

Análisis temporal y frecuencial de presiones medidas en la solera de cuencos de aliviaderos de vertido libre

Analysis in the time and frequency domains of pressures measured at plunge pool bottom of free falling jets

Marco, F. ^{a1}, Carrillo, J.M. ^{a2}, Castillo, L.G. ^{a3}, García, J.T. ^{a4}

^a Grupo Hidr@m, Área de Ingeniería Hidráulica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena, Paso Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España.
E-mail: ^{a1} francisca.marco@upct.es, ^{a2} jose.carrillo@upct.es, ^{a3} luis.castillo@upct.es, ^{a4} juan.gbermejo@upct.es

Recibido: 24/08/2019

Aceptado: 28/10/2019

Publicado: 31/10/2019

Citar como: Marco, F., Carrillo, J.M., Castillo, L.G., García, J.T. (2019). Analysis in the time and frequency domains of pressures measured at plunge pool bottom of free falling jets. *Ingeniería del agua*, 23(4), 289-301. <https://doi.org/10.4995/la.2019.12255>

RESUMEN

El flujo en vertido en lámina libre constituye uno de los métodos de disipación de energía más utilizados en el sobrevertido de presas. Este artículo presenta el análisis temporal y frecuencial de registros de presiones medidos en la solera de un cuenco de disipación de un aliviadero de vertido libre. Las mediciones han sido realizadas en un dispositivo experimental de tamaño relativamente grande (altura de caída de hasta 2.84 m y velocidades del chorro incidente entre 5.3 y 7.6 m/s). Se han analizado los comportamientos en el dominio del tiempo y de la frecuencia de los cuatro tipos de chorros de aliviaderos de vertido libre clasificados en estudios previos. El estudio se centra en el punto de estancamiento y en las distribuciones de presiones en su entorno. Finalmente, se ha realizado una comparativa de las frecuencias obtenidas con resultados existentes en la bibliografía para chorros circulares y rectangulares.

Palabras clave | vertido libre; cuenco de disipación; sensores de presión; análisis temporal; análisis frecuencial.

ABSTRACT

Free falling jet is one of the most common energy dissipation methods used in the overtopping of dams. This work presents the time and frequency analysis of pressure measurements obtained at the bottom of a plunge pool downstream of free falling jets in an experimental facility. A relative large device (falling height up to 2.85 m and impingement jet velocities between 5.3 and 7.6 m/s) has been used in the study. The behavior of the four types of free falling jets classified in previous studies has been analyzed in the time and the frequency domains. The study focuses on the pressure on the stagnation point. The pressure distributions near the stagnation point have been also analyzed. Finally, the results have been compared with the frequencies behavior for circular and rectangular jets available in the literature.

Key words | free discharge; plunge pool; pressure sensors; time analysis; frequency analysis.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aumento en la magnitud de las inundaciones ha promovido, a nivel mundial, la reevaluación de la capacidad de los aliviaderos y de los escenarios de operación de las grandes presas. Diferentes investigaciones (FEMA 2004, 2013, 2014) han concluido que la capacidad actual de muchos aliviaderos es inadecuada, lo que aumenta la posibilidad de que las presas lleguen a verter durante eventos extremos. El incremento de la capacidad de los aliviaderos resulta costoso y en ocasiones técnicamente inviable. El desbordamiento crea nuevos escenarios de acciones y plantea interrogantes sobre los problemas de erosión y socavación aguas abajo de la presa (Wahl et al., 2008).

La energía potencial creada por el embalse de una presa tiene que ser disipada adecuadamente, de modo que el flujo desaguado pueda reintegrarse en el medio natural. Para la disipación de energía, el vertido libre por coronación es una solución comúnmente adoptada en presas de fábrica. La evaluación de las acciones sobre los elementos estructurales de los cuencos de disipación de energía es de gran interés de cara al diseño y la estabilidad mecánica del cuenco, especialmente las acciones debidas al campo de presiones, inducidas por la macroturbulencia del flujo aire-agua. En el impacto del chorro turbulento con la solera del cuenco de disipación se producen altas presiones hidrodinámicas que pueden provocar el levantamiento de las losas de protección, el arrastre de partículas sólidas, erosión y socavación a pie de presa (Maleki y Fiorotto, 2019).

La elección del tipo de cuenco de disipación suele ser una decisión técnico-económica entre un cuenco de gran profundidad y sin revestimiento, y un cuenco con poca profundidad y con revestimiento. Un adecuado diseño del calado en el cuenco se basa en la determinación de la magnitud y frecuencia de la presión dinámica en el fondo en función de las características del chorro incidente y que han sido analizadas por diversos autores (por ejemplo, Castillo, 1989, 2006, 2007, ; Withers, 1991; Ervine et al. 1997; Castillo et al., 1999, 2007, 2015, 2018; Bollaert, 2002; Puertas, 1994; Manso, 2006; Carrillo, 2014; Castillo y Carrillo, 2016a,b).

Según Castillo (2006), la disipación de energía en el vertido por coronación de presas de fábrica se puede dividir en cuatro fases: 1) disgregación del chorro en el vuelo (aireación más atomización); 2) arrastre de aire cuando el chorro entra en el cuenco; 3) difusión en el cuenco; 4) impacto con la solera del cuenco de disipación.

De cara a las consideraciones de diseño, en la figura 1 se definen las condiciones iniciales e incidentes (Castillo, 2006; Castillo et al., 2015).

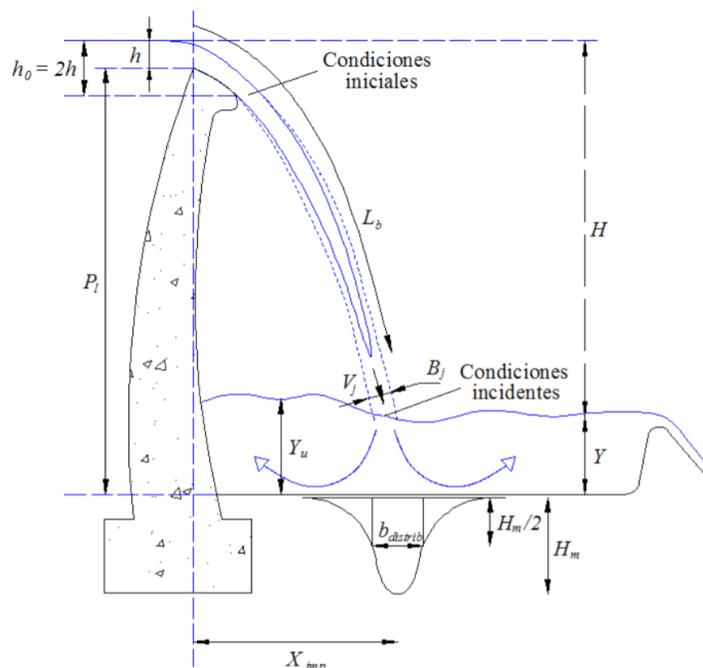


Figura 1 | Esquema de aliviadero de vertido libre en presas bóveda (Carrillo, 2014; adaptado de Castillo, 2006).

