

Erosion by a two-dimensional horizontal jet on a movable bed downstream of a fixed bed

Alix T. Moncada M. y Julián Aguirre Pe

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

Abstract

In this paper the local scour produced on a loose material bed downstream of a fixed bed, due to a submerged horizontal jet of water issuing through a sluice opening, is analyzed. An experimental study of the phenomenon of scour is made. Experiments were carried out with two natural sand sizes for various sluice openings and jet velocities. The experiments were conducted in a glass-walled channel, 0.5 m wide and 0.5 m depth. The parameters that characterize the phenomenon of scour were identified based on the physical reasoning and dimensional analysis. Then, they were correlated through the development of empirical expressions, which allow to predict the characteristic lengths of the scour hole at the equilibrium stage. Moreover, some experimental results of the time variation of scour hole are presented. Evolution of scour, as a function of time and position, until reaching an equilibrium condition, is obtained. Equations for time variation of maximum scour depth and the scour hole length are empirically obtained.

Key words: Erosion, horizontal plane jet, submerged jet, scour hole, channel flow.

Erosión por un chorro horizontal bidimensional en un fondo móvil aguas abajo de un lecho fijo

Resumen

En este trabajo se analiza la socavación local producida en un fondo de material suelto aguas abajo de un lecho fijo, debida a un chorro de agua horizontal sumergido que sale a través de una abertura de compuerta. Se hizo un estudio experimental del fenómeno de socavación. Se llevaron a cabo experimentos con dos tamaños de arena natural, para diferentes aberturas de compuerta y velocidades del chorro. Las experiencias fueron realizadas en un canal de paredes de vidrio de 0.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad. Los parámetros que caracterizan el fenómeno se identificaron en base a razonamiento físico y análisis dimensional y se correlacionaron entre sí, a través del desarrollo de expresiones empíricas que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio. Además, se presentan algunos resultados experimentales sobre la variación del foso de socavación con el tiempo. Se midió la evolución temporal de la socavación, así como la espacial, hasta alcanzar una estabilización o situación de equilibrio. Se obtienen empíricamente ecuaciones para la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima y la longitud del foso de socavación.

Palabras clave: Erosión, chorro plano horizontal, chorro sumergido, foso de socavación, flujo en canal.

Introducción

La socavación local se debe a una perturbación del lecho causada por vórtices originados por

alguna singularidad del escurrimiento, tal como la presencia de un obstáculo, el cambio de dirección del flujo, la implantación de obras en un cauce aluvial y cambios bruscos de lecho fijo a lecho

móvil. La erosión a gran escala causada por el flujo local en estructuras hidráulicas es de gran interés porque las fundaciones pueden ser socavadas conduciendo a fallas estructurales. La seguridad de lechos fijos aguas abajo de compuertas y de dispositivos que disipan energía también puede estar amenazada por la erosión de sedimentos en su vecindad, debido a la socavación aguas abajo producida por la acción de un chorro de fluido que sale desde la abertura de la compuerta.

El problema de socavación es extremadamente complejo puesto que las condiciones del flujo en el foso de socavación, inclusive de turbulencia, son difíciles de evaluar. Además, la interacción entre los sedimentos y las propiedades del flujo no es fácil de cuantificar. Por eso, hasta ahora la predicción de la extensión de la socavación está principalmente basada en resultados empíricos. En este trabajo se realiza una investigación experimental sobre la socavación local aguas abajo de un lecho fijo producida por un chorro de agua que sale a través de una abertura de compuerta. Se presentan experimentos de laboratorio propios, que permiten estudiar el comportamiento de las variables involucradas en el fenómeno físico. Se desarrollan ecuaciones empíricas que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio.

Antecedentes

Rouse [1] fue el pionero en investigar la socavación producida por un chorro. Existen resultados empíricos relacionados con la erosión causada por el impacto de chorros ubicados a varios ángulos respecto al fondo arenoso. La socavación local aguas abajo de una losa rígida fue investigada experimentalmente por Breusers [2], Chatterjee y Ghosh [3], Hassan y Narayanan [4], Chatterjee et al. [5], entre otros. Chatterjee y Ghosh [3] realizaron una investigación experimental para evaluar los parámetros hidráulicos que permiten el cálculo del transporte de sedimento debido a un chorro horizontal bidimensional sumergido que fluye sobre una losa, en parte rígida, hacia un fondo de arena. Chatterjee et al. [5] realizaron un estudio experimental sobre el fenómeno de la socavación y el transporte de sedimento

debido a un chorro de agua horizontal, sumergido y bidimensional. Obtuvieron que los perfiles de socavación son de naturaleza similar e independientes del tiempo, pero dependen del tamaño de los granos del fondo. Chiew y Lim [6] investigaron la socavación local causada por un chorro circular profundamente sumergido. Usaron un chorro de pared y uno ubicado a una cierta distancia del fondo. Encontraron que una mayor distancia vertical causaba la formación de un hueco de socavación menor porque la mayor parte de la energía se difundía en el flujo, en lugar de ser usada para erosionar el sedimento. Hassan y Narayanan [4] estudiaron las características del flujo y la similitud de los perfiles de socavación local aguas abajo de una losa rígida, producidos por un chorro de agua que fluye a través de la abertura de una compuerta. Los perfiles de socavación que obtuvieron mostraron semejanza de forma si se tomaba como escala de longitud, para adimensionalizar, la distancia medida desde el borde de la losa rígida hasta la cresta de la arena depositada. Sin embargo, ellos observaron que la longitud de la losa rígida producía algunas desviaciones en la semejanza, en la región aguas abajo de la profundidad de socavación máxima.

