

Generación de resaltos hidráulicos de alto número de Froude a partir de regímenes rápidos emulsionados. Una investigación experimental

Francisco J. Vallés-Morán, Beatriz Nácher-Rodríguez,
Arnau Bayón Barrachina, Juan F. Macián Pérez, Juan B. Marco Segura
*Instituto del Agua y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022. Valencia*

P. Amparo López Jiménez
*Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022. Valencia*

1. Introducción

La adaptación de nuestras presas para permitir el alivio de crecidas de mayor periodo de retorno, cuestión a la que nos conduce tanto la nueva normativa como los actuales estándares de seguridad (Vallés Morán et al., 2015) plantea todo un reto tecnológico en el campo de la ingeniería civil en general y en la ingeniería hidráulica en particular.

Así, es necesario concebir soluciones para prevenir los problemas de vertido, habida cuenta de que no puede realizarse un diseño *in situ* en la mayoría de los casos, dado que las instalaciones son de gran tamaño y los problemas ligados al ensayo-error serían apreciables. Algunas de estas soluciones se basan en un aumento de capacidad de desagüe de los aliviaderos de las presas de gravedad vertedero. En ellas una de las partes más comprometida y compleja es la relativa a la obra de disipación de energía, cuyo enfoque más habitual se basa en forzar un resalto hidráulico en un cuenco de disipación dispuesto al efecto. En este sentido, la aireación forzada o emulsionamiento del flujo en la rápida mediante la disposición de aireadores en la misma se propone como una solución segura y eficiente (Fernández Bono y Vallés Morán, 2006).

La aireación del flujo afecta a prácticamente todas sus propiedades mecánicas de forma significativa, pudiéndose gracias a ella disminuir el riesgo de daños por cavitación, aumentar el calado del flujo y aumentar la disipación de energía a lo largo de la rápida. De esta manera, pueden generarse unas condiciones de entrada al cuenco menos exigentes para caudales mayores a los de diseño.

La investigación que se presenta en esta comunicación, que se enmarca en los resultados del Proyecto EMULSIONA (Plan Nacional I+D. MINECO, Convocatoria 2011), plantea la aireación

forzada del flujo en la rápida mediante aireadores especialmente dispuestos u otros dispositivos (dientes, escalonado parcial...) para la mejora del comportamiento hidráulico del cuenco de disipación. Se aumenta así su rango de utilización, posibilitando su correcto funcionamiento hidráulico para mayores caudales de proyecto o para condiciones hidráulicas más exigentes. La aireación se concibe así no sólo para evitar los problemas de cavitación en la rápida sino también para mejorar el funcionamiento y el rendimiento disipativo del resalto hidráulico en el cuenco.

En principio la aireación artificial (forzada) aumenta el calado del flujo y le hace perder velocidad. Por esto disminuye el número de Froude, no sólo del flujo aireado real sino también el del flujo equivalente –aquel que, moviéndose a la velocidad de la mezcla, tiene el calado con el que fluiría el agua supuesta independiente del aire–, generándose unas condiciones de entrada al cuenco menos exigentes para caudales mayores a los de diseño (Fernández Bono y Vallés Morán, 2006; Valero et al. 2013). No obstante, el resultado final en cuanto a las características hidráulicas (calado, velocidad y número de Froude) del flujo a pie de rápida dependen del balance entre los tres mecanismos disipadores que tienen lugar en un flujo emulsionado, a saber, disminución de la fricción con los contornos, aumento de la fricción de la lámina libre y disipación turbulenta por vorticidad generada por la estratificación. La investigación completa aborda, desde la evidencia empírica de la idea, tanto su justificación teórica como el detalle práctico final de su aplicación, pasando por los resultados experimentales de laboratorio y su análisis posterior. Es en este contexto de diseño de los experimentos, es donde se encuadra la investigación que se presenta.

El análisis de la aireación en resaltos hidráulicos se viene desarrollando desde hace más de medio siglo (Rajaratnam, 1962). En la mayoría de estudios disponibles en la literatura, el enfoque empleado es experimental, pese a que cada vez es más frecuente el uso de modelos matemáticos en este campo (Bayón-Barrachina y López-Jiménez, 2015). La cantidad de trabajos existentes es notable, si bien es cierto que la práctica totalidad de ellos se centra en el análisis del resalto hidráulico clásico (sin aireación) y, generalmente, dentro del rango de números de Froude de aproximación (Fr_1) propuesto por las directrices de diseño de cuencos amortiguadores del U.S. Bureau of Reclamation (Peterka, 1984), es decir, entre 4.5 y 9.0 (resalto estacionario) y el rango de aceptabilidad del resalto fuerte (hasta $Fr_1=13$). El presente estudio pretende ampliar la casuística analizada hasta ahora, tanto por el empleo de flujos supercríticos emulsionados, como por la extensión del rango de números de Froude estudiados.

