

Influencia de la aireación del flujo en rápidas en la evolución del Número de Manning

Rebollo, J.J.^{a1}, López, D.^{a2}, Herrero, R.^{a3}, Garrote, L.^{b1}, Balairón, L.^{a4}, Díaz, R.^{a5} y Ramos, T.^{a6}

^a Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Paseo Bajo Virgen del Puerto, 3 (28005) Madrid. E-mail: ^{a1}juan.j.rebollo@cedex.es, ^{a2}david.lopez@cedex.es, ^{a3}ricardo.herrero@cedex.es, ^{a4}luis.balairón@cedex.es, ^{a5}ruben.diaz@cedex.es, ^{a6}tamara.ramos@cedex.es

^b ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad Politécnica de Madrid). C/ Profesor Aranguren, 3 (25040) Madrid. Email: ^{b1}l.garrote@upm.es

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX está realizando una investigación sobre la influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto en el marco del proyecto EMULSIONA (Plan Nacional de I+D del MINECO), cuyo objeto es caracterizar estos efectos a escala de prototipo. La primera fase de la investigación se ha centrado en el estudio de la influencia de la aireación en las rápidas, donde se intenta evaluar la pérdida de energía para conocer la velocidad de entrega al final de la misma y así dimensionar la estructura de disipación necesaria. Analizando el estado del arte, se mencionan diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en rápidas: Frenado por fricción de contornos (Manning, 1889), Disipación turbulenta (Hinze, 1949) y Disipación por efecto de la división y reagrupamiento de las burbujas. El objeto de esta primera fase de la investigación será evaluar cuál de ellos tiene mayor influencia.

Palabras clave | emulsión; aireación; Manning; concentración; velocidad.

INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del proyecto EMULSIONA, con financiación del Plan Nacional de I+D del MINECO, el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX está realizando una investigación sobre la influencia de la aireación en rápidas y en cuencos de resalto. Este estudio tiene como objeto analizar estos efectos y para ello se ha construido una instalación de grandes dimensiones que permite eliminar los efectos de escala de la aireación y granatizar la semejanza. La primera fase de la investigación se ha centrado en el estudio de la influencia de la aireación en las rápidas, donde se intenta evaluar la pérdida de energía para conocer la velocidad de entrega al final de la misma y así dimensionar la estructura de disipación necesaria. Analizando el estado del arte sobre esta temática, se mencionan diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en rápidas:

- Frenado por fricción de contornos: Existen múltiples expresiones para cuantificar este efecto, siendo el más extendido la fórmula de Manning (1889). Esta ecuación representa la pendiente de fricción en base al coeficiente n (1).

$$I_f = \frac{n^2 Q^2}{S^2 R_h^{4/3}} \quad (1)$$

- Disipación turbulenta: Hinze (1949) propuso una formulación para evaluar los efectos disipativos de la aireación, ya que altera los mecanismos de disipación turbulenta. Esta formulación es teórica sin apoyo experimental.
- Disipación por efecto la división y reagrupamiento de las burbujas: La diferencia de tensión tangencial en el flujo a diferentes capas produce efectos de cizallamiento que rompen las burbujas, para volver a reagruparse en zonas de choque. Durante este proceso se vence la tensión superficial de las burbujas, lo que produce una disipación de energía (paso a calor).

Los efectos de la aireación en el primer mecanismo son contrapuestos a los restantes. En el flujo en rápida, con láminas de poca entidad debido a la velocidad, parece que la fricción será preponderante, mientras que en el resalto tiene mucho más importancia la turbulencia. En este sentido, el principal objeto de la experimentación será evaluar cuál de ellos tiene mayor influencia en cada caso. El objeto de este estudio se centra en el efecto que tiene la variación de la concentración de aire sobre el número de Manning a lo largo de la rápida.

En cuanto a la instalación experimental e instrumentación, se ha construido en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX una rápida de 6 m de altura y un cuenco de amortiguamiento de 9 m de longitud. La instalación se alimenta con un sistema de bombeo que permite alimentar un caudal de 300 l/s a través de una boquilla que permite regular el calado entre 2 y 20 cm. El dispositivo experimental consta además de un compresor de aire de 8 bares que permite alimentar caudales de hasta 2500 l/min de aire. Los principales equipos de medida y caracterización del flujo están formados por un tubo Pitot de fabricación propia, que toma una muestra de flujo emulsionado de forma continua.

Tras las fases de experimentación y análisis de resultados, se han obtenido valores de velocidad y concentración de aire a pie de rápida para una gama de ensayos que varían entre 155 y 300 l/s de caudal de agua y entre 0 y 2500 l/min de caudal de aire. Se ha podido observar y medir en la rápida que una mayor concentración de aire en el flujo se traduce en un aumento de la velocidad, en parte por la reducción de los efectos de la fricción (Mateos, 1987). Asociado a este análisis, el siguiente paso consiste en obtener el campo de concentraciones a lo largo de la vertical en el mismo punto, con el objeto de obtener la concentración media y poder relacionar esta variable con el número de Manning. Para esta fase, se han utilizado diversos métodos basados en la decantación agua – aire y métodos de fotointerpretación con el objeto de extrapolar el rango de concentraciones a toda la sección.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Con el fin de analizar los efectos de la aireación en condiciones de prototipo, se ha construido en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX una instalación con una rápida de 6.5 m de altura y un cuenco de amortiguamiento de 9.7 m de largo y 2 m de altura (Figura 1). La instalación se alimenta con un sistema de bombeo que permite aportar un caudal de más de 300 l/s con 10 m de altura de carga en la sección de entrada de la rápida.

