

# Aplicación de deflectores para el control de la socavación local alrededor de pilas cuadradas y rectangulares

## Application of deflectors for local scour control around square and rectangular 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

DOI: <https://doi.org/10.53766/CEI/2021.43.02.03>

### Resumen

*El presente estudio analiza experimentalmente el efecto de diferentes dispositivos de alteración del flujo para el control de la socavación local en pilas, que se denominaron deflectores. En los ensayos se utilizó una pila cuadrada y una rectangular; y se usó arena como material de fondo. En primer lugar, con la pila cuadrada, se analizaron los siguientes dispositivos: una placa colocada alrededor de la pila, dispositivos cúbicos con una sección curva y deflectores curvos del flujo descendente en la pila. Posteriormente, usando la pila rectangular, se ensayaron los dispositivos que lograron la mayor protección a la pila cuadrada. Además, se analizó un dispositivo alternativo que se diseñó considerando el efecto favorable alcanzado por dos de estos dispositivos, al cual se le denominó deflector tipo canaleta curva. Para cada experimento, se midió el perfil del fondo erosionado en el eje de cada lado de la pila. Esto permitió determinar la profundidad de socavación máxima. Se obtuvo que la posición óptima de la placa alrededor de la pila cuadrada era colocada a nivel del fondo. Bajo esta condición y con el mayor ancho de placa igual a 2.5 cm, se alcanzó la mayor efectividad igual a 68.11 %. Esto indica que la posición y el ancho de la placa tienen una gran influencia sobre la reducción de la profundidad de socavación. Los deflectores tipo canaleta curva de esquinas rectangulares y redondeadas y la placa plana, ubicados alrededor de la pila rectangular y a nivel del fondo granular, lograron la mayor efectividad de 91.12 %, 91.54 % y 73.36 %, respectivamente. Estos dispositivos lograron una disminución significativa en el tamaño del foso de socavación y una reducción considerable de la profundidad de socavación máxima.*

**Palabras clave:** Socavación local, socavación en pilas cuadradas y rectangulares, fosos de socavación, control de la socavación, deflectores como dispositivos de protección.

### Abstract

*The present study experimentally analyses the effect of different flow alteration devices for local scour control at piers, which were denominated deflectors. A square and a rectangular pier were used in the tests; and sand was used as bed material. Firstly, with the square pier, the following devices were analyzed: a plate placed around the pier; cubic devices with a curved section and curved deflectors of the down flow at pier. Subsequently, using the rectangular pier, the devices that achieved the greatest protection to the square pier were tested. Furthermore, an alternative device was analyzed that was designed considering the favorable effect achieved by two of these devices, which was denominated a curved gutter-type deflector. For each experiment, the scoured bed profile was measured on the axis of each side of the pier. This allowed determining the maximum scour depth. It was obtained that the optimum location of the plate around the square pier was placed at the bed level. Under this condition and with the greatest width of the plate equal to 2.5 cm, the highest efficiency equal to 68.11 % was reached. This indicates that the location and width of the plate have a great influence on the reduction of the scour depth. The curved gutter-type deflectors with rectangular and rounded corners and the flat plate, located around the rectangular pier at the granular bed level, reached the greatest efficiency of 91.12 %, 91.54 % and 73.36 %, respectively. These devices achieved a significant decrease in the size of the scour hole and a considerable reduction of the maximum scour depth.*

**Keywords:** Local scour, scour at square and rectangular piers, scour holes, scour control, deflectors as protection devices.

## 1 Introducción

La colocación de una pila de puente en una corriente aluvial la convierte en un obstáculo para el flujo, cambiando las condiciones hidráulicas de la sección y creando un sistema de vórtices de altas velocidades, las cuales aumentan la capacidad para arrastrar sólidos. La socavación local se define como la disminución local del material del lecho del río al pie de la pila. Esto se debe a que al obstaculizar el flujo, se forma un sistema complejo de vórtices o remolinos que generan la socavación, la cual depende principalmente del vórtice de herradura, que levanta los sedimentos sacándolos del foso de socavación progresivamente, en combinación con los vórtices de estela que se encargan de transportarlos y depositarlos aguas abajo. La socavación local puede originar importantes fallas geotécnicas en la cimentación, desequilibrando la pila y provocando un posible colapso. Es por ello que esta investigación propone la aplicación de varios dispositivos de alteración del flujo, que sirven para desviar y debilitar el flujo descendente en la pila, de manera de prevenir la formación de vórtices y proteger el lecho granular, evitando que se produzca el arrastre de material del lecho, logrando así el control de la socavación en pilas de puentes. En la pila cuadrada, se analizará el efecto de una placa alrededor de la pila, variando su ancho y ubicación; el uso de dispositivos cúbicos con una sección curva y deflectores curvos del flujo. En la pila rectangular, se ensayarán los dispositivos que hayan logrado la mayor reducción de la socavación en la pila cuadrada. Además, se estudiará el efecto de deflectores tipo canaleta curva, con el fin de desviar y reducir el impacto directo del flujo descendente sobre el fondo granular; y disminuir la formación de vórtices al pie de la pila. Se determinará la efectividad de los diferentes dispositivos propuestos con el fin de reducir la socavación local y lograr mayor protección a las pilas.

## 2 Estudios previos

Chiew (1992) estudió los efectos de un collar, una ranura, o una combinación de ambos como dispositivos para controlar la profundidad de socavación, en condiciones de agua clara. Encontró que estos dispositivos eran muy efectivos y reducían la profundidad de socavación significativamente. El estudio mostró que cuando una ranura era colocada cerca del fondo en combinación con un aro era capaz de eliminar la socavación totalmente. Sin embargo, en la práctica, una ranura puede causar problemas si se presentan escombros en el flujo, ya que éstos pueden bloquear parcialmente la abertura de la ranura, reduciendo su eficiencia. Según Melville y Hadfield (1999), la efectividad de las pilas de sacrificio depende del número de pilas, del tamaño de las pilas relativo a la pila, de si las pilas están sumergidas parcial o completamente, y del arreglo geométrico de las

pilas, en relación de una a otra con la pila del puente. Un arreglo triangular, con el ápice del triángulo apuntando hacia aguas arriba ha mostrado ser una de las mejores configuraciones entre las probadas. Concluyeron que la efectividad de las pilas de sacrificio depende del ángulo del flujo de aproximación y de la intensidad del flujo. No recomiendan las pilas de sacrificio a menos que el flujo se mantenga alineado y la intensidad del flujo sea relativamente pequeña. Encontraron que las pilas de sacrificio sumergidas eran ligeramente más eficientes, que pilas de profundidad completa, en la reducción de la socavación.

El objetivo del estudio de Kumar y col. (1999) fue determinar la efectividad en la reducción de la socavación usando ranuras de diferentes longitudes y alineadas en diferentes ángulos con el flujo. También investigaron la reducción de la socavación debido a la colocación de collares circulares, de diferentes tamaños y a diferentes elevaciones. Encontraron que la eficiencia de un collar depende de su tamaño y la ubicación en la pila con respecto al fondo, y que una ranura resulta efectiva para reducir la socavación, particularmente si la ranura se extiende en el fondo. Indican que la ranura es prácticamente ineficaz si el flujo de aproximación tiene una alta oblicuidad respecto a la ranura. Obtuvieron 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 en pilas circulares. Indicaron que una posible forma de controlar la profundidad de socavación es debilitar y, posiblemente, prevenir la formación de vórtices de herradura provocado por el flujo descendente. Los cables sintéticos eran enrollados en espiral en la superficie de la pila, para formar un arreglo helicoidal con ángulos de rosca relativamente pequeños. Observaron que la socavación disminuye con el aumento del diámetro del cable y el número de vueltas dispuestas en la superficie de la pila. Además, indicaron que el ángulo de rosca del cable tiene un papel significativo en relación con la reducción de la profundidad de socavación.

