

# Socavación producida por chorros verticales circulares y rectangulares sumergidos

## Scour produced by submerged rectangular and circular vertical jets

\*A. T. Moncada M. y J. Aguirre Pe  
Laboratorio de Hidráulica. CHIDRA.  
Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela  
e-mail: \*alix@ing.ula.ve.

### Resumen

*En este trabajo se presenta una investigación experimental sobre el fenómeno de socavación local producida por el impacto de chorros de agua verticales circulares y rectangulares sumergidos sobre fondos de arena. Los experimentos se realizaron en un tanque de sección circular de 0.75 m de diámetro y 0.84 m de alto, con una disposición apropiada de carga constante. Para el caso de chorros verticales circulares, el diámetro medio de las partículas de arena usadas como material de fondo fue  $d_{50} = 3.1$  mm. Los diámetros de las boquillas empleadas fueron 6.5, 12.9 y 16 mm. El caudal suministrado al modelo varió entre  $1.67 \times 10^{-4}$  y  $1.974 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. En total, se realizaron 60 experimentos. Para el estudio de chorros verticales rectangulares, los experimentos se realizaron variando la sección transversal rectangular de la boquilla. Estas tenían una relación de aspecto de 2, 4 y 6. Se usaron dos tamaños diferentes de arena como material de fondo. El primer material granular fue arena fina con  $d_{50} = 0.055$  cm y el segundo arena gruesa con  $d_{50} = 0.14$  cm. La descarga se varió entre  $3.8 \times 10^{-4}$  y  $1.30 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. Se realizaron 90 experimentos. A partir de la información experimental, se desarrollan relaciones empíricas que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación en el estado final de equilibrio.*

**Palabras claves:** Socavación por chorros, foso de socavación, impacto de chorros, perfil de socavación

### Abstract

*In this paper, an experimental research on the local scour phenomenon on sand beds, produced by the impingement of submerged rectangular and circular vertical water jets, is presented. Experiments were carried out in a tank of circular cross section of 0.75 m diameter and height of 0.84 m, with a suitable constant-head arrangement. For the case of circular vertical jets, the mean diameter of the sand particles used as bed material was  $d_{50} = 3.1$  mm. The circular jet nozzle diameters were 6.5, 12.9 and 16 mm. The discharge supplied to the model varied between  $1.67 \times 10^{-4}$  and  $1.974 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. In total, 60 experiments were performed. An additional study of rectangular vertical jets was performed. Experiments were carried out varying the rectangular cross section of the nozzle. These had an aspect relation of 2, 4 and 6. Two different sizes of sand were used as bed material. The first granular material was fine sand with  $d_{50} = 0.055$  cm and the second coarse sand with  $d_{50} = 0.14$  cm. The discharge varied between  $3.8 \times 10^{-4}$  and  $1.30 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. For rectangular vertical jets, 90 experiments were performed. From the experimental investigation, empirical relationships that allow to predict the characteristic lengths of the final steady state scour hole are developed.*

**Keywords:** Scour by jets, scour hole, impingement of jets, scour profile

### 1 Introducción

Los flujos a través de estructuras hidráulicas frecuentemente ocurren en forma de chorros. Los estudios

consideran chorros horizontales y verticales, chorros bidimensionales y tridimensionales, y chorros sumergidos o libres con varias configuraciones de frontera. Los chorros que impactan sobre un fondo móvil de partículas pueden

conducir a efectos de socavación local fuertes. Los chorros sumergidos, los cuales en la práctica frecuentemente muestran fluctuaciones de velocidad periódicas, pueden ocasionar socavación peligrosa cerca de estructuras hidráulicas, o pueden tener uso técnico debido a su fuerte capacidad de erosión.

Este estudio está relacionado con una investigación experimental sobre el fenómeno de socavación local debido a chorros verticales rectangulares y circulares sumergidos. Se obtienen relaciones empíricas que permiten predecir las longitudes características de los fosos de socavación, en el estado de equilibrio, producidos por la acción de chorros rectangulares y circulares verticales sumergidos.

## 2 Socavación por chorros verticales sumergidos

Rajaratnam y Beltaos (1977) estudiaron la erosión producida por el impacto de chorros turbulentos circulares. Ellos obtuvieron el perfil del fondo erosionado para un cierto número de observaciones, así como también la profundidad de socavación máxima  $S_m$ , la cual ocurre bajo el centro del chorro, como se muestra en la Fig. 1, en la cual  $S$  es la profundidad de erosión bajo el nivel del fondo original en la distancia radial  $r$ ,  $b$  el valor de  $r$  para el cual  $S = \frac{1}{2} S_m$ ,  $X_D$  la distancia radial a la cresta de la duna y  $r_0$  el radio del foso de socavación.