Las condiciones iniciales se sitúan en la sección del chorro situada a una altura $z = -h$ aguas abajo del vertedero, siendo z la coordenada vertical con origen en la cresta del vertedero y h la carga sobre vertedero. Dichas condiciones se definen mediante la velocidad media del flujo $V_i = \sqrt{2gh_0}$ y el ancho del chorro en la condición inicial $B_i = \frac{q_i}{\sqrt{2gh_0}}$, siendo $h_0 = 2h$, q_i el caudal específico en la condición inicial y g la aceleración de la gravedad.

Las condiciones incidentes se localizan en la sección del chorro justo antes del impacto con la superficie del agua en el cuenco de disipación. Están definidas por la velocidad media V_j y el ancho del chorro en el impacto $B_j = B_g + 2\xi$, siendo $B_g = \frac{q}{\sqrt{2gh_0}}$ el ancho por condiciones gravitatorias, y $\xi = 4\varphi\sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h})$ la distancia lateral de difusión del chorro por efectos de aireación y turbulencia. Para el ancho del chorro se considera el caudal específico q y el parámetro turbulento $\varphi = K_\varphi T_u$, donde T_u es la intensidad de turbulencia (0.012 para presas arco y 0.013 para presas de gravedad) y K_φ un parámetro experimental de valor 1.24 para el caso de chorros tridimensionales (Castillo et al., 2015; Castillo y Carrillo, 2016a,b). De esta forma, se obtienen las principales formulaciones existentes de chorros tridimensionales para el cálculo del ancho del chorro de impacto propuesta por Castillo (2006, 2007), revisadas por Castillo et al. (2015):

$$B_j = B_g + 2\xi = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4K_\varphi T_u \sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h}) \quad (1)$$

La longitud de rotura del chorro L_b es la distancia a partir de la cual el chorro se encuentra totalmente desintegrado y formado por grandes gotas de agua que se van descomponiendo en gotas más pequeñas debido al rozamiento con el aire. Para su estimación, Castillo (2007) y Castillo et al. (2015) propusieron la siguiente ecuación:

$$L_b = 0.85 \cdot \frac{B_i \cdot F_i^2}{(K_\varphi \cdot T_u \cdot F_i^2)^{0.82}} \quad (2)$$

donde B_i y F_i son el espesor del chorro y el número de Froude en las condiciones iniciales, respectivamente.

Los registros de presión típicos de chorros tridimensionales se pueden clasificar en 4 grupos (Figura 2), en función de la relación altura de caída / longitud de rotura del chorro (chorros no desarrollados $H/L_b < 1$; chorros desarrollados $H/L_b > 1$), y de la relación calado / espesor del chorro incidente (colchón no efectivo $Y/B_j \leq 5.5$; colchón efectivo $Y/B_j > 5.5$). Según Castillo (2007) y Castillo et al. (2015), los chorros no desarrollados en general muestran un registro de presiones constante, con picos de presión similares por encima y por debajo de la presión media. Estos picos disminuyen sustancialmente cuando aumenta el colchón de agua (caso de colchón efectivo - flujo establecido). Para colchones no efectivos se observa una elevada fluctuación con caídas de presión cerca del nivel de presión atmosférica. Los chorros desarrollados se caracterizan por registros de presiones más fluctuantes debido a la entrada de aire en el chorro vertiente, lo que provoca una mayor área de distribución de presiones. El efecto global es un aumento de la disipación de energía y una reducción sustancial de la presión en el fondo. Este efecto aumenta con la altura de caída y el colchón de agua.

La disipación de energía en los cuencos de amortiguación se produce principalmente mediante el proceso de turbulencia. La turbulencia es un estado caótico y aleatorio del flujo, en el que la presión y la velocidad oscilan instantáneamente a lo largo del tiempo. El modelo de cascada de energía (Figura 3) propuesto por Kolmogorov (1941) considera que la turbulencia está formada por vórtices de diferentes tamaños. Los vórtices más grandes interactúan con el flujo principal, extrayendo energía de él. Estos vórtices son inestables en sí mismos y van transfiriendo energía a los vórtices más pequeños, que a su vez tienden a dividirse, hasta llegar a escalas totalmente disipativas. En este proceso coexisten una gran variedad de escalas, correspondientes a distintos tamaños de vórtices, los cuales son arrastrados y estirados por la acción de los gradientes del flujo promedio dominante y por su interacción con los demás vórtices. Este proceso de división continúa hasta que la escala de los vórtices es tan pequeña que su número de Reynolds no es lo suficientemente grande como para que la inestabilidad persista. La energía cinética contenida en los vórtices pequeños se transforma en energía térmica por disipación viscosa.

