

Aliviaderos en laberinto. Presa de María Cristina

CORDERO PAGE, DOLORES (*), ELVIRO GARCÍA, VICTOR (**) y GRANELL NINOT CARLOS (***)

RESUMEN En el presente artículo se presenta una breve revisión del estado actual en materia de aliviaderos en laberinto como base para su cálculo hidráulico. Se exponen las principales características de estas estructuras hidráulicas, su aplicabilidad, los rasgos más importantes de su comportamiento hidráulico, un análisis cronológico de las referencias existentes y finalmente su aplicación en la presa de María Cristina avalado por su ensayo en modelo físico en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

LABYRINTH SPILLWAYS DAM OF MARIA CRISTINA

ABSTRACT This article provides a brief state of the art on labyrinth spillways as a basis for their hydraulic design. It includes the main characteristics of these hydraulic structures, their application, the most important features of their hydraulic performance, a chronological analysis of existing references and finally the application of this information to the "María Cristina" dam as shown by experiments carried on a physical model in the Hydraulic Laboratory of CEDEX, Madrid, Spain.

Palabras clave: Aliviaderos en laberinto, Recrecimiento de presas, María Cristina.

1. APROXIMACIÓN A LOS ALIVIADEROS EN LABERINTO

1.1. INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Hidráulica se engloban dentro del término genérico de "aliviadero" a aquellas estructuras de desagüe, cuyo principal fin es el control de los niveles del agua en las obras hidráulicas cuando estos niveles superan los máximos de explotación ordinaria.

Con tal objetivo se construyen y proyectan los aliviaderos en laberinto. La particularidad de este tipo de estructuras hidráulicas reside en la forma del vertedero, que es asimilable a un "zig - zag". Esta especial morfología incrementa la longitud de vertedero "a encajar" en un determinado "espacio disponible", con el fin de aumentar la capacidad de evacuación respecto a la de un vertedero recto convencional ubicado en el mismo espacio y para igual carga hidráulica.

Esta supuesta ventaja –mayor capacidad hidráulica para iguales condiciones de espacio disponible y carga hidráulica– se hace incierta cuando la carga hidráulica sobre el umbral del vertedero crece por encima de determinados valores. En efecto, las diversas investigaciones analizadas establecen como límite de funcionamiento aquél en el que la máxima sobreelevación de la lámina sobre el vertedero es entre 0,50 y 0,70 veces la altura del vertedero.

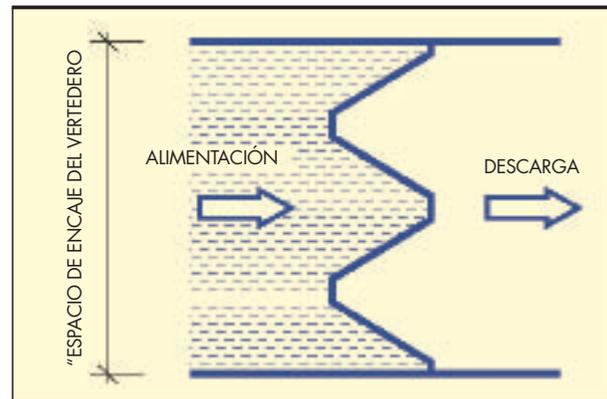


FIGURA 1.

De lo explicado se puede deducir, por tanto, que los aliviaderos en laberinto:

- Son estructuras hidráulicas de elevada capacidad de desagüe para sobreelevaciones reducidas.
- Pueden precisar de menor espacio para evacuar los caudales exigidos.

Ello permite realizar un sencillo encuadre de este tipo de estructuras hidráulicas dentro del conjunto de órganos de desagüe que hacen las veces de aliviaderos en las obras hidráulicas:

- Los aliviaderos en laberinto resultan de dudosa idoneidad cuando se prevé su funcionamiento para elevadas sobreelevaciones.

(*) Directora de Programa del Laboratorio de Hidráulica. CEDEX.

(**) Coordinador de Programas Técnico-Científico. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX.

