

# Evaluación de las acciones hidrodinámicas a pie de presa por efecto del desbordamiento por coronación

Francisco Javier Pérez de la Cruz, Luis G. Castillo Elsitdié  
Grupo I+D+i Hidr@m - www.upct.es/hidrom/  
Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental, UPCT  
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena (Murcia)  
E-mail: fjpcruz@gmail.com, luis.castillo@upct.es

**Resumen.** En este artículo se presenta el tema de la tesis doctoral que en la actualidad está realizando el primer autor en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), sobre las acciones hidrodinámicas que se producen en las presas de fábrica cuando se realiza un vertido por coronación. Esta tesis es continuación de la línea de investigación iniciada en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y fruto de la cual ya se han leído tres tesis doctorales, así como de las posteriores investigaciones realizadas por el segundo autor y cuyos resultados se han publicado en diferentes congresos internacionales y revistas científicas.

## 1 Introducción

Una de las principales conclusiones de los estudios realizados sobre cambio climático es que en las zonas semiáridas los patrones de precipitación se concentrarán en menores intervalos temporales, lo que dará lugar a la presentación de tormentas más concentradas y destructivas, lo cual afectará al funcionamiento de las presas, su seguridad y a la disponibilidad del recurso con suficiente garantía.

En este contexto, las principales agencias de gestión del agua en Estados Unidos (Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, etc.), vienen estudiando desde hace algunos años los efectos de los sucesos extremos en las presas y, más concretamente, el desbordamiento por coronación, con el objetivo final de lograr un adecuado refuerzo y evitar de esta manera su destrucción (Annandale, 2006).

Para la cuantificación de estas acciones, se utilizan algunas formulaciones obtenidas a partir de mediciones de presiones sistematizadas en laboratorios de hidráulica. En Europa se destacan las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Glasgow (UK) (Ervine et al., 1997), la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (Bollaert and Schleiss, 2003) y en las Universidades Politécnicas de Cataluña UPC y de Cartagena UPCT (Castillo, 1989, Armengou, 1991, Puertas, 1994, Castillo, 1998, 2006, 2007 y Castillo et. al., 2007).

En la actualidad, en España, existen unas 1200 grandes presas en explotación, con un volumen de regulación de unos 46000 Hm<sup>3</sup>/año, que han hecho posible pasar de una regulación natural de recursos inferior al 9%, a unos recursos disponibles superiores al 40% de las aportaciones medias anuales, lo que nos sitúa en el entorno de disponibilidades de la media de los países europeos. Resulta por tanto imprescindible continuar en España esta línea de investigación.

## 2 Caracterización del fenómeno

La disipación de la energía en el vertido por coronación de presas de fábrica se realiza principalmente mediante la disgregación del chorro (aireación y atomización), la difusión en el cuenco y, finalmente, el impacto con la base del cuenco de disipación (ver Fig. 1). Es por ello que, tanto las condiciones a la salida del aliviadero (condiciones de vertido), como las condiciones de impacto se han de tener en cuenta a la hora de realizar el diseño.

Las condiciones de vertido se definen mediante el valor de la velocidad media  $V_i = (2gh_0)^{1/2}$ , siendo  $h_0$  aproximadamente el doble de la altura de energía  $h$ . Las condiciones de impacto (a la entrada del cuenco) vienen definidas por la velocidad media  $V_j$  y el ancho del chorro en el impacto  $B_j = B_g + \xi$ , siendo  $B_g$  el ancho por condiciones gravitatorias y  $\xi$  la distancia lateral de difusión del chorro por efectos de aireación y turbulencia (ver Fig. 2).

