

Disipación de energía en aliviaderos escalonados

VÍCTOR ELVIRO GARCÍA (*)
CRISTÓBAL MATEOS IGUÁCEL (**)

RESUMEN Los aliviaderos escalonados constituyen una excelente solución para evacuar avenidas en presas de hormigón compactado con rodillo. Una de las grandes ventajas de este tipo de aliviaderos es la disipación de energía a lo largo de la rápida, no obstante el flujo presenta irregularidades e inestabilidades que pueden poner en peligro la durabilidad de la obra.

DISSIPATION OF ENERGY IN STEPPED SPILLWAYS

ABSTRACT *Stepped spillways are an excellent solution for handling flood releases in RCC dams. One of the biggest advantages of this type of spillways consists in the dissipation of energy along the rapid, nevertheless the flow presents irregularities and instabilities that can peril the durability of the structure.*

Palabras clave: Energía hidráulica; Aliviadero escalonado; Flujo; Caudal; Disipación; Cavitación; Aireación.

INTRODUCCIÓN

Aunque los aliviaderos escalonados hace tiempo que se vienen usando como uno de los procedimientos posibles para la disipación de energía la realidad es que han sido utilizados para pequeños caudales o para pequeños saltos.

Sin embargo recientemente y debido en buena parte a que estos dispositivos pueden ser fácilmente encajables en presas de hormigón compactado con rodillo han recibido una considerable atención.

El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas ha efectuado los estudios en modelo reducido del aliviadero escalonado de la Presa de La Puebla de Cazalla así como el de la presa de Sierra Brava. En la actualidad se están terminando los ensayos de la presa de Alcollarín, también está realizando por encargo de la D.G.O.H. un amplio estudio amplio sobre el comportamiento y márgenes de viabilidad de este tipo de aliviaderos.

Dos son los problemas principales que se plantean en relación a estos aliviaderos: Optimizar la disipación de la energía y asegurar una vida suficiente a la obra.

Se pretende en este artículo dar cuenta de los trabajos realizados por el Laboratorio de Hidráulica en relación con esta temática.

1. DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALIVIADEROS ESCALONADOS

El parámetro que más condiciona la viabilidad e interés de un aliviadero escalonado es su caudal unitario, q , o su

equivalente el calado crítico asociado, h_c , tanto en sentido absoluto como en relación con la distancia entre aristas homólogas de los escalones, d , o con la altura total de la presa, H . Así por ejemplo según se verá con relaciones $H/h_c < 10$ ó $d/h_c < 0,2$ poco puede esperarse ganar en disipación de energía frente a un aliviadero plano convencional.

Parece razonable admitir para un proyecto concreto que en función de las condiciones de la cerrada y del caudal total a evacuar se habrá procurado minimizar en lo posible el valor de " q ". Y una vez fijado éste, dado que el talud está condicionado por razones estructurales (normalmente en torno a 0,75) el proyectista debe de centrar su atención en el tamaño de los escalones, pues éste es el que de forma más relevante afecta a las pérdidas de carga. En efecto admitiendo que la turbulencia está suficientemente desarrollada lo que es seguro tanto en prototipo como en un modelo a escala adecuada se concluye que el coeficiente, " f " de Darcy-Weisbach es función solamente del cociente entre la distancia, " d ", entre aristas del escalonado, y el espesor de la lámina, " e ". Entendiendo por espesor de la lámina en una zona del flujo la distancia desde una arista externa del escalonado hasta la superficie libre del agua.

Si el escalonado es suficientemente largo es factible alcanzar el régimen uniforme y es posible obtener en modelo reducido esa relación ensayando con diversos caudales.

Así se ha hecho con los modelos de Puebla de Cazalla y de Sierra Brava, presas constituidas por similar rápida escalonada, obteniéndose la relación entre magnitudes adimensionales recogida en la curva de la figura nº 1. En relación a esta curva debe indicarse que se ha deducido con un talud 0,8, por lo que en principio se considera aplicable entre taludes 0,75 y 0,85.