(***) Jesús Granell, Ingenieros Consultores SA.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

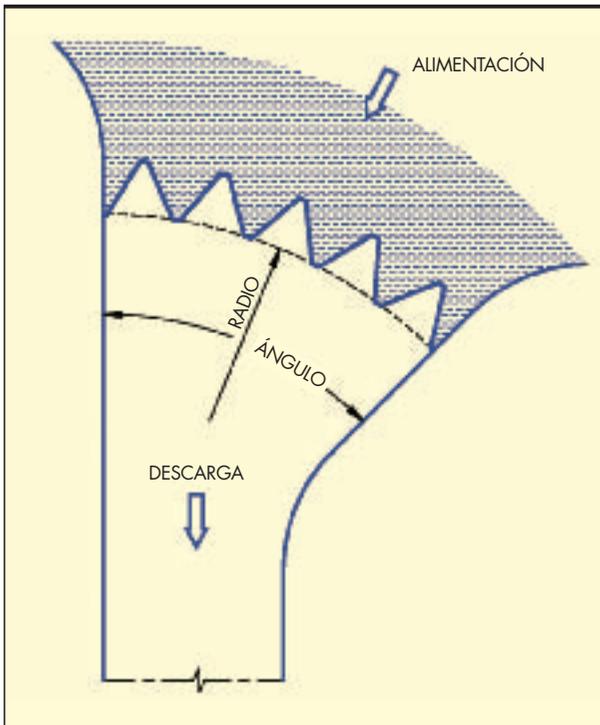


FIGURA 2. Cinco módulos de laberinto sobre directriz circular.

- Los aliviaderos en laberinto resultan apropiados en aquellas obras hidráulicas en las que se quiere restringir la sobre elevación de la lámina de agua, como puede ser el caso de canales o presas en las que se tienen limitados los niveles de embalse por distintas razones.

Además, es conveniente puntualizar una serie de aspectos de carácter general relacionados con el funcionamiento y la morfología de estas particulares estructuras hidráulicas:

- Funcionan en régimen de lámina libre.
- Son vertederos en pared delgada o en pared curva.

- No presentan limitaciones con respecto a la alimentación del vertedero. Pueden ser tanto de alimentación lateral como de alimentación frontal.
- No presentan limitaciones con respecto a la morfología del canal de descarga. Es posible proyectar un aliviadero con vertedero en laberinto de alimentación lateral y descarga escalonada o un aliviadero con vertedero en laberinto de alimentación frontal y descarga en túnel.

Como se ha explicado, la denominación de aliviadero en laberinto se refiere a la morfología del vertedero. Por ello, en adelante, hablaremos de vertedero en laberinto.

1.2. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE UN VERTEDERO EN LABERINTO

1.2.1. Formas en planta

Los vertederos en laberinto suelen estar constituidos por una serie de módulos iguales adosados a lo largo de una directriz que puede adoptar diversas formas geométricas. Lo usual es que la geometría de la directriz permita distribuir de forma regular los módulos, por lo que se suele acudir a directrices rectas o a arcos de circunferencia

Los módulos pueden adoptar formas desde triangulares hasta rectangulares, siendo lo más comunes y lógicos desde un punto de vista hidráulico y constructivo, las formas trapeziales.

El conjunto de investigaciones analizadas definen geométricamente a los módulos de manera similar:

Se definen, por tanto, los siguientes parámetros geométricos:

- A:** Semilongitud de muros longitudinales
- B:** Longitud de muros diagonales
- m:** Pendiente del canal aguas abajo del vertedero.
- $l = 4A + 2B$:** Longitud desarrollada del módulo.
- w:** Longitud recta o proyectada del módulo.
- α :** Ángulo de los muros diagonales con el eje del módulo.
- α_{max} :** Ángulo correspondiente al módulo triangular de misma "w" y mismo "Y".
- n:** Número de módulos.
- p:** Altura del vertedero en su parte de aguas arriba.
- D:** Altura del vertedero en su parte de aguas abajo.
- T:** Espesor de los muros.
- $W = nw$.** Longitud total recta o proyectada del vertedero en laberinto.
- $L = nl$.** Longitud total desarrollada del laberinto.

