

Aliviaderos escalonados. Presa de La Puebla de Cazalla

VICTOR ELVIRO GARCIA (*)
CRISTOBAL MATEOS IGUACEL (**)

RESUMEN. La presa de La Puebla de Cazalla, de 71 m de altura y hormigón compactado, dispone en su aliviadero de una rápida escalonada igual al resto del paramento de aguas abajo de la presa. El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos ensaya en modelo físico dicho aliviadero. En el presente artículo se resumen las principales consecuencias obtenidas en dichos ensayos.

STEPPED SPILLWAYS. LA PUEBLA DE CAZALLA DAM

ABSTRACT. *The RCC of La Puebla de Cazalla, is 71 m high, and its stepped spillway is the same shape as the sloping surface. The Hydraulics Laboratory at the Centro de Estudios Hidrográficos, uses a physical model to test the stepped spillway. This paper shows the results of the experiment.*

1. INTRODUCCION

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir construye sobre el río Corbones la presa de La Puebla de Cazalla. Es una presa de tipo gravedad con planta recta y una altura máxima sobre cimientos de 71 m. El sistema utilizado para la construcción es de hormigón compactado, siendo la primera de estas características que en España utiliza el sistema de rápida escalonada en su aliviadero.

La Dirección General de Obras Hidráulicas firma un Convenio en mayo de 1991 con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas para que por el Laboratorio de Hidráulica (Centro de Estudios Hidrográficos) se ensaye en modelo reducido el comportamiento hidráulico del aliviadero, escalonado de la presa de La Puebla de Cazalla. En diciembre de 1991, y una vez concluidos los ensayos del aliviadero se emite el Informe titulado «Estudio en modelo reducido del aliviadero de la presa de La Puebla de Cazalla». El objeto del presente artículo es exponer de forma concisa los principales resultados obtenidos en los ensayos en modelo reducido.

2. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LA OBRA

La presa de La Puebla de Cazalla es de gravedad con planta recta y una longitud en coronación de 220 m. La

altura máxima sobre cimientos es de 71 m, siendo la cota de coronación la 278.

El aliviadero de superficie se construye sin compuertas. La rápida en escalera termina con un trampolín dentado sumergido que vierte en un cuenco amortiguador. En la figura 1 puede verse una sección de la obra por el aliviadero y cuyas principales características son:

Número de vanos	3
Anchura de vano	6 m
Cota del umbral	272
Caudal de diseño	162 m ³ /seg
Caudal unitario	9 m ² /seg
Talud de la rápida	0,8/1
Dimensión de los peldaños	0,72 m en horiz. 0,90 m en vertical
Cota del trampolín sumergido	218,85
Cotas del lanzamiento	216,832 217,219
Cota de solera del cuenco amortiguador	214,50
Cota superior del azud de cierre del cuenco	220,0

3. EL MODELO

Para estudiar el aliviadero se construyó en el Laboratorio de Hidráulica un modelo físico tridimensional a escala geométrica lineal 1/16. Comprobándose que se cumplen las condiciones que hacen viable la semejanza de Froude.

Característica singular de este modelo es la rápida escalonada que se realiza toda ella en metacrilato, lo que permite la perfecta observación del flujo y facilita la

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Servicio del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPT).

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPT).

