

Medición experimental de flujos con agua clara y gravas sobre sistemas de captación de fondo. Determinación del índice de huecos efectivo y de la longitud de reja requerida

Luis G. Castillo Elsitdié, Juan T. García Bermejo, José M. Carrillo Sánchez
*Grupo de I+D+i Hidr@m, Departamento de Ingeniería Civil,
Universidad Politécnica de Cartagena*

1. Introducción

Los sistemas de captación de fondo consisten en una serie de rejas situadas en el lecho del cauce con la intención de captar la máxima cantidad de agua en ríos de montaña, donde existen fuertes pendientes y lechos irregulares, y en los cuales se producen importantes transportes de sedimentos y caudales de avenida. Debido a que la carga de transporte de fondo pasa sobre la reja, estas estructuras tienen que operar bajo condiciones extremas (Bouvard, 1992). La mayoría de los criterios de diseño tratan de evitar la oclusión de las rejas generadas por la deposición de materiales granulares de diámetro superior al espaciamiento entre los barrotes. Así, los parámetros de diseño principales son:

- Espaciamiento entre barrotes. Como norma se eligen espaciamientos superiores al mayor tamaño de grano transportado;
- Pendiente longitudinal de la reja. El incremento en la pendiente de la reja tiende a reducir la oclusión pero disminuye el caudal de captación;
- Incremento del área de huecos de la reja considerando un porcentaje de superficie ocluida, pero ingresa una mayor cantidad de sedimentos al sistema ;
- Construcción de un depósito de sedimentación aguas arriba que regula el tamaño de los sólidos que alcanzan la reja.

Existen diversos estudios sobre el grado de oclusión de la reja como consecuencia de la deposición de sólidos sobre éstas, o de la cantidad de sedimentos que se introducen en la reja y que son transportados a lo largo del canal de derivación (Ract-Madoux et al., 1955; Simmler, 1978; Drobir, 1981; Bouvard, 1992; Raudkivi, 1993; Ahmad y Kumar, 2010).

Al analizar el flujo espacialmente variado con caudales decrecientes sobre la reja se asumen una serie de simplificaciones: flujo unidimensional, distribución de presiones hidrostática a lo largo de la reja y energía específica constante a lo largo de toda la reja. Diversos investigadores han analizado estas simplificaciones a través de modelos de laboratorio.

Nosedá (1956) estudió el flujo con agua clara sobre diversas rejas, y definió una expresión para el coeficiente de descarga:

$$C_q = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13} \quad [1]$$

donde l es la distancia entre el centro de gravedad de dos barras consecutivas, m el índice de huecos y h el calado del agua medida perpendicular a la barra.

De acuerdo a Brunella *et al.* (2003), las diferencias entre los calados medidos y calculados en los tramos iniciales y finales de la reja se deben a la no consideración de la curvatura de las líneas de corriente y a despreciar los efectos de la fricción, respectivamente.

Righetti y Lanzoni (2008) proponen calcular el flujo captado por la reja a partir de la siguiente ecuación diferencial:

$$dq(x) = C_q m \sqrt{2g(H_0 + \Delta z)} dx \quad [2]$$

donde m es el índice de huecos, dx el diferencial de reja en la dirección del flujo, H_0 la energía total al inicio de la reja, Δz la distancia vertical entre el inicio y la sección de cálculo de la reja, y C_q el coeficiente de descarga. Dichos autores consideran que $C_q \approx \text{seno } \alpha$, donde α es el ángulo que forma el vector velocidad con el plano de la reja.

A continuación se presentan diversas expresiones para calcular la longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal (Tabla 1):

Autor	Formulación
Bouvard and Kuntzmann (1954)	$L = \left\{ \frac{1}{2.m''} \left[\left(j + \frac{1}{2.j^2} \right) \cdot \arcsin \sqrt{\frac{j}{j + (1/2.j^2)}} + 3 \sqrt{\frac{1}{2.j}} \right] + \left(\frac{0.303}{m''^2} + \frac{2.j^3 - 3.j^2 + 1}{4.j^2} \right) \text{tg } \varphi \right\} \cdot h_1 \cdot \cos \varphi$ $j = \frac{h_1}{h_c}; \quad m'' = m.C_q$ <p>h_1 = calado al inicio de la reja; h_c = calado crítico; m'' = producto del índice de huecos por el coeficiente de descarga</p>
Nosedá (1956)	$L = \frac{E_0}{C_q \cdot m} [\Phi(y_2) - \Phi(y_1)]; \quad \Phi = f(y); \quad y = \frac{h}{E}$ $L = 1.1848 \frac{E_0}{C_q \cdot m}$ $\Phi = \frac{1}{2} \arccos \sqrt{y} - \frac{3}{2} \sqrt{y(1-y)}$ <p>E_0 = energía específica al inicio</p>