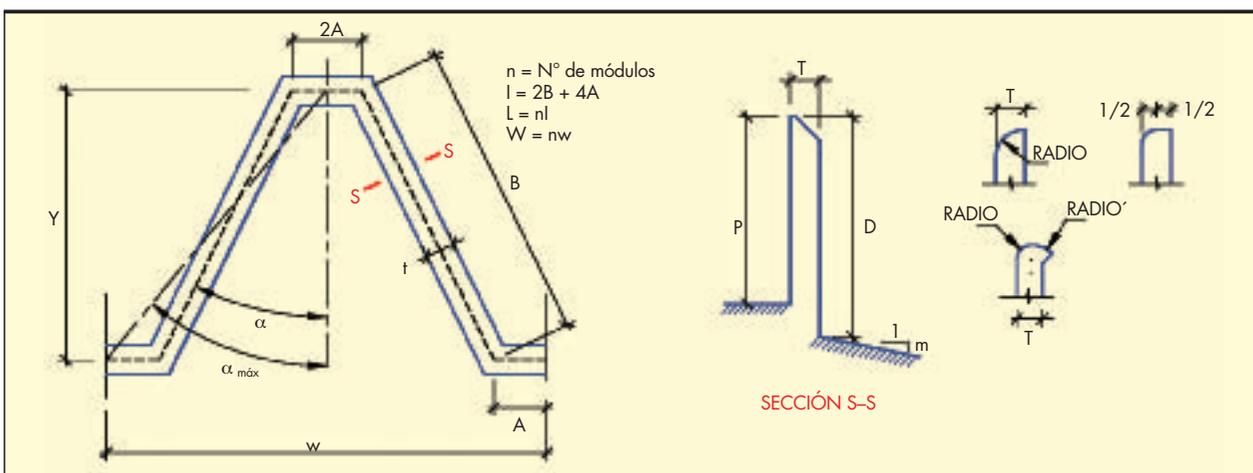


FIGURA 3.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

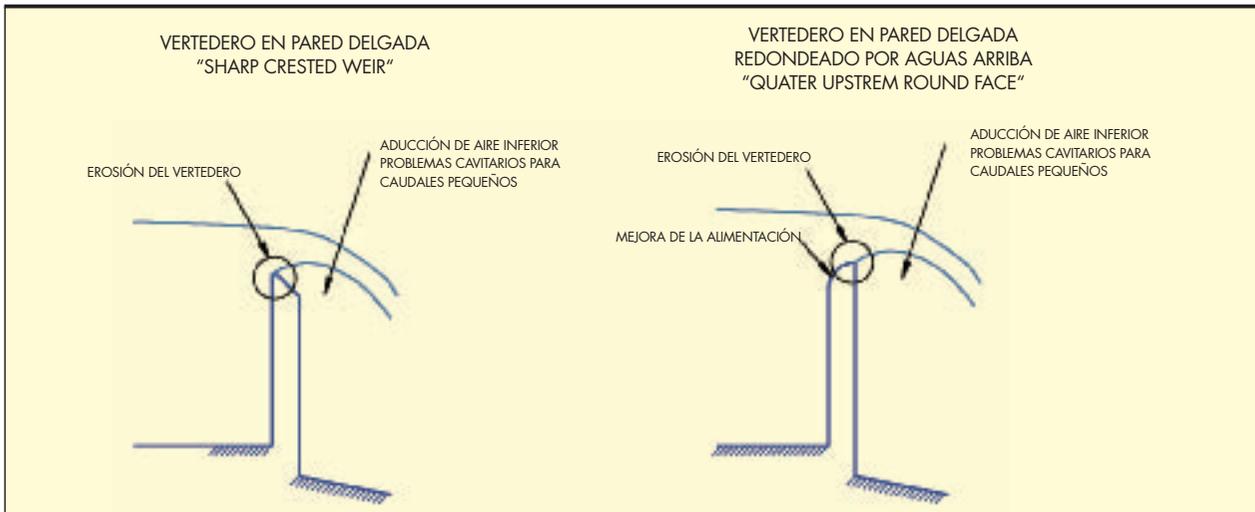


FIGURA 4.

Hay además una serie de ratios que permiten caracterizar el diseño en cuestión:

$\frac{l}{w}$: "Length Magnification Ratio" o relación entre la longitud desarrollada del vertedero y la recta o proyectada.

$\frac{w}{p}$: "Vertical Aspect Ratio". Relación entre la longitud recta o proyectada de un módulo y desarrollada del vertedero.

$\frac{\alpha}{\alpha_{máx}}$: Relación de ángulos.

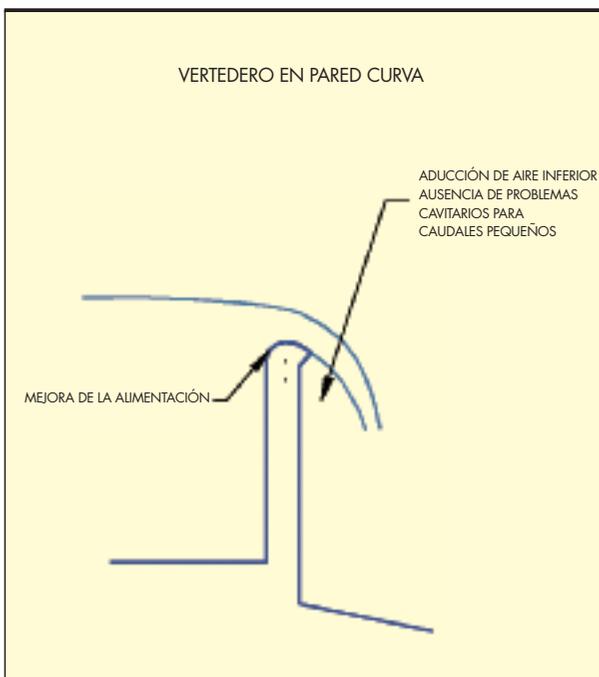


FIGURA 5.

