

Caracterización experimental de resaltos hidráulicos estacionarios con alto número de Reynolds

Juan Francisco Macián-Pérez^a, Arnau Bayón^a, Francisco J. Vallés-Morán^a, Rafael García-Bartual^a, P. Amparo López-Jiménez^b

^aInstituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València. Email: juamapre@cam.upv.es

^bDepartamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Universitat Politècnica de València.

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el análisis experimental del resalto hidráulico, un fenómeno crucial en ingeniería civil y que resulta particularmente importante por lo que respecta a la disipación de energía en presas. El objetivo principal del trabajo no es otro que obtener un conocimiento lo más completo posible sobre la estructura, comportamiento y características del resalto hidráulico. Para ello se ha diseñado una campaña experimental que se extiende tanto al régimen rápido y lento como al cuerpo del resalto. La instrumentación empleada ha permitido obtener información sobre variables determinantes como el campo de velocidades, las presiones dinámicas o el perfil de la lámina libre a lo largo del eje del resalto. En conclusión, los resultados obtenidos en la campaña experimental arrojan luz sobre el conocimiento de un tipo de resalto hidráulico que por sus números de Froude y Reynolds presenta una gran utilidad en aplicaciones de ingeniería hidráulica.

Palabras clave | resalto hidráulico; número de Froude; número de Reynolds; campaña experimental.

INTRODUCCIÓN

El resalto hidráulico constituye un fenómeno de elevada complejidad y con una extensa aplicación en ingeniería hidráulica en general y en disipación de energía en grandes presas en particular. La complejidad del resalto hidráulico viene dada por las grandes fluctuaciones turbulentas, la intensa entrada de aire y la significativa disipación de energía que tienen lugar en el mismo.

La impredecible naturaleza del resalto hidráulico hace que, a pesar de que los avances en modelación numérica han paliado parte de las limitaciones de los modelos matemáticos de resalto hidráulico, la modelación física de este fenómeno constituya una parte imprescindible de su estudio (Blocken y Gualtieri, 2012). En este sentido se propone la caracterización experimental de un resalto hidráulico a fin de estudiar su estructura y características, así como la interacción entre todos los procesos que tienen lugar en el desarrollo del mismo. El objetivo final del trabajo es contribuir al estudio de un fenómeno tan importante en ingeniería de presas como lo es el resalto hidráulico y del que todavía nos encontramos lejos de su total comprensión.

El primer paso consiste en seleccionar el resalto hidráulico a caracterizar y que por tanto es objeto del presente estudio. Para ello, cabe destacar que los resaltos hidráulicos se clasifican en general haciendo uso del número de Froude de aproximación (Fr_1). Por lo que respecta a este número adimensional que relaciona fuerzas inerciales y gravitatorias en el flujo, los resaltos hidráulicos pueden ser ondulares, débiles, oscilantes, estacionarios o fuertes. De acuerdo con el USBR (Peterka, 1978), los resaltos hidráulicos que ofrecen un mejor comportamiento para la disipación de energía en cuencos amortiguadores de presas son los estacionarios ($4,5 < Fr_1 < 9$) por lo que se ha estudiado un resalto hidráulico con $Fr_1 \sim 6$. Otro número adimensional que juega un papel crucial en la modelación de flujos a escala laboratorio es el número de Reynolds (Chanson y Gualtieri, 2008; Chanson, 2009), que establece una relación entre fuerzas inerciales y viscosas. La importancia de este número

radica en que se necesita Reynolds de aproximación altos ($Re_1 > 100000$) para mitigar la aparición de efectos de escala en el modelo físico (Heller, 2011) y por tanto, poder extrapolar los resultados obtenidos en laboratorio a escala prototipo. Así pues, el resalto hidráulico objeto de este estudio presenta un $Re_1 \sim 210000$. Recapitulando, se ha escogido para su caracterización experimental un resalto hidráulico que por sus características permite la extracción de conclusiones útiles para su extrapolación a los resaltos hidráulicos que se emplean comúnmente para la disipación de energía en cuencos amortiguadores de presas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Una vez queda definido el resalto hidráulico objeto del presente estudio, este se ensaya en el canal disponible en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València. Se trata de un canal de ensayos (Figura 1) de 10 m de longitud y sección rectangular 0,3 x 1 m con solera de PVC y cajeros de vidrio. La alimentación al canal se realiza en presión de manera que a la entrada del mismo hay una boquilla donde se efectúa la transición de flujo en presión a flujo en lámina libre. El canal está preparado para alcanzar los números de Froude y Reynolds referidos previamente y además consta de sendas compuertas aguas arriba y aguas abajo que pueden ser maniobradas para controlar los calados supercrítico y subcrítico en la simulación del resalto.



Figura 1 | Canal de ensayos del Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València.