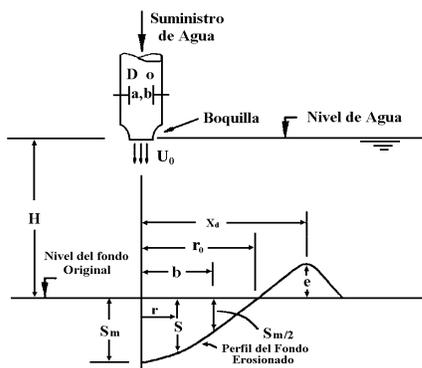


Fig. 1. Esquema de definición para la socavación producida por un chorro vertical

El estudio experimental de Rajaratnam y Beltaos (1977) confirmó que durante una parte significativa del proceso de erosión, la profundidad máxima de socavación primero varía linealmente con el logaritmo del tiempo y luego se desvía hasta eventualmente aproximarse a un estado asintótico. Ellos encontraron que, en el estado asintótico, los perfiles del foso de socavación eran similares.

Rajaratnam (1982) realizó una serie de experimentos sobre la socavación en fondos de arena por el impacto de chorros de agua circulares y sumergidos. Él observó que la socavación que ocurre después que el chorro se detiene podía ser significativamente diferente del perfil de erosión que existe con el chorro activo. La profundidad de erosión

con el chorro activo se denomina profundidad de socavación dinámica, mientras que la profundidad de socavación observada después que el chorro se detiene se refiere a la profundidad de socavación estática.

Aderibigbe y Rajaratnam (1996) presentaron los resultados experimentales sobre la socavación en fondos de arena producida por el impacto de chorros turbulentos verticales circulares sumergidos. Ellos encontraron que los perfiles del fondo erosionado eran similares excepto en valores muy bajos de un parámetro de erosión. Estudiaron la variación de la profundidad de socavación estática y dinámica con la distancia de impacto. Desarrollaron ecuaciones semi-empíricas para las longitudes características de los perfiles de erosión en el estado asintótico.

Lugo (1996) y Moncada et al. (1996) realizaron experimentos para determinar los parámetros de la socavación generada por chorros verticales que impactan sobre fondos de arena suelta.

Burigo (1999) llevó a cabo un trabajo experimental para estudiar el fenómeno de socavación producida por un chorro de salida rectangular. Para ello consideró los parámetros involucrados en estudios previos. El estudio tenía como finalidad determinar la profundidad máxima y la expansión radial de la fosa socavada, considerando tres situaciones: socavación estática final, socavación estática impermanente y socavación dinámica.

## 3 Análisis dimensional

Entre las variables que afectan el fenómeno de socavación generada por chorros verticales circulares sumergidos sobre fondos de arena se pueden mencionar la velocidad de salida del chorro en la boquilla  $U_0$ , la altura de impacto  $H$ , el diámetro medio del material del fondo  $d_{50}$ , la aceleración de gravedad  $g$ , el diámetro del chorro en la boquilla  $D$ , la densidad del fluido  $\rho$  y la densidad del material del fondo  $\rho_s$ . Las longitudes características del fondo erosionado, en el estado asintótico, son la profundidad máxima de socavación  $S_m$ , la distancia radial a la cresta de la duna  $X_D$ , el radio del foso de socavación  $r_0$  y la distancia radial  $b$ . Así, se obtienen 8 parámetros adimensionales independientes. Una relación funcional adecuada, que represente el fenómeno, puede ser la siguiente:

$$\frac{S_m}{H}, \frac{X_D}{H}, \frac{r_0}{H}, \frac{b}{H} = f_{1,2,3,4} \left( \frac{H}{d_{50}}, \frac{H}{D}, \Delta, F_1 \right) \quad (1)$$

en la cual  $F_1 = U_0/(gH)^{1/2}$  es el número de Froude del chorro vertical y  $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$  es la densidad relativa sumergida.

