

# INFLUENCIA DE LA RAMA DE ASCENSO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA DE LOS ALIVIADEROS DE PERFIL ESTRICTO

Antonio Moñino<sup>1</sup>, Miguel Ángel Losada<sup>1</sup> y Jaime Riera<sup>2</sup>

## Resumen:

Este trabajo presenta un estudio de la influencia de la rama ascendente de la cresta del aliviadero de perfil estricto, aquél cuya geometría adopta la forma de la cara inferior de una lámina vertiente sobre vertedero en pared delgada, en el proceso de desagüe. Las alteraciones geométricas de la rama ascendente con respecto al criterio convencional de diseño propuesto por el U.S. Bureau of Reclamation, conducen a variaciones en la eficiencia de la descarga y la carga sobre la cresta, esto es, en los niveles de embalse aguas arriba.

Partiendo de la formulación analítica del problema del vertedero, se identifican tres regímenes característicos de funcionamiento, vertedero somero, intermedio y profundo, el último de los cuales gobierna el funcionamiento de la mayoría de aliviaderos de presas. Bajo este enfoque, se ha desarrollado un programa experimental que ha permitido cuantificar la influencia de la geometría del perfil en el régimen de descarga, encontrándose una nueva geometría de diseño simple que garantiza igual o mejor respuesta hidráulica que la del perfil clásico. Se ha verificado experimentalmente, no obstante, que la mejora en la descarga no supone un riesgo de daños por cavitación.

**Palabras clave:** vertedero, aliviadero, descarga, geometría de vertido, rama ascendente.

## INTRODUCCIÓN

Un dispositivo preciso para el aforo del caudal en un flujo en régimen libre es el vertedero en pared delgada. El caudal transportado por el flujo puede ser evaluado mediante expresiones que dependen de la altura de lámina sobre la cresta, el ancho de la sección de vertido y un coeficiente de desagüe, este último representando los efectos locales de contracción de la vena líquida y la fricción.

En el caso del aliviadero de una presa, donde igualmente resulta necesario disponer de una medida precisa del caudal vertiente, la magnitud de las variables físicas que intervienen en el problema dificulta la utilización de aforadores en pared delgada. Por esta razón, se utilizan vertederos de perfil estricto, cuya geometría se adapta a la que tendría una lámina vertiente en pared delgada bajo

iguales condiciones de carga y régimen de aproximación.

Los problemas del vertedero de pared delgada y de perfil estricto quedan definidos por las mismas variables. No obstante, para el último de ellos debe tenerse en consideración la influencia de la geometría, la cual condiciona el valor del coeficiente de desagüe y la carga de agua sobre la coronación, debiéndose prestar especial atención al cuadrante de aguas arriba.

Los criterios generales para el diseño de perfiles y cálculo de curvas características han sido propuestos por el U.S. Bureau of Reclamation, en adelante USBR, USBR (1948). La incertidumbre más destacada al aplicar este método surge cuando el dispositivo funciona bajo caudales pequeños, Riera & Moñino (1998).

<sup>1</sup>Grupo de Puertos y Costas, Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada. Avenida del Mediterráneo, s/n, 18006, Granada, España. e-mail: amonino@ugr.es, mlosada@ugr.es Tf.:958 24 10 00, ext. 31161

<sup>2</sup>Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Avenida de Madrid, nº 7, 18071, Granada, España. Tf: 958 28 24 00

Artículo recibido el 27 de mayo de 2004, recibido en forma revisada el 7 de abril de 2005 y aceptado para publicación el 27 de diciembre de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Sin embargo, la construcción de los aliviaderos de la presa Boulder (1930-1940), con la magnitud de los caudales de vertido considerados para su diseño, planteó la necesidad de disponer de una herramienta precisa para el proyecto de aliviaderos y la determinación del régimen de descarga. Por esta razón, el USBR desarrolló un exhaustivo programa de ensayos encaminados a completar tales fines. El resultado de estos ensayos fue la elaboración de una metodología que ha quedado plasmada en un conjunto de publicaciones especializadas, las cuales han ido viendo la luz a partir de entonces, USBR (1948, 1970), U.S. Army Corps of Engineers (1995). En esta metodología, la cual apenas ha sufrido revisión desde entonces, queda de relieve la importancia de un adecuado diseño de la geometría del perfil. Los trabajos de USBR han servido también como base para el desarrollo de programas experimentales aplicados a aspectos específicos de los aliviaderos tales como los coeficientes de desagüe y la distribución de presiones, Abecasis (1961), Lemos (1981), a casos particulares de aliviaderos y estructuras disipadoras, Peterka (1963), Melshemer & Murphy (1970), o bien a aliviaderos de geometrías que podrían clasificarse de irregulares, Bradley (1952), en el sentido de que difieren ligeramente de los criterios inicialmente propuestos; las conclusiones de estas investigaciones pueden resultar complicadas de aplicar a casos fuera de los registrados en esa documentación.

Durante la última década, y fuera del ámbito del USBR, se han hecho nuevas revisiones del problema del vertido sobre un aliviadero de perfil estricto, cuyo concepto se define más adelante. Estas revisiones han sido conducidas a la luz tanto de modelos físicos, como de modelos numéricos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional, Hager (1992), Olsen & Kjellesvig (1998), Wen et al. (1998). No obstante, el punto de partida del desarrollo y puesta en funcionamiento de esos modelos se fundamenta en datos de diseño propuestos por el USBR, no existiendo nuevas revisiones sobre la influencia de la geometría de la rama ascendente del perfil en el comportamiento del flujo. Por otra parte, el avance en las técnicas constructivas han propiciado el desarrollo de modificaciones en el diseño de los aliviaderos, tales como los aliviaderos en laberinto, Falvey (2003), o los aliviaderos escalonados, Rajaratnam (1990), Diez-Gascón et al (1991), Christodoulou (1993), Chanson (1996), Rice & Kadavy (1996). Si bien para los primeros el uso conjunto con vertederos de perfil estricto no está generalizado, para los

segundos la modificación en el diseño se orienta claramente hacia la disipación de la energía aguas debajo de la cresta y sus efectos en cuencos de resalto y otras estructuras, conservándose la geometría de la coronación como la de un aliviadero de perfil estricto convencional, Moñino (1999).

