



SOCAVACIÓN LOCAL EN UN FONDO MÓVIL AGUAS ABAJO DE UNA LOSA RÍGIDA

Alix T. Moncada M., Julián Aguirre PE

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería
Laboratorio de Hidráulica, Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA)
Mérida, A-5101, Venezuela

(24 de marzo de 2004, para publicación 23 de junio de 2004)

Resumen – En este trabajo se analiza la socavación local en un fondo móvil aguas abajo de una losa rígida, debida a un chorro de agua horizontal sumergido que sale desde una compuerta. Se hizo un estudio experimental del fenómeno. Los experimentos se realizaron con dos tamaños de arena como material de fondo, para diferentes aberturas de compuerta y velocidades del chorro. Se empleó un canal de paredes de vidrio, 0.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad. En cada experimento se midió el perfil del fondo socavado en el estado de equilibrio. Los parámetros que caracterizan el fenómeno de socavación se identificaron con base en el razonamiento físico y el análisis dimensional. Se obtuvieron expresiones empíricas que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio. Además, se presentan algunos resultados experimentales de la evolución temporal del foso de socavación. Se obtienen empíricamente ecuaciones para predecir la variación con el tiempo de la profundidad de socavación máxima y la longitud del foso de socavación.

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de ingeniería hidráulica, el estudio de la socavación en fondos de arena, grava y arcilla es de considerable importancia, ya que es necesario predecir y controlar la erosión cerca de estructuras hidráulicas, la cual puede poner en peligro la seguridad de tales estructuras.

La socavación local es un fenómeno que se presenta en los escurrimientos en cauces con lechos móviles. Se debe a una perturbación local del lecho causada por vórtices originados por alguna singularidad del escurrimiento, tal como presencia de un obstáculo, cambio de dirección del flujo, implantación de obras en un cauce aluvial o cambios bruscos de lecho fijo a lecho móvil.

Los flujos a través de estructuras hidráulicas ocurren frecuentemente en forma de chorros de agua turbulentos. Generalmente, las velocidades son suficientemente altas para que éstos puedan producir fosos de socavación de dimensiones notables e incluso peligrosos. Los chorros pueden ocurrir bajo diferentes configuraciones. Los estudios incluyen chorros horizontales y verticales, chorros bidimensionales y tridimensionales, chorros libres o sumergidos y chorros con varias configuraciones de frontera.

Una de las situaciones que ha atraído considerable atención es la socavación alrededor de pilas de puentes. 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, debida a la socavación aguas abajo, producida por la acción de un chorro de fluido que sale desde la abertura de la compuerta. El agua que descarga a través de una esclusa forma un chorro horizontal que puede fluir sobre un fondo erosionable después de abandonar una losa rígida. La alta velocidad del chorro causa esfuerzos de corte local altos que, generalmente, exceden el esfuerzo cortante crítico para el movimiento incipiente del material del fondo. Esto ocasiona socavación local aguas abajo de la losa rígida, la cual causa un incremento en la profundidad del flujo local.

El problema de socavación es extremadamente complejo puesto que las condiciones del flujo, inclusive de turbulencia, en el foso de socavación son difíciles de evaluar. Aún cuando esto sea posible, la interacción entre los sedimentos y las propiedades del flujo no es fácil de cuantificar. Por eso, el análisis teórico de la socavación local por chorros está en una etapa rudimentaria, y 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 una losa rígida. El chorro de agua que sale desde la compuerta genera un chorro de pared sobre un fondo rígido antes de que éste encuentre un lecho de material no cohesivo. 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.

2. ESTUDIOS PREVIOS

La socavación local aguas abajo de una losa rígida fue investigada experimentalmente por Breusers [1], Chatterjee y Ghosh [2], Hassan y Narayanan [3] y Chatterjee *et al.* [4], entre otros. Chatterjee y Ghosh [2] 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 hacia un fondo de arena.

Chatterjee *et al.* [4] realizaron una investigación experimental sobre la socavación producida por un chorro de agua horizontal. Desarrollaron relaciones empíricas sobre el tiempo requerido para alcanzar la profundidad de equilibrio, el volumen de socavación en cualquier tiempo, la ubicación del punto de socavación máxima y el pico de la duna, la variación con el tiempo de la profundidad de socavación máxima y la profundidad de socavación máxima en equilibrio. Encontraron que para fondos de arena y grava, la profundidad de socavación máxima en el estado de equilibrio S_m se puede expresar como:

$$\frac{S_m}{B_0} = 0.775 \left(\frac{U_0}{\sqrt{g B_0}} \right) \quad (1)$$

en la cual U_0 es la velocidad del chorro, B_0 es el espesor del chorro y g es la aceleración de gravedad.

Chiew y Lim [5] investigaron la socavación causada por un chorro circular profundamente sumergido sobre un fondo de material no cohesivo. 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 foso 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 [3] estudiaron las características del flujo y la similitud de los perfiles de socavación aguas abajo de una losa rígida, producidos por un chorro de agua que sale desde una compuerta. Observaron que la longitud de la losa producía desviaciones en la semejanza de los perfiles, aguas abajo de la profundidad de socavación máxima.

Según refieren Breusers y Raudkivi [6], Laursen midió, en 1952, la socavación producida por un chorro plano completamente sumergido. 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 dada por:

$$\frac{S_m}{B_0} = (\tan\phi)^A \left(\frac{d}{B_0} \right)^{0.25} \left(\frac{U_0}{\sqrt{g \Delta d}} \right)^{1.5} \quad (2)$$

En esta expresión, ϕ representa el ángulo de reposo del material, $A = 0.5$ es un coeficiente numérico experimental, $\Delta = (\rho_s/\rho - 1)$ es el peso específico relativo sumergido (en la cual ρ es la densidad del agua y ρ_s la densidad del sedimento), y d es el diámetro del material del fondo. Los experimentos fueron realizados con B_0 de 6 a 50 mm, los materiales del fondo eran arena con $d = 1.2$ y 6.5 mm y carbón de diámetro $d = 2.65$ mm ($\rho_s = 1300$ kg/m³). Las velocidades del chorro U_0 estaban entre 0.6 y 4.3 m/s.