Para el caso de chorros verticales rectangulares, la sección transversal del chorro se define por los lados  $a$  y  $b$

de la boquilla de sección rectangular. Si  $a$  y  $b$  se sustituyen por la dimensión representativa  $D_r = (ab)^{1/2}$ , entonces la función  $f_{1,2,3,4}$  se puede escribir, para chorros verticales rectangulares y flujo permanente, como:

$$\frac{S_m}{H}, \frac{X_D}{H}, \frac{r_0}{H}, \frac{b}{H} = f_{5,6,7,8} \left( \frac{H}{d_{50}}, \frac{H}{D_r}, \Delta, F_1 \right) \quad (2)$$

y para flujo impermanente

$$\frac{S_m}{H}, \frac{X_D}{H}, \frac{r_0}{H}, \frac{b}{H} = f_{9,10,11,12} \left( \frac{H}{d_{50}}, \frac{H}{D_r}, \Delta, F_1, \frac{gt}{w} \right) \quad (3)$$

donde  $t$  es el tiempo y  $w$  es la velocidad de caída.

#### 4 Instalación experimental

Los experimentos se realizaron en un tanque de sección transversal cuadrada, de  $1 \text{ m}^2$  de área y  $0.90 \text{ m}$  de altura, el cual permitía incorporar en su interior otro tanque de sección circular de  $0.75 \text{ m}$  de diámetro y  $0.84 \text{ m}$  de alto, con una disposición de carga constante apropiada.

Para el caso de chorros verticales circulares, el diámetro medio de las partículas de arena, usada como material de fondo, era  $d_{50} = 3.1 \text{ mm}$ . Los diámetros de las boquillas empleadas para generar el chorro circular eran  $6.5, 12.9$  y  $16 \text{ mm}$ . La boquilla se colocó centrada en el tanque circular y siempre estaba sumergida bajo el nivel de agua. El caudal suministrado al modelo varió entre  $1.67 \times 10^{-4}$  y  $1.974 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . La distancia de impacto  $H$  se varió manteniendo la boquilla en posición fija y cambiando el espesor del fondo de arena. El valor de  $H$  varió entre  $26$  y  $52.02 \text{ cm}$  cada  $5 \text{ cm}$ .

Se suministró agua a la instalación experimental y se abrió la llave, que permitía el flujo de agua hacia la boquilla, después de establecida una carga constante.

Tabla 1. Características Físicas de las Boquillas Rectangulares

	Ancho $b$ (mm)	Alto $a$ (mm)	Area ( $\text{mm}^2$ )	$D_r$ (mm)
Boquilla No. 1	5.00	30.00	150.00	12.25
Boquilla No. 2	5.00	20.00	100.00	10.00
Boquilla No. 3	5.00	10.00	50.00	7.07

Los experimentos se realizaron hasta alcanzar el estado de equilibrio. En cada experimento se midieron las siguientes variables: el caudal  $Q$  y las longitudes características del foso de socavación, es decir, la profundidad de socavación máxima final  $S_m$  y las distancias radiales  $X_D$  y  $r_0$ . En total, se realizaron  $60$  experimentos.

Para el estudio de chorros verticales rectangulares, los experimentos se llevaron a cabo variando la descarga, la distancia de impacto y la sección transversal de la boquilla

rectangular. Las dimensiones de las boquillas rectangulares están dadas en la Tabla 1. Las boquillas se fabricaron con aluminio.

Para el caso de chorros rectangulares, se usaron dos tamaños diferentes de partículas de arena como material de fondo. El primer material granular fue arena fina de diámetro medio  $d_{50} = 0.055 \text{ cm}$  y el segundo material usado fue arena gruesa con diámetro medio  $d_{50} = 0.14 \text{ cm}$ . La velocidad de caída uniforme  $w$  fue de  $0.23 \text{ cm/s}$  para la arena fina y  $1.50 \text{ cm/s}$  para la arena gruesa. La descarga se varió entre  $3.8 \times 10^{-4}$  y  $1.30 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Las velocidades de salida  $U_0$  variaron desde  $3.17$  hasta  $15.7 \text{ m/s}$  y la distancia de impacto  $H$  varió entre  $20$  y  $32 \text{ cm}$ . Se realizaron  $90$  experimentos con chorros verticales rectangulares.

#### 5 Análisis de los resultados

Con el fin de obtener relaciones adecuadas entre las variables que influyen en el proceso de socavación, producido por chorros verticales sumergidos, se realizó un estudio de los parámetros adimensionales involucrados.

Primero se analizó el fenómeno de socavación local generado por chorros verticales circulares. Para la determinación de las longitudes características del foso de socavación se realizaron varias pruebas de regresión múltiple, considerando los parámetros obtenidos en la Ec. 1. Así, se obtiene que la profundidad de socavación máxima  $S_m$  puede estar representada por la siguiente ecuación de ajuste:

$$\frac{S_m}{D} = 0.103 F_1^{0.29} \left( \frac{H}{D} \right)^{0.74} \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{0.25} \quad (4)$$

la cual entrega un coeficiente de correlación  $r = 0.95$  y un error medio de  $11.37\%$ . La Ec. 4 indica que la profundidad de socavación máxima  $S_m$  se incrementa proporcionalmente con la altura de impacto y en menor proporción con el número de Froude  $F_1$  y el diámetro de la boquilla y disminuye al aumentar el diámetro medio de la partícula. En la Fig. 2 se muestra un gráfico adimensional entre los valores de  $S_m/D$  medidos experimentalmente y, los calculados a partir de la Ec. 4.

