

Ensayo de diferentes métodos de protección contra la socavación local en pilas cuadradas

Testing of different protection methods against local scour at square piers

Moncada-Moreno, Alix*; Molina, Omar; Suárez, Ambrosio

Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA), Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela
moncada.alix@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta un estudio experimental sobre el efecto producido por diferentes métodos de protección para reducir la socavación local en pilas cuadradas. Se usó arena uniforme con diámetro medio de 1.4 mm como material de fondo y una pila cuadrada de 5 cm de ancho. Entre los métodos propuestos se consideró generar rugosidad en la superficie de la pila usando una cadena enrollada en la pila y pegando elementos cúbicos en las caras de la pila. Además, se usaron varios dispositivos colocados aguas arriba de la pila: una pantalla perpendicular al flujo, pilas de sacrificio circulares con una configuración triangular y pilas de sacrificio planas, dispuestas en diferentes configuraciones. Para cada experimento, se obtuvo el perfil del foso de socavación en el eje de cada lado de la pila. Esto permitió determinar la profundidad de socavación máxima. Se alcanzó una efectividad de 32.65 % en el caso del uso de la cadena y de 28.89 % con el uso de elementos cúbicos pegados en la superficie de la pila. Se encontró que el efecto de la pantalla se incrementa con el aumento de la separación entre la pila y la pantalla. Sin embargo, hay una separación a partir de la cual el efecto de la pantalla es despreciable. Se obtuvo que a mayor altura del grupo de pilas de sacrificio circulares se logra mayor efectividad. Se encontró que para la mayor altura H igual a 11.67 cm, se alcanzó la mayor efectividad igual a 42.96 %. Usando pilas de sacrificio planas, se obtuvo la mayor efectividad con el arreglo geométrico del mayor número de pilas.

Palabras claves: Socavación en pilas cuadradas, fosos de socavación, reducción de la socavación local, rugosidad en la pila, pantalla y pilas de sacrificio como métodos de protección.

Abstract

This paper presents an experimental study on the effects produced by different protection methods for reducing local scour at square piers. Uniform sand with a median particle size of 1.4 mm was used as bed material and a square pier of 5 cm wide. Among the proposed methods, it was considered to generate roughness on the surface of the pier using a chain wound on the pile and sticking cubical elements on the sides of the pile. Furthermore, several devices placed upstream of the pier were used: a vertical wall perpendicular to flow, circular sacrificial piles arranged in a triangular configuration and flat sacrificial piles, arranged in different configurations. For each experiment, the scour hole profile was obtained on the axis of each side of the pile. This allowed determining the maximum scour depth. An efficiency of 32.65% was reached in the case of the use of the chain and of 28.89% with the use of cubical elements stuck on the surface of the pile. It was found that the effect of the vertical wall increases with increasing space among the pier and the vertical wall. However, there is a separation from which the effect of the vertical wall is negligible. It was obtained that for larger height of the group of circular sacrificial piles, the greater efficiency was achieved. It was found that for the largest height H equal to 11.67 cm, the greatest efficiency equal to 42.96% was reached. Using flat sacrificial piles, the greatest efficiency was obtained with the geometric arrangement of the largest number of piles.

Key words: Scour at square piers, scour holes, reduction of local scour, pier roughness, vertical wall and sacrificial piles as protection methods.

1 Introducción

La necesidad de tener vías de comunicación ha llevado al hombre a trabajar en la evolución de los puentes, ya que en una red de infraestructura vial son elementos fundamentales para el buen funcionamiento social y económico de una sociedad. Las estadísticas demuestran que la principal causa del colapso de puentes construidos en cauces aluviales, radica en la acción erosiva del agua que se presenta en el cauce en épocas de inundaciones o grandes crecidas. Siendo la socavación un problema de gran interés de estudio y aunado a ello la importancia económica y social que se ve involucrada al momento del colapso de un puente, lleva a la interrogante de cómo se puede prevenir el colapso de puentes bajo este fenómeno. Esta investigación propone ensayar diferentes métodos de protección contra la socavación local en pilas de puentes a partir de la evaluación de los factores que originan dicho fenómeno.

Se determinará la profundidad de socavación en pilas cuadradas, sin protección, para diferentes profundidades de flujo, con el fin de obtener datos de referencia, que permitan comparar resultados con los obtenidos en los diferentes métodos propuestos para reducir la socavación local. Se estudiará el efecto causado por rugosidades incorporadas a la pila, representadas por una cadena enrollada en la pila y por elementos con forma de cubos adheridos a las caras de la pila. Se ensayará el uso de una pantalla perpendicular al flujo, colocada frente a la pila y se analizará el efecto causado por el empleo de pilas de sacrificio dispuestas aguas arriba de la pila, construidas con cabilla corrugada y láminas lisas. Además, se comparará la efectividad alcanzada con los métodos propuestos para reducir la socavación en pilas de puentes, contribuyendo a la construcción de estructuras más seguras, disminuir riesgos de fallas y garantizar el funcionamiento adecuado.

2 Antecedentes

El patrón de flujo y los mecanismos de socavación alrededor de la pila de un puente son muy complejos y han sido reportados en varios estudios. La magnitud del problema ha motivado a los investigadores a desarrollar fórmulas confiables para estimar la profundidad de socavación máxima y también para reducir el impacto de la socavación local sobre la estructura de puentes. La comparación de las diversas ecuaciones permite mejorar la precisión en la predicción de la profundidad de socavación máxima en pilas de puentes e incrementar la confianza en el diseño del puente (Moncada, 2018).

Durante muchas décadas la profundidad de socavación local alrededor de pilas ha sido estudiada extensivamente y ha existido interés en encontrar maneras confiables para reducirla. Según Melville y Hadfield (1999), las pilas de sacrificio son pilas colocadas aguas

arriba de la pila del puente, con el fin de protegerla contra la socavación. Éstas protegen la pila desviando el flujo de alta velocidad, creando una región de vórtices de estelas detrás de ellas. Ellos encontraron que las pilas de sacrificio sumergidas eran ligeramente más eficientes, que pilas de profundidad completa, en la mayoría de los ensayos. No recomiendan las pilas de sacrificio a menos que el flujo se mantenga alineado y la intensidad del flujo sea relativamente pequeña.

Kumar y col. (1999) estudiaron el uso de ranuras y collares en las pilas para reducir la socavación local, bajo condiciones de flujo de agua clara y tamaño uniforme de sedimentos. Determinaron la efectividad alcanzada usando ranuras de diferentes longitudes y alineadas en diferentes ángulos con el flujo. También investigaron la reducción de la socavación mediante la colocación de collares circulares, de diferentes tamaños y a diferentes elevaciones. Según estos investigadores, una ranura resulta efectiva para reducir la socavación, particularmente si la ranura se extiende en el fondo. Sin embargo, la ranura es prácticamente ineficaz si el flujo de aproximación tiene una alta oblicuidad respecto a la ranura. Encontraron que collares de diámetro mayor en el fondo o más cerca del fondo son más efectivos.