Dey y Westrich [7] presentaron los resultados de una investigación experimental sobre la variación del foso de socavación con el tiempo y de las características del flujo para el estado de casi-equilibrio de socavación de un fondo cohesivo, aguas abajo de una losa rígida, debido a un chorro horizontal sumergido. Obtuvieron empíricamente una ecuación para la variación con el tiempo de la profundidad de socavación máxima.

Mazurek *et al.* [8] presentaron los resultados de un estudio de laboratorio para examinar el efecto de las variables hidráulicas sobre la socavación de un suelo cohesivo, producida por chorros de pared turbulentos planos y sumergidos. En los ensayos, variaron la velocidad y el espesor del chorro. Midieron los perfiles del foso de socavación en el estado asintótico o de equilibrio, incluyendo la profundidad de socavación máxima, la ubicación de la socavación máxima y la longitud del foso de socavación. Mazurek *et al.* [8] presentaron observaciones relacionadas con el crecimiento de los fosos de socavación.

3. 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 empleados para describir los perfiles del fondo socavado, en el estado de equilibrio, son la distancia de ubicación de la profundidad de socavación máxima X_m , medida desde el final de la losa rígida, la profundidad de socavación máxima S_m , la altura máxima de la cresta de la duna h_r , la distancia al pico de la duna de material 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 del perfil de socavación con el nivel del fondo original L_{sm} y la profundidad de socavación en el borde de la losa S_b como se muestra en la Fig. 1. Además, se debe considerar el tiempo requerido para alcanzar la condición de equilibrio T_e .

Todos los experimentos se realizaron en un canal de 0.5 m de ancho y se descargó agua a través de la compuerta para generar el chorro. Por lo tanto, X_m , S_m , h_r , L_{sm} , X_D , S_b y T_e se pueden expresar como:

$$X_m, S_m, h_r, L_{sm}, X_D, S_b, T_e = f_{1,2,3,4,5,6,7}(B_0, U_0, d_{50}, L, g, t, \nu, \rho_s, \rho) \quad (3)$$

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

$$\frac{X_m}{B_0}, \frac{S_m}{B_0}, \frac{h_r}{B_0}, \frac{L_{sm}}{B_0}, \frac{X_D}{B_0}, \frac{S_b}{B_0}, \frac{U_0 T_e}{B_0} = f_{8,9,10,11,12,13,14} \left(\frac{U_0}{\sqrt{g B_0}}, \frac{L}{B_0}, \frac{U_0 t}{B_0}, \left(\frac{g \Delta}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} d_{50}, \frac{d_{50}}{B_0}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad (4)$$

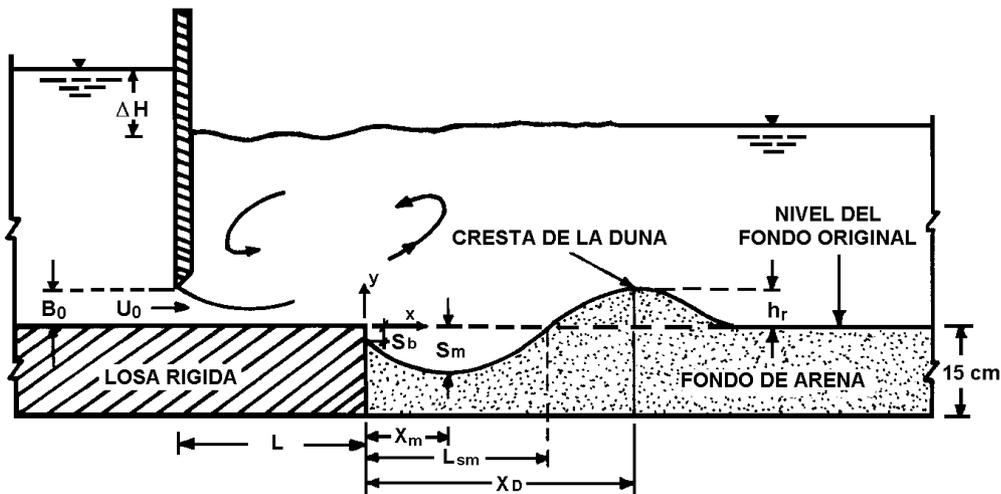


Fig. 1. Esquema de definición para la socavación producida por un chorro horizontal sumergido.

4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El estudio experimental se desarrolló en un canal de 8.5 m de longitud, 0.50 m de ancho y 0.50 m de profundidad. El canal tiene un tramo de paredes de vidrio, en el cual se ubicó la compuerta. Se usaron dos tamaños de arena 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 varió entre 2 y 15.5 l/s. La compuerta se ubicó aguas arriba a dos distancias diferentes, $L = 12$ y 26 cm. Aplicando una diferencia de carga apropiada a través de la abertura de la compuerta se generó un chorro horizontal, sumergido y bidimensional. En todos los experimentos, el chorro de agua que salía desde la abertura de la compuerta estaba bien sumergido por el agua del lado de corriente abajo. Para estudiar la evolución temporal del foso de socavación, los perfiles de algunos fosos de socavación se marcaron cada cierto tiempo t sobre una lámina transparente adherida a la pared de vidrio del canal. 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 las distancias que caracterizan el foso de socavación.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para estudiar el fenómeno de socavación local producida aguas abajo de un fondo fijo, debido a un chorro de agua horizontal sumergido, se realizaron 42 experimentos. En cada ensayo se midieron las variables que definen el flujo y 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 Fig. 2 se exhiben algunos perfiles del fondo erosionado en el estado de equilibrio para diferentes condiciones de flujo.