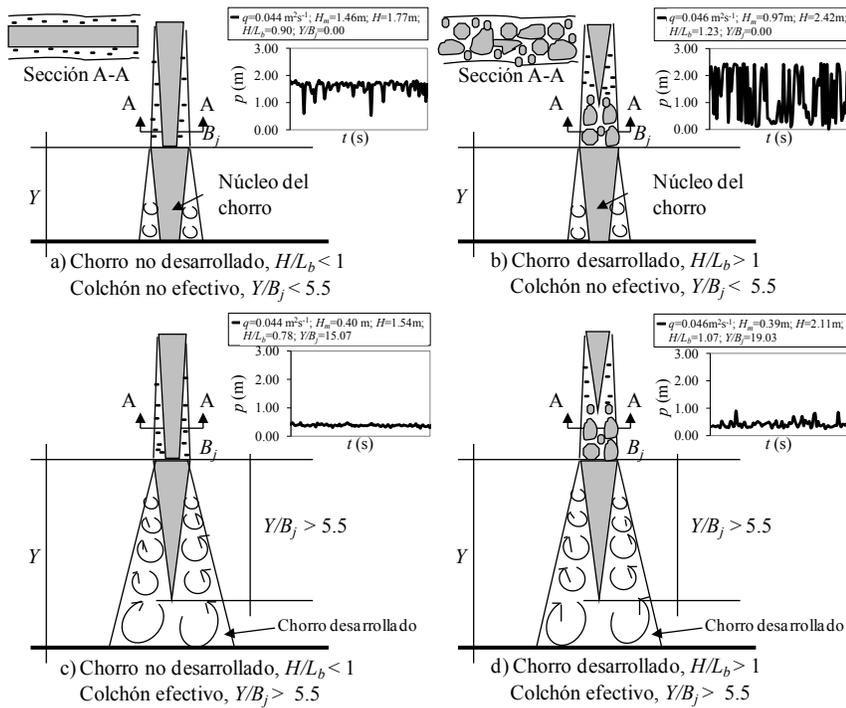


Figura 2 | Diagrama de los cuatro tipos de chorros: (a) chorro no desarrollado y colchón no efectivo ($H/L_b \leq 1$, $Y/B_j \leq 5.5$); (b) chorro no desarrollado y colchón efectivo ($H/L_b \leq 1$, $Y/B_j > 5.5$); (c) chorro desarrollado y colchón no efectivo ($H/L_b > 1$, $Y/B_j \leq 5.5$); (d) chorro desarrollado y colchón efectivo ($H/L_b > 1$, $Y/B_j > 5.5$) (Adaptado de Castillo et al., 2015).

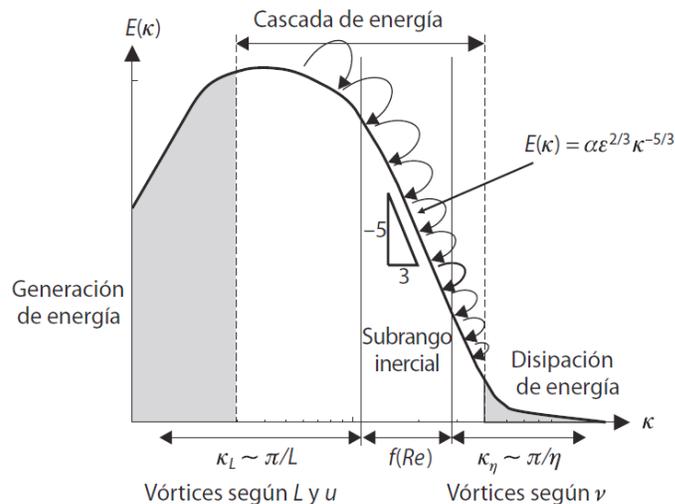


Figura 3 | Espectro de energía turbulenta (adaptado de Davidson, 2004).

Las fluctuaciones de presión pueden ser analizadas por medio del análisis espectral. Este análisis permite identificar el contenido energético en función de las distintas frecuencias. Las diferentes zonas se pueden clasificar en (Chassaing, 2000):

- Zona de producción, relacionada con las características medidas en la fuente de energía (el chorro incidente).

- Zona de redistribución de energía, pasando de grandes remolinos con bajas frecuencias a vórtices progresivamente más pequeños con altas frecuencias (cascada de energía).
- Zona disipativa o viscosa, donde la energía de las pequeñas estructuras turbulentas (altas frecuencias) se disipa por viscosidad.

El objetivo de este trabajo es comparar las características de las presiones generadas en los 4 tipos de chorros desde un punto de vista temporal y frecuencial. Su mejor conocimiento permitirá facilitar la adaptación de los aliviaderos de presas de gravedad existentes a condiciones hidráulicas más exigentes derivadas de la reevaluación de los escenarios hidrológicos extremos, así como mejorar los criterios de diseño de nuevas presas, tal y como exigen las nuevas Normas Técnicas de Seguridad (NTS) de Grandes Presas y sus Embalses de España.

Antecedentes

Hasta la fecha, diversos autores han abordado la caracterización de presiones generadas por chorros incidentes en un cuenco de disipación. La mayoría de las investigaciones se basan en estudios experimentales a escala en laboratorio, dada la complejidad de instalar instrumentación en prototipos y de realizar simulaciones numéricas de flujos emulsionados. Algunas de estas investigaciones son:

- Castillo (1989) realizó uno de los primeros estudios sistemáticos del campo de presiones generado por chorros rectangulares de vertido libre en presas bóveda. El modelo experimental consistió en un vertedero de 0.24 m de ancho y una altura fija de caída de 1.72 m. El autor analizó caudales de 3, 6 y 8 l/s, con siete colchones de agua que varían desde el impacto directo hasta 0.25 m. Esos valores equivalen a un rango de altura de caída/longitud de rotura del chorro (H/L_b) entre 0.78 y 1.22. En todos los ensayos se registraron 2400 datos a una frecuencia de 20 Hz.
- Puertas (1994) y Puertas y Dolz (2005) presentaron los resultados de estudios de acciones de chorros rectangulares bidimensionales de caída libre con las siguientes características: ancho de vertedero de 1.20 m, caudales de 31 a 179 l/s, cuatro alturas de caída (de 1.85 m a 5.45 m), y diez colchones de agua (desde 0.08 m hasta 0.80 m). Esos datos cubren una relación H/L_b entre 0.42 y 3.06. La frecuencia de medición fue de 20 Hz con 2400 datos por ensayo.
- Withers (1991) y Ervine et al. (1997) analizaron el campo de fluctuación de presiones en un cuenco de disipación donde impacta un chorro circular aireado. Los autores consideraron diferentes diámetros de tobera (25, 52.5 y 78 mm), alturas de caída de 0.51 a 2.63 m, colchones de agua desde 0.10 m hasta 0.50 m, velocidades de impacto de 4 a 25 m/s, y concentraciones de aire entre 0 y 20%. Con esos datos se cubren relaciones H/L_b de 0.04 a 0.82, y relaciones calado/diámetro del chorro incidente (Y/D_j) de 1.30 a 20. La frecuencia de medición varió entre 100 y 230 Hz.
- Bollaert (2002) estudió el campo de presiones que se generan en el cuenco de disipación debido al impacto de un chorro circular de alta velocidad. Se registraron caudales entre 20 y 120 l/s, con diámetros de chorro de 57 mm y 72 mm, colchones de agua desde el impacto directo hasta 0.70 m de altura, velocidades de impacto entre 7.4 y 31.3 m/s, y relaciones calado/diámetro de chorro incidente (Y/D_j) de 2.10 a 12.30. La frecuencia de medición fue de 1000 Hz con 65024 datos por ensayo.
- Federspiel (2011) analizó experimentalmente el comportamiento de un “bloque de roca artificial” separado de su entorno por una fisura tridimensional completamente interconectada, en el cual impacta un chorro circular a alta velocidad. El bloque móvil tenía forma cúbica de 200 mm de lado y se encontraba incrustado en una masa rocosa creada artificialmente. El autor realizó mediciones con caudales de 10 a 120 l/s, colchones de agua que oscilan entre el impacto directo y 0.70 m, velocidades de impacto desde 2.50 hasta 29.50 m/s, y relaciones Y/D_j de 0 a 9.70. La frecuencia de medición fue de 1000 Hz con 65536 datos por ensayo.
- Continuando con el trabajo de Federspiel (2011), Duarte (2014) implementó un sistema de aire comprimido en la instalación. El autor realizó mediciones de caudales líquidos entre 20 y 90 l/s, concentraciones de aire hasta el 23%, colchones de agua que varían desde 0.30 hasta 0.80 m, y velocidades de impacto entre 4.90 y 22.10 m/s. La frecuencia de medición fue de 1000 Hz con 65536 datos por ensayo.

