

Análisis y caracterización experimental de aliviaderos escalonados. Estudio aplicado a la presa de Cuira (Venezuela)

Experimental analysis and characterization of stepped spillways. Applied research to the Cuira dam (Venezuela)

Víctor Elviro García^{1*}, Juan José Rebollo Cillán¹ y Lucía Turrero Ruíz¹

Palabras clave

aliviaderos escalonados;
presa de Cuira;

Sumario

Se presenta una actualización de los principales criterios de diseño en materia de aliviaderos escalonados y su aplicación al diseño del aliviadero de la presa de Cuira (Venezuela), cuyo modelo físico ha sido analizado en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX en el año 2014. Los aspectos teóricos y experimentales que han sido tratados en este artículo se centran en el diseño de la embocadura, la transición del vertedero escalonado y el comportamiento del flujo a lo largo de rápida.

Keywords

stepped spillways;
Cuira dam;

Abstract

The objective of this article is to review the main design criteria related to stepped spillways and their application in the Cuira dam (Venezuela). In this sense, a physical model has been built in the Hydraulic Laboratory of CEDEX for this project in 2014. The main theoretical and experimental aspects showed in this paper are related to the design of the spillway entrance, the stepped transition section and the flow behaviour along the spillway channel.

1. INTRODUCCIÓN

Los aliviaderos escalonados son utilizados con relativa frecuencia y de forma continua tanto en presas muy antiguas como en pequeñas obras recientes, pero su introducción en presas de gran altura y de forma sistemática ha estado ligada a las presas de hormigón compactado con rodillo (RCC). Desde un punto de vista estructural, estas presas son de gravedad e incluyen la novedad en el sistema constructivo, utilizando hormigones secos con alto contenido en cenizas y con un método de puesta en obra continuo mediante grandes rodillos vibrantes para su compactación, lo que reduce enormemente el tiempo de construcción. El paramento de aguas abajo de la presa es escalonado al utilizar un encofrado a saltos, siendo la altura de los escalones múltiplo de 30 cm por ser el espesor de compactación óptimo de cada tongada. Para grandes caudales, es necesario construir un aliviadero convencional debido a que el efecto del escalonado no introduce mejoras en el comportamiento del flujo en la rápida. En el caso de contar con caudales unitarios no muy grandes, la idea de poder verter sobre un paramento escalonado resulta muy atractiva económicamente por sus requerimientos funcionales. En primer lugar, el guiado del flujo a lo largo de la rápida únicamente precisa de la construcción de unos cajeros laterales a ambos lados de la rápida para orientar el caudal. Por otra parte, a medida que se avanza en el análisis del comportamiento de la estructura, se comprueba que la disipación de energía en este tipo de aliviaderos es

muy importante y reduce considerablemente la obra final de cuenco de resalto, introduciendo un beneficio económico añadido.

El estudio del comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados se inició en España en 1990 por el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, con los ensayos en modelo físico del aliviadero escalonado de la presa de La Puebla de Cazalla (figura 1). Durante el dimensionamiento de la presa, con una altura de 71 m, se definieron los escalones con una contrahuella de 0,9 m (altura del escalón) para un caudal máximo unitario de 10 m³/s-m. En cuanto a la fase de experimentación y análisis del modelo, construido a escala geométrica 1/16, se midieron presiones rápidamente variables y velocidades a lo largo de la rápida escalonada. Posteriormente, y con similares técnicas de ensayo, se realizaron los modelos del aliviadero escalonado de las presas de Sierra Brava en 1992, con una altura de 53 m y un caudal máximo unitario de 4 m³/s-m, y Alcollarín en 1994, con 31 m de altura y 10 m³/s-m. Ambas presas contaban con escalones de 90 cm y para su estudio se construyeron modelos físicos a escalas de 1/25, 1/12, 1/10 y 1/4.

En el año 1995 se realizaron los ensayos de los aliviaderos escalonados de las presas de Montearagón y El Boquerón, de 72 m y 58 m de altura respectivamente. En el primer caso se estableció un escalón de 0,9 m para un caudal unitario máximo de 13,6 m³/s-m en la avenida de comprobación, mientras que la segunda se eligió una contrahuella de 1,2 m para un caudal máximo de 19 m³/s-m. Entre los años 1996 y 1997 se estudia la presa de Val, 75 m de altura y escalones de 1,20 m. En este caso también se analiza la salida de los desagües de fondo a través de la rápida escalonada,

* Corresponding author: victor.elviro@cedex.es

¹ Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Madrid, España.

considerando un caudal unitario que alcanza la importante cifra de $28,5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ para la avenida extraordinaria, siendo $12,25 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ para la avenida de diseño. En 1998 se llevó a cabo el estudio de la presa de Los Charcos, donde se analizó el comportamiento de un aliviadero escalonado sobre una presa tipo arco-gravedad como variante al aliviadero liso. Finalmente, en el año 2007 se estudia la presa de La Breña II (figura 2), con 124 m de altura y una capacidad de 850 Hm^3 . El talud de aguas abajo, con pendiente de 0,8, estaba definido por escalones de 1,20 m de altura para un caudal unitario de diseño de $12 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ y una avenida de comprobación de $21 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$.



Figura 1. Modelo físico del aliviadero de La Puebla de Cazalla.



Figura 2. Modelo físico del aliviadero de La Breña II.

A parte de los trabajos concretos de presas, el Laboratorio de Hidrúlica del CEDEX ha realizado, por encargo y en colaboración con otras instituciones y organismos, diversos estudios genéricos sobre el comportamiento y diseño de aliviaderos escalonados, del que surgen publicaciones con criterios de dimensionamiento utilizados en la actualidad para el diseño de esta tipología de aliviaderos:

- Recopilación y documentación de bibliografía a nivel internacional

- Ensayo de una rápida escalonada en conducto cerrado con alimentación de caudales líquido y gaseoso regulables. El objeto de estas condiciones consiste en estudiar las pérdidas de energía para flujos con distintos contenidos de aire
- Simulación de un mismo aliviadero a tres escalas diferentes (1/15, 1/10 y 1/6) para analizar la influencia de los efectos de escala en modelos físicos
- Caracterización de la transición entre el umbral del aliviadero y la rápida escalonada para la regularización del flujo y eliminación de saltos y despegues del flujo para pequeños caudales.

En el año 2014, en base a un convenio firmado con la empresa INCLAM y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidrúlica de Centro de Estudios Hidrográficos el estudio hidráulico mediante modelo físico a escala reducida del aliviadero de la presa sobre el río Cuira (Venezuela). La definición en detalle de la presa ha sido realizada por el estudio de ingeniería Jesús Granell Ingenieros Consultores, encargados de la realización del proyecto de ejecución en el que se ha basado la definición del modelo físico. El principal objetivo de este artículo es analizar la aplicación de todas las indicaciones y experiencias obtenidas de los estudios previos realizados por este Laboratorio en el diseño y definición final del aliviadero escalonado de esta presa. En este sentido, habrá que determinar si el diseño propuesto para la embocadura del aliviadero, el perfil de transición de escalonado y la rápida son adecuados para la gama de caudales propuestas, que variará entre caudales unitarios de $15,9 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ para la Avenida de Proyecto y $24,65 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ para la Avenida Máxima.