Se observa que para un mismo valor de B_0 , las dimensiones del foso de socavación se incrementan con U_0 . Además, se obtiene que el tamaño del foso de socavación también aumenta 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. Se obtiene que los parámetros característicos que permiten definir las dimensiones del foso de socavación son el número de Froude del chorro $F_0 = U_0/(gB_0)^{1/2}$ y el diámetro específico $d_* = (g\Delta/v^2)^{1/3}d_{50}$.

Los valores del tiempo requerido para alcanzar el estado de equilibrio T_e se presentan en la Tabla 1. Pa-

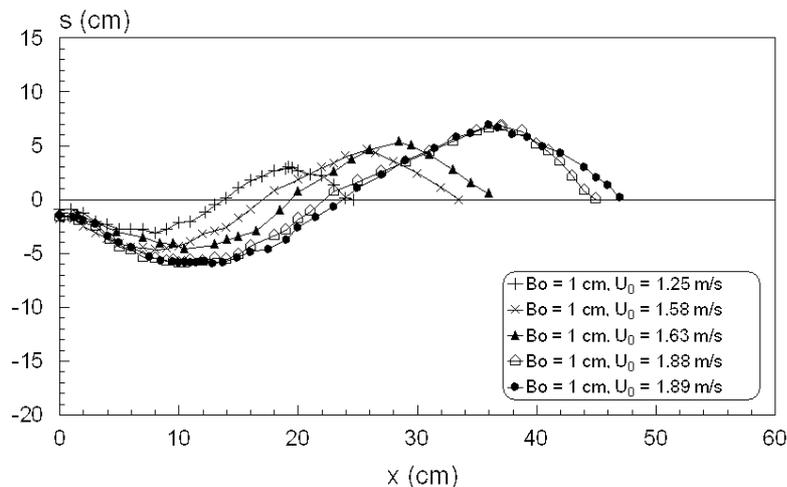


Fig. 2. Perfiles de socavación en el estado de equilibrio para $L = 12$ cm y $d_{50} = 3.1$ mm.

Tabla 1. Datos experimentales de socavación aguas abajo de una losa rígida, $L = 12$ cm.

N _{o.} Exp.	U ₀ (m/s)	d ₅₀ (mm)	B ₀ (cm)	ΔH (cm)	T _e (min)	S _m (cm)	X _D (cm)	X _m (cm)	L _{sm} (cm)	h _r (cm)	S _b (cm)
1	1.68	3.1	1.0	14.46	80	4.56	26.5	8.50	17.05	5.75	2.55
2	1.17	3.1	2.0	6.92	115	5.34	31.5	11.25	21.45	5.74	2.12
3	1.23	3.1	3.0	7.68	95	7.02	41.0	14.00	27.91	7.10	2.85
4	1.53	3.1	1.5	11.98	88	5.89	36.0	11.50	21.29	7.55	2.50
5	1.23	3.1	2.5	7.70	87	6.16	35.0	12.00	24.35	5.60	2.25
6	1.57	3.1	3.5	12.63	120	10.48	63.5	21.00	40.68	11.43	3.49
7	1.45	3.1	0.5	10.65	95	2.54	19.0	7.50	12.81	3.87	0.65
8	0.97	3.1	1.0	4.83	70	3.35	21.5	9.80	16.60	3.35	1.43
9	1.44	3.1	1.5	10.52	60	5.72	31.4	11.60	22.25	5.12	2.24
10	1.62	3.1	1.5	13.43	75	6.73	39.5	13.00	25.89	6.79	2.05
11	1.54	3.1	1.5	12.08	62	5.47	32.8	9.80	20.58	6.50	1.40
12	1.80	3.1	1.5	16.56	80	6.82	43.5	12.00	26.80	8.63	2.41
13	1.82	3.1	1.5	16.88	50	6.75	40.3	13.00	25.51	6.37	1.93
14	1.57	3.1	2.0	12.54	65	6.60	43.0	14.00	25.18	7.89	1.96
15	1.51	3.1	2.0	11.69	75	6.81	41.0	13.00	25.37	7.17	2.09
16	1.72	3.1	2.0	15.15	94	8.89	52.0	15.00	30.91	8.80	2.71
17	1.45	3.1	2.0	10.65	85	6.51	39.5	13.20	24.09	7.59	2.10
18	1.79	3.1	2.0	16.40	90	9.06	52.5	15.00	33.61	9.89	2.45
19	1.15	3.1	2.0	6.77	54	4.72	27.0	8.50	18.11	4.83	1.70
20	1.63	3.1	1.0	13.61	75	4.59	28.5	10.50	19.40	5.33	1.24
21	1.89	3.1	1.0	18.12	75	5.87	36.0	10.50	23.74	6.91	1.43
22	1.25	3.1	1.0	7.95	68	3.13	19.2	8.00	13.79	3.02	0.93
23	1.58	3.1	1.0	12.78	80	4.63	25.8	8.00	17.07	4.63	1.83
24	1.88	3.1	1.0	17.99	90	5.94	37.1	10.50	22.21	6.80	1.62
25	1.81	1.4	1.5	16.70	95	9.30	56.0	14.8	34.00	8.88	3.35
26	1.55	1.4	1.0	12.25	75	6.79	43.0	11.00	24.74	6.34	2.32
27	1.79	1.4	1.0	16.37	96	7.68	53.0	12.50	30.25	7.48	2.88
28	1.86	1.4	1.0	17.70	100	8.70	53.0	13.50	30.35	7.72	2.20
29	1.49	1.4	1.0	11.34	79	5.96	37.0	10.00	22.18	5.20	2.25
30	1.68	1.4	1.0	14.44	118	6.66	43.0	11.00	24.83	5.92	2.80
31	1.46	1.4	1.0	10.92	98	5.34	36.0	9.50	20.78	5.26	1.76
32	1.29	1.4	1.5	8.45	97	5.40	36.0	9.50	21.02	5.25	1.82
33	1.05	1.4	1.5	5.61	84	4.26	26.2	7.50	16.20	3.66	1.55
34	0.89	1.4	1.5	4.02	47	3.40	21.3	7.20	13.72	3.02	1.25
35	0.84	1.4	1.5	3.57	55	3.25	19.8	6.00	13.32	2.86	1.38
36	0.97	1.4	1.5	4.78	70	3.68	23.3	7.00	14.76	3.13	1.43
37	1.16	1.4	1.5	6.84	76	4.96	32.8	9.00	20.22	4.36	1.51
38	1.57	1.4	1.5	12.53	85	8.27	49.5	12.80	30.59	6.29	2.23
39	1.43	1.4	1.5	10.44	100	6.48	42.5	11.50	25.33	5.78	1.90
40	1.05	1.4	2.0	5.61	110	5.00	35.0	9.00	20.71	4.77	1.89
41	0.97	1.4	2.0	4.83	75	4.65	29.0	8.80	18.18	4.07	2.07
42	1.49	1.4	2.0	11.24	133	8.87	61.0	13.80	35.99	8.01	2.65

