

Aliviaderos escalonados. Comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida

CRISTÓBAL MATEOS IGUACEL (*); VÍCTOR ELVIRO GARCÍA (**)

RESUMEN Se presentan en este artículo dos aspectos importantes del comportamiento de un aliviadero escalonado de una presa de gravedad. Por un lado el comienzo de la aireación natural, determinando la sección del aliviadero en la cual está totalmente desarrollada la turbulencia, a partir de la cual se inicia la aireación natural y el flujo presenta un alto contenido de aire, estado fundamental para prevenir el riesgo de cavitación debido a la velocidad y a la alta turbulencia del flujo. Por otro lado la disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada, lo que permitirá una más precisa definición de la estructura de amortiguación y de reincorporación al cauce.

STEPED SPILLWAYS. INITIATION OF NATURAL AERATION. ENERGY DISSIPATION

ABSTRACT *This paper presents two relevant aspects in the behaviour of the flow along a stepped spillway in a gravity dam. The first one is the initiation of natural aeration. The second one is the study of energy dissipation along the stepped spillway. With respect to the former, the cross-section where the boundary layer totally develops is assessed. At this point natural aeration starts. Thus the air content in the flow is high, which is an essential stage for cavitation risk prevention due to high velocity and turbulence of the passing flow. With respect to the latter aspect of flow, the quantification of energy dissipation allows a more precise design of the structure of dissipation at the end of the spillway.*

Palabras clave: Aliviaderos escalonados; Aireación; Pérdida de energía.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre aliviaderos escalonados se inician en el Laboratorio de Hidráulica en el año 1990 con el aliviadero de la presa de La Puebla de Cazalla, desde esta fecha hasta nuestros días se han llevado a cabo los ensayos de los aliviaderos de las presas de Sierra Brava, Alcollarín, Montearagón, El Boquerón, Val y Los Charcos, esta última es una presa arco-gravedad, siendo el resto presas de gravedad de hormigón compactado con rodillo. Junto a estos estudios específicos, se han llevado a cabo unos estudios genéricos, mediante un convenio con la Dirección general de Obras Hidráulicas, con el fin de tipificar el diseño de este tipo de aliviaderos. Para dar una idea de la envergadura de este trabajo citaremos que para el estudio de la transición entre el umbral del aliviadero y la rápida escalonada se construyeron más de quince modelos, los últimos a escala 1/3; También están construidas en el Laboratorio un conjunto de tres rápidas de pendiente variable de siete metros de altura que son las mayores existentes en el mundo en su género que incluso han sido utilizadas para realizar sus tesis algunos estudiantes europeos.

Los resultados que se presentan en este artículo han sido obtenidos en catorce rápidas, en modelos con escalas entre 1/6 y 1/25, referidas a escalones de 0,9 y 1,2 cm de altura y taludes comprendidos entre 0,75/1 y 0,8/1 relativos a presas de gravedad y uno de 0,333/1 de una presa arco. Experimentalmente se ha llegado a caudales máximos unitarios en prototipo de 40 m³/seg.m, aunque este valor está en general muy por encima de los caudales máximos de diseño para este tipo de aliviaderos.

2. CONFIGURACIÓN DE LA AIREACIÓN EN UNA RÁPIDA ESCALONADA

En el diseño de las estructuras hidráulicas con alta velocidad aparecen frecuentemente problemas ocasionados por elevadas presiones negativas que pueden producir graves deterioros de la estructura por cavitación. De todos es conocido que uno de los métodos más eficaces para evitar los daños por cavitación es introducir aire en el flujo de agua, logrando un fluido que sea mezcla de agua y pequeñas burbujas de aire de manera que la proporción de este en las proximidades del paramento sea superior al 8%. La forma de conseguir que el aire penetre en la masa de agua puede ser de forma forzada o de manera natural.

En los aliviaderos escalonados, la alta turbulencia del flujo en la proximidad de los escalones provoca el acortamiento de la zona de flujo irrotacional si se compara con un aliviadero convencional y una vez que alcanza el punto de

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Hidráulica. CEH-CEDEX (Ministerio de Fomento).

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Programa de Ensayos con Fondo Móvil. CEH-CEDEX (Ministerio de Fomento).

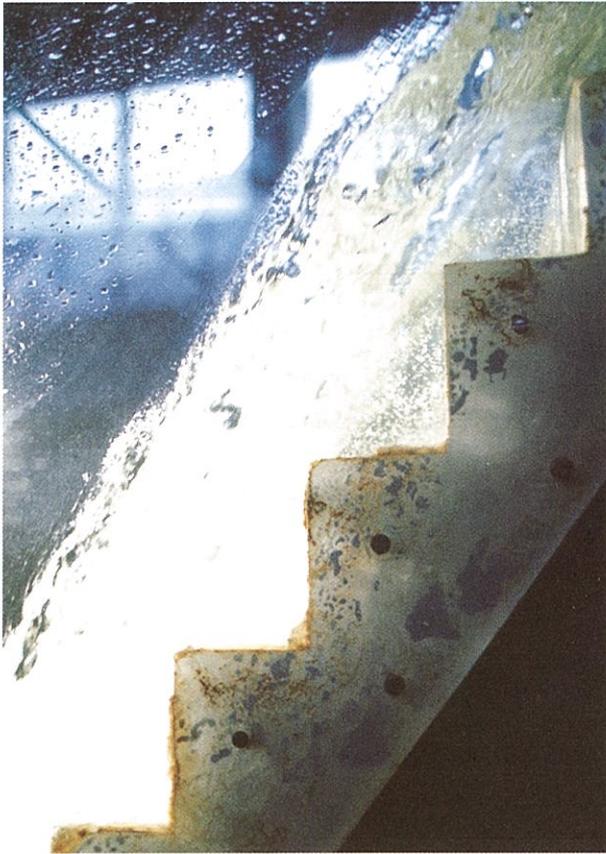


FOTO 1. Comienzo de la aireación en una rápida escalonada.