2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA PROYECTADA Y DISEÑO DEL MODELO FÍSICO

La construcción de la presa de Cuira tiene como objeto la ampliación y mejora de las garantías de abastecimiento a la ciudad de Caracas. Para alcanzar este nivel de servicio, el embalse contará con una capacidad aproximada de 700 Hm^3 . El Nivel Máximo Normal asociado al volumen de servicio alcanza la cota de 141 msnm, con lo que la presa contará con una altura máxima sobre el cauce de unos 90 m. La altura máxima sobre la cota de cimentación es de 130 m, debido a los importantes espesores de suelo hasta la roca estable, y la cota de coronación de la presa se establece en 147 msnm. El eje de definición es circular con una radio de 647,53 m y un desarrollo total de 335 m.

En cuanto al diseño, se trata de una presa de gravedad de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR-RCC) con aliviadero escalonado. La sección tipo de la presa es triangular, de talud vertical aguas arriba hasta la cota 147 msnm y con pendiente de 1V:0,8H aguas abajo, con escalones a lo largo de todo la presa. De este modo los paramentos inclinados no son tales, sino que están formados por un escalonado en el que la relación entre la huella y la contrahuella es el talud del plano inclinado equivalente (figura 3). La altura del escalón se ha establecido en 1,20 m y la huella en 0,96 m, el primer valor por ser múltiplo de la tongada de hormigón que se utilizará durante el proceso constructivo (30 cm).

El aliviadero se ubica sobre el eje central del cuerpo de presa y, teniendo en cuenta su curvatura, converge de tal

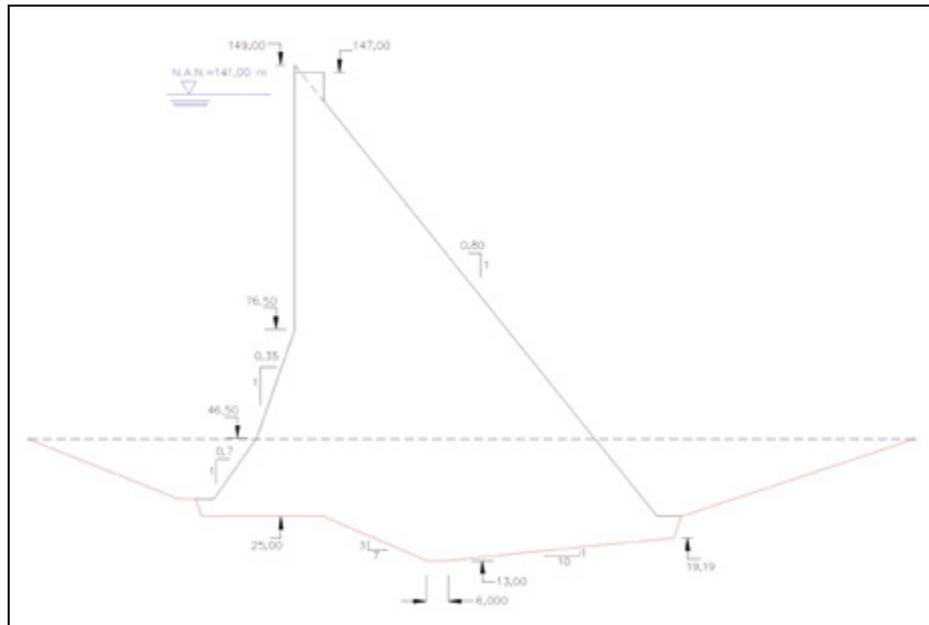


Figura 3. Sección principal de la presa.

forma que las pilas centrales y los muros laterales son radiales al eje circular de la presa. La embocadura consta de 5 vanos de 15 m de anchura delimitados por cuatro pilas intermedias de 2 m de anchura y dos estribos laterales. Los estribos del aliviadero se abren hacia el exterior y tanto pilas como estribos se perfilan mediante curvas elípticas para favorecer la alimentación procedente del embalse.

Por último, los caudales de entrada laminados de las avenidas de Proyecto y Máxima Probable (CMP-8) se presentan en la siguiente tabla, junto con la altura de lámina alcanzada sobre el umbral del aliviadero principal (141 msnm) y la cota que adquiere el agua en el embalse.

Tabla 1. Datos hidráulicos del proyecto para las avenidas de diseño y CMP-8

Avenida	Periodo retorno (años)	Q aliviadero (m ³ /s)	Q unitario (m ³ /s-m)	Altura lámina (m)	Cota embalse (msnm)
Proyecto	1.000	1.192,19	15,9	4,023	145,023
CMP-8	7.000	1.849,14	24,65	5,294	146,294

En cuanto a la definición del modelo físico, considerando las dimensiones de la obra, los caudales de ensayo y la experiencia de este laboratorio en otros estudios análogos, se ha adoptado como escala geométrica más adecuada $\lambda = 1/45$. En él se reproduce el aliviadero escalonado de superficie, la zona de alimentación, el cuenco de disipación, la rampa de salida de escollera y el tramo del cauce aguas abajo necesario para estudiar la restitución de los caudales. También se ha reproducido la salida del desagüe de fondo (figura 4).

Los límites aguas arriba del modelo se han definido con amplitud suficiente para reducir al mínimo la influencia de los contornos sobre el flujo de aproximación. En esta zona ha sido modelizada parte del paramento central interior de la presa, donde se ubica la entrada del aliviadero escalonado, incluidas las torres de toma.

En cuanto al aliviadero, se ha construido a escala la rápida y los muros laterales de contención, estos últimos en metacrilato transparente que permite la visualización del flujo. Esta parte finaliza en la base del cuenco de disipación a la cota 27,5 msnm y asciende sobre lecho de escollera hasta la cota 57 msnm, donde se integra con el cauce del río Cuira (figura 5).

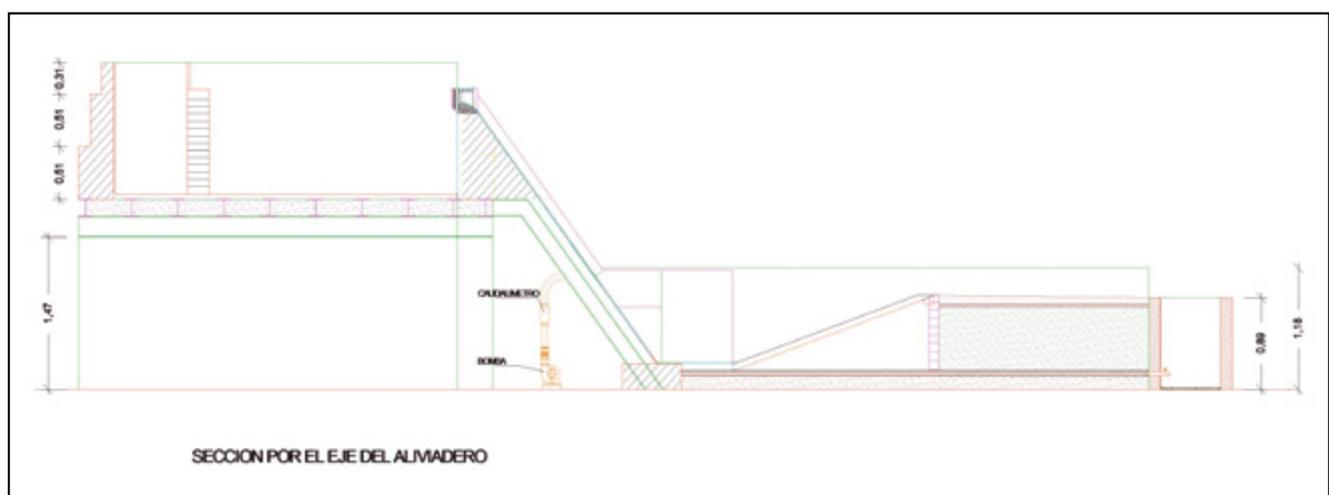


Figura 4. Eje longitudinal del modelo físico de la presa de Cuira.



