

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE LA BREÑA. ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO DEL ALIVIADERO ESCALONADO

Víctor Elviro García¹, Luis Balairon Pérez²

RESUMEN: La presa de la Breña II, sobre el río Guadiato sustituye a la actual presa de la Breña con un notable aumento de capacidad. La construcción de la presa es promovida por AQUAVIR que adjudica a INITEC INFRAESTRUCTURAS la asistencia técnica a la dirección de la obra. Es una presa de hormigón compactado de 124 m de altura sobre cimientos, dispone de un aliviadero con escalones de 1,20 m de altura. Se presentan en este artículo los estudios llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX sobre modelo físico reducido del aliviadero escalonado de la presa de La Breña II. Se analizan fundamentalmente dos temas, el diseño de la transición entre la coronación del aliviadero y la rápida escalonada y las pérdidas de energía a lo largo de la misma.

¹ Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Consejero Técnico del CEDEX.

² Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

1. DESCRIPCIÓN DEL ALIVIADERO

En la nueva presa de La Breña (con capacidad de 850 Hm³) se ha diseñado un aliviadero central para evacuar las crecidas del río Guadiato que permite laminar la avenida de proyecto correspondiente a un período de retorno de 1.000 años con un caudal de salida de 705 m³/s, y la avenida de comprobación con un caudal de 1.205 m³/s. Este aliviadero está ubicado sobre los bloques 14 y 15 que se sitúan sobre el eje del río, y tiene 4 vanos de 13,5 m con 3 pilas intermedias de 1,5 m lo que supone una longitud de vertido en coronación de 54,0 m y de 58,5 m de ancho en la rápida a efectos de calcular el caudal unitario de diseño, valor característico de los aliviaderos escalonados.

Las embocaduras de los estribos tienen forma elíptica para optimizar el recorrido de las líneas de corriente. Las pilas intermedias tienen 13,80 m de longitud, se diseñan también con superficie elíptica y se rematan con tajamares aguas abajo. El perfil transversal responde al tipo Bradley. La cota del umbral es la 179 m sobre el nivel del mar. Sobre el paramento de aguas abajo de talud 0,75 se encauza la lámina de vertido mediante cajeros de hormigón armado de 3 m de altura medidos sobre la perpendicular al paramento y de 1,50 m de espesor. Los escalones de este paramento y del aliviadero son de 1,20 m de altura.

El aliviadero vierte las aguas al cuenco amortiguador. Una parte importante de la amortiguación de la energía se consigue en el paramento escalonado y el resto en el resalto que se forma dentro del propio cuenco. El cuenco tiene una longitud de 48 m. La anchura es de 58,50 m. La altura de los muros cajeros es de 10,50 m sobre el fondo, dispuesto a la cota 72,00, y de 13,50 sobre la cimentación. Aguas abajo del cuenco amortiguador se ha diseñado una regularización del cauce mediante un segundo cuenco de una longitud de 115 m con transición a la sección de 20 m de ancho del canal del Guadiato. En esta canalización se ubica una central reversible de bombeo y turbinado que permite regular los caudales excedentes del Guadalquivir.

2. TRANSICION ENTRE LA CORONACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA

Se parte de un perfil de vertido en solera tipo Bradley dado por la fórmula

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

El origen de coordenadas es el umbral del aliviadero, midiéndose el eje x en horizontal y el "y" en vertical hacia abajo. H es la altura estática de la lámina de agua en el embalse en relación con el umbral, variable que se utiliza para definir el perfil estricto y el caudal crítico. En el caso de Breña se fija H=4,00 m, valor comprendido entre la avenida de diseño y la de comprobación. Los ensayos se realizan en un modelo a escala 1/45 con semejanza de las fuerzas gravitatorias para lo que se

considera invariable el número de Froude, el número de Reynolds viene dado por la expresión

$$R = \frac{4Q}{b\gamma} = \frac{4q}{1,15 \cdot 10^{-6}} = 3478261q$$

Para caudales pequeños el modelo no sería representativo y no se podría analizar la transición del escalonado, siendo precisamente para estos pequeños valores cuando se presentan los fenómenos de lanzamiento, que van desapareciendo conforme aumenta el caudal. Para dimensionar correctamente esta transición el Laboratorio de Hidráulica ha utilizado modelos hasta escala 1/3 comprobando resultados a escala 1/1 en estudios de I+D de varios años de duración. Basados en estos trabajos se proponen varios criterios de diseño para transiciones que pueden aplicarse directamente a casos prácticos con garantía de buen funcionamiento.