Este trabajo presenta nueva información, basada en el análisis dimensional y metodología empírica, para evaluar las características de la descarga del aliviadero en función de la modificación del cuadrante ascendente del perfil de coronación. Puesto que las ramas de ascenso estudiadas cubren un rango de geometrías que representan una evolución continua entre formas extremas, los resultados pueden ser aplicados a otros perfiles incluidos en el rango. La conclusión principal es que la rama ascendente definida con un chaflán en talud 1:1 proporciona un comportamiento hidráulico igual o mejor que el perfil estándar del USBR, siendo además mucho más simple en su diseño y ejecución material.

## ECUACIONES DE GOBIERNO Y RÉGIMENES DE VERTIDO

La figura 1 muestra las variables que caracterizan el proceso de desagüe sobre un vertedero en pared delgada, en función del plano de comparación elegido. Las cargas  $H_s$  y  $h_s$  medidas en puntos lejano y próximo a la cresta se relacionan a través de la altura de velocidad  $h_a = u_a^2/2g$  en la forma  $H_s = h_s + h_a$ . En la citada figura también se hace referencia a la máxima elevación  $E$  alcanzada por la cara inferior de la lámina vertiente sobre la cresta.

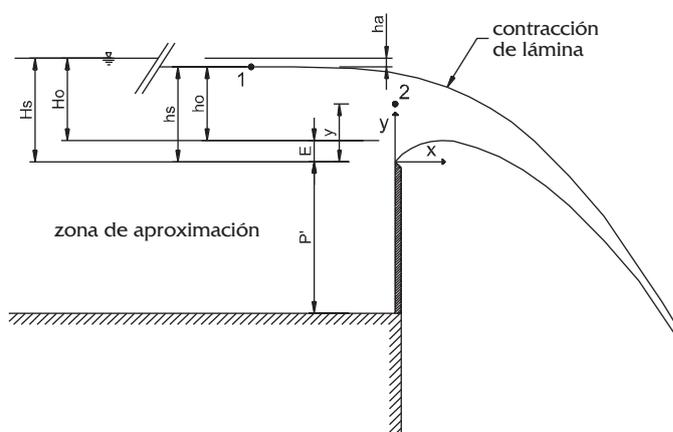


Figura 1. Variables de gobierno en el problema del vertedero en pared delgada.

Tomando como nivel de referencia el plano de la cresta del vertedero, y aplicando la ecuación de la energía a entre los puntos 1, alejado de la cresta, y 2, en la sección de vertido, puede ser calculada la velocidad  $u_2$  en un punto de la sección de vertido:

$$u_2 = \sqrt{2g \left( h_s - y + \frac{u_a^2}{2g} \right)} \quad (1)$$

siendo  $h_s$  e  $y$  la carga y la elevación respectivamente, medidas sobre la cresta, y  $u_a$  la velocidad de aproximación. En la deducción de (1) se ha considerado que las presiones en los puntos 1 y 2 son iguales a la atmosférica, o nulas en términos manométricos, y no han sido incluidas las pérdidas de carga entre ambos puntos. A partir de la velocidad el caudal  $Q$  vertido se determina por integración directa de la ecuación de continuidad:

$$Q = \int u_2 dS_c = C_d \int u_2 dS_c = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H_s^{3/2} \left( 1 - \left( \frac{h_a}{H_s} \right)^{3/2} \right) \quad (2)$$

La integral, inicialmente extendida a cada elemento diferencial de superficie  $dS_c$  de la vena contracta, puede ser relacionado con una sección situada aguas arriba a través de un coeficiente de contracción. Si además se incluyen los efectos de distribución no hidrostática de presiones y fricción, todo ello puede ser englobado en un único coeficiente de descarga  $C_d$ , cuyo valor se encuentra comprendido entre 0 y 1.

Aplicando el análisis dimensional a la relación explícita (2), la descarga adimensionalizada  $\Phi$  puede ser expresada en función de la carga  $H_s$ , la carga de velocidad  $h_a$ , el coeficiente  $C_d$  y el calado de aproximación  $P'$  en la forma:

$$\Phi \equiv \frac{Q}{\sqrt{2g} H_s^{3/2} P' L} = \frac{2}{3} C_d \frac{H_s}{P'} \left( 1 - \left( \frac{h_a}{H_s} \right)^{3/2} \right) \quad (3)$$

la cual representa la relación funcional:

$$\Phi = f \left( C_d, \frac{H_s}{P'}, \frac{h_a}{H_s} \right) \quad (4)$$

El coeficiente de descarga, que en sí mismo es una magnitud adimensional, representa en realidad un coeficiente de ajuste, de forma que quedaría fuera del funcional. Sin embargo, se ha conservado dentro del funcional para enfatizar su influencia en ciertas condiciones. La expresión (4) permite definir los factores de profundidad  $H_s/P'$  y velocidad  $h_a/H_s$ , a partir de los cuales identificar

los regímenes de trabajo de un vertedero:

- Vertederos profundos, en los que el factor de profundidad  $H_s/P' \ll 1$ , y en consecuencia el factor de velocidad  $h_a/H_s \ll 1$ . Esto supone a partir de (4) que  $\Phi$  no depende esencialmente de ninguno de ellos, de forma tal que la descarga sólo viene influida por aquellos parámetros que determinan el coeficiente de desagüe  $C_d$ , es decir, los relativos a la contracción del flujo y la geometría de la lámina esencialmente. En otras palabras, el proceso de vertido será más sensible a variaciones en la geometría y las condiciones de aproximación que a cambios en la carga sobre coronación, de modo que el coeficiente  $C_d$  ejerce sobre el problema una influencia superior a la que viene dada por los factores de profundidad y velocidad. Ese comportamiento es igualmente aplicable al vertedero de perfil estricto.