Subhasish y col. (2006) determinaron la efectividad de cables enrollados de manera helicoidal en pilas circulares, con el fin de controlar la profundidad de socavación al pie de la pila. Probaron 3 combinaciones de pila cubierta con un cable enrollado, denominados simple, doble y triple, respectivamente. Obtuvieron que la reducción de la profundidad de socavación máxima obtenida era de 46.3 %, usando cables con la configuración triple, con un ángulo de 15° y diámetro del cable de 0.1D (D diámetro de la pila). Encontraron que la profundidad de socavación disminuye con el aumento del diámetro del cable y el número de vueltas dispuestas en la superficie de la pila. Además, observaron que el ángulo de rosca del cable tiene un papel significativo sobre la reducción de la profundidad de socavación.

Según Zarrati y col. (2006), el objetivo del estudio era determinar la eficiencia de la aplicación de collares continuos o independientes en la reducción de la socavación en grupos de pilas de puentes, así como también investigar el rendimiento de la combinación de collares continuos y enrocados para pilas alineadas con el flujo. El estudio consideraba los efectos de los collares en diferentes arreglos en grupos de pilas de puentes, bajo condiciones de agua clara, sin transporte de sedimentos. Realizaron pruebas en un grupo de 2 pilas, en 2 arreglos diferentes, en línea con el flujo o alineados transversalmente. Colocaron los collares al nivel inicial del lecho. Los collares más anchos eran más efectivos, pero la construcción de collares con un ancho superior a 3 veces el diámetro de la pila no era viable.

3 Procedimiento experimental

Se utilizó un canal de 8 m de largo, 0.50 m de ancho y 0.50 m de alto. El canal tiene un fondo falso de altura 0.15 m, aguas arriba y aguas abajo de la sección de estudio. En esta sección, de 1.10 m de largo, se colocó un material no cohesivo de granulometría conocida y la pila a ensayar. La pendiente del canal se fijó para los ensayos en 0.5 %. El caudal se midió con un vertedero rectangular de pared delgada. El modelo de pila cuadrada, de ancho $b = 5$ cm, se construyó en madera. Ésta se ubicó en la parte central de la sección de estudio, la cual se rellenó completamente con arena uniforme de diámetro medio igual a 1.4 mm, hasta enrasar la superficie de arena con la superficie del fondo falso. Una vez compactada la superficie granular, se medían las cotas del terreno, mediante el uso de un limnómetro.

Preparada la instalación experimental, se abría lentamente la válvula que permitía el flujo de agua al canal, hasta alcanzar la profundidad del flujo Y_n deseada en el experimento. Luego, se procedía a medir las cotas de la superficie del agua. Los experimentos se llevaron a cabo hasta alcanzar el estado de equilibrio de la socavación. Posteriormente, después de que escurriera totalmente el agua, se procedía a medir el foso de socavación en el eje de las caras de aguas arriba, aguas abajo, izquierda y derecha de la pila. La medición de la profundidad de socavación se realizó cada 1 cm, mediante el uso del limnómetro, como se observa en la Fig.1. Finalizadas las mediciones, se preparaba el fondo de material granular y se repetía el proceso.

Inicialmente, con la pila sin protección, se realizaron ensayos para diferentes profundidades del flujo Y_n . Esto con el fin de obtener datos de referencia que permitieran comparar resultados con los métodos de protección propuestos. Se obtuvieron los fosos de socavación para las diferentes profundidades Y_n consideradas.



Fig.1. Foso de socavación en pila cuadrada

Posteriormente, para el ensayo de los diferentes métodos de protección, se trabajó con una profundidad del flujo representativa, considerada en los experimentos con la pila sin protección, e igual a $Y_n = 18.25$ cm, que originaba las condiciones experimentales deseadas.

Con el fin de reducir la profundidad de socavación al pie de la pila, se propusieron los siguientes métodos:

Rugosidades incorporadas a la pila

Teniendo en cuenta que la socavación local alrededor de una pila es en parte el resultado del flujo descendente en las caras de la pila, se decidió estudiar el efecto de dos tipos de rugosidades incorporadas a la pila. Esto con la finalidad de aumentar la rugosidad, de manera de debilitar y posiblemente prevenir la formación del flujo descendente y el vórtice de herradura. Inicialmente, se estudió el efecto producido por una cadena metálica enrollada en la pila con una separación uniforme, aproximadamente de 5 mm, fijada a la pila mediante sujetadores, como se observa en la Fig. 2.

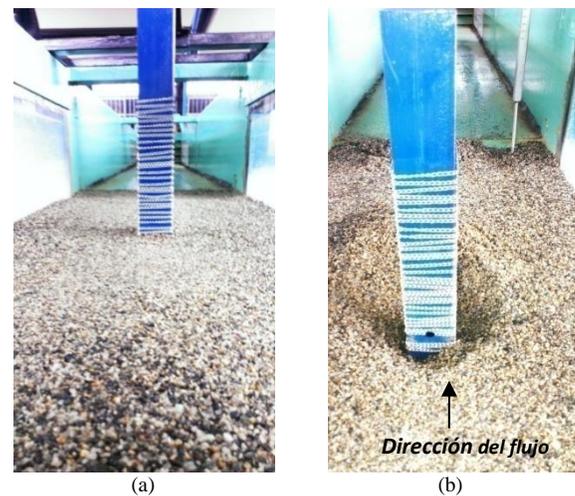


Fig. 2. Cadena enrollada en la pila: a) Fondo granular inicial, b) Foso de socavación desarrollado

Luego, se estudió el efecto de otro tipo de rugosidad. Ésta se generó mediante la incorporación de elementos cúbicos de 5 mm de arista, adheridos con pegamento a la superficie de la pila, siguiendo una disposición uniforme, como se muestra en la Fig. 3.

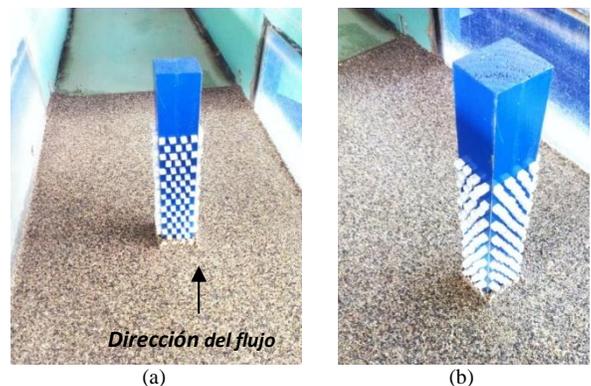


Fig. 3. Rugosidad representada por elementos cúbicos adheridos a la superficie de la pila: a) Vista frontal, b) Vista lateral

Pantalla (placa vertical)

Esta medida de protección consistió en colocar una pantalla (placa o lámina vertical) aguas arriba de la pila y perpendicular al flujo, lo que produce que las líneas de corriente sean afectadas por la pantalla y no por la pila. Con esto se logra la desviación del flujo aguas arriba de la pila. Se genera un foso de socavación en la pantalla. El material arrancado del pie de la pantalla se transporta y deposita alrededor de la pila, originando relleno. La pantalla, de 22 cm de largo y 5 cm de ancho, se construyó con lámina de hierro de 1 mm de espesor.