inceptión se inicia la aireación natural, manteniéndose de forma permanente un alto contenido de aire en la masa fluida. Ver figura 1.

La observación en modelo reducido del flujo en un aliviadero escalonado si se mira desde el lado de la superficie libre, muestra un flujo claro y transparente y súbitamente un flujo blanco que tiene forma de U aplanada, o sea, la aireación se inicia antes junto a los cajeros, pero se desarrolla prácticamente a la misma cota en el resto del aliviadero. Si se observa el flujo desde el lateral o desde la solera se aprecia una lámina transparente disminuyendo progresivamente de espesor hasta que en un cierto escalón aparecen burbujas de aire confinadas por las fuerzas centrífugas del remolino asociado al escalón. En función del caudal unitario, aguas abajo de esta celda todo el flujo se llena de burbujas de aire aumentando considerablemente el espesor de la lámina de agua. En las observaciones realizadas se ha tomado como altura a la que comienza la aireación la cota media del primer escalón donde se mantienen confinadas las burbujas ya que se ha podido comprobar que esta cota coincide con la línea blanca de inicio de aireación que se aprecia en el flujo observándole desde una posición frontal.

En la cuantificación de los resultados el inicio de la aireación se localiza por la diferencia de su cota con la del umbral del vertedero, en lugar de longitud a lo largo del aliviadero que es como suele ser estimado por otros autores. Esto se justifica en este caso por que es el número de saltos (y no el que la huella sea un poco mayor o menor) el parámetro más ligado al desarrollo de la turbulencia y por otra parte per-

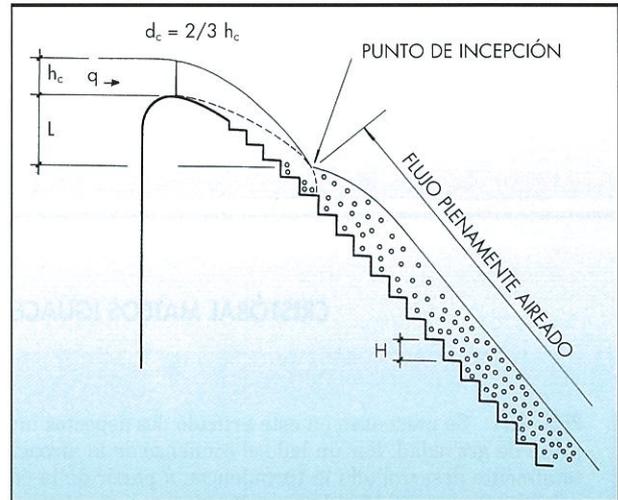


FIGURA 1. Entrada de aire en un aliviadero escalonado.

mite obtener más directamente la velocidad del flujo en la cota en la que se inicia la aireación, pudiéndose estimar el riesgo de cavitación al fijar una correlación entre las velocidades y la posible existencia de presiones negativas.

Los aliviaderos escalonados presentan una gran turbulencia del flujo, potenciada por que la inestabilidad de la lámina de agua produce choques y despegues con los escalones lo que a su vez favorece la entrada de aire en los mismos. Este aire permanece en el escalón gracias a los vórtices de eje horizontal inducidos por la fuerte turbulencia del flujo. Al mismo tiempo y a partir de una cierta concentración esta fuerte agitación compensa suficientemente los efectos del gradiente de presiones existente en la celda triangular entre el paramento vertical y horizontal que tiende a separar las burbujas del paramento.

3. DETERMINACIÓN DEL COMIENZO DE LA AIREACIÓN

Como ya se ha comentado, el criterio adoptado para fijar la cota a la que comienza la aireación, ha sido determinar el escalón en el cual las burbujas de aire permanecen estables dentro del mismo. A la diferencia de cotas entre la coronación del aliviadero y el punto medio de este escalón se ha denominado "L", siendo "H" la altura de los escalones en la rápida y "g" la aceleración de la gravedad. El caudal unitario "q" viene dado en m³/seg.m.

La presentación de los datos se ha realizado en la Figura 2, en papel doblemente logarítmico y en términos adimensionales, relacionando L/H y q/(g^{1/2} · H^{3/2}).