Tabla 1. Formulaciones para el cálculo de longitud de reja en función del caudal

Autor	Formulación
Frank (1956)	$L = 2.561 \frac{q_1}{\lambda \sqrt{h_1}}; \quad \lambda = m C_{q_0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \cos \varphi}; \quad C_{q_0} = 1.22 C_{q_{x=x_0}}$ <p>h_1 = calado al inicio de la reja; q_1 = caudal específico entrante; φ = ángulo de la reja con la horizontal</p>
Krochin (1978)	$L = \left[\frac{0.313 q_1}{(C_q k)^{3/2}} \right]^{2/3}; \quad k = (1 - f) \cdot m; \quad f = 0.15 - 0.30$ <p>$C_q = C_0 - 0.325 \operatorname{tg} \alpha$ $C_0 = 0.6$ if $m \geq 4$ $C_0 = 0.5$ if $m < 4$ q_1 = caudal específico entrante; f = coeficiente de obstrucción</p>

Tabla 1 (cont.). Formulaciones para el cálculo de la longitud de reja en función del caudal

Uno de los objetivos de los estudios que se está llevando a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) es optimizar este tipo de sistemas de captación para utilizarlos en flujos torrenciales y discontinuos con una alta concentración de sedimentos.

2. Materiales y Métodos

2.1 Modelo físico

El laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena dispone de una infraestructura diseñada para el estudio de los sistemas de captación de fondo. Consistente en un canal de 5 metros de longitud y 0.50 m de ancho, al final del cual existe una reja de fondo que puede adoptar diferentes pendientes. Además, dispone de un canal de recogida del caudal captado por la reja y de una arqueta de derivación que recoge el agua no captada. La entrada de caudal se mide mediante un caudalímetro electromagnético, mientras que los caudales no captados por la reja se miden mediante un vertedero triangular. Las rejas fueron construidas con sección transversal de aluminio en forma de T (30/25/2 mm) y de 0.90 m de longitud en la dirección del flujo. Se dispone de tres configuraciones de rejas (Tabla 2), diferenciadas en el espaciamiento entre las barras (índice de huecos o porosidad $m = 0.16, 0.22$ y 0.28).

	A	B	C
Espacio entre barras, b_1 (mm)	5.70	8.50	11.70
Índice de huecos $m = \frac{b_1}{b_1 + 30}$	0.16	0.22	0.28

Tabla 2. Características geométricas de las rejas

La reja puede adoptar diferentes pendientes longitudinales, comprendidas entre el 0 y el 33%. Para cada pendiente se caracterizan diversos caudales específicos de entrada al modelo, midiendo el perfil de la lámina de agua y los caudales captados y rechazados a lo largo de la reja.