La campaña de ensayos diseñada para la caracterización del resalto hidráulico busca ser lo más completa posible, extendiéndose tanto al flujo supercrítico y subcrítico, como al propio cuerpo del resalto. Así pues, tal y como se muestra en la Figura 2 adaptada de Bayón *et al.* (2016), se estudia, mediante el uso de limnímetros, el perfil de la lámina libre aguas arriba y aguas abajo del cuerpo del resalto (secciones 1 y 2) así como el perfil de velocidades con tubos de Pitot (sección 1) y con velocímetro acústico Doppler (ADV) (sección 2). Además, se estudian las fluctuaciones de velocidad mediante correlación y tratamiento estadístico de las mediciones tomadas en varios puntos representativos del cuerpo del resalto y se determina la longitud del remolino principal, también haciendo uso del ADV para obtener la velocidad en distintos puntos del cuerpo del resalto y ajustar una función que permita establecer el punto donde finaliza el mencionado remolino. Por último, a lo largo de todo el eje longitudinal del resalto se miden por un lado las presiones dinámicas en la solera, haciendo uso de transmisores digitales de presión dispuestos a lo largo de todo el canal de ensayo; y por otro, se determina el perfil de la lámina libre y sus frecuencias características mediante técnicas de tratamiento digital de la imagen.

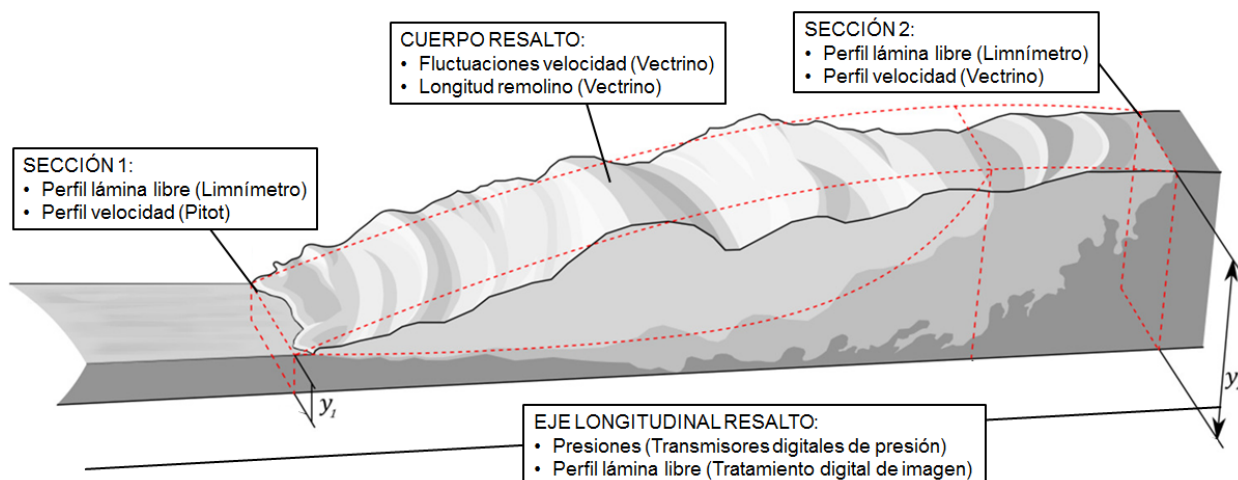


Figura 2 | Caracterización experimental del resalto hidráulico.

A continuación, se pasa a dar una descripción detallada de la instrumentación empleada (Figura 3) y la metodología a seguir para la toma de datos correspondientes a la caracterización del resalto hidráulico.

Por lo que respecta a la medición del perfil de la lámina libre haciendo uso de limnómetros de aguja, el procedimiento seguido ha sido similar tanto aguas arriba como aguas abajo del cuerpo del resalto. Para la definición del perfil longitudinal de la lámina libre se ha seleccionado un tramo de un metro de longitud en el cuál se han tomado medidas del calado cada 5 cm a lo largo del eje del canal. Asimismo, para cada uno de estos tramos de un metro de longitud (el de aguas arriba y el de aguas abajo del cuerpo del resalto) se ha medido el perfil transversal de la lámina libre haciendo uso de tres secciones transversales de canal equidistantes. Para la caracterización de cada una de estas secciones transversales se han tomado cuatro medidas de calado de forma simétrica hacia ambos lados del eje del canal, además de medir el calado en las paredes del mismo.

En cuanto al velocímetro acústico Doppler (ADV), éste ha sido empleado para la medición del perfil de velocidades en el régimen lento, es decir, aguas abajo del cuerpo del resalto. El ADV permite obtener en un punto concreto de la sección transversal las tres componentes espaciales del vector velocidad, con un alto grado de resolución temporal. El principio de funcionamiento del equipo es el denominado efecto Doppler. Se basa en el cambio de frecuencia que se produce entre la señal acústica emitida por una fuente y la recibida por un receptor, cuando existe un movimiento relativo entre ambos. En el caso del ADV, cuyos receptores permanecen inmóviles durante el ensayo, la velocidad relativa es precisamente la velocidad de las partículas que se hallan en el seno del fluido, viajando su misma velocidad. Este equipo dispone de diferentes rangos de frecuencia para conseguir la máxima precisión a lo largo del amplio rango de velocidades para el que está diseñado: desde 3 cm/s hasta 4 m/s. Para la medición del perfil de velocidades en el régimen lento se han tomado 9 puntos a distinta altura en una misma vertical separados aproximadamente 4 cm. En cada uno de estos puntos se han registrado valores de velocidad durante 1 minuto a una frecuencia de 200 Hz para posteriormente aplicar el correspondiente tratamiento estadístico a la información así obtenida.