La modelación del fenómeno de los resaltos hidráulicos para el análisis de los aspectos energéticos en un laboratorio controlado se hace imprescindible para el diseño de las estrategias de disipación de energía. Muchos han sido los intentos de analizar este fenómeno a través de modelos numéricos y experimentales, con gran profusión de modelos numéricos (Hager, 1992; Chanson, 2013). No obstante, como afirman Murzyn y Chanson (2009), los modelos matemáticos aún tienen problemas para reproducir la física de ciertos fenómenos hidráulicos, aunque pueden contribuir de forma significativa a su mejor comprensión. Como Romagnoli et al. (2009) destacan, hasta la fecha no se ha alcanzado una

comprensión del flujo interno y las estructuras turbulentas características de los resaltos hidráulicos. Para Murzyn y Chanson (2009), los principales aspectos del resalto hidráulico que no han sido aún enteramente descritos son: la mezcla de flujo, la rotura y coalescencia de burbujas, las interacciones turbulentas de la superficie libre de agua y los procesos de formación y rotura de olas. En este sentido una metodológica caracterización experimental se hace imprescindible.

En el caso de la modelación física descrita en esta comunicación, los primeros ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en un dispositivo experimental diseñado ad hoc para la generación de este tipo de resaltos. Sin embargo, como su diseño es complejo y la alimentación en flujo mixto agua-aire no está exenta de dificultades, se decidió en su momento construir un canal de menores dimensiones, con el que iniciar la campaña experimental e ir adquiriendo conocimiento en este campo. Este canal se construyó en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la UPV. Para este canal se diseñó, mediante técnicas CFD, un dispositivo de alimentación que permite una correcta transición de flujo en presión a lámina libre, asegurando un reparto homogéneo de caudales a la largo de la anchura del canal (Valero et al., 2013; Bayon-Barrachina et al., 2013). A su vez, el diseño de este dispositivo se basaba en uno previo de Hager (1992).

2. Modelo experimental

2.1. Geometría del canal

A partir del conocimiento adquirido en la realización de experimentos con un canal de pequeño tamaño, se ha diseñado y construido un nuevo canal en el laboratorio: el Canal Emulsiona 2. Su diseño se ha basado tanto en el canal precedente como en las recomendaciones de la literatura técnica internacional en cuanto a la no aparición de efectos de escala en los ensayos con flujos aireados (Heller, 2011).

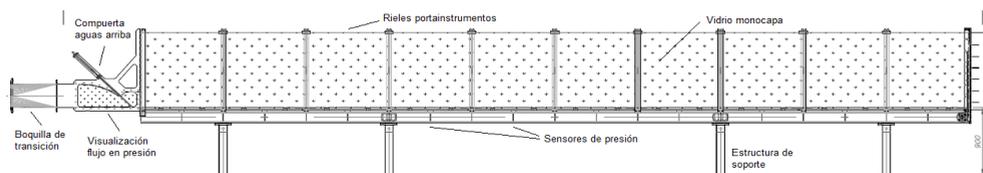


Figura 1. Esquema general del canal Emulsiona 2.

Así, este nuevo canal, horizontal y de sección rectangular de 0.3 m de ancho y 1.0 m de alto, con 10.0 m de longitud, permite realizar ensayos con números de Weber por encima de 110 (Rutschmann, 1988) y números de Reynolds superiores en todo caso a 10^5 (Chanson, 2009) con calados del régimen supercrítico mayores a 4.0 cm.

El caudal mínimo en flujo líquido que garantiza un comportamiento estable de la bomba y la instalación en conjunto es de 55 l/s, pudiendo alcanzar valores máximos de 140 l/s. El

compresor que abastece la instalación de aire permite inyectar hasta 90 l/s. Esto implica poder cubrir un rango de concentraciones de aire desde 0% hasta 62% y 39% en condiciones de caudal líquido mínimo y máximo, respectivamente.



Figura 2. Canal Emulsiona 2. Detalle del dispositivo de alimentación, boquilla y compuerta de entrada (izda.) y vista general del canal Emulsiona 2 (dcha.).