Zarrati y col. (2006) estudiaron la aplicación de collares continuos o independientes en grupos de dos pilas para reducir la socavación local. También consideraron dos arreglos para grupos de pilas, alineados con el flujo y otro transversal al flujo. Además, estudiaron una combinación de collares continuos y enrocados para pilas alineadas con el flujo. Obtuvieron que la eficiencia de un collar depende de su tamaño y ubicación en el pilote con respecto al lecho, es decir, la eficiencia del collar aumenta a menores elevaciones. Cuando un collar se instala por debajo del nivel del lecho, se reduce la velocidad de penetración del flujo debajo del collar, aunque la profundidad por encima del collar se convierte en parte del foso de socavación. Por lo tanto, decidieron instalar el collar en el nivel inicial del lecho en todos los experimentos.

### 3 Instalación y proceso experimental

Se usó 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 1.10 m de largo y 0.15 m de altura, aguas arriba y aguas abajo de la sección experimental, la cual está ubicada en la parte central del canal. El caudal se midió con un vertedero rectangular de pared delgada. Se construyeron en madera una pila cuadrada de ancho  $b = 5$  cm y otra rectangular de ancho  $b = 5$  cm y largo  $L = 10$  cm. La pila a ensayar 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. Lograda la compactación, se medían las cotas del terreno, mediante el uso de un limnómetro. Posteriormente, se abrió lentamente la válvula, que permitía el flujo de agua al canal, hasta alcanzar la profundidad del flujo  $Y_n$  deseada. Luego, se medían las cotas de la superficie del agua.

Los experimentos se realizaron bajo condiciones de flujo de agua clara y se llevaron a cabo hasta alcanzar el estado de equilibrio de la socavación. Finalizado el ensayo, se cerraba la válvula y se esperaba hasta que escurriera totalmente el agua. Luego, se procedía a medir el foso de socavación aguas arriba, aguas abajo y en las caras laterales de la pila. Estas mediciones se realizaron mediante un sistema de coordenadas fijado en la zona de estudio, con separación cada 1 cm, midiendo en cada posición  $X$  la profundidad de socavación  $Y_s$ , con el uso del limnómetro, como se observa en la Fig. 1.

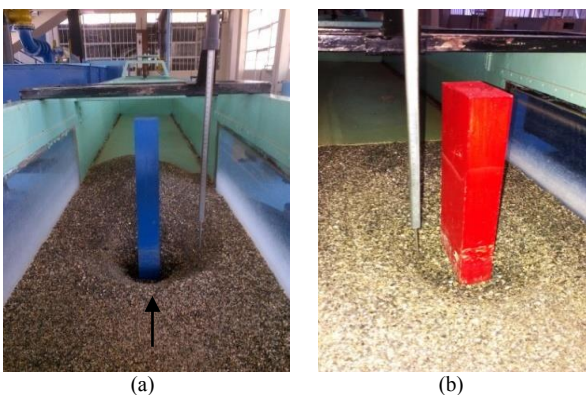


Fig. 1. Fosos de socavación: a) Pila cuadrada, b) Pila rectangular

Una vez realizadas todas las mediciones, se rellenaba nuevamente el foso socavado con el material arrastrado y depositado aguas abajo de la pila. Luego, se repetía todo el proceso, para cada profundidad y tipo de dispositivo.

#### 3.1 Ensayos realizados usando la pila cuadrada

Al inicio se realizaron varios experimentos con la pila sin protección trabajando con diferentes profundidades del flujo  $Y_n$ , con el fin de obtener datos de referencia que permitieran comparar resultados con los métodos de protección a estudiar. Se llevaron a cabo experimentos,

con caudales y profundidades del flujo  $Y_n$  variables. Se obtuvieron los fosos de socavación, con la pila sin protección, para diferentes profundidades del flujo  $Y_n$ . Luego, para el estudio con los diferentes dispositivos de protección, se trabajó con una profundidad del flujo constante, considerada en los experimentos de referencia, e igual a  $Y_n = 18.25$  cm, que generaba las condiciones experimentales deseadas. Con el fin de controlar la profundidad de socavación al pie de la pila, se diseñaron varios dispositivos de alteración del flujo, tipo deflector.

#### a. Placa alrededor de la pila

Se utilizaron 4 placas de metal, de 1 mm de espesor, con una abertura interna de 5 por 5 cm, con el fin de incorporarlas alrededor de la pila por la parte superior, a manera de un collar. Se trabajó con diferentes anchos a: 1.0, 1.7, 2.0 y 2.5 cm. Con el objetivo de estudiar el efecto producido por la variación de la elevación de la placa respecto al fondo  $Y_d$ , la placa de ancho  $a$  igual a 1 cm, se colocó a diferentes alturas con respecto al fondo granular  $Y_d$ . En la Fig. 2 se observa la ubicación de la placa. Se empezó colocando la placa a nivel del fondo, es decir,  $Y_d = 0$  cm. Luego, se varió la posición de la placa para  $Y_d = 6, 12$  y 15 cm. Posteriormente, con el fin de estudiar el efecto del ancho  $a$  de la placa sobre la profundidad de socavación, se mantuvo constante la elevación respecto al fondo, en  $Y_d = 0$  cm, y se trabajó con las otras placas de diferente ancho.

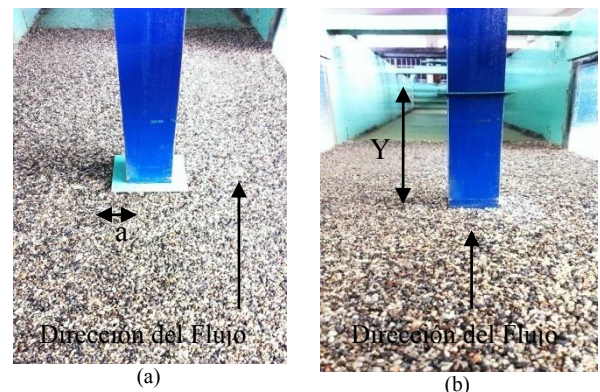


Fig. 2. Posición de la placa: a)  $Y_d = 0$  cm, b)  $Y_d = 12$  cm

#### b. Dispositivo cúbico con una sección curva

Se ensayó un dispositivo de madera, con forma cúbica, de 2.5 cm de lado, con una sección curva, realizada con una mecha de 5/8" en la parte superior del cubo. Esto con la finalidad de crear un tipo de deflector que permitiera la alteración del flujo y, por lo tanto, desviar el flujo descendente, de manera de reducir su impacto directo sobre el material y evitar la formación de vórtices al pie de la pila. Se utilizaron dos dispositivos. Al inicio, éstos se colocaron en la cara izquierda y derecha de la pila sobre el fondo granular, con la sección curva perpendicular a la dirección del flujo. Luego, se enterraron uno al lado del otro, con la superficie curva al ras del fondo granular, en

la cara de aguas arriba de la pila y, finalmente, se pegaron en la cara de aguas arriba sobre la superficie del lecho.