- Vertederos intermedios, en los cuales es  $H_s/P' [ 1$ . En estas condiciones la relación (4) puede ser aplicada en toda su amplitud.

- Vertederos someros, en los cuales  $H_s/P' \cong 1$ . Este es el caso de pequeñas presas de derivación y azudes. Ahora el factor de velocidad no resulta despreciable. En consecuencia, el coeficiente de descarga no influye realmente en el proceso de desagüe, quedando en última instancia dominado por efectos cinemáticos del flujo; las características del vertido no se verán sensiblemente modificadas por variación en los parámetros geométricos. La razón para este comportamiento se encuentra en que un vertedero somero presenta un funcionamiento hidráulico que comienza a aproximarse a un vertedero de pared gruesa en régimen crítico, cuyo coeficiente de desagüe tiende al valor constante de 0.58 aproximadamente. En tal situación la geometría ya no es el factor determinante del proceso de descarga en la medida en que no afecte a la dinámica del flujo de aproximación. La siguiente sección incide en este aspecto aplicado al vertedero de perfil estricto.

Desde el punto de vista del diseño aplicado, el límite para establecer el comportamiento como vertedero profundo puede establecerse para valores del factor de profundidad  $H_s/P' [ 0.33$ , Moñino (2004), representando el límite por debajo del cual el coeficiente de desagüe en un vertedero de perfil estricto, definido en la siguiente sección, adopta el valor constante 0.737.

**DESCARGA SOBRE VERTEDEROS DE PERFIL ESTRICTO**

Cuando los criterios constructivos no aconsejan la utilización de un vertedero en pared delgada, pero se desea disponer de un dispositivo de control de análogo funcionamiento, en el cual el caudal puede ser determinado mediante la lectura directa de la carga sobre coronación, la solución consiste en la construcción de un vertedero adaptado a la geometría inferior de una lámina vertiente en pared delgada. La figura 2 muestra la elección de variables, referidas esta vez a la coronación del perfil. El punto de comienzo de la rama ascendente coincide con la posición imaginaria de la cresta del vertedero en pared delgada asociado.

La carga de diseño  $H_0$  es aquella que medida sobre la coronación del perfil genera, para un caudal  $Q_0$  asociado, una lámina cuya geometría es la misma que la de una lámina vertiente sobre un vertedero en pared delgada bajo una carga  $H_s = H_0 + E$  y con el mismo calado de aproximación  $P'$  que el del aliviadero. En realidad, dada una elección de  $Q_0$  y  $P = P' + E$  impuesta por requisitos constructivos, el procedimiento usual es considerar una carga  $H_0$  adecuada en términos del régimen de funcionamiento y los niveles de embalse aguas arriba. Sin embargo, y pensando en términos del vertedero en pared delgada asociado, el proceso de cálculo geométrico consiste en realidad en determinar la elevación  $E$  que permite obtener el valor de  $P'$  correspondiente al vertedero en pared delgada, toda vez que el valor de  $P$  ha sido elegido.

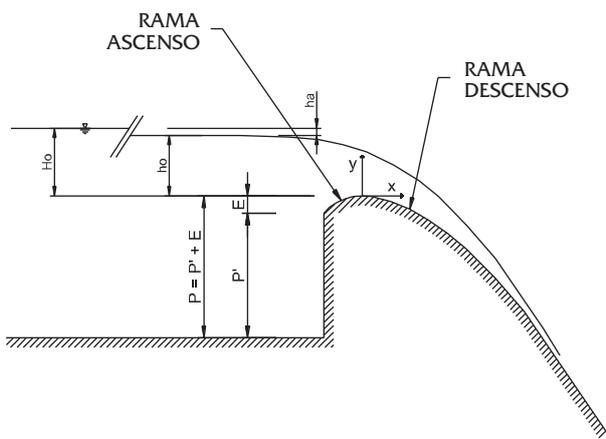


Figura 2. Variables de gobierno para el vertedero de perfil estricto.

Aplicando un formalismo semejante al caso del vertedero en pared delgada, la descarga adimensionalizada  $\Phi_e$  puede ser expresada en la forma:

$$\Phi_e = f\left(C_e, \frac{H_e}{P}, \frac{h_e}{H_e}\right) \tag{5}$$

o bien de manera explícita:

$$\Phi_e = \frac{Q_e}{\sqrt{2gH_e^{1/2}PL}} = \frac{2}{3}C_e \frac{H_e}{P} \left[1 - \left(\frac{h_e}{H_e}\right)^{3/2}\right] \tag{6}$$