2.1. SOLUCIÓN N° 1.

Esta solución se encuentra definida en el gráfico n° 1.

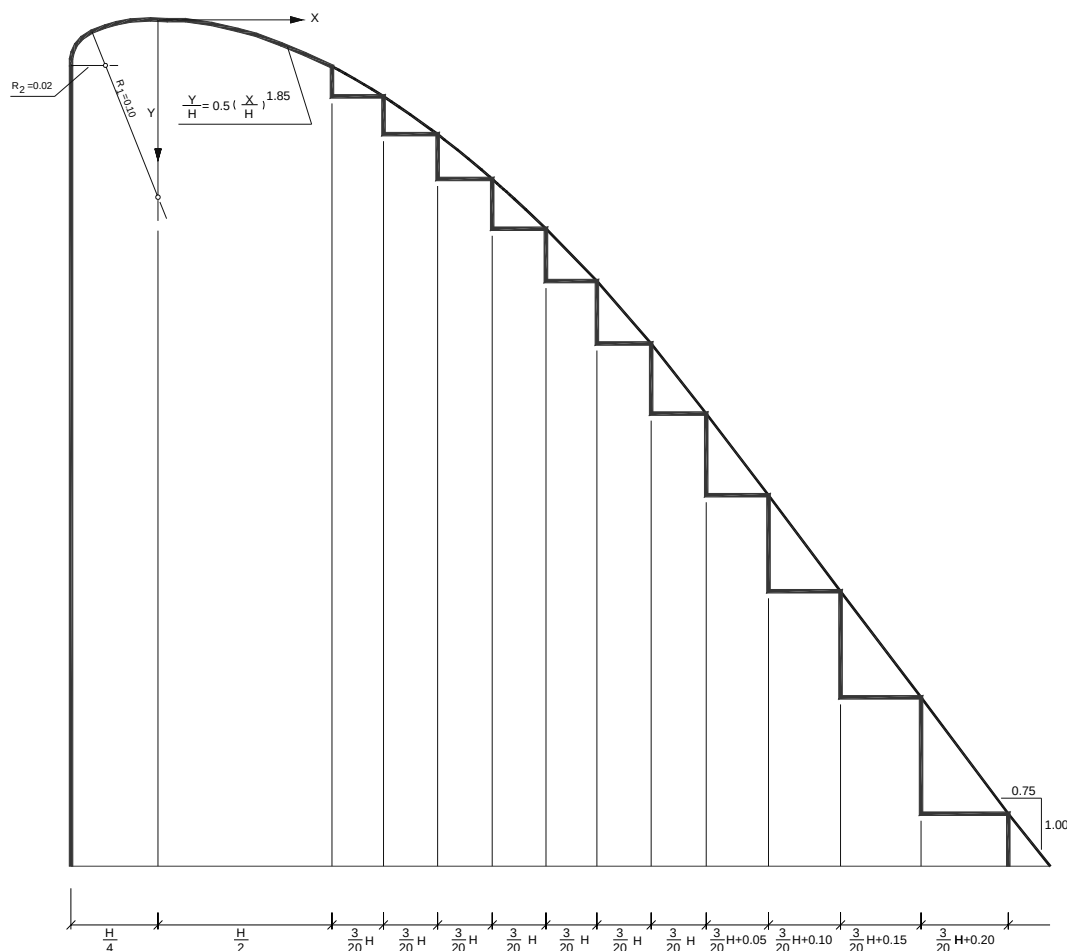


Gráfico n° 1. Aliviaderos escalonados. Transición en solera.