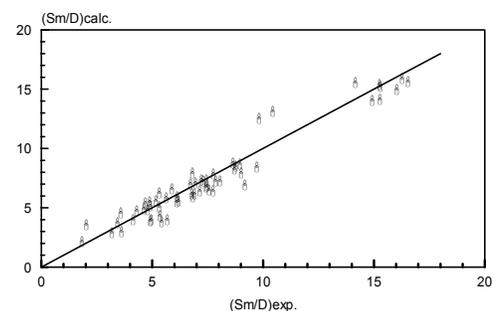


Fig. 2. Valores de  $S_m/D$  experimentales y los calculados, según la Ec. 4

Para determinar una ecuación que permita predecir la distancia radial hasta la cresta de la duna  $X_D$ , medida en el estado final, también se partió de la Ec. 1. Se realizaron varias pruebas de regresión múltiple. Los datos experimentales presentan buen ajuste con la ecuación:

$$\frac{X_D}{H} = 0.206 F_1^{0.40} \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.33} \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{0.28} \quad (5)$$

En la Ec. 5, el coeficiente de correlación  $r = 0.96$  y el error medio es de 5.36%. Esta ecuación también indica que la distancia radial  $X_D$  es directamente proporcional a la altura de impacto y aumenta en menor proporción con el número de Froude y el diámetro de la boquilla, y que disminuye con incrementos de  $d_{50}$ . A manera de ilustración, en la Fig.3 se muestran los valores de  $X_D/H$  medidos y los calculados.

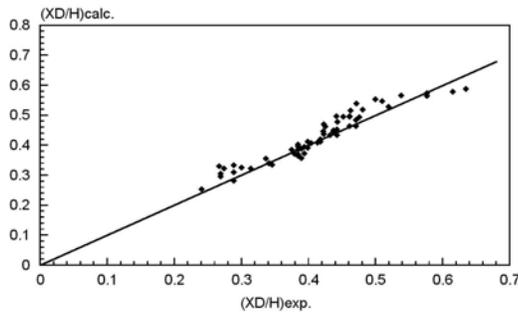


Fig. 3. Valores de  $X_D/H$  experimentales y los calculados, según la Ec. 5

También se realizó un análisis estadístico para obtener una expresión que permita calcular el radio de la fosa de socavación  $r_0$ , en el estado de equilibrio. Se estudió la influencia de los parámetros, dados en la Ec. 1, sobre  $r_0$ . Luego de varias pruebas de regresión múltiple, se obtiene la siguiente ecuación, que describe razonablemente bien los datos experimentales:

$$\frac{r_0}{H} = 0.176 F_1^{0.38} \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.24} \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{0.18} \quad (6)$$

la cual entrega un coeficiente de correlación  $r = 0.92$  y un error medio de 6.14%.

Así como en las Ecs. 4 y 5, la Ec. 6 indica que el valor de  $r_0$  se incrementa proporcionalmente con la altura de impacto y crece en menor proporción con el número de Froude y el diámetro de la boquilla, y que disminuye al aumentar  $d_{50}$ . En la Fig. 4 se muestran los valores experimentales de  $r_0/H$  y, los calculados a partir de la Ec. 6.

En este estudio se encontró que la relación  $r_0/S_m$  es aproximadamente 1.42 para el rango de los datos experimentales estudiados. Aderibigbe y Rajaratnam (1996) obtuvieron que  $r_0/S_m$  era aproximadamente 1.7 para

valores del parámetro  $E_c = U_0(D/H)/(g\Delta d_{50})^{1/2}$  mayores que 0.35 y que para  $E_c$  menores, se incrementa rápidamente con disminución de  $E_c$ .