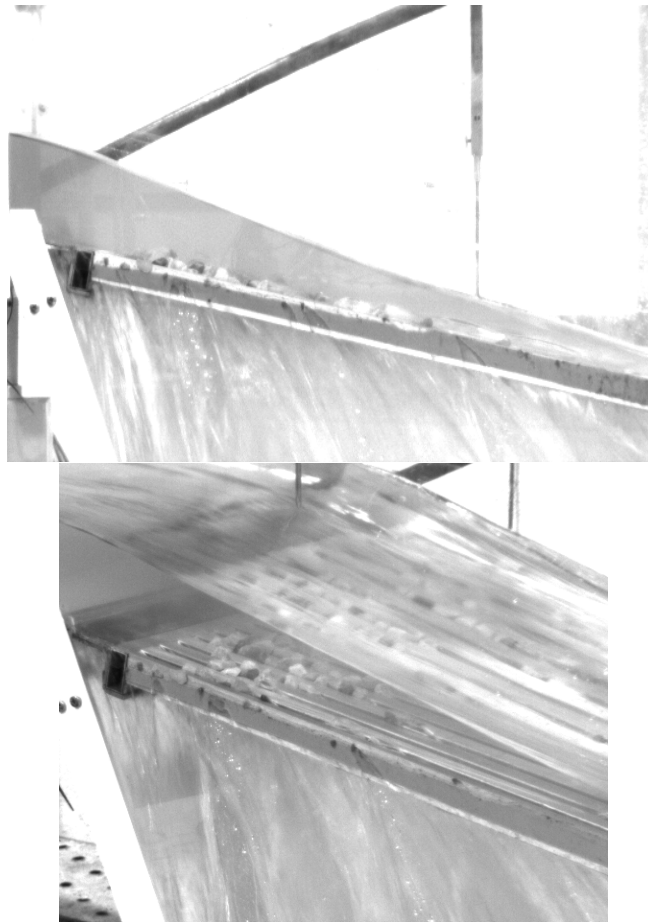


Figura 1. Ensayo con agua clara y gravas sobre la reja del dispositivo físico del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena

2.2 Campaña experimental

Para evaluar el efecto del transporte sólido sobre la reja, se ha llevado a cabo una campaña experimental con dos materiales clasificados como gravas cuyos diámetros característicos son $d_{50} = 8.3$ mm (grava 1), y $d_{50} = 14.8$ mm (grava 2).

La reja de índice de huecos $m = 0.22$ junto con la grava 1, se ha ensayado considerando tres caudales específicos (77.0, 114.6, y 155.4 l/s/m), y diversas pendientes (0, 10, 20, 30, y 33%), lo cual da lugar a un total de 15 combinaciones posibles. Igualmente, la reja de índice de huecos $m = 0.28$ con la grava 2 se ha ensayado para tres caudales específicos (114.6, 138.88 y 155.4 l/s/m) y utilizando las mismas configuraciones de pendiente. Cada ensayo se ha repetido en dos ocasiones, obteniéndose un total de 60 ensayos. Cada ensayo se ha mantenido hasta que todo el material sólido alcanza la reja. La duración del

ensayo ha variado entre 700 y 1620 segundos. En todos los casos, el caudal sólido al inicio de la reja es de $q_s = 0.33$ kg/s. El punto de entrada de los sólidos se sitúa al inicio del canal de aproximación, a una distancia de 5 m del inicio de la reja. Considerando el rango de caudales analizado, la concentración de sólidos en volumen varía entre 0.16 y 0.34%, dependiendo del flujo de agua clara ensayado.

Durante el ensayo se ha medido el perfil adoptado por la lámina de agua, así como los caudales captados y rechazados por la reja, tanto a nivel total como por unidad de longitud de reja para los casos de agua clara y agua con transporte de gravas. Al final de cada ensayo se ha analizado la superficie de huecos ocluida por las gravas.

3. Resultados y Discusión

Con los valores medidos de caudales captados y longitud de reja ocluida por el depósito de material granular sobre el espacio entre las barras, se ha calculado el nuevo índice de huecos denominado índice de huecos efectivo, m' . Para ello se ha resuelto la ecuación diferencial obtenida de asumir que la energía específica es constante a lo largo de toda la reja:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{m'0.66m'^{-0.16}\left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13} 2\sqrt{h \cos \alpha (E_0 - h \cos \alpha)}}{3h \cos \alpha - 2(E_0)} \quad [3]$$

combinando con la ecuación del orificio propuesta por Nosedá (1956):

$$\frac{dq}{dx} = -C_q m \sqrt{2gh \cos \alpha} \quad [4]$$

mediante el algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden, donde α es el ángulo de la reja con la horizontal.

El sistema de ecuaciones es equivalente a la solución de dos ecuaciones diferenciales ordinarias para $h(x)$ y $q(x)$. Como condiciones de contorno se parte del calado a la entrada de la reja h_0 , la energía específica E_0 , y el caudal de aproximación q_1 . El incremento longitudinal de cálculo es de 0.05 m.

Los resultados obtenidos para $h(x)$ se corresponden con los medidos en laboratorio y simulados numéricamente (Castillo *et al.* 2014).

Se obtiene también el valor del coeficiente de descarga efectivo considerando que se mantiene el índice de huecos inicial m :

$$C'_q = \frac{m'}{m} \left[0.66m'^{-0.16} \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.13} \right] \quad [5]$$

La figura 2 muestra los índices de huecos efectivos m' para los casos medidos en laboratorio de la reja B y la grava 1, y la reja C con la grava 2 comparándolos con los casos de agua clara.