La pantalla de protección se colocó perpendicular a la dirección del flujo. Los valores de separación s entre la pila y la pantalla variaron ($s = 1b$, $1.5b$ y $2b$, donde $b = 5$ cm), tal como se ilustra en la Fig. 4.

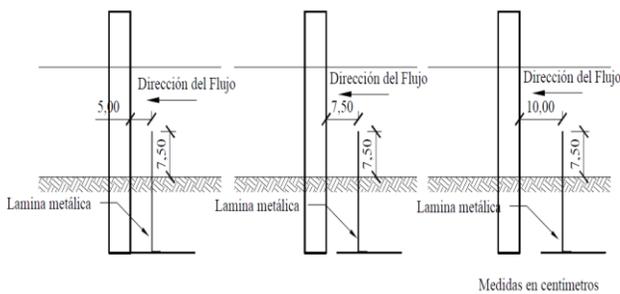


Fig. 4. Variación de la posición de la pantalla (lámina vertical)

La profundidad de la placa vertical con respecto al fondo granular se mantuvo constante para todos los experimentos e igual a 7.5 cm. En la Fig. 5 se muestra la ubicación de la placa con respecto a la pila.

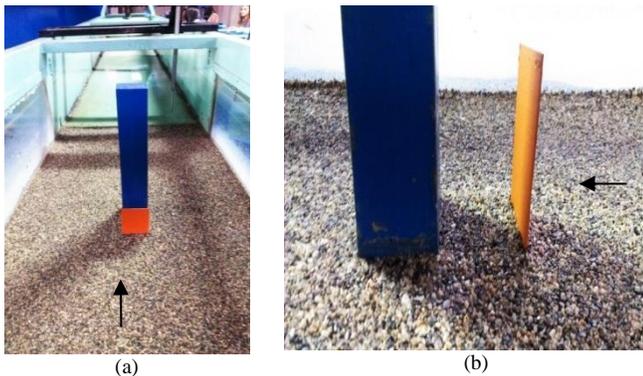


Fig. 5. Posición de la placa vertical: a) Vista frontal, b) Vista lateral

Pilas de sacrificio circulares

Las pilas de sacrificio consisten en un grupo de pilas que se ubican aguas arriba de la pila en estudio, con el fin de protegerla contra la socavación local, desviando el flujo y originando una región de vórtices de estelas detrás de ellas. Estas pilas se construyeron con 6 cabillas corrugadas de diámetro $3/8''$, dispuestas en forma triangular sobre una base de madera, como se presenta en la Fig. 6.

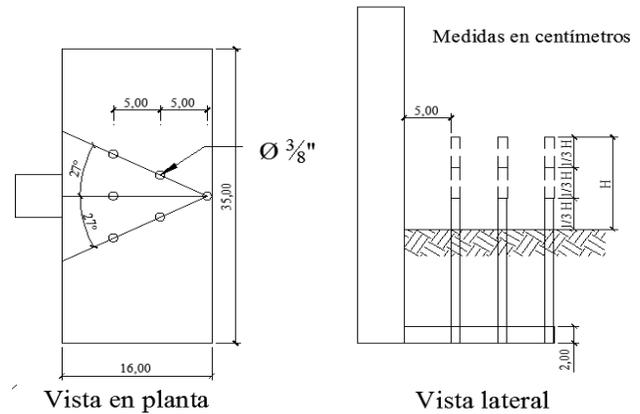


Fig. 6. Esquema de las pilas de sacrificio circulares

Para estudiar el efecto producido por la variación de la altura H de las pilas de sacrificio, se realizaron 3 experimentos variando la altura H del grupo de cabillas. La variación de la altura H se logró cortando las cabillas a razón de, aproximadamente, $1/3 H$, donde la altura inicial H era de 11.67 cm. Así, se logró una altura variable de 11.67, 7.85 y 4.47 cm. La configuración triangular de las pilas de sacrificio se mantuvo constante para todos los ensayos, a 5 cm aguas arriba de la pila en estudio, como se observa en la Fig. 7.

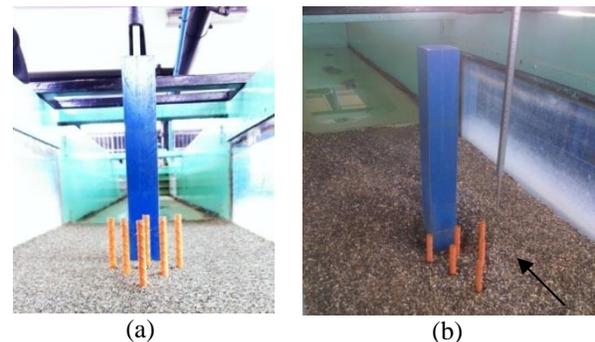


Fig. 7. Disposición del grupo de pilas de sacrificio: a) Vista frontal del fondo original, b) Vista lateral del fondo socavado

Pilas de sacrificio planas

Se utilizó otro grupo de pilas, construidas con láminas de metal liso de espesor 1 mm, ancho $a = 2$ cm y longitud de 25 cm, dobladas en la parte inferior, con el fin de fijar las láminas a una base de madera, mediante tornillos de punta, los cuales permitían disponer las pilas en cualquier configuración. La configuración del grupo de pilas, dispuestas de forma triangular, se realizó tomando arcos de circunferencia centrados en la cara de aguas arriba de la pila.

Se realizaron 5 ensayos. En los 3 primeros experimentos se decidió variar la altura H del grupo de pilas de sacrificio con respecto al fondo granular. Esta variación se llevó a cabo de igual manera que la realizada en las pilas de sacrificio circulares, cortando las láminas a razón de $1/3$ de la altura inicial, aproximadamente. Se

inició con la altura H igual a 13.2 cm. Así, se obtuvo una altura variable H de 13.20, 9.75 y 6.56 cm.

Posteriormente, con el fin de estudiar el comportamiento de diferentes configuraciones, se decidió fijar la altura H y eliminar algunas pilas de sacrificio de forma progresiva, como se ilustra en la Fig. 8.