2.2. Casos de estudio

Se pretende analizar los efectos sobre el comportamiento del resalto hidráulico que ejercen las tres variables hidráulicas siguientes: número de Froude de aproximación (Fr_1), número de Reynolds de aproximación (Re_1) y concentración de aire (C). Así, la campaña experimental, descrita más adelante, cubre un rango de concentraciones de aire desde 0% hasta 50% y de números de Froude desde 4.5 hasta aproximadamente 13, abarcando todo el intervalo del resalto estacionario y la región de comportamiento hidráulico aceptable del fuerte, es decir, entre 9 y 13. Para los caudales a ensayar y el rango de Fr_1 planteados, se intenta mantener el calado del régimen supercrítico siempre por encima de 4.0 cm, pues valores menores pueden ocasionar la aparición de efectos de escala. Por el contrario, dado que la anchura del canal es fija, calados supercríticos excesivamente altos pueden dar pie a ratios de aspecto (relación entre calado supercrítico y ancho del canal) excesivamente altos, con lo que la presencia de cajeros puede devenir perceptible y sesgar los resultados (Chanson, 2009). Por último, y en relación con esta cuestión, el número de Reynolds se mantiene siempre por encima de 10^5 , a fin de evitar que los efectos viscosos y la presencia de cajeros jueguen un papel relevante en el comportamiento del resalto, alcanzándose valores de hasta $3.33 \cdot 10^5$.

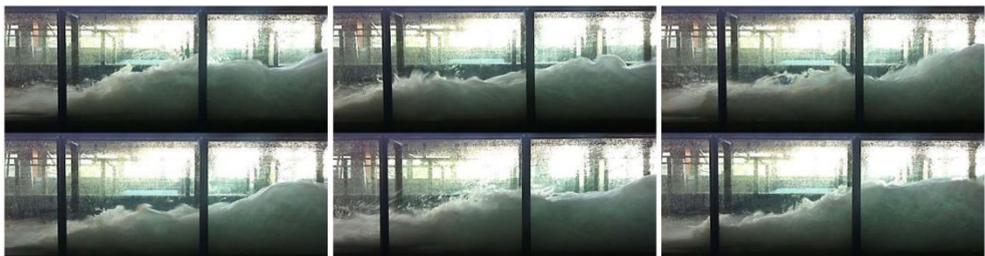


Figura 3. Resalto hidráulico fuerte ($Fr_1 = 11.15$), caudal líquido $Q = 100$ l/s, concentración de aire $C = 0.12$. Secuencia de perfiles en diferentes instantes.

2.3. Variables analizadas

Para cada caso de estudio, se obtienen experimentalmente los calados y distribución de velocidades del régimen rápido de aguas arriba y lento de aguas abajo. Los calados medios se obtienen, una vez alcanzada la estacionariedad estadística del resalto analizado, mediante sendas medidas realizadas con limnímetros de aguja. El análisis de la relación de calados conjugados ($Y=y_2/y_1$) en resaltos hidráulicos clásicos y el efecto que ejercen sobre ésta los números de Froude y Reynolds de aproximación, constituyen un foco de interés en la literatura específica (Hager, 1992). Sin embargo, dichas variables en condiciones de emulsionamiento del flujo de entrada no ha sido prácticamente analizadas.

De la medida de los perfiles de velocidad medias aguas arriba del resalto pueden obtenerse también algunas variables de interés, como el espesor de la capa límite y cómo éste afecta a las propiedades del resalto hidráulico en combinación con la aireación del flujo. Por otro lado, el análisis de los perfiles de velocidad aguas abajo del resalto puede ser empleado, entre otros, para determinar la sección en la que éste acaba, pues uno de los criterios para determinar el fin del resalto hidráulico es la restitución del flujo desarrollado con perfil hidrostático. Esta variable tiene gran interés, pues supone acotar el revestimiento del cauce aguas abajo de una presa al mínimo necesario para evitar problemas de socavación, lo que puede suponer una reducción nada desdeñable del coste total de la obra.

2.4. Diseño de experimentos

A fin de analizar del modo más sistemático posible la sinergia entre las tres variables hidráulicas descritas en la Sección 2.2, se lleva a cabo una extensa campaña experimental. Dicha campaña, cuyos detalles se muestran en la Tabla 1, es concebida de forma que se respeten los rangos de aceptabilidad de cada variable, estudiados por otros autores y discutidos en las secciones anteriores.

Tabla 1. Rango de variables cubierto en la campaña experimental (número de Froude, número de Reynolds y concentración de aire) y de condiciones de contorno impuestas.