Es importante recordar que el agua puede llevar una proporción considerable de aire en forma de burbujas, lo cual

(*) Ingeniero de Caminos. Jefe de la División de Dispositivos Especiales del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPTMA).

(**) Dr. Ingeniero de Caminos. Director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPTMA).

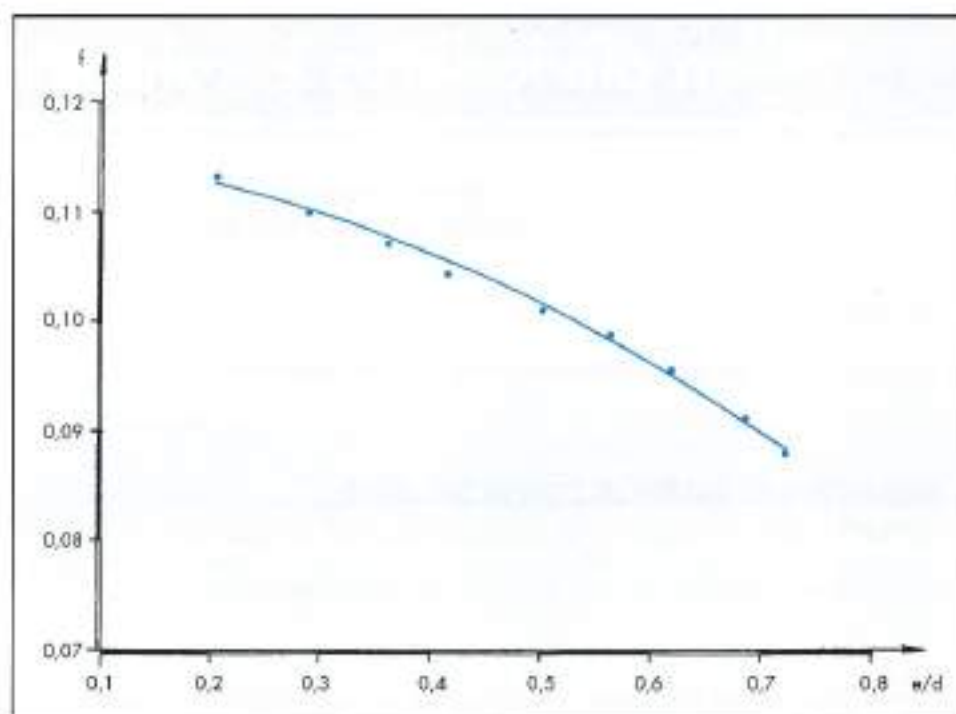


FIGURA 1.

debe ser tomado en cuenta y valorado para aplicar la curva de la figura n° 1, ya que también fue valorado en su obtención.

A partir de esta curva y también contrastando con los modelos citados se ha obtenido la familia de curvas recogidas en la figura n° 2, que permiten en un caso concreto valorar la eficacia como disipador de energía de cada posible escalonado según su tamaño y la altura de la presa.

2. PERSISTENCIA A LARGO PLAZO DEL ESCALONADO

De los diversos riesgos a que está expuesta una obra hidráulica se va a ocupar este artículo solamente del riesgo de cavitación toda vez que ésta puede tener en los aliviaderos escalonados consecuencias especialmente graves si la destrucción que provoca se traduce en una mayor lisura del