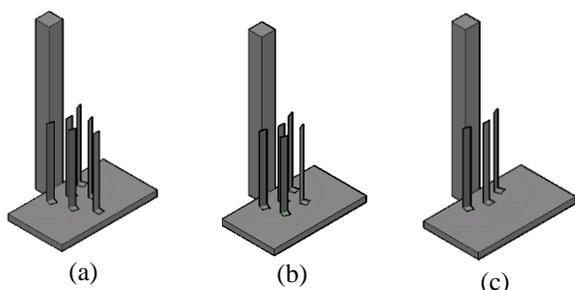


Fig. 8. Distintas configuraciones de pilas de sacrificio (láminas lisas): a) Configuración I, b) Configuración II, c) Configuración III

4 Presentación y análisis de resultados

En esta investigación se realizó un estudio experimental con el fin de reducir la profundidad de socavación al pie de la pila cuadrada, ensayada bajo condiciones de flujo de agua clara. Para ello, inicialmente, se llevaron a cabo 7 experimentos de referencia, sin ningún método de protección, variando la profundidad del flujo Y_n entre 10.00 y 20.04 cm, y el caudal entre 8.925 y 37.614 l/s. Para estos valores de profundidad y caudal, la velocidad media V varió entre 0.1785 y 0.375 m/s, el número de Froude F entre 0.180 y 0.268 y se alcanzó una profundidad de socavación máxima Y_{smax} al pie de la pila, en el eje de la cara de aguas arriba, de 1.58 y 9.29 cm, respectivamente.

Se observó que a mayor profundidad del flujo Y_n , aumentaba el tamaño del foso de socavación en las caras de aguas arriba, izquierda y derecha de la pila. Sin embargo, en la cara de aguas abajo, para algunos valores de Y_n , se presentó un comportamiento diferente, caracterizado por el depósito de material. En la Fig. 9 se presentan los perfiles de socavación desarrollados, para diferentes profundidades del flujo Y_n , en el eje de la cara de aguas arriba de la pila.

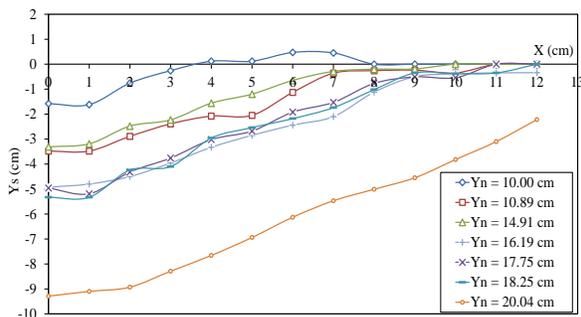


Fig. 9. Perfiles de socavación para diferentes profundidades del flujo Y_n

Se observa que a medida que aumenta la profundidad del flujo Y_n , se incrementa el tamaño del foso de socavación. Se obtuvo que los fosos de socavación en las caras laterales, izquierda y derecha, y en la cara de aguas abajo de la pila eran de menor tamaño. En la Fig. 10 se muestra la relación adimensional entre la profundidad de socavación máxima al pie de la pila Y_{smax}/b , en la cara de aguas arriba, y la profundidad del flujo Y_n/b . Se observa que a mayor profundidad del flujo, la profundidad de socavación máxima se incrementa.

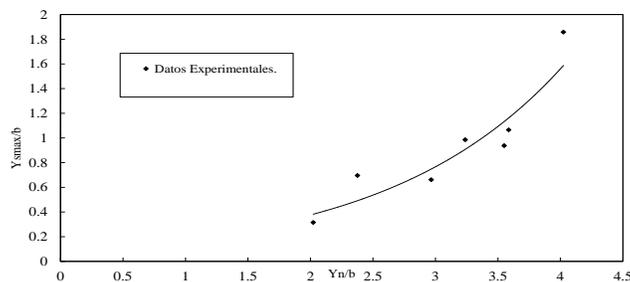


Fig. 10. Variación de la profundidad de socavación máxima con la profundidad del flujo

Posteriormente, se ensayaron los diferentes métodos de protección propuestos. En los experimentos, se trabajó con una profundidad del flujo Y_n constante e igual a 18.25 cm.

Ensayo usando una cadena enrollada en la pila

Con el fin de aumentar la rugosidad y así reducir el potencial de socavación del flujo descendente en las caras de la pila, se empleó una cadena enrollada en la pila. En la Fig. 11 se compara el perfil de socavación desarrollado con la pila sin protección, en el eje de la cara de aguas arriba, con el obtenido mediante el uso de la cadena. Se observa que los perfiles son semejantes.

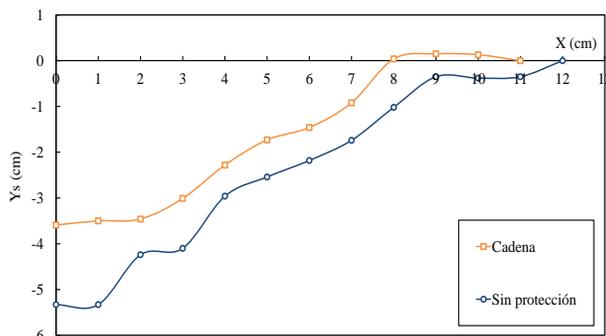


Fig. 11. Perfiles de socavación obtenidos con la pila sin protección y con el uso de la cadena enrollada en la pila, cara aguas arriba

La Fig. 11 muestra que la cadena empleada como dispositivo para generar rugosidad en la pila y, por lo tanto, disminuir la fuerza de impacto en el fondo del flujo descendente, cumple con el propósito. Se observa una

reducción razonable en el tamaño del foso de socavación. Se evidencia que la rugosidad generada por la cadena reduce la profundidad de socavación al pie de la pila. En las caras laterales izquierda y derecha se alcanzó un comportamiento muy similar, pero se evidenció un efecto mayor en cuanto a la reducción de la socavación. En la cara de aguas abajo, el efecto de la cadena era mayor cerca de la cara de la pila, ya que se producía relleno.

Ensayo con elementos cúbicos adheridos a la pila

Siguiendo con los ensayos para incrementar la rugosidad en la pila, se usaron elementos con forma de cubos, pegados en la superficie de la pila. En la Fig. 12 se aprecia el perfil de socavación desarrollado en el eje de la cara de aguas arriba empleando los elementos cúbicos y el obtenido con la pila sin protección.