El primer escalón comienza a $H/2$ del umbral y el tamaño en horizontal de los escalones es constante con un valor de $3H/20$. En la zona de pendiente constante es necesario incrementar uniformemente el ancho hasta llegar el tamaño del escalón que define la rápida.

El funcionamiento de esta solución es altamente satisfactorio no produciéndose salto alguno y solo se origina un ligero lanzamiento para un caudal de unos 100 l/sm 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.

2.2. SOLUCIÓN N° 2.

Se define esta solución con valores exactos en función de H todos ellos reflejados en el gráfico n° 2.

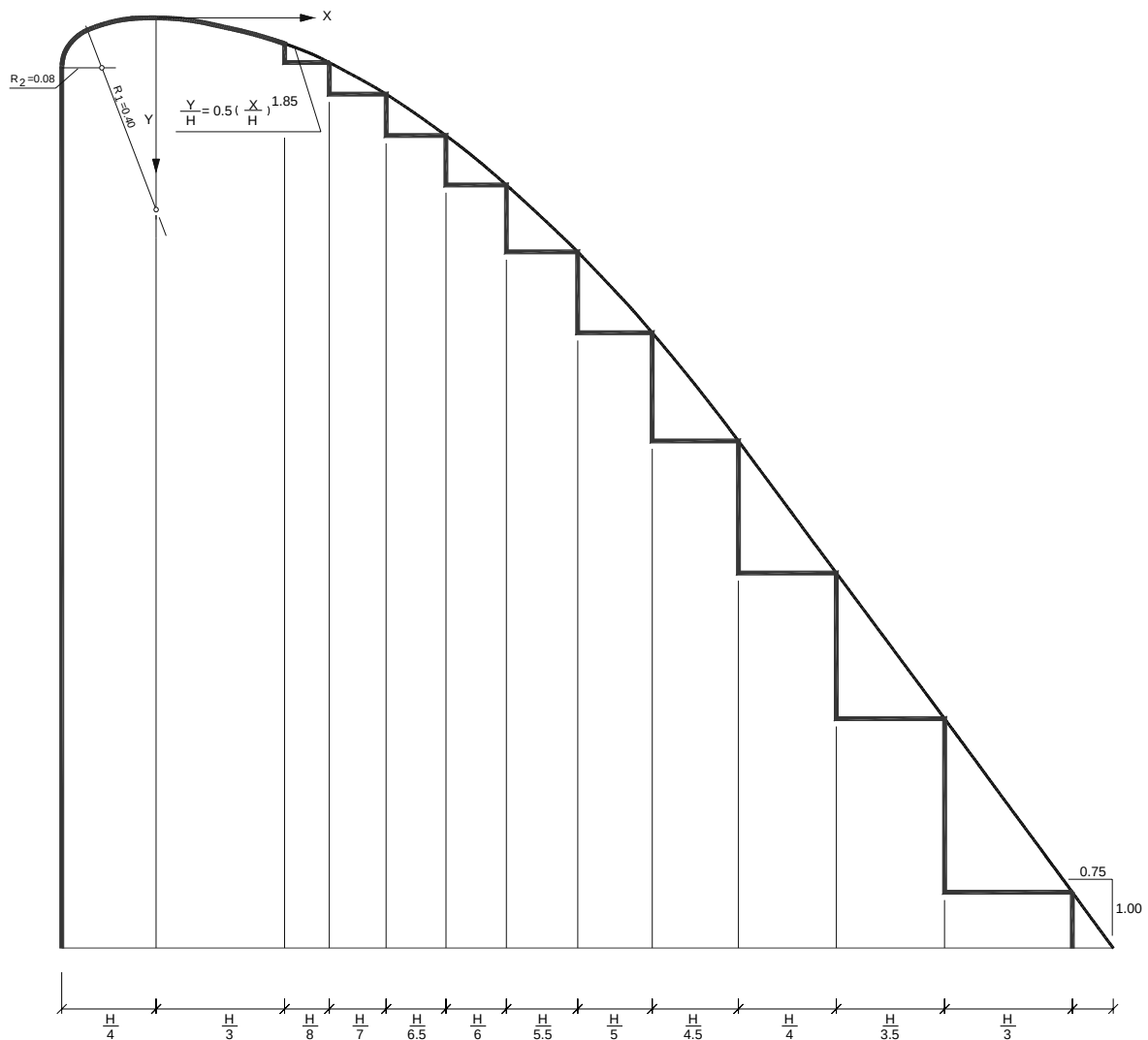


Gráfico n° 2. Aliviaderos escalonados. Transición en solera

El escalonamiento 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, H/5; H/4,5; H/4; H/3,5; H/3; H/2,5... y así hasta llegar al tamaño del escalón que define la rápida. Naturalmente no es probable que el tamaño del escalón de la rápida 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.

Hasta valores de 12 m³/s.m con cualquiera de estas definiciones garantizamos buenos resultados, por encima de estos valores es conveniente realizar ensayos, al menos bidimensionales a escalas inferiores a 1/8 para comprobar el buen funcionamiento; luego la buena práctica permite definir transiciones intermedias sin necesidad de ajustarse exactamente o matemáticamente a las dos definiciones propuestas. Un punto importante es el comienzo del escalonado, cuanto menos velocidad (menor altura) es menos probable que se produzca el lanzamiento de la lámina vertiente; otro punto básico es que los escalones estén por el interior del perfil estricto de definición para evitar que actúen como trampolines.

