro ubicado en \$Y_d = 3\$ cm, la efectividad estuvo entre 30.71 % y 87.18 %, para \$Y_d = 6\$ cm entre 30.95 % y 74.48 %, y para \$Y_d = 9\$ cm se tiene que la efectividad del aro está entre 40.71 % y 80.72 %.
- La profundidad de socavación se reduce considerablemente cuando se utiliza el aro de diámetro \$W = 21.96\$ cm

ubicado en el lecho ($Y_d = 0$ cm), logrando disminuir la profundidad de socavación en un 100%. Para las posiciones del aro por debajo del lecho, la efectividad estuvo entre 44.64 % y 93.53 % para $Y_d = -6$ cm y entre 72.86 % y 88.11 % para $Y_d = -3$ cm dependiendo de la profundidad de flujo. De igual manera, la efectividad del aro de diámetro $W = 21.9$ cm fue significativa cuando éste se ubicaba por arriba del lecho. Así, para $Y_d = 3$ cm la efectividad estuvo entre 26.55 % y 85.91%, para $Y_d = 6$ cm entre 39.40 % y 84.76 % y, finalmente, para $Y_d = 9$ cm la efectividad varió entre 22.26 % y 70.90%.

- El mayor efecto del aro contra la socavación local en pilas circulares se logra colocándolo a nivel del lecho, ya que para esta posición la profundidad de socavación se reduce considerablemente.
- Comparando la efectividad del aro de diámetro $W = 14.6$ cm con la del aro de diámetro $W = 21.9$ cm, se obtiene que para éste último la efectividad es mayor, lo que indica que el tamaño del aro influye directamente sobre la profundidad de socavación, es decir, a mayor tamaño del aro la profundidad de socavación es menor.
- Cuando se analiza el comportamiento de $Y_{sm(aro)}/Y_{sm(ref)}$ en función de Y_d/Y_n para el caso del aro de menor diámetro con valores de Y_n constante, se obtiene que las curvas tienen la misma tendencia, la cual coincide con la obtenida por Ettema en 1980 y confirmada por Chiew (1992).
- El análisis de los perfiles de socavación adimensionales permitió constatar que la forma de los fosos de socava-

ción es muy similar aún cuando se varía la profundidad de flujo, la posición y el tamaño del aro, es decir, los perfiles son de naturaleza similar.

6 Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento 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

- Breusers HNC, Nicollet G y Shen HW, 1977, Local scour around cylindrical piers, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 211-252.
- Chiew, YM, 1992, Scour protection at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 9, pp. 1260-1269.
- Lauchlan CS y Melville BW, 2001, Riprap protection at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 412-418.
- Maza AJ y Sánchez JL, 1966, Socavación y protección al pie de pilas de puente. II Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Caracas, Venezuela, Vol. 1, pp. 91-107.
- Posey CJ, 1974, Tests of scour protection for bridge piers, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 100, No. HY12, pp. 1773-1783.