Los resultados se encuentran muy bien agrupados con independencia de las escalas. Obteniéndose un excelente ajuste con la ecuación:

$$\frac{L}{H} = 5,6 \left(\frac{q}{g^{1/2} H^{3/2}} \right)^{0,8} \quad [1]$$

La ley (1) se puede escribir en la forma

$$L = 5,6 \frac{q^{0,8}}{g^{0,4}} \cdot \frac{1}{H^{0,2}} \quad [2]$$

En esta ecuación se percibe que las variaciones de H (dentro de los límites razonables) prácticamente no alteran el valor de L. Si bien como era de esperar con el incremento

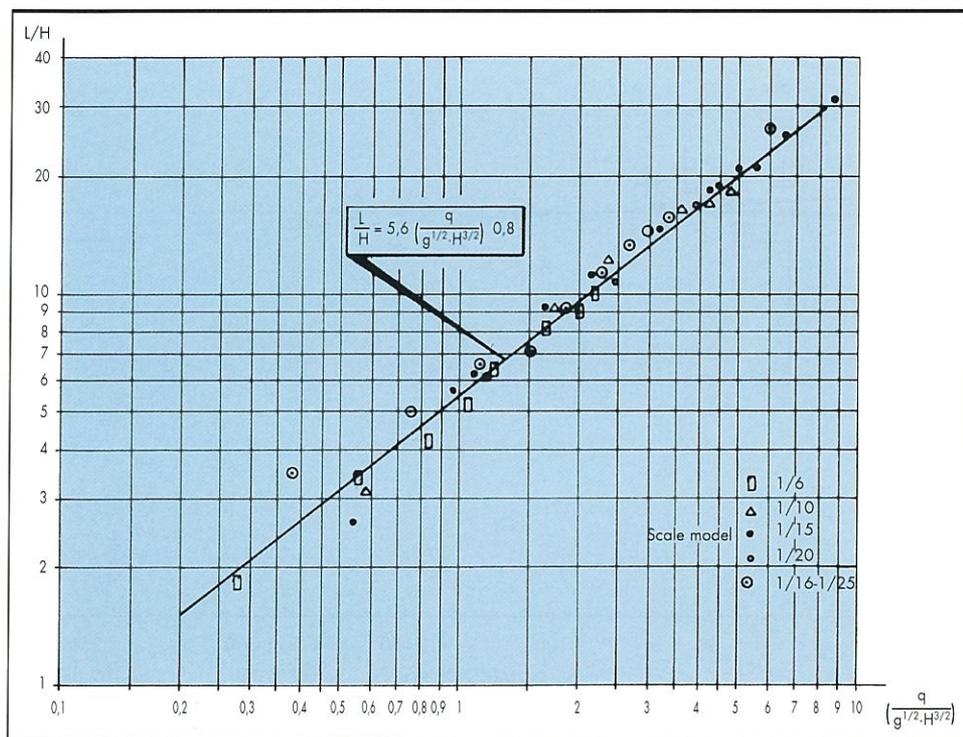


FIGURA 2. Determinación experimental del punto de inyección.

de H se aumenta la turbulencia y consecuentemente se reduce L. Así por ejemplo una duplicación del tamaño de los dientes acorta la distancia de aireación solo en un 15%.

4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE ESCALA

La hipótesis de la que se ha partido en los ensayos es que dada la intensa agitación de este tipo de flujos es adecuado utilizar una semejanza de Froude, vigilando únicamente que el número de Weber sea suficientemente alto. Los propios ensayos corroboran, como se verá posteriormente, lo adecuado de esta hipótesis.

En las presas de Hormigón compactado por razones constructivas se suele depositar el hormigón en tongadas de 30 cm, por ello, los aliviaderos escalonados suelen tener escalones de 90 cm, (aunque ocasionalmente los haya de otros múltiplos de 30 cm), con la excepción de los escalones superiores que suelen ser más pequeños y acomodar sus aristas a un perfil Creager o similar. Cuando se hable aquí de escalas, se entenderán referidas a un escalón tipo de altura 90 cm y talud en el mencionado rango 0,75/1 a 0,8/1. En cualquier caso, los resultados se formulan de forma adimensional por lo que son de aplicación a cualquier aliviadero con los taludes citados.

Para efectuar el análisis se ha buscado la relación entre los dos parámetros adimensionales L/H y $q/g^{0,5}H^{1,5}$ este último deducido en aplicación de la semejanza de Froude.

Se han utilizado 42 pares de valores de esos dos parámetros, obteniéndose un excelente ajuste de mínimos cuadrados con la ley:

$$\frac{L}{H} = 5,65 \left(\frac{q}{g^{1/2}H^{3/2}} \right)^{0,8} \quad [3]$$

No obstante para obtener un análisis más exacto del efecto de escala y especialmente el efecto del número de We-

ber se realiza una representación gráfica (figura nº 3) relacionando este número con el cociente

$$K = \frac{L}{H} \cdot \left(\frac{q}{H^{3/2}} \right)^{0,8} \quad [4]$$

Se obtiene un valor medio de $K = 2.268$ con una desviación típica de 0.2127, ligeramente mas baja que el 10% de la media. Se aprecia que para los valores más bajos del número de Weber los valores del cociente se separan algo de lo que se obtiene en los casos restantes.