Por otro lado, y a pesar de que el ADV está especialmente indicado para medir perfiles de velocidades en flujos lentos, donde exista un calado suficiente y no aparezcan elementos que alteren la señal, como burbujas de aire, existen una serie de métodos de filtrado de datos que permiten eliminar las interferencias ocasionadas por estos elementos logrando así mediciones satisfactorias por parte del ADV (Sánchez, 2012). En base a estos procedimientos de filtrado, se ha planteado la utilización del ADV en el cuerpo del resalto hidráulico. Con él se pretende, por un lado captar las fluctuaciones de velocidad que tienen lugar en esta zona del resalto. Para ello, se toma una matriz de puntos y para cada uno de ellos se mide con el ADV. Los datos así resultantes se correlacionan y se les da el tratamiento estadístico oportuno a fin de capturar las fluctuaciones de velocidad. Por otro lado, se obtiene la longitud del remolino principal. En este caso, la metodología consiste en medir el perfil de velocidades en varias secciones del cuerpo del resalto. Para cada uno de estos perfiles se detecta el punto de velocidad nula (punto de

estancamiento), de manera que la unión de todos estos puntos da lugar a una línea cuya intersección con la superficie libre marca precisamente el final del remolino principal (Hager *et al.*, 1990).

Por lo que respecta a las mediciones realizadas a lo largo de todo el eje del resalto hidráulico. Se han empleado transmisores digitales de presión instalados en la solera del canal para medir las presiones dinámicas. La distribución de los mismos es tal que se han tomado datos de presión tanto en el régimen rápido y el lento como en el cuerpo del resalto. En estos sensores, la señal digital es medida hasta 500 veces por segundo a través de un convertidor A/D de alta precisión (16 bit). Tras cada medida, el valor exacto de presión es calculado mediante eliminación de la linealidad y corrección de los errores por temperatura. Así pues, la señal analógica saliente es actualizada por el convertidor D/A y queda preparada para su posterior tratamiento con el software adecuado (CCS30). Esta tecnología permite tomar medidas de presión rápidas y con una elevada precisión, incluso cuando los rangos de temperatura son muy amplios. En el caso particular del presente estudio se ha medido con cada sensor durante un periodo de diez segundos, en tres días distintos, y a los datos obtenidos se les ha aplicado el tratamiento estadístico adecuado de promediado y eliminación de valores anómalos para así conseguir los valores de presión deseados.

Además se han utilizado técnicas de tratamiento digital de imagen para determinar el perfil de la lámina libre. En la metodología seguida para el caso de este estudio, se ha utilizado una cámara Nikon D5200 para registrar vídeos desde un lateral del canal a 25 imágenes por segundo y una resolución de 1920 x 1080 píxeles durante un minuto. Dichos vídeos son descompuestos en fotogramas para su tratamiento individual. La técnica consiste en la aplicación de métodos de detección de contornos (edge detection). Para ello, antes se aplica una corrección de los efectos de la perspectiva y la fusión de todos los canales de color en uno solo, para generar una imagen en escala de grises. De la gran cantidad de métodos de detección de bordes existentes, el empleado en el presente proyecto consiste en el establecimiento de un umbral de intensidad de luz.

Dicho método se basa en admitir que, en condiciones de laboratorio y con la debida iluminación, existe un umbral bien definido de intensidad de luz que diferencia claramente qué píxeles de la imagen son ocupados por aire y qué píxeles son ocupados por agua (o agua y aire en emulsión). Entendiéndose que los primeros son siempre más oscuros y los segundos, más claros, el proceso descrito precisa de una calibración para las condiciones específicas de cada laboratorio.

Una vez definidas las regiones ocupadas por aire y por agua, se aplica un algoritmo expresamente desarrollado que lee columna por columna de píxeles hasta encontrar el primer píxel de agua empezando desde el extremo superior. Con ello, pueden inferirse, no sólo los calados supercrítico y subcrítico, sino también un detallado perfil de la lámina libre del conjunto del resalto hidráulico y su variación con el tiempo. Adicionalmente, leyendo fila por fila de píxeles en la dirección del flujo, puede localizarse la posición del pie del resalto y sus fluctuaciones temporales. En este proceso, un fondo oscuro y de textura lo más homogénea posible es crucial para obtener unos resultados fiables, así como la aplicación de algoritmos de filtrado de gotas adheridas a los cajeros, burbujas y otros fenómenos que puedan sesgar la interpretación automática de fotogramas.