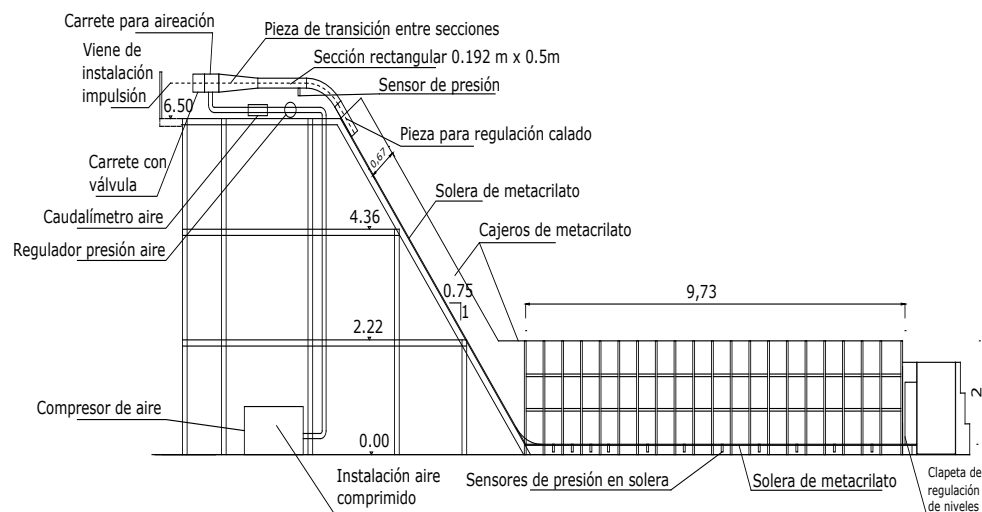


Figura 1 | Esquema de la instalación experimental

La bomba toma el agua de un depósito elevado de nivel constante de 6 m de altura, lo que proporciona una carga adicional, y el caudal de entrada se controla mediante un caudalímetro de ultrasonidos para tubería de 350 mm y una válvula de regulación para ajustar los caudales de ensayo. Posteriormente se ha colocado un carrete circular por el que se introduce el aire a presión seguido de una transición circular-rectangular de 0.50 m de ancho por 0.19 m de alto para ganar el ancho de la rápida.

Finalmente se dispone un tramo curvo para tomar la alineación de la rápida, con talud 0.75(H):1(V), y se controla con una boquilla que permite regular el calado entre 2 y 20 cm. Este mecanismo permite disponer de velocidades en la sección de entrada entre 3 y 20 m/s. El dispositivo experimental consta además de un compresor de aire de 8 bares que permite introducir en el carrete de aireación un caudal de aire de hasta 10.000 l/min. Esta instalación dispone de un filtro, una válvula de regulación de presión, un caud l metro de aire y una válvula de regulación.

INSTRUMENTACIÓN

La primera fase de la experimentación se ha focalizado en la calibración de un dispositivo de medida de concentración de aire que consiste en un pseudo tubo Pitot de fabricación propia, que toma una muestra de flujo emulsionado de forma continua en un punto de la rápida y lo conduce a un depósito de decantación en el que se separa y afora el caudal de aire y agua. La velocidad del flujo en la rápida se ha obtenido con el mismo tubo Pitot, conectado a un sensor de presión que proporciona el término cinético de la altura de energía (Figura 2).

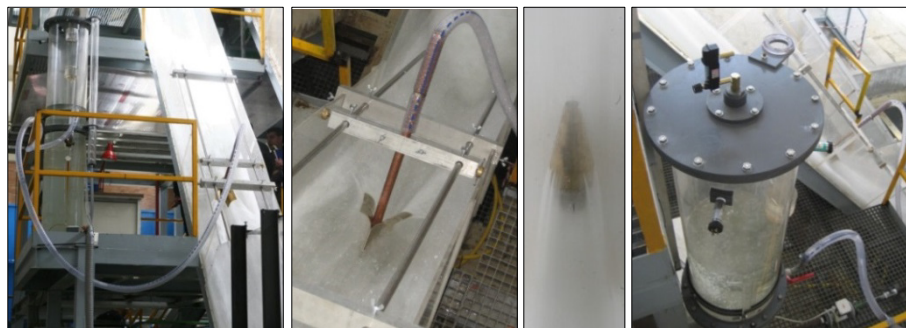


Figura 2 | Elementos de instrumentación y medida

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA

En primer lugar, con el fin de mantener unas condiciones homogéneas de aireación a lo largo de toda la rápida y evitar la incorporación de aire en el flujo por la superficie, se ha colocado sobre la cubierta una membrana plástica que consigue este efecto manteniendo las condiciones de régimen libre (Figura 3). Por otro lado, este elemento también introduce una fricción adicional que permite realizar ensayos con números de Froude en el campo de interés. El número de Reynolds en los ensayos se mantiene entre 800,000 y 2,000,000 y el de Weber entre 137 y 1,050. Posteriormente, este elemento se ha eliminado por tener de nuevo los valores de velocidad y concentración asociados a un flujo en lámina libre, cuya comparativa con otros casos de estudio es más sencilla.