Uno de los estudios pioneros y de mayor relevancia sobre las leyes de similitud en socavación local es el de Carstens [7], quien formuló relaciones de transporte de sedimento de socavación localizada, que luego integró para obtener funciones para la profundidad de socavación. Analizó datos de socavación local para diferentes tipos de obstrucciones de flujo. Estudió experimentos de socavación local con un hueco de socavación definido, socavación asociada con dunas, socavación por un chorro bidimensional, socavación alrededor de un cilindro vertical, y socavación alrededor de un cilindro horizontal para formular funciones de transporte de sedimento asociadas con la socavación local. La integración de las funciones de transporte de sedimento conduce a las relaciones de las variables dependientes con las cuales se expresa la profundidad de socavación como una función del tiempo. Valentin [8] observó la profundidad de socavación máxima producida aguas abajo de una compuerta, bajo condiciones de flujo libre, cuando un resalto hidráulico se forma sobre el fondo erosionable. Según Valentin [8], el análisis dimensional indica que la profundidad de socavación máxima es función

del número de Froude y del tamaño del material. Valentin [8] no consideró en el análisis el efecto de la profundidad de aguas abajo. Este es un parámetro importante para ser tomado en consideración aún en el rango de las descargas libres.

Según refieren Breusers y Raudkivi [9], Laursen en 1952 midió la socavación producida por un chorro plano completamente sumergido. Ellos señalan que Altinbilik y Basmaci en 1973 repitieron los ensayos de Laursen, obteniendo una ecuación para la profundidad de socavación en el estado de equilibrio en función de la velocidad de salida del chorro, el espesor del chorro, el ángulo de reposo del material y del número de Froude densimétrico. Indican que Rajaratnam en 1981 realizó ensayos con chorros horizontales planos. Encontró que las dimensiones del foso de socavación cambiaban si el chorro no estaba completamente sumergido. Dey y Westrich [10] presentaron resultados experimentales sobre la variación del foso de socavación con el tiempo y de las características del flujo correspondientes al estado de casi-equilibrio de la socavación de un fondo cohesivo, aguas abajo de una losa rígida, producida por un chorro horizontal sumergido. Obtuvieron empíricamente una ecuación para la variación de la profundidad de socavación máxima con el tiempo.

Análisis Dimensional

Entre las variables principales que intervienen en la socavación local, producida por un chorro de pared horizontal sumergido, cabe mencionar el espesor del chorro, definido por la abertura de la compuerta B_0 , la velocidad media del chorro U_0 o alternativamente la diferencia entre las profundidades del flujo aguas arriba y aguas abajo de la compuerta ΔH , la longitud de la losa rígida L , el diámetro del grano d_{50} , el ancho del canal B , la densidad del agua ρ , la viscosidad cinemática del agua ν , la densidad del sedimento ρ_s , la aceleración de la gravedad g y el tiempo de socavación t . Los parámetros más significativos que se han usado para describir los perfiles del fondo socavado, en el estado de equilibrio, son la distancia a la profundidad de socavación máxima X_m , medida desde el final de la losa rígida o lecho fijo, la profundidad de socavación máxima S_m , la altura máxima de la duna h_r ,

la distancia al pico de la duna X_D , medida desde el final de la losa rígida, la longitud del foso desde el final de la losa rígida hasta el punto de intersección entre el nivel del fondo original y el modificado L_{sm} , y la profundidad de socavación en el borde de la losa S_b , como se muestra en la Figura 1. Todos los experimentos se desarrollaron en un canal de 0.5 m de ancho y se descargó agua a través de la compuerta de admisión inferior para generar el chorro sobre el fondo erosionable. Por lo tanto, X_m , S_m , h_r , L_{sm} , X_D y S_b se pueden expresar en la forma funcional siguiente:

$$X_m, S_m, h_r, L_{sm}, X_D, S_b = f_{1, 2, 3, 4, 5, 6} (B_0, U_0, d_{50}, L, g, t, \nu, \rho_s, \rho) \quad (1)$$

Empleando el teorema π de Vaschy-Buckingham se obtiene la siguiente relación adimensional que rige el fenómeno de socavación

$$\frac{X_m}{B_0}, \frac{S_m}{B_0}, \frac{h_r}{B_0}, \frac{L_{sm}}{B_0}, \frac{X_D}{B_0}, \frac{S_b}{B_0} = f_{7, 8, 9, 10, 11, 12} \left(\frac{U_0}{\sqrt{g B_0}}, \frac{L}{B_0}, \frac{U_0 t}{B_0}, \left(\frac{g \Delta}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} d_{50}, \frac{d_{50}}{B_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad (2)$$

donde $\Delta = (\rho_s/\rho - 1)$ es la densidad relativa sumergida. Cuando la profundidad del flujo aguas abajo de la compuerta es menor o aproximadamente igual que el espesor del chorro, definido por la abertura B_0 , éste actúa bajo las condiciones de flujo libre, y la altura de la vena contraída influye en el comportamiento del chorro. Se generan ondulaciones ligeras en la superficie, tendiendo a la formación de un resalto ondulado (no ahogado) en el lecho móvil. Bajo estas condiciones de flujo, se producen cambios en la geometría y en las dimensiones del foso de socavación, puesto que no se forma la duna aguas abajo, al final del foso de socavación, característica del foso generado por un chorro completamente sumergido.

