

Aliviaderos escalonados. Diseño de la transición entre el umbral y la rápida escalonada

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

RESUMEN El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX estudia, de acuerdo con una investigación encomendada por la Dirección General de Obras Hidráulicas, una metodología para el diseño de aliviaderos escalonados analizando las principales variables que intervienen en su funcionamiento, caudal unitario, tamaño de los escalones, distribución de aire en el flujo, pérdidas de energía, presiones rápidamente variables, etc. La transición entre el umbral y la rápida uniforme de un aliviadero escalonado ha sido hasta ahora objeto de estudio en modelo reducido particular de cada caso. Con este trabajo se pretende fijar el diseño de la transición en función de la altura de la lámina de agua con la que se define el perfil estricto de la coronación.

STEPPED SPILLWAYS. DESIGN FOR THE TRANSITION BETWEEN THE SPILLWAY CREST AND THE STEPS

ABSTRACT The Hydraulic Works Administration has commissioned the Hydraulics Laboratory of the CEDEX to carry out research into a methodology for designing stepped spillways, in which emphasis is placed on the main factors that influence operation: flow rate, step dimensions, air distribution in the flow, energy dissipation, rapidly varying pressures, etc. Until now, a specific scale model has been used for each case, when studying the transition between the threshold and the uniform chute of a stepped spillway. The aim of this paper is to determine a suitable design of the transition on the basis of the surface flow height with which the strict profile of the crest is defined.

Palabras clave: Aliviaderos escalonados; Transición en coronación.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de construcción de grandes presas mediante la técnica de hormigón compactado con rodillo se desarrolla en la década de los años 80 existiendo, en la actualidad, más de 150 presas en servicio o construcción diseminadas por todo el mundo. Una ventaja adicional a este sistema es disponer el aliviadero en el cuerpo de la presa, manteniendo el escalonado producido por el encofrado durante la construcción, lográndose también una importante pérdida de energía a lo largo de la rápida, con la consiguiente disminución de volumen en la obra de reincorporación al cauce.

Los aliviaderos escalonados actualmente no están suficientemente estudiados existiendo una cierta incertidumbre en cuanto a su funcionamiento a largo plazo, la cuantía máxima del caudal unitario a evacuar, así como en la metodología de su diseño. Para paliar en lo posible esta incertidumbre la Dirección General de Obras Hidráulicas encarga al Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) un estudio general sobre este tipo de aliviaderos en el que se analizan las principales variables que

afectan a su funcionamiento para contribuir a una correcta definición hidráulica de los mismos.

En este artículo se presenta un resumen de los trabajos realizados sobre uno de los puntos contenidos en el citado estudio en el que se analiza la transición entre el umbral del aliviadero y la rápida escalonada.

2. CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE UN ALIVIADERO ESCALONADO

En un aliviadero escalonado típico pueden apreciarse dos zonas diferenciadas: el perfil de coronación más o menos convencional y la rápida escalonada. Ambas zonas deben unirse, según justificaremos, por otra de transición. El perfil de coronación se dimensiona para una lámina de agua próxima o coincidente con la máxima y en general para estos caudales altos a poco que se cuide la transición no se observan problemas de continuidad. Los problemas se presentan para pequeños caudales, pues en el primer escalón la lámina cae muy poco tendida y por ello choca toda ella con la huella del escalón con el resultado de que sale totalmente horizontal, con lo que evita el contacto con los escalones inmediatos agravándose la situación en los sucesivos impactos. Si el tamaño del primer escalón es grande en relación con la lámina de agua y la velocidad elevada, se produce un verdadero trampolín que origina un gran salto de la lámina de agua.

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

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

Al aumentar el caudal, como ya se ha comentado, el salto desaparece pero empiezan a aparecer depresiones acompañadas de fluctuaciones rápidamente variables tanto en las zonas de altas como de bajas presiones. Fluctuaciones que no es posible suprimir, pero lo que puede ser especialmente grave es la aparición de cavitaciones y para evitarlas es necesario introducir aire en la lámina de agua. El aire entra de forma natural por superficie, pero puede que no llegue a todas las zonas en que es necesario o lo haga en cuantía insuficiente. Se sabe que la sección en que comienza la aireación depende del caudal unitario, por ello para caudales unitarios altos aparecen zonas con flujos de alta velocidad y sin airear, al mismo tiempo que se producen fuertes perturbaciones en solera, todo lo cual se traduce en que, salvo eventuales cambios radicales del diseño, exista un límite práctico para el caudal unitario máximo que es razonable evacuar.