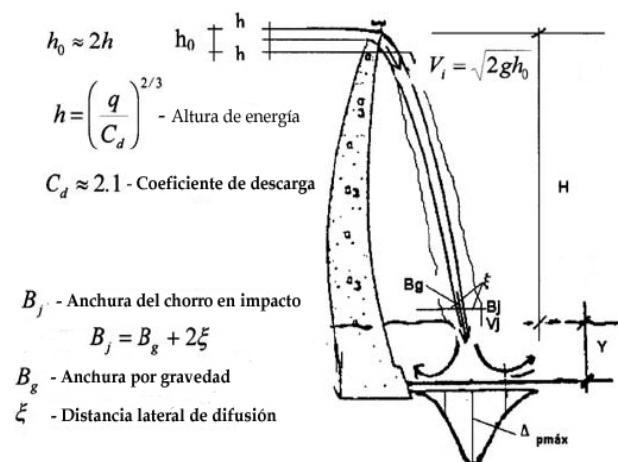


Figura 1. Vertido por coronación en una presa bóveda.

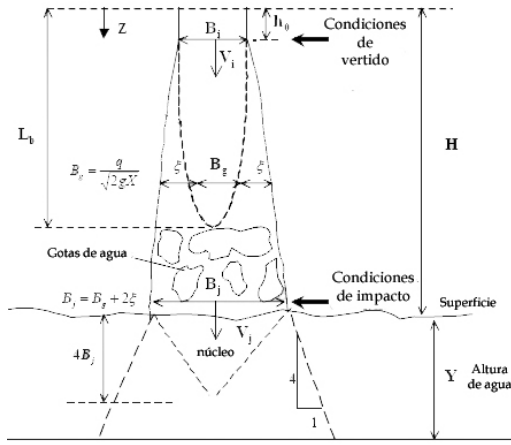


Figura 2. Esquema de comportamiento del chorro.

La longitud de rotura del chorro,  $L_b$ , es un parámetro muy importante. Cuando se supera esta distancia, el chorro está completamente desarrollado o desintegrado, desapareciendo el núcleo sólido y conteniendo únicamente grandes gotas de agua que a medida que siguen cayendo, se descomponen en gotas más y más pequeñas debido al rozamiento con el aire. Una vez que el chorro alcanza la superficie de agua del cuenco de disipación, se inicia el proceso de difusión, produciéndose la desintegración de la parte sólida del chorro a una profundidad de 4 veces el ancho del chorro en la zona de incidencia o de impacto  $B_j$ .

### 3 Registros de presiones

Los estudios realizados por Castillo (1989) y Puertas (1994) sobre las presiones instantáneas producidas en el cuenco son el punto de partida de la investigación a desarrollar en esta tesis. Las diferentes configuraciones del chorro estudiadas se muestran en la Fig. 3.

Según las conclusiones de Castillo (2007), en el caso de chorros sin desarrollar con colchones de agua poco profundos (Fig. 3. Caso a) los registros muestran un patrón constante con picos de presiones similares por encima y por debajo de la media, que disminuyen a medida que aumenta el colchón de agua en el cuenco. Es en este caso cuando la función de densidad de los registros de presiones se ajusta a una distribución normal.

En el caso de chorros desarrollados se registran presiones más fluctuantes, fenómeno que aumenta con la altura de caída y el colchón de agua.

### 4 Parámetros de cálculo

Del estudio de las presiones en el cuenco, se han definido diferentes parámetros de cálculo que se comentan a continuación (Castillo, 1998, 2006, Castillo et al., 2007).

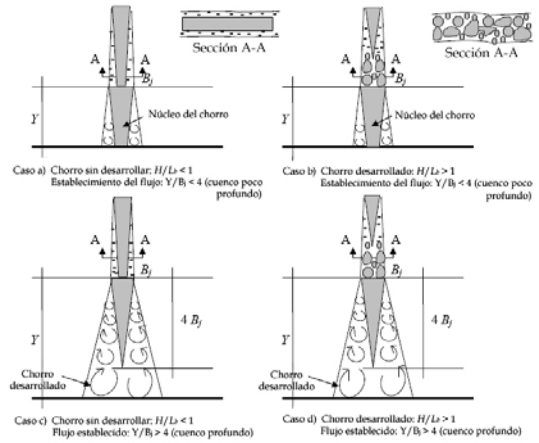


Figura 3. Esquemas de las diferentes configuraciones de chorro.