Se han realizado ensayos con una apertura de 8 cm de la boquilla de salida, por lo que el calado al inicio de la rápida es conocido, al mismo tiempo que se han combinado diferentes caudales de agua (entre 100 y 300 l/s) y aire (entre 0 a 2500 l/min). Con estos datos, junto a los de velocidad y concentración de aire obtenidos al final del canal, sería posible calcular la diferencia de energía específica al inicio y final de la rápida y por tanto, la pendiente de fricción. Considerando los valores medios de la velocidad, radio hidráulico y concentración, es posible obtener un valor de la n de Manning que representa las pérdidas en la rápida para cada escenario.



Figura 3 | Rápida cubierta con la membrana plástica

Campo de velocidades

Los siguientes gráficos representan el campo de velocidades a lo largo de la vertical obtenidos a pie de rápida. El conjunto de escenarios de ensayo est n asociados a diferentes combinaciones de caudal de agua y aire y con cubierta y sin ella.

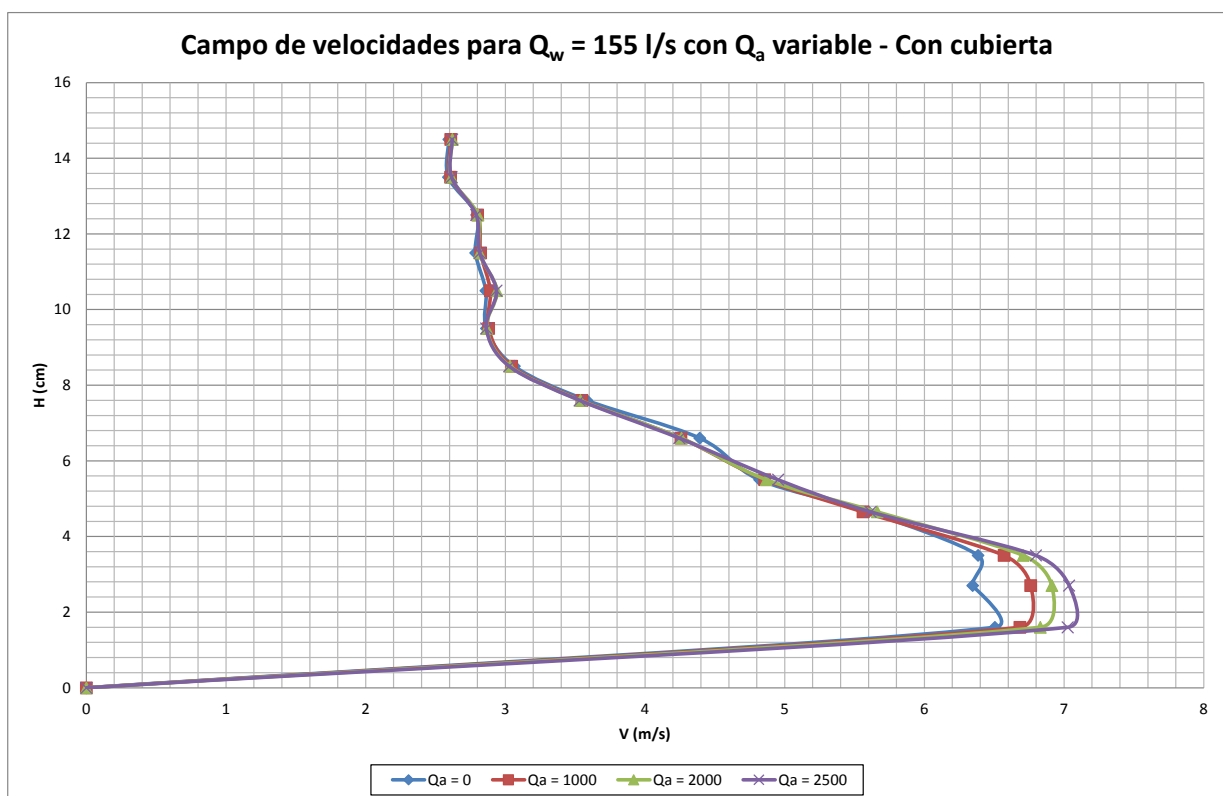


Figura 4 | Campo de velocidades en ensayo con cubierta para $Q_w = 155$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