Figura 5. Perspectiva lateral de la rápida escalonada.

3. ANÁLISIS DE LA EMBOCADURA DEL ALIVIADERO

Este apartado tiene como objeto analizar el comportamiento del flujo en la embocadura de aliviaderos escalonados desde un punto de vista teórico y experimental, teniendo en cuenta los efectos relacionados con la geometría de pilas y estribos en la entrada para diferentes caudales. En primer lugar, se plantean los criterios de diseño relacionados con este efecto y ejemplos de flujos de entrada con geometrías experimentales analizadas previamente en el Laboratorio de Hidráulica. La segunda parte se centra en la aplicación experimental de estas indicaciones en el modelo físico de la presa de Cuira.

3.1. Criterios de diseño para embocaduras de aliviaderos escalonados

La cota del umbral, anchura y altura de la lámina de agua son variables a determinar en cualquier presa. Una vez fijado el hidrograma de entrada y en función del volumen de embalse correspondiente a cada cota y del caudal desaguado por el aliviadero para esa misma cota, se determina el hidrograma laminado de salida. En este sentido, el diseño de la embocadura de un aliviadero viene regulado, de manera simplificada, por la siguiente expresión:

$$Q = C_d \cdot L_e \cdot H^2 \quad [1]$$

Donde Q es el caudal desaguado por el aliviadero en m^3/s , C_d es el coeficiente de desagüe variable, L_e la longitud efectiva del aliviadero en coronación en metros y H representa la altura obtenida como diferencia entre las cotas de agua en el embalse y la del umbral del aliviadero en metros. Por razones de seguridad los aliviaderos escalonados limitan el caudal unitario, cociente entre el caudal total Q y el ancho de la rápida L_R (Longitud Real), que en general es constante a todo lo largo de la misma en este tipo de aliviaderos pues una vez que se produce el cambio de ancho al terminar las pilas este valor continúa uniforme hasta el final de la rápida. Una vez fijado este valor se determina el valor de L_e en función del número y del ancho de las pilas.

En un aliviadero convencional interesa diseñar las pilas y estribos que conforman la entrada con formas hidrodinámicas que eviten alteraciones en el flujo, que por un lado disminuyen la capacidad y por otro facilitan la creación de

ondas que se transmiten a lo largo de la rápida. En un aliviadero escalonado, debido a la fuerte turbulencia del flujo en la rápida, este último punto no es tan importante y, en algunos casos, es beneficioso por facilitar el desarrollo de la capa límite y la aducción de aire en el flujo.



Figura 6. Estribo con perfil hidrodinámico.

En este sentido, la definición de estos elementos en un aliviadero escalonado puede ser similar a la de un aliviadero convencional cuando se pretende optimizar la capacidad del aliviadero. Por el contrario, se pueden incluir diseños con baja optimización desde el punto de vista hidráulico si el objetivo es conseguir aumentar la turbulencia y la aireación.



Figura 7. Estribo con depresión de la lámina de agua.

3.2. Solución adoptada en la embocadura de la presa de Cuira

En el caso de la embocadura del aliviadero de la presa de Cuira, el comportamiento general del flujo en la entrada del aliviadero es correcto para todos los escenarios de caudales. Para la Avenida de Proyecto, que representa el caudal de diseño de la estructura, no se aprecia la presencia de ondas que alteren el flujo de llamada e impidan el correcto funcionamiento del vertedero (figuras 8 y 9).



Figura 8. Vista lateral de la zona de entrada para la Avenida de Proyecto.



Figura 9. Vista frontal de la zona de entrada para la Avenida de Proyecto.

En cuanto a los contornos del vertedero, el comportamiento del flujo es correcto en torno a las pilas, observándose ligeras depresiones de la lámina de agua alrededor de los estribos que no afectan a su correcto funcionamiento (figuras 10 y 11).



Figura 10. Detalle del comportamiento de las pilas centrales para la Avenida de Proyecto.



Figura 11. Detalle del comportamiento del estribo izquierdo para la Avenida de Proyecto.

En el caso de la Avenida Máxima CMP-8, aparecen fenómenos que empeoran el comportamiento del flujo junto a los estribos, apareciendo ligeras depresiones y ondas pero sin llegar a modificar el coeficiente de desagüe en el vertedero ni a comprometer el funcionamiento general (figuras 12, 13 y 14).



Figura 12. Vista frontal de la zona de entrada para la Avenida CMP-8.



Figura 13. Vista lateral de la zona de entrada para la Avenida CMP-8.

La geometría de las pilas de entrada del aliviadero genera un conjunto de ondas en torno a las estructuras que separan los vanos. Estas oscilaciones se trasladan aguas abajo configurando un flujo algo irregular en el primer tramo de la rápida, pero que desaparecen cuando entran en contacto con el tramo escalonado.



Figura 14. Depresiones del estribo izquierdo en su cara interior para la Avenida CMP-8.

4. ESTUDIO DEL PERFIL DE TRANSICIÓN EN ALIVIADEROS ESCALONADOS

El diseño de un aliviadero escalonado no difiere en cuanto a metodología al de un aliviadero convencional ya que el

conjunto de la obra fija la posición de la rápida escalonada, así como las características que van a determinar las condiciones hidráulicas del mismo. En este sentido, el umbral del aliviadero y el perfil en solera vienen determinados por la carga de agua y la cota de embalse máxima a inundar.

Teniendo en cuanto la consideración anterior, difícilmente la unión directa del perfil de coronación con la rápida escalonada dará un funcionamiento hidráulico aceptable, siendo necesario realizar una transición escalonada. Tanto el perfil de coronación como la transición escalonada están definidas para la altura máxima de carga del aliviadero, caudales para los que la transición suele funcionar correctamente debido al espesor de la lámina de agua, aunque pudieran aparecer problemas al aumentar la velocidad del flujo por la presencia de presiones negativas que podrían originar cavitaciones en la solera. Los problemas de mal funcionamiento hidráulico con despegues y lanzamientos, se presentan para caudales pequeños y con un rango más o menos amplio de los mismos.