1.2.2. Perfiles generalmente empleados

En las investigaciones analizadas, se exponen profusamente dos tipos de perfiles que en la literatura técnica se denominan "sharp crested weir" y "quarter upstream round face". Ambos perfiles responden al funcionamiento de un vertedero en pared delgada, si bien el segundo de ellos presenta una morfología que mejora la alimentación de agua.

No obstante, se considera que ambos perfiles presentan los mismos inconvenientes:

- Erosión del perfil, de tal manera que se puede llegar a modificar su forma y con ello, reducir la capacidad hidráulica del vertedero.
- Problemas cavitatorios para caudales pequeños. En efecto durante la evacuación de caudales reducidos la lámina no se despegaba del perfil del vertedero, produciendo cavitaciones que pueden llegar a dañar la fábrica.

La figura 4 ilustra lo descrito.

Se considera que estos problemas quedan resueltos mediante el empleo de un perfil curvo como el que se muestra en la figura 5.

2. "ESTADO DEL ARTE"

2.1. ANÁLISIS CRONOLÓGICO

Las primeras referencias encontradas respecto de aliviaderos en laberinto datan de 1941. En dicho año se construyó en Australia un aliviadero en laberinto en la presa de Woronora. Desde la construcción de este aliviadero hasta la publicación de las primeras investigaciones conocidas (aparecidas en 1970 y publicadas por Hay y Taylor a finales de los 60 y 70) se construyeron una serie de estructuras hidráulicas de este tipo, sin que se conozcan sus características concretas ni los estudios o teorías en que se basaron. Estos aliviaderos, proyectados por ingenieros ingleses, son los de las presas de Skelton (Reino Unido), River Belia (El Congo) y Beni Bahdel (Argelia).

A finales de los años 60 y primeros de los 70 se publican las primeras "guías" de diseño de aliviaderos en laberinto que con total profusión se han empleado en los 30 años siguientes.

Por una parte, el BUREAU OF RECLAMATION emprende una serie de investigaciones que finalizan con la publicación en 1968 de la tesis doctoral de G. Taylor: "The performance of labyrinth weirs" y de la investigación de N. Hay y G. Taylor: "Performance and design of labyrinth weirs", en 1970.

Por otra parte, en Australia, con motivo de la construcción de la presa Avon, THE METROPOLITAN WATER SEWERAGE AND DRAINAGE BOARD (MWS&DB) realiza una serie de investigaciones que concluyen con la publicación por el ingeniero Louis A. Darvas de "Performance and designing of labyrinth weirs" en 1971.

Ambas líneas de investigación constituyen la base de los procedimientos actuales de diseño y estudio de este tipo de estructuras hidráulicas. En efecto, es el propio BUREAU OF RECLAMATION el que de un tiempo a esta parte ha ido corrigiendo y mejorando la "guía" de estudio y diseño elaborada por Hay y Taylor a la par que, años más tarde, ingenieros portugueses han retomado los estudios de L. A. Darvas para elaborar nuevos procedimientos de diseño.

En 1980 P. G. Mayer, ingeniero del GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY publica un artículo de síntesis de los resultados de los modelos hidráulicos elaborados con motivo de la construcción del aliviadero en laberinto de la presa de Bartletts Ferry (EE.UU.). En dicha publicación se constata la inexactitud de los estudios desarrollados por Hay y Taylor.

A primeros y mediados de la década de los 80 y con motivo de la construcción de las presas de Hyrum (Estados Unidos) y Ute (Nuevo Méjico), el BUREAU OF RECLAMATION retoma las investigaciones de Hay y Taylor publicando una serie de estudios que revisan y corrigen sus resultados.

Paralelamente el LABORATORIO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL DE PORTUGAL (LNEC) con motivo de la construcción de las presas de Harreza y de Dungo realiza una serie de investigaciones que se materializan con la publicación de una serie de artículos.