2.3. SOLUCIÓN ADOPTADA EN LA BREÑA II

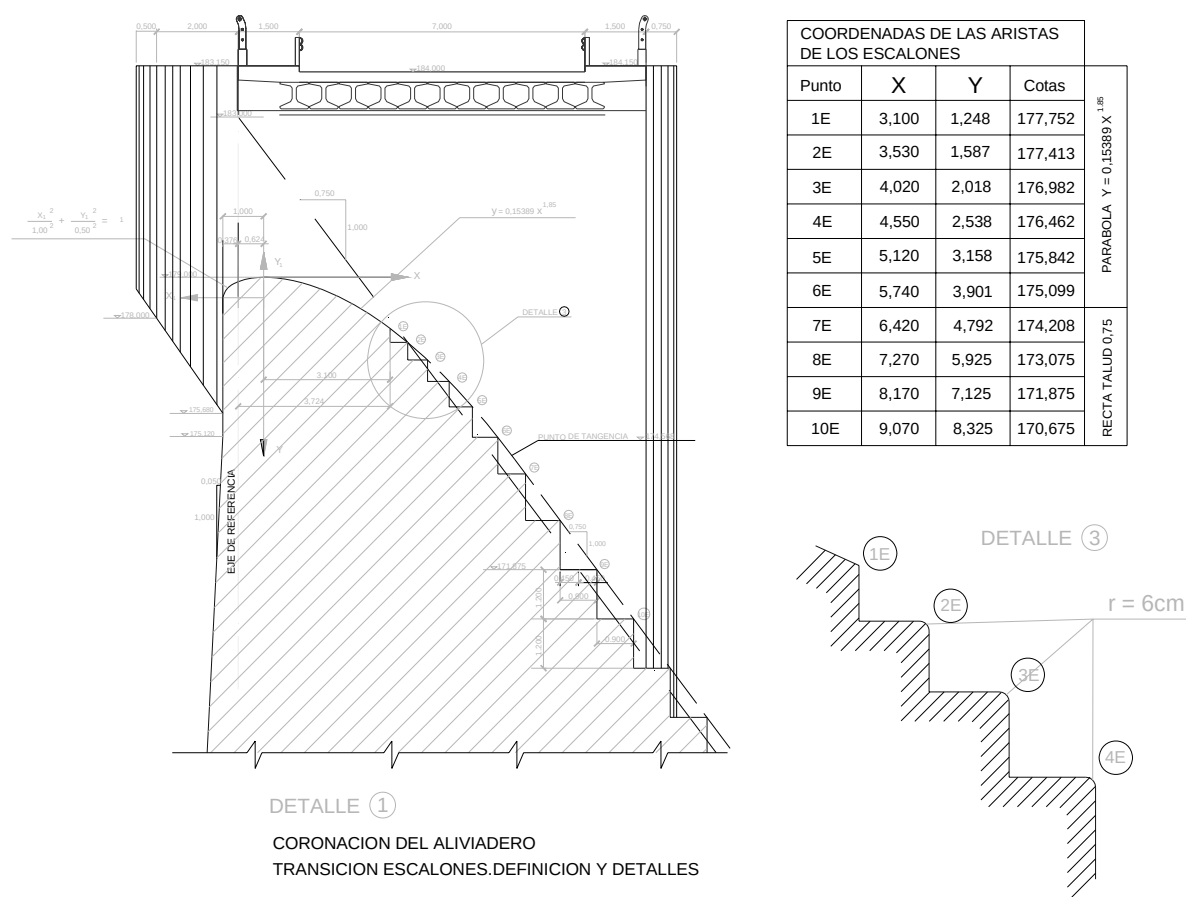


Grafico nº 3. Definición de la transición utilizada en Breña II

En el caso de la Breña II la lámina de vertido para la avenida de proyecto es de 3.32 m y la extraordinaria de 4,63 m, mientras que el perfil de coronación se define para una $H=4,0\text{m}$, con todos estos valores es necesario acudir a la buena praxis y definir una solución adecuada al caso que se comprueba en un bidimensional. La definición final que se adopta es la representada en el Gráfico nº 3 y para evitar el salto de la lámina para pequeños caudales se decide redondear los vértices de los tres