ra obtener una expresión empírica que permita predecir T_e , se graficaron los valores experimentales del parámetro adimensional $U_0 T_e / B_0$ contra el número de Froude F_0 , como se muestra en la Fig. 3. Se observa que a medida que se incrementa el número de Froude F_0 también aumenta el parámetro que contiene el tiempo necesario para alcanzar la condición de equilibrio.

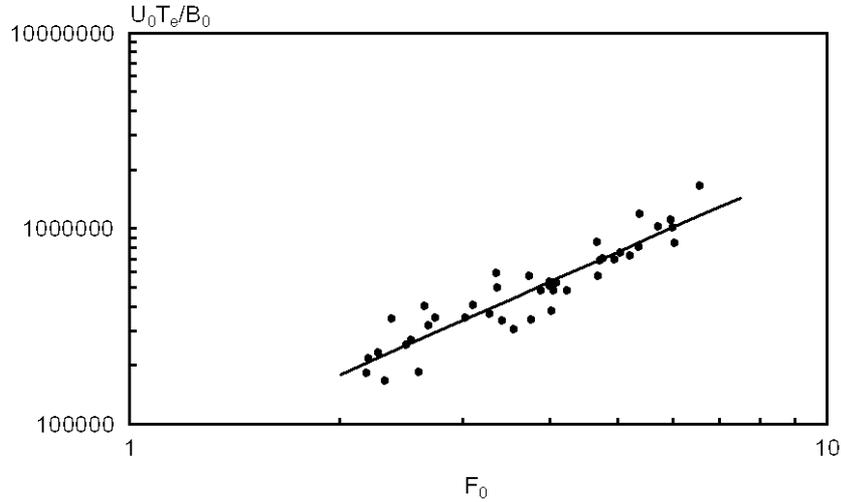


Fig. 3. Variación de $U_0 T_e / B_0$ con F_0 .

La expresión empírica obtenida a partir de un análisis de correlación lineal, aplicable a los dos tamaños de arena usados como material de fondo, está dada por:

$$\frac{U_0 T_e}{B_0} = 60604 F_0^{1.574} \quad (5)$$

El coeficiente de correlación entre los valores medidos y calculados de $U_0 T_e / B_0$ es $r^2 = 0.859$ y el error relativo promedio es 13.62%.

Con la finalidad de estudiar la geometría del foso de socavación en el estado de equilibrio, en la Fig. 4 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 F_0 y d_* .

En la Fig. 4 se visualiza que el valor de S_m / B_0 se incrementa con F_0 , pero disminuye con incrementos del valor de d_* . Empleando el método de correlación múltiple se obtiene, para los datos del presente estudio, una expresión que permite predecir el valor de S_m en función de F_0 y d_* , dada por:

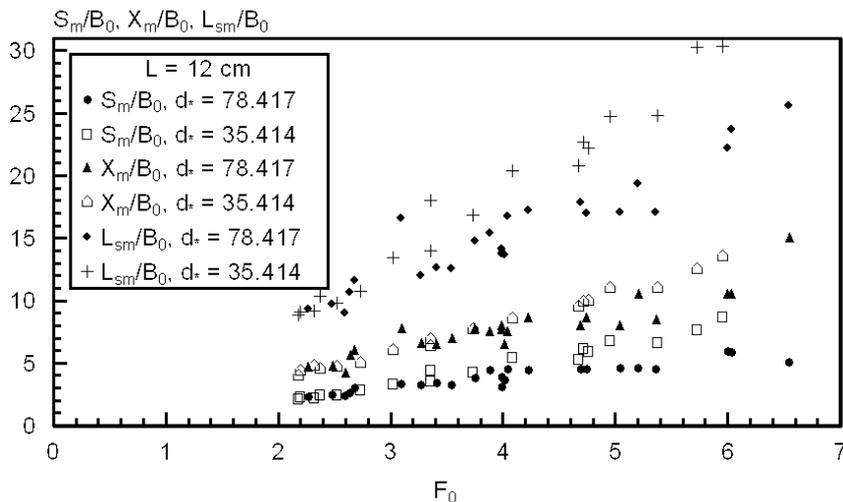


Fig. 4. Variación de S_m / B_0 , X_m / B_0 y L_{sm} / B_0 con el número de Froude F_0 y el diámetro específico d_* .