Además de poder obtener una medida del perfil de la lámina libre, las técnicas de tratamiento digital de la imagen permiten hacer uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analizar el comportamiento del perfil en el dominio frecuencia, observándose si aparecen frecuencias dominantes y en qué medida éstas dependen de las características del resalto hidráulico. Así, se analizan las fluctuaciones del calado subcrítico en el dominio frecuencia. Dado que la frecuencia de Nyquist esperable queda muy por debajo de los 25Hz que es capaz de registrar la cámara, queda garantizada la no ocurrencia de aliasing y otros efectos indeseables. La extensión temporal de los registros, supone una precisión en los resultados de la FFT de 0.02Hz.

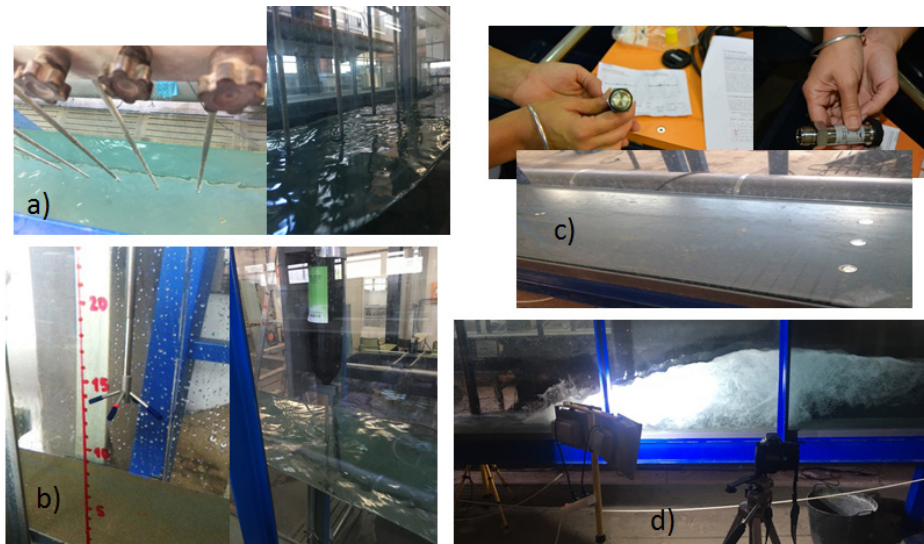


Figura 3 | Instrumentación de medida empleada en la caracterización del resalto hidráulico: a) Limnómetro de aguja, b) Velocímetro acústico Doppler (ADV), c) Transmisores digitales de presión y d) Tratamiento digital de imagen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos a través de las mediciones realizadas en la campaña de ensayos llevada a cabo sobre el resalto hidráulico estacionario con alto número de Reynolds.

Perfil de la lámina libre

La campaña de ensayos realizada ha permitido obtener información acerca de la lámina libre por medio del uso de diferentes tipos de instrumentación. Se considera que el contraste de toda esta información resulta de gran valor de modo que se procede a la presentación y comparación de los resultados obtenidos mediante distintas técnicas.

En la Figura 4 se muestra, por un lado, el perfil obtenido en el régimen rápido y en el lento haciendo uso de limnómetros. Además, con la presión que proporcionan los transmisores digitales situados en distintos puntos del canal, se obtiene y representa la cota de la lámina libre, suponiendo presión hidrostática. Se refleja también el perfil de la lámina libre conseguido mediante técnicas de tratamiento digital de la imagen. Por último se incluye en la figura el perfil de la lámina libre obtenido por Bakhmeteff & Matzke (1936) y Chanson (2015) con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos en el presente estudio.

Cabe destacar que a fin de comparar en una misma figura los resultados obtenidos por medio de distintos instrumentos así como los resultados de estudios precedentes, se han adimensionalizado las variables de estudio, de manera que (Hager, 1992):

$$X = \frac{x - x_0}{L_r} ; \quad Z = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (1) ; (2)$$

Donde x_0 es la posición del pie del resalto hidráulico, L_r la longitud del remolino principal calculada con la formulación de Hager (1992), z_1 el calado supercrítico con el que se diseñó el ensayo y z_2 el calado subcrítico calculado mediante la ecuación de Belanger.