Un análisis de las causas de esta desviación revela lo siguiente:

- Posibles errores en la medida de caudales, que pueden ser cuantificados por debajo del 3% para los caudales bajos e inferiores al 1% en los caudales altos.
- Errores en el tamaño de los escalones. Prácticamente despreciables, incluso para los escalones pequeños su influencia sobre el valor de K no supera el 0.25%.
- Medida de los valores de H. El comienzo de la aireación se observa en un escalón al que se le asigna una cota, lo que implica saltos en su determinación no acorde con la continuidad de la ecuación nº 4. Este efecto es especialmente significativo para números de Weber bajos y escalones grandes, como puede verse en las figuras 3 y 4, donde la altura de la cruz indica el tamaño del escalón a la escala correspondiente. Por esta causa pueden producirse errores de hasta el 5% en el valor de K.
- Independencia de las causas de dispersión. El máximo error global que podría esperarse es del 7.5% como resultado de la diferencia cuadrática.

Se ha podido comprobar así, que si se suprime el 10% de los datos con menor número de Weber se evita esa disper-

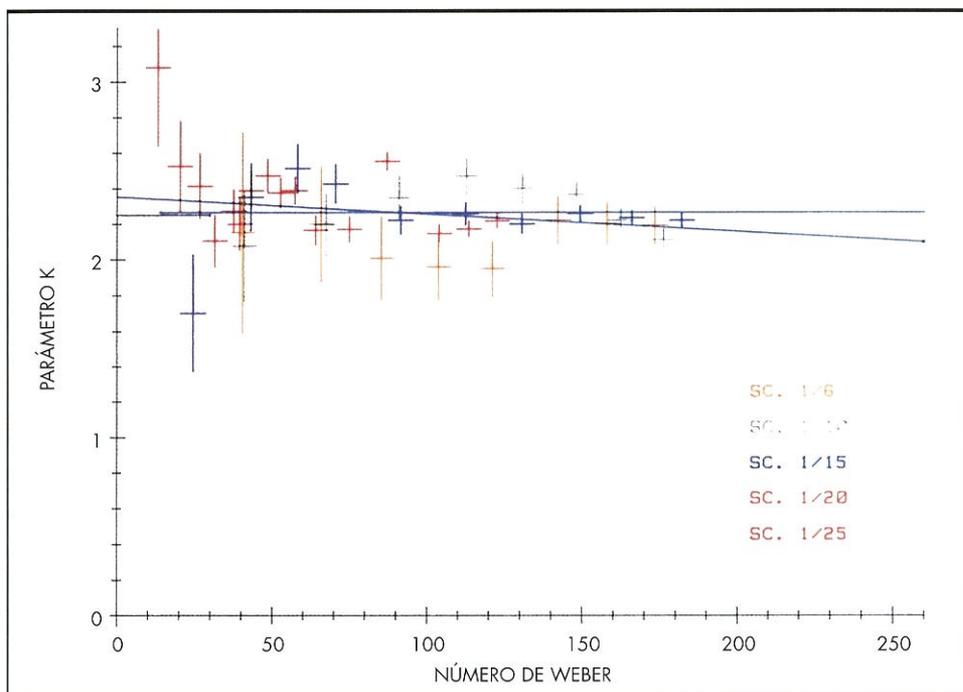


FIGURA 3. Comienzo de la aireación sin limitación del número de Weber.

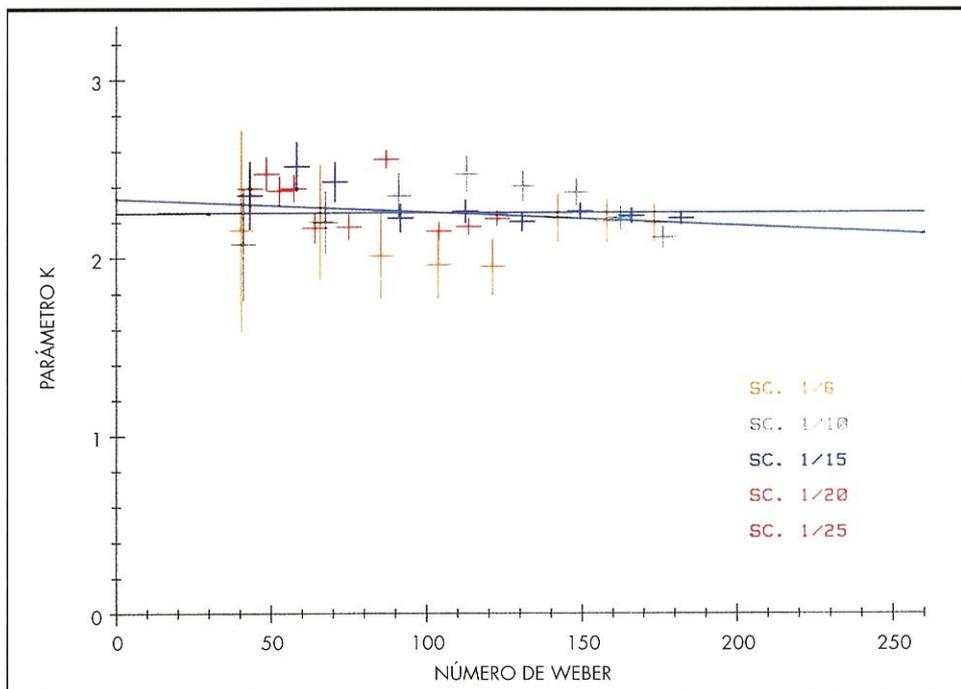


FIGURA 4. Comienzo de la aireación para ensayos con número de Weber superior a 40.

sión inicial habiéndose de corregir la ecuación (3) obteniendo la ecuación (1) anteriormente propuesta.

$$\frac{L}{H} = 5,6 \left(\frac{q}{g^{1/2} H^{3/2}} \right)^{0,8} \quad [1]$$

Si con el mismo criterio de número de Weber más bajo se eliminan el 20% o el 30% de los casos queda prácticamente inalterada la ecuación (1) por lo que es ésta la que se ha propuesto.