- Carrillo (2014) analizó la caracterización hidrodinámica de las acciones actuantes en el cuenco de disipación de energía de un aliviadero de vertido libre a partir de medidas de laboratorio, y apoyándose en simulaciones numéricas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se llevaron a cabo registros de siete caudales entre 11 y 49 l/s, con un ancho de vertedero de 0.85 m, tres alturas de caída desde 1.70 a 3.00 m, y siete colchones de agua (desde el impacto directo hasta 0.60 m). Con esos datos se obtiene una relación H/L_b entre 0.60 y 2.02. La frecuencia de medición fue de 20 Hz con 7200 datos por registro, obtenidos por triplicado.
- Castillo et al. (2015), compararon los resultados experimentales de chorros rectangulares de Castillo (1989), Puertas (1994) y Carrillo (2014), y propusieron ecuaciones de ajuste en el punto de estancamiento y su entorno para el coeficiente de presión dinámica media y fluctuante de chorros rectangulares de vertido libre.

Teniendo en cuenta los estudios previos disponibles en la literatura, es necesario realizar un análisis detallado de las características de los diferentes tipos de chorros rectangulares de vertido libre en el dominio frecuencial. En este sentido, el estudio se ha diseñado para avanzar en la caracterización en el dominio frecuencial de los 4 tipos de chorros identificados por Castillo (2007) para el campo temporal. Igualmente, se ha analizado el entorno del punto de estancamiento desde el punto de vista frecuencial.

MATERIAL Y MÉTODOS

Infraestructura experimental

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena cuenta con una infraestructura diseñada para analizar la disipación de energía de chorros turbulentos rectangulares de vertido libre. Hasta la fecha, en el laboratorio se habían estudiado chorros tridimensionales (ancho del vertedero menor que ancho del cuenco de disipación). Con el fin de ahondar en el conocimiento, se ha modificado la infraestructura para el estudio de chorros bidimensionales con un mayor rango de caudales y alturas de caída (Figura 4).



Figura 4 | Infraestructura para el estudio de chorros en aliviaderos de vertido libre (caso $q=0.031 \text{ m}^2/\text{s}$, $H=2.23 \text{ m}$, $Y=0.02 \text{ m}$).

La instalación está diseñada para analizar caudales entre 10 y 200 l/s, con alturas de vertido entre 2.20 y 3.50 m, y colchones de agua que oscilan desde el impacto directo hasta 1 m de profundidad. La estructura de flujo bidimensional consta de un sistema de bombeo, un cajón superior o parte móvil finalizado en un vertedero de pared delgada de 1.05 m de ancho, y un cuenco de amortiguación fijo. El cuenco de disipación de energía tiene 1.06 m de ancho, 3.00 m de longitud y 1.60 m de altura, y está construido en metacrilato para observar el flujo en su interior. A lo largo del eje central longitudinal de la solera del cuenco se ubican 30 taladros roscados equiespaciados cada 5 centímetros, en los que se ajustan transductores de presión en función del caudal a ensayar.

Sensores de presión y campaña experimental

Para obtener los registros de presiones instantáneas a distintas frecuencias de muestreo se están utilizando transductores de presión piezorresistivos GE DRUCK, modelo UNIK-5000, con un rango de medición que varía entre -200 y +800 mbar y con una precisión de $\pm 0.04\%$ del fondo de escala. Se ha llevado a cabo la adquisición de datos con una frecuencia de muestreo de 20 Hz para el análisis temporal y de 1000 Hz para el análisis frecuencial. Para ello, se han utilizado dos sistemas de adquisición de datos DATAQ INSTRUMENTS, una tarjeta modelo DI-710 (16 canales, velocidad de adquisición hasta 1108 Hz a repartir entre todos los canales activos, y resolución de 14 bits) para el análisis temporal y un equipo DI-1110 (4 canales, velocidad de procesamiento de 160 kHz a repartir entre todos los canales activos, y resolución de 12 bits) para el análisis frecuencial.

Basándonos en estudios previos (Carrillo, 2014; Castillo et al., 2015), se registran 7200 datos a 20 Hz para el análisis temporal. Esta longitud de registros garantiza contar con series de datos suficientemente largas, evitando variaciones de los distintos estadísticos. Para la frecuencia de medición de 1000 Hz se ha realizado un estudio previo que evalúa el número de datos necesarios para considerar que la serie sea representativa del fenómeno. Según las pruebas realizadas, se plantean campañas de 150 000 datos. Las series de datos se filtran utilizando el percentil del 99 y el 1% con reemplazo de valores, utilizando el promediado de los 12 datos más cercanos. Se ha comprobado que este filtrado permite eliminar posibles datos anómalos sin distorsionar los estadísticos de las series temporales ni alterar el análisis frecuencial.

La tabla 1 recopila los datos característicos de la campaña experimental.

Tabla 1 | Resumen de las condiciones analizadas.

Número de ensayos	Caudal específico q (l/s/m)	Altura de vertedero P_l (m)	Colchón de agua Y (m)	H/L_b	Y/B_j
178	25-148	2.19-2.84	0-0.90	0.46-1.26	1.35-51.48

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de las presiones debe abordarse en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En el dominio del tiempo se analiza la presión media y fluctuante en el punto de estancamiento, así como la distribución de presiones en el entorno del punto de estancamiento. En el dominio de la frecuencia se analizan las frecuencias dominantes y la energía asociada a cada una de ellas a través del análisis espectral de las fluctuaciones de presión en el punto de estancamiento y en su entorno. En los apartados siguientes se han considerado ensayos representativos de cada tipo de chorro.

Análisis temporal

En la Figura 5 se presentan los cuatro tipos de chorros para el caso de chorros bidimensionales siguiendo la clasificación propuesta por Castillo (2007) y Castillo et al. (2015). Se puede observar el mismo comportamiento que para chorros tridimensionales, con mayores presiones en el caso de chorros no desarrollados, y disminución de la presión media y de la amplitud del registro para colchones efectivos, lo que conlleva un aumento en la disipación de la presión en el punto de estancamiento.