4.1. Criterios de diseño de la transición del perfil del vertedero

El escalonado de la rápida en este tipo de aliviaderos es constante en altura y anchura. La altura habitual es múltiplo de 30 cm, que es el tamaño de la tongada, con valores usuales de 90 y 120 cm. En base a estudios realizados en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, se ha comprobado que se producen irregularidades en el flujo cuando se intenta alcanzar la coronación del aliviadero con escalones iguales. Además, si se continuase por encima del primer escalón uniforme con una solera continua hasta la coronación, este escalón actuaría como un trampolín y lanzaría el flujo desde el inicio de vertido hasta caudales que pueden llegar a ser importantes.

Una variable importante en el diseño de aliviaderos escalonados es su caudal unitario (expresado como cociente entre el caudal total Q y el ancho de la embocadura L_c), el cual queda limitado a valores inferiores a $16 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ para evitar riesgos de cavitación en la zona no aireada del aliviadero, no obstante para avenidas extraordinarias se ha llegado incluso a valores de $30 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$. En el caso de la presa de Cuira, los valores de caudal unitario se encuentran dentro de estos límites ($15,9 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$) para la Avenida de Proyecto ($1.192,88 \text{ m}^3/\text{s}$), caudal de diseño para el dimensionamiento del aliviadero.

En este sentido, a medida que aumenta el valor del caudal unitario, la zona de comienzo de aireación se desplaza aguas abajo, encontrándose extensas zonas del aliviadero con flujos de alta velocidad y sin airear. Como orden de magnitud, y para escalones de 120 cm de altura en la rápida, pueden establecerse los siguientes valores, conforme a la experimentación realizada en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX:

Tabla 2. Relación entre el caudal unitario y la zona no aireada en un aliviadero escalonado

Caudal unitario ($\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$)	Altura por debajo del umbral de la presa sin airear (m)
4	7
6	10
9	14
16	24

Analizado el problema sobre la transición en solera, los ensayos del Laboratorio Hidráulica se han centrado en encontrar una solución que reduzca lo más posible el salto, tanto su magnitud como el rango de caudales para el cual se pueda producir. Los resultados no se deberían generalizar para otras formas de coronación, que por otro lado no son frecuentes en aliviaderos de presas.

Para llevar a cabo estos estudios se han utilizado varios modelos, siendo realizados la mayoría de los ensayos en un canal de vidrio de 40 cm de ancho por 60 cm de alto y en otro de 100 cm por 110 cm, a escalas que van de 1/3 a 1/5.

Desde un punto de vista geométrico, se parte de un perfil en solera tipo Bradley dado por la fórmula:

$$\frac{y}{H} = 0.5 \left(\frac{x}{H} \right)^{1.85} \quad [2]$$

El origen de coordenadas es el umbral del aliviadero, midiéndose el eje x en horizontal y el y en vertical hacia abajo, y H es la altura estática de la lámina de agua en el embalse en relación con el umbral.

EL principal objetivo de los ensayos es determinar una transición que no produzca saltos para los pequeños caudales, al mismo tiempo que se comprueba que el funcionamiento para los grandes flujos sea satisfactorio. De otros ensayos realizados por el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX y diferentes estudios publicados se sabe que el desarrollo de la aireación depende del caudal y del tamaño del escalonado de la rápida. Los siguientes perfiles representan una selección de los ensayos que se consideran más apropiados para el diseño de la transición.

La primera solución determina el inicio del primer escalón a $H/2$ del umbral, siendo el tamaño en horizontal de los escalones un valor constante de $3H/20$. Cuando se llega a la zona de pendiente uniforme es necesario incrementar el ancho hasta llegar al tamaño del escalón que define la rápida (figura 15).

El funcionamiento de esta solución es altamente satisfactorio ya que no genera ningún salto a lo largo del perfil. Sólo para caudales en torno $100 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ se produce un ligero lanzamiento que hace que el segundo escalón se encuentre lleno de aire, ya que la lámina de agua va de vértice a vértice. Al aumentar un poco más de caudal, el funcionamiento se regulariza para la totalidad de los escalones.

La figura 16 muestra el perfil longitudinal de la segunda solución con valores exactos en función de H . En este caso, el escalonamiento comienza a una distancia $H/3$ del umbral con escalones definidos en horizontal por valores de $H/8$, $H/7$, $H/6,5$, $H/6$, $H/5,5$, $H/5$, $H/4,5$, $H/4$, $H/3,5$, $H/3$, $H/2,5$, etc. y así hasta llegar al tamaño del escalón que define la rápida. Generalmente no es probable que el tamaño del escalón coincida con la serie definida, por lo que es necesario hacer un ajuste en los últimos valores de forma que la transición sea progresiva y no exista un escalón discordante.

A partir de los ensayos en laboratorio que permitieron definir esta solución, se verificó que el nuevo perfil disminuía sensiblemente el tamaño y el rango de caudales para los que se produce el salto de la lámina de agua.

En este sentido, el agua discurre de escalón en escalón para láminas de 30 cm de calado, iniciándose para este nivel un salto del primero hasta el tercero. Para láminas algo superiores, el salto se mantiene y se genera desde el tercer escalón hasta el sexto, con agua muy agitada y sin formar una lámina continua. Finalmente, los saltos desaparecen superados los 45 cm de nivel sobre el vertedero.



Figura 17. Funcionamiento de la solución nº 2 para la transición a la rápida escalonada.

4.2. Aplicación de la transición del perfil del vertedero a la presa de Cuira

EL perfil de transición aplicado en la presa de Cuira ha sido definido con los criterios de la Solución nº 2, permitiendo circular de manera adecuada una amplia gama de caudales. En primer lugar, la Avenida de Proyecto muestra un buen funcionamiento donde no se aprecian alteraciones en la entrada de caudales por ninguno de los cinco vanos del vertedero (figura 18).



Figura 18. Vista global del funcionamiento del vertedero para la Avenida de Proyecto.

Se observa una total simetría en el desagüe a lo largo de toda la cresta del vertedero y no se aprecian problemas de turbulencia ni despegues de lámina en los vanos laterales.

La avenida CMP-8 genera un comportamiento más forzado del flujo en la rápida, en gran parte provocado por las alteraciones de pilas y estribos. Pese a este incremento de caudal, el comportamiento del perfil de transición sigue siendo correcto y no genera alteraciones que afecten al funcionamiento global de la estructura (figura 19).



Figura 19. Vista global del funcionamiento del vertedero para la Avenida CMP-8.

Analizando en detalle el comportamiento de los vanos para la máxima avenida, se aprecia que el desagüe es adecuado. También se produce un despegue de la lámina de agua en las aristas posteriores de las pilas (figura 20). Este efecto provocado por las aristas tiene gran importancia ya que propicia la aireación del flujo, reduciendo el riesgo de cavitación.



Figura 20. Entrada del flujo en la rampa escalonada procedente del perfil de transición para la Avenida CMP-8.

La figura 21 muestra la comparativa entre la curva de capacidad teórica y la obtenida durante el proceso de experimentación en modelo físico donde se relaciona la altura de la lámina de agua en el vertedero y el caudal desaguado. La curva experimental se mantiene en todo momento por debajo de la teórica definida en proyecto. Esto indica una mayor capacidad de desagüe que la estimada, mejorando el resguardo de la estructura.