De los ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica con distintas rápidas así como de datos obtenidos de ensayos de otros laboratorios, como orden de magnitud y para escalones entre 80 y 100 cm de altura se tienen los siguientes valores de comienzo de aireación:

Caudal unitario	Diferencia de cotas con el umbral
4 m ³ / seg m	7,0 m
6 m ³ / seg m	10,0 m
8 m ³ / seg m	13,0 m
10 m ³ / seg m	16,0 m
16 m ³ / seg m	24,0 m

A la vista de estos valores si se pasa de 10 m³ / seg m pueden aparecer graves problemas de cavitación, siendo necesario realizar ensayos en modelo reducido en los que se midan presiones rápidamente variables en los escalones, fundamentalmente en las aristas exteriores de los mismos y sus entornos.

El criterio de diseño utilizado en estos trabajos es lograr una transición uniforme que regularice el flujo para toda la gama de caudales, evitando la separación de la lámina de agua para todos ellos y fundamentalmente para los caudales inferiores.

Cabe el criterio de dimensionar la transición pensando en grandes caudales de forma que se logre la aireación de la rápida lo más pronto posible, aunque el flujo sea irregular para los caudales inferiores. En este sentido, si el proyecto de la transición se realiza con la necesidad de lograr una aireación de la lámina de agua, se deberán tener en cuenta los valores indicados en la tabla anterior con el fin de alcanzar la plena aireación en secciones más próximas a coronación, disminuyendo así el riesgo de cavitación.

3. ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN

Los ensayos realizados se centran en encontrar una solución que reduzca lo más posible la magnitud del salto así como el rango de caudales para el que se pueda producir.

Con el fin de sistematizar los ensayos se trabaja con una rápida de talud 0,75:1 al que es tangente un perfil Bradley dado por la fórmula:

$$\frac{Y}{H} = 0,5 \left(\frac{X}{H} \right)^{1,47}$$

en la que el origen de coordenadas es el umbral del aliviadero, siendo "X" el eje horizontal e "Y" el vertical, por último "H" es la altura estática de la lámina de agua en el embalse en relación con el umbral, para la que se desea que sean nulas las presiones a lo largo del vertedero.

Los ensayos se realizan en laboratorio en varios canales de ensayo y con valores de H de 0,20 m, 0,40 m, y 0,80 m. A los resultados obtenidos se les puede aplicar cualquier escala considerando invariable el número de Froude, pero teniendo en cuenta las limitaciones que los efectos de escala imponen a la semejanza hidráulica. Conviene resaltar que hay que garantizar que el número de Reynolds sea suficientemente grande, no sólo para el caudal nominal de diseño, sino para los caudales que producen el salto que son mucho más pequeños. La tensión superficial, representada por el número de Weber, también tiene influencia en este tipo de ensayos.

Se ensayaron nueve diseños diferentes, todos ellos con funcionamiento satisfactorio para los caudales altos, pero diferenciándose en el comportamiento para pequeños cauda-



FOTO 1. Solución propuesta.