Experimentación

El estudio experimental se desarrolló en un canal de 8.5 m de longitud, 0.50 m de ancho y 0.50 m de profundidad. El canal tiene un tramo de paredes de vidrio, que permite la visualización del flujo y en el cual se ubicó la compuerta. El fondo erosionable tenía 15 cm de espesor. Se usaron

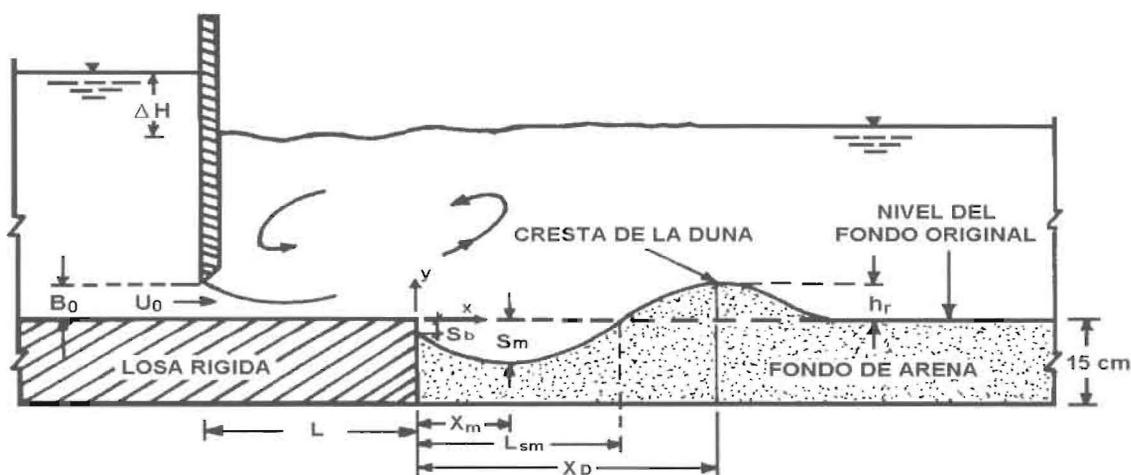


Figura 1. Esquema de definición para la socavación producida por un chorro horizontal plano sumergido.

dos tamaños de arena natural uniforme con d_{50} de 1.4 y 3.1 mm. Los experimentos se realizaron con diferentes aberturas de compuerta $B_0 = 0.50$, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 y 3.50 cm y varias descargas. El caudal Q se midió con un vertedero de cresta aguda ubicado al final del canal y se varió entre 2 l/s y 15.5 l/s. Durante la etapa experimental, la compuerta se ubicó aguas arriba en dos distancias diferentes, $L = 12$ y 26 cm, medidas desde el final de la losa rígida. Se generó un chorro horizontal, sumergido y bidimensional, aplicando una diferencia de carga apropiada a través de la abertura de la compuerta. Para cada experimento, la profundidad del flujo sobre el fondo erosionable se mantenía relativamente constante, operando una compuerta de persiana ubicada aguas abajo del canal. El chorro de agua que salía desde la abertura de la compuerta estaba bien sumergido por el agua del lado de corriente abajo. Tan pronto como el agua, que fluía desde la abertura de la compuerta, alcanzaba el fondo erosionable se iniciaba el proceso de socavación aguas abajo de la sección final de la losa rígida y, la geometría del foso de socavación cambiaba con el tiempo. Se observó que durante la etapa inicial la tasa de socavación era muy alta. Luego, ésta disminuía gradualmente con el tiempo transcurrido.

Con la finalidad de obtener resultados experimentales sobre la evolución temporal del foso de socavación, los perfiles de algunos fosos de socavación se marcaron cada cierto tiempo t sobre

una lámina plástica transparente adherida a la pared de vidrio del canal y, posteriormente cuadrículada con elementos de 1 cm de lado. La posición del foso de socavación se midió con un intervalo horizontal de un centímetro. Para la mayoría de los experimentos, los perfiles de los fosos de socavación sólo se midieron en el estado final de equilibrio. Se consideró que se alcanzaba el estado de equilibrio cuando ya no se observaba movimiento de los granos en la zona de socavación máxima.

Concluido cada experimento se procedía a medir, en cada perfil de socavación en el estado de equilibrio, las longitudes características del foso de socavación: X_m , X_D , S_m , h_r , L_{sm} y S_b . Antes de empezar otro experimento se nivelaba el fondo perturbado, después de desaguar y secar el material del fondo.

Presentación y Discusión de los Resultados

Para estudiar el fenómeno de socavación local producida aguas abajo de un fondo fijo, se realizaron 42 experimentos. En cada ensayo se midieron las longitudes características del fondo erosionado en el estado asintótico. Las condiciones experimentales de los ensayos se muestran en la Tabla 1.

A manera de ilustración, en la Figura 2 se presentan algunos perfiles del fondo erosionado en el estado de equilibrio. Se observa que para un

Tabla 1
 Datos experimentales de la socavación producida por un chorro de agua horizontal sumergido.