En el caso de régimen de vertedero profundo, la expresión (6) se reduce a:

$$\Phi_e = \frac{Q}{\sqrt{2gH_e^{1/2}PL}} = \frac{2}{3}C_e \frac{H_e}{P} \tag{7}$$

en la cual  $H_e$  representa una carga genérica sobre coronación para condiciones  $\Phi_e/\Phi_0 \neq 1$ ,  $Q_e/Q_0 \neq 1$ ,  $H_e/H_0 \neq 1$  y  $C_e/C_0 \neq 1$  diferentes a las de diseño. El resultado (7) no se encuentra en desacuerdo con la definición conceptual de vertedero profundo hecha a partir de (4), ya que simplemente indica que en el caso de que los factores de profundidad y velocidad sean suficientemente bajos, la descarga adimensionalizada  $\Phi_e$  es más sensible al coeficiente de desagüe  $C_e$  que a la relación  $H_e/P$ . El coeficiente de diseño  $C_0$  puede ser calculado a partir del ábaco de la figura 3, Moñino (2004). En ella se muestra cómo para un aliviadero en régimen de vertedero profundo el coeficiente de desagüe adopta el valor máximo  $C_0 \approx 0.737$ , lo que en términos de funcionamiento hidráulico se traduce en unas condiciones de vertido óptimas. En el extremo opuesto, para un vertedero somero el coeficiente adopta un valor que tiende a mantenerse constante y próximo a 0.6, acercando el funcionamiento al de un vertedero en pared gruesa con régimen crítico: es en esa situación cuando a partir de (5) la respuesta del sistema pasa a depender principalmente de las condiciones cinemáticas, resultando despreciables los efectos geométricos en tanto que no afecten a la dinámica del flujo de aproximación.

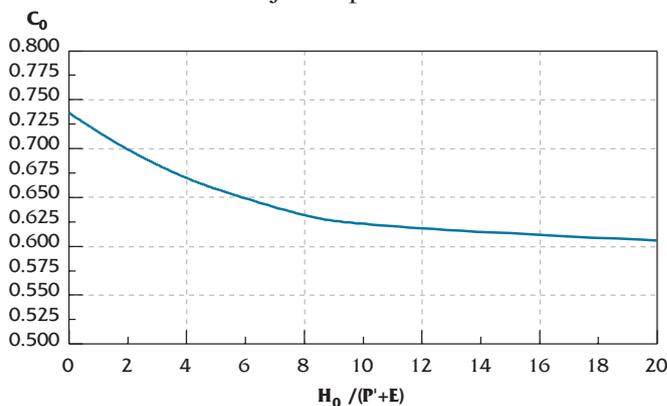


Figura 3. Coeficiente de desagüe  $C_0$ , Moñino (2004).

# INFLUENCIA DE LA RAMA DE ASCENSO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA DE LOS ALIVIADEROS DE PERFIL ESTRICTO

La relación  $C_e/C_0$  para  $H_e/H_0 \neq 1$  puede ser deducida a partir de la expresión, Moñino (2004):

$$\frac{C_e}{C_0} = -0.005 \frac{H_e}{H_0} + 0.49 \left( \frac{H_e}{H_0} \right)^{0.35} + 0.51 \left( \frac{H_e}{H_0} \right)^{-0.07} \quad (8)$$

La ecuación (7) informa sobre las características de desagüe de los aliviaderos en régimen profundo. Es posible obtener a partir de ella una curva de descarga compacta aplicable a vertederos dentro de un régimen dado, Riera & Moñino (1998), Moñino (2004), en la forma:

$$\frac{H_e}{P} = A \Phi_e^B \quad (9)$$

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE LA RAMA ASCENDENTE

El objetivo del estudio ha sido evaluar la influencia de la rama ascendente en el proceso de desagüe sobre el aliviadero, esto es, los efectos en la relación entre el caudal vertido y la carga sobre coronación. Partiendo de un aliviadero de perfil estricto diseñado de acuerdo el formalismo del USBR y bajo condiciones de vertedero profundo, véase la tabla 1, se ha reemplazado su rama ascendente por un conjunto de geometrías que representen una evolución entre formas extremas, entre las cuales la definición del USBR representa un estado intermedio. El conjunto de ramas ascendentes se muestra en la figura 4.

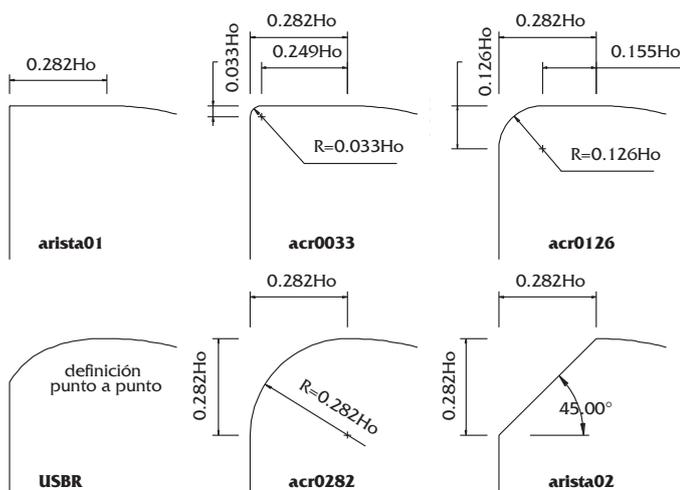


Figura 4. Ramas de ascenso ensayadas.

La rama descendente, definida de acuerdo con un perfil Bradley de expresión analítica:

$$\frac{y}{H_0} = -0.50 \left( \frac{x}{H_0} \right)^{1.87} \quad (10)$$

no ha sido modificada en ningún caso. Puesto que todo el tratamiento se encuentra adimensionalizado, los resultados son aplicables a cualquier aliviadero en régimen de vertedero profundo que tenga los mismos valores característicos que los indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño para el perfil del USBR.