Los estudios, iniciados por L. A. Darvas en 1971 y desarrollados por ingenieros portugueses en los primeros años de la década de los 80 han sido ampliamente utilizados en muchos países. Hay que decir, sin embargo, que no se tiene constancia de que desde el Laboratorio de Ingeniería Civil de Lisboa o desde alguna otra institución se hayan llevado a cabo, en años posteriores, más investigaciones en torno a este tipo de estructuras hidráulicas.

Bien diferente es el caso de la otra "rama" de la investigación. Ciertamente las investigaciones emprendidas por el BUREAU OF RECLAMATION han tenido una ininterrumpida continuidad desde la aparición de las primeras investigaciones en 1970 hasta nuestros días.

La construcción de las presas Ritchard (1991) y Standley Lake (1993) en Estados Unidos con sendos "laberintos" motivan la realización de investigaciones que concluyen con la publicación en 1995 de "Design of labyrinth spillways" por los ingenieros de la UTAH WATER RESEARCH LABORATORY (UWRL).

A finales de los años 90 y hasta la actualidad, la aparición de aplicaciones informáticas de modelización hidráulica por el Método de los Elementos Finitos abre una nueva línea de trabajo en el diseño y estudio de las distintas estructuras hidráulicas y en particular de los aliviaderos en laberinto.

La construcción en 2004 de la presa Dog River (Georgia, Estados Unidos) y su aliviadero en laberinto supone la primera aplicación conocida de métodos de modelización numérica tridimensional de una estructura hidráulica del tipo que nos ocupa. Este estudio fue llevado a cabo por ingenieros de la McNeese State University.

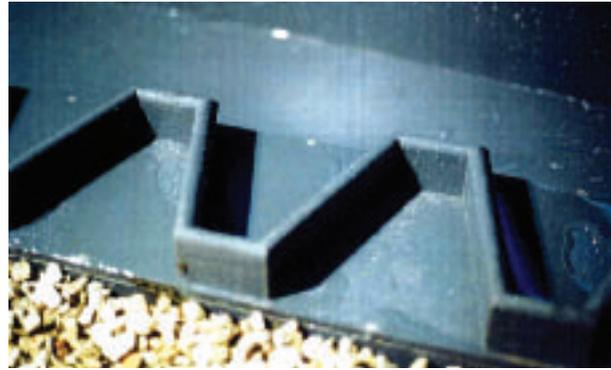


FIGURA 6. Modelo reducido del aliviadero de vertido lateral con vertedero en laberinto de la presa de Biscarrués, río Gállego. Huesca.

Además, es necesario señalar que existen muchas otras investigaciones realizadas de manera aislada en otros países; no obstante, estas investigaciones, que han sido analizadas, han carecido de continuidad temporal y no se puede decir que hayan contribuido de manera perceptible al conocimiento hidráulico de este tipo de vertederos.

2.2. HIDRÁULICA DE UN VERTEDERO EN LABERINTO

El estudio de cualquier estructura hidráulica de alivio persigue como fin último la determinación de la curva de capacidad de dicha estructura, esto es, la curva que enfrenta caudales con sobreelevaciones de la lámina de agua.

En un vertedero recto convencional, ya sea en pared delgada o en pared curva la curva de capacidad, determinada de forma experimental responde a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times Cd \times L \times h^{1,50}$$

en donde:

Q: Caudal, en m³/s

g: gravedad (m/s²)

Cd: Coeficiente de desagüe, que se determina experimentalmente

L: Longitud total del vertedero

h: Sobreelevación de la lámina respecto del umbral del vertedero.

Se entiende que el caudal unitario (por unidad de longitud de vertedero) es:

$$q = \frac{Q}{L}$$

El coeficiente de desagüe (**Cd**) queda determinado de forma experimental, y en función de la forma del vertedero; para un vertedero en pared delgada:

$$Cd = 0,611 + 0,075 \times \frac{h}{p}$$

que resulta válida cuando $h < 0,50 p$.

Para un vertedero "en pared curva" existen numerosas ecuaciones correspondientes al Coeficiente de Desagüe, función éstas de la forma del perfil (Creager, Bradley, etc.).