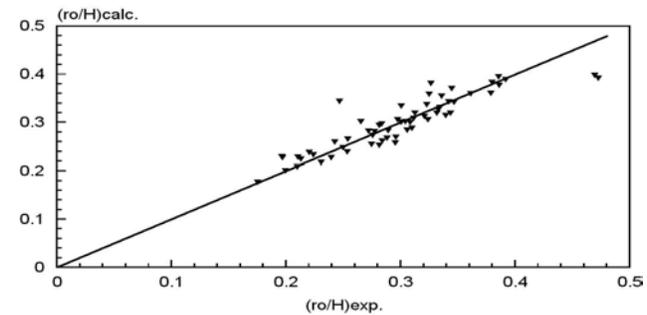


Fig. 4. Valores de  $r_0/H$  experimentales y los calculados, según la Ec. 6

Se intentó averiguar si los perfiles del fondo erosionado, en el estado asintótico, eran similares graficando  $S/S_m$  contra  $r/b$ , en la cual  $S_m$  es la profundidad de erosión en el centro. Los resultados que se muestran en la Fig. 5 para varios perfiles típicos indican que los perfiles son similares con alguna dispersión en la proximidad de la cresta.

También se observa en la Fig. 5 que la ecuación exponencial de Rajaratnam y Beltaos (1977) describe, razonablemente bien, los datos experimentales para  $r/b \leq 1.4$ .

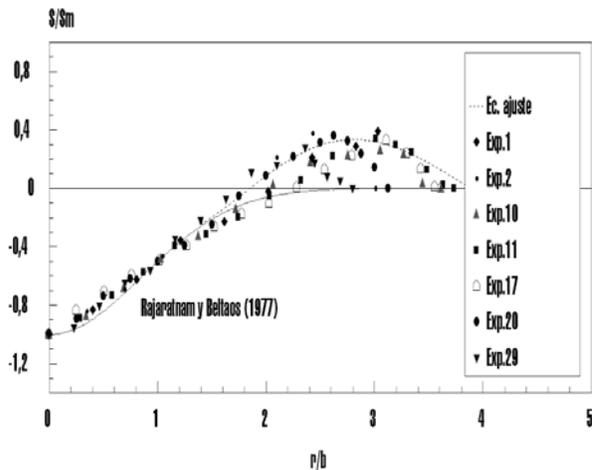


Fig. 5. Similitud de los perfiles del fondo erosionado por chorros circulares

Para  $r/b \geq 1.4$ , se obtiene la siguiente ecuación de ajuste

$$\frac{S}{S_m} = \frac{1}{3} \cos \left( 3.08 \left( \frac{r}{b} \right)^{0.69} \right) \quad (7)$$

En esta investigación se encontró que la relación entre la profundidad de socavación dinámica y estática  $y_{sd}/S_m$  varió entre 1 y 5.26, y la relación  $y_{sd}/X_D$  varió desde 0.30 hasta 0.70.

Para determinar la profundidad de socavación máxima  $S_m$ , en el caso de chorros rectangulares, para sedimentos de densidad constante, se realizaron diversos ensayos de regresión múltiple de tipo potencial. Se obtiene que:

$$\frac{S_m}{D_r} = 0.544 F_1^{0.41} \left(\frac{H}{D_r}\right)^{0.15} \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{0.29} \quad (8)$$

En la cual  $D_r = (ab)^{1/2}$ . La Ec. 8 entrega un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.8$  y un error medio de 9.97%. Se puede observar que para chorros verticales rectangulares se emplea la dimensión representativa  $D_r$  en lugar de  $D$ .

La Ec. 8 indica que la profundidad de socavación máxima  $S_m$  se incrementa con  $D_r$  y el número de Froude  $y$ , que  $S_m$  es inversamente proporcional al diámetro de las partículas del fondo.

A manera de ilustración, en la Fig. 6 se muestran los valores  $S_m/D_r$  medidos y los calculados, según la Ec. 8.

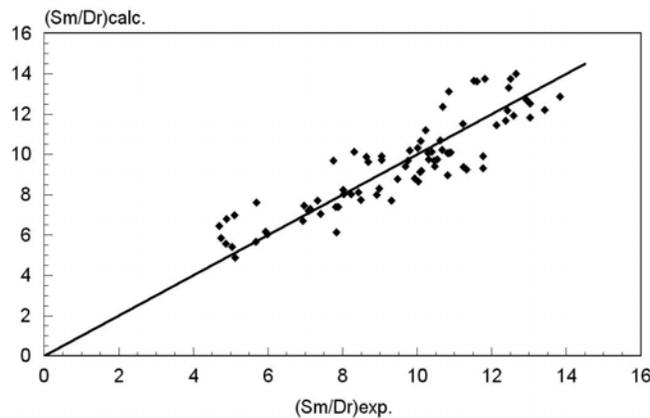


Fig. 6. Valores de  $S_m/D_r$  experimentales y los calculados, según la Ec. 8

Se encontró que la distancia radial  $X_D$ , medida desde el eje del chorro hasta la cresta de la duna, se puede expresar como:

$$\frac{X_D}{H} = 3.182 F_1^{0.46} \left(\frac{H}{D_r}\right)^{-0.78} \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{0.09} \quad (9)$$