$H_0/P$	0.10
$H_s/P'$	0.12
$h_a/H_s$	$\approx 0.002$
$E/H_s$	0.11
$C_0$	$\approx 0.737$
$\Phi_0$	0.050

Los resultados del estudio se muestran en la figura 5, en la que para cada geometría se ha representado  $H_e/P$  frente a  $\Phi_e$ . Tal como puede observarse, la menor carga sobre coronación, para un caudal dado se obtiene cuando la rama de ascenso es del tipo arista02, seguida de cerca por el tipo acr0282. De este modo, se logra que un mismo caudal sea desaguado bajo un nivel de embalse notablemente inferior al caso de que la geometría sea la correspondiente al perfil tipo USBR; en el otro extremo, el perfil tipo arista01 resulta en la descarga más deficiente de todas las observadas.

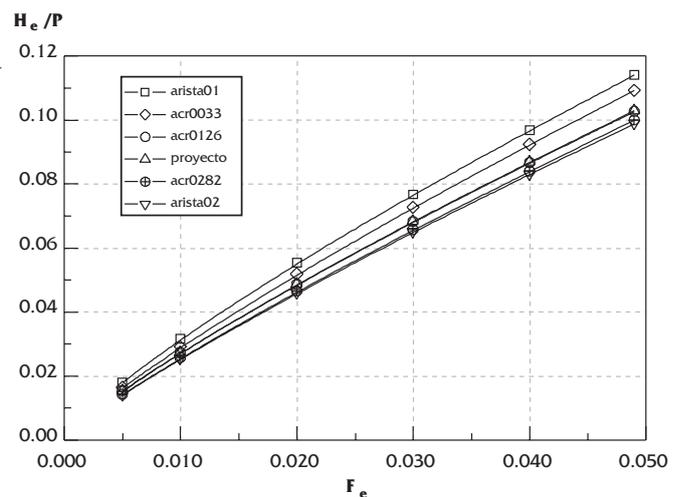


Figura 5. Curvas de descarga para las geometrías estudiadas.

De acuerdo con lo anterior, a partir de la figura 6.1 puede cuantificarse el efecto de la alteración de la geometría de ascenso sobre el proceso de descarga.

Para tal fin se ha estudiado la variación de la relación  $H_e/H_{e\text{ teo}}$  en función del cociente  $H_{e\text{ teo}}/H_0$ , es decir, para cada  $\Phi_e$  se ha determinado en cuánto se ve modificada la carga real  $H_e$  sobre coronación con respecto a la teóricamente correspondiente a esa descarga,  $H_{e\text{ teo}}$ , en función del valor de la carga teórica con respecto a la de diseño, es decir, la relación  $H_{e\text{ teo}}/H_0$ . Cabe destacar que  $H_{e\text{ teo}}$  designa la carga deducida a partir del formalismo de cálculo del USBR, el cual se fundamenta en realidad sobre argumentos empíricos.

Según la figura 6.1, la relación  $H_e/H_{e\text{ teo}}$  adopta los valores más bajos para el perfil arista02, llegando a dar valores inferiores a 1 en el caso del perfil tipo arista02 cuando la carga teórica se asemeja a la de diseño. Manteniendo el mismo significado para los subíndices, la mejora en el vertido revela un aumento de la relación  $C_e/C_{e\text{ teo}}$  frente a  $C_{e\text{ teo}}/C_0$  de acuerdo con la figura 6.2, obteniéndose los valores mayores respecto al perfil USBR para el perfil arista02. Al igual que para la figura 6.1, se ha tomado como referencia la relación  $H_e/H_{e\text{ teo}}$ , dado que ese aumento en la eficiencia de la descarga tiene lugar por razón de la aparición de presiones manométricas negativas, presiones subatmosféricas, en la coronación del perfil.

Tabla 2. Parámetros de diseño para el perfil del USBR.

$H_0/P$	0.6
$H_s/P'$	0.71
$h_a/H_s$	$\approx 0.03$
$E/H_s$	0.10
$C_0$	$\approx 0.732$
$\Phi_0$	0.29

Las presiones negativas sobre la coronación pueden ser admisibles, en el sentido de que no supongan un riesgo de daños por cavitación, siempre que su magnitud no supere el valor de  $0.5H_0$ , o bien  $0.5h_{atm}$ , lo cual queda garantizado en tanto que  $H_{e\text{ max}}/H_0 < 1.33$ , USBR (1948, 1970). Dado que ha quedado probado experimentalmente que el perfil tipo arista02 da igual o mejor respuesta hidráulica que el perfil tipo USBR, solamente resta comprobar que el desarrollo de presiones negativas sobre la coronación del perfil no supone un riesgo de daños por cavitación. Para ello, y a partir de consideraciones teóricas sobre el flujo en la coronación del aliviadero, Moñino (2004), se lleva a término un estudio experimental para la determinación de las presiones sobre coronación en el caso de los perfiles tipo USBR y arista02. En este caso se ha elegido como perfil USBR de partida el correspondiente a un aliviadero en régimen de vertedero intermedio definido en términos de las variables de diseño correspondientes al vertedero en pared delgada asociado, con factor de profundidad  $H_s/P' \approx 0.7$ , mayor velocidad de aproximación que en los casos previos, y un valor de la relación  $H_{e\text{ max}}/H_0 = 1.45 > 1.33$ , de manera que es excedido el límite recomendado por el USBR, lo que garantiza la seguridad en caso de resultado favorable. La tabla 2 resume los datos de diseño del perfil, esquematizándose en la figura 7 los puntos de registro de las presiones. Dichos puntos han sido elegidos de modo que informen de las presiones en el dintel de inicio de la rama ascendente del perfil, en la sección media de la rama ascendente del perfil arista02, y en la rama descendente del perfil inmediatamente aguas abajo de la coronación. En particular para el punto  $P3$ , se ha procurado una posición muy próxima a la arista superior del perfil, de forma que pueda ser registrada la presión al comienzo de la zona de capa límite, y compatible con los requisitos constructivos del modelo. Esa región es aquella donde tiene lugar la separación incipiente del flujo cuando la cara inferior de la lámina vertiente es más amplia que la geometría