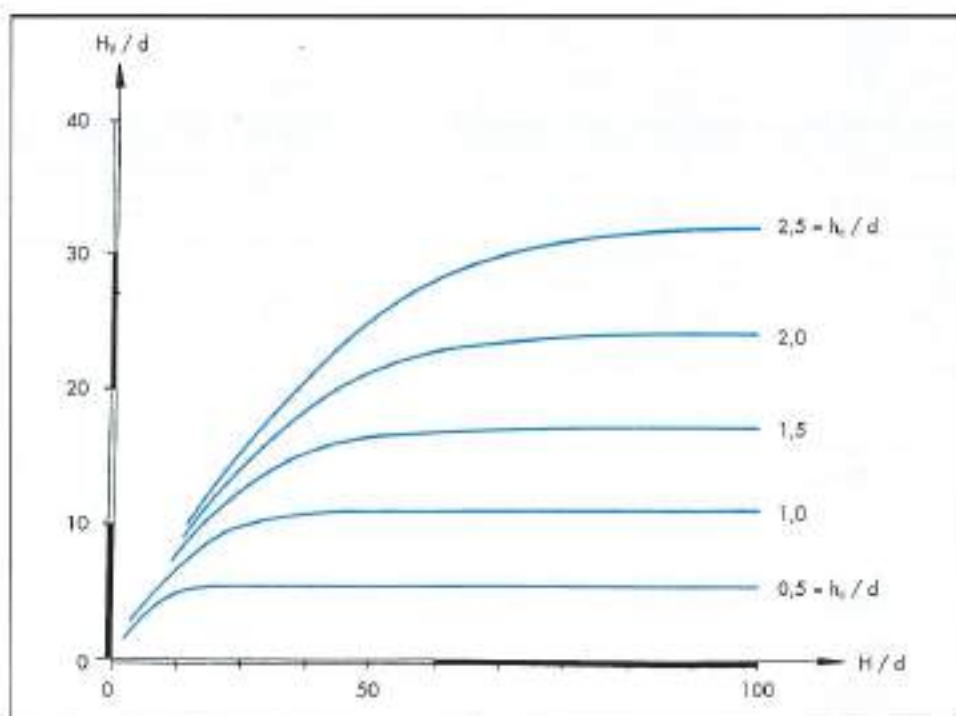


FIGURA 2.

paramento y consecuentemente en una reducción de la disipación de energía con el consiguiente peligro al pie.

El análisis del riesgo de cavitación debe orientarse tanto a sus causas: fuertes velocidades y fuertes turbulencias, como a sus remedios: diseños que atenúen velocidades y turbulencias, aireación natural o forzada, protecciones especiales en los puntos más sensibles, etc. Al haberse efectuado la parte experimental del estudio sobre modelos a escala de Froude, cobra importancia la estimación o al menos acotación de los efectos de escala y su sentido, en temas tales como: fluctuación turbulenta de presiones, zona de inicio de la aireación, desarrollo de ésta, proporción de aire resultante, tamaño de las burbujas, su velocidad en relación al medio, cuantía de aire cerca de los paramentos, etc.

En los estudios en modelo se ha partido de una relación de altura, paso de los escalones y distancia entre aristas 5:4:6,4 y se ha alcanzado hasta valores de q , tales que $q/\sqrt{gd^3}$ no supere 2,5. Para el análisis de los efectos de escala se ha supuesto que ésta era 16, aunque los resultados en general son de aplicación a escalas algo mayores.

A continuación se discuten pormenorizadamente los aspectos reseñados:

A) VELOCIDADES EN ZONAS SIN AIREACIÓN

De la experiencia en aliviaderos planos se sabe que salvo ejecución muy cuidada si no hay aireación aparece riesgo de cavitación para velocidades del agua del orden de los 15 m/s. En los aliviaderos escalonados, dado que lo abrupto de sus formas aumenta la turbulencia, esa cifra debe de rebajarse a

12 ó 13 m/s. En modelo la aireación natural por superficie para un caudal unitario equivalente de 10 m³/seg m no se produce hasta una distancia de 16 m. de la cresta del aliviadero lo que supone velocidades 15 m/seg y aun contando con que en prototipo pudiera por efecto escala acortarse la distancia en un 50% y por tanto reducir la velocidad del orden de un 20%, resultan velocidades considerables y es conveniente una ejecución muy cuidada o una aireación forzada más aguas arriba. En el caso de Puebla de Cazalla la interrupción de las pilas a 6,40 m de la cresta permite la entrada de aire por el eje horizontal del remolino que la corriente induce en la celda que definen los dos paramentos de cada escalón (ver figura 3).