primeros escalones. En la fotografía puede apreciarse el buen comportamiento de la transición pero al mismo tiempo se aprecia la claridad del flujo, lo que implica la falta de aire en el mismo con el consiguiente riesgo de cavitación. La entrada de aire se acelera provocando perturbaciones en el flujo y una de las causas de la entrada es la terminación de las pilas que origina la aducción de aire y lo distribuye a lo largo del escalón. Para determinar la altura en la que se produce la aireación natural se puede utilizar la siguiente fórmula

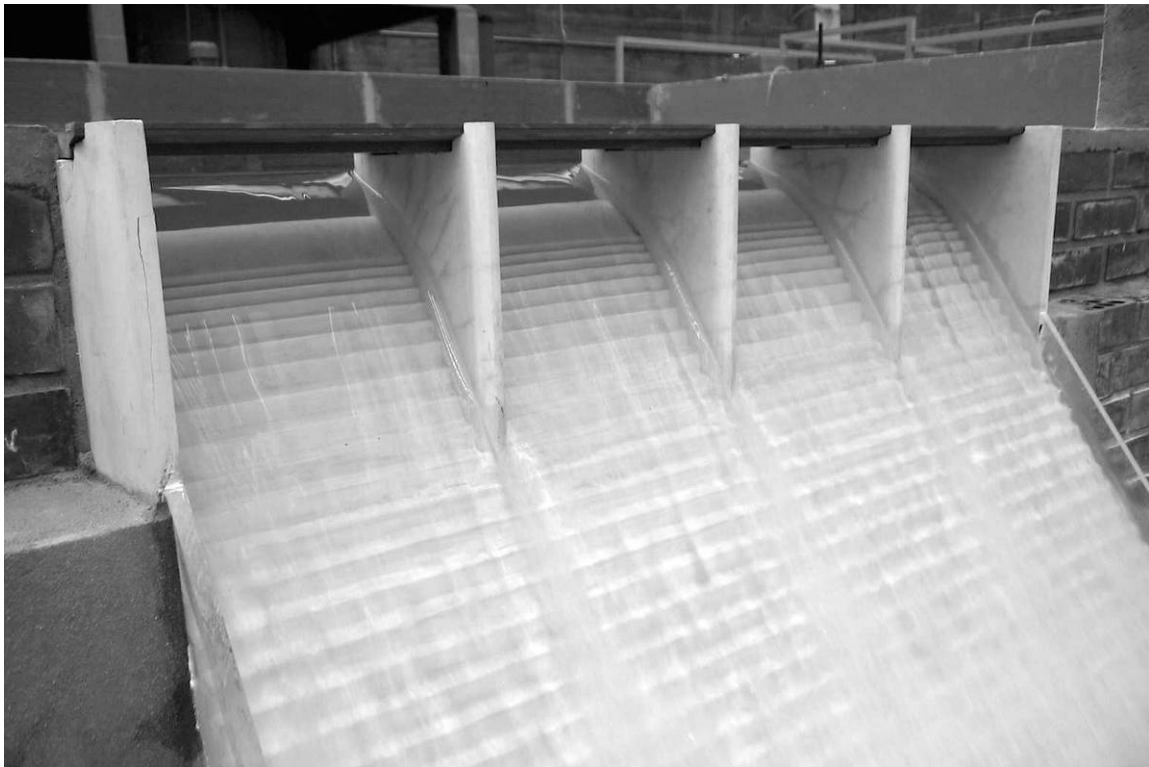
$$\frac{L}{h} = 5.6 \left(\frac{q}{g^{1/2} h^{3/2}} \right)^{0.8}$$