5. ESTUDIO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

En el diseño de aliviaderos escalonados se plantean unos objetivos que en principio pueden parecer contradictorios. En primer lugar, se pretende que el flujo disipe una parte sustancial de su energía a lo largo del escalonado, generando al mismo tiempo una considerable agitación. Por otra parte, se persigue confinar el flujo entre los cajeros evitando cualquier tipo de desbordamiento. Teniendo en cuenta estas dos premisas, el principal interés de este tipo de aliviaderos es conjugar ambos factores y conseguir maximizar la

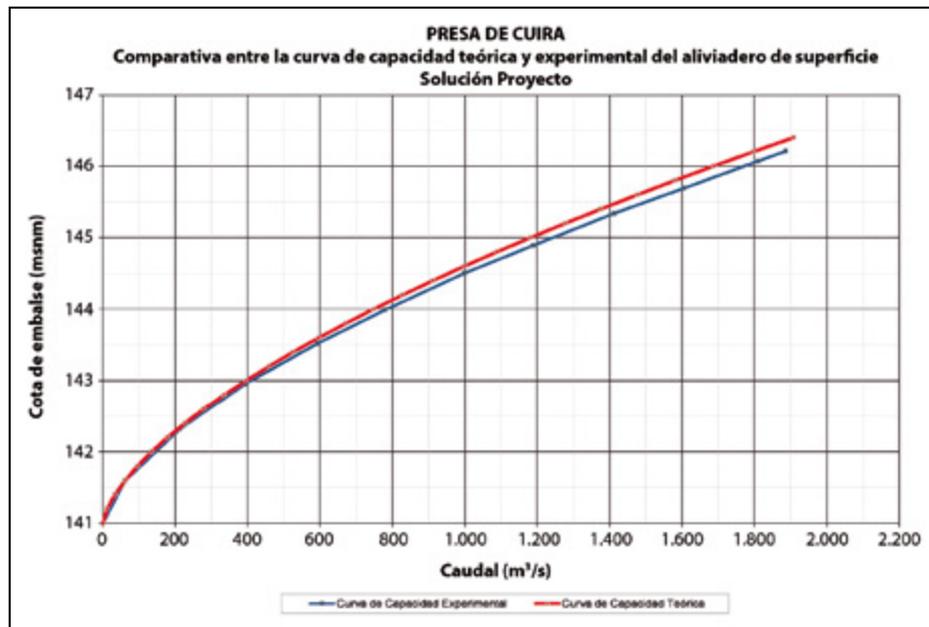


Figura 21. Comparativa de las curvas de capacidad teórica y experimental para la solución inicial.

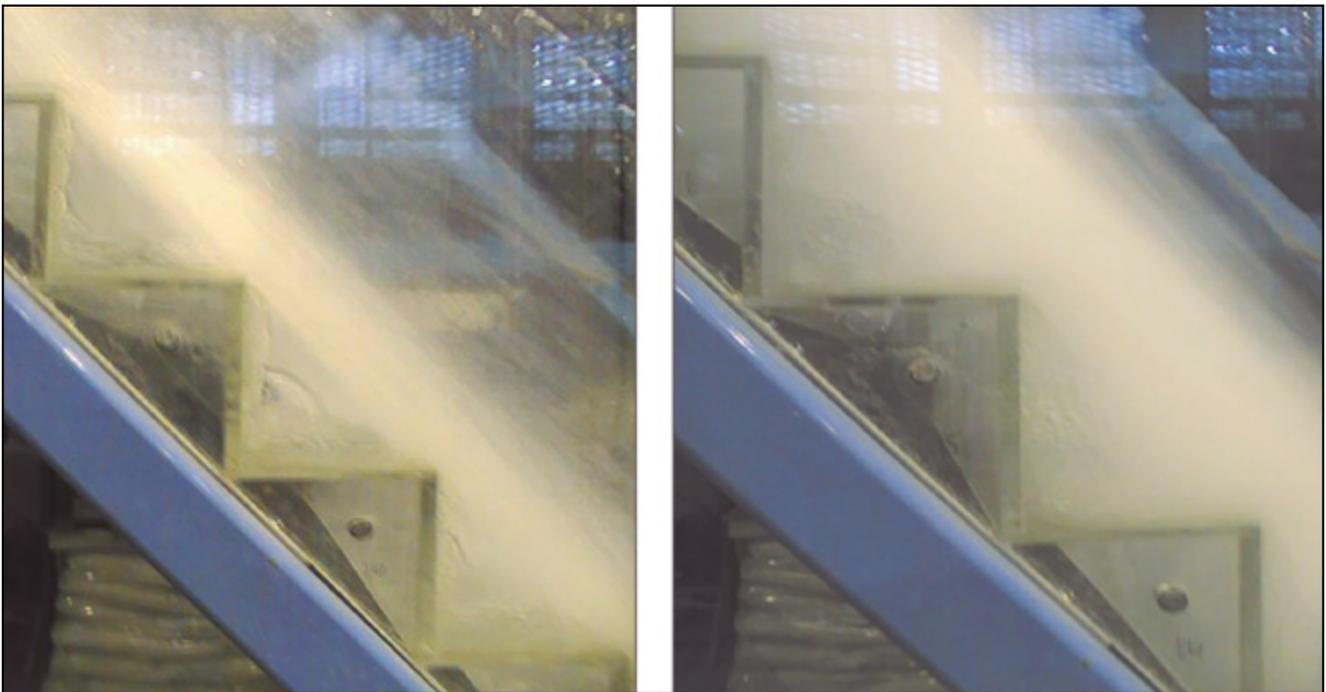


Figura 22. Flujo escalón a escalón (izquierda) y flujo rasante (derecha) en modelo físico con diferentes caudales.

disipación de energía sin perder la regularidad y estabilidad del flujo.

5.1. Comportamiento del flujo en aliviaderos escalonados

El comportamiento hidráulico sobre un aliviadero escalonado puede caracterizarse según dos tipologías que evolucionan en función del caudal circulante:

- Flujo en cascada (Nappe flow), para caudales bajos: Se distingue por la formación de una sucesión de caídas libres a lo largo de la rápida.
- Flujo rasante (Skimming flow) para caudales elevados: En este caso todas las celdas de aire bajo el chorro principal, han quedado repletas de la emulsión de aire y agua.

En el caso de un aliviadero escalonado sobre una presa de hormigón compactado con rodillo, sus características geométricas son responsables de buena parte de los aspectos específicos de su comportamiento hidráulico. En este sentido, es necesaria una adecuada definición de las variables geométricas durante el diseño para el correcto control de todas las situaciones del flujo durante la fase de explotación de la presa.

Las principales definiciones geométricas en este tipo de aliviaderos son la pendiente y las dimensiones del escalonado. En base a la experiencia del laboratorio y las limitaciones de los procedimientos constructivos actuales, se recomienda para una pendiente de la rápida alrededor de 1V:0,80H (presas de gravedad) y un escalonado de altura de 0,9 ó 1,2 m, dependiendo del espesor y número de tongadas que se planteen durante la construcción del cuerpo de la presa.