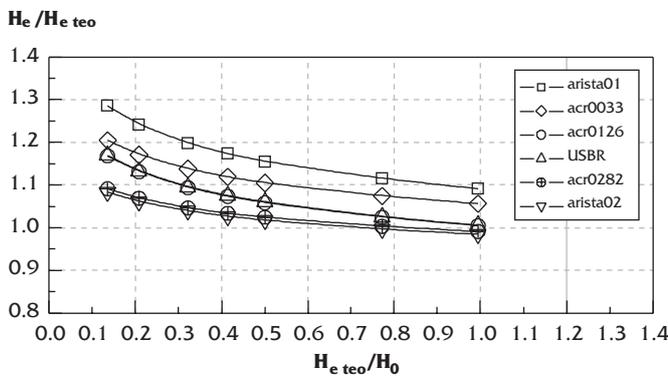


Figura 6. 1. Variación de la carga real respecto al formalismo del USBR.

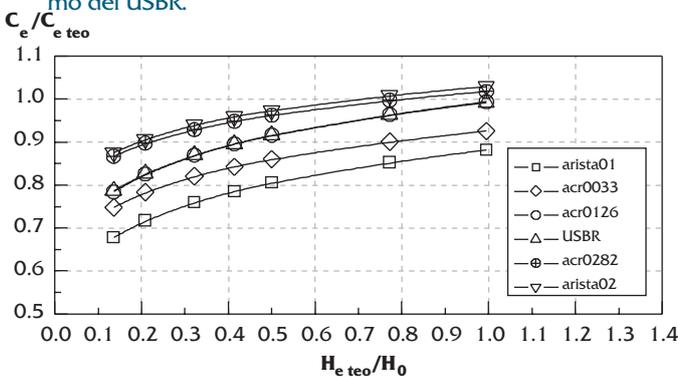


Figura 6. 2. Variación del coeficiente de desagüe real respecto al formalismo del USBR.

construida, caso  $H_e/H_0 > 1$ , o el vertido más deficiente en caso de que la lámina vertiente tenga una geometría más reducida que el perfil, caso  $H_e/H_0 < 1$ . Cuanto más se desplace el punto  $P3$  hacia aguas abajo, el efecto de la mayor o menor tendencia de separación de la lámina vertiente respecto al perfil se verá atenuado.

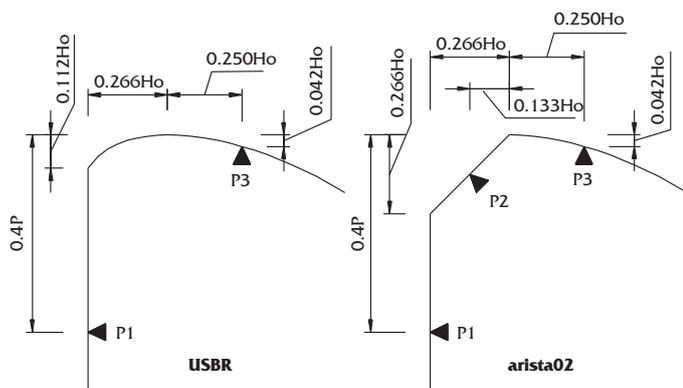


Figura 7. Esquema de situación de los puntos para el registro de presiones.

Teniendo en cuenta que la presión en cada punto de la superficie del perfil puede definirse en términos manométricos como  $p_{man} = p_h + p_d$ , es decir, en una componente hidrostática  $p_h$  y otra dinámica  $p_d$ , será la parte dinámica al adoptar valores negativos la responsable de que la presión manométrica total alcance valores negativos, y en consecuencia de que la presión absoluta tome valores inferiores a la presión atmosférica.

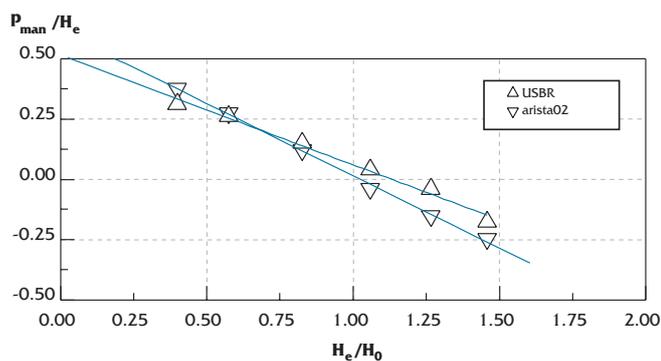


Figura 8. Presiones manométricas en la coronación del perfil para el punto  $P3$ .

Bajo este planteamiento, los resultados del estudio mostrados en la figura 8 para el caso del punto  $P3$  indican que, efectivamente, para  $H_e/H_0 > 1$  se obtienen valores negativos de la presión manométrica para ambos perfiles, rebasándose antes este umbral para el perfil arista02. No se registran presiones manométricas negativas para en el punto  $P2$ , figura 9, lo que indica que no existe riesgo de

que en esa región la presión absoluta alcance valores inferiores a la presión atmosférica, Moñino (2004), siendo suficiente el punto  $P3$  para evaluar el riesgo de cavitación.