Con un coeficiente de correlación múltiple  $r^2 = 0.82$  y un error medio de 6.18%. Se obtiene que el radio máximo a la cresta de la duna  $X_D$  es proporcional a la dimensión representativa  $D_r$  de la boquilla rectangular  $y$ , que sus dimensiones no muestran distorsión en la simetría axial del foso de socavación. En la Fig. 7 se presentan los valores de  $X_D/H$  experimentales y los obtenidos a partir de la Ec. 9.

Para estudiar la semejanza de los perfiles del foso de socavación en el estado asintótico final, generados por chorros verticales rectangulares, se realizó un gráfico de  $S/S_m$  contra  $r/X_D$ , en la cual  $S$  es la profundidad de

socavación en la distancia radial  $r$ . Se encontró que la geometría del foso de socavación depende del tamaño del material del fondo, como se muestra en las Figs. 8a y 8b.

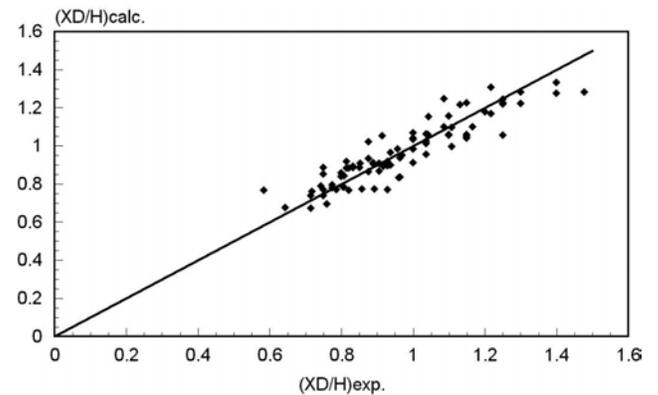


Fig 7. Valores de  $X_D/H$  experimentales y los calculados, según la Ec. 9

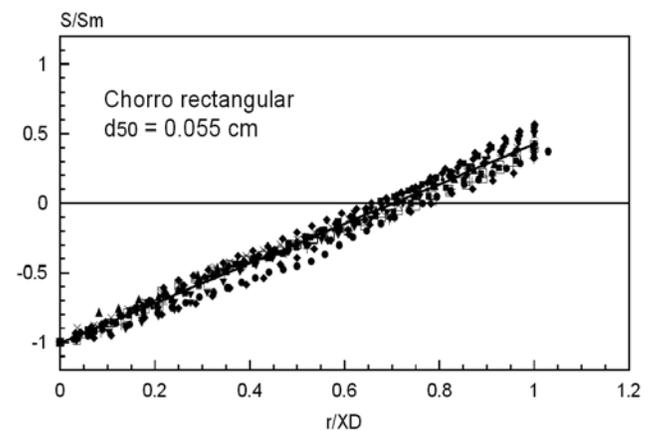


Fig. 8a. Similitud en los perfiles del foso de socavación,  $d_{50} = 0.055$  cm

A partir de la Fig. 8a se obtiene que:

$$\frac{S}{S_m} = 1.422 \left(\frac{r}{X_D} - 0.693\right) \quad (10)$$

válida para  $0 \leq r/X_D \leq 1$  y  $d_{50} = 0.055$  cm, la cual entrega un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.974$ .

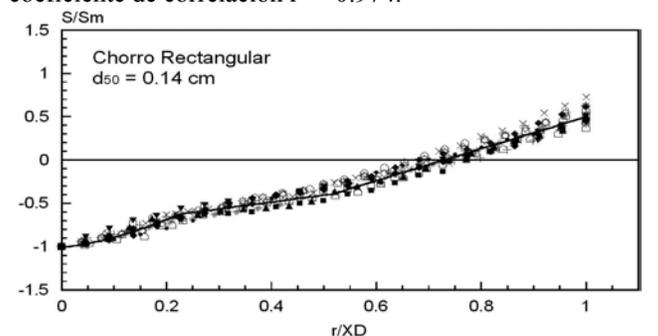


Fig. 8b. Similitud en los perfiles del foso de socavación,  $d_{50} = 0.14$  cm

A partir de la Fig.8b se obtiene que

$$\frac{S}{S_m} = 3.55 \left( \frac{r}{X_D} \right)^{1.5} - 1 \tag{11}$$

válida para  $0 \leq r/X_D \leq 0.225$ .