En las Figura 6 se analizan los registros de presiones en el punto de estancamiento (X_{imp}) del chorro vertiente, así como en las posiciones situadas aguas arriba y aguas abajo de dicho punto, equiespaciadas cada 5 cm. Los valores máximos de presión se obtienen en el punto de estancamiento y disminuyen hacia los lados.

La Figura 6a muestra un registro correspondiente a un chorro no desarrollado (caso $H/L_b=0.70$, $Y/B_j=3.88$), obtenido con un caudal específico $q=0.141$ m²/s. Aguas arriba del punto de estancamiento se genera un colchón de agua mayor que aguas abajo. Por lo general, las presiones aguas arriba del punto de estancamiento tienden a ser superiores a las obtenidas aguas abajo, donde se produce un flujo supercrítico. En este caso analizado, el sensor situado inmediatamente aguas abajo del punto de estancamiento ($X_{imp} + 0.05$ cm) posee una presión superior al situado aguas arriba ($X_{imp} - 0.05$ cm). Este hecho se debe a la disipación que produce

el pozo de acumulación aguas arriba del punto de estancamiento (Y_u), creado por el cambio de cantidad de movimiento del chorro en el impacto (Moore, 1943; Castillo, 1989).

La Figura 6b muestra un registro de un chorro desarrollado (caso $H/L_b = 1.16$, $Y/B_j = 1.53$), registrado con un caudal específico $q = 0.031 \text{ m}^2/\text{s}$. En este tipo de chorros, la diferencia de presiones entre el punto de estancamiento y los situados aguas arriba y aguas abajo tiende a ser mayor.

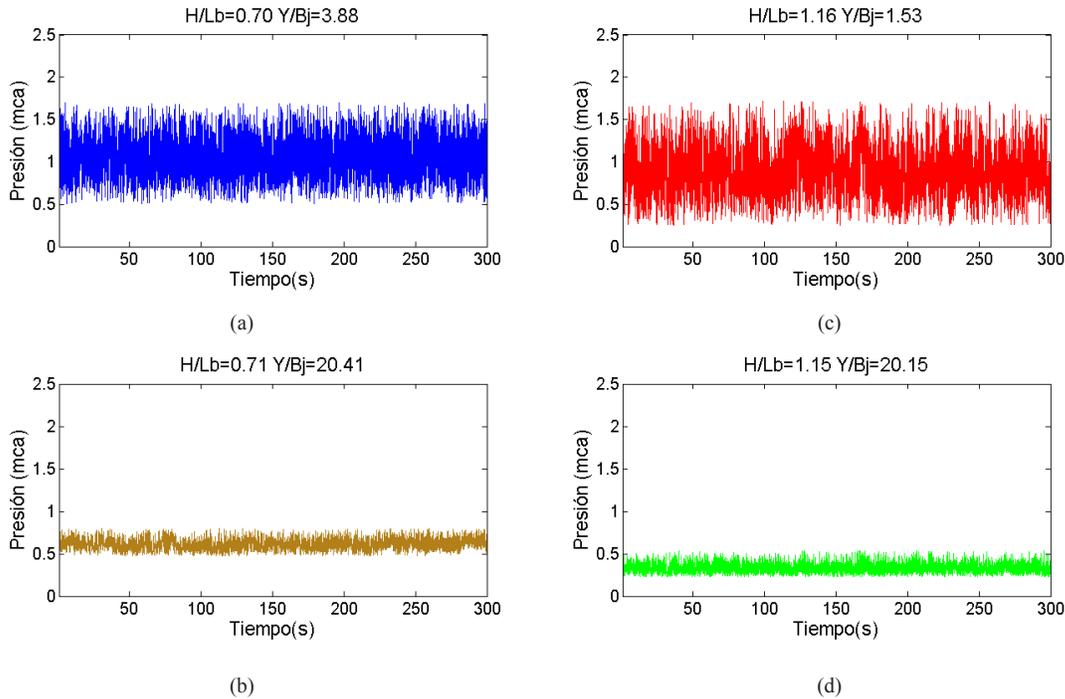


Figura 5 | Registro de presiones de un chorro bidimensional para los cuatro tipos de chorros: a) chorro no desarrollado y colchón no efectivo ($H/L_b = 0.70$, $Y/B_j = 3.88$, $q = 0.141 \text{ m}^2/\text{s}$); b) chorro no desarrollado y colchón efectivo ($H/L_b = 0.71$, $Y/B_j = 20.41$, $q = 0.074 \text{ m}^2/\text{s}$); c) chorro desarrollado y colchón no efectivo ($H/L_b = 1.16$, $Y/B_j = 1.53$, $q = 0.031 \text{ m}^2/\text{s}$); d) chorro desarrollado y colchón efectivo ($H/L_b = 1.15$, $Y/B_j = 20.15$, $q = 0.024 \text{ m}^2/\text{s}$).

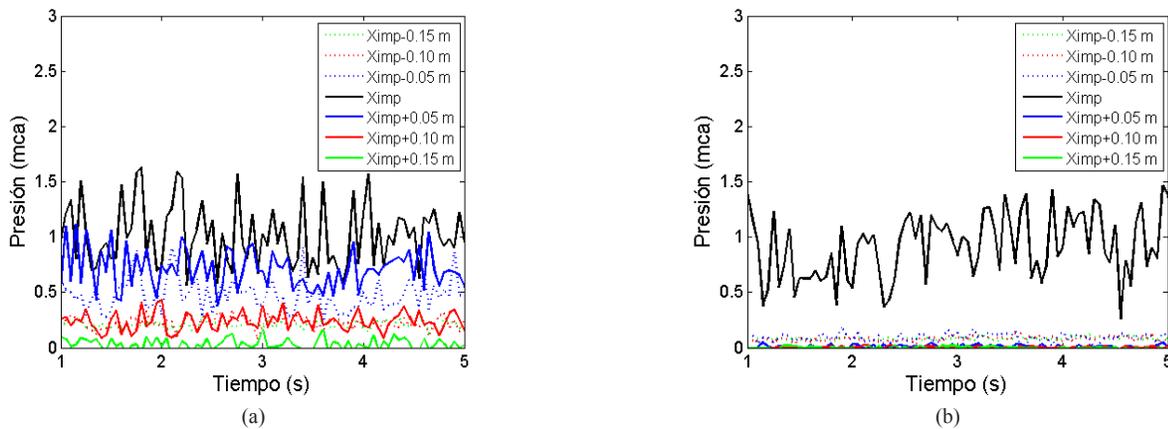


Figura 6 | a) Registro de presión de chorro bidimensional no desarrollado ($H/L_b = 0.70$, $Y/B_j = 3.88$, $q = 0.141 \text{ m}^2/\text{s}$); b) registro de presión de chorro bidimensional desarrollado ($H/L_b = 1.16$, $Y/B_j = 1.53$, $q = 0.031 \text{ m}^2/\text{s}$).