No. Exp.	U_0 (m/s)	B_0 (cm)	S_m (cm)	X_D (cm)	X_m (cm)	L_m (cm)	h_r (cm)	No. Exp.	U_0 (m/s)	B_0 (cm)	S_m (cm)	X_D (cm)	X_m (cm)	L_m (cm)	h_r (cm)
$d_{50} = 3.1 \text{ mm}$				$L = 12 \text{ cm}$				22	1.25	1.0	3.13	19.2	8.00	13.79	3.02
1	1.68	1.0	4.56	26.5	8.50	17.05	5.75	23	1.58	1.0	4.63	25.8	8.00	17.07	4.63
2	1.17	2.0	5.34	31.5	11.25	21.45	5.74	24	1.88	1.0	5.94	37.1	10.50	22.21	6.80
3	1.23	3.0	7.02	41.0	14.00	27.91	7.10	$d_{50} = 1.4 \text{ mm}$				$L = 12 \text{ cm}$			
4	1.53	1.5	5.89	36.0	11.50	21.29	7.55	25	1.81	1.5	9.30	56.0	14.8	34.00	8.88
5	1.23	2.5	6.16	35.0	12.00	24.35	5.60	26	1.55	1.0	6.79	43.0	11.0	24.74	6.34
6	1.57	3.5	10.5	63.5	21.00	40.68	11.43	27	1.79	1.0	7.68	53.0	12.5	30.25	7.48
7	1.45	0.5	2.54	19.0	7.50	12.81	3.87	28	1.86	1.0	8.70	53.0	13.5	30.35	7.72
8	0.97	1.0	3.35	21.5	9.80	16.60	3.35	29	1.49	1.0	5.96	37.0	10.0	22.18	5.20
9	1.44	1.5	5.72	31.4	11.60	22.25	5.12	30	1.68	1.0	6.66	43.0	11.0	24.83	5.92
10	1.62	1.5	6.73	39.5	13.00	25.89	6.79	31	1.46	1.0	5.34	36.0	9.50	20.78	5.26
11	1.54	1.5	5.47	32.8	9.80	20.58	6.50	32	1.29	1.5	5.40	36.0	9.50	21.02	5.25
12	1.80	1.5	6.82	43.5	12.00	26.80	8.63	33	1.05	1.5	4.26	26.2	7.50	16.20	3.66
13	1.82	1.5	6.75	40.3	13.00	25.51	6.37	34	0.89	1.5	3.40	21.3	7.20	13.72	3.02
14	1.57	2.0	6.60	43.0	14.00	25.18	7.89	35	0.84	1.5	3.25	19.8	6.00	13.32	2.86
15	1.51	2.0	6.81	41.0	13.00	25.37	7.17	36	0.97	1.5	3.68	23.3	7.00	14.76	3.13
16	1.72	2.0	8.89	52.0	15.00	30.91	8.80	37	1.16	1.5	4.96	32.8	9.00	20.22	4.36
17	1.45	2.0	6.51	39.5	13.20	24.09	7.59	38	1.57	1.5	8.27	49.5	12.8	30.59	6.29
18	1.79	2.0	9.06	52.5	15.00	33.61	9.89	39	1.43	1.5	6.48	42.5	11.5	25.33	5.78
19	1.15	2.0	4.72	27.0	8.50	18.11	4.83	40	1.05	2.0	5.00	35.0	9.00	20.71	4.77
20	1.63	1.0	4.59	28.5	10.50	19.40	5.33	41	0.97	2.0	4.65	29.0	8.80	18.18	4.07
21	1.89	1.0	5.87	36.0	10.50	23.74	6.91	42	1.49	2.0	8.87	61.0	13.80	35.99	8.01

mismo valor de la abertura de la compuerta B_0 , las dimensiones del foso de socavación se incrementan con la velocidad del chorro U_0 .

Además, se obtiene que la abertura de la compuerta B_0 es un parámetro importante en el proceso de socavación. El tamaño del foso de socavación se incrementa con el valor de B_0 .

Esta investigación está dirigida principalmente a determinar la profundidad de socavación máxima y la geometría del foso de socavación en el estado de equilibrio. Se procesaron 42 experimentos. Una vez realizadas varias pruebas con los parámetros adimensionales, según la Ecuación 2, se obtiene que los parámetros característicos que permiten definir las dimensiones del foso de socavación son el número de Froude $F_0 = U_0 / (gB_0)^{1/2}$ y el diámetro espe-

cífico $d_s = (g\Delta/\nu^2)^{1/3} d_{50}$. Así, en la Figura 3 se presentan los valores experimentales de la profundidad de socavación máxima adimensional S_m/B_0 y las distancias adimensionales X_m/B_0 y L_{sm}/B_0 contra el número de Froude F_0 y el diámetro específico d_s . En la Figura 3 se visualiza que el valor de S_m/B_0 se incrementa con F_0 , pero disminuye con incrementos del valor de d_s . Empleando el método de correlación múltiple se obtiene, para los datos del presente estudio, una expresión que permite predecir la profundidad de socavación máxima S_m en función de F_0 y d_s , dada por

$$\frac{S_m}{B_0} = 2498 F_0^{1.089} d_s^{-0.245} \quad (3)$$

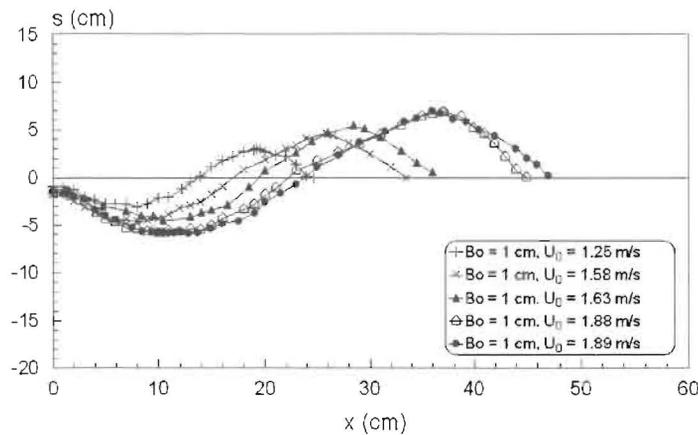


Figura 2. Perfiles de socavación en el estado de equilibrio para $L=12$ cm y $d_{50}=3.1$ mm.