La lógica y sobre todo la intuición inducen a aplicar de forma directa estas ecuaciones para obtener la capacidad de un vertedero en laberinto. En efecto, numerosas investigaciones han contemplado el comportamiento hidráulico de este tipo de vertederos desde esta perspectiva; sin embargo, existen una serie de aspectos que invalidan o cuando menos

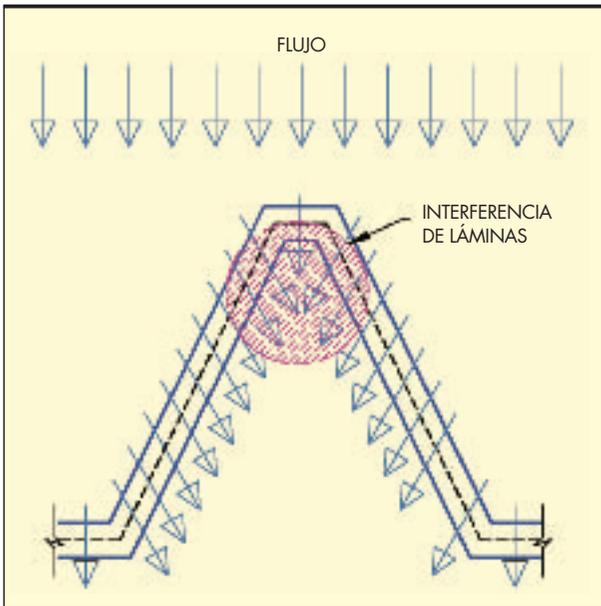


FIGURA 7.

reducen la aplicabilidad de estas ecuaciones experimentales a los vertederos en laberinto.

En efecto, el conjunto de las investigaciones analizadas presentan un común acuerdo sobre la existencia de una serie de fenómenos físicos, relacionados unos con otros, que tienen lugar durante el proceso de evacuación de caudales por parte del vertedero y que se pueden esquematizar de la siguiente manera:

1. **Interferencia de láminas:** Se produce cuando las láminas vertientes por muros diagonales que confluyen en el mismo vértice de aguas arriba, chocan generando unas pérdidas de carga elevadas. Se puede decir que este fenómeno se produce antes (para menores sobreelevaciones de la lámina) cuanto mayor es l/w .

2. **Sumergencia del vertedero:** Se produce cuando la piezométrica aguas abajo del vertedero alcanza un valor tal que condiciona la capacidad de desagüe del vertedero, tal y como ocurre en vertederos rectos. Este fenómeno se produce cuando en el canal o cubeta de recogida ubicada inmediatamente aguas abajo del vertedero, no se encuentra adecuadamente diseñada (con pendiente insuficiente o con un valor del parámetro m escaso).

El segundo de los fenómenos comentados (sumergencia del vertedero) es el mismo que en vertederos convencionales, esto es, el vertedero se sumerge cuando la piezométrica aguas abajo alcanza una cota próxima a la del umbral del azud (algunas publicaciones fijan este calado en la altura del vertedero en su cara de aguas abajo más dos terceras partes de la sobreelevación de la lámina sobre el umbral). Este fenómeno, por tanto, se evita adoptando las mismas medidas que en vertederos rectos, esto es, bien aumentando la pendiente del canal o cubeta de recepción (parámetro m), bien aumentando la altura del vertedero en su cara de aguas abajo (parámetro D).

Más complicado de caracterizar resulta el primero de los fenómenos –interferencia de láminas–. En algunas investigaciones se realizan aproximaciones cualitativas al fenómeno a partir de los parámetros de diseño y funcionamiento:

$$\frac{l}{w} : \text{“Length Magnification Ratio”}$$

$$\frac{w}{p} : \text{“Vertical Aspect Ratio”}$$

$$\frac{h}{p} : \text{Parámetro de funcionamiento}$$

Los valores máximos de h/p que dan lugar un funcionamiento admisible se encuentran entre 0,50 y 0,70. Asimismo, para un mismo valor h/p , la interferencia de láminas es mayor para valores crecientes de l/w .

Según muchas publicaciones el aumento de p , y consiguientemente la reducción de w/p , propicia un mejor funcionamiento del laberinto. No obstante, el comportamiento hidráulico de un vertedero en laberinto, no puede entenderse si no es desde una perspectiva, al menos, bidimensional. La figura 8 muestra un esquema con este comportamiento.