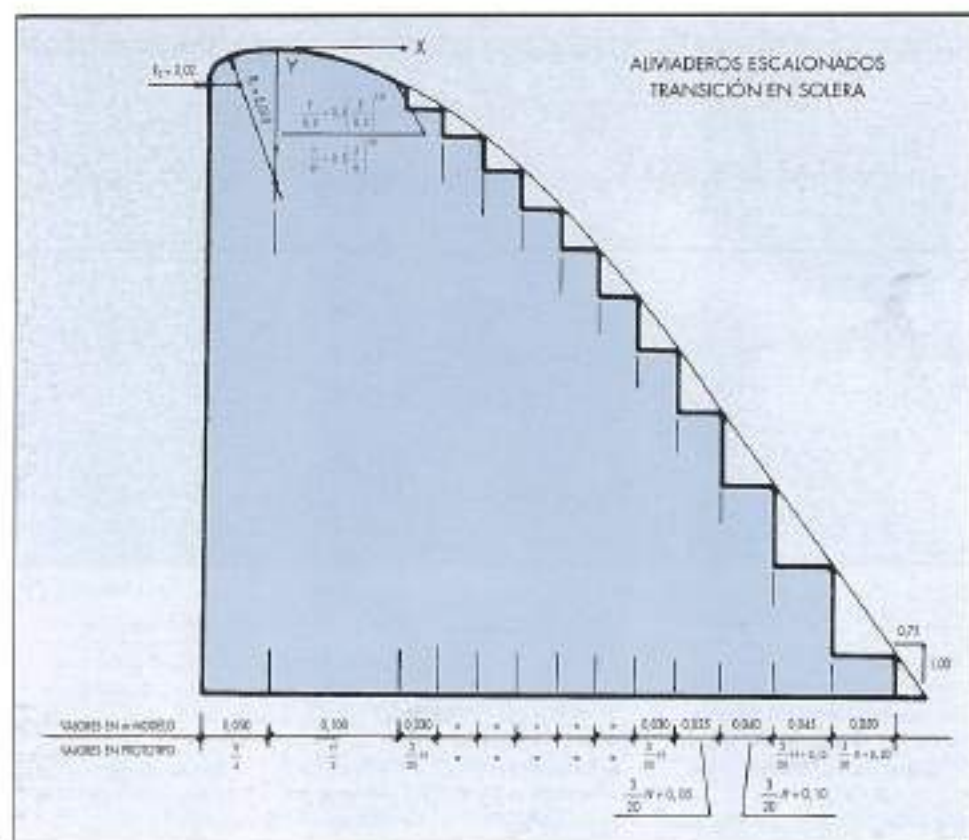


FIGURA 1. Diseño de transición suave.

les. En este artículo se comentan únicamente las soluciones que se consideran más adecuadas.

4. PRINCIPALES DISEÑOS ENSAYADOS

- DISEÑO 1

Tras realizar algunos tanteos se ensayó el diseño reflejado en la figura 1, en la que el escalonado comienza a una distancia horizontal $H/2$ del umbral, siendo los escalones constantes en horizontal y de valor $3H/20$, por lo que es necesario que a partir del octavo escalón, esta magnitud se incremente hasta llegar al tamaño de los escalones que forman la rápida.

En los ensayos se pone de manifiesto que el inicio del escalonado, así como el tamaño de los primeros escalones, son las dos variables fundamentales para determinar el comportamiento de la transición. Con esta solución se logra que prácticamente no se produzca salto alguno, sólo para láminas con alturas de $H/20$ se produce un ligero lanzamiento de la lámina de agua del primer escalón al tercero, salto que desaparece en cuanto se aumenta ligeramente el caudal.

El único inconveniente de este diseño es que es una transición muy suave y por lo tanto necesita mucha longitud, con los consiguientes problemas constructivos.

- DISEÑO 2

En la figura 2 se representa este diseño que pretende paliar el principal inconveniente del anterior aumentando la progresión de la transición. El escalonado se inicia a $2H/3$ del umbral, definiéndose el tamaño de los escalones por la longi-

tud horizontal con la siguiente cadencia, H/10; H/8; 3H/20; H/5; H/4... hasta llegar al escalonado uniforme.

El funcionamiento de esta solución es en general agitado, produciéndose para pequeñas láminas de agua un salto no desde el primero sino desde el segundo escalón. De la misma forma que la primera solución podría indicar una cota de transición suave, esta segunda solución indicaría la cota de transición brusca.

5. DISEÑO PROPUESTO

El ensayo de este diseño se realiza utilizando un perfil guía definido para 80 cm estando la transición definida en la figura 3. El escalonado comienza a H/3 del umbral con escalones definidos en horizontal por valores de H/8, H/7, H/6,5, H/6, H/5,5... El agua discurre de escalón en escalón desde el inicio del vertido hasta láminas de 3,35 cm (H/24) para la que se produce un salto del primer escalón al tercero rozando el vértice del segundo escalón.