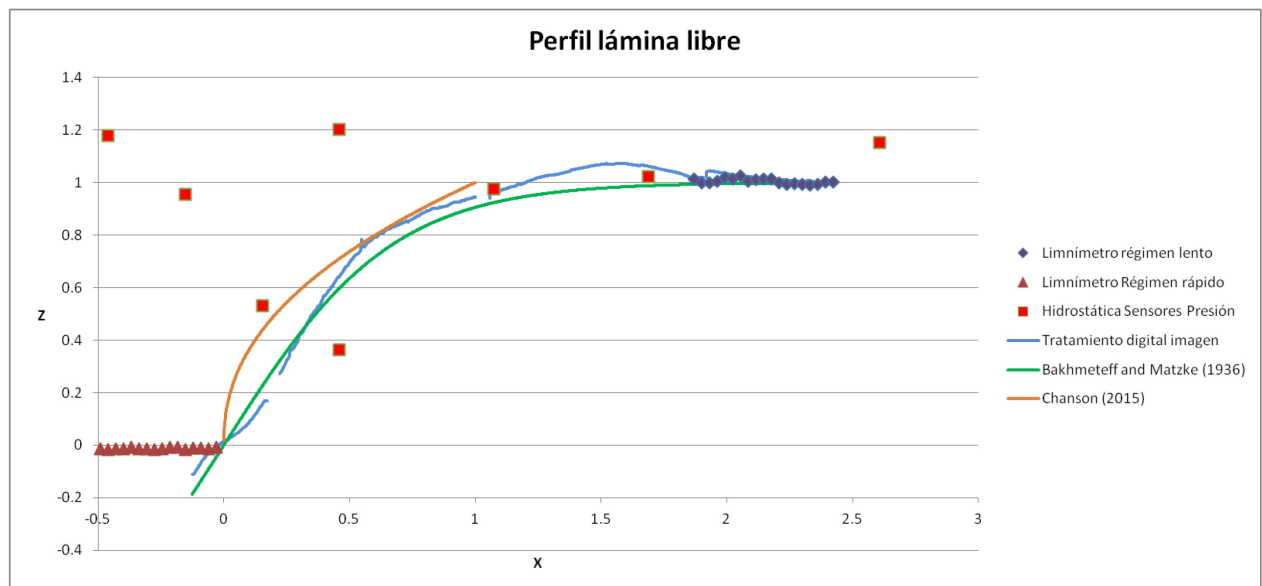


Figura 4 | Perfil de la lámina libre del resalto hidráulico. Comparación entre bibliografía y diferentes instrumentos de medida.

En la figura 4 observamos que las medidas tomadas con limnómetro presentan una precisión satisfactoria ya que, tras adimensionalizar, el calado medido en régimen rápido toma valores cercanos a cero con lo que coincide con el calado teórico con el que se lanzaron los ensayos para obtener los números de Froude y Reynolds deseados, mientras que los valores obtenidos para el régimen lento están en torno a 1, lo cual indica su coincidencia con el calado subcrítico calculado mediante la ecuación de Belanger.

Por lo que respecta a los valores de cota de la lámina libre calculados suponiendo presión hidrostática a partir de los datos obtenidos con los transmisores digitales de presión, tenemos que mientras que en el régimen lento la suposición de presión hidrostática proporciona valores cercanos a los medidos con limnómetro, y por lo tanto a los calculados con la ecuación de Belanger, en el régimen rápido los valores son muy diferentes a los obtenidos empleando el resto de técnicas. Ésta diferencia puede explicarse por la mayor velocidad del flujo supercrítico (~ 4.2 m/s frente a los ~ 0.5 m/s del flujo subcrítico) que da lugar a una mayor presión dinámica, haciendo que la aproximación de que la presión es únicamente hidrostática quede alejada de la realidad. Asimismo, para los valores obtenidos en el cuerpo del resalto, las grandes fluctuaciones de presión que tienen lugar en el mismo junto con las aproximaciones realizadas, hacen que los valores de la cota de la lámina libre obtenidos mediante las presiones registradas por los transmisores digitales no proporcionen, al menos en este caso, resultados satisfactorios, si bien es cierto que conforme nos acercamos al régimen lento los valores son más cercanos a los medidos por limnómetro y tratamiento digital y los obtenidos por otros autores.

En cuanto a los resultados de perfil de lámina libre promedio obtenidos mediante procesamiento digital de imagen, estos han sido comparados con la expresión de origen empírico propuesta por Bakhmeteff and Matzke (1936), obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 de 0.99 tras eliminar del perfil obtenido en el presente estudio con técnicas de tratamiento digital las interferencias de los montantes metálicos (de ahí las discontinuidades de la gráfica). Se observa una ligera infraestimación del perfil en la región $X < 0.4$, seguida de una sobreestimación aguas abajo de esta sección, suceso observable también en los perfiles obtenidos por Bayón et al. (2016) en un caso de estudio diferente empleando la misma técnica. La sobreestimación de calados hacia el final del resalto en comparación con la expresión propuesta por Bakhmeteff and Matzke (1936) fue observada en su día también por Hager (1992) y su causa es analizada en mayor profundidad por Bayón et al. (2016).

Finalmente, el tratamiento digital de imagen ha permitido el análisis de frecuencias de fluctuación de los calados subcríticos, el cual muestra una frecuencia dominante de 1.5Hz, como puede observarse en la Figura 5, valor coincidente con el observado por Bayón et al. (2016), lo que supone un número de Strouhal de 0.0179. Correlacionando dicho valor con el número de Reynolds (210,000), el caso analizado se sitúa sobre la misma tendencia de los resultados de Bayón et al. (2016), Chanson y Gualtieri (2008), Long et al. (1991) y Mossa y Tolve, (1998), como se muestra en la Figura 6.