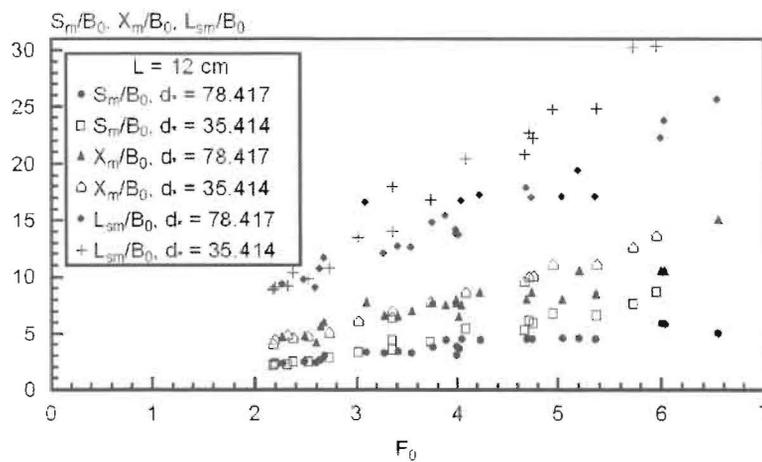


Figura 3. Variación de S_m/B_0 , X_m/B_0 y L_{sm}/B_0 con el número de Froude F_0 y el diámetro específico d_s .

La Ecuación 3 entrega un coeficiente de correlación $r^2 = 0.91$ y un error medio de 9.13%.

A manera de ilustración, la Figura 4 exhibe los valores de S_m/B_0 experimentales y los estimados según la Ecuación 3, y muestra la bondad del ajuste realizado. Se observa que existe poca dispersión entre los valores medidos y calculados. Con respecto a los valores de X_m/B_0 , se observa también en la Figura 3 que éstos también se incrementan con F_0 y disminuyen lentamente al aumentar d .

Empleando los parámetros antes mencionados y usando el método de correlación múltiple se obtiene que

$$\frac{X_m}{B_0} = 2526 F_0^{1.005} d^{-0.068} \quad (4)$$

El coeficiente de correlación entre los valores de X_m/B_0 obtenidos experimentalmente y los

estimados, según la Ecuación 4, es 0.956 y el error relativo medio es 7.44%. En la Figura 3 se visualiza que el valor de la longitud adimensional del foso L_{sm}/B_0 se incrementa más rápidamente con el número de Froude F_0 , pero disminuye con el aumento de d . A partir del método de correlación múltiple se obtiene la siguiente ecuación que describe, razonablemente bien, los puntos experimentales

$$\frac{L_{sm}}{B_0} = 9264 F_0^{1.053} d^{-0.22} \quad (5)$$

que entrega un coeficiente de correlación $r^2 = 0.917$ y un error medio de 7.56%.

Con el fin de estudiar el comportamiento de la distancia X_D , a la cual se ubica el pico de la duna y la altura de la cresta de la duna h_r , en la Figura 5 se ilustran los valores experimentales de X_D/B_0 y h_r/B_0 en función de F_0 y de d .

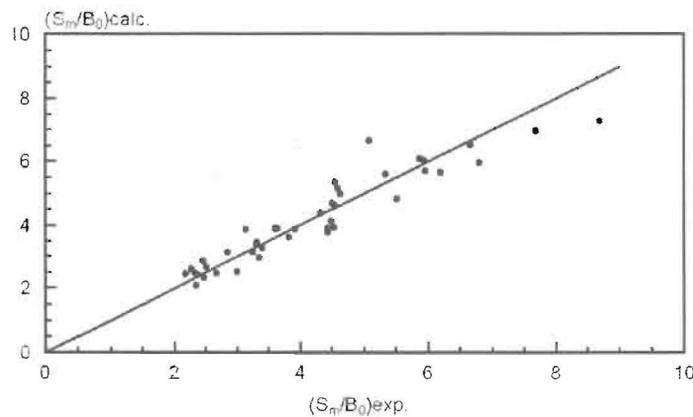


Figura 4. Valores de S_m/B_0 experimentales y los calculados a partir de la Ecuación 3.

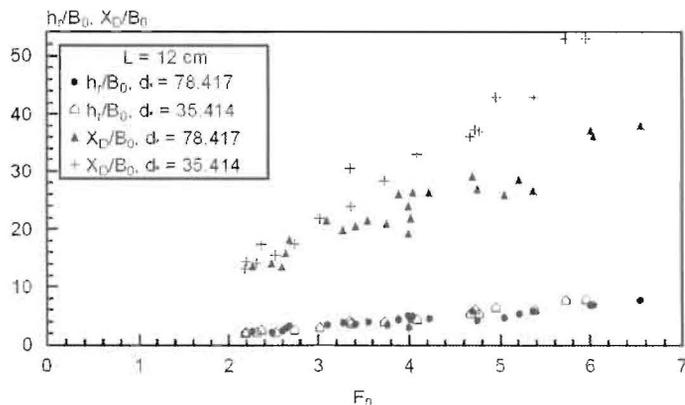


Figura 5. Relación entre las distancias adimensionales X_D/B_0 y h_r/B_0 con F_0 y d .