B) RIESGO DE CAVITACIÓN POR FLUCTUACIONES TURBULENTAS DE LA PRESIÓN

Aunque los aliviaderos escalonados disminuyen la velocidad, ya se ha señalado que aumentan considerablemente la turbulencia del flujo. Los vórtices inducidos por esta turbulencia presentan en sus ejes depresiones que pueden llegar a alcanzar los niveles de cavitación. En los ensayos pudo apreciarse que para caudales que corresponden con 9 m³/s de prototipo, en algún punto y de forma intermitente se alcanzaba en el modelo la depresión estrictamente necesaria para la cavitación. En modelo y debido a la presencia de aire en cuantías que luego se comentarán resultan velocidades del sonido muy reducidas del orden de los 30 a 50 m/s según la proporción de aire. En prototipo es igual o incluso más redu-

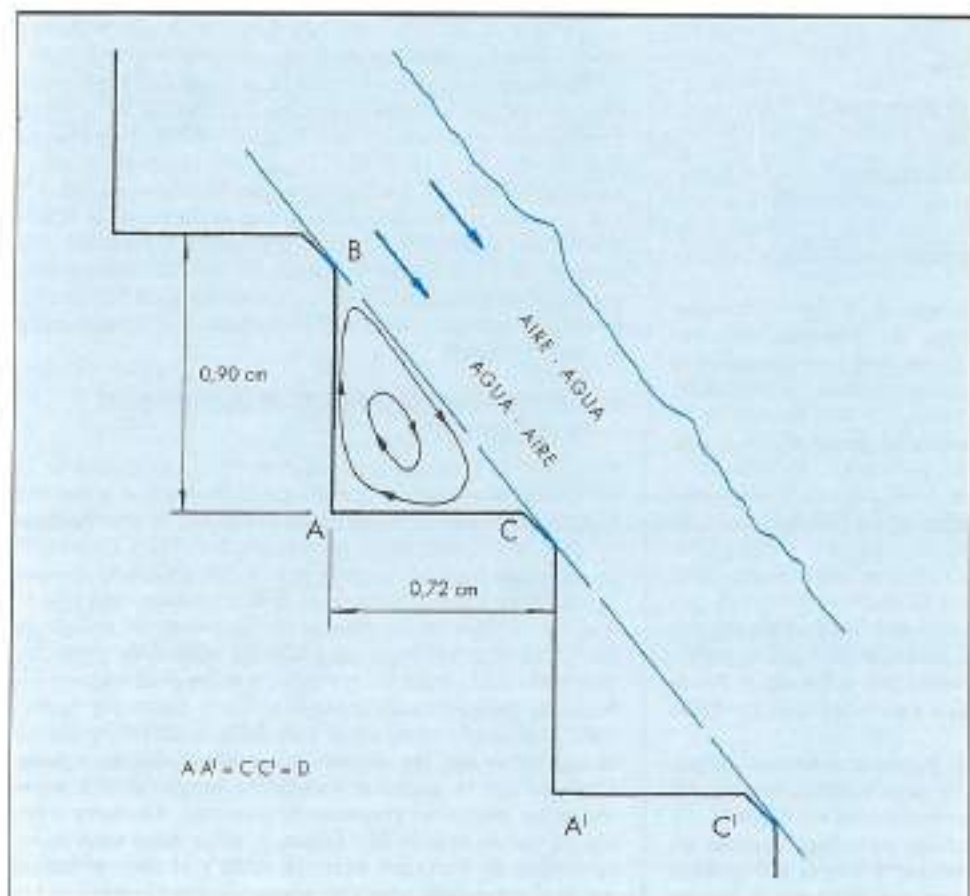


FIGURA 3.



FOTO 1. Aliviadero escalonado de la presa de Alcollarín.

cida al menos en los puntos con depresiones importantes pues la celeridad del sonido baja en éstas hasta 15 ó 20 m/s. Esto se traduce en que por efecto escala las fluctuaciones máximas de presión serán algo más reducidas en prototipo que en modelo y cabe prever que la agitación turbulenta por sí sola no llegue a producir en un paramento liso del escalón cavitación para el caudal reseñado.

C) CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE AIRE Y DEL TAMAÑO DE LAS BURBUJAS

El hecho de que los acabados de los paramentos, salvo ejecución muy cuidada, presenten irregularidades, lleva a concluir que para prevenir los efectos nocivos de la cavitación es conveniente asegurar una aireación en cuantía y tamaño adecuados.

Sobre la cuantía cabe indicar que en la lámina fluyente se puede medir el "esponjamiento" de la lámina como cociente entre el espesor de la lámina y el cociente entre el caudal unitario y la velocidad. Se ha llegado así a estimar en el modelo unas cuantías del orden de 50% de aire en la mezcla. En principio y atendiendo a la estructura de varias fórmulas como las de Douma, Kalinske, Robertson y Sharma en las que la proporción de aire depende exclusivamente de la geometría y del número de Froude cabe concluir que la proporción de aire en modelo y prototipo es idéntica. La estructura de otras fórmulas como la propuesta por Falvey comportan una mayor aireación en prototipo que en modelo. Por contra la fórmula del Task Committee del ASCE para paramentos planos parece indicar que se puede esperar en prototipo una aireación 2/3 del modelo. Aceptando esa reducción corresponden a prototipo una aireación de 30%.

Por lo que hace a la celda de flujo que delimitan los paramentos vertical y horizontal de cada escalón, resulta que al ser predominante en ella un remolino de eje horizontal y gran velocidad periférica la fuerza centrífuga provoca un gradiente de presiones bastante mayor que el hidrostático lo que induce una succión del aire que fluye por la lámina

superior por lo que el equilibrio sólo se alcanza si las concentraciones en la celda son sensiblemente superiores. Las medidas realizadas hasta la fecha indican cuantías del 65% en modelo, así como presencia de cámaras de aire en la celda con caudales bajos. Aun con una cauta reducción a 2/3 para pasar al prototipo resultan cuantías de aire suficientes prevenir la cavitación según se verá.

Por lo que respecta al tamaño de las burbujas se han medido por fotografía rápida en modelo y junto a unas pocas burbujas grandes de 3 a 9 mm la mayoría tenía tamaños situados entre 0,9 y 1,4 mm. El D_{99} (diámetro que no es superado por el 95% de las burbujas) puede estimarse en 1,3 mm., en razonable concordancia con la fórmula de Hinze que da una estimación de 1,1 mm. Es por ello aceptable valorar el efecto escala con la propia fórmula de Hinze y concluir que en prototipo las burbujas reducirán el tamaño de modelo 1,75 veces es decir el 90% tendrán un diámetro entre 0,5 mm. y 0,8 mm.

D) EFECTIVIDAD DE LAS BURBUJAS EN LA PREVENCIÓN DE LA CAVITACIÓN

Para que las burbujas sean eficaces en la prevención de la cavitación es necesario que las haya en cuantía suficiente junto a los paramentos. El fuerte gradiente de presiones en la celda triangular entre paramento vertical y horizontal contiguos se traduce en principio en una tendencia a separar las burbujas del paramento. Situaciones de este tipo se dan por ejemplo en los cuencos de las presas en las que la fuerte curvatura provoca un gradiente adverso de presiones que mantenido durante un tiempo suficiente, separa las burbujas del paramento y puede originar daños por cavitación. Afortunadamente en el caso de la celda triangular en el escalón se dan las circunstancias adecuadas para poder asegurar que la agitación turbulenta compensa suficientemente los efectos del gradiente de presiones. En efecto el hecho de que en el lado BC (Figura 3) actúe como zona de intercambio de burbujas entre la celda y el flujo principal unido al comentado efecto de concentraciones crecientes ha-

cia el eje, presupone que la concentración en el interior de BC es igual o superior que en el exterior. La misma concentración en la proximidad de CA y AB se encontrará ligeramente más alejada de estos lados como consecuencia del desplazamiento que impone el gradiente de presiones y de no haber aportación de aire por estos lados.