A partir de los resultados de la figura 8 se comprueba que  $p_{man}/H_e = -0.25$  para el valor máximo de  $H_e/H_0$ , lo que supone  $|p_{man}/H_e| = 0.4 < 0.5$  para  $H_{e,max}/H_0 = 1.45 > 1.33$ , lo que supone que la geometría tipo arista02 no induce un riesgo de daños por desarrollo de presiones negativas para los límites de diseño indicados.

Debe tenerse presente que el funcionamiento del perfil tipo arista02 difiere en algunos aspectos del comportamiento de la rama ascendente clásica del perfil tipo USBR. En efecto, mientras que para la arista02 las presiones manométricas positivas dominan en la zona ascendente, en la rama de ascenso convencional aparecen presiones manométricas negativas en la zona próxima al enlace con la rama descendente, justo aguas arriba de la coronación del perfil. Este hecho ha sido constatado en los trabajos sobre el tema, USBR (1974), Lemos (1981), lo que supone una mejora por parte del perfil arista02.

La ausencia de cavitación en la coronación del perfil garantiza el buen funcionamiento del dispositivo. Asimismo, la geometría en forma de arista viva favorece el desarrollo de la capa límite turbulenta en la región de contacto del flujo con la superficie del aliviadero, requiriéndose si cabe una distancia más corta que en un perfil convencional para que dicha capa alcance la superficie libre, y generando un punto de inyección de arrastre de aire hacia el seno del fluido, Moñino & Riera (2002); la entrada de aire en el seno del fluido garantiza la protección frente a daños por cavitación en la rápida y canal de descarga del aliviadero.

De esta forma, si bien el riesgo de daños por cavitación en la zona del paramento del aliviadero ocurre siempre que la velocidad del flujo es igual o superior a 12 - 15 m/s, Hager (1992), Falvey (1990), lo que en principio es independiente de las condiciones en la coronación, el perfil tipo arista02 puede contribuir a que el comienzo de entrada de aire en el flujo tenga lugar en una posición más alta en el paramento. El desplazamiento hacia la coronación del punto de inyección de aire mejora en principio el funcionamiento general de la estructura de desagüe, aunque luego sea necesario incluir elementos adicionales que mantengan una determinada concentración de aire en el seno del

fluido en su recorrido hacia aguas abajo del paramento. Esto puede ser de interés en el cálculo de aliviaderos escalonados, Moñino (1999), en los cuales la particular configuración de la rápida da lugar a la presencia de zonas no aireadas con flujo en recirculación en la contrahuella de los escalones. En esos casos, el perfil tipo arista02 facilitaría un comienzo anticipado de la entrada de aire en el seno del fluido y una mejora en las condiciones de seguridad, si bien en situación de *skimming flow*, Chanson (1996), debería ser estudiada en detalle la recirculación local.

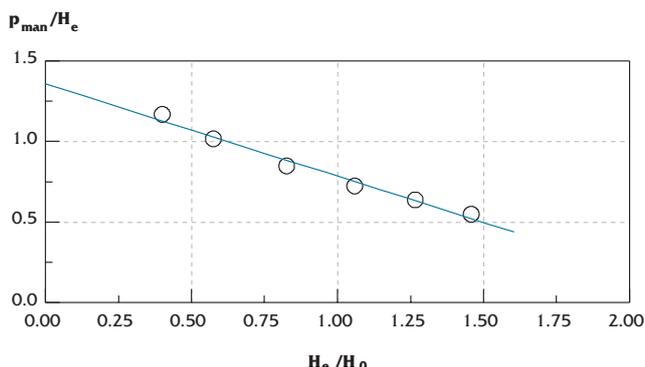


Figura 9. Presiones manométricas en la coronación del perfil para el punto P2.

No se han comprobado los otros perfiles, dado que al generar una respuesta hidráulica más deficiente, la existencia de presiones negativas queda limitada con respecto al caso de la arista02.

## CONCLUSIONES

Ha sido presentado un estudio teórico y experimental sobre la influencia de la rama ascendente del perfil de vertido de un aliviadero en el proceso de descarga. El análisis dimensional ha permitido enfocar el estudio desde el punto de vista de los regímenes de trabajo de un vertedero, lo cual conduce a una interpretación preliminar de la respuesta hidráulica en función de las variables de gobierno del problema.

La valoración de los efectos geométricos ha conducido a la obtención del perfil tipo arista02, el cual muestra la mejor eficiencia en la descarga, incluso respecto al perfil recomendado por el formalismo clásico de diseño del USBR. La mejora en el vertido tiene lugar a expensas de un aumento en el coeficiente de desagüe, propiciado a su vez por el desarrollo de presiones manométricas negativa sobre la coronación del perfil. No obstante, el estudio desarrollado para determinar la magnitud

de aquéllas, ha dado como resultado que en el caso del perfil tipo arista02, el más desfavorable desde el punto de vista del riesgo de daños por cavitación, las presiones se mantienen dentro de los límites recomendados. En efecto, se obtienen valores absolutos de la presión manométrica tales que  $|p_{man}/H_0| = 0.4 < 0.5$  para  $H_{e,max}/H_0 = 1.45$ , de modo que los límites establecidos por el USBR son respetados, y esto a pesar de que la carga máxima sobre coronación excede el límite recomendado  $H_{e,max}/H_0 = 1.33$ .