Siendo:

h = altura del escalón.

L = la diferencia de cotas entre la coronación y el punto medio del escalón donde se produce la aireación.

Como puede observarse, las variaciones de h alteran ligeramente el valor de " L "; así, duplicar el tamaño del escalón acorta la distancia de aireación en un 15 %.



Fotografía nº 1. Comportamiento de la transición

3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Este es uno de los puntos actualmente más controvertidos en el sentido de concretar una formulación que permita al proyectista calcular las dimensiones de una determinada obra. En primer lugar, debido a su diferente forma de disipar energía, aunque habría que distinguir entre flujo en cascada (Nappe flow) y flujo rasante (Skimming flow). Nos centraremos en éste último tipo de régimen, puesto que es el flujo predominante en aliviaderos sobre cuerpos de presas y el único existente para los caudales importantes; en este sentido se puede ver que para relaciones $H_E/d_c < 10$ ó $K/d_c < 0,1$ (H_E altura de la presa, d_c calado crítico) poco puede esperarse ganar en disipación de energía frente a un aliviadero convencional.

Para flujos plenamente desarrollados y régimen uniforme, o al menos asimilable por tener suficiente longitud la rápida, y no depender del número de escalones, parece aceptable suponer que el coeficiente "f" de Darcy-Weisbach es función del calado "y" y el tamaño del escalón "k" definido como $K = l \cdot \sin \theta$, siendo l la huella. Es importante recordar la enorme influencia que en estos flujos tiene la aireación, pues no se trabaja con agua sino con un fluido mezcla de aire-agua, es por esto que existe una enorme discrepancia en los resultados reflejados en distintas publicaciones, no ya sólo por el diferente criterio en la obtención de los datos, sino también en la simbología utilizada en el sentido de aclarar suficientemente los términos hidráulicos utilizados referidos a flujos aireados o sin airear.

Para flujos uniformemente aireados se tiene:

$$f = \frac{8 g \sin \theta y}{v^2}$$

En modelo mediante vídeo de alta velocidad se obtiene v, como velocidad media por tramos, tiempo que tarda un indicador en recorrer un determinado espacio. La medida de "y" se realiza mediante la introducción en el flujo de una varilla flexible que resiste el impacto del fluido (gotas de agua) hasta un determinado valor. Introduciendo estos dos valores en la fórmula anterior se obtiene "f". Pero también se calcula $q = v \cdot y$, siendo $q = q_w + q_a$, de esta expresión se estima por diferencia el caudal de aire ya que se conoce mediante aforo el caudal líquido. Naturalmente con estos datos se pueden determinar las pérdidas de energía que para una pendiente y un tamaño de escalón determinado dependerán del caudal. De los ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica y hablando siempre de flujos aireados en aliviaderos con rápidas de 53° ó próximos a ellos, escalones de 0,9 m. de altura y caudales de hasta $10 \text{ m}^3/\text{seg.m.}$, se ha obtenido un valor del coeficiente "f" comprendido entre 0,18 y 0,20 para valores de $y/k < 1,7$.