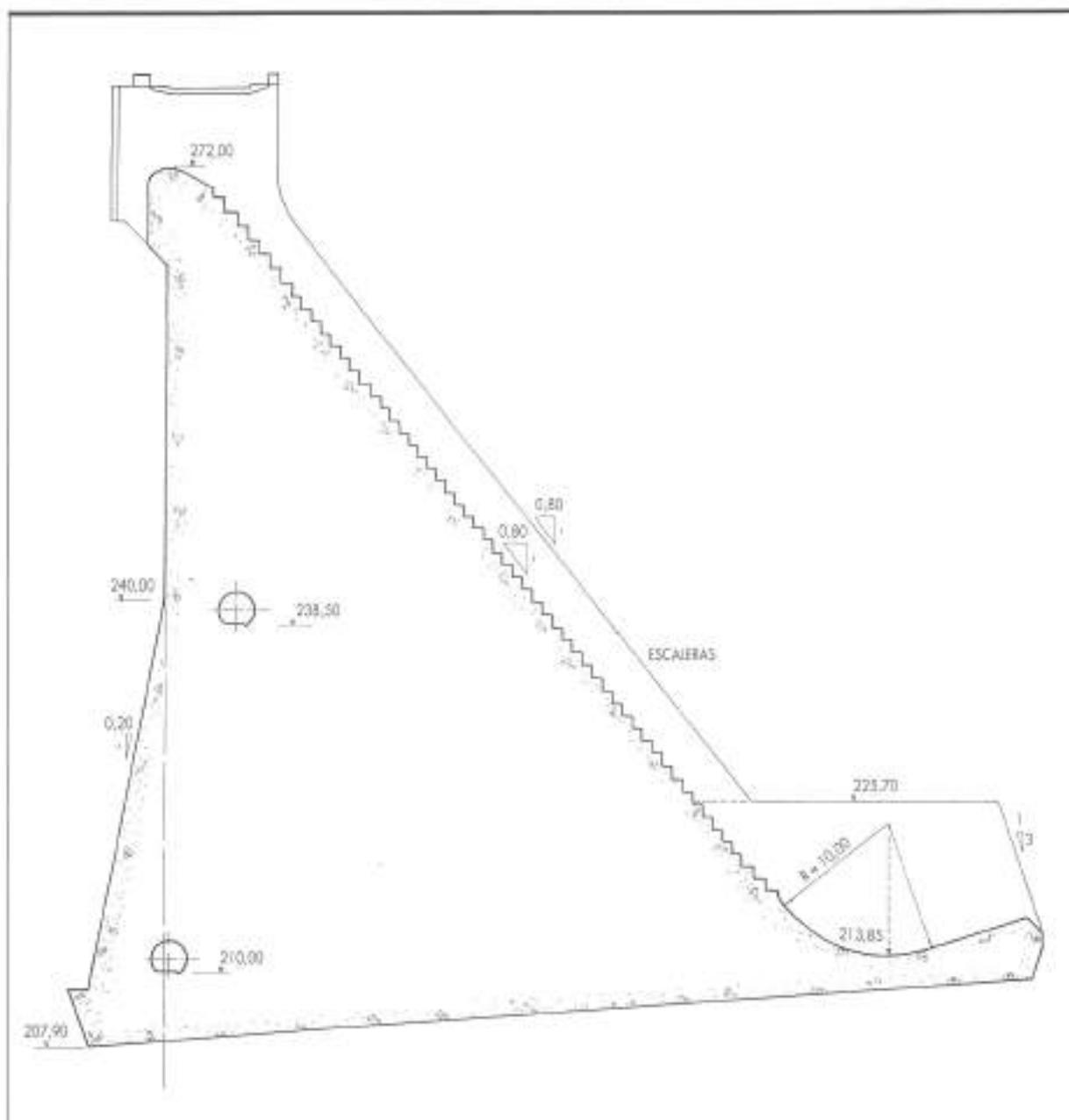


FIGURA 1. Sección tipo de la presa por vertedero.

implantación de aparatos de registro, al construirse toda la rápida al aire apoyada sobre vigas metálicas.

Otra característica necesaria en este tipo de estudios es la medida en los escalones de las presiones rápidamente variables; para ello se utiliza un equipo electrónico consistente en sensores de alta sensibilidad (galgas extensométricas de piezoresistencias difundidas en un diafragma de silicio), acondicionadores de señal, equipo de adquisición de datos a alta velocidad y un ordenador que gobierna el proceso, analiza la información recibida

(incluido análisis espectral por transformada de Fourier, detección de picos, etc.) y la almacena en diskettes.

4. ENSAYOS REALIZADOS

Cuando se iniciaron los ensayos, la presa de La Puebla de Cazalla se encuentra en fase de construcción, estando terminado el trampolín de lanzamiento y parte de la rápida, por lo cual el Laboratorio de Hidráulica se limita a comprobar su funcionamiento, no considerándose necesario introducir modificaciones en el mismo, puesto



FIGURA 2. Modelo de La Puebla de Cazalla.

que el cuenco amortiguador presenta un comportamiento hidráulico aceptable siendo espaz de amortiguar el irregular comportamiento del trampolín.