### c. Deflector curvo del flujo descendente

Se diseñó otro tipo de dispositivo con el fin de desviar el flujo descendente en la cara de aguas arriba de la pila y alejarlo del fondo granular. El dispositivo consistió en una lámina metálica de ancho igual a 2 cm, espesor de 1 mm y altura variable, tendiendo a una configuración triangular. Se diseñaron y construyeron 3 dispositivos variando la curvatura de los lados inclinados, como se muestra en la Fig. 3.

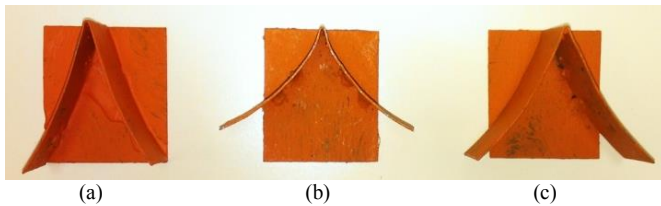


Fig. 3. Deflectores curvos del flujo descendente: a) Deflector curvo N° 1, b) Deflector curvo N° 2, c) Deflector curvo N° 3

Cada deflector curvo del flujo se ubicó aguas arriba. Se sujetaba al pie de la pila mediante una lámina, soldada al deflector, como se observa en la Fig. 4.

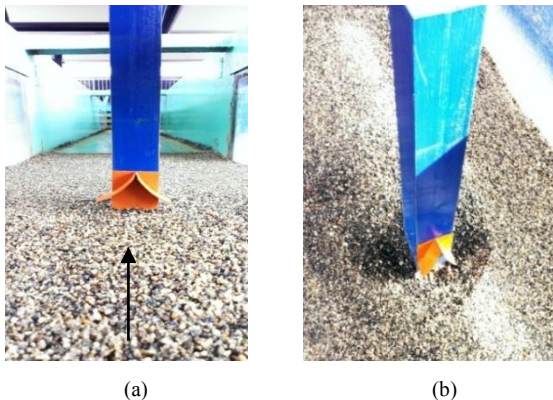


Fig. 4. Vista de la ubicación del deflector curvo del flujo en la pila cuadrada: a) Fondo original, b) Foso de socavación

### 3.2 Ensayos realizados con la pila rectangular

Inicialmente, con la pila sin protección, se realizaron 3 ensayos, con caudales y profundidades del flujo  $Y_n$  variables. En la Fig. 5 se muestra un foso de socavación típico desarrollado para una cierta condición de flujo.

Seguidamente, se analizó el comportamiento de los dispositivos usados en la pila cuadrada, que lograron la mayor reducción de la profundidad de socavación. Además, se ensayaron nuevos tipos de dispositivos y a los cuales se les denominó deflectores tipo canaleta curva de esquinas rectangulares y de esquinas redondeadas. Se trabajó también con una profundidad del flujo constante e igual a  $Y_n = 18.25$  cm.

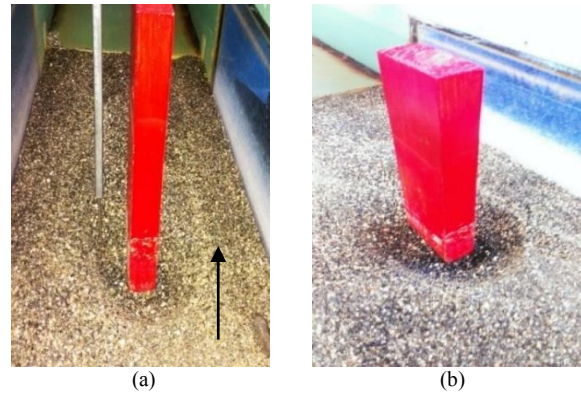


Fig. 5. Foso de socavación desarrollado con la pila rectangular

### a. Deflector curvo del flujo descendente

Se ensayó el deflector curvo del flujo descendente N° 2, puesto que fue el que alcanzó la mayor efectividad del grupo de deflectores ensayados en la pila cuadrada.

### b. Dispositivo cúbico con una sección curva

Se ensayaron los dispositivos cúbicos con una sección curva, ubicando la sección curva al ras del fondo granular, ya que con esta disposición se logró la mayor reducción de la socavación en la pila cuadrada.

El deflector curvo del flujo descendente y los dispositivos cúbicos con una sección curva, se ubicaron en la pila rectangular, al ras del fondo granular, como ya se había indicado, según se observa en la Fig. 6.

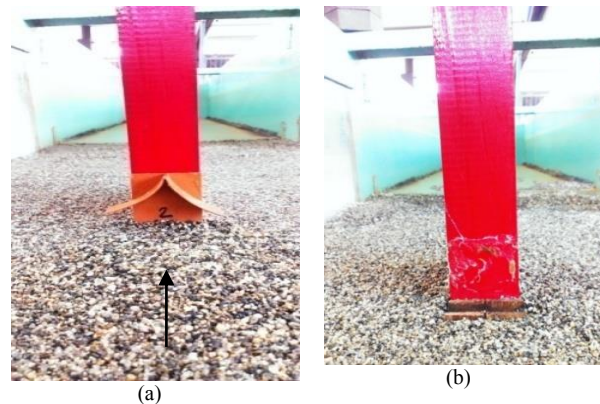


Fig. 6. Ubicación de dispositivos: a) Deflector curvo del flujo descendente, b) Dispositivos cúbicos con una sección curva

### c. Canaleta curva de esquinas rectangulares

Se diseñó un dispositivo considerando el efecto logrado con el dispositivo cúbico con una sección curva y la placa de 2.5 cm de ancho. Se construyó en madera, según las dimensiones indicadas en la Fig. 7, con una sección curva realizada con una mecha de 5/8" de diámetro, al que se le denominó deflector tipo canaleta de sección curva. Con éste se pretendía desviar el flujo descendente en la pila, lejos del fondo granular, de manera de reducir el impacto y la formación de vórtices al pie de la pila y, por lo tanto, disminuir la socavación.

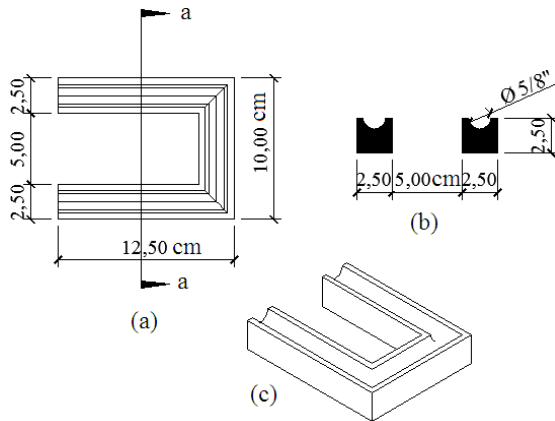


Fig. 7. Dimensiones del deflector tipo canaleta curva de esquinas rectangulares: a) Vista en planta, b) Sección a-a, c) Perspectiva

Con el fin de estudiar el efecto de la posición del dispositivo, se realizaron 3 ensayos variando la elevación del deflector, medida desde el tope superior de la sección curva hasta el fondo granular:  $Y_d = 2.5, 0, -2.5$  cm.

*d. Canaleta curva de esquinas redondeadas*

Teniendo en cuenta el efecto alcanzado con el deflector tipo canaleta curva, se decidió construir otro dispositivo, similar al anterior, con la única diferencia de un biselado de radio igual a 1 cm, realizado en las esquinas del dispositivo, con el fin de no alterar los parámetros hidráulicos del flujo y, por lo tanto, disminuir los vórtices generados por el choque del flujo contra las esquinas rectas del dispositivo, ofreciendo así un mayor grado de protección a la pila. Para hacer comparaciones, se realizaron también 3 experimentos variando la elevación del dispositivo, como se observa en la Fig. 8.