Análisis frecuencial

La función de densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density*, PSD) permite conocer la energía en función de la frecuencia. Para el cálculo de la PSD se ha empleado la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT).

En la Figura 7 se presenta la PSD de los cuatro tipos de chorros para el caso de chorros bidimensionales. Se observa una disminución exponencial de la energía desde las bajas frecuencias hacia las frecuencias más altas.

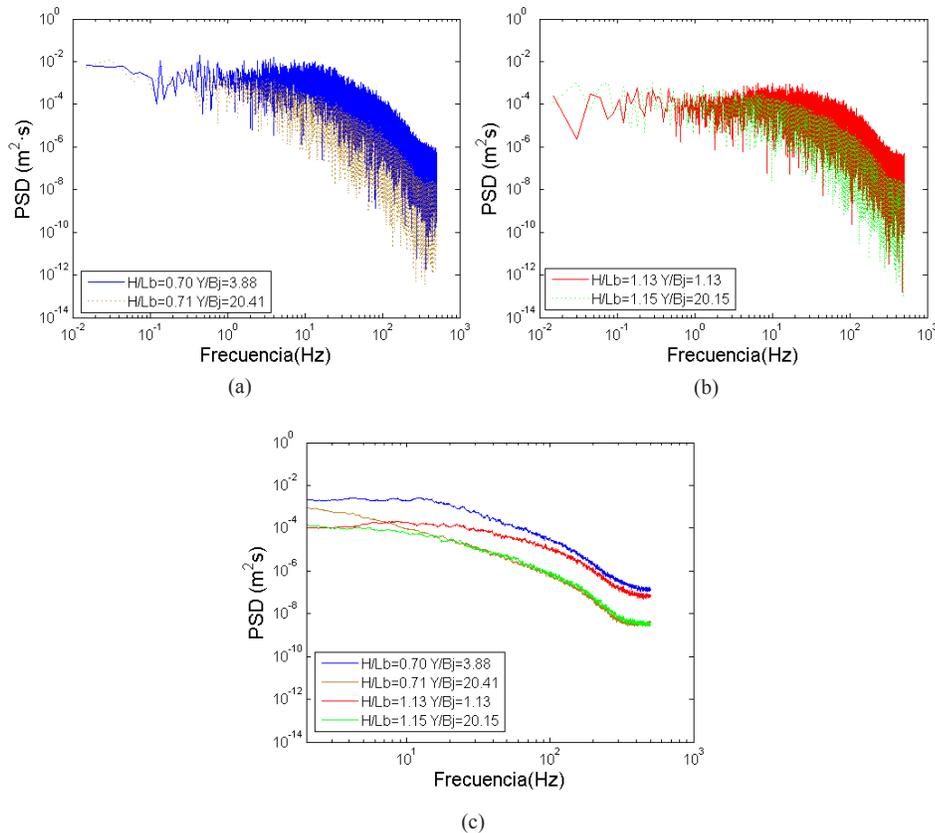


Figura 7 | Densidad espectral de potencia: a) chorros no desarrollados sin colchón efectivo ($H/L_b=0.70$, $Y/B_j=3.88$, $q=0.141$ m²/s) y con colchón efectivo ($H/L_b=0.71$, $Y/B_j=20.41$, $q=0.074$ m²/s); b) chorros desarrollados sin colchón efectivo ($H/L_b=1.13$, $Y/B_j=1.13$, $q=0.081$ m²/s) y con colchón efectivo ($H/L_b=1.15$, $Y/B_j=20.15$, $q=0.024$ m²/s); c) comparativa de media móvil de la densidad espectral de potencia.

La energía de los chorros no desarrollados ($H/L_b < 1$) en bajas frecuencias es de un orden de magnitud superior a la observada en los chorros desarrollados ($H/L_b > 1$). Estas diferencias parecen estar relacionadas con la entrada de aire en el chorro vertiente. La PSD de los colchones no efectivos tiende a mantenerse constante hasta frecuencias en torno a los 20 Hz. Para frecuencias superiores a 50-100 Hz, las pendientes de las cuatro series tienden a igualarse. A altas frecuencias, los colchones efectivos presentan una PSD de un orden de magnitud inferior a la observada con colchones no efectivos (Figura 7c).

En las figuras 8 y 9 se presentan la función de densidad espectral en el entorno del punto de estancamiento para chorros no desarrollados y desarrollados, respectivamente. Para comparar las tendencias de los diferentes espectros se ha llevado a cabo un filtrado con una media móvil de 100 puntos.

En la Figura 8 se muestran los registros de presiones en el entorno del punto de estancamiento para un chorro no desarrollado sin colchón efectivo. El sensor situado en el punto de estancamiento registra una mayor energía. El valor de PSD disminuye conforme el punto de muestreo se aleja del punto de estancamiento.

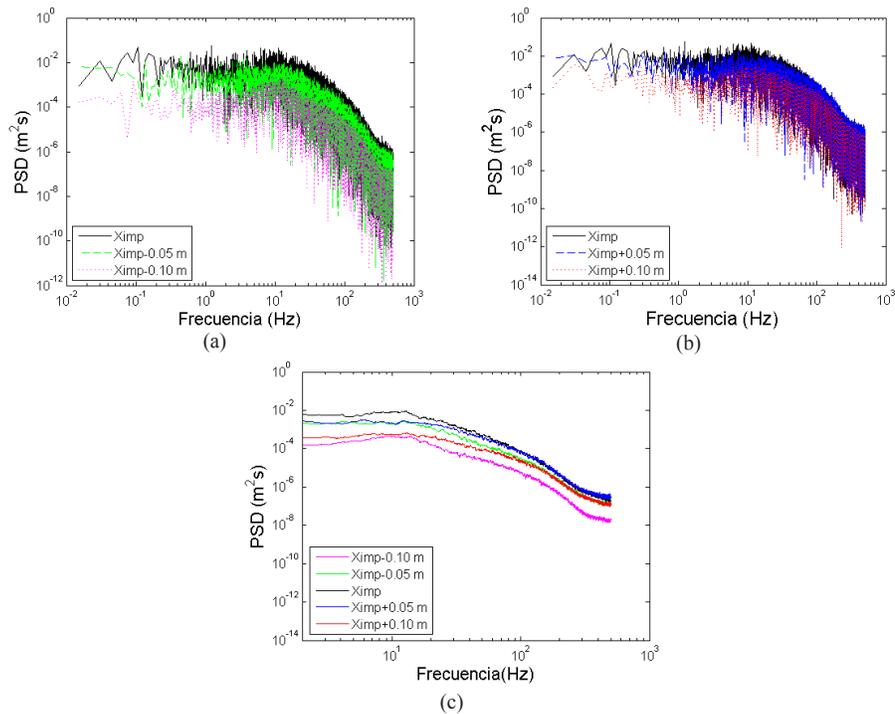


Figura 8 | Densidad espectral de potencia para de un chorro bidimensional no desarrollado ($H/L_b=0.70$, $Y/B_j=3.88$, $q=0.141$ m²/s): a) aguas arriba del punto de estancamiento; b) aguas abajo del punto de estancamiento; c) comparativa de media móvil de la densidad espectral de potencia.