El primer problema que se plantea en este tipo de aliviaderos es la transición entre el perfil más o menos tipificado de la coronación del aliviadero y la rápida escalonada; si la transición es muy suave se retrasa la entrada de aire y al existir irregularidades en solera, si la velocidad es alta, existe riesgo de cavitación; por el contrario, si la transición es brusca se produce el lanzamiento total de la lámina de agua. El diseño de estas transiciones no está tipificado, considerándose necesario el ensayo en modelo reducido dada su complejidad.

En los ensayos del proyecto se observa un fuerte lanzamiento de la lámina de agua (véase figura 3) cuyo alcance va disminuyendo a medida que aumenta el caudal, de forma que cuando la relación calado/altura del escalón es suficientemente grande el lanzamiento deja de producirse.

En el Laboratorio se ensayaron diversas soluciones, proponiendo al final dos soluciones de comportamiento similar. En el diseño elegido el escalonado entre el umbral y la rápida se realiza disminuyendo el tamaño de los escalones de forma progresiva hacia aguas arriba, iniciando el primer escalón a unos 50 cm por debajo del labio del vertedero. Con este diseño se consigue que no se produzca el salto del flujo ni siquiera para el comienzo del vertido; ahora bien, la aireación en esta zona de transición es muy reducida.

En los escalones se van a producir depresiones, que podrían llegar a producir cavitaciones. El colapso de las burbujas de vapor de agua y las ondas de presión asociadas es la causa de la destrucción del hormigón. Desde hace tiempo se sabe que una solución para evitar los efectos de la cavitación es airear el flujo, ya que por una



FIGURA 3. Lanzamiento del flujo en el comienzo del escalonado.

parte la velocidad de propagación del sonido en un flujo mixto de agua-aire es muy inferior a la velocidad que tendría en cualquiera de los dos medios puros; por otra parte se limita la expansión de las cavidades de vapor, pues a la presión de vacío también se expanden las burbujas de aire, formándose burbujas mixtas que no pueden colapsar totalmente. De ahí la necesidad de airear el flujo en el aliviadero antes de que éste adquiera velocidad.

En el modelo se intentó introducir aire por solera aprovechando los escalones. El procedimiento no funcionó ya que aunque hay depresiones instantáneas los valores medios son muy próximos a cero (el valor varía a lo alto del escalón) y por tanto para introducirlo sería necesario insuflar el aire. Sólo en el escalón donde terminan las pilas en el que por tanto existe alimentación de aire lateral el sistema puede ser útil, pero no se considera necesario. Es importante airear lo antes posible toda la lámina de agua, pero de forma natural esta aireación sólo se produce por superficie.

La rápida está formada por escalones de 0,9 m en vertical por 0,72 m en horizontal, presentando la peculiaridad de biselar a 45° el vértice de los escalones (bisel de 10 x 10 cm). El bisel se podría justificar como mejora del acabado en obra y de la resistencia a largo plazo;

hidráulicamente no presenta ventajas, siendo desfavorable en el sentido de agrandar la zona expuesta a las mayores depresiones.

En la bibliografía la altura de los escalones se relaciona o bien con el caudal unitario o bien con la diferencia de alturas entre la lámina de agua en el embalse y la cota del umbral del aliviadero (variables relacionadas entre sí en función del coeficiente de desagüe del aliviadero). Para la Puebla de Cazalla la lámina de agua es tres veces la altura del escalón y el caudal unitario es de 9 m²/seg. Estos valores, que podrían parecer altos, se puede decir que se corresponden con los máximos valores estudiados en algún otro caso. A medida que aumente el conocimiento y la experiencia sobre el funcionamiento de este tipo de aliviaderos seguramente se irán ampliando estos valores.

Los ensayos realizados por el Laboratorio de Hidráulica sobre la rápida se centraron fundamentalmente en la medida de velocidades y en la medida de presiones.