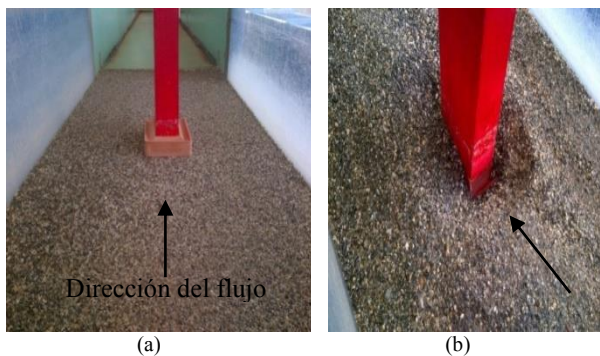


Fig. 8. Posición del deflector canaleta curva de esquinas redondeadas: a) Fondo original y  $Y_d = 2.5$  cm, b) Foso de socavación y  $Y_d = -2.5$  cm

*e. Placa plana alrededor de la pila*

Se decidió usar una placa plana de metal, de espesor 1 mm, con el fin de comparar su efecto con el que generaba la sección curva de los deflectores tipo canaleta curva. Se analizó la placa al ras del fondo granular y por debajo de éste, a una profundidad de -2.5 cm; y no se consideró la elevación del dispositivo a  $Y_d = 2.50$  cm. En la Fig. 9 se muestra la forma y ubicación de la placa en  $Y_d = 0$ .

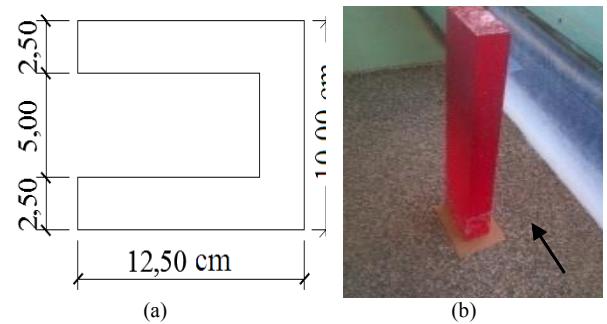


Fig. 9. Placa plana: a) Forma y dimensiones, b) Ubicación de la placa

**4 Presentación y análisis de resultados**

*4.1. Pila cuadrada*

Inicialmente, se llevaron a cabo 7 experimentos de referencia (pila sin 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 sin protección, en el eje de la cara de aguas arriba, de 1.58 y 9.29 cm, respectivamente. Se obtuvo que a mayor profundidad del flujo  $Y_n$ , aumentaban las dimensiones del foso de socavación en la cara de aguas arriba de la pila y en las caras laterales izquierda y derecha y, por lo tanto, se incrementaba la profundidad de socavación máxima, tal como indicó Moncada-Moreno y col. (2021). También se encontró que el foso de socavación aguas abajo de la pila era de menor tamaño y, en algunos casos, ocurría un comportamiento distinto caracterizado por el depósito de material. Para el análisis, se consideraron los perfiles de socavación en el eje de la cara de aguas arriba de la pila, donde los perfiles de socavación logrados eran de mayor tamaño. Para el ensayo con los diferentes dispositivos, se trabajó con la profundidad del flujo constante e igual a  $Y_n = 18.25$  cm.

*Estudio experimental con placa alrededor de la pila*

Con la finalidad de estudiar el efecto producido por la ubicación de una placa, de 1 cm de ancho, alrededor de la pila, se realizaron 4 experimentos variando la elevación de la placa con respecto al fondo granular  $Y_d = 0, 6, 12$  y 15 cm. A partir de los resultados se encontró que la posición de la placa con respecto al fondo afecta de manera significativa la profundidad de socavación al pie de la pila. Se obtuvo que a medida que la placa se aproxima al fondo de material granular, mayor será el grado de protección contra la socavación local, como se muestra en la Fig. 10, en la cual se observan los perfiles de socavación obtenidos, en el eje de la cara de aguas arriba de la pila, con la placa ubicada en diferentes elevaciones con respecto al fondo granular, y el que corresponde a la pila sin protección.

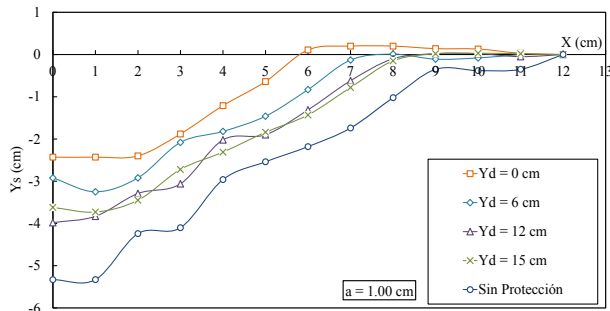


Fig. 10. Perfiles de socavación con placa a diferentes elevaciones  $Y_d$

En la Fig. 11 se presenta el gráfico adimensional,  $Y_{smax}/b$  en función de  $Y_d/b$ . Se observa que a medida que la elevación de la placa  $Y_d$  aumenta, la profundidad de socavación máxima  $Y_{smax}$  se incrementa. Se observa que la posición óptima de la placa es a nivel del fondo.

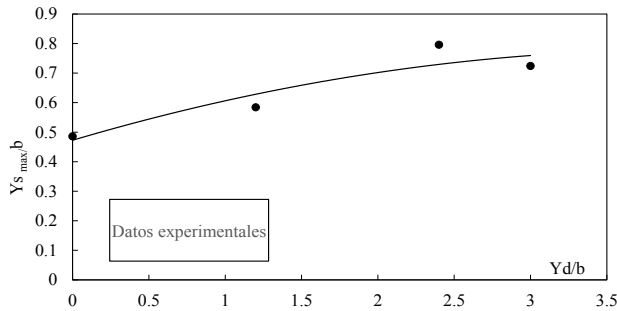


Fig. 11. Relación entre la profundidad de socavación máxima  $Y_{smax}$  y la elevación de la placa  $Y_d$

Luego, se mantuvo constante la elevación de la placa en  $Y_d = 0$  y se estudió el efecto del ancho de la placa. Se realizaron 4 experimentos variando el ancho de la placa  $a = 1, 1.7, 2.0$  y  $2.5$  cm. Los resultados obtenidos mostraron que el ancho de la placa alteraba de forma apreciable la profundidad de socavación al pie de la pila. Se obtuvo que a medida que la placa tenía un ancho mayor, se incrementaba su efectividad contra la socavación local, como se muestra en la Fig. 12, en la cual se observan los perfiles de socavación obtenidos variando el ancho de la placa y el correspondiente a la pila sin protección, para la misma condición de flujo.

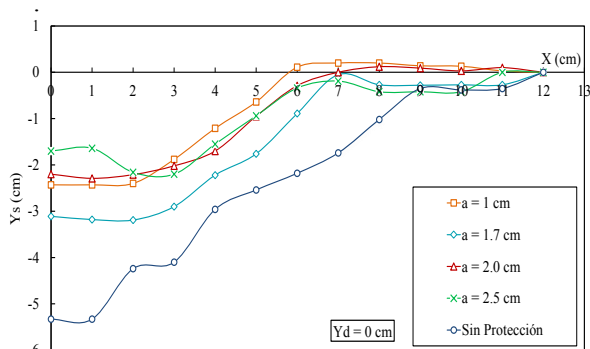


Fig. 12. Perfiles de socavación con placas de diferente ancho  $a$

En la Fig. 13 se muestra el gráfico adimensional,  $Y_{smax}/b$  en función de  $a/b$ , que relaciona la variación de la profundidad de socavación máxima con el ancho de la placa. Se observa que al incrementar el ancho de la placa, la profundidad de socavación máxima disminuye.