En el rango  $0.225 \leq r/X_D \leq 0.515$  se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{S}{S_m} = 0.802 \left( \frac{r}{X_D} - 1 \right) \tag{12}$$

y para  $0.515 \leq r/X_D \leq 1$  se obtiene que

$$\frac{S}{S_m} = 1.84 \left( \frac{r}{X_D} - 0.727 \right) \tag{13}$$

Las Ecs. 11, 12 y 13 son válidas para  $d_{50} = 0.14$  cm.

Analizando las longitudes características de los fosos de socavación, en el estado final de equilibrio, producidos por los chorros verticales circulares y rectangulares sumergidos se obtiene que, para el caso de chorros circulares  $S_m/X_D \cong 0.50$ , para material de fondo constituido por arena con  $d_{50} = 3.1$  mm.

Para el caso de chorros generados por boquillas rectangulares se obtiene que para  $d_{50} = 0.055$  cm,  $S_m/X_D \cong 0.41$ , mientras que para  $d_{50} = 0.14$  cm,  $S_m/X_D \cong 0.34$ , como se ilustra en la Fig. 9. Esto indica que, para chorros rectangulares, las dimensiones del foso de socavación se incrementan cuando el diámetro  $d_{50}$  disminuye. Sin embargo, se observa que, para los datos experimentales analizados, los chorros circulares producen fosos de socavación mayores, aun cuando se emplea un material de diámetro mayor.

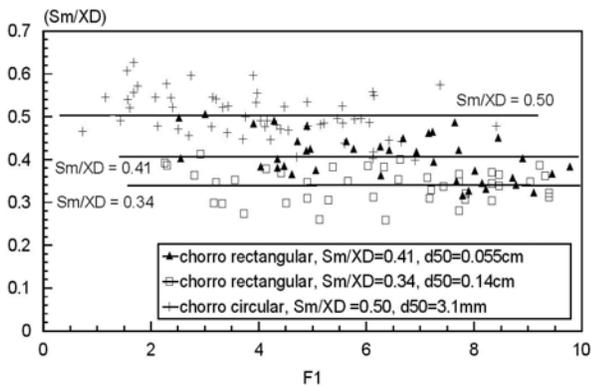


Fig. 9. Relación entre las longitudes características de los fosos de socavación producidos por chorros circulares y rectangulares sumergidos

En un intento por encontrar ecuaciones que permitan predecir las longitudes características del foso de socavación, producido tanto por los chorros circulares como los rectangulares, se procedió a realizar un análisis

estadístico al banco de datos recabado experimentalmente, usando ambos tipos de chorros verticales.

Para la profundidad de socavación máxima  $S_m$  se encontró la siguiente ecuación

$$\frac{S_m}{D_{cr}} = 0.105 F_1^{0.36} \left( \frac{H}{D_{cr}} \right)^{0.57} \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{0.36} \tag{14}$$

en la cual  $D_{cr} = D$  para el caso de chorros circulares y,  $D_{cr} = D_r = (ab)^{1/2}$  para chorros rectangulares. La Ec. 14 entrega un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.857$  y un error medio de 12.29%. En la Fig. 10 se muestran los valores de  $S_m/D_r$  medidos y los calculados, según la Ec. 14.

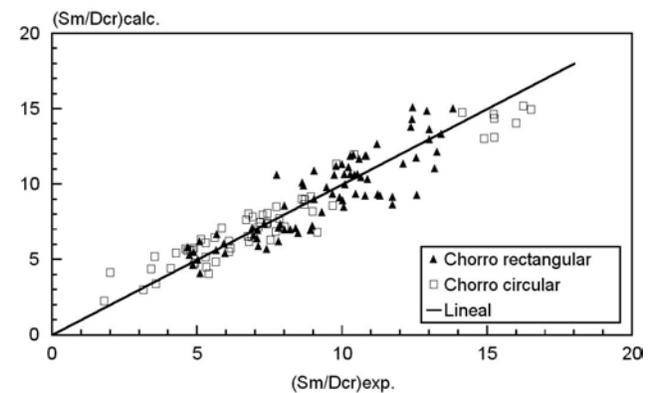


Fig. 10. Valores de  $S_m/D_{cr}$  medidos y calculados para chorros circulares y rectangulares

Para la distancia radial  $X_D$  se obtuvo que:

$$\frac{X_D}{H} = 0.382 F_1^{0.51} \left( \frac{H}{D_{cr}} \right)^{-0.62} \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{0.34} \tag{15}$$

la cual entrega un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.852$  y un error medio de 15.01%. En la Fig. 11 se presenta un gráfico de los valores de  $X_D/H$  experimentales y teóricos.