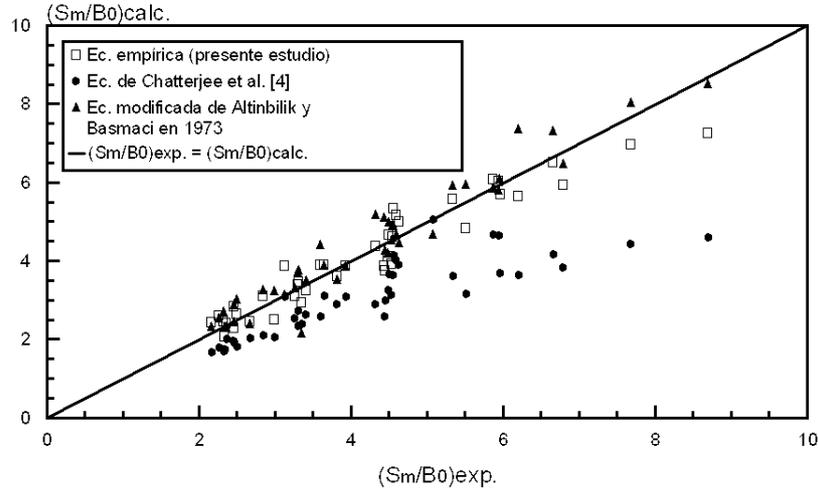


Fig. 5. Comparación entre los valores experimentales de S_m/B_0 y las ecuaciones (1), (2) y (6).

$$\frac{S_m}{B_0} = 2.498 F_0^{1.089} d_*^{-0.245} \quad (6)$$

La ecuación (6) entregó un coeficiente de correlación $r^2 = 0.91$ y un error medio de 9.13%. Con el fin de comparar la expresión obtenida para S_m/B_0 con resultados disponibles, previamente publicados por otros autores, se analizaron las ecuaciones (1) y (2). En la Fig. 5 se comparan los valores de S_m/B_0 obtenidos a partir de las ecuaciones (1), (2) y (6) con las observaciones experimentales. Para la ecuación (2), en el presente estudio se encontró que el coeficiente experimental que proporciona mejor ajuste es $A = 4$. Se observa que la ecuación (6) se aproxima bien a las ecuaciones (1) y (2), y que presenta el mejor ajuste a los datos experimentales analizados.

Con respecto a los valores de X_m/B_0 , se observa en la Fig. 4 que éstos también se incrementan con F_0 y disminuyen lentamente al aumentar d_* . Empleando los parámetros antes mencionados se obtiene que:

$$\frac{X_m}{B_0} = 2.561 F_0^{1.005} d_*^{-0.068} \quad (7)$$

la cual entregó un coeficiente de correlación $r^2 = 0.914$ y un error medio de 7.44%. En la Fig. 4 se visualiza que el valor de la longitud adimensional del foso L_{sm}/B_0 se incrementa más rápidamente con F_0 , pero disminuye con el aumento de d_* . A partir del análisis se obtiene la siguiente ecuación que describe, razonablemente bien, los puntos experimentales:

$$\frac{L_{sm}}{B_0} = 9.264 F_0^{1.053} d_*^{-0.22} \quad (8)$$

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 Fig. 6 se ilustran los valores experimentales de X_D/B_0 y h_r/B_0 en función de F_0 y de d_* .

Se observa que la distancia adimensional X_D/B_0 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 que:

$$\frac{X_D}{B_0} = 20.153 F_0^{1.13} d_*^{-0.324} \quad (9)$$

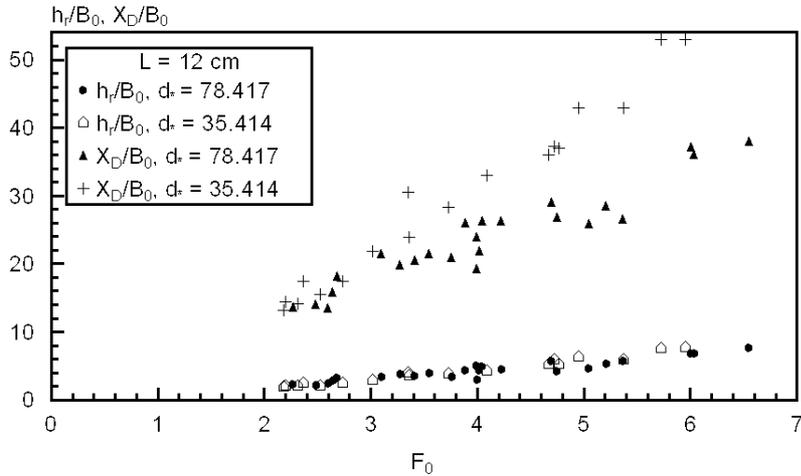


Fig. 6. Relación entre las distancias adimensionales X_D/B_0 y h_r/B_0 con F_0 y d_* .

la cual presenta un coeficiente de correlación $r^2 = 0.923$ y un error medio de 8.39%. La Fig. 6 también muestra que la distancia adimensional h_r/B_0 se incrementa con F_0 y varía muy poco con d_* . A partir de los datos experimentales y empleando el método de correlación múltiple se obtiene que:

$$\frac{h_r}{B_0} = 0.893 F_0^{1.214} d_*^{-0.013} \quad (10)$$

con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.919$ y un error medio de 9.06%.

Para encontrar relaciones entre las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio, a manera de ilustración, en la Fig. 7 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 Fig. 7 muestra que h_r/S_m tiende a 1. La relación X_D/S_m tiende a ser aproximadamente igual a 6.38. La Fig. 7 también ilustra que la relación entre L_{sm} y S_m está alrededor de 3.75 y que la relación X_m/S_m es aproximadamente 1.80. También se obtiene que $L_{sm} \cong 2.08 X_m$. Combinando las relaciones anteriores se

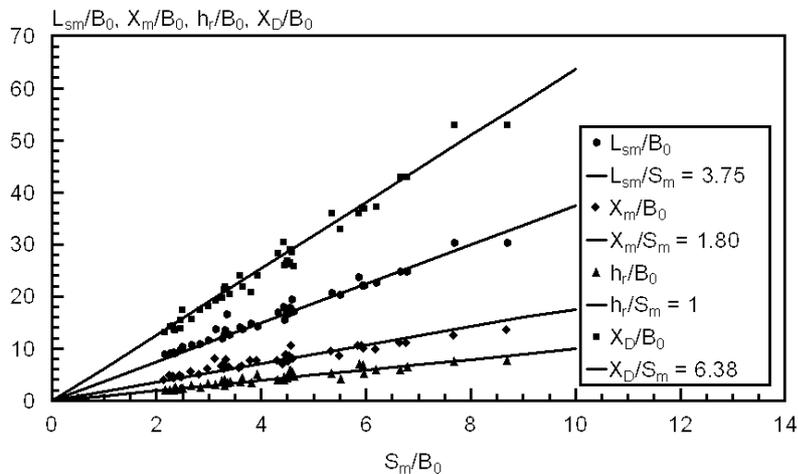


Fig. 7. Relación entre las longitudes características del foso de socavación para $d_{s0} = 1.4$ y 3.1 mm.