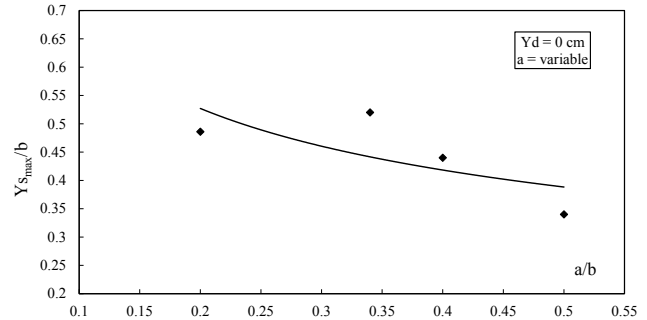


Fig. 13. Relación entre la profundidad de socavación máxima  $Y_{smax}$  y el ancho  $a$  de la placa

*Estudio experimental usando dispositivos cúbicos con una sección curva*

Se estudió el efecto producido por dispositivos cúbicos con una sección curva, ubicados en diferentes posiciones, alrededor de la pila, como se indicó previamente. En la Fig. 14 se ilustran los perfiles de socavación obtenidos empleando estos dispositivos, y el perfil desarrollado con la pila sin protección.

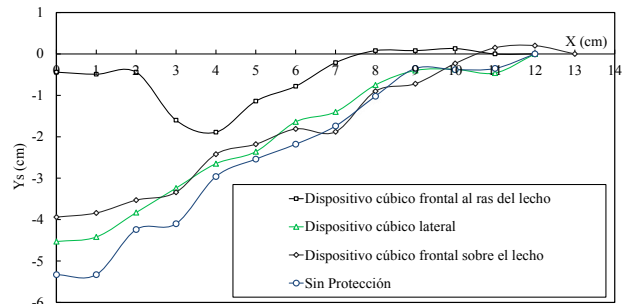


Fig. 14. Perfiles de socavación obtenidos con los dispositivos cúbicos con una sección curva, cara aguas arriba

Se observa que ubicando estos dispositivos en la cara de aguas arriba de la pila y al ras del lecho, se reduce en gran medida la profundidad de socavación al pie de la pila y disminuye notablemente el tamaño del foso de socavación. Se obtiene que la socavación se incrementa colocando los dispositivos en los laterales de la pila.

*Estudio experimental utilizando deflectores curvos*

Se ensayaron los deflectores curvos del flujo descendente, pegados en la cara de aguas arriba de la pila. En la Fig. 15 se aprecian los perfiles de socavación desarrollados empleando los deflectores curvos N° 1, 2 y 3 y el correspondiente a la pila sin protección.

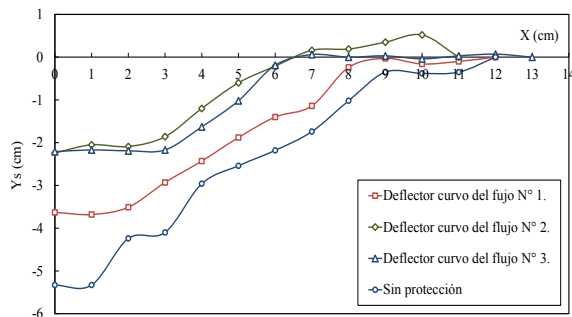


Fig. 15. Perfiles de socavación con los deflectores curvos N° 1, 2 y 3

Se observa que los deflectores curvos del flujo descendente N° 2 y 3, disminuyen en mayor medida la profundidad de socavación al pie de la pila, aunque cabe destacar que el deflector N° 2 logra una disminución considerable de la socavación y una mayor reducción en el tamaño del foso en todas las caras de la pila. Aguas abajo se observó acumulación de material.

*Efectividad de los dispositivos en la pila cuadrada*

Se determinó la efectividad E de los dispositivos usando la expresión que relaciona la reducción de la profundidad de socavación respecto a la profundidad de socavación obtenida sin ningún dispositivo de protección

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

en la cual  $Y_{s \max \text{ disp}}$  es la profundidad de socavación máxima obtenida, en el eje de la cara de aguas arriba de la pila, con el dispositivo y  $Y_{s \max \text{ ref}}$  es la profundidad de socavación máxima al pie de la pila sin protección.

Para comparación se usó el ensayo de referencia (pila sin protección), para  $Y_n = 18.25 \text{ cm}$ , en el cual se alcanzó una profundidad de socavación máxima  $Y_{s \max} = 5.33 \text{ cm}$ . Con el uso de una placa de ancho a constante e igual a 1 cm, colocada alrededor de la pila cuadrada, y variando su elevación  $Y_d$  con respecto al fondo granular, se obtuvo que la efectividad  $E = 54.41 \%$  para  $Y_d = 0$ ,  $E = 45.22 \%$  para  $Y_d = 6 \text{ cm}$ ,  $E = 25.33 \%$  para  $Y_d = 12 \text{ cm}$  y  $E = 32.08 \%$  para  $Y_d = 15 \text{ cm}$ .

En la Fig. 16 se presenta un gráfico adimensional que relaciona la efectividad E, que ofrece la placa como dispositivo de protección, con  $Y_d/Y_n$ . Se obtiene que a medida que la placa se eleva con respecto al fondo granular, la efectividad disminuye. Se puede concluir que la posición óptima es ubicar la placa en el lecho, al ras del fondo granular, logrando así la mayor efectividad, con lo cual se reduce la profundidad de socavación al pie de la pila.

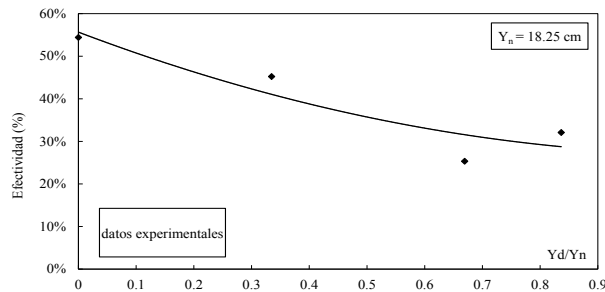


Fig. 16. Relación entre la efectividad E y la elevación  $Y_d$

Adicionalmente, se determinó la efectividad alcanzada usando la placa colocada alrededor de la pila, al ras del fondo granular,  $Y_d = 0 \text{ cm}$ , y variando el ancho a de la placa. Se obtuvo que usando la placa con ancho a igual a 1 cm, la efectividad E alcanzada fue de 54.41 %. Además, se encontró que para  $a = 1.7 \text{ cm}$ ,  $E = 41.65 \%$ ; para  $a = 2 \text{ cm}$ ,  $E = 58.72 \%$  y para  $a = 2.5 \text{ cm}$  se logró la mayor efectividad de 68.11 %. En la Fig. 17 se presenta un gráfico adimensional que relaciona la efectividad E con  $a/Y_n$ . Se muestra que a medida que aumenta el ancho de la placa, la efectividad es mayor.