Del mismo modo, la figura 3 muestra los coeficientes de descarga efectivos C'_q . Se observa que los máximos valores efectivos de m' y C'_q se obtienen para rejas con pendiente del 30% aproximadamente.

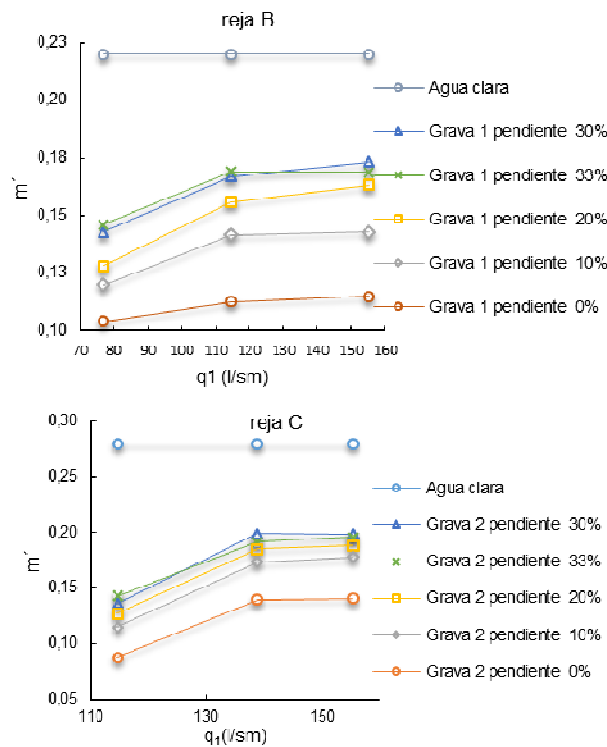


Figura 2. Índice de huecos efectivo m' calculado para las rejas B y C, considerando diversos caudales de aproximación y pendiente longitudinal de la reja

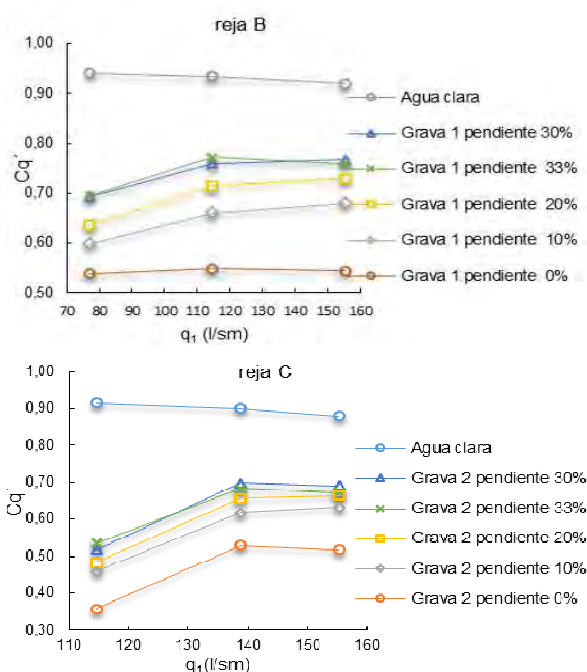


Figura 3. Coeficiente de descarga efectivo C_q' calculado para las rejas B y C, considerando diversos caudales de aproximación y pendiente longitudinal de la reja

A partir de los valores de índice de hueco efectivo m' se resuelve la ecuación [3] para calcular la longitud de reja mojada necesaria para captar la totalidad del caudal de aproximación, q_1 .

Las figuras 4 y 5 reflejan dichas longitudes de reja en función del caudal de entrada q_1 , para los casos de agua clara comparadas con las formulaciones propuestas por Nosedá (1956), Frank (1956) y Bouvard Kuntzmann (1956), así como con la formulación de Krochin (1978) que introduce un coeficiente de obstrucción de las rejas entre el 15 y 30 %.

Los resultados obtenidos en laboratorio se aproximan a los propuestos por Krochin (1978) para el valor de obstrucción $f = 30\%$.