La indicada limitación aconsejable del número de Weber tiene dos conclusiones prácticas:

1^ª) Es deseable utilizar modelos con tamaño de los escalones igual o superior a 4,5 cm. siendo los errores por efecto de escala inferiores al 5% y del lado de la seguridad, más aún para valores del número de Weber superiores a 40, que generalmente es el caso cuando se pretenden estudiar problemas de cavitación. No obstante se

puede utilizar escalas que resulten tamaños de escalones en el rango de los 4 cm a los 2,5 cm (rango de escalas 1/25) debiéndose esperar en la estimación de "L" errores entre un 5% y un 20% del lado de la seguridad o incluso más si el número de Weber es menor de 30. Siendo desaconsejable utilizar modelos de menor tamaño de escalones para estudiar el comienzo de la aireación.

2ª) Con independencia de que su validez real fuera mayor, la validación de la fórmula (1) con los modelos utilizados es aceptable con un número de Weber en los modelos suficientemente alto y concretamente para valores de $q/g^{1/2}H^{3/2}$ superiores a 0,25, lo que equivale a láminas vertientes aproximadamente iguales o superiores a la mitad de la altura del escalón. Lo que en la práctica, y para los problemas de cavitación, permite asegurar que la fórmula (1) es directamente aplicable.

5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALIVIADEROS ESCALONADOS

En un aliviadero escalonado existen dos tipos de flujos, el flujo de escalón en escalón (Nappe flow en la literatura en lengua inglesa) y el flujo rasante (Skimming flow), con dos formas de disipación de energía diferente. Los aliviaderos escalonados construidos habitualmente sobre presas de hormigón compactado con rodillo presentan en general los dos tipos de flujo, al inicio del vertido y para los caudales bajos se presenta el primer tipo de flujo y para los caudales altos, lo que supone la mayor parte de los caudales de diseño, el flujo es rasante. En los ensayos realizados en el Laboratorio



FOTO 2. Rápida prepara para medida de velocidades.

de Hidráulica del CEDEX, los estudios se centran en este último tipo de flujo que es el característico de los aliviaderos escalonados. Por otra parte, los aliviaderos estudiados son de presas superiores a 25 m de altura y es claro que la disipación de energía depende de la altura de la presa pudiéndose decir que a mayor altura mayor disipación. También el caudal unitario circulante en relación con el tamaño del escalón es un factor que influye en la disipación de energía en forma interrelacionada con el anterior, así en presas de pequeña altura para grandes caudales con pequeños escalones las pérdidas de energía son similares a las obtenidas en un aliviadero convencional. Una vez establecidas estas premisas en relación con los ensayos, se puede añadir que para relaciones $H_p/h_c < 10$, (altura de la presa dividido por el calado crítico) la disipación de energía es similar a la obtenida en un aliviadero liso y es por lo tanto necesario pensar en otro tipo de dissipador de energía. También se ha podido comprobar que para un aliviadero concreto a medida que aumenta el caudal disminuye la disipación de energía, pero con esto no puede afirmarse que para un caudal fijo, si se comparan dos diseños, el escalonado que produce la máxima disipación de energía sea siempre el de mayor tamaño.

5.1. LA MEDIDA DE VELOCIDADES

Desde el punto de vista de la disipación de energía la medida de la velocidad es lo más relevante toda vez que la obtención de la cota es elemental. El calado, aun siendo compleja su medida, tiene una influencia muy reducida dado el alto valor de las velocidades.



FOTO 3. Modelo de más de 7 m de altura para el estudio de rápidas escalonadas.