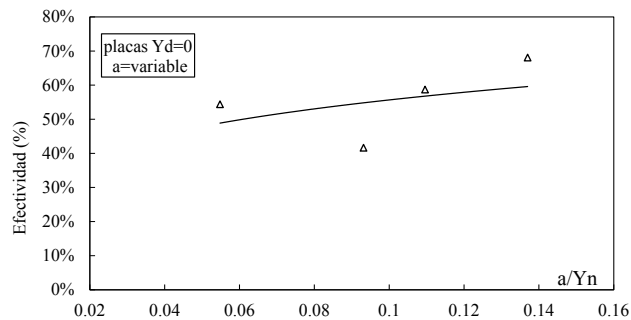


Fig. 17. Relación entre la efectividad E y el ancho a de la placa

Se determinó la efectividad alcanzada con los dispositivos cúbicos con una sección curva, colocados en diferentes posiciones al pie de la pila. Se obtuvo que la mayor reducción en la profundidad de socavación máxima se obtiene colocando los dispositivos pegados aguas arriba de la pila y al ras del lecho granular, logrando así la mayor efectividad de 91.74 %.

Se calculó la efectividad E obtenida con el uso de los deflectores curvos del flujo descendente, pegados en la cara de aguas arriba, al pie de la pila. Con el deflector curvo del flujo N° 1, se obtuvo que  $E = 31.89 \%$ . Además, con los deflectores curvos del flujo N° 2 y 3, se obtuvieron efectividades E de 57.97 % y 58.54 %, respectivamente. Se encontró poca diferencia. Se aclara que, en este estudio, se considera que el deflector curvo del flujo N° 2 es el que presenta el comportamiento más favorable en cuanto a la reducción en el tamaño del foso de socavación, como se indicó previamente, con el cual se lograron perfiles de socavación más suavizados y una mayor disminución de

la profundidad de socavación en las caras de aguas arriba, aguas abajo y en las caras laterales izquierda y derecha de la pila.

A manera de comparación, en la Fig. 18 se muestran los perfiles de socavación desarrollados en el eje de la cara de aguas arriba de la pila con los dispositivos que resultaron ser más efectivos como métodos de protección contra la socavación local en la pila cuadrada y el correspondiente a la pila sin protección. Se observa que con el uso de estos dispositivos, tipo deflector, se alcanza una reducción notable, en gran medida, de la profundidad de socavación.

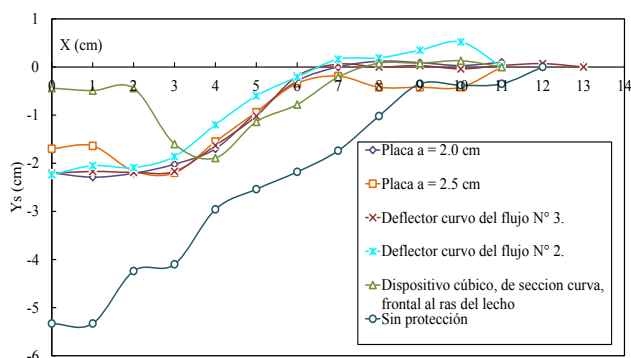


Fig. 18. Perfiles de socavación desarrollados aguas arriba de la pila con los dispositivos que ofrecieron la mayor efectividad

#### 4.2 Pila rectangular

Al inicio se realizaron 3 ensayos de referencia sin ningún dispositivo, variando la profundidad de flujo  $Y_n$ . Los valores promedio de caudal, velocidad media y el número de Froude  $F$  fueron 29 l/s, 0.319 m/s y 0.239, respectivamente. Se obtuvo también que la profundidad de socavación se incrementa cuando aumenta la profundidad del flujo y se encontró que, en algunos casos, en la cara de aguas abajo se producía acumulación de material al pie de la pila. Se ensayaron los dispositivos que lograron mayor reducción de la socavación en la pila cuadrada y los deflectores tipo canaleta curva. En todos los ensayos con los diferentes deflectores, se trabajó con una profundidad del flujo constante e igual a 18.25 cm, con el propósito de realizar comparaciones con el perfil desarrollado con la pila sin protección.

##### Estudio experimental con deflector curvo del flujo

Se ensayó el deflector curvo del flujo descendente N° 2, usado previamente, pegado en la pila, en la cara de aguas arriba. En la Fig. 19 se aprecian los perfiles de socavación generados en el eje de la cara de aguas arriba, mediante el uso de este dispositivo tipo deflector curvo, y el desarrollado con la pila sin protección.

Se muestra que ocurre reducción en el tamaño del foso de socavación y, por lo tanto, de la profundidad de socavación máxima al pie de la pila. En la cara de aguas

abajo también ocurrió acumulación del material transportado y depositado.

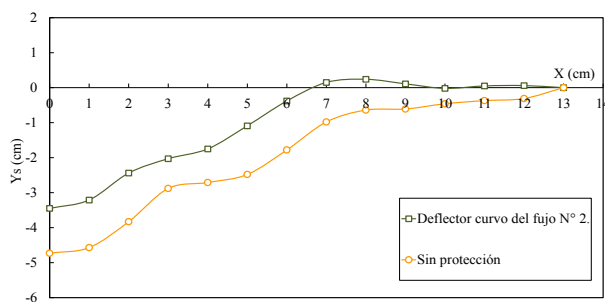


Fig. 19. Perfiles de socavación usando el deflector curvo del flujo N° 2 y el desarrollado con la pila sin protección

##### Estudio experimental usando dispositivos cúbicos con una sección curva, al ras del lecho

Se estudió el efecto producido por los dispositivos cúbicos con una sección curva, colocados al ras del fondo granular y aguas arriba de la pila, con la finalidad de desviar el flujo descendente y reducir los vórtices generados al pie de la pila. En la Fig. 20 se ilustra el perfil del foso de socavación generado en el eje de la cara de aguas arriba, con el uso de los dispositivos indicados y el perfil obtenido con la pila sin protección. Se obtuvo que en la cara de aguas arriba y en las caras laterales de la pila, ocurría una disminución considerable en la profundidad de socavación. En la cara de aguas abajo, ocurrió menor deposición del material socavado.

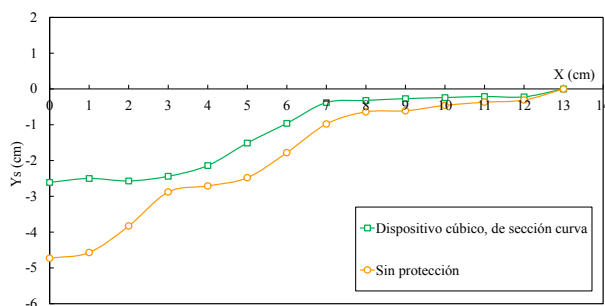
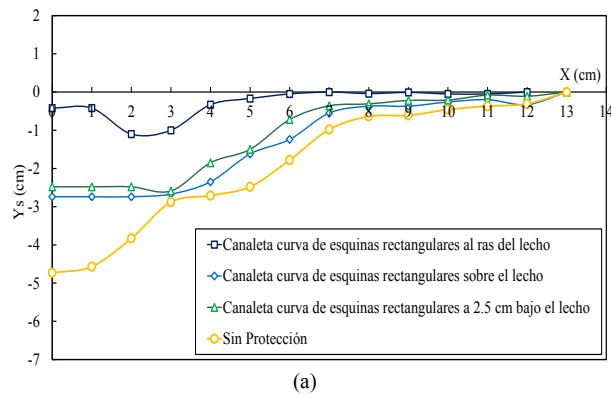