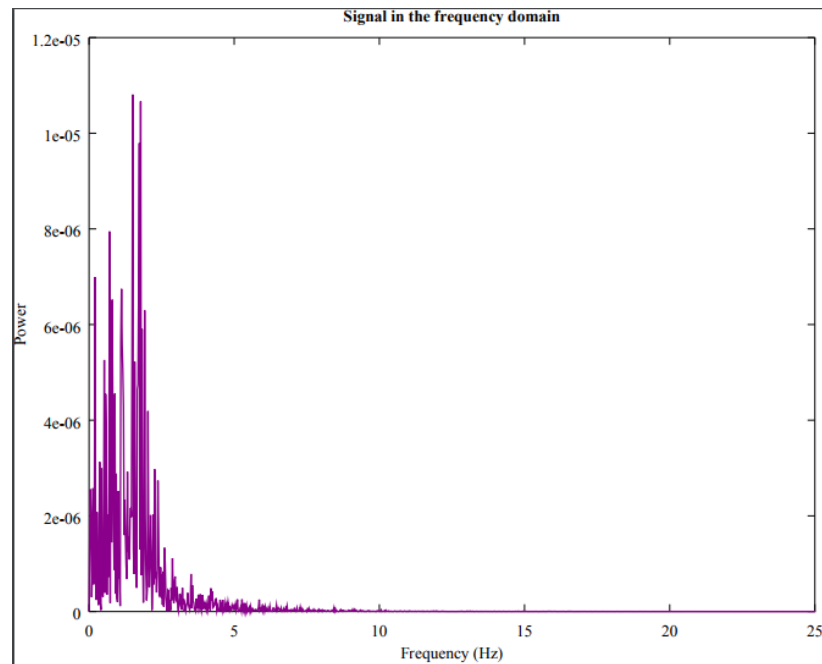


Figura 5 | Análisis de frecuencias de fluctuación de los calados subcríticos.

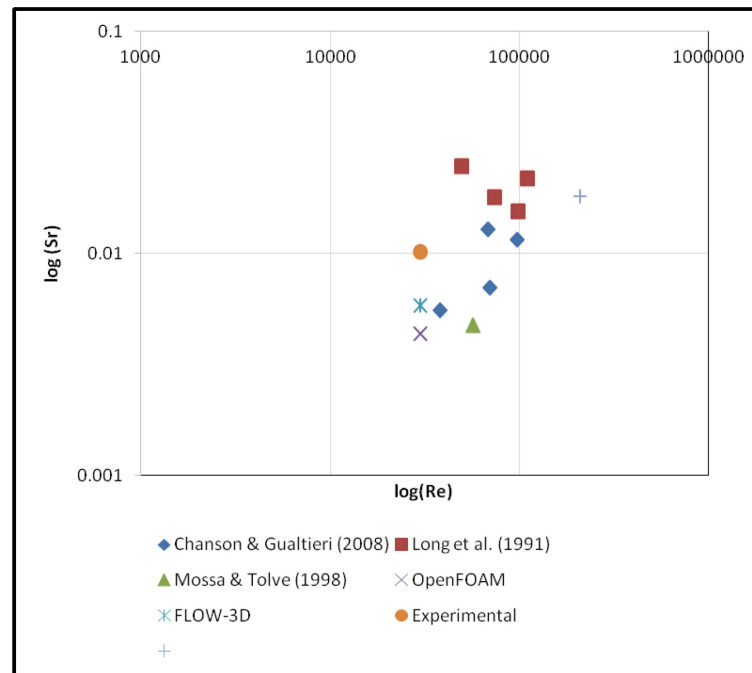


Figura 6 | Comparación del número de Strouhal resultante en el presente trabajo con bibliografía previa.

Perfil de velocidad

Las mediciones de velocidad en el régimen lento se han llevado a cabo empleando el ADV. Los resultados se presentan en la Figura 7 mostrándose el valor promedio para cada uno de los puntos de la vertical en los que se ha medido la velocidad. Los valores medidos se comparan con el perfil de velocidad teórico obtenido con la siguiente expresión (Kirkgöz & Ardiçlioğlu, 1997):

$$\frac{u}{u^*} = A \ln \frac{z \cdot u^*}{\nu} + B \quad (3)$$

Donde $A=2.5$ y $B=5.5$ para canales abiertos de acuerdo con Kirkgöz & Ardiçlioğlu (1997), ν es la viscosidad cinemática del agua y u^* la velocidad cortante, que tiene por expresión:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad del agua y τ_0 la tensión cortante de pared que se calcula como:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot I \quad (5)$$

Siendo γ el peso específico del agua, R_h el radio hidráulico e I la pendiente motriz que se ha obtenido haciendo uso de la fórmula de Manning.