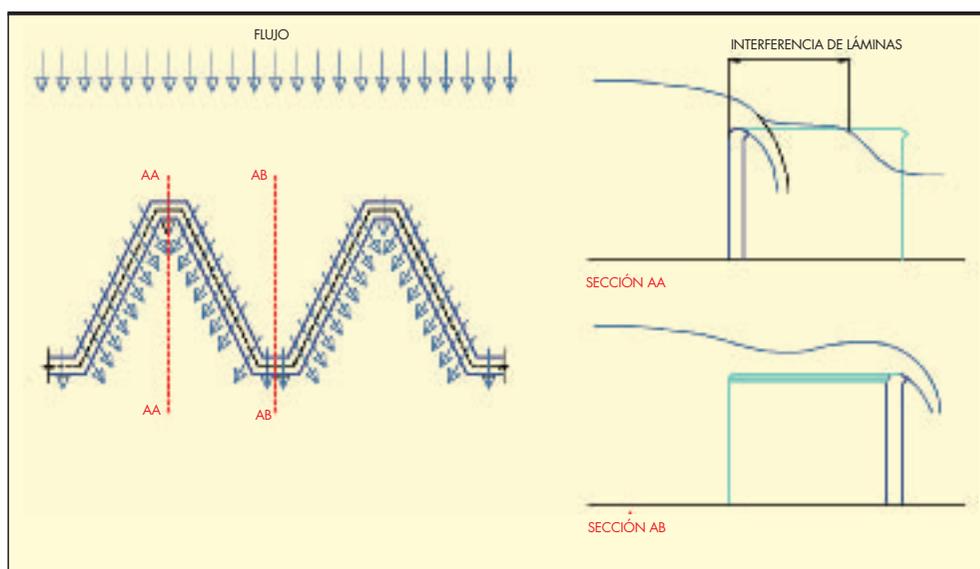


FIGURA 8.



FIGURA 9. Modelo reducido del aliviadero de vertido lateral con vertedero en laberinto de la presa de Biscarrués. Avenida de diseño $Q = 2.200 \text{ m}^3/\text{s}$.

En efecto, en los vértices de aguas abajo, mientras no existe sumergencia, el funcionamiento es adecuado, la lámina adopta una posición ondulada que queda determinada, para cada caudal, por las contracciones y expansiones generadas en el flujo por los vertidos que en las zonas adyacentes del vertedero se están produciendo.

No ocurre lo mismo en los vértices de aguas arriba en donde la interferencia de láminas (en caso de que ocurra) eleva la superficie libre, generándose unas pérdidas de carga importantes que afectan a la capacidad hidráulica y propician un funcionamiento indeseable del vertedero.

Sobre la base de los fenómenos comentados, el comportamiento hidráulico se puede esquematizar según la morfología en planta del mismo (y que da lugar a la aparición de interferencia de láminas en un momento u otro) y de las condiciones hidráulicas en la cubeta o canal de recogida, inmediatamente aguas abajo del vertedero (que puede o no propiciar la sumergencia del vertedero):

FASE N° 1: Inexistencia de interferencia de láminas: El funcionamiento se desarrolla con láminas pequeñas, no existe interferencia de láminas vertientes. La capacidad hidráulica del vertedero se acerca a la de uno recto de longitud la desarrollada del laberinto.

FASE N° 2: Aparición de la interferencia de láminas: Comienza la interferencia de láminas en la parte de aguas arriba de los muros diagonales y el “frente de interferencia” se desplaza hacia aguas abajo a medida que se aumentan los caudales. La aireación es deficiente en la zona en la que existe interferencia. La pendiente de la curva de capacidad (espesor de lámina - caudal) se hace progresivamente menor.

FASE N° 3: La interferencia de láminas abarca el vertedero. La capacidad hidráulica apenas crece con el aumento de la sobre-elevación sobre el umbral del vertedero y la aducción de aire es prácticamente nula.

2.3. INFLUENCIA DE LA ALIMENTACIÓN

Pocas conclusiones se pueden encontrar en el conjunto de investigaciones analizadas sobre aliviaderos en laberinto sobre la influencia de la alimentación al vertedero en el comportamiento hidráulico del mismo:

1. La adecuada alimentación al vertedero en laberinto es esencial en el buen comportamiento del mismo. Con ello

hay que adoptar formas redondeadas en los canales y estructuras de alimentación, que influyen apreciablemente en los módulos de los extremos del vertedero.

2. En aquellos casos en los que la dirección del flujo en la alimentación no sea perpendicular al vertedero, es recomendable que el vertedero se encuentre lo más “dentro” del embalse posible.