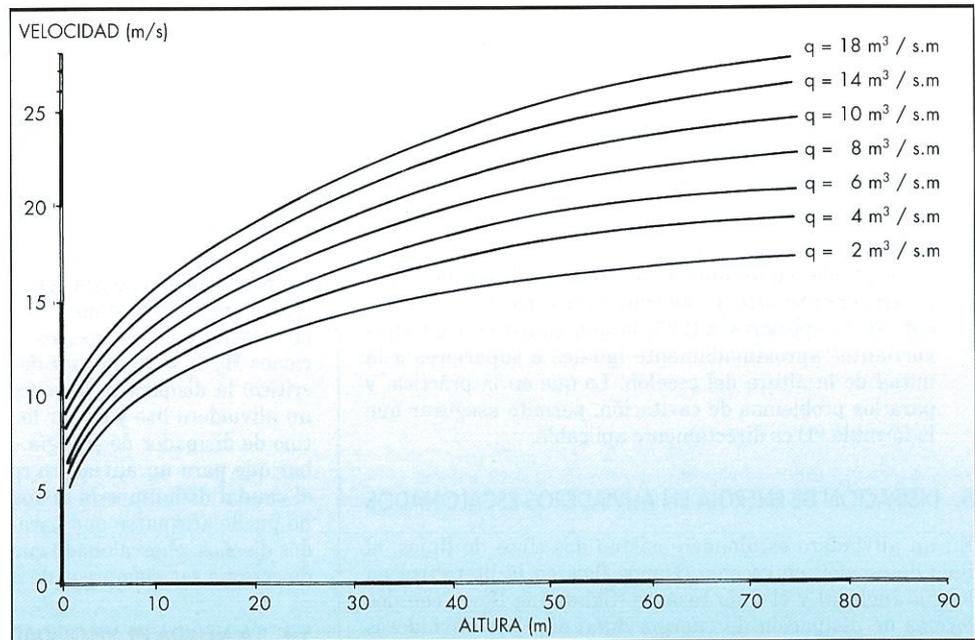


FIGURA 5. Curvas de velocidades. Alturas en un aliviadero escalonado.

La medida de velocidades en un flujo de alta turbulencia y con alto contenido de aire funcionando en régimen libre, es compleja, puesto que los instrumentos de medida convencionales como Pitot, micromolinetes, anemómetro de hilo caliente o sondas magnéticas, por citar los más comunes de los utilizados en los laboratorios no son válidos para medir la velocidad del flujo en un aliviadero escalonado debido, fundamentalmente, a la fuerte presencia de aire. La medida indirecta como puede ser altura de resalto al pie de la rápida puede ser aceptable para determinar las características de una obra concreta, pero no para comparar la velocidad o energía residual de diferentes rápidas.

Tras diversas pruebas en el Laboratorio se adoptó el método de filmar, mediante cámara de alta velocidad de obturación, elementos sólidos inelásticos y de baja flotabilidad introducidos en el flujo cuyo tamaño sea proporcional al tamaño del escalón representado en el modelo.

La rápida se divide en tramos equidistantes de una determinada longitud y conocida la velocidad de filmación de la cámara (número de fotogramas por segundo), se obtiene el tiempo que tarda cada indicador en recorrer cada tramo establecido.

Se toman como mínimo 15 indicadores calculando la media y la desviación típica, despreciándose de antemano aquellos indicadores cuya velocidad en uno de los tramos presenta una velocidad anormalmente reducida, lo que indica que se han introducido en el remolino de un escalón y por tanto su velocidad no es representativa. Con los indicadores utilizados no es posible que estos salgan fuera del flujo (a diferencia de lo que sucede con elementos más elásticos). Las velocidades se asignan a un desnivel de referencia "L" que o bien es el valor medio de los desniveles entre el umbral del aliviadero con el inicio y con el final del tramo, o bien se toma como valor más aproximado a una parábola el representado por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{4} (H_1 + H_2 + 2\sqrt{H_1 H_2}) \quad [5]$$

Donde H_1 y H_2 son los desniveles arriba mencionados.

Las velocidades así obtenidas se comparan con una velocidad de referencia cuya expresión es:

$$V = \sqrt{2g(L + h/2)} \quad [6]$$

Siendo "h" la altura de vertido (cota del embalse menos cota del umbral) para cada caudal.

En la figura nº 5 se representan las curvas de velocidades-alturas obtenidas a partir de los distintos ensayos realizados por el Laboratorio. Incluye tanto los distintos casos concretos de aliviadero con diferentes alturas, pendientes y tamaños de escalón, como los resultados sistemáticos realizados en tres rápidas de 7 m de altura y escalones de 6, 9 y 15 cm de altura. Son curvas de ensayo ajustadas según el modelo más representativo pero eliminando velocidades bajas por lo que se puede decir que están del lado de la seguridad. También puede observarse que las velocidades son siempre crecientes.

5.2. MEDIDA DE CALADOS

Para flujos plenamente desarrollados con aireación uniforme se puede determinar el coeficiente "f" de Darcy-Weisbach con la expresión.

$$f = \frac{8gY_{sen}\Theta}{V^2} \quad [7]$$

en la que "V" es la velocidad del flujo, "g" la aceleración de la gravedad, "Θ" es el ángulo que la rápida forma con la horizontal e "Y" es el calado del flujo aireado.

En la medida del calado en un flujo aireado no se ha llegado ni teórica ni experimentalmente a un acuerdo entre los investigadores que permita determinar un valor "Y" para sustituirlo en la fórmula. Los distintos criterios para medir "V" e "Y" son los que originan las fuertes discrepancias en la bibliografía sobre el valor de "f" y fundamentalmente al medir el calado debido a la fuerte agitación del flujo.