### 4.1 Intensidad de la turbulencia en condiciones de vertido ( $T_u^*$ ) y longitud de rotura del chorro ( $L_b$ )

Se toman como punto de partida de las formulaciones que se proponen para estimar los dos parámetros de cálculo, la ecuación experimental de longitud de rotura del chorro circular de Ervine et al. (1997) y la de chorro rectangular de Horeni (1956), resultando

$$T_u^* = \frac{q^{0.43}}{IC} \quad (1)$$

siendo  $q$  el caudal específico e  $IC$  las condiciones iniciales del vertido:

$$IC = \frac{14.95g^{0.50}}{K^{1.22}C_d^{0.19}} \quad (2)$$

donde el coeficiente de descarga  $C_d \approx 2.1$  para el caso usual de un aliviadero hidrodinámico y  $K \approx 0.85$ .

La longitud de rotura del chorro se estima con:

$$\frac{L_b}{B_i F_i^2} = \frac{0.85}{(1.07 T_u F_i^2)^{0.82}} \quad (3)$$

donde  $B_i$  y  $F_i$  son la anchura del chorro y el número de Froude en condiciones de vertido y,  $T_u$  es la intensidad inicial de la turbulencia correspondiente y que está comprendida entre 0 y 3%.

### 4.2 Anchura del chorro en condiciones de impacto ( $B_j$ )

Como ya se indicó, la anchura del chorro en condiciones de impacto viene dada por la expresión:

$$B_j = B_n + 2\xi \quad (4)$$

Según Ervine et al. (1997):

$$\xi = kv't = k \left( \frac{v'}{V_i} \right) V_i \frac{V_j - V_i}{g} \quad (5)$$

Partiendo de esta ecuación se define un nuevo parámetro de turbulencia  $\varphi = k(v'/V_i)$ , siendo  $k$  el coeficiente de la distancia lateral de difusión,  $t$  es el tiempo caída del chorro y  $v'$  la componente de la turbulencia en la dirección principal del flujo.  $V_i$  y  $V_j$  son las velocidades medias en condiciones de vertido e impacto respectivamente.

Sustituyendo en la ecuación (5) las velocidades medias correspondientes, se obtiene que

$$\xi = 2\varphi\sqrt{h_0} \left[ \sqrt{H} - \sqrt{h_0} \right] \quad (6)$$

siendo  $H$  la diferencia entre los niveles de agua en el vertido y en el cuenco y  $\varphi = 1.07T_u^*$  (Castillo 2006).

La expresión de la anchura del chorro en condiciones de impacto queda de la siguiente forma:

$$B_j = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h_0} \left[ \sqrt{H} - \sqrt{h_0} \right] \quad (7)$$

### 4.3 Coeficientes de presión dinámica media ( $C_p$ ) y fluctuante ( $C'_p$ )

Castillo (1998) realizó un nuevo análisis con los datos existentes a la fecha y propuso formulaciones del coeficiente de presión dinámica media  $C_p = f(Y/B_j, H/L_b)$ . En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos comparándolos con los de otros autores (chorros circulares y rectangulares).

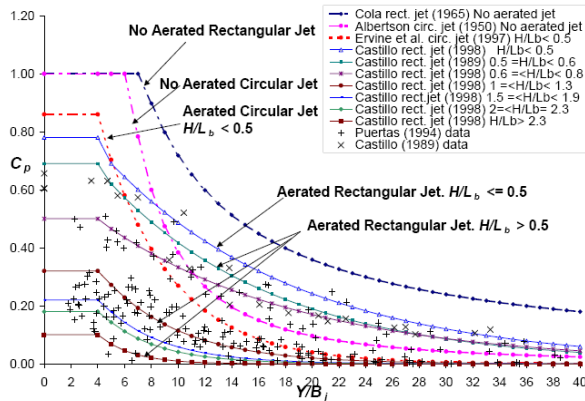


Figura 4. Coeficientes de presión dinámica media  $C_p$ .