Se observa que la distancia X_D se incrementa rápidamente con F_0 pero disminuye al aumentar d . A partir de la información experimental, y empleando los parámetros anteriores, observando la buena relación que éstos generan, se obtiene mediante correlación múltiple la siguiente ecuación:

$$\frac{X_D}{B_0} = 20.153 F_0^{1.13} d^{-0.324} \quad (6)$$

la cual presenta un coeficiente de correlación $r^2 = 0.923$ y un error medio de 8.39%. La Figura 5 también muestra que la distancia adimensional h_r/B_0 se incrementa con el número de Froude F_0 y varía muy poco con d . A partir de la información experimental y empleando el método de correlación múltiple se obtiene que

$$\frac{h_r}{B_0} = 0.893 F_0^{1.214} d^{-0.013} \quad (7)$$

con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.919$ y un error medio de 9.06%. Siguiendo con el análisis de las longitudes características del foso de socavación, en la Figura 6 se exhiben los puntos experimentales de las relaciones L_{sm}/B_0 , X_m/B_0 , h_r/B_0 y X_D/B_0 contra S_m/B_0 de los fosos de socavación producidos por el chorro horizontal de agua sobre los dos tamaños de arena, empleados como material de fondo. La Figura 6 muestra que el valor de h_r/S_m tiende a 1. Con respecto a la relación X_D/S_m , se observa que ésta tiende a ser aproximadamente igual a 6.38, independientemente del número de Froude F_0 y del diámetro específico d .

La Figura 6 también ilustra que la relación entre longitud L_{sm} y la profundidad de socavación máxima S_m está alrededor de 3.75 y que la relación X_m/S_m es aproximadamente 1.80. A partir de la Figura 6 se obtiene que $L_{sm} \cong 2.08 X_m$. Combinando las relaciones anteriores se obtiene que $X_D \cong 6.38 h_r$. Finalmente, también se obtiene que la profundidad de socavación que ocurre al borde de la losa rígida S_b es aproximadamente 1/3 de S_m .

Para estudiar la semejanza de los perfiles de socavación en el estado asintótico, se graficaron los valores de s/X_D contra x/X_D como se muestra en la Figura 7, donde s es la profundidad de socavación en la distancia longitudinal x . Adicionalmente, en la Figura 7 se presenta la ecuación empírica que muestra muy buena correlación con los puntos experimentales, dada por

$$\frac{s}{X_D} = 0.165 \cos \left(4.75 \frac{x}{X_D} + 1.775 \right) \quad (8)$$

válida para $0 < x/X_D \leq 1.279$. La Ecuación 8 entrega un error medio de 20%.

Con la finalidad de estudiar la evolución temporal del foso de socavación se midió, para algunos experimentos, el perfil del fondo erosionado para diferentes valores del tiempo t , hasta que se estableció el estado asintótico. A manera de ilustración, en la Figura 8 se muestran una serie de perfiles del fondo erosionado, para diferentes tiempos, de un experimento típico. A partir de estos perfiles se puede medir la socavación máxima S_m . Se obtiene que para un tiempo t grande, los perfiles del fondo erosionado se hacen casi invariantes con el tiempo.

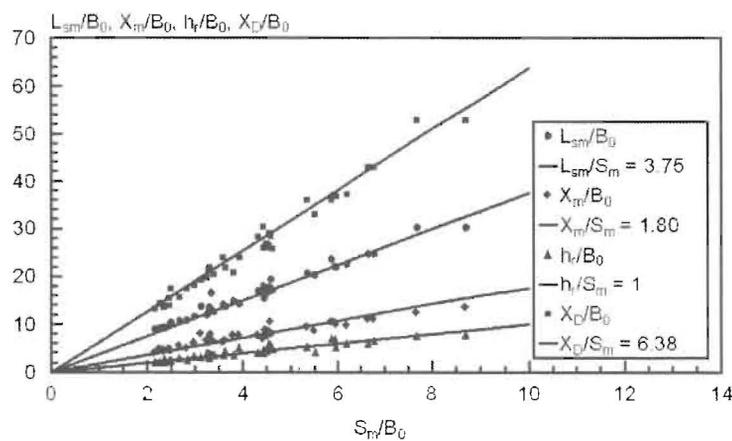


Figura 6. Relación entre las longitudes características del foso de socavación.

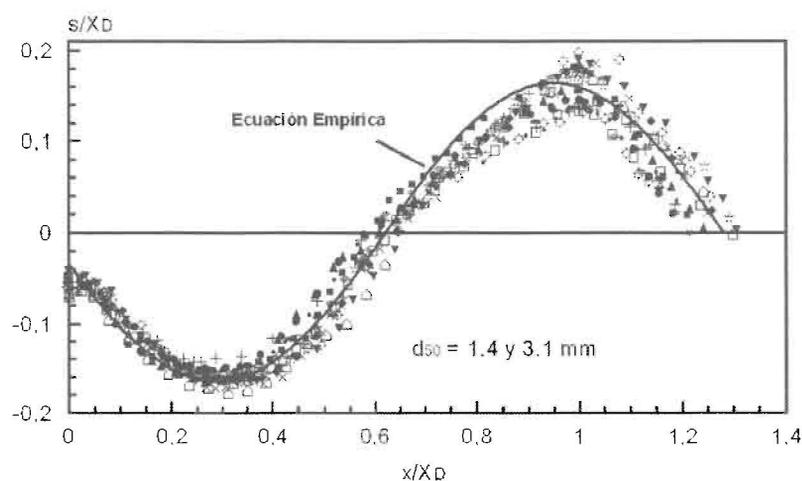


Figura 7. Perfiles adimensionales del foso de socavación para los dos tamaños de arena y $L = 12 \text{ cm}$.