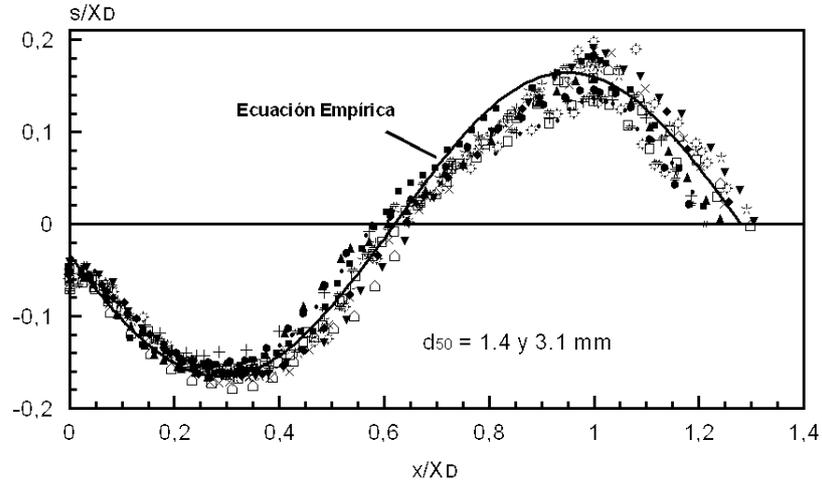


Fig. 8. Perfiles adimensionales del foso de socavación, en el estado asintótico, para los dos tamaños de arena.

encuentra que $X_D \cong 6.38 h_r$. Finalmente, también se obtiene que la profundidad de socavación que ocurre al borde 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 Fig. 8, donde s es la profundidad de socavación en la distancia longitudinal x y X_D es la distancia al pico de la duna. Se observa que los perfiles son de naturaleza similar e independientes del tamaño de la arena.

Adicionalmente, en la Fig. 8 se presenta la ecuación empírica que muestra muy buena correlación con los puntos experimentales, dada por:

$$\frac{s}{X_D} = 0.165 \cos \left(4.75 \frac{x}{X_D} + 1.775 \right) \quad (11)$$

válida para $0 < x/X_D \leq 1.279$. La ecuación (11) entrega un error medio de 20%.

Para comparar la expresión obtenida de s/X_D con estudios previos, en la Fig. 9 se presentan datos experimentales de Hassan y Narayanan [3] y la ecuación empírica (11).

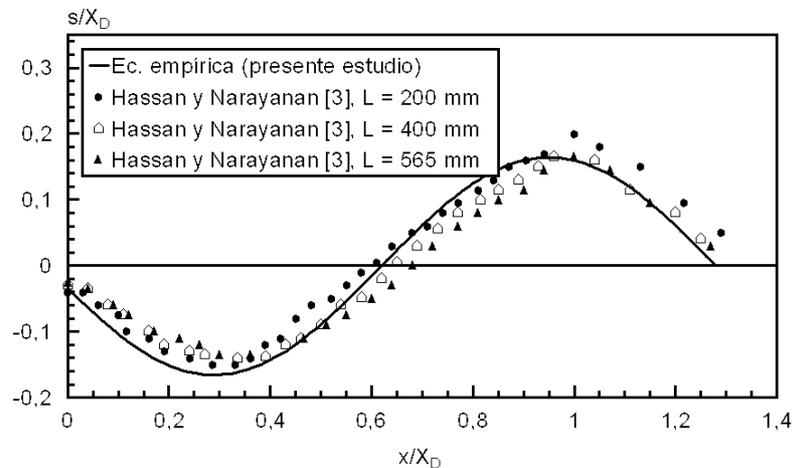


Fig. 9. Comparación entre los valores experimentales de Hassan y Narayanan [3] y la ecuación (11).

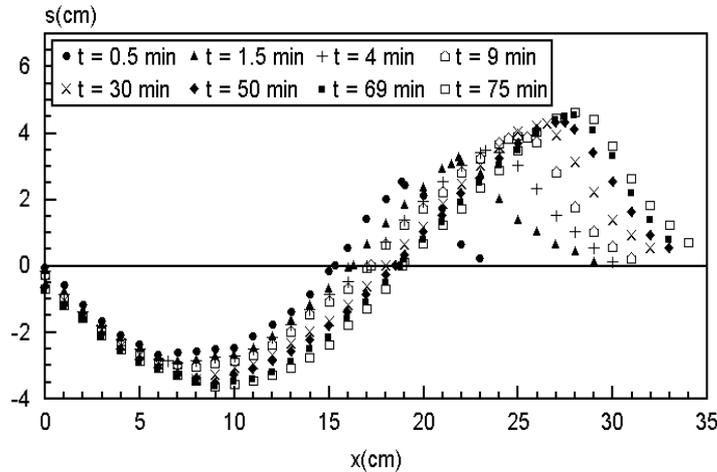


Fig. 10. Evolución temporal de los perfiles de socavación para exp. 3, $d_{50} = 1.4$ mm, $L = 26$ cm.