Se puede observar que para  $H/L_b \leq 0.5$ , resulta una única curva de cálculo. Sin embargo para  $H/L_b > 0.5$  se obtiene una familia de curvas en función de éste parámetro.

Se comprueba de la Figura anterior que la desintegración de la fase sólida del chorro se produce

a una profundidad aproximada de cuatro veces la anchura de impacto ( $Y < 4B_j$ ). Para este rango el colchón de agua del cuenco es ineficaz (no se produce disipación de energía por difusión) y se obtiene el coeficiente de presión dinámica media en la solera del cuenco  $C_p$  y, la correspondiente disipación de energía del chorro en el aire y por el arrastre del mismo dentro del cuenco  $DE_{air}$ :

$$C_p = 0.36(H/L_b)^{-1.04} \quad (8)$$

$$DE_{air} = 1 - 0.36(H/L_b)^{-1.04} \quad (9)$$

Para valores de  $H/L_b > 0.5$ , se propone la siguiente ley exponencial:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g} = ae^{-b(Y/B_j)} \quad (10)$$

siendo  $H_m$  la carga media e  $Y$  la profundidad de agua en el cuenco. Los valores de  $a$  y  $b$ , así como el valor de  $C_p$ , vienen reflejados en la siguiente tabla:

$H/L_b$	$a$	$b$	$C_p$ ( $Y/B_j \leq 4$ )
< 0.5	0.98	0.070	0.78
0.5-0.6	0.92	0.079	0.69
0.6-0.8	0.65	0.067	0.50
1.0-1.3	0.65	0.174	0.32
1.5-1.9	0.55	0.225	0.22
2.0-2.3	0.50	0.250	0.18
> 2.3	0.50	0.400	0.10

Tabla 1. Parámetros  $a$  y  $b$  para el cálculo de  $C_p$ .

Las fluctuaciones de presión de la raíz cuadrática media se definen como  $C'_p = H'/(V_j^2/2g)$  donde  $H'$  es el valor la raíz cuadrática media de las fluctuaciones de la carga de presión.

La Fig. 5 muestra los resultados para diferentes intensidades de la turbulencia,  $T_u$ , (Bollaert 2002, chorro circular) y del parámetro  $H/L_b$  (Castillo 2006, vertido libre o chorro rectangular).

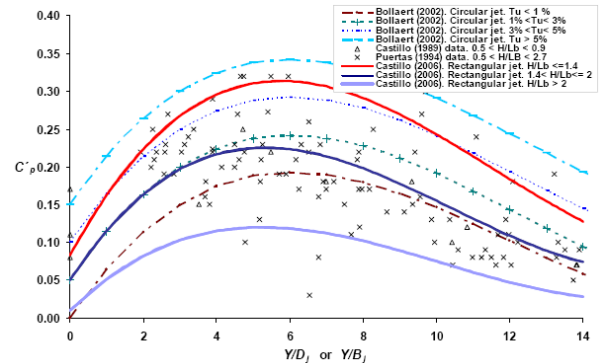


Figura 5. Coeficientes de presión dinámica fluctuante  $C'_p$ .

#### 4.4 Coeficientes de presión dinámica extrema ( $C_p^+$ y $C_p^-$ ).

Las Fig. 6 y 7 muestran los valores de los coeficientes de presión dinámica extrema positiva ( $C_p^+$ ) y negativa ( $C_p^-$ ).

$$C_p^+ = \frac{P_{\max} - H_m}{V_j^2 / 2g} \quad (10)$$

$$C_p^- = \frac{H_m - P_{\min}}{V_j^2 / 2g} \quad (11)$$

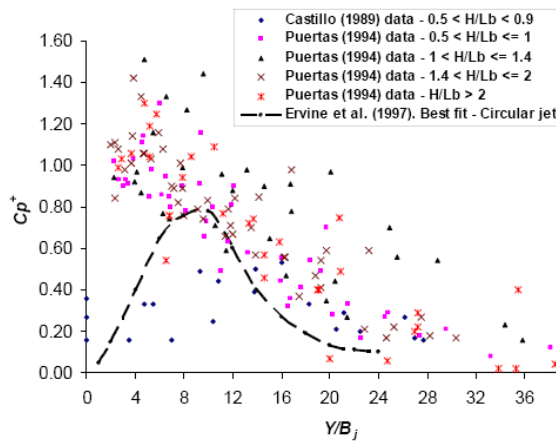


Figura 6. Coeficientes de presión dinámica extrema positiva  $C_p^+$ .