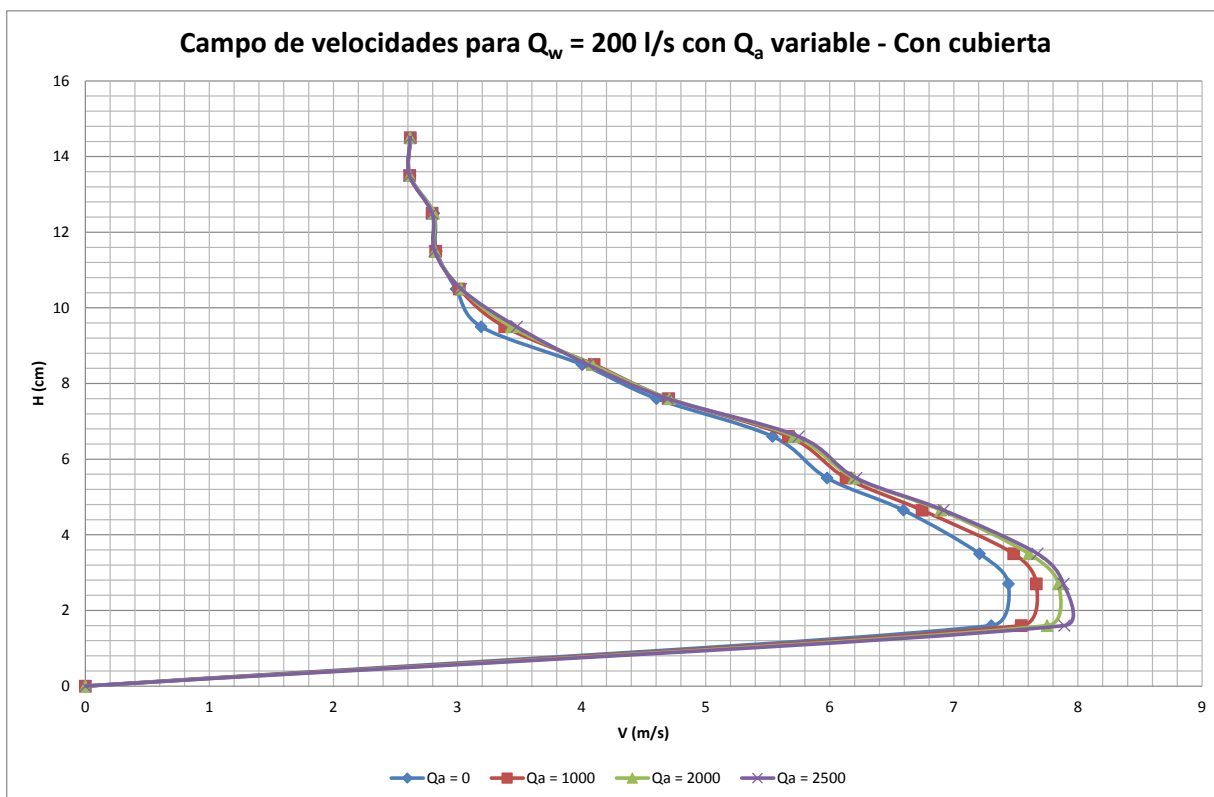


Figura 5 | Campo de velocidades en ensayo con cubierta para $Q_w = 200$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