Se observa que los puntos experimentales de Hassan y Narayanan [3] son próximos a los valores calculados a partir de la expresión empírica (11).

Para 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. En la Fig. 10 se ilustra una serie de perfiles del fondo erosionado, para diferentes tiempos, de un experimento típico. Se obtiene que para un tiempo t grande, los perfiles del fondo erosionado se hacen casi invariantes con el tiempo.

En la Fig. 11 se exhiben los perfiles adimensionales del fondo erosionado, del experimento 3, en diferentes tiempos.

Se observa que los perfiles adimensionales de socavación también son de naturaleza similar, independientes del tiempo, si se emplea la distancia X_D para adimensionalizar. En la Fig. 12 se presenta la variación de S_m/B_0 con $U_0 t/B_0$ para algunos puntos experimentales. Un análisis estadístico condujo a la siguiente ecuación para la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima:

$$\frac{S_m}{B_0} = 0.082 \left(\frac{U_0 t}{B_0} \right)^{0.129} F_0^{1.360} \quad (12)$$

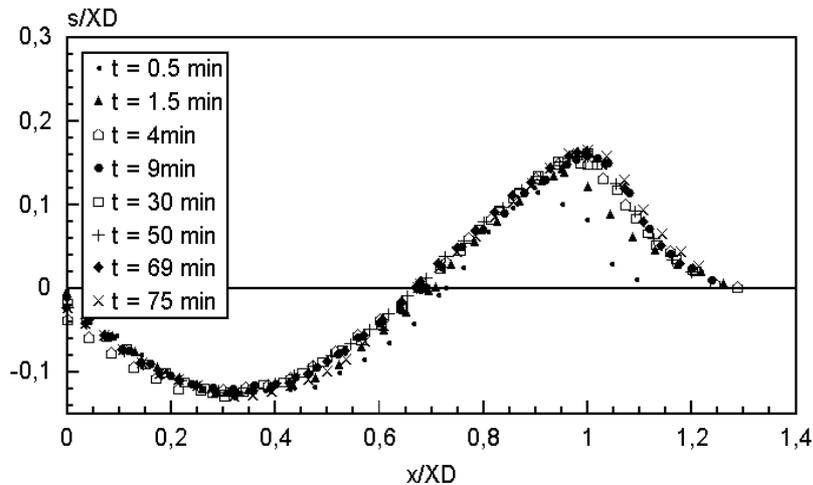


Fig. 11. Perfiles adimensionales, $d_{50} = 1.4$ mm, $L = 26$ cm.

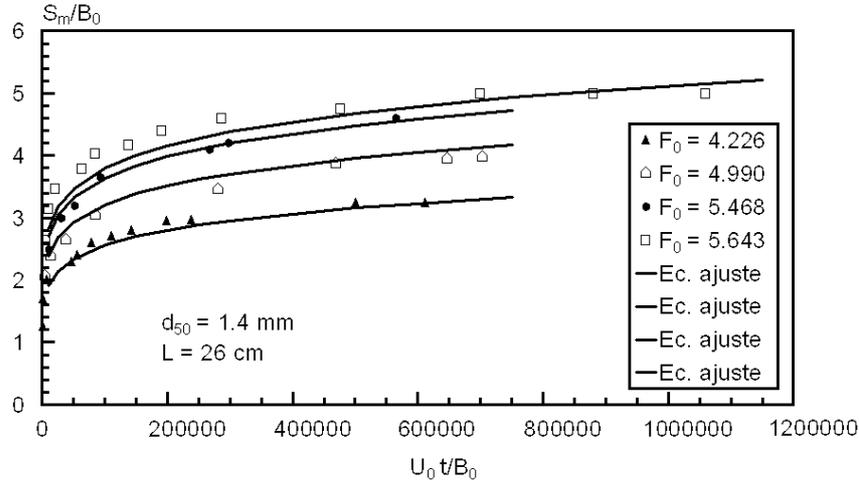


Fig. 12. Variación de S_m/B_0 con $U_0 t/B_0$.

válida para $U_0 t/B_0 \leq 1.15 \cdot 10^6$, correspondiente al rango experimental estudiado. Para valores mayores la curva, en el estado de equilibrio, debe hacerse asintótica con la horizontal. El coeficiente de correlación es $r^2 = 0.973$ y el error medio 4.28%. En la Fig. 12 se muestra la bondad del ajuste realizado. Las curvas indican que la tasa de crecimiento de la profundidad de socavación es alta en la etapa inicial y luego disminuye gradualmente con el tiempo.

Con el fin de comparar la ecuación (12) con resultados previos de otros investigadores, en la Fig. 13 se presenta la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima S_m experimental, las curvas teóricas, correspondientes a cada condición de flujo, y los datos experimentales de Hassan y Narayanan [3] y de Tsuchiya e Iwagaki (Hassan y Narayanan [3]).

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 de los valores experimentales, se obtiene una ecuación que permite predecir la variación con el tiempo de L_{sm} , dada por:

$$\frac{L_{sm}}{B_0} = 1.158 \left(\frac{U_0 t}{B_0} \right)^{0.08} F_0^{1.081} \quad (13)$$

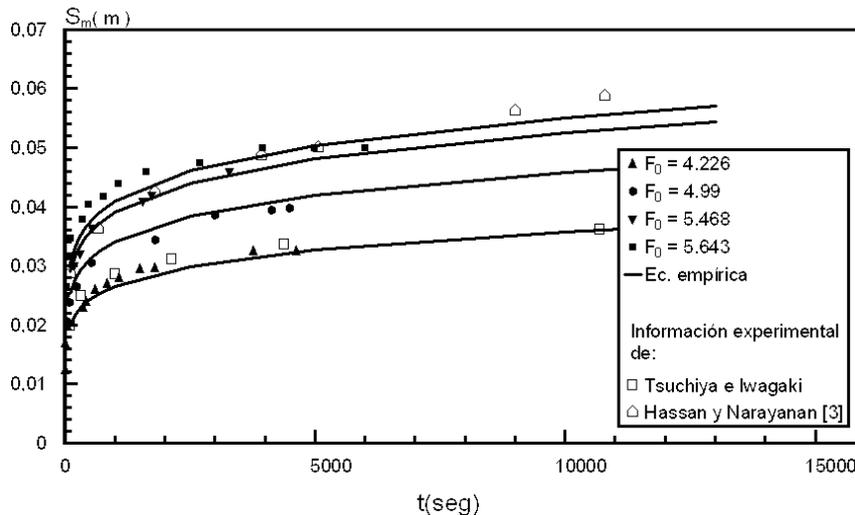


Fig. 13. Variación de S_m con el tiempo t .