Caudal l/s	Calado y_1 cm	Calado y_2 cm	Velocidad u_1 m/s	Número de Froude	Número de Reynolds	Número de Weber	Concentración de aire %
55	[3.8 - 5.5]	[40.4 - 47.7]	[4.8 - 6.5]	[7.9 - 13]	$1.8 \cdot 10^5$	[110.1 - 128.2]	[0 - 62]
75	[3.4 - 6.5]	[41.2 - 59.1]	[3.9 - 7.4]	[4.5 - 13]	$2.5 \cdot 10^5$	[115.1 - 158.7]	[0 - 55]
100	[4.1 - 8.2]	[48.5 - 71.8]	[4.0 - 8.1]	[4.5 - 13]	$3.3 \cdot 10^5$	[136.3 - 192.7]	[0 - 47]
120	[4.6 - 9.3]	[54.6 - 81.3]	[4.3 - 8.7]	[4.5 - 13]	$4.0 \cdot 10^5$	[153.5 - 218.3]	[0 - 43]
140	[5.1 - 10.0]	[61.6 - 90.1]	[4.7 - 9.2]	[4.5 - 13]	$4.6 \cdot 10^5$	[172.7 - 241.9]	[0 - 39]

3. Resultados preliminares

Los primeros resultados experimentales (Valero et al., 2014), confirmaban el comportamiento esperado obteniéndose una disminución en la relación de calados conjugados, creciente con la concentración de aire (reducciones de hasta el 15% para concentraciones de 0.5, si bien los puntos de mayor concentración presentaban una mayor dispersión) así como una aparente reducción en la longitud del resalto.

Estos resultados (Figura 4) indican que a mayor número de Froude del flujo de entrada mayor es la diferencia entre el calado conjugado mayor teórico (Belanger, 1841; Hager y Bremen, 1989) y el experimental, siendo éste siempre inferior con números de Froude superiores a 9, y tanto más inferior cuanto mayor sea la concentración.

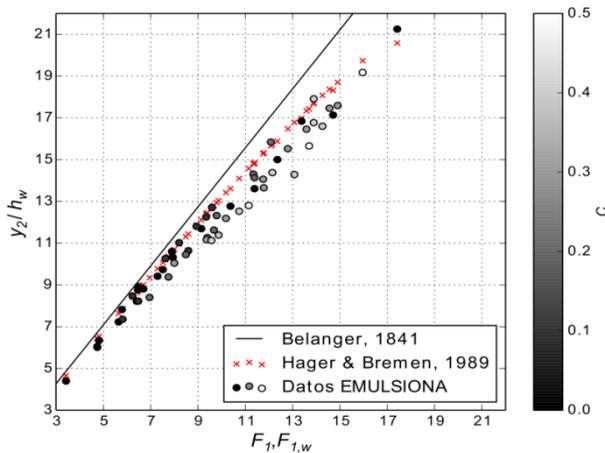


Figura 4.- Relación de calados conjugados obtenida en laboratorio. El tono de gris de los puntos representa la concentración de aire. Se representa además en línea sólida la solución de Bélanger, 1841; y con cruces la formulación para fricción de Hager & Bremen, 1989. (Fte.: (Valero et al., 2014))

Se ha comparado la variación relativa de la longitud del resalto con la concentración para diferentes valores del número de Froude. Los resultados muestran que, a igualdad del número de Froude, se aprecia una reducción de la longitud del resalto con la aireación.

Además, en los nuevos ensayos se observan cambios importantes en la estructura turbulenta de este tipo de resaltos para concentraciones de aire elevadas del régimen supercrítico de aproximación. Este hecho requiere de una investigación tanto teórica como experimental más profunda que se abordará en desarrollos futuros.

4. Conclusiones

Los problemas en los aliviaderos de las presas deben ser predichos y atajados a través de la modelación, puesto que los ensayos y mediciones en instalaciones reales son inviables. En este sentido la realización de prototipos experimentales en los que puedan analizarse los

fenómenos con cierta repetitividad y gran cantidad de instrumentación se hace imprescindible para la toma de decisiones hoy en día. De entre estos modelos, si bien los códigos numéricos son una solución que proporciona a los ingenieros mucha información sobre los procesos acaecidos en la fluidodinámica de los casos reales, se hace necesario realizar experimentaciones fiables que, no sólo validen los modelos, sino que permitan observar fenómenos que solo ocurren en la realidad.

En este marco se encuentra la comunicación que se ha presentado. El diseño de un canal de grandes dimensiones, la dotación de instrumentación y la realización de campañas de ensayos permitirá la completa caracterización de los resaltos hidráulicos generados a partir de flujos supercríticos emulsionados. En esta ponencia se ha analizado el diseño de la campaña, la generación de los resaltos en el dispositivo diseñado y la metodología a seguir para la toma de datos experimentales. Este será un camino abierto para que las campañas que deben ser realizadas en el laboratorio caractericen de la forma más completa posible el fenómeno de los resaltos hidráulicos emulsionados.