FOTO 2. Solución propuesta.

Para láminas de 4,2 cm ($H/19$) se produce un nuevo salto desde el tercer escalón hasta el sexto de forma agitada y sin formar una lámina continua, este proceso tiene un rango de funcionamiento muy corto, pues para láminas de 5,0 cm ($H/16$) desaparece el salto al anegarse el segundo escalón, iniciándose un nuevo salto desde éste hasta el cuarto, funcionamiento que se mantiene hasta láminas de 6,4 cm ($H/12,5$) en la que desaparecen los saltos. Debido a la pequeña magnitud de los saltos este proceso no es fácil de observar mirando frontalmente al aliviadero, desde donde pa-

rece que el funcionamiento tiene regularidad para toda la gama de caudales y así es por tanto a los efectos prácticos.

Con pequeños ajustes esta definición se ha adaptado a la presa de Alcollarín que tiene un perfil guía más tendido y aplicando los valores en función de la lámina de agua H , obteniéndose los resultados esperados y confirmando de forma aún más genérica la bondad de la definición.

Con el fin de eliminar totalmente aun los pequeños saltos se introdujeron pequeñas modificaciones en el escalonado manteniendo la definición básica de la misma. Comentare-

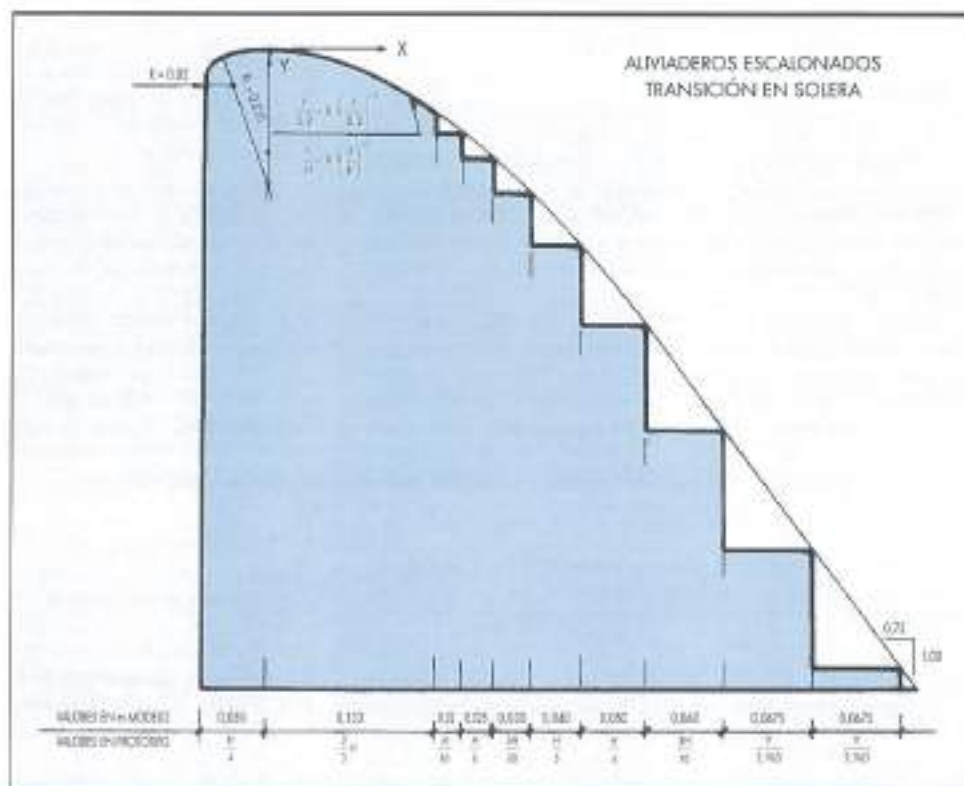


FIGURA 2. Diseño de transición corto.