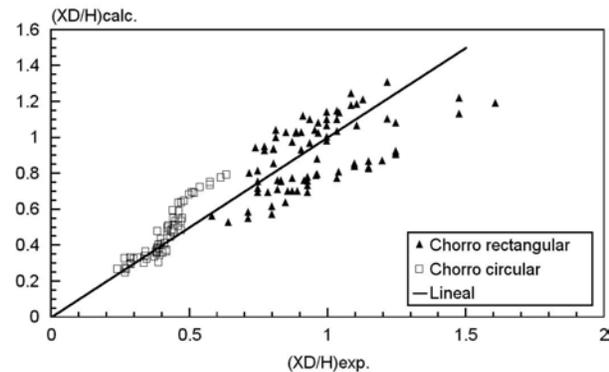


Fig. 11. Valores de  $X_D/H$  medidos y calculados para chorros circulares y rectangulares

## 6 Conclusiones

Para el caso de chorros verticales circulares, se encontró que:

- Las longitudes características importantes del fondo erosionado en el estado asintótico se pueden expresar en función de  $F_1$ ,  $H$ ,  $D$  y  $d_{50}$ . Se encontró una ecuación que permite predecir la profundidad de socavación máxima  $S_m$  y una ecuación que representa, con buen ajuste, los datos experimentales de la distancia radial  $X_D$ , en el estado asintótico final. Además, se obtuvo una expresión que permite calcular el radio de la fosa de socavación  $r_0$  en el estado de equilibrio.

- Se encontró que los perfiles del foso de socavación en el estado final son de naturaleza similar. Se obtuvo una ecuación que describe razonablemente bien los datos experimentales del perfil adimensional para  $r/b \geq 1.4$ .

- Se obtuvo que la relación entre la profundidad de socavación dinámica y estática  $y_{sd}/S_m$  varió entre 1 y 5.26. Se encontró que la relación entre la socavación dinámica y la distancia radial  $y_{sd}/X_d$  varió de 0.30 a 0.70.

Con respecto a los chorros verticales rectangulares, se obtuvo que:

- Para el rango experimental, los dos parámetros lineales de la sección transversal del chorro se pueden reemplazar por un parámetro lineal igual a su promedio geométrico.

- Se determinó que la profundidad de socavación máxima final, bajo el eje de simetría, también es función del número de Froude  $F_1$ ,  $H$ ,  $D_r$  y  $d_{50}$ .

- Se encontró que la distancia radial máxima final a la cresta de la duna  $X_D$  es función del número de Froude del chorro, y que ésta depende fuertemente de la relación entre la dimensión representativa del chorro y la altura de impacto.

- Se encontró que la profundidad de socavación máxima dinámica puede ser 5 veces mayor que la profundidad de socavación máxima estática final.

- Se obtuvo que los perfiles del fondo erosionado son diferentes, dependiendo del tamaño de las partículas empleadas como material de fondo.

- Se encontraron ecuaciones que permiten predecir las longitudes características del foso de socavación,  $S_m$  y  $X_D$ , aplicables tanto al caso de chorros circulares como a los rectangulares verticales sumergidos, las cuales describen, razonablemente bien, los datos experimentales.

## 7 Reconocimiento

Los autores expresan su gratitud al “Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT)” de la Universidad de los Andes por su apoyo financiero a través del Proyecto “Socavación en Lechos de Material Suelto”, I-566-97-02-C y CVI-ADG-I-07-95.

## Referencias

- Aderibigbe O, (1996), Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 19-33.
- Burigo J, (1999), Socavación permanente e impermanente en lechos sueltos por la acción de un chorro vertical y rectangular sumergido, Tesis, CIDIAT - Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, pp. 81.
- Lugo A, (1996), Socavación por efecto de chorros circulares verticales sumergidos, Tesis, Universidad de los Andes, Mérida, pp. 2-36.
- Moncada A, Aguirre-Pe J, y Lugo J, (1996), Socavación por efecto de chorros circulares verticales sumergidos, *Proceedings of XVII Latin American Congress, IAHR, Guayaquil*, Vol. 4, pp. 351-362.
- Rajaratnam N y Beltaos S, (1977), Erosion by impinging circular turbulent jets, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE*, Vol. 103, No. HY10, pp. 1191-1205.
- Rajaratnam N, (1982), Erosion by submerged circular jets, *Proceedings of ASCE 108 (HY2)*, pp. 262-267.