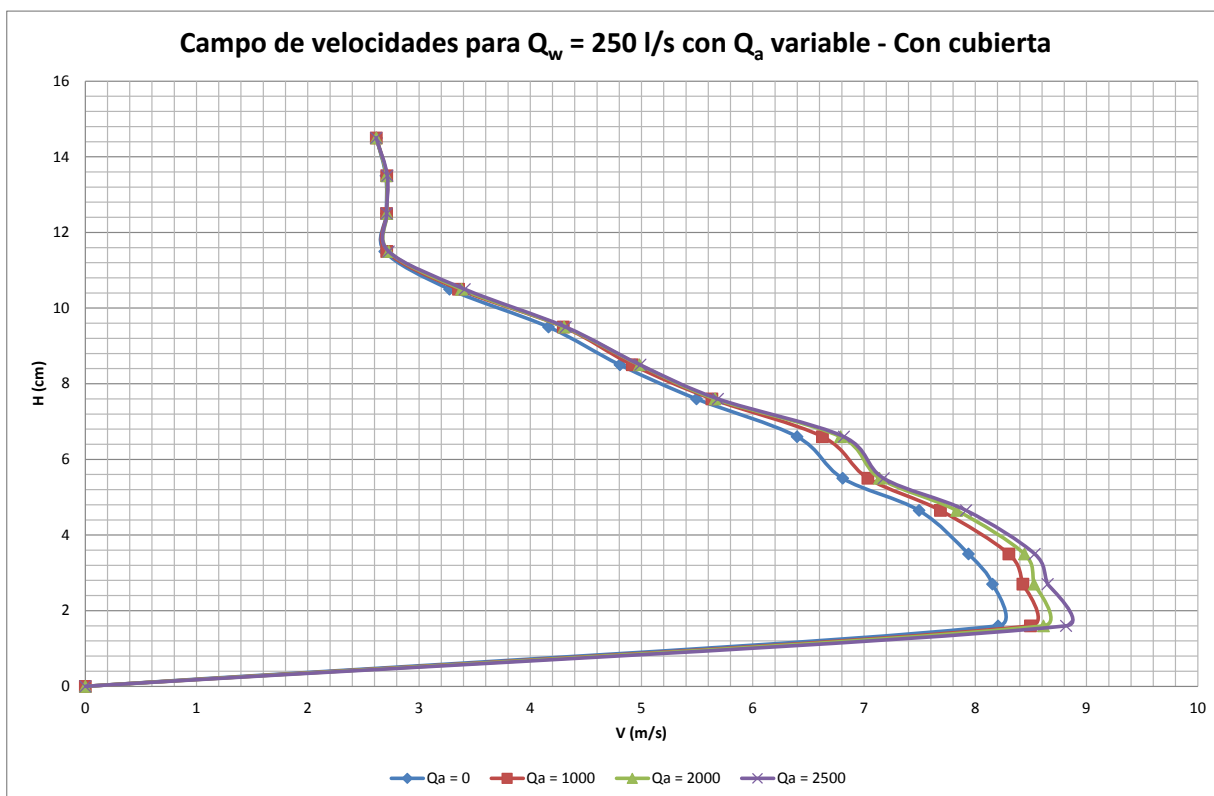


Figura 6 | Campo de velocidades en ensayo con cubierta para $Q_w = 250$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

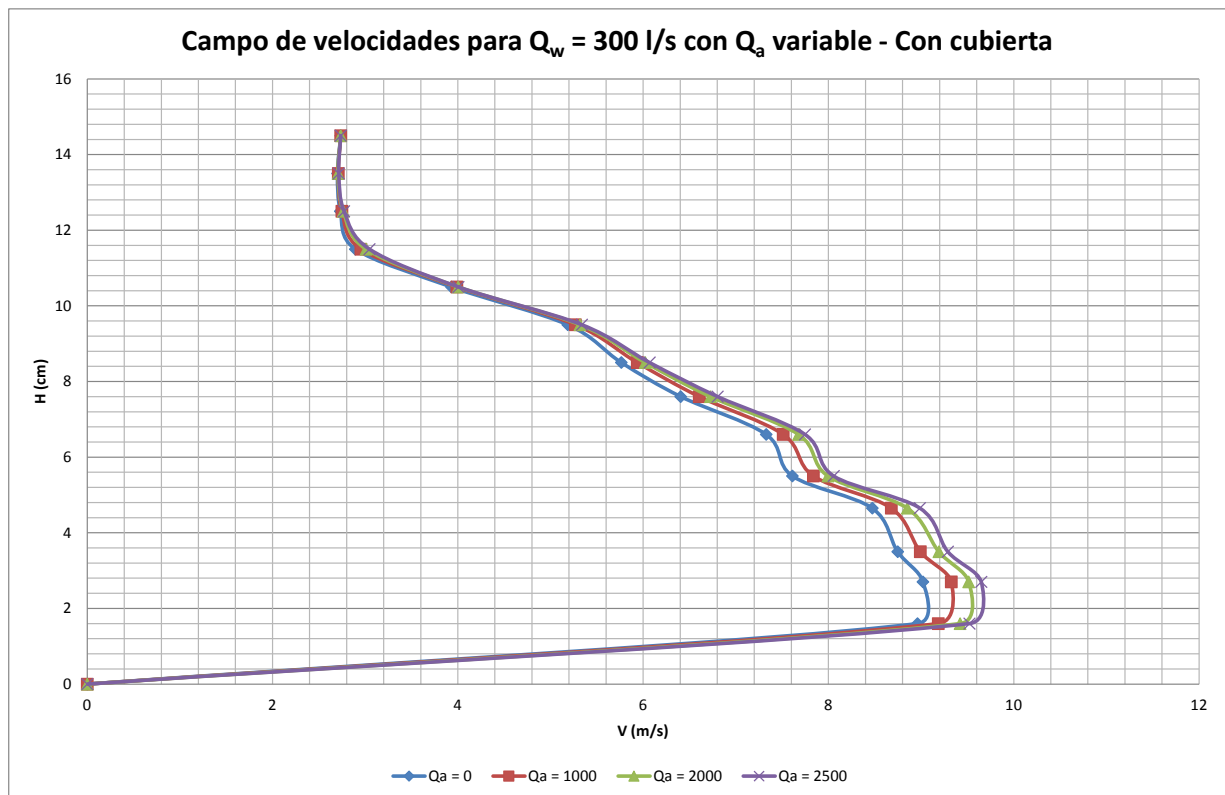


Figura 7 | Campo de velocidades en ensayo con cubierta para $Q_w = 300$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