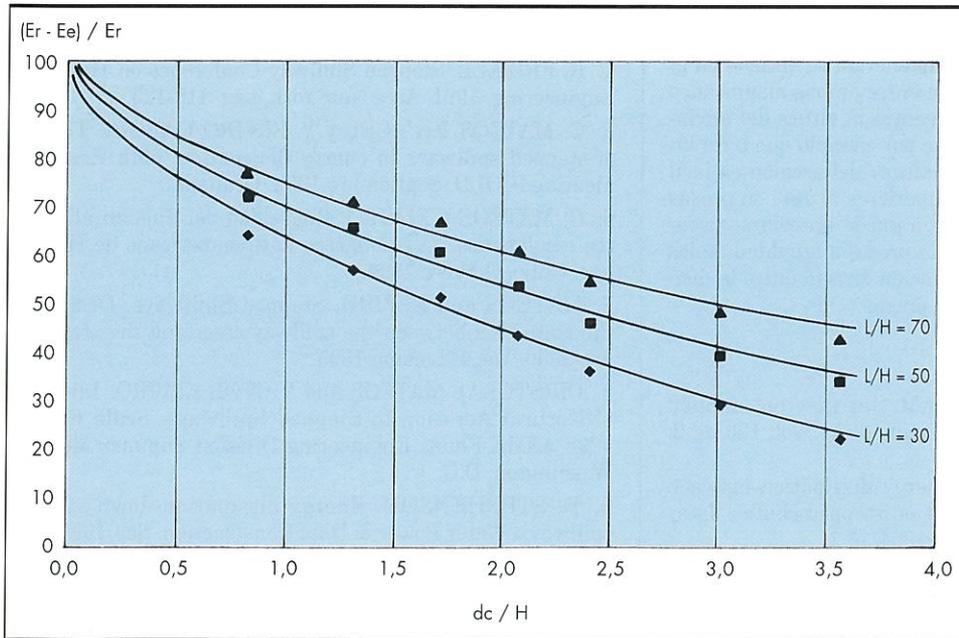


FIGURA 6. Disipación de energía en un aliviadero escalonado.

En la Laboratorio se han utilizado dos sistemas que dan calados sustancialmente diferentes. El primero consiste en ir introduciendo en el flujo una lámina metálica flexible de una determinada longitud. A medida que aumenta el número y la fuerza de los impactos llega un momento que la lámina flexa y permanece flectada, lo que indica una continuidad en el flujo, tomándose esta medida como calado. El segundo método consiste en ir introduciendo una varilla conectada a una fuente eléctrica (terminal de un puente de Wheastone), cerrándose el circuito mediante una lámina metálica pegada a los escalones. Este sistema se utiliza frecuentemente para medir calados en flujos no aireados con óptimos resultados, ya que el circuito se cierra en cuanto la aguja toca la superficie del agua, cosa que no sucede en una rápida escalonada donde se observa que la aguja está introducida en el flujo aire-agua y el circuito no se cierra. Eléctricamente no se aprecia una disminución de la resistencia, sino que súbitamente se produce un salto. Es importante saber que estos valores son reiterativos pero que también con calados mayores se produce el mismo cierre del circuito, aunque de forma esporádica o intermitente.

En el ensayo en modelo reducido de la presa de El Boquerón donde los escalones son de 1,20 m de altura se midieron calados con los dos métodos. Los resultados fueron comprobados posteriormente en otra rápida escalonada con pendiente similar pero con escalones de mayor tamaño en el modelo.

Se han obtenido los siguientes valores (expresados en magnitudes del prototipo) (Ver Tablas 1 y 2).

Como puede observarse el calado registrado por ambos métodos presenta una gran discrepancia, aproximadamente el calado según la varilla flexible es el doble que el medido con la punta eléctrica, siendo a su vez este del orden del doble que el calado obtenido en un aliviadero sin aireación y sin pérdidas de energía.

Estas diferencias tan grandes muestran que en la parte superior del flujo desarrollado hay un espesor considerable del mismo con proporciones de aire/mezcla entre el 50% y el

| CAUDAL UNITARIO m ³ / seg. m | DIFERENCIA DE COTAS | | | | | |
|--|---------------------|------|------|------|------|-----|
| | 5,5 | 14,5 | 23,5 | 32,5 | 41,5 | (m) |
| 16 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 1,9 | (m) |
| 20 | 1,5 | 1,6 | 2,0 | 2,2 | 2,2 | (m) |

TABLA 1. Medida de calados con varilla flexible.

| q (m ³ / s.m.) | 4 | 8 | 10 | 16 | 18 | 20 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Calado (m) | 0,43 | 0,69 | 0,74 | 0,94 | 1,01 | 1,12 |

TABLA 2. Medida de calados con aguja eléctrica. (El calado se mide en una sección situada a 39,2 m de la coronación del aliviadero).

90%, lo que evidencia la dificultad de dar una separación nítida entre los dos medios. Por lo que consecuentemente en la aplicación del coeficiente "f" el dato de la proporción media de aire es esencial. Mediciones precisas en este sentido se encuentran en curso en ese momento. Por ello solo se da cuenta en este trabajo de los aspectos globales de la disipación de la energía.

5.3. OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Con los resultados obtenidos en la experimentación podemos obtener, expresada en tantos por ciento, la proporción relativa de las pérdidas de energía en la rápida mediante la expresión

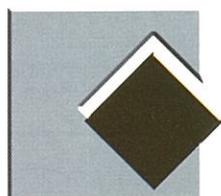
$$\Delta E = \frac{E_R - E_E}{E_R} \cdot 100 \quad [8]$$

Siendo E_R la energía correspondiente a lo que se ha denominado velocidad de referencia y E_E a la obtenida de los ensayos.