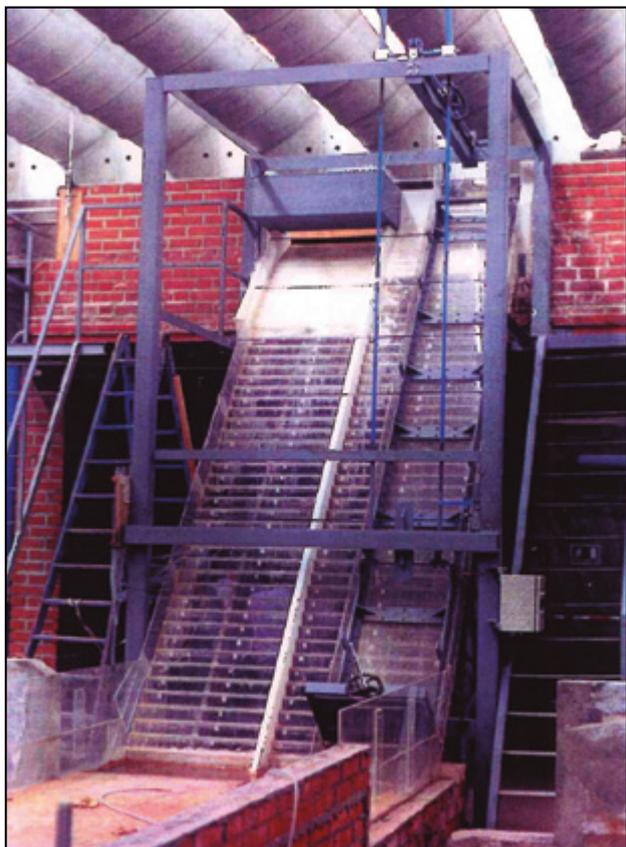


Figura 23. Flujo en régimen libre y confinado para ensayos de contenido de aire de un aliviadero genérico analizado en el Laboratorio de Hidráulica.

5.2. Comportamiento de la rápida escalonada de la presa de Cuira

De manera general, el comportamiento del flujo en la rápida de la presa de Cuira es correcto para toda la gama de caudales ensayada. Las avenidas menores muestran un desagüe homogéneo a lo largo y ancho del canal de descarga, donde el comportamiento del flujo es regular y se mantiene controlado dentro de los contornos del aliviadero (figura 24). A medida que aumenta el caudal de avenida, el flujo adquiere mayor regularidad y simetría en toda la sección. Se comprueban las diferentes transiciones descritas en el apartado anterior y aparece uniforme la aireación en la contrahuella del escalonado.



Figura 24. Vista frontal del flujo en la rápida escalonada para $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Avenida de Proyecto ($Q = 1.192,19 \text{ m}^3/\text{s}$) genera un flujo uniforme y regular a lo largo del eje escalonado. En este escenario, los calados se encuentran dentro de los límites definidos por los cajeros y la turbulencia generada propicia una aireación suficiente.



Figura 25. Vista lateral del flujo en la rápida escalonada para la Avenida de Proyecto.

Por último, la Avenida Máxima CMP-8 ($Q = 1.849,14 \text{ m}^3/\text{s}$) genera un flujo más complejo debido al notable incremento de caudal. En este caso los cajeros cumplen estrictamente la contención de calados alcanzados para este caudal, evitando de manera límite desbordamientos laterales. Pese a estas alteraciones, el comportamiento global del flujo es adecuado teniendo en cuenta que se representa la avenida extraordinaria.

Una fase fundamental del estudio de la rápida escalonada es el análisis de disipación de energía en función de la comparativa entre la velocidad teórica del flujo y la real. El objeto de esta fase de la experimentación ha sido comprobar la influencia de los escalones en la disminución de la velocidad y la energía del flujo asociada.



Figura 26. Vista frontal del flujo en la rápida escalonada para la Avenida CMP-8.

Desde un punto de vista de disipación de energía, la medida de velocidades sobre una rampa de escalonado es la más relevante para mostrar los efectos de disipación. El análisis de esta variable en un flujo de alta turbulencia y con alto contenido de aire que funciona en régimen libre es complejo, debido a que los instrumentos de medida convencionales no son válidos por la alta presencia de aire en

el flujo. Por este motivo, se emplean medidas indirectas de filmación de elementos sólidos inelásticos y baja flotabilidad, introducidos en el flujo y cuyo tamaño sea proporcional a la altura de escalón representado en el modelo.

Para ejecutar esta fase de la experimentación se han utilizado técnicas de fotografía de alta resolución, que permite tomar suficientes fotogramas (frames) por segundo para determinar la velocidad del flujo a través del elemento trazador con respecto a hitos fijos situados en el modelo. Para ello, se establece una relación entre espacio y tiempo con los frames y se realiza un seguimiento del objeto inmerso en la corriente, que cuenta con una densidad similar al agua para adaptarse a las mismas condiciones de movimiento. Se denomina frame o fotograma a una imagen particular dentro de una sucesión de imágenes que componen una animación. La continua sucesión de estos fotogramas producen a la vista sensación de movimiento, dado las pequeñas diferencias que hay entre cada uno de ellos. En este caso, se ha utilizado una cámara de video estándar con calidad HD y una frecuencia de 25 frames por segundo o Hercios, lo que genera una sucesión de fotogramas consecutivos cada 0,04 segundos.

Los datos de velocidades obtenidos están asociados a caudales unitarios de ensayo, teniendo en cuenta que la longitud del vertedero de la presa de Cuira cuenta con 75 m. Los resultados muestran la comparación de las velocidades obtenidas experimentalmente y los valores teóricos en las mismas cotas según la ecuación:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{h}{2} \right)} \quad [3]$$

Donde v es la velocidad teórica del flujo sin rozamiento, H es la diferencia de cota entre el umbral del aliviadero y el punto considerado y h es la altura de la lámina vertiente para un caudal determinado.

La obtención de velocidades experimentales se realizó mediante tomas de video del recorrido de 15 trazadores por la rápida tramificada. No se han considerado en el cálculo aquellos indicadores cuya velocidad en uno de los tramos haya sido anormalmente reducida, lo que muestra que se han introducido en el remolino de un escalón y, por lo tanto, su velocidad no es representativa. La división en tramos de la rápida escalonada, tanto para la determinación de las velocidades experimentales como teóricas, se ha establecido para una altura de 73 m en prototipo, desde la cota de coronación (141 msnm) hasta el inicio del cuenco de dissipación (68 msnm). Cada tramo cuenta con una altura individual de 10,8 y 8,2 metros, que representan los puntos de referencia para la determinación de las velocidades a lo largo del aliviadero (figura 27).

Se analizaron los dos escenarios asociados a la Avenida de Proyecto y la Avenida Máxima CMP-8. En el caso de las velocidades experimentales, se han extrapolado los resultados del modelo a escala de prototipo, lo cual ha permitido la comparación con los datos teóricos.