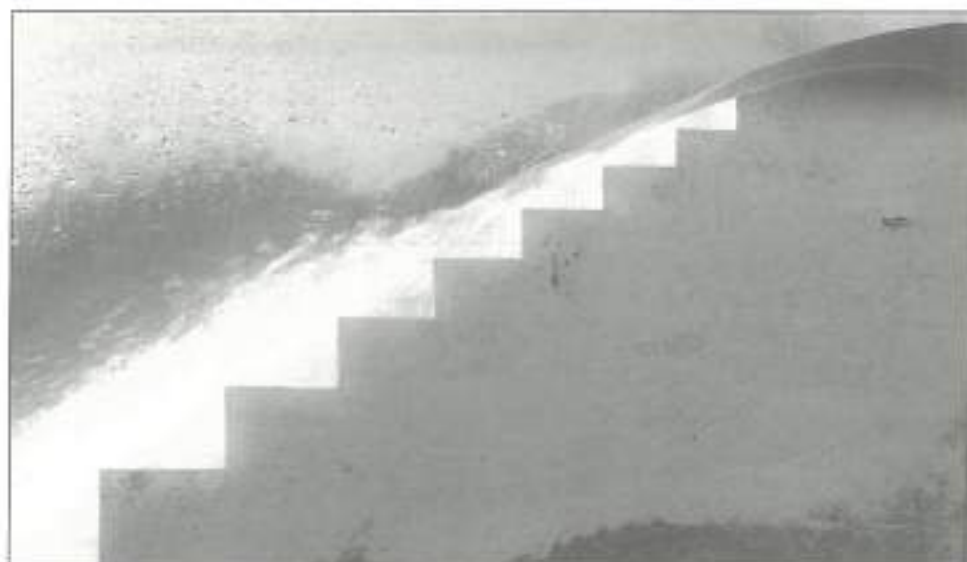


FOTO 3. Presa de Alcollarín.
Modelo Escala 1/4.

mos exclusivamente la que mejor resultado dio, que fue redondear el vértice de los primeros escalones formando cilindro de 1,6 cm ($H/50$) de radio; con este diseño se consigue eliminar totalmente el salto, pero dada la magnitud real de los mismos así como la gama de caudales para los que se produce, es posible que la mejora realizada no se vea compensada con la dificultad constructiva que ella acarrea.

Según se ha comentado, el diseño presenta importantes ventajas para los caudales bajos, pero no hay diferencias sensibles para los altos, por lo que son de aplicación las cau-

telas generales vigentes en el momento, esto es, no utilizarlos con láminas vertientes que sobrepasen los 3 m, o sea, para caudales unitarios superiores a $11 \text{ m}^3/\text{seg m}$ a menos que se adopten medidas adicionales.

6. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados sobre modelo reducido relacionados con la definición de la transición entre el umbral y la rápida escalonada se obtienen las siguientes conclusiones:

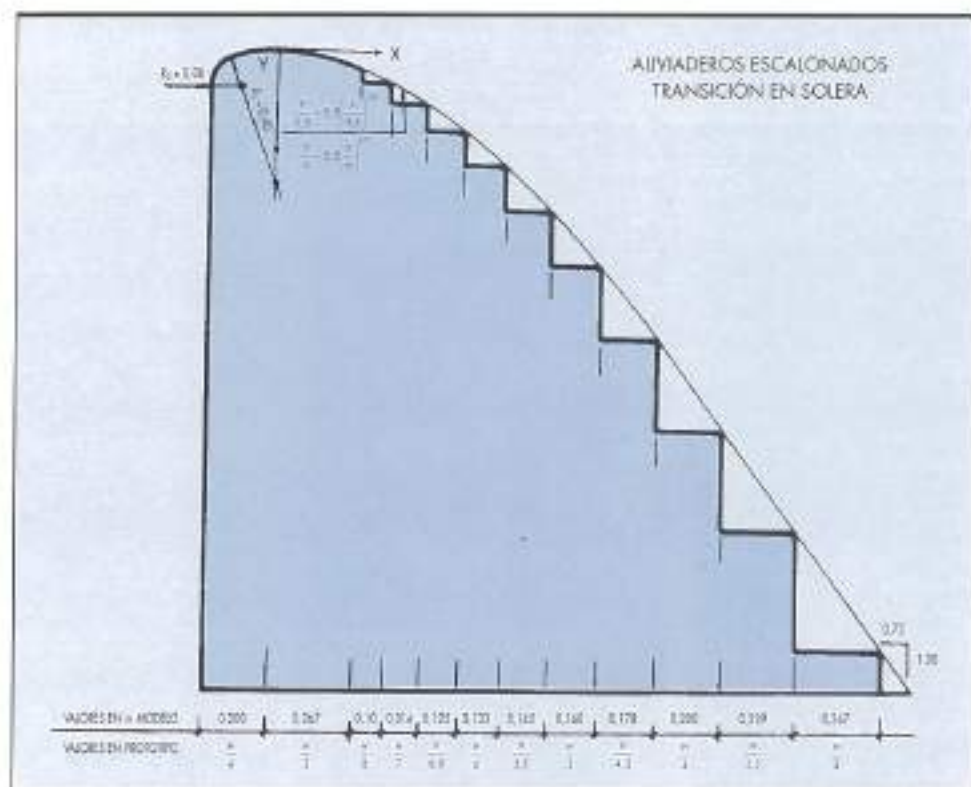


FIGURA 3. Diseño propuesto.

1. Los trabajos se realizan con perfiles guía tipo Bradley dados por la fórmula:

$$\frac{Y}{H} = 0,5 \left(\frac{X}{H} \right)^{1,85}$$

Se ha podido comprobar que los resultados pueden ser aplicables a otro tipo de perfil guía, también tangentes a taludes 0,75:1 usuales en este tipo de presas.

2. Para pequeñas láminas de agua, muy inferiores a las de proyecto, el comienzo del escalonado actúa como un trampolín produciendo el lanzamiento de la lámina de agua. Es necesario un estudio muy cuidadoso de la transición con el fin de evitar este funcionamiento nocivo.
3. El efecto de escala es muy importante en este tipo de ensayos, ya que el estudio hay que centrarlo para láminas muy pequeñas, debiéndose analizar cómo afectan los números de Reynolds y Weber para esos pequeños caudales y no sólo para las láminas de proyecto. Ello ha llevado al Laboratorio de Hidráulica a utilizar en algunos casos para los ensayos finales, modelos a escala 1/4 ó 1/3.
4. Como diseño de la transición se propone el definido en la figura 3. El escalonado se inicia a H/3 de la coronación del aliviadero, aumentando progresivamente el tamaño de los escalones hasta llegar al escalonado uniforme de la rápida.
5. Con el diseño propuesto el salto se produce para una reducida gama de pequeños caudales sólo apreciable en modelos de gran escala. Para el resto de los caudales el funcionamiento de la transición es plenamente satisfacto-

rio. Sólo con redondear los vértices de los cinco primeros escalones se evita totalmente cualquier tipo de salto.

BIBLIOGRAFÍA

- M. BINDO. The stepped spillway of M'Bali dam, Water Power & Dam Construction, January 1993.
- H. CHANSON. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research, Vol. 30, 1994, n° 2.
- C. CHRISTODOULOU. Energy dissipation on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, Mayo 1993.
- V. ELVIRO GARCÍA y C. MATEOS IGUÁCEL. Aliviaderos Escalonados. Presa de La Puebla de Cazalla. Ingeniería Civil, n° 84 CEDEX, Junio 1992.
- V. ELVIRO GARCÍA y C. MATEOS IGUÁCEL. Disipación de energía en aliviaderos escalonados. Ingeniería Civil, n° 97 CEDEX, Abril 1996.
- C. MATEOS IGUÁCEL y V. ELVIRO GARCÍA. The use of stepped spillways in energy dissipation. 60 th Executive Meeting ICOLD, Septiembre 1992, Granada.
- C. MATEOS IGUÁCEL y V. ELVIRO GARCÍA. Regularidad del flujo en aliviaderos escalonados. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Chile), Octubre 1994.
- N. RAJARATNAM. Skimming flow in stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, n° 4, Apr. 1990.
- R. SORENSEN. Stepped spillways Hydraulic model investigation. ASCE New York, vol. 111, n° 12, December 1985.
- D. STEPHENSON. Energy dissipation down stepped spillways. Water Power & Dam Construction, Sep. 1991.
- M. J. TOZZI. Residual energy in stepped spillways. Water Power & Dam Construction, May, 1994.