En la figura 9 se presentan los registros de presiones obtenidos alrededor del punto de estancamiento para un chorro desarrollado sin colchón efectivo. La variación de energía entre el sensor de impacto y los sensores situados aguas arriba y aguas abajo es de un orden de magnitud, superior a la diferencia observada en los chorros no desarrollados.

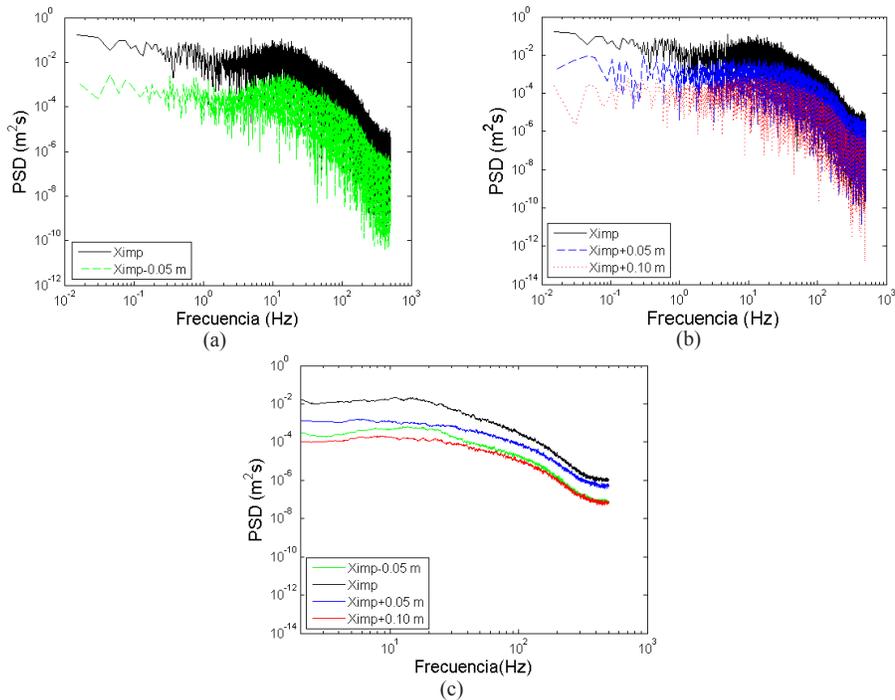


Figura 9 | Densidad espectral de potencia para un chorro bidimensional desarrollado ($H/L_b=1.13$, $Y/B_j=1.13$, $q=0.081$ m²/s): a) aguas arriba del punto de estancamiento; b) aguas abajo del punto de estancamiento; c) comparativa de media móvil de la densidad espectral de potencia.

La figura 10 recopila la densidad espectral de potencia en función de la frecuencia obtenida por varios investigadores (Bollaert, 2002). Esta información recoge los casos de chorros no desarrollados, concretamente para $H/L_b < 0.5$. Adicionalmente, se han incluido los registros de presiones medidos en este estudio. Teniendo en cuenta los datos obtenidos, el comportamiento de los chorros rectangulares desarrollados y no desarrollados resultan similares a lo indicado por otros autores. En los cuatro casos analizados, para altas frecuencias las pendientes son similares a los resultados obtenidos en chorro circular con colchón efectivo por Ballio et al. (1992) y en chorro rectangular oblicuo con colchón efectivo por Xu-Duo-Ming (1983).

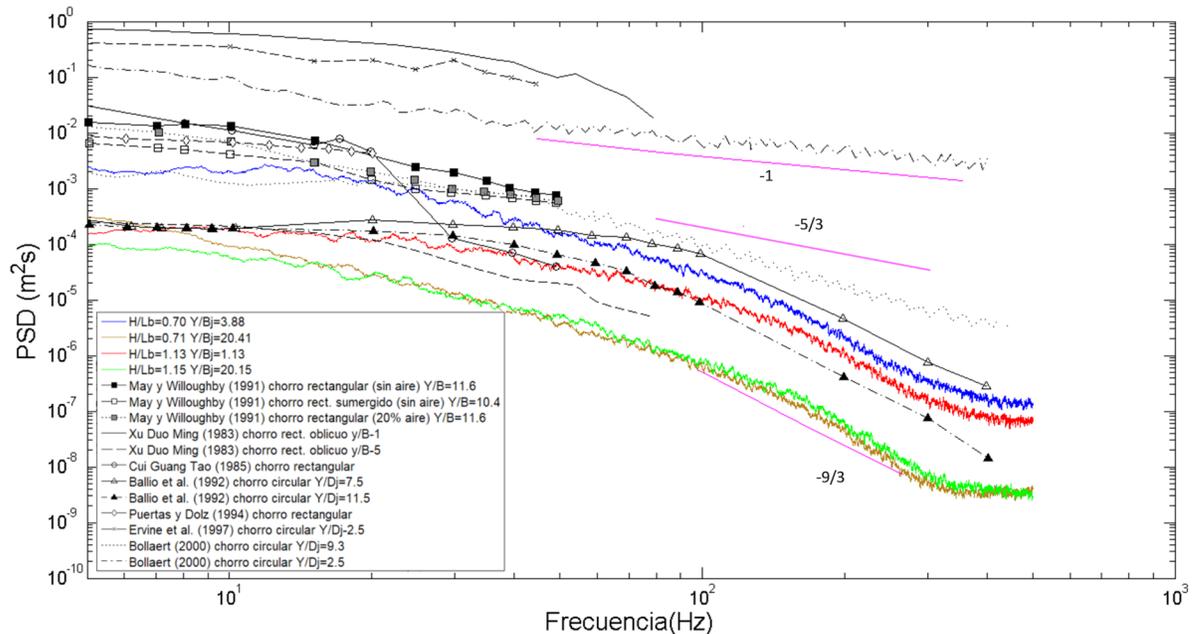


Figura 10 | Recopilación de estudios de PSD (adaptado de Bollaert, 2002). Nota: datos de los autores obtenidos a través de digitalización.