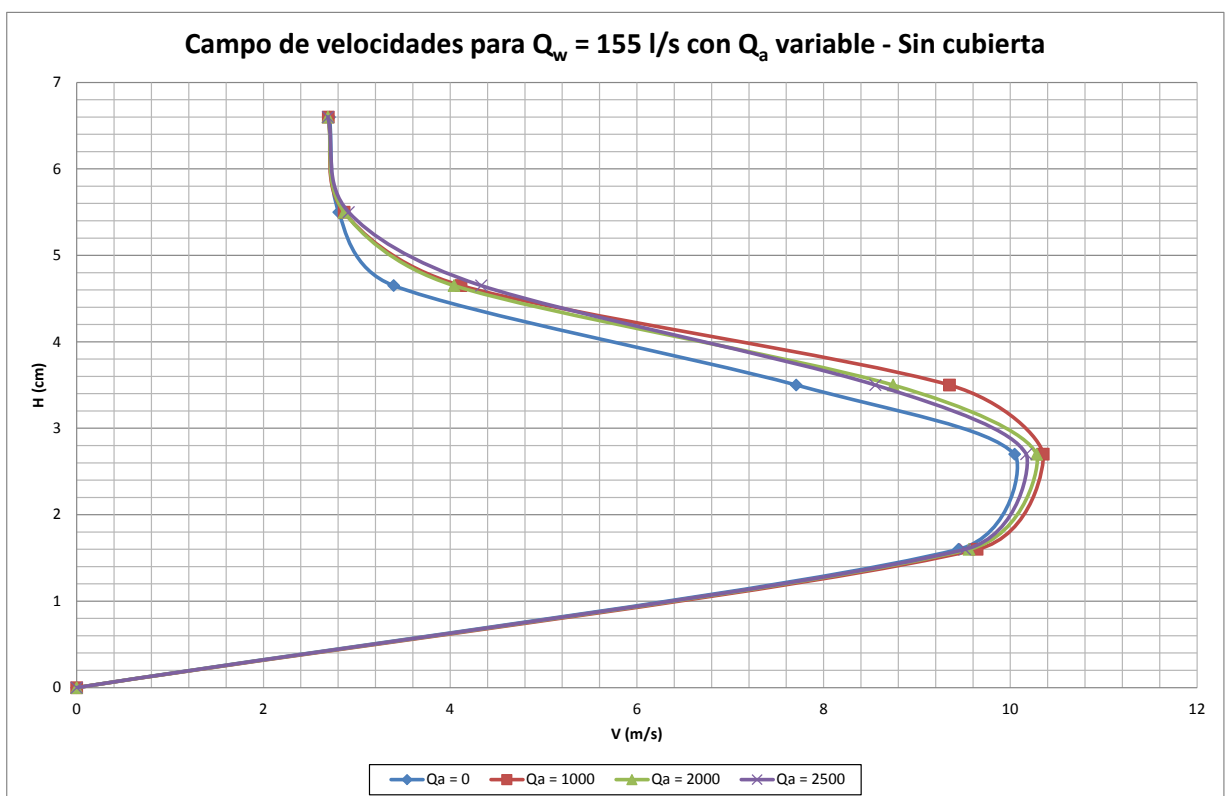


Figura 8 | Campo de velocidades en ensayo sin cubierta para $Q_w = 155$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

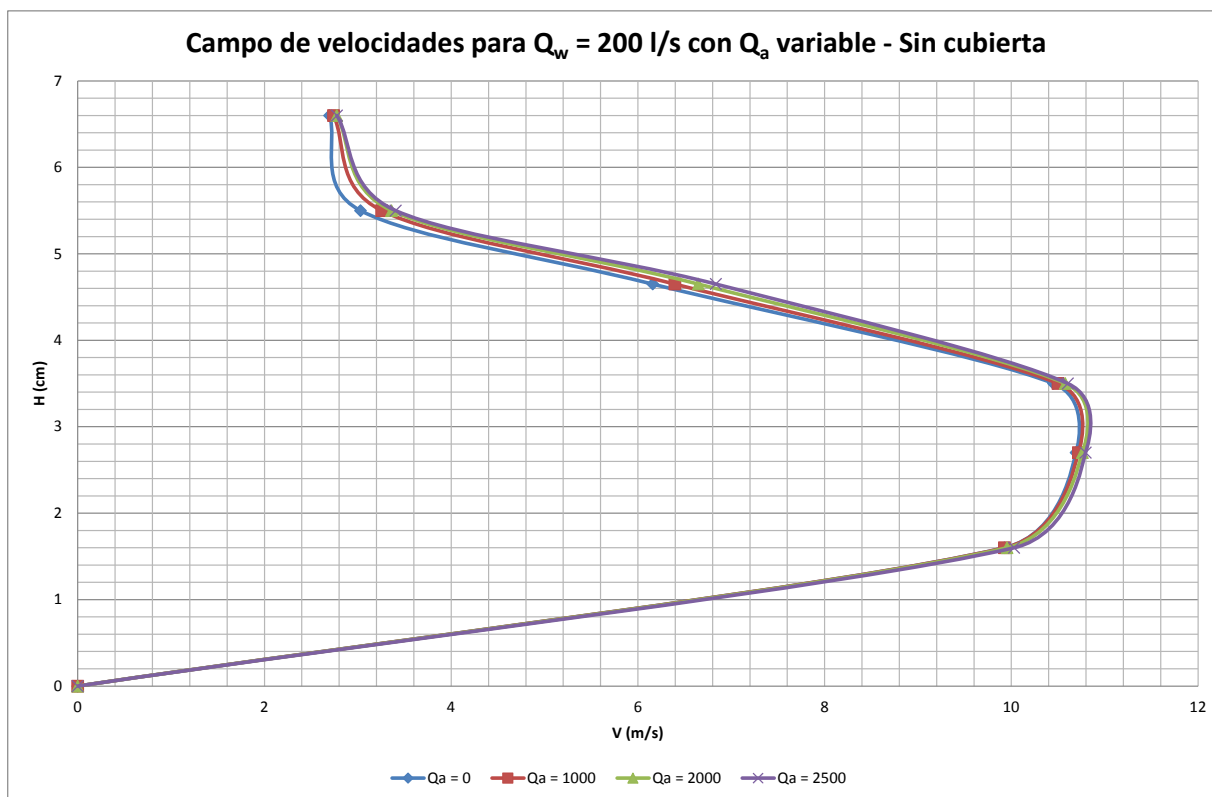


Figura 9 | Campo de velocidades en ensayo sin cubierta para $Q_w = 200$ l/s y caudal de aire variable (0, 1000, 2000 y 2500 l/min)