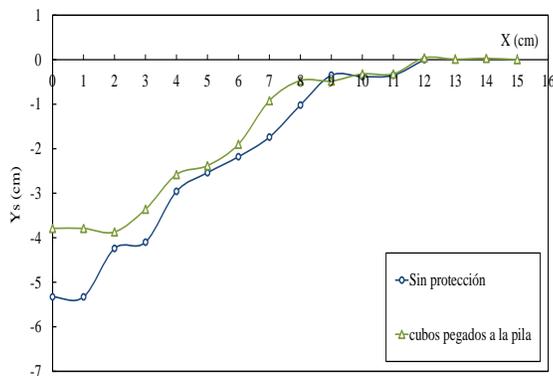


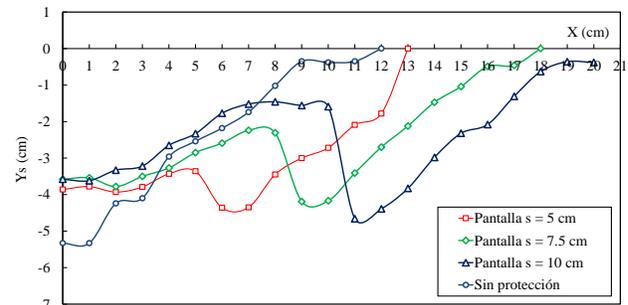
Fig. 12. Perfiles de socavación desarrollados con la pila sin protección y con el uso de elementos cúbicos pegados en la pila, cara aguas arriba

Se observa que el perfil de socavación generado con la rugosidad incorporada en la pila, mediante el uso de los elementos cúbicos, es de forma similar al perfil desarrollado con la pila sin protección. Se muestra que ocurre reducción en el tamaño del foso de socavación. En la cara de aguas abajo se producía acumulación de material a lo largo de la sección de estudio, originando relleno.

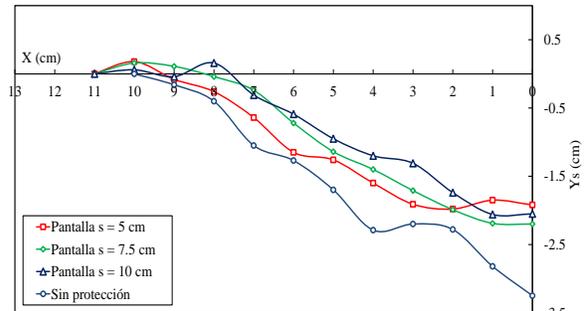
En las caras laterales de la pila se encontró semejanza en cuanto a la forma de los perfiles del foso de socavación, cuando se comparan con el perfil desarrollado con la pila sin protección. Además, en estas zonas se encontró mayor efectividad del método propuesto.

Ensayo utilizando una pantalla aguas arriba de la pila

Se empleó una pantalla perpendicular al flujo, colocada aguas arriba de la pila. Se varió, en cada experimento, la separación entre la pila y la pantalla, $s = 5, 7.5$ y 10 cm. En la Fig. 13 se observan los perfiles de socavación desarrollados empleando la pantalla (placa vertical), colocada en diferentes posiciones aguas arriba de la pila, y el obtenido con la pila sin protección.



(a)



(b)

Fig. 13. Perfiles de socavación obtenidos con la pila sin protección y con el uso de la pantalla: a) Cara aguas arriba, b) Cara lateral izquierda

En la Fig. 13a se muestra que la pantalla modifica la forma de los perfiles de socavación de aguas arriba. En este estudio, se obtuvo que al aumentar la separación s se logra mayor reducción de la socavación en la cercanía de la pila. Se observó que se depositaba al pie de la pila mayor cantidad de material proveniente de la socavación originada en la pantalla, generando mayor relleno. Sin embargo, se observa que el foso de socavación es de mayor extensión. Además, se encontró que para $s > 7.5$ cm, la profundidad de socavación máxima $Y_{s\max}$ no se ve alterada y, por lo tanto, el efecto de la pantalla sobre la socavación, ocurrida muy cerca de la pila, es despreciable.

Se obtuvo que, en las caras laterales izquierda y derecha de la pila, la forma de los fosos de socavación no se ve alterada con el uso de la pantalla, como se evidencia en la Fig. 13b. En estas zonas, se encontró también que al aumentar la separación s disminuye el tamaño del foso de socavación. Se observó que en la sección de aguas abajo de la pila se producía acumulación de sedimento, generando una condición de relleno a lo largo de la sección de estudio.

En la Fig. 14 se muestra un gráfico adimensional de $Y_{s\max}/b$ en función de s/b , en el que se relaciona la profundidad de socavación máxima, en la sección de aguas arriba, con la separación s . Se evidencia que al aumentar la distancia s la profundidad de socavación disminuye, pero a partir de un cierto valor de s , el efecto es despreciable.

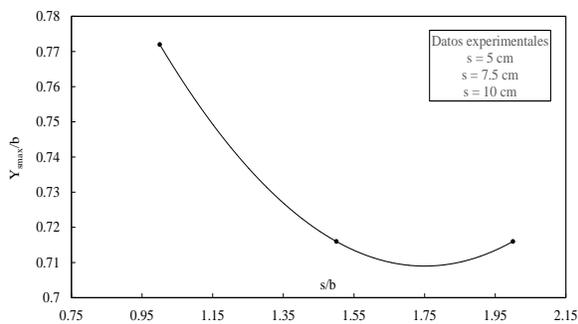
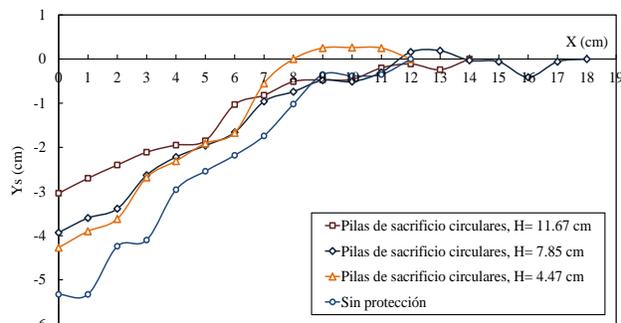


Fig. 14. Variación de la profundidad de socavación con la separación s

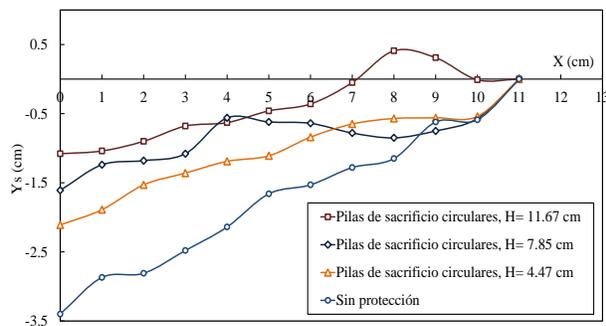
Ensayo usando pilas de sacrificio circulares

Inicialmente, se decidió utilizar pilas de sacrificio circulares modeladas con 6 cabillas corrugadas de diámetro $\Phi = 3/8"$, dispuestas en forma triangular. Se varió la altura H del grupo de pilas de sacrificio cortando las cabillas. Se trabajó con alturas H igual a 11.67, 7.85 y 4.47 cm. En cada experimento, se mantuvo la misma altura H para el grupo de pilas.

En la Fig. 15 se aprecia el perfil de socavación generado con la pila sin protección y los perfiles obtenidos empleando pilas de sacrificio circulares, variando la altura H del grupo de pilas. La reducción de la socavación y, por lo tanto, del tamaño del foso de socavación depende de la altura H. Se obtiene que para valores mayores de H se alcanza mayor reducción en la profundidad de socavación.