En cualquier caso el valor más importante que se desea conocer es la velocidad del flujo que nos va a permitir calcular de forma suficientemente precisa las dimensiones que debe tener el cuenco de resalto que debemos construir para disipar la energía residual que no se ha perdido a lo largo de la rápida. Es cierto que se necesita el calado al final de la rápida para calcular el calado conjugado del resalto, pero tenemos una primera aproximación puesto que conocemos el caudal y la velocidad sin tener en cuenta el aire.

En la siguiente fotografía vemos el flujo al final de la rápida totalmente aireado (blanco y no transparente por el contenido de aire), ya en el cuenco el aire va saliendo a la superficie y al final del mismo el flujo es transparente. El cuenco está diseñado para caudales superiores a la avenida de proyecto, lo que implica un buen funcionamiento incluso para la avenida extrema, sin que apenas suponga un aumento de coste, puesto que las dimensiones del cuenco están condicionadas por la salida de los desagües de fondo y las tomas.



Fotografía nº 2 Funcionamiento para el caudal de diseño

3.1. LA MEDIDA DE VELOCIDADES

Desde el punto de vista de la disipación de energía la medida de la velocidad para cada cota es lo más relevante. El valor del calado, aun siendo compleja su medida, tiene una influencia reducida comparada con el valor de las velocidades.

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

En el gráfico n° 4 se representan las curvas de velocidades-alturas obtenidas a partir de los distintos ensayos realizados por el Laboratorio. Incluye tanto los distintos casos concretos de aliviaderos con diferentes alturas, pendientes y tamaños de escalón, como los resultados sistemáticos realizados en tres rápidas de 7 m de altura y escalones de 6, 9 y 15 cm de altura. Son curvas de ensayo ajustadas según el modelo más representativo pero eliminando velocidades bajas por lo que se puede asegurar que están del lado de la seguridad. Estas curvas están dibujadas en color rojo continuo y son curvas representativas para dimensionar cuencos para rápidas con escalones de 90 cm de altura. En color negro y a trazos se dibujan las curvas para escalones de 120 cm, estos datos fundamentalmente se han obtenido en los ensayos de la presa del Boquerón donde se llegó a caudales de investigación de $42 \text{ m}^3/\text{s.m}$ y en la presa de La Breña II con caudales ya comentados próximos a los $21 \text{ m}^3/\text{s.m}$. Se representan los valores máximos registrados, para estar del lado de la seguridad y que puedan servir al proyectista para dimensionar un cuenco de disipación de energía. Debemos insistir en que se trabaja con flujos enormemente aireados y por tanto de baja densidad y donde para que se cumpla la ecuación de la continuidad, el caudal es la suma del caudal de agua más el de aire y por lo tanto los calados son más elevados.