A falta de concretar los ensayos para los puntos superiores de la sección en los caudales de 250 y 300 l/s sin cubierta, los resultados muestran un incremento de la velocidad a medida que se incrementa el caudal forzado de aire en la entrada del dispositivo.

Concentración

Hasta el momento, la determinación de la concentración se ha basado en métodos mediante decantación y fotointerpretación. A partir de diagramas de concentración en perfiles de flujos de aliviaderos en régimen uniforme (Wood, 1991) y teniendo en cuenta la ecuación de continuidad, se han analizado diferentes escenarios con fotogramas a elevada velocidad de obturación para obtener la tendencia de concentración en los perfiles. Las siguientes figuras muestran el tratamiento de los resultados de la escala de grises (RGB) para obtener una propuesta de perfil de concentración en cada escenario (Figura 10).

Los resultados muestran una tendencia creciente asociada a la coloración del calado hasta un cambio de pendiente que se considera el calado asociado al 90% de concentración. Comparando con los resultados de velocidad en ambos escenarios, se aprecia que este cambio coincide con otro cambio de pendiente en el perfil superior donde la velocidad se vuelve constante. Por último, utilizando la ecuación de continuidad, se puede extrapolar los valores de la escala RGB a concentración para que el caudal de agua sea igual al de cada escenario (Tablas 1 y 2).