En la rápida se presenta un flujo diferenciado. Entre los escalones el fluido agua-aire tiene un movimiento rotacional de eje horizontal, observándose la traslación transversal de los remolinos. Por encima de los escalones el flujo tiene la dirección de la rampa, observándose dos zonas no claramente diferenciadas, un flujo inferior

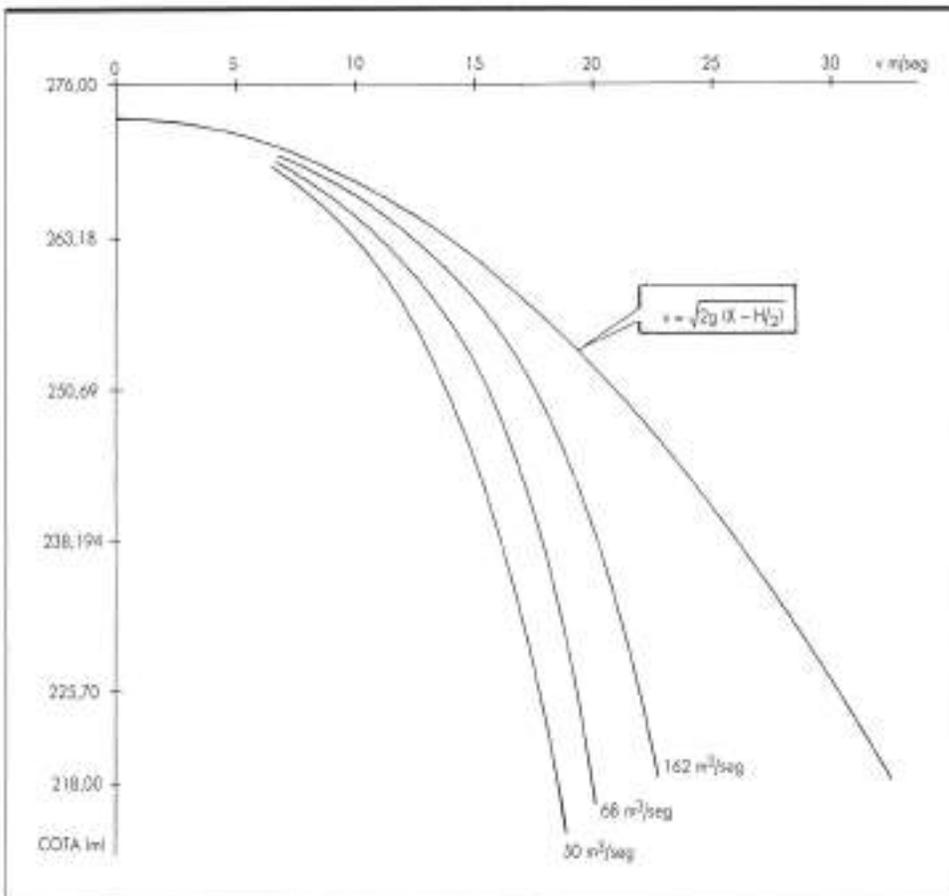
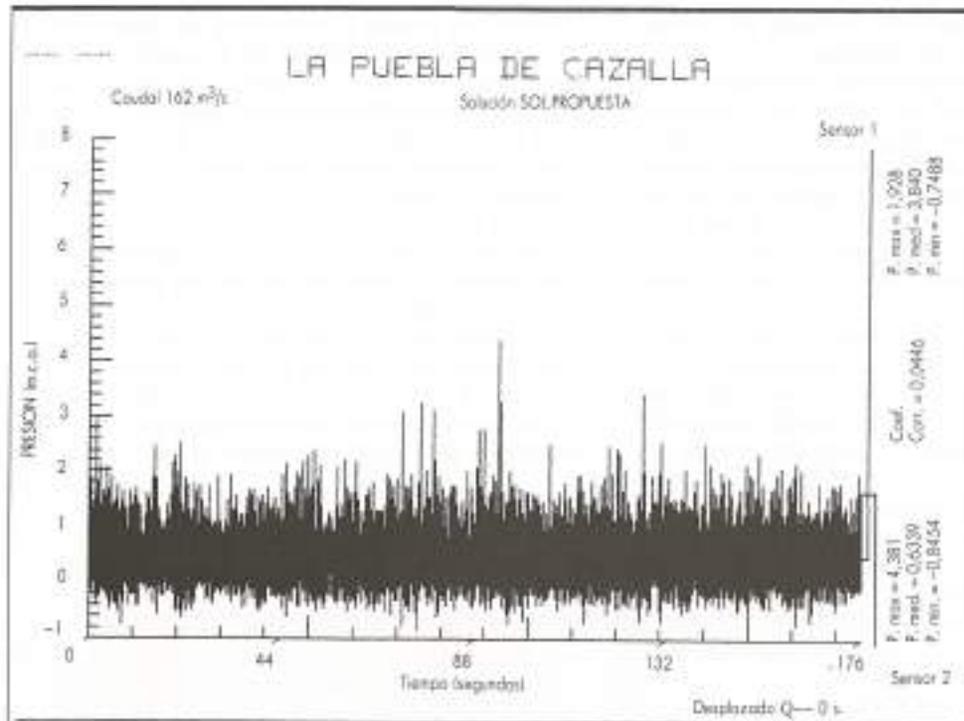
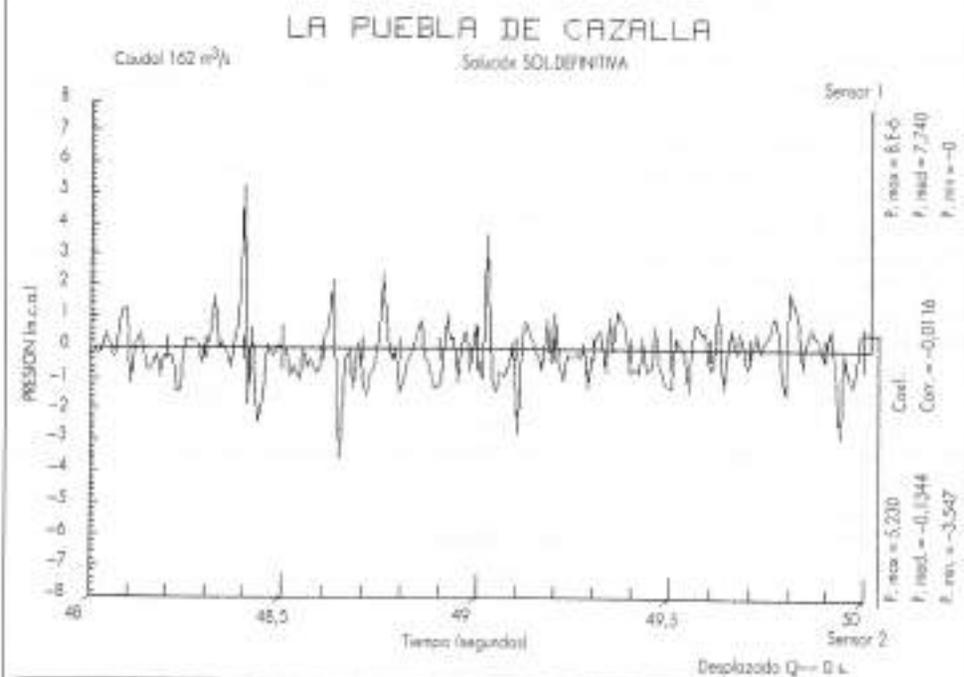