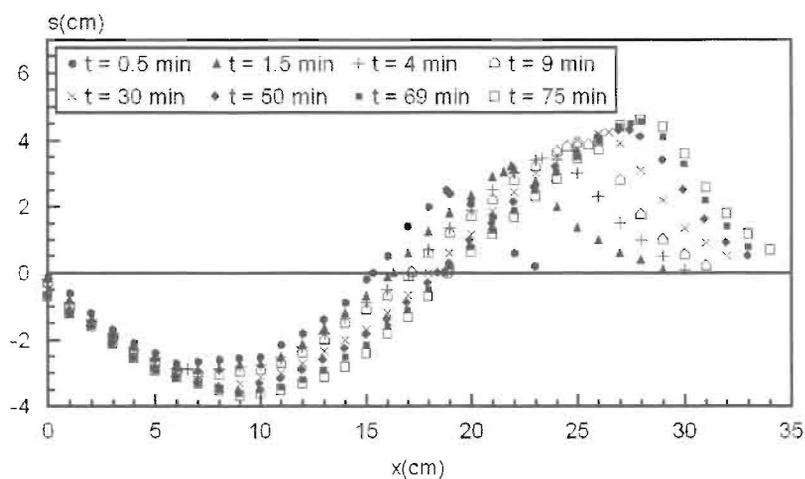


Figura 8. Evolución temporal de los perfiles de socavación, experimento 3, $d_{50} = 1.4 \text{ mm}$, $L = 26 \text{ cm}$.

En la Figura 9 se exhiben los perfiles adimensionales del fondo erosionado, del experimento 3, en diferentes tiempos. Se observa que los perfiles de socavación adimensionales también son de naturaleza similar, independientes del tiempo, si se emplea la distancia X_D para adimensionalizar.

En la Figura 10 se presenta la variación de S_m/B_0 con U_0t/B_0 para algunos puntos experimentales. Un análisis de regresión lineal múltiple a los datos experimentales condujo a la siguiente ecuación para la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima

$$\frac{S_m}{B_0} = 0.082 \left(\frac{U_0 t}{B_0} \right)^{0.129} F_0^{1.360} \quad (9)$$

válida para $U_0t/B_0 \leq 1.15 \times 10^6$, correspondiente al rango experimental estudiado. Para valores mayores la curva debe hacerse asintótica con la horizontal, que corresponde al estado de equilibrio. El coeficiente de correlación entre los valores medidos y los estimados es $r^2 = 0.973$, y el error medio es 4.28%, lo cual indica que la Ecuación 9 se puede usar adecuadamente para la predicción de la profundidad de socavación máxima en cualquier tiempo, en el rango indicado.

Se observa que las curvas ajustadas se acercan a los datos experimentales. Las curvas indican que la tasa de crecimiento de la profundidad de socavación es más alta en la etapa inicial, durante los primeros minutos, y va disminuyendo a medida que el proceso de socavación avanza.

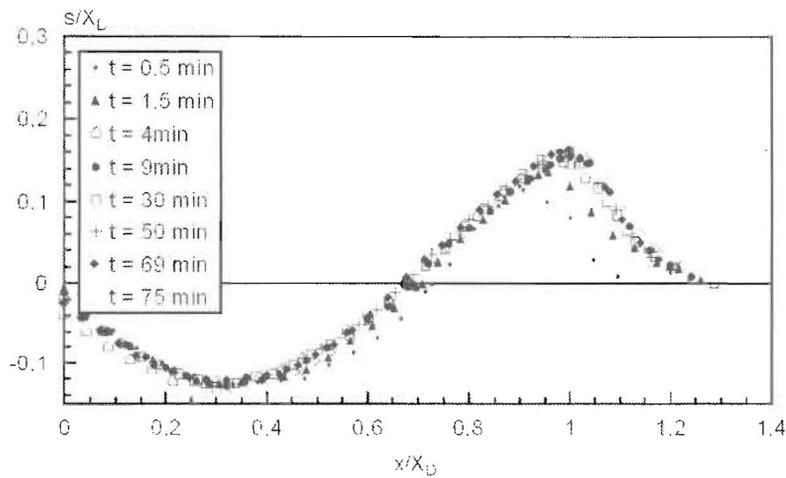


Figura 9. Perfiles adimensionales, $d_{50} = 1.4 \text{ mm}$, $L = 26 \text{ cm}$.