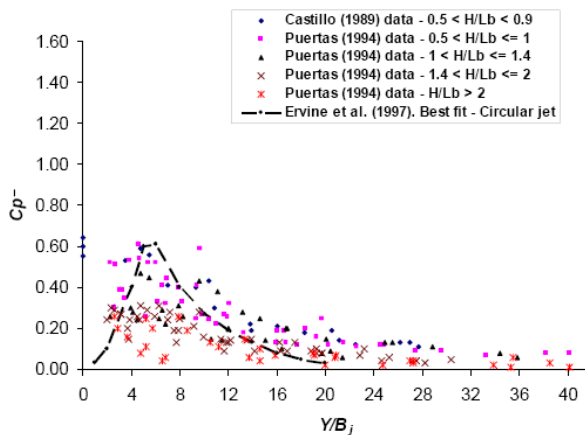


Figura 7. Coeficientes de presión dinámica extrema negativa  $C_p^-$ .

Los valores obtenidos no permiten realizar ningún tipo de ajuste.

Los valores extremos positivos medidos son muy superiores a los datos que se pueden encontrar en la literatura existente (Ervine et al. 1997 and Bollaert et al. 2003). El valor máximo obtenido es de  $C_p^+ \sim 1.3$  para la relación  $Y/B_j = 8$ .

Los valores extremos negativos se ajustan más a los datos ya publicados, obteniéndose un valor máximo de  $C_p^- \sim 0.6$  para la relación  $Y/B_j = 6$ .

Todas las formulaciones recogidas en este epígrafe 4 y sus diferentes actualizaciones y modificaciones se han venido publicando en diferentes congresos internacionales y revistas científicas (Castillo et al., 2007; Castillo, 2007; Castillo, 2006; Castillo, 2002; Castillo et al., 1999; Annandale, 2006; Bollaert et al., 2003; Ervine et al., 1997, Hager et al., 2007). Puesto que la metodología de cálculo se basa exclusivamente en el resultado de las mediciones de presiones instantáneas en el fondo del cuenco, consideramos necesario, para avanzar en el conocimiento de esta temática, realizar más estudios experimentales, tanto en modelos físicos como en prototipos, caracterizando simultáneamente presiones, velocidades y las diferentes tasas de aireación.

## 5 Adquisición de datos

Con este fin se ha construido en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la UPCT una infraestructura destinada a la toma de datos de las diferentes variables.

### 5.1 Descripción de la infraestructura

La infraestructura para el estudio de chorros turbulentos y disipación de energía que permitirá estudiar fenómenos bifásicos (agua-aire) (aireación-atomización, difusión e impacto) consta de un dispositivo móvil que permite obtener alturas de vertido de entre 1,70 y 4 m con unos caudales entre 30 y 150 l/s, un cuenco fijo de disipación de energía de metacrilato donde se realizarán medidas de presión, velocidad y aireación y, un canal de desagüe donde se dispone un aforador triangular (ver Fig. 8).

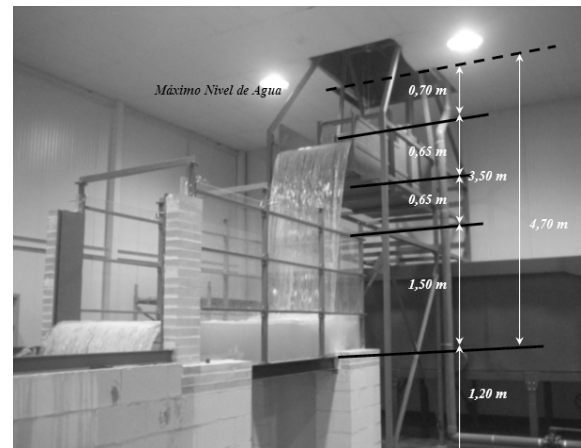


Figura 8. Infraestructura para el estudio de chorros turbulentos.