FIGURA 4. Curvas de velocidad media en la rápida.



SENSOR 1. ESC. INTERMEDIO PARED HORIZ. A 5,6 m DEL VERTICE
SENSOR 2. ESC. INTERMEDIO PARED VERT. A 8 m DEL VERTICE



SENSOR 1. SENSOR DE REFERENCIA CERO
SENSOR 2. ESCALON MEDIO (B6)

FIGURA 5. Medida de presiones rápidamente variables en los escalones.

agua-aire y un flujo superior de aire-agua en función del predominio de uno u otro elemento.

En estas condiciones la medida de velocidades no es fácil, variando la velocidad en función de la profundidad. En la figura 4 se representa las curvas de velocidades medias obtenidas en modelo para diferentes caudales. Con estos valores se evalúan las pérdidas de energía a lo largo del aliviadero en relación con la altura de la línea de energía: en Puebla de Cazalla es del orden del 55 % para el caudal máximo. Este valor, ya de por sí importante, es inferior a lo esperado según diversas bibliografías; se observa en esta figura que efectivamente para valores del cociente caudal unitario/altura del escalón altos, como es el caso analizado, las pérdidas de energía disminuyen. Así para $68 \text{ m}^3/\text{seg}$ (la altura de la lámina de aguas es dos veces la altura del escalón) las pérdidas de energía son superiores al 66 %.

Se realizaron medidas de presiones rápidamente variables en tres escalones diferentes, uno situado en la parte superior de la rampa, otro en medio y el tercero en la parte inferior. En cada escalón los captosres se dispusieron de forma que se cubriese una sección transversal completa. Un ejemplo de los registros obtenidos es el representado en la figura 5.

Las presiones medias son reducidas, tanto los valores positivos como negativos en general no superan el valor de 1 metro de columna de agua. El mayor valor positivo se registra en la superficie horizontal en su parte exterior, donde alcanza los 2,25 m.c.a. En general la cara horizontal presenta valores positivos, mientras que en la vertical y en el bisel los valores son negativos, en concordancia con las previsiones teóricas.

Los mayores valores instantáneos positivos se registran en la parte exterior de la cara horizontal con un valor de 24 m.c.a., mientras que el mayor valor instantáneo negativo se registra en la zona superior del bisel, alcanzando el valor de -10 m.c.a. Una explicación esquemática puede darse tomando en cuenta que las fluctuaciones en torno a un hipotético flujo medio de la lámina exterior, que fuera tangente a los biseles, se traducen cuando son hacia el interior en fuertes choques con la parte plana del escalón próxima al bisel y consecuentemente fuertes presiones positivas en esta zona; por el contrario, una ligera separación del bisel deja una estrecha garganta en la que las fuertes velocidades provocan la consiguiente depresión en el bisel. El flujo real es aún más complejo, pues se añade a este esquema la presencia de importantes corrientes secundarias.

Con los valores registrados, unido a la fuerte aireación del flujo, y a que los efectos de escala son favorables, es de esperar que en el aliviadero no se presentarán problemas de cavitación.

5. RESUMEN

La técnica de construcción de presas por el sistema de hormigón compactado con rodillo está adquiriendo gran auge en España, así como en el resto del mundo. Al

31-12-91 en España se encuentran en construcción 57 presas, de las cuales 10 son de hormigón compactado según datos del Comité Español de Grandes Presas. El disponer el aliviadero dentro del cuerpo de la presa sin más que construir dos cajeros para el guiado del flujo supone una gran ventaja económica, pero si además la disipación de energía en la rápida permite disminuir el volumen de la obra de amortiguación de energía, esta ventaja se acrecienta. En su contra, el aliviadero escalonado presenta la limitación del caudal unitario actualmente utilizable.

El aliviadero escalonado de La Puebla de Cazalla se dimensiona para $9 \text{ m}^3/\text{seg.m}$ con escalones de 90 cm de altura y 72 cm de huella. Con estas dimensiones el aliviadero no presenta peligro de cavitación. La pérdida de energía para el caudal máximo es del 55 %.

6. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACION

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, en colaboración con la Dirección General de Obras Hidráulicas, está desarrollando un trabajo de investigación sobre aliviaderos escalonados. Este trabajo, con una duración prevista en su primera fase de dos años, está siendo llevada a cabo por el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos. Con estos estudios se pretende llegar al conocimiento de los fenómenos que se desarrollan en este tipo de aliviaderos y con ello poder tipificar el diseño más conveniente según la problemática a resolver.

Una síntesis de los temas a desarrollar es la siguiente:

- Forma de la transición entre cresta y rápida.
- Valores del cociente «espesor de la lámina de agua/tamaño de los escalones» que logra la disipación de energía mas aceptable. Caudal específico máximo.
- Influencia del grado de aireación en la pérdida de energía y en el riesgo de cavitación (fluctuación de presiones).
- Evolución del contenido de aire a lo largo de la lámina vertiente.
- Influencia de la pendiente de la rápida.
- Modificaciones en el escalonado con el fin de determinar si se logra mejorar la disipación de energía. Forma constructiva más adecuada.
- Forma del flujo, determinando la velocidad, el caudal, proporción de contenido de aire y energía residual del flujo.