Esto quiere decir que las concentraciones en CA y AB son algo inferiores a las de BC. Pero dada la fuerte agitación turbulenta y el poco tiempo empleado por el agua en recorrer C-A-B (del orden de un cuarto de segundo) la reducción de la concentración no es significativa.

Así pues cabe esperar en los paramentos con riesgo de bajas presiones una proporción de aire de al menos 30% (en modelo se aprecia una proporción del orden del 50%), en burbujas entre 0,5 mm y 0,8 mm. Valores que según la bibliografía son suficientes para asegurar que no hay riesgo de cavitación.

3. CONCLUSIONES

Las conclusiones extraídas ensayando con aliviaderos escalonados de proporciones 5:4 entre paramento vertical y horizontal para caudales tales que la relación q^2/gd^3 no exceda del valor 2,5 son las siguientes:

- La pérdida de energía que provoca un aliviadero escalonado se puede calcular por medio de la fórmula de Darcy con un coeficiente, "f", dado en la figura 1 como función del cociente entre la distancia entre aristas y el espesor de la lámina.
- Para caudales unitarios por encima de los 6 m³/s la aireación natural puede comenzar tan aguas abajo que algunos escalones estén expuestos a cavitación. Esta dificultad puede evitarse forzando la aireación antes de que el agua alcance velocidades de 13 m/s.
- En las zonas en que ya es suficiente la aireación natural no hay riesgo de cavitación al menos para caudales que no superen los 10 m³/s.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) M. BINDO. The stepped spillway of M'Bali dam. 1993. Water Power & Dam Construction. January.
- (2) H. CHANSON. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research. Vol 30. 1994. nº 2.
- (3) G.C. CHRISTODOULOU. Energy dissipation on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. Vol 119. Mayo 1993.
- (4) DÍEZ - CASCÓN, J.L. BLANCO. Studies on the Hydraulic behaviour of stepped spillways. Water Power & Dam Construction. September 1991.
- (5) V. ELVIRO GARCÍA y C. MATEOS IGUÁCEL. Aliviaderos Escalonados. Presa de La Puebla de Cazalla. Ingeniería Civil nº 84 CEDEX. Junio 1992.
- (6) ESSERY AND HORNER. The Hydraulic Design of stepped spillways. CIRIA Report 33. London.
- (7) K. FRIZELL. Stepped spillway design for flow over embankments. National Conference on Hydraulic Engineering. Asce New York, pág. 118-123.
- (8) C. MATEOS IGUÁCEL y V. ELVIRO GARCÍA. The use of stepped spillways in energy dissipation. 60 th Executive Meeting ICOLD. Septiembre 1992. Granada.
- (9) C. MATEOS IGUÁCEL y V. ELVIRO GARCÍA. Regularidad del flujo en aliviaderos escalonados. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Chile). Octubre 1994.
- (10) L. PEYRAS. Ecoulement et dissipation sur les déversoirs à gradins de gabions. La Houille Blanche. 1991, nº 1.
- (11) N. RAJARATNAM. Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. Vol 116. nº 4 Apr. 1990.
- (12) R. SORESENSEN. Stepped spillways Hydraulic model investigation. ASCE New York vol 111 nº 12. December 1985.
- (13) D. STEPHENSON. Energy dissipation down stepped spillways. Water Power & Dam Construction. Sep. 1991.



FOTO 2. Observación lateral del flujo en un aliviadero escalonado.

LA CALIDAD, POR SISTEMA.

Auxini es una empresa constructora, especializada en la ejecución de obras de gran magnitud y trascendencia social, cimentadas sobre un experto equipo humano y sólidos recursos técnicos.

Todo ello con un firme compromiso, la mejora de las infraestructuras y la conservación del medio ambiente.



SOLUCIÓN A GRANDES OBRAS