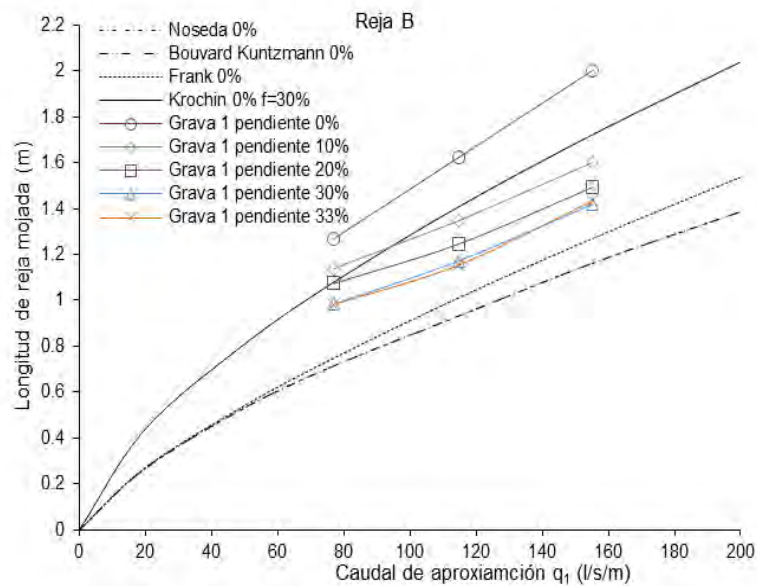


Figura 4. Longitud de reja B mojada para diversos caudales de aproximación y pendientes

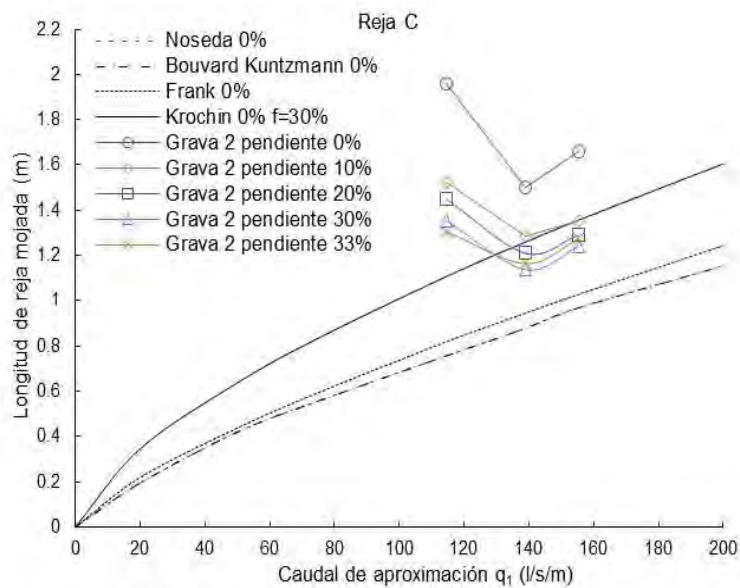


Figura 5. Longitud de reja C mojada para diversos caudales de aproximación y pendientes

Como se puede observar, la oclusión generada por las gravas da lugar a que las longitudes de reja obtenidas para los índices de hueco efectivos, m' , sean mayores que las obtenidas para el caso de agua clara. La oclusión se acentúa con la disminución de la pendiente longitudinal de la reja en ambos casos, aumentando la longitud de reja necesaria para captar el mismo caudal, aunque hay que tener en cuenta otros parámetros como son el caudal de aproximación y la pendiente de la reja.

En dichas figuras se puede observar como para la reja B ($m = 0.22$), pendiente longitudinal 30% y caudal $q_1 = 114.6$ l/s/m, la longitud de reja requerida se incrementa de 0.93 m calculado con la fórmula de Noseda (1956) para agua clara, a 1.15 m considerando el efecto

de oclusión debido a las gravas. La longitud de reja mojada se ha incrementado en un 24% respecto al valor inicial. Para el caso de la reja C ($m = 0.28$), pendiente del 30% y $q_1 = 138.88$ l/s/m, la longitud de reja se incrementa en cerca del 29% respecto a la longitud de reja requerida inicial.