Para ello, amén de la instrumentación para medir calados y perfiles de velocidad, se está trabajando en la obtención experimental de la distribución de presiones dinámicas a lo largo del eje; la concentración de aire, distribución de tamaños de burbujas y velocidad del flujo emulsionado y los perfiles completos de lámina libre a lo largo de todo el resalto, incidiendo además en la caracterización de los fenómenos quasi-estacionarios que se desarrollan en el interior del resalto hidráulico. Para ello, se emplean, aparte de los limnímetros de aguja y el velocímetro Doppler anteriormente descritos, tubos de Pitot, sensores de presión rápidamente variable, sensores de fibra óptica y técnicas de tratamiento digital de imágenes.

Por sí solos, los primeros resultados obtenidos, en relación a la tipología de vertido propia de las presas de gravedad, indican que los resaltos hidráulicos formados a partir de flujos supercríticos emulsionados tienen una relación de calados conjugados menor que la correspondiente a un resalto clásico, lo que llevaría a cuencos menos profundos (menor excavación) respecto de la cota de la solera del lecho del cauce o a una mejor adaptación de cuencos preexistentes. La longitud de dichos cuencos es también menor, lo que llevaría a obras de disipación de energía y reintegro al río más cortas si se trata de diseños nuevos o a que obras antiguas sean capaces de albergar resaltos generados a partir de mayores caudales o condiciones hidráulicas más exigentes. La campaña experimental diseñada en el dispositivo experimental presentado, pretende confirmar estos resultados y completar la caracterización de los resaltos hidráulicos a partir de flujos supercríticos emulsionados para diferentes ratios de aspecto, con y sin efecto de las paredes laterales del canal.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible en el marco del Proyecto EMULSIONA (Plan Nacional I+D. MINECO, Convocatoria 2011).

Referencias

- Bayon-Barrachina, A.; López-Jiménez, P.A.; Valles Moran, F.J.; Andres Domenech, I. (2013). Análisis numérico mediante OpenFOAM de un dispositivo experimental para la caracterización de resaltos hidráulicos en flujos emulsionados. III JIA. Valencia.
- Bayón-Barrachina, A. y López-Jiménez, P.A. 2015. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM, *Journal of Hydroinformatics*, 17 (4), 662-678.
- Chanson, H. (2009) Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environ. Fluid. Mech.*, 9, 125-142.
- Chanson, H. 2013 Hydraulics of aerated flows: qui pro quo? *J. of Hydr. Res.*, 51, 223-243.
- Fernández Bono, J.F., Vallés Morán, F.J., 2006. "Criterios Metodológicos de Adaptación del Diseño de Cuencos de Disipación de Energía a Pie de Presa con Resalto Hidráulico, a Caudales Superiores a los de Diseño". IAHR, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Ciudad Guayana, Venezuela.
- Hager, W. H. 1992 *Energy dissipators and hydraulic jump*. Springer.
- Heller, V. (2011) Scale effects in physical hydraulic engineering models, *J. Hydraul. Res.*, Taylor & Francis, 49, 293-306.
- Murzyn, F. y Chanson, H. (2009a), Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps. *Environmental Fluid Mechanics*, 2, 143–159.
- Peterka, A. J. (1984) *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, U.S.B.R.
- Rajaratnam, N. (1962) An experimental study of air entrainment characteristics of the hydraulic jump, *J. Inst. Eng. India*, 42, 247-273.
- Romagnoli, M., Portapila, M. y Morvan, H. (2009), Simulación computacional del resalto hidráulico. *Mecánica Computacional*, XXVIII, 1661-1672.
- Rutschmann, P. (1988). *Chute aerators*, VAW Mitteilung 97. D. Vischer Ed. ETH. Zurich, Suiza.
- Valero Huerta, D.; Fullana Montoro, V.; Garcia bartual, R.; Valles Moran, F.J.; Andres-Domenech, I. (2013). Diseño hidrodinámico mediante técnicas CFD de un dispositivo de laboratorio para el emulsionamiento del flujo. III JIA. Valencia.
- Vallés-Morán, F.J., Valero Huerta, D., Marco Segura, J.B. (2015). La aireación forzada del flujo en la rápida como herramienta para la adaptación de los cuencos amortiguadores a mayores caudales de diseño. X Jornadas Españolas de Presas, SPANCOLD.