El perfil tipo arista02 resulta en una mayor sencillez en el diseño y ejecución material, confiriendo igual o mayor capacidad de desagüe que una rama de ascenso clásica. Además su uso puede contribuir a una mejora en las condiciones del flujo en la zona del paramento del aliviadero aguas abajo de la coronación, favoreciendo el desarrollo de la capa límite a lo largo de un espacio más reducido e induciendo un punto de inyección de aire situado más arriba que en un perfil convencional.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $C_d$  coeficiente de desagüe para el vertedero en pared delgada, referido a la sección de vertido sobre la cresta, adimensional.
- $C_e$  coeficiente de desagüe para el aliviadero de perfil estricto, referido a la sección de máxima contracción, adimensional.
- $C_0$  coeficiente de desagüe para el aliviadero de perfil estricto en condiciones de diseño, adimensional.
- $E$  máxima elevación de la cara inferior de la lámina vertiente sobre un vertedero en pared delgada, m.
- $g$  aceleración de la gravedad,  $9.81\text{m/s}^2$ .
- $h_a$  altura de velocidad de aproximación, m.
- $h_a/P'$  factor de velocidad, adimensional.
- $h_e$  carga sobre la coronación del aliviadero, medida en la región de aproximación, m.
- $h_s$  carga sobre la cresta del vertedero en pared delgada, medida en la región de aproximación, m.
- $h_0$  carga sobre la coronación del aliviadero en condiciones de diseño, medida en la región de aproximación, m.
- $H_e$  carga total sobre la coronación del aliviadero, m.
- $H_s$  carga total sobre la cresta del vertedero en pared delgada, m.
- $H_s/P'$  factor de profundidad, adimensional.
- $H_0$  carga total sobre la coronación del aliviadero en condiciones de diseño, m.
- $L$  longitud del vertedero, normal a la dirección del flujo, m.

$p_h$	presión hidrostática, N/m <sup>2</sup> excepto donde se indique.
$p_d$	presión hidrostática, N/m <sup>2</sup> excepto donde se indique.
$P$	calado de aproximación para el aliviadero, medido desde la coronación, m.
$P'$	calado de aproximación para el vertedero en pared delgada, medido desde la cresta, m.
$Q_e$	caudal genérico, m <sup>3</sup> /s.
$Q_0$	caudal genérico en condiciones de diseño, m <sup>3</sup> /s.
$y_s$	espesor del flujo en la sección de vertido, m.
$\rho$	densidad del agua, 1000Kg/m <sup>3</sup> .
$\Phi_e$	caudal adimensional genérico.
$\Phi_0$	caudal adimensional en condiciones de diseño.

## REFERENCIAS

- Abecasis F.M. (1961). *Soleiras descargadoras. Alguns problemas especiais*. Memoria n° 175, LNEC. ISBN 972-49-0357-5.
- Bradley J.N. (1952). *Discharge coefficients for irregular overfall spillways*. Engineering monograph n° 9, U.S. Dept. of Interior.
- Chanson H. (1996). *Prediction of the transition nappel skimming flow on a stepped channel*. Journal of Hydraulic Research, vol. 34, n° 3.
- Christodoulou G.C. (1993). *Energy dissipation on stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 119, n° 5, pp. 644-650.
- Diez-Gascón J., Blanco J.L., Revilla J. & García R. (1991). *Studies o the hydraulic behaviour of stepped spillways*. Water Power and Dam Construction, September, pp 22-226.
- Falvey H. (1990). *Cavitation in Chutes and spillways*. Engineering monograph n° 42. U.S. Dept. of Interior.
- Falvey H. (2003). *Hydraulic design of labyrinth weirs*. A.S.C.E. Press.
- Hager W.H. (1992). *Spillways, shock waves and air entrainment*. International Commission on Large Dams, Bulletin 81.
- Lemos F.O. (1981). *Criterios para o dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras*. Memoria n° 556, LNEC. ISBN 972-49-0662-5.
- Melshemer E.S. & Murphy T.E. (1970). *Investigation on various shapes of the upstream quadrant of the crest of a high spillway*. RR H-70-1. U.S Army Engineer Waterways Experimental Station.
- Moñino A. (1999). *La medida de grandes caudales. Revisión de criterios aplicados a aliviaderos de presas*. Tesina de Magíster, Universidad de Granada, 150 pp.
- Moñino A. (2004). *Sobre soluciones analíticas y experimentales de flujo en régimen libre*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 255 pp. ISBN 84-688-9180-0.
- Moñino A. & Riera J. (2002). *On the incipient self aerated flow in chutes and spillways*. Journal of Hydraulic Research, vol. 40, n° 1, pp. 95-97.
- Olsen N. & Kjellesvig H. (1998). *Three dimensional numerical modelling for estimation of spillway capacity*. Journal of Hydraulic Research, vol. 36, n° 5, pp. 775-784.
- Peterka A.J. (1963). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Engineering monograph n° 25. U.S. Dept. of Interior.
- Rajaratnam N. (1990). *Skimming flow in stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 116, n° 4, pp. 587-591.
- Rice C.E. & Kadavy K.C. (1996). *Model study of a roller compacted concrete stepped spillway*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 122, n° 6.
- Riera J. & Moñino A. (1998). *Accurate measurement of large flows. Revision on criteria applied to spillways of dams*. Dam Safety, Balkema, Rotterdam.
- U.S. Army Corps of Engineers (1995). *Hydraulic design of spillways*. Technical Engineering and Design Gudes, n° 12, A.S.C.E. Press.
- U.S. Bureau of Reclamation (1948). *Studies on crests for overfall dams*. Bulletin 3, Part VI, Boulder Canyon Project Final Reports.
- U.S. Bureau of Reclamation (1970). *Design of small dams*. Dossat.
- Wen X., Guo Y. & Fang D. (1998). *Numerical modelling of spillway flow with free drop and initially unknown discharge*. Journal of Hydraulic Research, vol. 36, n° 5, pp. 785-801.