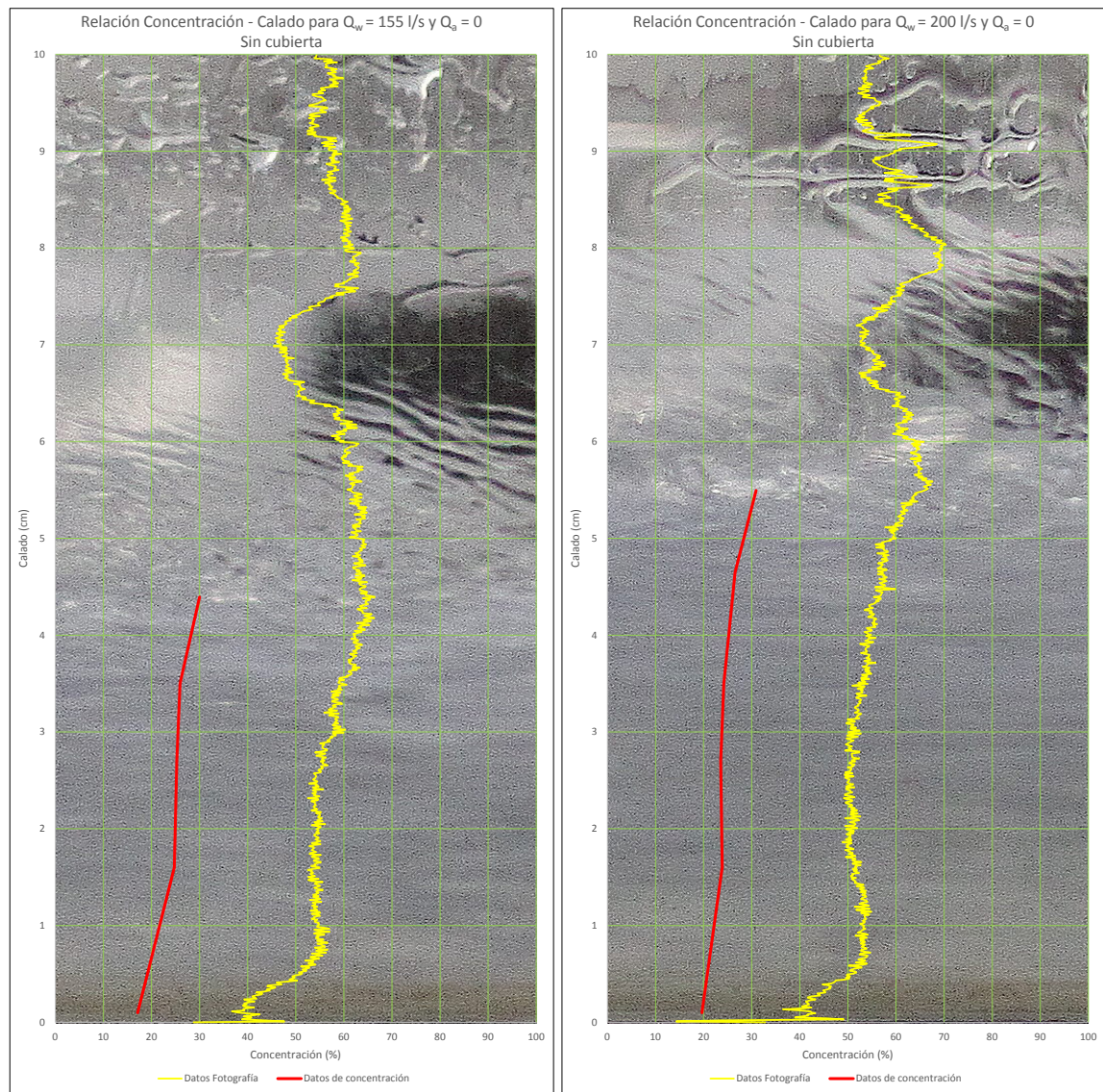


Figura 10 | Tendencia de la escala de grises en el escenario sin cubierta para caudales de agua de 155 y 200 l/s sin caudal de aire forzado

Tabla 1 | Aplicación de la ecuación de continuidad para $Q_W = 155$ l/s - $Q_A = 0$ l/min

Q ₁₀₀ (m ³ /s)	0.155	RGB _{MAX}	170.103		
Q ₉₀ (m ³ /s)	0.1395	RGB _{MIN}	97.050		
C _{MAX}			0.3		
Q _W = 155 l/s - Q _A = 0 l/min					
Z (m)	V (m/s)	RGB	C	Q _T (m ³ /s)	Q _W (m ³ /s))
0.001	8.626	97.051	0.171		
0.016	9.445	140.297	0.247	0.068	0.054
0.027	10.045	143.320	0.253	0.054	0.040
0.035	7.707	147.106	0.259	0.036	0.026
0.043	4.358	170.104	0.300	0.027	0.019
0.0465	3.395				
				0.1838	0.1395

Tabla 2 | Aplicación de la ecuación de continuidad para $Q_W = 200$ l/s - $Q_A = 0$ l/min

Q ₁₀₀ (m ³ /s)	0.2	RGB _{MAX}	170.528		
Q ₉₀ (m ³ /s)	0.180	RGB _{MIN}	108.527		
		C _{MAX}	0.31		
Q _W = 200 l/s - Q _A = 0 l/min					
Z (m)	V (m/s)	RGB	C	Q _T (m ³ /s)	Q _W (m ³ /s))
0.001	8.8799927	108.527542	0.1966537		
0.016	9.92560013	131.732345	0.23870118	0.07052097	0.05517015
0.027	10.6923789	130.039548	0.23563381	0.05669944	0.04325218
0.035	10.4511748	133.445621	0.24180567	0.04228711	0.03219234
0.0465	6.15732167	146.498588	0.26545786	0.04774943	0.03563866
0.05493	3.05144645	170.528249	0.309	0.01942652	0.01384666
0.055	3.02872608				
				0.23668347	0.18009998

CONCLUSIONES

A falta de concluir la totalidad de los ensayos, los resultados experimentales en la rápida aireada muestran que, a igualdad de condiciones de otras variables hidráulicas, una mayor concentración de aire en la rápida se traduce en una aceleración del flujo. Esto indica que el mecanismo de disipación de energía predominante en la rápida es el de fricción y que este se ve reducido por la aireación. En consecuencia, a efectos de optimizar las estructuras de disipación de energía, se deben buscar formas de reducir la aireación en la rápida reduciendo así la velocidad del flujo en la entrada de la estructura de disipación. Con los futuros resultados de concentración, se propondr  una formulación para modificar el coeficiente de Manning.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación “ESTUDIO DE LA AIREACIÓN NATURAL Y FORZADA EN MODELO FÍSICO DE GRANDES DIMENSIONES Y ANÁLISIS DE SU INFLUENCIA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CUENCOS DE RESALTO HIDRÁULICO (LS-EMULSION)” (BIA2011-28756-C03-03), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

REFERENCIAS

- Bélanger, J. B. 1841. Notes sur l’hydraulique (Notes on hydraulic engineering). Ecole Royale des Ponts et Chaussées, Paris (in French)
- Chanson, H. 2009. Development of the Bélanger equation and backwater equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). Journal of Hydraulic Engineer, 135(3), pp. 159-163.
- Hager, W.H., Sinniger, R. 1985. Flow Characteristics of the Hydraulic Jump in a Stilling Basin with an Abrupt Bottom Rise. Journal of Hydraulic Research, 23(2), pp. 101-113.
- Hinze, J.O., Milborn, H. 1950. Atomization of liquids by means of a rotating cup, Journal of Applied Mechanics, 17, pp. 145–153

- Manning, R. 1891. On the flow of water in open channels and pipes. Institution of Civil Engineers of Ireland. vol. 20, pp. 161-207, Dublin (Ireland)
- Rajaratnam, N. 1967. Hydraulic Jumps. Advances in Hydrosience 4, pp. 197-280, ed. V. T. Chow. Academic Press (New York)
- Valero, D., Fullana, O., Gacía-Bartual R., Andrés-Domenech, I., Valles, F. 2014. Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modelling comparison. 3er IAHR Europe Congress, Porto (Portugal)
- Wood, I. R. 1991. *Air Entrainment in Free-Surface Flows*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual n° 4, Rotterdam, Netherlands.