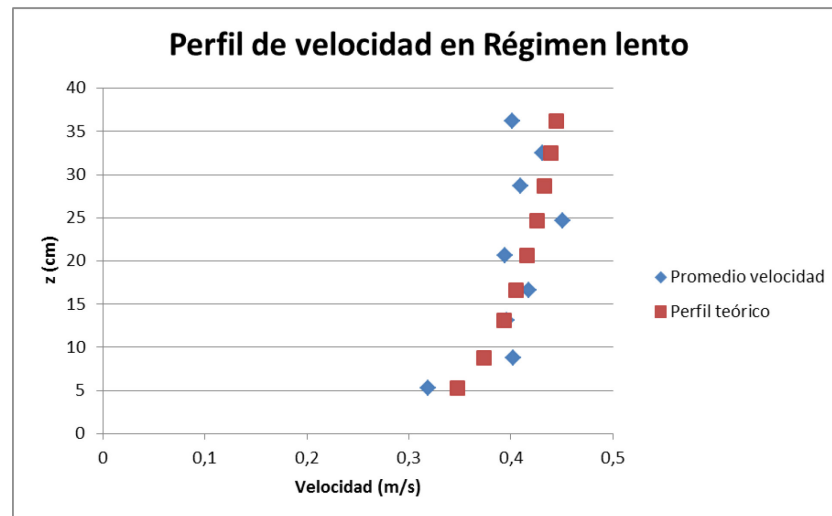


Figura 7 | Perfil de velocidad en el régimen lento medido con ADV.

Puede observarse que los resultados obtenidos de la medición con el ADV muestran una elevada coincidencia con los valores calculados mediante la expresión teórica propuesta, si bien es cierto que presentan cierta dispersión en torno a la tendencia mostrada por la expresión matemática.

En cuanto a la velocidad en las direcciones perpendiculares al eje del canal, éstas también son registradas por el ADV y, como era de esperar, se encuentran uno o varios órdenes de magnitud por debajo de la velocidad registrada en el sentido de avance del flujo.

Finalmente, por lo que respecta al perfil de velocidad en el régimen rápido, no ha podido emplearse el ADV ya que no está especificado para flujos que alcanzan velocidades de ese orden de magnitud, dando lugar a resultados poco precisos. Es intención de los investigadores caracterizar la velocidad en el régimen rápido haciendo uso de tubos de Pitot y poder así completar y ampliar las tareas que aquí se presentan.

Presión en la solera

Con el objetivo de analizar los resultados proporcionados por los transmisores digitales de presión, estos pueden dividirse en tres en función de si están colocados en el régimen rápido, el lento o en el cuerpo del resalto hidráulico (su disposición exacta en el canal de ensayos puede observarse en la Figura 8).

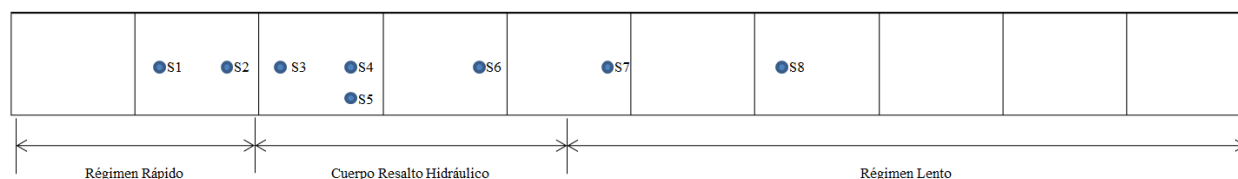


Figura 8 | Vista en planta del canal de ensayos donde se observa la disposición de los transmisores digitales de presión.

Así, tal y como se muestra en la Tabla 1 se han analizado los valores registrados por un total de ocho dispositivos, dos en el régimen rápido, dos en el lento y los cuatro restantes en el cuerpo del resalto.

Tabla 1 | Valores de presión promedio obtenidos por cada uno de los transmisores digitales dispuestos en el canal de ensayo.

	Régimen lento		Régimen rápido		Cuerpo del Resalto Hidráulico			
Sensor	S7	S8	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Presión (Pa)	4004.5	4443.0	4538.4	3768.9	2308.5	4612.3	2020.2	3839.9

Los resultados presentados en la tabla muestran que los sensores situados fuera del cuerpo del resalto proporcionan valores en torno a los 4000-4500 Pa, con la excepción del sensor S2 que por su situación puede verse afectado por las oscilaciones del pie del resalto hidráulico. Por su parte los resultados arrojados por los sensores colocados en el cuerpo del resalto presentan una gran variabilidad, abarcando valores desde los 2000 hasta los 4600 Pa, lo cual es muestra de las grandes oscilaciones de presión que tienen lugar en el mismo. Cabe destacar, en la línea de las grandes diferencias de presión que tienen lugar en el cuerpo del resalto, que los sensores S4 y S5 situados en la misma sección registran valores con diferencias de presión de en torno a los 2500 Pa.

Con la finalidad de aportar más información acerca de la variabilidad de los datos recogidos por los transmisores de presión, se muestra en la Tabla 2 la desviación típica de las mediciones realizadas por cada uno de ellos.

Tabla 2 | Desviación típica de las mediciones realizadas por los transmisores digitales de presión.