- La Avenida de Proyecto está asociada a un caudal de 1.192,88 m³/s y equivale a un caudal unitario de 15,9 m³/s·m. En este caso, la altura de la lámina vertiente es de 3,8 m sobre el umbral del vertedero. Los resultados aparecen representados en la tabla 3 y figura 28.
- La Avenida Máxima CMP-8 equivale a un caudal de 1.849,14 m³/s, correspondiente a un caudal unitario de 24,65 m³/s·m y una altura de la lámina vertiente de 5,2 m sobre el umbral del vertedero. La tabla 4 y la figura 29 muestran los resultados asociados a este escenario.

Los resultados muestran la efectividad de los escalones a medida que nos alejamos de la cota de vertido, disminuyendo así la energía cinética real del flujo con

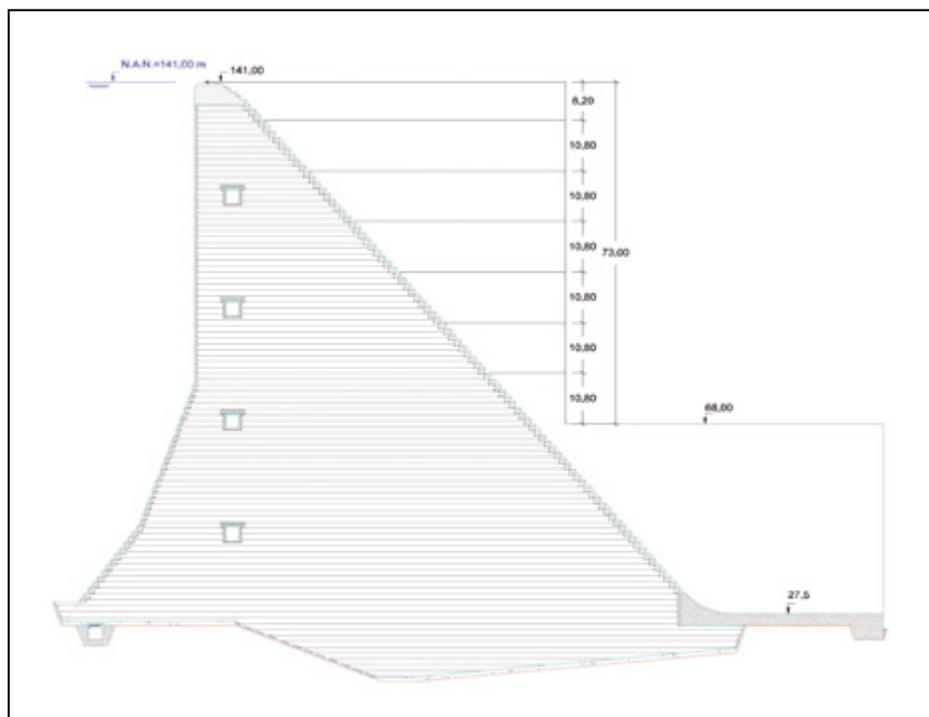


Figura 27. División en tramos de la rápida para la medida de velocidades a escala real.

Tabla 3. Relación de velocidades experimentales y teóricas para $q = 15,9 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$

Distancia al umbral del vertedero H (m)	V_{Modelo} Experimental (m/s)	$V_{\text{Prototipo}}$ Experimental (m/s)	$V_{\text{Prototipo}}$ Teórica (m/s)
8,2	2,11	14,73	14,15
19	3,03	16,91	20,31
29,8	3,72	20,13	24,98
40,6	4,31	21,32	28,92
51,4	4,83	22,34	32,37
62,2	5,29	23,24	35,50
73	5,72	24,00	38,37

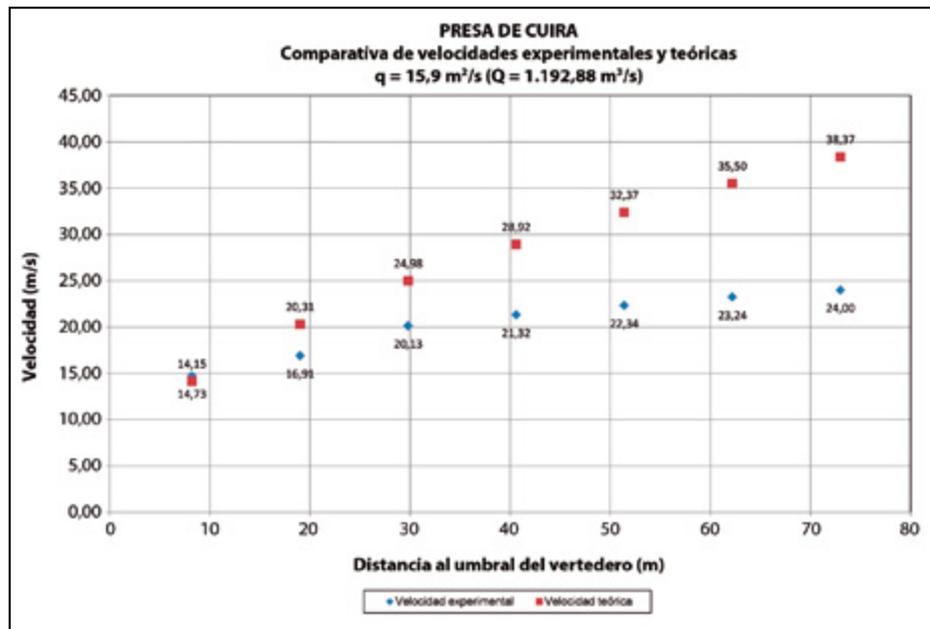


Figura 28. Comparativa de velocidades experimentales y teóricas para $q = 15,9 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$.

Tabla 4. Relación de velocidades experimentales y teóricas para $q = 24,65 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$

Distancia al umbral del vertedero H (m)	V_{Modelo} Experimental (m/s)	$V_{\text{Prototipo}}$ Experimental (m/s)	$V_{\text{Prototipo}}$ Teórica (m/s)
8,2	2,17	14,12	14,59
19	3,07	18,86	20,61
29,8	3,76	22,60	25,23
40,6	4,34	24,82	29,13
51,4	4,85	27,71	32,57
62,2	5,32	29,02	35,67
73	5,74	30,11	38,53

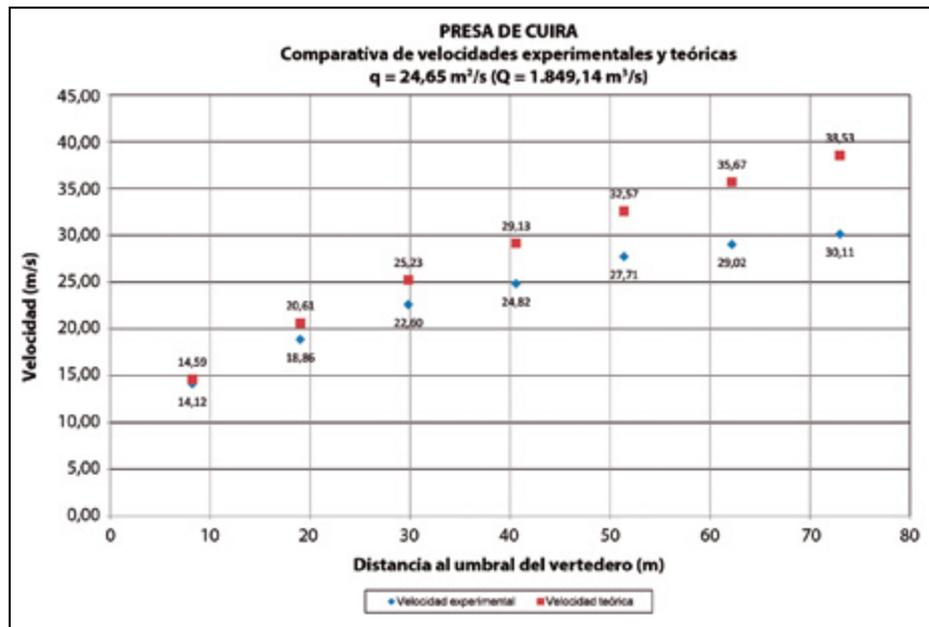


Figura 29. Comparativa de velocidades experimentales y teóricas para $q = 24,65 \text{ m}^2/\text{s}$.