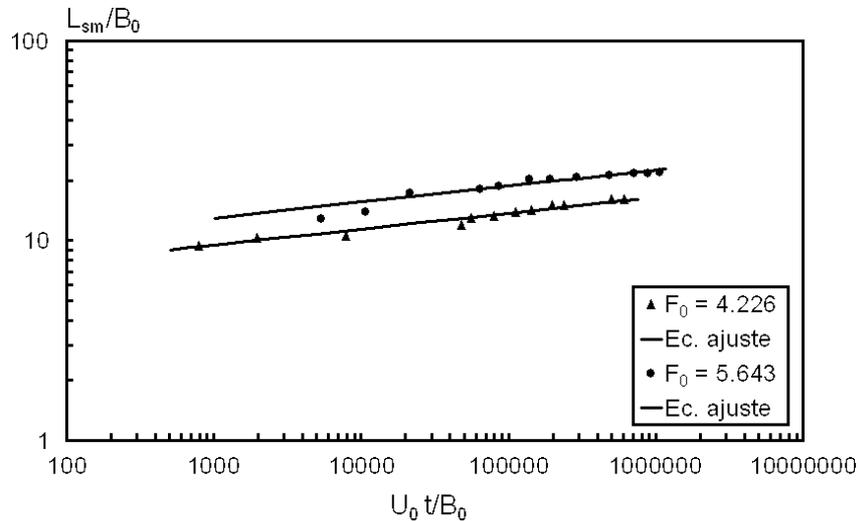


Fig. 14. Variación de L_{sm}/B_0 con $U_0 t/B_0$.

la cual se puede emplear para $U_0 t/B_0 \leq 1.15 \times 10^6$, $d_{50} = 1.4$ mm y $L = 26$ cm. La comparación de los valores de L_{sm}/B_0 obtenidos a partir de la ecuación (13) con los datos experimentales se muestra en la Fig. 14. El coeficiente de correlación entre los valores medidos y calculados es $r^2 = 0.929$ y el error relativo medio es 3.946%.

La Fig. 14 muestra que los valores de L_{sm}/B_0 , obtenidos de la ecuación (13), están en buen acuerdo con las observaciones experimentales.

6. CONCLUSIONES

1. Los perfiles de socavación son de naturaleza similar e independientes del tiempo y del tamaño de la arena, tomando la distancia X_D como escala de longitud para adimensionalizar.
2. Las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio: S_m , h_r , X_m , X_D y L_{sm} son función principalmente del número de Froude F_0 y del diámetro específico d_* .
3. Se obtienen ecuaciones empíricas que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación en el estado de equilibrio.
4. A partir de los datos experimentales se obtienen relaciones entre las dimensiones características del foso de socavación, independientemente del tamaño del sedimento.
5. Se obtienen expresiones empíricas que permiten predecir la evolución temporal de la profundidad de socavación máxima S_m y la longitud del foso de socavación L_{sm} , las cuales presentan muy buena correlación con los puntos experimentales.

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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. N. C. Breusers, “Conformity and Time Scale in Two-dimensional Local Scour”, Publication 40, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands (1965).

- [2] S. S. Chatterjee y S. N. Ghosh, "Submerged Horizontal Jet Over Erodible Bed", *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 106, No. HY11, 1765-1782 (1980).
- [3] N. M. K. Hassan y R. Narayanan, "Local Scour Downstream of an Apron", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 11, 1371-1385 (1985).
- [4] S. S. Chatterjee, S. N. Ghosh y M. Chatterjee, "Local Scour Due to Submerged Horizontal Jet", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 8, 973-992 (1994).
- [5] Y. M. Chiew y S. Y. Lim, "Local Scour by a Deeply Submerged Horizontal Circular Jet", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 9, 529-532 (1996).
- [6] H. N. C. Breusers y A. J. Raudkivi, *Scouring, Hydraulic Structures Design Manual*. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 101- 104 (1991).
- [7] S. Dey y B. Westrich, "Hydraulics of Submerged Jet Subject to Change in Cohesive Bed Geometry", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 1, 44-53 (2003).
- [8] K. A. Mazurek, N. Rajaratnam y D. C. Seago, "Scour of a Cohesive Soil by Submerged Plane Turbulent Wall Jets", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 2, 195-206 (2003).

LOCAL SCOUR ON A MOVABLE BED DOWNSTREAM OF A RIGID APRON

Abstract – In this paper local scour on a movable bed downstream of a rigid apron, due to a submerged horizontal jet of water issuing through a sluice opening, is analyzed. An experimental study of the phenomenon is made. Experiments were carried out with two natural sand sizes as bed materials for various sluice openings and jet velocities. A glass-walled channel, 0.5m wide and 0.5 m depth was employed. In each experiment the scoured bed profile at the equilibrium stage was measured. The parameters that characterize the phenomenon of scour were identified based on the physical reasoning and dimensional analysis. Empirical expressions, which allow to predict the characteristic lengths of the scour hole at the equilibrium stage, were obtained. Moreover, some experimental results of time variation of the scour hole are presented. Equations for predicting time variation of maximum scour depth and the scour hole length are empirically obtained.