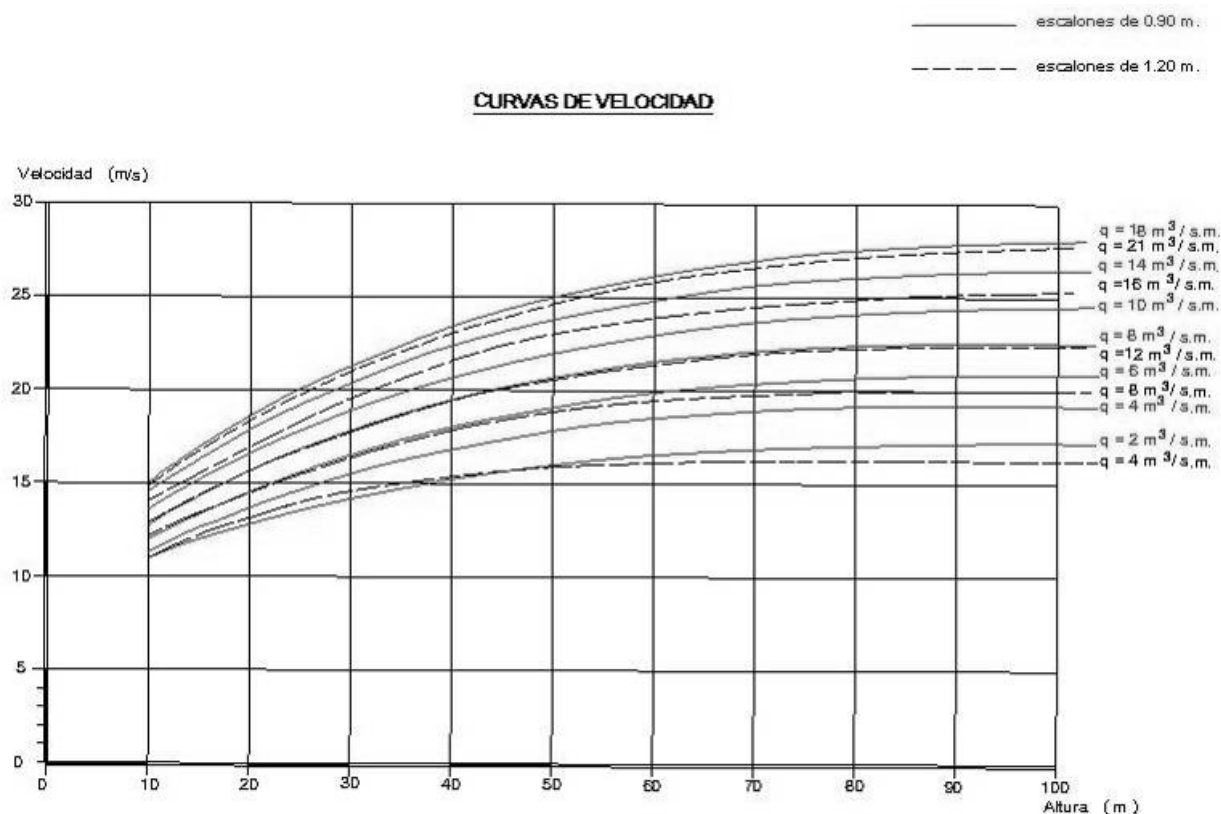


Gráfico n° 4.- Curvas de velocidades

REFERENCIAS

- Informe sobre el estudio y ensayo en modelo reducido de aliviaderos escalonados. Estudio de la transición entre el umbral del aliviadero y la rápida escalonada. CEDEX. Mayo 1994. Clave 41-492-1.028.
- Informe sobre el estudio en modelo reducido de la presa de la Breña II. CEDEX. Julio de 2007. Clave 41-506-5-049.
- Presas de Hormigón Compactado. Libro editado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (I.E.C.A.) Año 1999.
- Hydraulics of stepped spillways. Libro editado por Minor & Hager editors. VAW, ETH Zürich. Año 2000.
- Mateos Iguácel, Cristóbal y Elviro García, Víctor. The use of stepped spillways in energy dissipation 60th Executive Meeting. ICOLD, Septiembre 1992, Granada.
- Elviro García V. y Mateos Iguácel C. Aliviaderos escalonados. Diseño de la transición entre el umbral y la rápida escalonada. Ingeniería Civil nº 99. Julio 1995.
- Cristóbal Mateos and Víctor Elviro. "Initiation of Natural Aeration in Stepped Spillways. Scale Effects. 1998 ASME. Fluids Engineering Division Summer Meeting. Washington, D.C.
- C. Mateos Iguácel and V. Elviro García. Stepped spillway studies at CEDEX. International workshop on hydraulics of stepped spillways, Zürich, Switzerland. March 2000.