(a)



(b)

Fig. 15. Perfiles de socavación con la pila sin protección y con el uso de las pilas de sacrificio: a) Cara aguas arriba, b) Cara lateral derecha

En la Fig. 15a y b se observa que a mayor altura H se tiene menor profundidad de socavación y, por lo tanto, se alcanzará mayor efectividad. Se obtuvo que en la cara de aguas abajo ocurría acumulación de material en las proximidades de la pila. Se visualiza que la presencia de las pilas de sacrificio circulares no modifica la forma del perfil de socavación, cuando se compara con el obtenido con la pila sin protección, es decir, los perfiles son semejantes.

Con el fin de comparar el efecto de la altura H sobre la reducción de la socavación, en la Fig. 16 se muestra un gráfico adimensional, Y_{smax}/b en función de H/b , en el que se relaciona la profundidad de socavación máxima, aguas arriba, al pie de la pila con la altura del grupo de pilas de sacrificio. Se obtiene que al aumentar la altura H del grupo de pilas, la profundidad de socavación máxima disminuye.

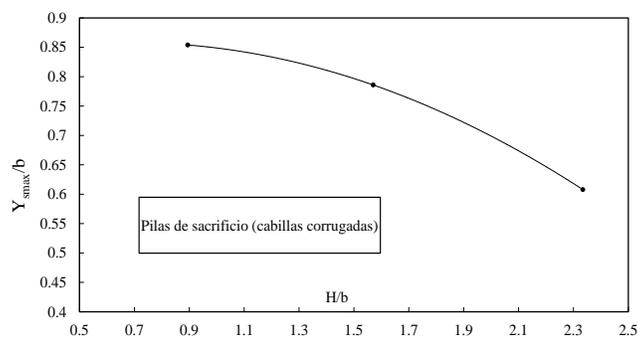
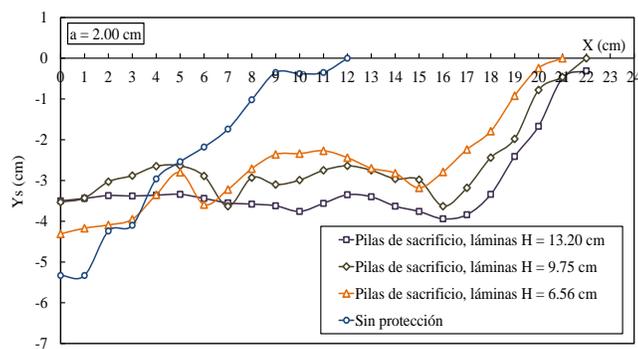


Fig. 16. Variación de la profundidad de socavación máxima con la altura del grupo de pilas de sacrificio

Ensayo utilizando pilas de sacrificio planas

Posteriormente, las pilas de sacrificio planas se modelaron con láminas verticales lisas de ancho $a = 2.00$ cm, dispuestas en forma triangular, aguas arriba de la pila, como se indicó previamente. Para variar la altura H se fueron cortando también el grupo de láminas. Se alcanzaron alturas de 13.2, 9.75 y 6.56 cm. En la Fig. 17 se ilustra el perfil de socavación desarrollado con la pila sin protección y los perfiles obtenidos usando las pilas de sacrificio planas, para las diferentes alturas H.



(a)

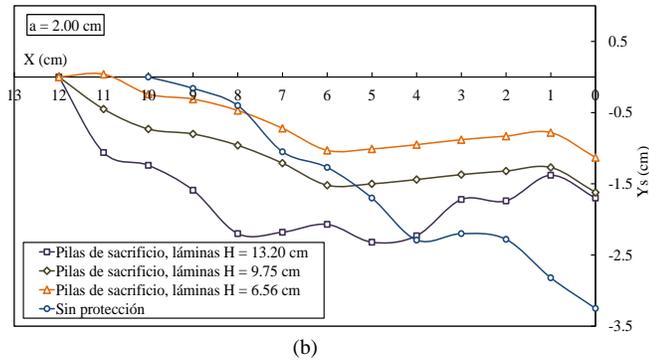


Fig. 17. Perfiles de socavación con la pila sin protección y con el uso de las pilas de sacrificio: a) Cara aguas arriba, b) Cara lateral izquierda

En la Fig. 17a, caras aguas arriba, se muestra que el empleo de láminas verticales lisas como pilas de sacrificio reduce la profundidad de socavación máxima al pie de la pila. Sin embargo, no está claro el efecto de la altura de las láminas. Se evidencia un aumento importante en el tamaño de los fosos de socavación y una variación considerable en su forma, cuando se comparan con el desarrollado en la pila sin protección. Se encontró que a medida que la altura H del grupo de láminas disminuye, la profundidad de socavación máxima, en la cara de aguas arriba, se incrementa. Sin embargo, se debe recalcar que este comportamiento de la profundidad de socavación solamente ocurrió muy cerca de la pila. Lejos de la cara de aguas arriba, el tamaño del foso de socavación aumentaba con el incremento de la altura H .

Se observó un comportamiento diferente al obtenido con las pilas de sacrificio circulares. Se encontró que, en las caras laterales izquierda y derecha, los fosos de socavación disminuían en tamaño a medida que se fueron cortando las láminas, es decir, a medida que la altura H iba disminuyendo, como se visualiza en la Fig. 17b. En la cara de aguas abajo ocurría acumulación de material, que disminuía a medida que se cortaban las láminas.

Ensayo con diferentes configuraciones de pilas de sacrificio planas

En esta etapa, se utilizaron las pilas de sacrificio planas, manteniendo la altura constante, $H = 6.56$ cm, para el grupo de pilas. Se emplearon 3 configuraciones diferentes denominadas conf. I, II y III. Inicialmente, se empleó el grupo total de 6 pilas (conf. I). Luego se quitó una pila, manteniendo en el grupo 5 láminas (conf. II), 3 en la primera fila y 2 en la siguiente y, finalmente, con 3 láminas (conf. III) en la primera fila, como se mostró en la Fig. 8. En la Fig. 18 se aprecian los perfiles de socavación desarrollados empleando diferentes configuraciones de pilas de sacrificio planas y el obtenido con la pila sin protección. En la Fig. 18a se observa que para conf. I, que tiene mayor número de láminas (configuración triangular), el empleo de las pilas de sacrificio planas, entrega una ligera reducción de la socavación muy cerca de la pila. Sin

embargo, se observa que la forma del foso de socavación cambia y es de mayor extensión. Se observó que parte del material removido en las cercanías de las pilas de sacrificio era transportado y depositado alrededor de la pila.