BIBLIOGRAFIA

1. STRAUB, I. G., y ANDERSON, A. G. (1960). «Experiments on Self-Aerated flow in Open Channels». Trans. Am. Soc. Civil Engrs. Vol. 125.
2. ESSERY, I. T. S. «The hydraulic desing of stepped spillways». CIRIA Jan. 1978. Report 83. London.
3. YOUNG, M. F. «Feasibility study of a stepped spillways». Applying hydraulic research. Am. Soc. Civ. Engrs. 1982. Sesión 4.ª. New York.

4. CAMPBELL, D. B., y JOHNSON, P. C. «RCC dam incorporates innovative hydraulic features». Proc. Conf. on Water for Resource Development. (Coeur d'Alene, USA: Aug. 14-17, 1984). New York.
5. SORENSEN, R. M. «Stepped spillway hydraulic model investigation» J. Hidraul. Engny. (ASCE), vol. 111, n.º 12, dec. 1985.
6. DIEZ-CASCON, J., y BLANCO, J.L. «Studies on the

- hydraulic behaviour of stepped spillways». Water Power and Dam Construction, vol. 4, n.º 9, sep. 1991
7. STEPHENSON, D. «Energy dissipation down stepped spillways». Water Power and Dam Construction, vol. 4, n.º 9, sep. 1991.
8. BAYAN, B. «La presa de La Puebla de Cazalla». Cauce 2000, enero-febrero 1992.



LA SIMPLICIDAD DE UNA GRAN FIBRA

Dramix. Fibras de acero para una solidez a toda prueba del hormigón. Producidas en todo el mundo por Bekaert, el especialista por excelencia en alambre de acero. Una garantía de calidad y servicio. Las fibras de acero Dramix se mezclan fácilmente y de manera homogénea. Refuerzan multidireccional-



mente ofreciendo un anclaje perfecto y el mejor rendimiento. El hormigón con fibras de acero Dramix es el material por excelencia para soleras, túneles y explotaciones mineras, estructuras de seguridad, carreteras y tableros de puentes, aeropuertos, puertos y productos prefabricados.

Dramix®

LA IDEA CONSTRUCTIVA

OFICINA DE VENTA ESPAÑA
Bekaert Ibérica, S.A.
Travesera de Gracia, 30 - 3.ª C
08021 Barcelona
Tel.: (93) 414 08 52
Fax: (93) 201 78 78

FABRICACION ESPAÑA
UBISA
Polígono Industrial de Vilaconquejar
09080 Burgos

Agua y Estructuras S. A.

ayesa

PRESAS

- * CANCHO DEL FRESNO
- * AUMEDRA
- * PEDRERA
- * SORBA
- * ESPELUY
- * SAN CALIXTO
- * GUADALCACIN
- * FERNANDINA
- * GIRIBAILE
- * FERNANDEZ CASADO
- * SERENA
- * YEGUAS
- * LA PUEBLA DE CAZALLA

PRESA DE LA PUEBLA DE CAZALLA



CANALES

- * REGADIOS
- * DEFENSAS Y ENCAUZAMIENTOS
- * ABASTECIMIENTOS
- * SANEAMIENTOS
- * ESTACIONES DE ELEVACION

**25 AÑOS DEDICADOS A LA INVESTIGACION
Y DESARROLLO DE LAS OBRAS HIDRAULICAS**

ayesa

OFICINA TECNICA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS

AVDA. REPUBLICA ARGENTINA, 19-C-2.º 41011 SEVILLA

TELS.: 427 66 06 - 427 66 07 - 427 82 09. FAX: 428 03 60



CIMENTACIONES DEL CANTABRICO, S. A.

PANTALLAS • PILOTES • ANCLAJES • SONDEOS •
INYECCIONES • REALCES



Licenciado Poza, 61 - 1º dcha.
Teléfonos: 442 04 12 / 26
Fax: 441 97 88
48013 BILBAO

Paseo de la Habana, 148 - 4º -Izda.
Teléfonos: 457 02 77 / 84 90
Fax: 457 84 90
28036 MADRID