Fig. 20. Perfiles de socavación usando dispositivos cúbicos con una sección curva y el obtenido con la pila sin protección

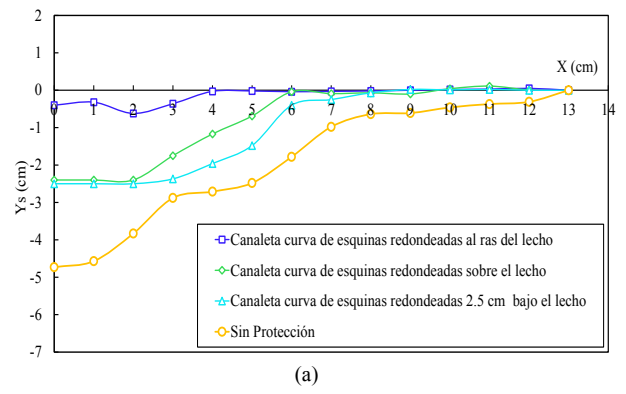
##### Estudio experimental utilizando el deflector tipo canaleta curva de esquinas rectangulares

Se estudió el efecto que produce la colocación de un deflector tipo canaleta, de sección curva, con esquinas rectangulares, el cual fue ubicado alrededor de la pila en tres posiciones diferentes: sobre el fondo granular, al ras del lecho granular y enterrado a 2.5 cm por debajo de éste, que se diseñó considerando el buen efecto logrado con algunos dispositivos ya estudiados. En la Fig. 21 se aprecian los perfiles de socavación obtenidos, en diferentes caras de la pila, usando el deflector indicado, y el desarrollado con la pila sin protección.

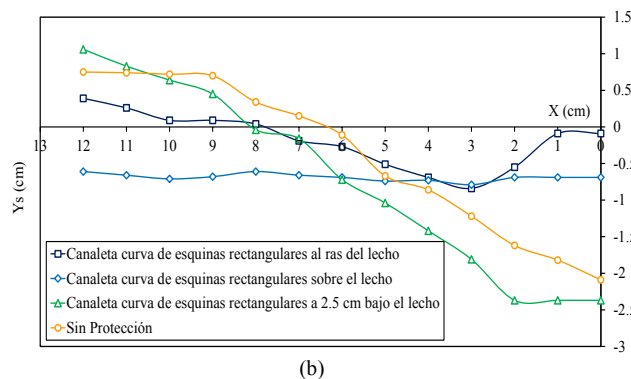




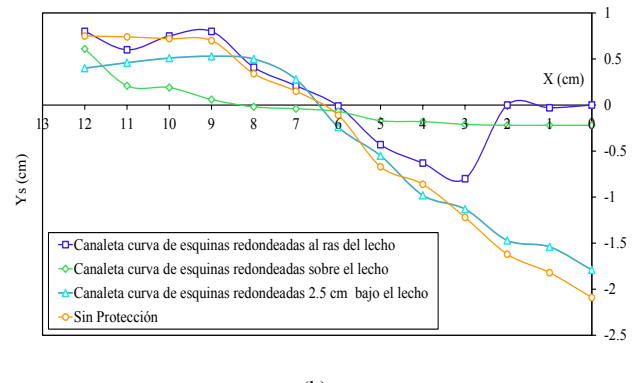
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 21.** Perfiles de socavación usando el deflector tipo canaleta curva de esquinas rectangulares: a) Aguas arriba, b) Cara lateral izquierda

**Fig. 22.** Perfiles de socavación obtenidos con el deflector canaleta curva de esquinas redondeadas: a) Aguas arriba, b) Cara lateral izquierda

En la Fig. 21a se observa una disminución considerable en la profundidad de socavación en la cara de aguas arriba de la pila, resultando como ubicación óptima cuando el dispositivo se coloca al ras del fondo granular, reduciendo en gran medida el tamaño del foso de socavación. Se observa que cuando este tipo de deflector se coloca a 2.5 cm por debajo, la profundidad de socavación aumenta considerablemente. Sin embargo, se encontró que cuando este dispositivo se ubica sobre el nivel original del lecho granular, la socavación resulta un poco mayor. En la Fig. 21b se observa que este dispositivo propuesto también reduce en gran medida el tamaño del foso de socavación en las caras laterales de la pila, cuando el deflector se coloca al ras del lecho.

*Estudio experimental usando el deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas*

Se diseñó otro deflector tipo canaleta curva, pero con esquinas redondeadas, el cual se ubicó también en tres posiciones diferentes: sobre el fondo granular, al ras del lecho granular y enterrado a 2.5 cm por debajo de éste. En la Fig. 22 se observan los perfiles de socavación desarrollados, en diferentes caras de la pila, usando el deflector indicado en las diferentes posiciones y el perfil correspondiente a la pila sin protección.

En la Fig. 22a se evidencia claramente el gran efecto producido por este dispositivo. Se observa que el tamaño del foso de socavación se reduce considerablemente y se aprecia una disminución significativa en la profundidad de socavación, en comparación con el de la pila sin protección, cuando el dispositivo se coloca al ras del fondo granular. También se observa en la Fig. 22b que, en los laterales de la pila, el foso de socavación se reduce en gran medida colocando el dispositivo al ras del fondo.

*Estudio experimental con el uso de una placa plana en la pila*

Se estudió el efecto producido por la colocación de una placa plana, de ancho igual a 2.5 cm, alrededor de la pila. Se realizaron dos ensayos con la placa ubicada al ras del fondo granular y a 2.5 cm por debajo de éste. En la Fig. 23 se observan los perfiles de socavación generados, en el eje de la cara de aguas arriba de la pila, usando la placa, ubicada alrededor de la pila en dos posiciones diferentes y el perfil desarrollado con la pila sin protección. Se observa una reducción considerable en la profundidad de socavación y disminución en el tamaño del foso de socavación, ubicando la placa al ras del fondo granular, tal como se obtuvo en el caso de la pila cuadrada. Se encontró que con la placa plana colocada a 2.5 cm por debajo del lecho, la profundidad de socavación, en la cara de aguas

arriba y en los laterales derecha e izquierda, era mayor que la alcanzada con la placa al ras del lecho.

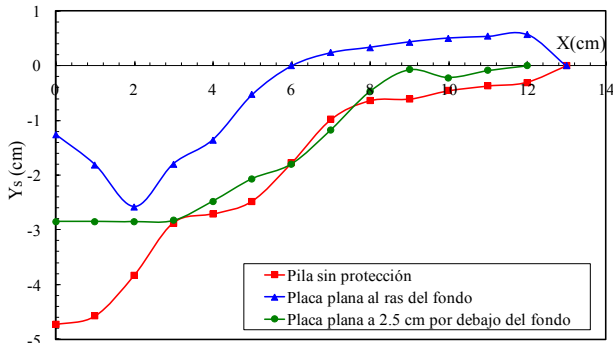


Fig. 23. Perfiles de socavación obtenidos usando una placa plana y el desarrollado con la pila sin protección

A manera de comparación, en la Fig. 24, se muestran los perfiles de los fosos de socavación desarrollados en el eje de la cara de aguas arriba de la pila con los deflectores tipo canaleta de sección curva y el obtenido con la placa plana, ubicados al ras del fondo granular; y el correspondiente a la pila sin protección.