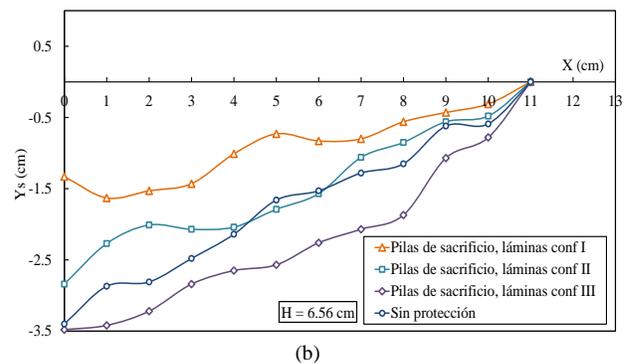
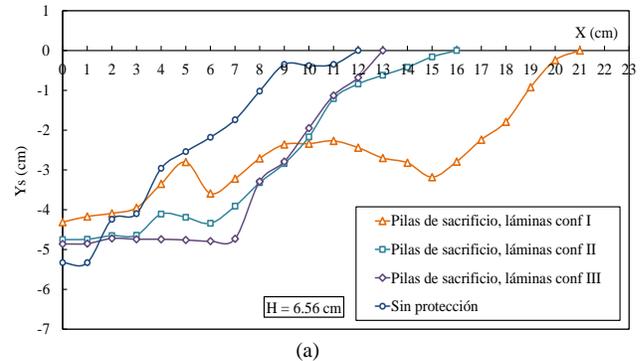


Fig. 18. Perfiles de socavación con la pila sin protección y con el uso de las pilas de sacrificio: a) Cara aguas arriba, b) Cara lateral derecha

Se desarrollan grandes fosos de socavación en las inmediaciones de las pilas de sacrificio planas. Cabe destacar que para la conf. III, provista con solo tres pilas de sacrificio planas, en las caras laterales se desarrollaron perfiles de socavación mayores que el obtenido en la pila sin protección, como se observa en la Fig. 18b, lo cual indica que esa disposición de las pilas de sacrificio planas es deficiente y no entrega protección a pila.

Se concluye que la mejor configuración es la que corresponde al grupo de 6 láminas. Sin embargo, se debe recalcar que aguas arriba, esta configuración genera un foso de socavación de forma diferente y de mayor extensión debido a la socavación que ocurre en las inmediaciones de un mayor número de pilas de sacrificio; y el efecto alcanzado es sólo ligeramente mayor que el logrado con las otras configuraciones. Se obtuvo que en las caras laterales, ver Fig. 18b, la configuración triangular (conf. I) generaba mayor reducción de la socavación y los fosos de socavación eran de menor tamaño que el obtenido con la pila sin protección. En esta zona, la forma de los fosos de socavación no cambia con el uso de las pilas de sacrificio planas.

Efectividad de los métodos de protección

Para cuantificar la efectividad E que ofrecen los métodos de protección contra la socavación local en pilas, se empleó la ec. 1, que relaciona la reducción de la profundidad de socavación respecto a la profundidad de socavación obtenida sin ningún método de protección

$$E = \left| \frac{Y_{s\text{máx ref.}} - Y_{s\text{máx mét.}}}{Y_{s\text{máx ref.}}} \right| 100 \quad (1)$$

donde $Y_{s\text{máx mét.}}$ es la profundidad de socavación máxima alcanzada, en el eje de la cara de aguas arriba de la pila, con el método propuesto y $Y_{s\text{máx ref.}}$ es la profundidad de socavación máxima al pie de la pila sin protección.

Para la comparación, se empleó el experimento de referencia (pila sin protección), con la profundidad del flujo $Y_n = 18.25$ cm, en el cual se alcanzó la profundidad de socavación máxima $Y_{s\text{máx ref.}}$, en el eje de la cara de aguas arriba, igual a 5.33 cm. En la Fig. 19 se muestra la efectividad alcanzada estableciendo rugosidades en la pila, mediante el uso de una cadena enrollada en la pila y de la incorporación de elementos cúbicos de 5 mm de arista, pegados en la superficie de la pila.

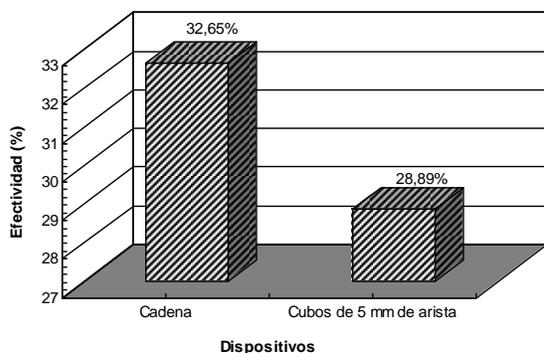


Fig. 19. Efectividad alcanzada con rugosidades incorporadas a la pila

En el caso del uso de la pantalla, se encontró que para la separación entre la pila y la pantalla de $s = 5$ cm, se obtuvo una efectividad $E = 27.58$ % y para $s = 7.5$ cm se alcanzó la mayor efectividad igual a 32.83 %. Se obtuvo que el tamaño del foso de socavación disminuye a medida que la separación s entre la pila y la pantalla aumenta y, por lo tanto, mayor será la efectividad. Sin embargo, a partir de un cierto valor de separación s, la pantalla tiene un efecto despreciable.

En la Fig. 20 se presenta un gráfico adimensional que relaciona la efectividad, alcanzada empleando la pantalla, con la separación s. Se obtuvo que a medida que la pantalla se aleja de la pila, mayor será la efectividad.

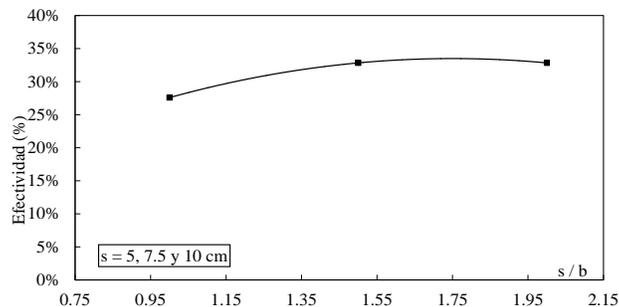


Fig. 20. Relación entre la efectividad y la separación s

En la Fig. 21 se ilustra la efectividad de las pilas de sacrificio circulares en función de la altura H del grupo de pilas. En este estudio, se obtiene que a mayor altura H del grupo de pilas de sacrificio circulares mayor será la efectividad, es decir, se logra una reducción razonable en la profundidad de socavación.

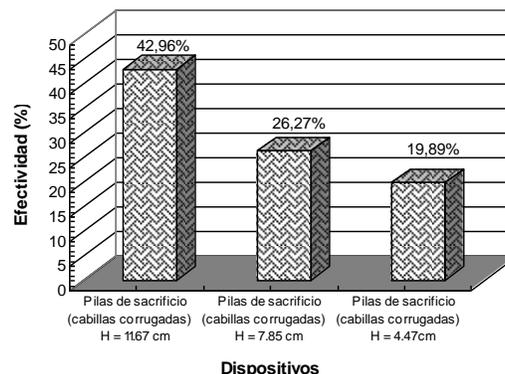


Fig. 21. Efectividad alcanzada usando pilas de sacrificio circulares

En la Fig. 22 se observa que la efectividad del grupo de pilas de sacrificio circulares se incrementa cuando la altura H aumenta, por lo tanto, originan mayor protección.