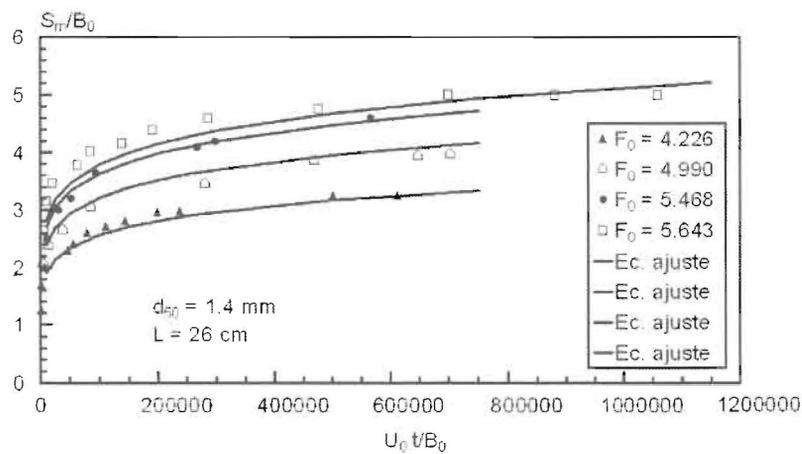


Figura 10. Variación de S_m/B_0 con $U_0 t/B_0$.

Se realizó un análisis similar para encontrar la evolución temporal de la longitud del foso de socavación L_{sm} . A partir de un análisis de correlación múltiple a los valores experimentales, se obtuvo una ecuación que permite predecir la evolución temporal de L_{sm} , dada por

$$\frac{L_{sm}}{B_0} = 1158 \left(\frac{U_0 t}{B_0} \right)^{0.08} F_0^{1.081} \quad (10)$$

la cual se puede emplear para $U_0 t/B_0 \leq 1.15 \times 10^6$, $d_{50} = 1.4 \text{ mm}$ y $L = 26 \text{ cm}$. La comparación entre los valores de L_{sm}/B_0 obtenidos de la Ecuación 10 y los experimentales se muestra en la Figura 11.

El coeficiente de correlación entre los valores medidos y calculados es $r^2 = 0.929$ y el error relativo medio es 3.946%. La Figura 11 muestra

que los valores de L_{sm}/B_0 , obtenidos de la ecuación 10, están en buen acuerdo con las observaciones experimentales.

Conclusiones

Los perfiles de socavación son similares, independientes del tiempo, tomando la distancia X_D como escala de longitud para adimensionalizar.

Las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio: S_m , h_r , X_m , X_D y L_{sm} son funciones principalmente del número de Froude F_0 y del diámetro específico d_s .

A partir de los datos experimentales se obtienen relaciones entre las dimensiones características del foso de socavación, independientemente del tamaño del sedimento.

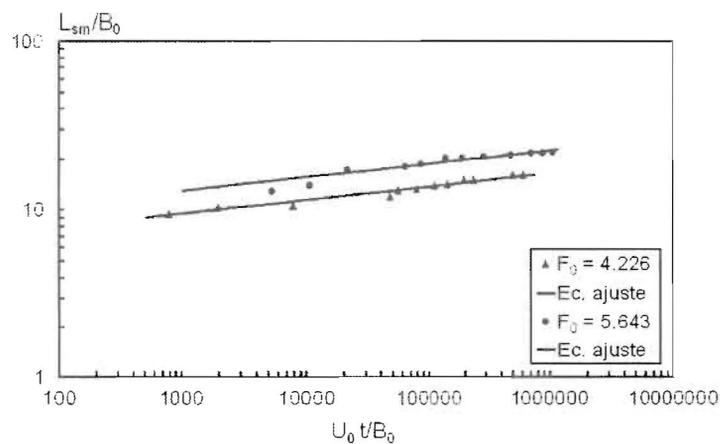


Figura 11. Variación de L_{sm}/B_0 con U_0t/B_0 .

Se obtuvieron ecuaciones empíricas que permiten predecir la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima y la longitud del foso, con muy buen ajuste experimental.

Agradecimiento

Los autores agradecen al "Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico" de la Universidad de los Andes por su apoyo financiero a través de Programa CVI-ADG-I-07-95 y el Proyecto I-566-97-02-C.

Referencias Bibliográficas

1. Rouse, H. "Criteria for Similarity in Transportation of sediment". Bulletin 20, State Univ, Iowa City, Iowa (1939).
2. Breusers, H.N.C. "Conformity and Time Scale in Two-dimensional Local Scour". Publication 40, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands. (1965).
3. Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N. "Submerged Horizontal Jet Over Erodible Bed". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 106, No. HY11 (1980) 1765-1782.
4. Hassan, N.M.K. y Narayanan, R. "Local Scour Downstream of an Apron". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 11 (1985) 1371-1385.
5. Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N., Chatterjee, M. "Local Scour Due to Submerged Horizontal Jet". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 8 (1994) 973-992.
6. Chiew, Y.M., Lim, S.Y. "Local Scour by a Deeply Submerged Horizontal Circular Jet". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 9 (1996) 529-532.
7. Cartens, M.R. "Similarity Laws for Localized Scour". Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. HY3 (1966) 13-36.
8. Valentin, F. "Considerations Concerning Scour in the Case of Flow Under Gates". Proceedings Twelfth Congress of the International Association for Hydraulic Research, IAHR, Fort Collins, Colorado, USA, Vol. 3 (1967).
9. Breusers, H.N.C., Raudkivi, A.J. "Scouring", Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 101- 104. 1991.
10. Dey, S., Westrich, B. "Hydraulics of Submerged Jet Subject to Change in Cohesive Bed Geometry". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 1 (2003) 44-53.

Recibido el 03 de Marzo de 2004

En forma revisada el 14 de Octubre de 2004