	Régimen lento		Régimen rápido		Cuerpo del Resalto Hidráulico			
Sensor	S7	S8	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Presión (Pa)	454.2	81.9	92.4	311.0	136.5	96.5	259.7	470.8

Puede observarse que los sensores cuyas mediciones presentan una menor variabilidad son S1 y S8, que son precisamente los que más alejados se encuentran del cuerpo del resalto hidráulico. Por otro lado, destaca la gran dispersión de los registros realizados por los sensores S2, S6 y S7. Su localización dentro del canal de ensayos hace que se encuentren en puntos donde pueden verse afectados por la oscilación de posición del cuerpo del resalto, dando lugar a las variaciones de presión que registran estos sensores.

Para finalizar este apartado de resultados y discusión cabe destacar que con respecto al diseño de la campaña experimental presentado para lograr una caracterización lo más completa posible del resalto hidráulico, se ha logrado medir la mayoría de variables planteadas en las distintas zonas del resalto hidráulico. No obstante, además de la ya mencionada medición de la velocidad en el flujo supercrítico empleando tubos de Pitot, queda como futuro trabajo la determinación de la longitud del remolino principal y las mediciones de variación de velocidad en el cuerpo del resalto hidráulico. Para llevar a cabo estas tareas se plantea la utilización del ADV, sin embargo y dado que este instrumento no está indicado para su utilización en zonas como

el cuerpo del resalto, donde pueden aparecer elementos como burbujas que alteren la señal, se está trabajando con una serie de métodos de filtrado de señal (Sánchez, 2012) que se encuentran en fase de implementación en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València y con los que se buscará realizar las mediciones de forma efectiva.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten una caracterización detallada de los resaltos hidráulicos de alto número de Reynolds y número de Froude similar al de los resaltos que se emplean en los cuencos amortiguadores para la disipación de energía en presas. Asimismo, se sientan las bases de futuras líneas de investigación en busca de usar nuevas técnicas de instrumentación para ampliar el conocimiento que se tiene sobre el resalto hidráulico estacionario de alto número de Reynolds. Dado que en las soluciones de aumento de la capacidad en aliviaderos, la parte más compleja es la obra de disipación de energía, conocer mejor este tipo de resaltos es fundamental para la adaptación de las presas a los nuevos escenarios normativos y de exigencias de la sociedad en los que se contempla mayores caudales de diseño para estas obras.

Así pues, el equipo investigador plantea como futuros trabajos la repetición de la campaña experimental a fin de mejorar la metodología empleada en la recogida de datos, incorporar nuevas técnicas e instrumentos de medida y contrastar los resultados ya obtenidos en el presente estudio.

Por último, los resultados obtenidos también pretenden servir como base para su comparación con resultados experimentales obtenidos por otros autores y con modelos numéricos de resalto hidráulico, cuya utilización está creciendo como complemento para el estudio de este fenómeno tan importante en el campo de la ingeniería hidráulica y del que aún queda tanto por conocer.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda prestada para el desarrollo de la presente investigación al proyecto EMULSIONA (MINECO [BIA2011-28756-C03-01-AR. Plan Nacional de I+D]) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y a las Ayudas para la contratación de personal investigador en formación de carácter predoctoral de la Generalitat Valenciana.

Asimismo se agradece especialmente la colaboración de Beatriz Nácher del Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Universitat Politècnica de València y de los técnicos Juan Carlos Edo y Joaquín Oliver, sin cuya ayuda no hubiera sido posible la realización el trabajo que aquí se presenta.

REFERENCIAS

- Bakhmeteff, B. A., & Matzke, A. E. (1936). The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 61, No. 2, pp. 145-162). ASCE.
- Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J. y López-Jiménez, P.A. 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software* 80, 322-335.
- Blocken, B., & Gualtieri, C. (2012). Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. *Environmental Modelling & Software* 33, 1-22.
- Chanson, H. (Ed.). 2015. *Energy dissipation in hydraulic structures*. CRC Press.

- Chanson, H. (2009). Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results. *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 28(2), 191-210.
- Chanson, H., & Gualtieri, C. (2008). Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research* 46(1), 35-44.
- Hager, W. H. 1992. *Energy dissipators and hydraulic jump* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.
- Hager, W. H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research* 28(5), 591-608.
- Heller, V. 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306.
- Kirkgöz, M. S., & Ardiçlioğlu, M. (1997). Velocity profiles of developing and developed open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(12), 1099-1105.
- Long, D., Rajaratnam, N., Steffler, P. M., & Smy, P. R. (1991). Structure of flow in hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research* 29(2), 207-218.
- Mossa, M., & Tolve, U. (1998). Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump. *Transactions-american Society of Mechanical Engineers Journal of Fluids Engineering* 120, 160-165.
- Peterka, A. J. 1978. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. No. 25. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Sánchez-Peña, D. 2012. *Determinación de la distribución de velocidades en un cuenco de disipación de energía de un vertedero de caída libre*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.