Para comprobar la relación entre el fenómeno de oclusión de las rejillas de fondo con las características del flujo circulante, en la figura 6 se representa la tensión de corte τ_0 y el número de Froude al inicio de la reja F_{r0} , junto con la relación entre el índice de hueco efectivo y el índice de hueco inicial, siendo:

$$\tau_0 = \gamma h_0 i; \quad F_{r0} = \frac{q_1}{g^{1/2} h_0^{3/2}} \quad [6]$$

donde γ es el peso específico del agua, h_0 el calado al inicio de la reja, i la pendiente longitudinal de la reja, y g la aceleración de la gravedad.

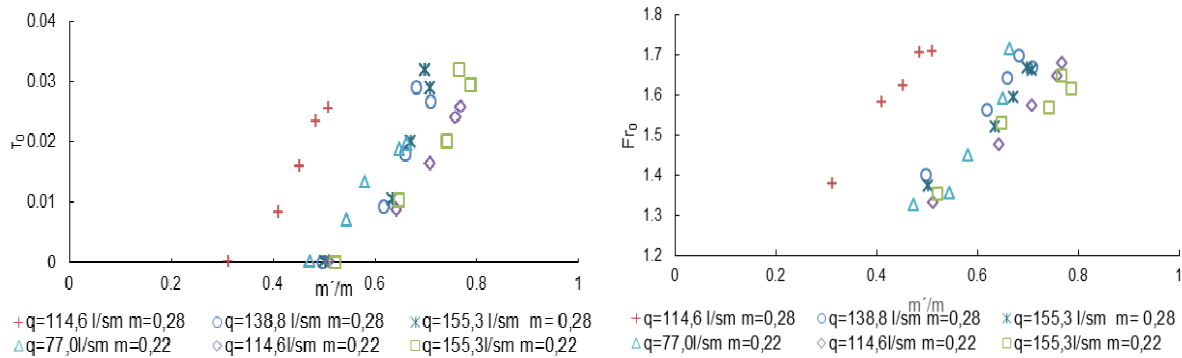


Figura 6. Cociente del índice de huecos efectivo e índice de huecos inicial en función de la tensión de corte o del número de Froude al inicio de la reja

En la figura anterior se observa una relación entre los parámetros hidráulicos, τ_0 y F_{r0} , y el cociente entre el índice de huecos efectivo y el inicial, m'/m . De este modo, incrementos en la tensión de corte y en el número de Froude conllevan en todos los casos a aumentos en la relación entre el índice de huecos efectivo y el inicial, m'/m .

De modo similar, en la figura 7 se representan las relaciones entre parámetros hidráulicos en los que interviene las características de los sólidos ensayados como son el cuadrado del número de Froude densimétrico al inicio de la reja F_{rd0}^2 y la fuerza de arrastre que ejerce el agua sobre los sólidos al inicio de la reja F_{D0} , respecto al cociente entre el índice de huecos efectivo y el inicial para cada ensayo, siendo:

$$F_{rd0}^2 = \frac{\tau_0}{\gamma \Delta d_{50}}; F_{D0} = C_D \rho \frac{U_0^2}{2} A; \Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \quad [7]$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre de las partículas, ρ_s y ρ las densidades de los sólidos y del agua respectivamente, U_0^2 la velocidad media del agua al inicio de la reja, y A el área

transversal al flujo de la partícula. En función de a los números de Reynolds ensayados, C_D adopta un valor constante de 0.6 (Sotelo, 2004).