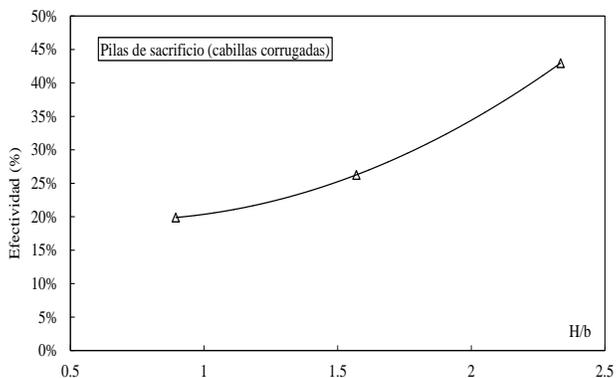


Fig. 22. Relación entre la efectividad y la altura H del grupo de pilas

En la Fig. 23 se presenta la efectividad alcanzada con las pilas de sacrificio planas variando la altura H . Se observa, en la región muy cerca de la cara de aguas arriba de la pila, que a mayor altura de las pilas, mayor será la efectividad. Sin embargo, este comportamiento no ocurrió lejos de aguas arriba de la pila. En las caras laterales, se encontró que al disminuir H disminuye el tamaño del foso de socavación, como se indicó previamente.

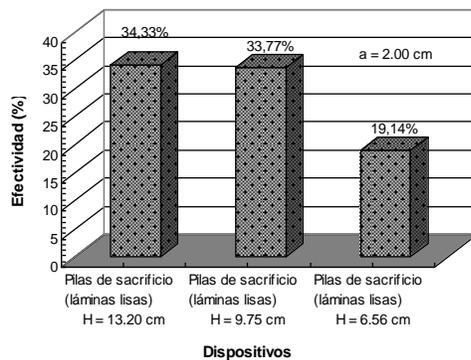


Fig. 23. Efectividad alcanzada con el uso de pilas de sacrificio planas

A partir de los resultados obtenidos, en este estudio, se concluye que las pilas de sacrificio circulares resultan más efectivas que las pilas de sacrificio planas, como medida de protección para la reducción de la socavación. Además, se encontró que los perfiles de los fosos de socavación desarrollados son semejantes y de menor tamaño que el obtenido con la pila sin ningún tipo de protección.

En la Fig. 24 se muestra la efectividad alcanzada variando la configuración de las pilas de sacrificio planas, para una altura H constante. Se observa que la mayor efectividad se logra con la conf. I, configuración triangular, la cual está provista por 6 pilas, es decir, que a mayor número de pilas de sacrificio, se reducirá, en mayor medida, la profundidad de socavación.

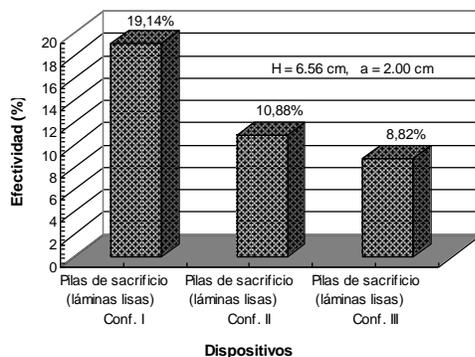


Fig. 24. Efectividad alcanzada con varias configuraciones de pilas de sacrificio planas

5 Conclusiones

Se comprobó que al incorporar rugosidades en la pila, se reduce la profundidad de socavación. Se obtuvieron perfiles de socavación semejantes al compararlos con el perfil desarrollado con la pila sin protección, pero de menor tamaño, es decir, que el aumento de la rugosidad en la pila debilita el flujo descendente y, por lo tanto, disminuye el tamaño del foso de socavación. Se lograron efectividades de 32.65 % con el uso de una cadena enrollada en la pila y de 28.89 % pegando elementos, con forma de cubos, de manera uniforme en la superficie de la pila.

Se determinó que el uso de la pantalla arroja mayor efectividad al aumentar la separación s entre la pila y la pantalla, hasta un cierto valor de s , a partir del cual el efecto de la pantalla era despreciable. Para la separación $s = 7.5$ cm, se logra la mayor efectividad igual a 32.83 %.

Se encontró que la efectividad alcanzada con el uso de pilas de sacrificio circulares, se ve afectada por la altura H del grupo de pilas, es decir, que al aumentar H mayor será la reducción de la profundidad de socavación. Se obtuvo la mayor efectividad, igual a 42.96 %, para la mayor altura $H = 11.67$ cm del grupo de pilas.

Para las pilas de sacrificio planas se encontraron resultados similares en cuanto al efecto de la altura H sobre la profundidad de socavación, en la región muy cerca de la pila, en la cara de aguas arriba. Sin embargo, este comportamiento no ocurrió lejos de aguas arriba de la pila y en las caras laterales, donde al disminuir H disminuía el tamaño del foso de socavación.

Se encontró que las pilas de sacrificio circulares resultan más efectivas que las pilas de sacrificio planas.

Para las diferentes configuraciones de las pilas de sacrificio planas, se alcanzó la mayor efectividad con la configuración provista con el mayor número de pilas (conf. I), dispuestas en forma triangular. Se encontró que usando solamente 3 láminas al frente (conf. III), el foso de socavación es de mayor tamaño, en comparación con el de referencia (pila sin protección). En este caso, el método resulta deficiente como medida de protección.

Referencias

Kumar V, Ranja Raju KG, Vittal N, 1999, Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1302 – 1305.

Melville BW, Hadfield AC, 1999, Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 11, pp. 1221 – 1224.

Moncada AT, 2018, Estudio comparativo de ecuaciones que predicen la socavación local en pilas de puentes con datos de campo y laboratorio, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 39, No. 2, pp. 125-136, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Subhasish D, Mutlu S, Jorgen F, 2006, Control of scour at vertical circular piles under waves and current, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 3, pp. 270-278.

Zarrati AR, Nazariha M, Mashahir MB, 2006, Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 2, pp. 154 – 162.

Recibido: 11 de abril de 2021

Aceptado: 10 de julio de 2021

Moncada-Moreno, Alix: Ingeniero Civil, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela-1989; Magister Scientiae en Obras Hidráulicas, ULA, Mérida, Venezuela-1993. Plan II, Facultad de Ingeniería ULA. Profesora Titular, Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Venezuela. Líneas de investigación: mecánica de fluidos, hidráulica general e hidráulica fluvial.

Molina, Omar: Ingeniero Civil, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela-2015. Correo electrónico: omamolina_25@hotmail.com

Suárez, Ambrosio: Ingeniero Civil, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela-2015. Correo electrónico: ambrosiojsuarezp@gmail.com