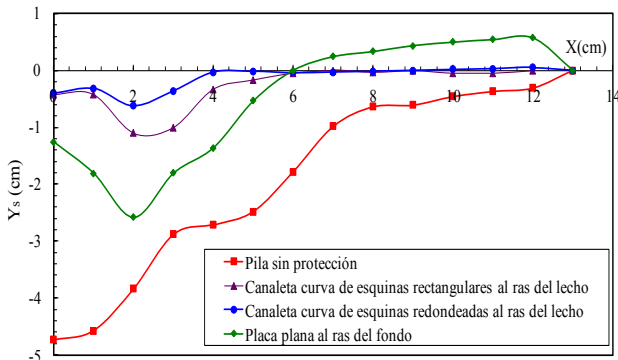


Fig. 24. Perfiles de socavación obtenidos colocando los deflectores tipo canaleta curva y la placa plana al ras del lecho granular

En la Fig. 24 se observa el efecto producido por los deflectores ensayados. Se obtiene que para los dispositivos tipo canaleta curva, se logra una notable reducción en la profundidad de socavación y un menor tamaño del foso socavado. Se alcanzó la mayor reducción de la profundidad de socavación con el deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas.

*Efectividad de los dispositivos en la pila rectangular*

Para el cálculo de la efectividad E que ofrecen los diferentes dispositivos de protección, se empleó la ec.1. En el experimento de referencia (pila sin protección), la profundidad del flujo era igual a 18.25 cm, con la cual se alcanzó la profundidad de socavación máxima al pie de la pila de  $Y_{smax} = 4.73$  cm, en el eje de la cara de aguas arriba.

Se obtuvo que la efectividad E alcanzada usando el dispositivo tipo deflector curvo del flujo descendente N° 2 fue de 27.06 % y la de los dispositivos cúbicos con una sección curva, ubicados al ras del fondo granular, de 44.82 %. Se encontró que, para este grupo de dispositivos ensayados, el que logra la mayor protección a la pila son los dispositivos cúbicos con una sección curva, colocados frente a la pila y al ras del fondo granular.

Se determinó la efectividad alcanzada con el deflector tipo canaleta curva de esquinas rectangulares, ubicado en distintas posiciones. Se alcanzó una efectividad E igual a 42.07 % colocando el deflector sobre el lecho granular. Además, se logró una efectividad E = 47.57 % con este dispositivo ubicado a 2.5 cm bajo el lecho y se obtuvo la mayor efectividad E = 91.12 % ubicando este deflector tipo canaleta curva al ras del fondo granular.

Adicionalmente, se calculó la efectividad lograda usando el deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas, ubicado en diferentes posiciones. Se obtuvo una efectividad E igual a 49.26 % con el dispositivo ubicado sobre el lecho. Además, se encontró que E = 47.15 % con la canaleta curva a 2.5 cm bajo el lecho y se alcanzó la mayor efectividad E = 91.54 % con el deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas ubicado al ras del fondo granular.

Se obtuvo que la efectividad alcanzada con el uso de la placa plana, ubicada al ras del lecho, era de 73.36 % y la obtenida con la placa a 2.5 cm bajo el fondo original del lecho fue de 39.75 %.

A manera de comparación, en la Fig. 25 se presenta la efectividad alcanzada con los deflectores que lograron la mayor reducción de la profundidad de socavación máxima en la pila rectangular, colocados al ras del lecho.

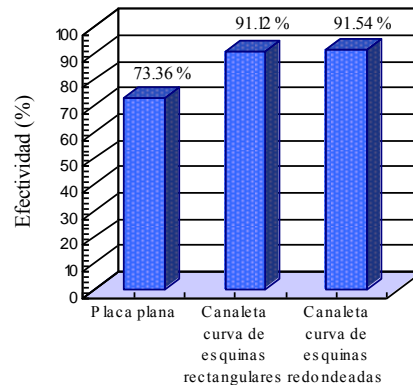


Fig. 25. Efectividad obtenida con los deflectores en la pila rectangular

Se muestra que el deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas, colocado al ras del fondo granular, fue el que obtuvo la mayor efectividad. Con este dispositivo se logró reducir en gran medida la profundidad de socavación en la pila rectangular y disminuir el tamaño del foso de socavación desarrollado. Este tipo de deflector

reduce razonablemente bien la socavación, lo cual se evidencia por la máxima efectividad alcanzada de 91.54 %.

Sin embargo, el deflector canaleta curva de esquinas rectangulares también presenta resultados favorables en cuanto a la reducción de la profundidad de socavación. Esto indica que este tipo de deflector constituye un dispositivo alternativo con el cual se puede lograr una reducción considerable de la socavación que afecta la estabilidad de las pilas de puentes.

## 5 Conclusiones

Se encontró que al aumentar la profundidad del flujo, se incrementa la profundidad de socavación tanto en la pila cuadrada como en la rectangular. Se obtuvo que los dispositivos de protección, tipo deflector, propuestos para el control de la socavación local arrojan resultados satisfactorios. Se concluye que:

1. A medida que la placa de ancho constante,  $a = 1$  cm, se aleja verticalmente del fondo granular, la profundidad de socavación se incrementa. Se encontró que la posición de la placa más favorable en cuanto a la reducción de la profundidad de socavación era a nivel del fondo granular, alcanzando una efectividad de 54.41 %.
2. Al incrementar el tamaño de la placa, la profundidad de socavación disminuye. Para la placa de mayor ancho igual a 2.5 cm, se logró la mayor efectividad de 68.11 %.
3. El empleo de los dispositivos cúbicos con una sección curva, colocados aguas arriba de la pila y al ras del fondo granular, reducen considerablemente la profundidad de socavación, logrando una efectividad de 91.74 % en la pila cuadrada y de 44.82 % en la rectangular.
4. El deflector curvo del flujo descendente N° 2 proporcionó efectividades de 57.97 % en la pila cuadrada y de 27.06 % en la rectangular. Se encontró que la curvatura que presentan los dispositivos influye de manera significativa en el tamaño del foso de socavación.
5. La posición óptima de los deflectores tipo canaleta curva de esquinas rectangulares y redondeadas es al ras del fondo granular, alcanzando efectividades de 91.12 % y 91.54 %, respectivamente.
6. El deflector tipo canaleta curva de esquinas redondeadas, ubicado al ras del fondo granular, reduce razonablemente bien la profundidad de socavación al pie de la pila rectangular. Este dispositivo logra disminuir en gran medida la profundidad y el tamaño del foso de socavación desarrollado, cumpliendo con el propósito para el cual fue diseñado.
7. Con el uso de una placa plana colocada alrededor de la pila rectangular y al ras del fondo granular se obtuvo una efectividad de 73.36 %.

Las conclusiones anteriormente indicadas aplican exclusivamente para las condiciones de ensayo consideradas en la presente investigación. Éstas pueden variar bajo diferentes condiciones experimentales.

## Referencias

- Chiew YM, 1992, Scour protection at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 9, pp. 1260-1269.
- 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-Moreno, AT, Molina O, Suárez A, 2021, Ensayo de diferentes métodos de protección contra la socavación local en pilas cuadradas, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 42, No. 3, pp. 339-350, 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:** 04 de septiembre de 2021

**Aceptado:** 26 de febrero de 2022


**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. Correo electrónico: moncada.alix@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7384-240X>

**Molina, Omar:** Ingeniero Civil, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela-2015. Correo electrónico: omamolina\_25@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1957-2872>

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

 <https://orcid.org/0000-0002-1369-6786>