Representando en abscisas el término adimensional del cociente entre el calado crítico (d_c) y la altura del escalón (H) y en ordenadas la disipación de energía se obtiene en el gráfico de la figura nº 6 la relación entre ambas magnitudes para distintos valores del cociente entre la altura del aliviadero y la del escalón. Apreciándose por ejemplo que para láminas vertientes del orden de la altura del escalón es fácil obtener disipaciones de energía superiores al 70% en presas de más de 50 m de altura. También puede apreciarse la influencia de este factor (altura de la presa) a igualdad de los demás factores, existiendo una relación directa entre la disipación de energía y la altura de la presa.

BIBLIOGRAFÍA

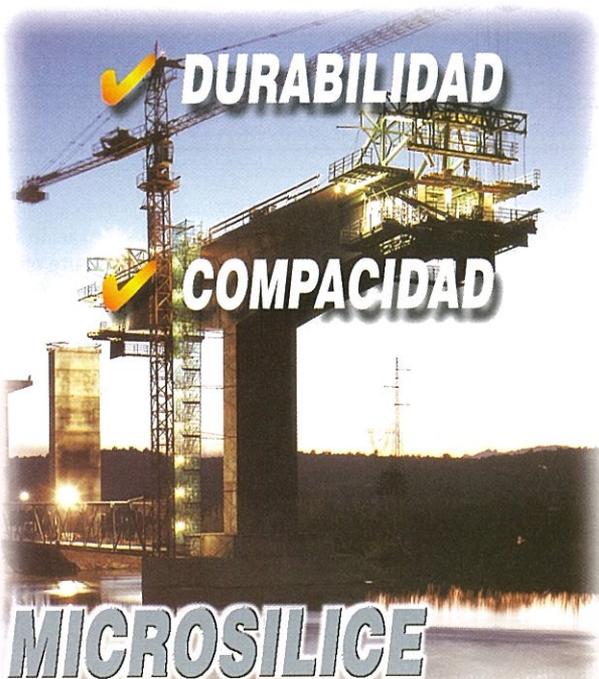
1. CHAMANI and RAJARATNAM. Jet flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 120, nº 2. February 1994.
2. CHANSON. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research. Vol 30. 1994. nº 2.
3. ELVIRO GARCÍA y C. MATEOS IGUÁCEL. Spanish research into stepped spillways. Hydropower & Dams. September 1995. Traducido en Ingeniería Civil Nº 101. 1996.
4. K. FRIZELL. Stepped Spillway Conference on Hydraulic Engineering. 1991. Asce New York, pág. 118-123.
5. C. MATEOS IGUÁCEL y V. ELVIRO GARCÍA. The use of stepped spillways in energy dissipation. 60th Executive Meeting ICOLD. Septiembre 1992. Granada.
6. C. MATEOS y ELVIRO. Rugosidad del flujo en aliviaderos escalonados. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Chile. Octubre 1994.
7. MATEOS and ELVIRO. Stepped Spillways. Design for the transition between the spillway crest and the steps. Hydr 2000. Vol. 1. London 1995.
8. CRISTÓBAL MATEOS and VÍCTOR ELVIRO. Initiation of Natural Aeration in Stepped Spillways. Scale Effects. 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Washington, D.C.
9. D. STEPHENSON. Energy dissipation down stepped spillways. Water Power & Dam Construction. Sep. 1991.
10. M. J. TOZZI. Residual energy in stepped spillways. Water Power & Dam Construction. Mayo 1994.



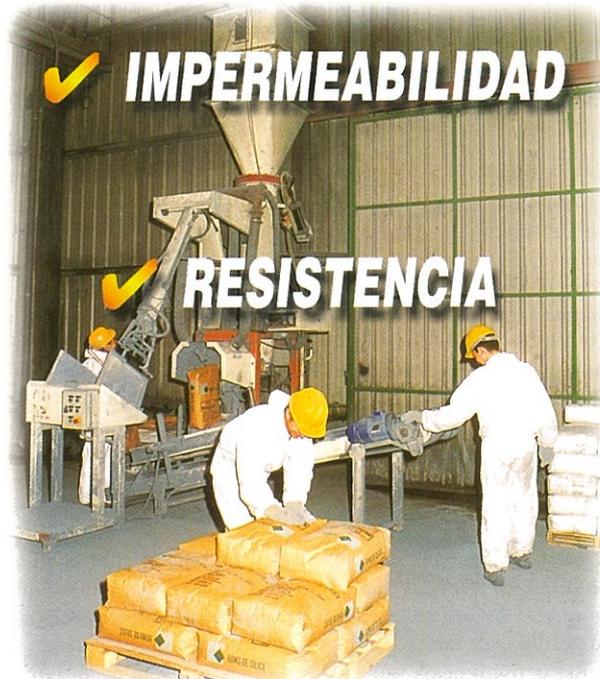
FERROATLÁNTICA, S.L.

Fábrica de Sabón • Polígono Industrial de Sabón • 15142 Arteixo.
La Coruña • Telf.: 981 60 06 75 • Fax: 981 60 13 06

Paseo de la Castellana, 86 - 6º • 28046 Madrid
Telf.: 915 90 32 19 • Fax: 915 63 91 07



MICROSILICE



RESISTENCIA

ADITIVO PARA HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

DURABILIDAD

COMPACIDAD

IMPERMEABILIDAD