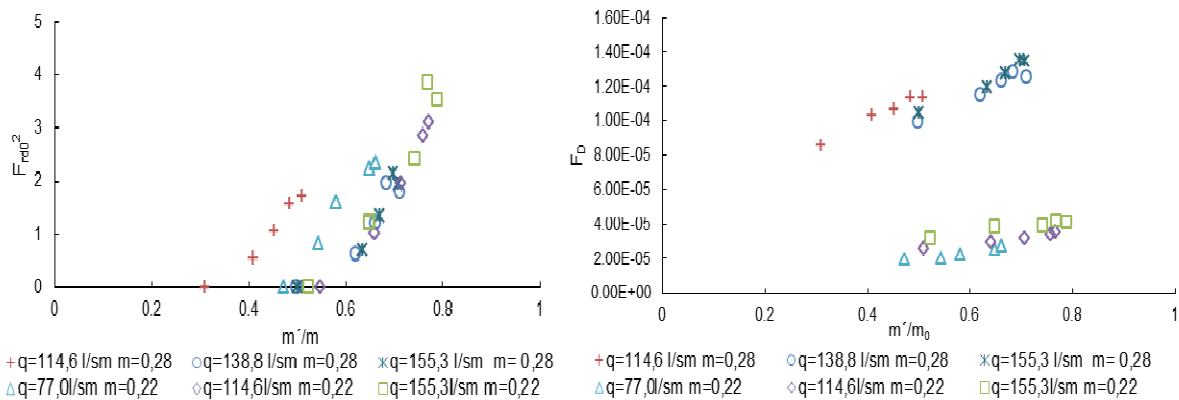


Figura 7. Cociente del índice de huecos efectivo e índice de huecos inicial en función del cuadrado del número de Froude densimétrico, F_{rd0}^2 , o de la fuerza de arrastre, F_{D0} , al inicio de la reja

En figura anterior se observa una relación entre los parámetros F_{rd0}^2 y F_{D0} , y el cociente entre índice de huecos efectivo y el inicial, m'/m .

En el caso de la fuerza de arrastre al inicio de la reja se observa una clara correlación entre ésta y el cociente m'/m que dan lugar a dos rectas diferenciadas para cada uno de los dos áridos empleados.

4. Conclusiones

Se está realizando un estudio sistemático del comportamiento de los sistemas de captación de fondo frente al transporte sólido de sedimentos para posibilitar su empleo en la captación de caudales de avenida en cauces efímeros. En este trabajo se ha analizado experimentalmente el fenómeno de obstrucción de las rejillas de fondo mediante flujos de agua clara con gravas cuyo d_{50} se aproxima al espaciamiento entre los barrotes.

A partir de los resultados medidos en laboratorio se ha calculado el índice de huecos y el coeficiente de descarga efectivo teniendo en cuenta la obstrucción de las rejillas por el depósito de las gravas sobre las mismas. A continuación se ha calculado la longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal y se ha comparado con las formulaciones existentes para el caso de agua clara, así como para el caso de Krochin (1978) considerando un coeficiente de obstrucción del 30%.

De la representación gráfica de diversos parámetros hidráulicos calculados al inicio de la reja respecto al cociente del índice de huecos efectivo con el índice de huecos inicial se han podido comprobar relaciones que deben ayudar a establecer correlaciones para la estimación del índice de huecos efectivo en función de diversos parámetros hidráulicos.

Referencias

- Ahmad, Z. & Kumar S., Estimation of trapped sediment load into a trench weir, Proc. of the 11th International Symposium on River Sedimentation (ISRS), University of Stellenbosch, South Africa, pp.1-9, 2010.
- Bouvard, M., Mobile Barrages & Intakes on Sediment Transporting Rivers. IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1992.
- Bouvard, M., & Kuntzmann, J., Étude théorique des grilles de prises d'eau du type "En dessous". La Houille Blanche, 5, pp. 569-574, 1954.
- Brunella, S., Hager, W. & Minor, H., Hydraulics of Bottom Rack Intake. Journal of Hydraulic Engineering, 129(1), pp. 4- 9, 2003.
- Castillo, L.G.; García, J.T., & Carrillo, J.M., Experimental measurements of flow and sediment transport through bottom racks. Influence of gravel sizes on the rack. Proc. of the 7th Int. Conf. River Flow, Lausanne, 2014.
- Drobir, H., Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. Österreichische Wasserwirtschaft, 11(12): pp. 243-253, 1981.
- Frank, J., Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr. Der Bauingenieur, 31(3): pp. 96-101, 1956.
- Krochin, S., Diseño Hidráulico. Segunda Edición. Colección Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador, 1978.
- Noseda, G., Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. L'Energia Elettrica, pp. 565-581, 1956.
- Ract-Madoux, M., Bouvard, M., Molbert, J., & Zumstein, J., Quelques réalisations récentes de prises en-dessous à haute altitude en Savoie. La Houille Blanche, 6, pp. 852-878, 1955.
- Raudkivi, A.J., Hydraulic Structures Design Manual. IAHR, pp. 92-105, 1993.
- Righetti, M. & Lanzoni, S., Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks. Journal of Hydraulic Engineering, 134(1), pp. 15-22, 2008.
- Simmler, H., Konstruktiver Wasserbau, Technische Universität Graz. Institut für Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau, 1978.
- Sotelo, G. (1997). Hidráulica General. Volumen I. Fundamentos. Limusa Noriega Editores, México D.F.