### 5.2 Instrumentación

Para realizar las mediciones se cuenta con la siguiente instrumentación:

- 1) Medidores de velocidades instantáneas (acoustic Doppler velocimeters, ADV).
- 2) Transductores de presiones instantáneas piezoeléctricos.

- 3) Equipos de fotografía y vídeo de alta velocidad.
- 4) Equipo de fibra óptica para la medición de concentración de aire, velocidad de aire y distribución de tamaños de burbujas.

Todos estos elementos de medida cuentan con una serie de dispositivos electromecánicos que permiten automatizar los diferentes procesos de medida.

## 6 Conclusiones

Con el fin de mejorar el diseño de estructuras de disipación de energía en presas de fábrica y adaptarlas a los nuevos condicionantes de seguridad de presas y los diversos requerimientos medioambientales, es necesario avanzar en el conocimiento y caracterización de las acciones hidrodinámicas que se presentan en las mismas.

A los estudios ya realizados sobre medidas de presiones en el cuenco, se han de añadir investigaciones relacionadas con los fenómenos de aireación producidos en el chorro, así como medidas de velocidades en el cuenco de disipación.

Este es el objetivo de la tesis doctoral que está llevando a cabo el primer autor, cuyos resultados y conclusiones contribuirán a avanzar en el conocimiento de estos fenómenos.

## Agradecimientos

Al Prof. Dr. Jerónimo Puertas (Universidad de La Coruña, UDC) y al Prof. Dr. José Dolz (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC) por los datos experimentales facilitados.

Parte de este Proyecto de investigación ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto BIA2003-08635-C03-03.

## Referencias

- [1] Annandale, G.W. *Scour Technology. Mechanics and Engineering Practice*. McGraw-Hill, New York, USA, 2006.
- [2] Bollaert, E., Schleiss, A. *Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No.5, pp. 451-464, 2003.
- [3] Castillo, L. *Revisión de las formulaciones de presión en los disipadores de energía en presas bóveda y corrección del coeficiente de presión*

*dinámica*. Comunicación personal. No publicado, 1998.

- [4] Castillo, L. *Parametric analysis of the ultimate scour and mean dynamic pressures at plunge pools*. Proceedings of the International Workshop on Rock Scour due to Falling High-velocity Jets. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 25-28 september 2002. Schleiss & Bollaert (eds). A.A. Balkema. ISBN 90 5809 518 5, 2002.
- [5] Castillo, L. *Areated jets and pressure fluctuation in plunge pools*. The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), IAHR, ASCE Environment and Water Resources Institute, Drexel University. College of Engineering. DSpace Digital Lybrary. DU Haggerty Library (22 pages). Philadelphia, USA, 2006.
- [6] Castillo, L. *Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool*. 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research, Vol.2, pp. 645-655, Venice, Italy, July. 2007.
- [7] Castillo, L., Puertas, J., Dolz, J. *Discussion about pressure fluctuations on plunge pool floors*. Journal of Hydraulic Research, Vol.37, No.2, pp. 272-788, 1999.
- [8] Castillo, L.; Puertas, J. and Dolz, J. *Discussion about Scour of Rock due to the impact of plunging high velocity jets*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 6, pp. 715-723, 2007.
- [9] CEDEX. *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático sobre recursos hídricos y demandas de agua de riego en determinadas regiones de España*. Informe para MMA, 1997.
- [10] Irvine, D.A., Falvey, H.T., Withers, W.A. *Pressure fluctuations on plunge pool floors*. Journal of Hydraulic Research. Vol. 35, No. 2, pp. 257-279, 1997.
- [11] Hager, W.H., Unger, J. *Book Review: Scour Technology. By George W. Annandale*. McGraw-Hill, New York, USA. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 5, pp. 719-720, 2007.