respecto a la teórica. También se observa una disminución global del efecto de pérdida a medida que aumentan los caudales ensayados, ya que los calados mayores anulan progresivamente el efecto de la aireación en la base del canal.

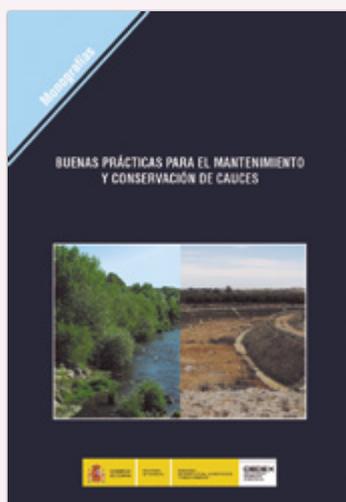
6. CONCLUSIONES

El desarrollo de las técnicas constructivas en presas de hormigón compactado supone una reducción importante en el coste económico de dichas obras al mismo tiempo que reducen la duración de la construcción. Una ventaja de esta técnica constructiva es la utilización de aliviaderos escalonados, lo que supone una pérdida de energía adicional a lo largo de la rápida y la consiguiente disminución de las dimensiones del cuenco de disipación.

El objetivo principal de este artículo es actualizar los conocimientos hidráulicos e información disponible sobre el diseño de aliviaderos escalonados y su aplicación al diseño del aliviadero de la presa de Cuira (Venezuela). Los aspectos fundamentales que se han tratado desde el punto de vista teórico y experimental han sido el efecto y la influencia sobre las líneas de corriente en la embocadura, el diseño de la transición y el comportamiento del flujo a lo largo de rápida, analizando en este caso la pérdida de velocidad y de energía para una gama de caudales.

7. REFERENCIAS

- Mateos, C y Elviro, V. (1992). The use of stepped spillways in energy dissipation. 60th Executive Meeting of ICOLD. Granada.
- Mateos, C y Elviro, V. (1994). Regularidad del flujo en aliviaderos escalonados. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Chile.
- Elviro, V y Mateos, C. (1995). Aliviaderos escalonados. Diseño de la transición entre el umbral y la rápida escalonada. Ingeniería Civil n° 99.
- Elviro, V y Mateos, C. (1995). Spanish research into stepped spillways. Hydropower and dams.
- Elviro, V y Mateos, C. (1996). Investigación sobre aliviaderos escalonados en España. Ingeniería Civil n° 101.
- Presas de Hormigón Compactado. (1999). Editado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones IECA.
- Hydraulics of stepped spillways. (2000). Minor & Hager editors. ETH Zürich.
- Chanson, H. (2001). Experimental investigation of air entrainment in transition and skimming flows down stepped chute. Queensland.
- Amador, A., Sánchez-Juny, M. y Dolz, J. (2006). Diseño hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR. Ingeniería del agua n° 13.
- Elviro, V y Mateos, C. (2008). Recrecimiento de la presa de La Breña. Estudio en modelo reducido del aliviadero escalonado. VIII Jornadas de Presas SPANCOLD. Córdoba.



Buenas prácticas para el mantenimiento y conservación de caudales. M-123

Autores: Fernando Magdaleno Mas y Alberto Cabrero Rodríguez

Serie Monografías: M-123

ISBN: 978-84-7790-551-6

Año: 2014

P.V.P.: 20€

Los cauces fluviales y sus terrenos aledaños proporcionan una serie de importantes servicios ambientales, gracias a su singular estructura y funcionamiento. Al tiempo, muchos de estos cauces se enfrentan a frecuentes operaciones de aumento de la eficiencia hidráulica y de ampliación de la capacidad de desagüe, que comportan diversos problemas desde el punto de vista hidromorfológico, ecológico y social. Este trabajo tiene como objetivo, sobre la base de la complejidad de los sistemas fluviales, ofrecer una base para orientar su gestión, en lo referente a los diferentes trabajos de mantenimiento y conservación de cauces. Para ello, se repasan cada una de las acciones habitualmente incluidas en dichas operaciones, y se aportan diversas recomendaciones enfocadas a la mejora de su diseño y ejecución.



Manual de técnicas de restauración fluvial

Autores: Fernando Magdaleno Mas

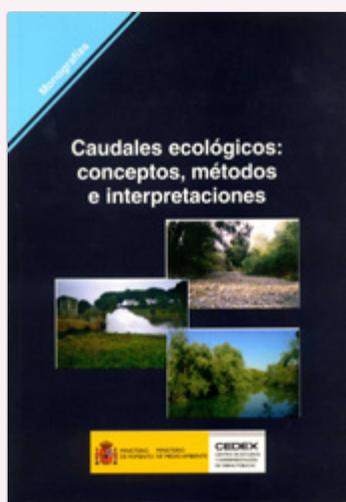
Serie Monografías: M-100

ISBN: 978-84-7790-522-6

Año: 2011 (2ª edición)

P.V.P.: 30€

La restauración fluvial constituye un proceso encaminado a la recuperación de la integridad ecológica del medio fluvial, en términos de biodiversidad y funciones y procesos ecológicos. Este Manual examina las técnicas más destacadas para la consecución de estos fines, diferenciando entre aquellas dirigidas a la restauración de los ecosistemas acuáticos y ribereños, y las que tienen por objeto la integración de las actividades humanas en la protección y mejora de los medios fluviales. Se presta especial atención a las técnicas de ampliación y mejora de las formaciones vegetales de ribera, bioingeniería e incremento de la biodiversidad florística y faunística. Finalmente, se dedica un capítulo específico a los procedimientos que deben guiar los programas y proyectos de restauración fluvial.



Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones

Autor: Fernando Magdaleno Mas

Serie Monografías: M-82

ISBN: 84-7790-410-3

Año: 2005

P.V.P.: 25€

El estudio tiene como objetivo fundamental el análisis de los procedimientos de evaluación y establecimiento de regímenes de caudales ambientales. Asimismo, pretende exponer los planteamientos técnicos, legales y ambientales que explican la adopción de las medidas necesarias para la consecución de los mismos. Junto a ello, el estudio trata de mostrar los últimos avances obtenidos en esta materia, así como los regímenes de caudales necesarios para la conservación y el buen estado de las distintas variables que componen el medio fluvial.