CONCLUSIONES

Para asegurar la seguridad de presas y evitar la erosión y socavación aguas abajo de la estructura se deben caracterizar las presiones hidrodinámicas que impactan en el cuenco de disipación.

En este trabajo se ha llevado a cabo un análisis temporal y frecuencial de presiones en la solera de un cuenco de disipación de aliviaderos de vertido libre.

Se han analizado las cuatro tipologías de chorros (Castillo, 2007) mediante análisis temporal y frecuencial. El patrón de las series en el análisis temporal es similar al obtenido en chorros tridimensionales. En el dominio de la frecuencia, los chorros no desarrollados poseen una energía superior a los desarrollados, efecto que se acentúa para bajas frecuencias. Además, se observa una energía menor en los casos de colchón efectivo.

En el análisis del entorno del punto de estancamiento, en todos los casos se ha obtenido una mayor presión y energía en el sensor de impacto. La diferencia de este sensor con los adyacentes se ve acentuada en el caso de chorros desarrollados, llegando a tener diferencias de hasta dos órdenes de magnitud en el análisis frecuencial.

Para avanzar en esta línea de trabajo es preciso realizar nuevas mediciones experimentales que cubran rangos más amplios de velocidades y concentraciones en el chorro incidente, incluyendo velocidades incidentes hasta 15-20 m/s. Esto permitirá mejorar la caracterización de los fenómenos existentes en prototipo.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto (“La aireación del flujo en el vertido en lámina libre por coronación de presas a nivel de prototipo y su efecto en cuencos de disipación de energía”, referencia RTI2018-095199-B-I00) está financiado por la convocatoria “Proyectos de I+D Retos Investigación” del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Ciencia e Innovación.

La primera autora agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

REFERENCIAS

- Ballio, F., Franzetti, S., Tanda, M.G. 1992. Pressure fluctuations induced by turbulent circular jets impinging on a flat plate, *Excerpta*, 7.
- Bollaert, E. 2002. *Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high velocity jet impact*. PhD Thesis, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.
- Carrillo, J.M. 2014. *Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica*. PhD Thesis. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Castillo, L.G. 2007. Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool. *32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research*. Vol. 3, 1-10. Venice, Italy. Disponible en https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos/2007_Venice_Pressure_characterization_of_jets.pdf. Último acceso: octubre de 2019.
- Castillo, L.G. 2006. Aerated jets and pressure fluctuations in plunge pools. *The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006)*. Philadelphia, USA. Vol 7, 1-23. Disponible en https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/monografias/Philadelphia_USA_AeratedJets_2006.pdf. Último acceso: octubre de 2019.
- Castillo, L.G. 1989. *Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóveda*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M. 2016a. Pressures and Velocities Distributions in Plunge Pools. *2nd International Seminary of Dam Protection Against Over Topping*. Ft. Collins, Colorado, USA, 7-9 September.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M. 2016b. Scour, Velocities and Pressures Evaluations Produced by Spillway and Outlets of Dam. *Water*, 8(3), 68. <https://doi.org/10.3390/w8030068>
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., Blázquez, A. 2015. Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118. <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.968226>
- Castillo, L.G., Marco, F., Carrillo, J.M. 2018. Advances in the characterization of pressures and velocities in the overtopping arch and gravity dams. *3rd International Conference on Protection against Overtopping*, Grange Over Sands, UK, 6-8 June.
- Castillo, L.G., Puertas, J., Dolz, J. 1999. Discussion of "Pressure fluctuation on plunge pool floors". *Journal of Hydraulic Research*, 37(2), 272-288. <https://doi.org/10.1080/00221689909498311>
- Castillo L.G., Puertas J., Dolz, J. 2007. Discussion about Scour of Rock due to the impact of plunging high velocity jets. *Journal of Hydraulic Research*, 45(6), 715-723. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521823>
- Chassaing, P. 2000. *Turbulence en mécanique des fluides. Analyse du phénomène en vue de sa modélisation a l'usage de l'ingénieur*. POLYTECH. Cépadues-Editions, Toulouse.
- Davidson, P. A. 2004. *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*. Editorial Oxford University Press, ISBN-13:978-0198529491.

- Duarte, R.X.M. 2014. *Influence of Air Entrainment on Rock Scour Development and Block Stability in Plunge Pool*. PhD Thesis, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.
- Ervine, D.A., Falvey, H.R., Withers, W. 1997. Pressure fluctuations on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35(2), 257-279. <https://doi.org/10.1080/00221689709498430>
- Federspiel, M.P.E.A. 2011. *Response of an embedded block impacted by high-velocity jets*. PhD Thesis, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.
- FEMA. 2004. *Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams*. Federal Emergency Management Agency. October 1998. Reprinted January 2004. US Department of Homeland Security, USA.
- FEMA. 2013. *Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams*. Federal Emergency Management Agency. FEMA P-94, August. US Department of Homeland Security, USA.
- FEMA. 2014. *Technical Manual: Overtopping Protection for Dams*. Federal Emergency Management Agency. FEMA P-1014, May. US Department of Homeland Security, USA.
- Kolmogorov, A.N. 1941. *Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Number*. *Doklady Akademiyi Nauk SSSR*, 30, 299-303.
- Maleki, S., Fiorotto, V. 2019. Scour due to a Falling Plane Jet: A Comprehensive Approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001564](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001564)
- Manso, P.F.A.E. 2006. *The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets*. PhD Thesis, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.
- Moore, W.L. (1946). Energy loss at the base of a free overall. *Transaction, American Society of Civil Engineers*, 108, 1343-1360.
- Puertas, J. 1994. *Criterios hidráulicos para el diseño de cuencos de disipación de energía en presas bóveda con vertido libre por coronación*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Puertas, J., Dolz, J. 2005. Plunge Pool Pressures Due to a Falling Rectangular Jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5), 404-407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:5\(404\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:5(404))
- Wahl, T.L., Frizell, K.H., Cohen, E.A. 2008. Computing the trajectory of free jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), 256-260. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(256\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(256))
- Withers, W. 1991. *Pressure Fluctuations in the Plunge Pool of an Impinging Jet Spillway*. PhD Thesis, University of Glasgow, UK
- Xu-Duo-Ming 1983. *Pressao no fundo de um canal devido ao choque de um jacto plano, e suas características de fluctuacao*, Translation from chinese by J.A. Pinto de Campos, Lisboa.