La influencia de la alimentación en el comportamiento hidráulico de un vertedero en laberinto es, al igual que en vertederos rectos convencionales, de vital importancia y las conclusiones o recomendaciones que se pueden establecer son, para los dos casos, las mismas:

- La obtención de la capacidad hidráulica de cualquier tipo de vertedero en el que se tienen dudas sobre las condiciones de alimentación resulta complicada mediante la simple aplicación de fórmulas clásicas como las correspondientes a vertederos en pared delgada o curva. Ello obliga, en la generalidad de los casos, al ensayo en modelo físico a escala reducida.
- Respecto de las medidas a adoptar en fase de diseño cuando se tienen dudas respecto de las condiciones de alimentación, se puede exponer de manera genérica lo siguiente:
 - Para calados pequeños, el flujo adopta la dirección de la línea de máxima pendiente de la solera de la alimentación.
 - En calados grandes, la morfología de la solera de la alimentación influye menos, por lo que cuando este efecto es adverso, es recomendable excavar más la plataforma de alimentación y consecuentemente, elevar la altura del vertedero “ p ” o lo que es lo mismo que el vertedero se encuentre lo más “dentro” posible del embalse.

2.4. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

Entre las investigaciones analizadas están las que exponen una metodología para la determinación de la capacidad hidráulica de un vertedero en laberinto cualquiera a partir del conocimiento de las características geométricas del mismo. El conjunto de estas metodologías tienen las siguientes características:

- Se basan en los resultados de una batería de ensayos hidráulicos sobre modelos físicos a escala reducida.
- Ofrecen curvas, ábacos o ecuaciones experimentales que pueden aplicarse a vertederos en laberinto similares.

Podemos resumir los siguientes procedimientos:

- El elaborado por Frederick Lux III and David L. Hinchliff en 1985.
- El elaborado por A. Pinto - Maghalaës en 1983.
- El elaborado por J. Paul Tullis, Nosratollah Amanian and David Waldron en 1995.

Los “inputs” o datos de entrada son los relativos a la geometría del vertedero y que ya se han expuesto con anterioridad:

- A:** Semilongitud de muros longitudinales
- B:** Longitud de muros diagonales
- m:** Pendiente del canal aguas abajo del vertedero
- $l = 4A + 2B$:** Longitud desarrollada de vertedero
- w:** Longitud recta o proyectada del módulo
- α :** Ángulo de los muros diagonales con el eje del módulo
- α_{max} :** Ángulo correspondiente al módulo triangular de misma “ w ” y mismo “ Y ”
- n:** Número de módulos

- p:** Altura del vertedero en su parte de aguas arriba
D: Altura del vertedero en su parte de aguas abajo
T: Espesor de los muros
W = nw. Longitud total recta o proyectada del vertedero en laberinto
L = nl. Longitud total desarrollada del laberinto

Se ha realizado un estudio comparativo de los tres procedimientos comentados mediante la aplicación de los mismos a distintos vertederos. Así, se han analizado los resultados que unos y otros procedimientos ofrecen cuando se varían los parámetros l/w y la relación de ángulos ($\frac{\alpha}{\alpha_{m\acute{a}x}}$), y para distintas h .

Se ha tomado, como base de los cálculos un módulo con w de 10 m y p de 2 m. A partir de aquí se han ido variando los parámetros comentados para obtener, en cada caso, las curvas de capacidad (que enfrentan h/p con el caudal unitario desaguado).

Se presentan un total de 6 gráficos (figuras 10 y 11) que se agrupan en dos estudios (variación de l/w y variación de la relación de ángulos) y que muestran las tres curvas de capacidad correspondientes a cada procedimiento.

De la observación de los gráficos se puede concluir lo siguiente:

1. Los resultados de unos y otros procedimientos son muy aproximados cuando se adoptan l/w bajos y con formas de los módulos triangulares.
2. Los procedimientos presentan mayores diferencias cuanto mayor es h/p .
3. Los procedimientos presentan diferencias muy importantes (del 25% en caudales unitarios) cuando la relación de ángulos es baja y l/w elevado.

3. CONCLUSIONES DE CÁLCULO

Se han analizado unas 30 investigaciones relativas a aliviaderos en laberinto; las investigaciones que exponen resultados más interesantes son aquellas que realizan un estudio sobre ensayos físicos a escala reducida. En estos estudios se ensayan distintas geometrías de vertederos y distintos perfiles del mismo (en pared delgada y redondeado por aguas arriba). Del examen de éstas se puede concluir lo siguiente:

1. Los aliviaderos en laberinto son estructuras hidráulicas apropiadas cuando se pretende contar con una elevada capacidad hidráulica para sobreellevaciones reducidas.
2. Los aliviaderos en laberinto no son estructuras hidráulicas apropiadas cuando las sobreellevaciones de la lámina de agua son elevadas. Las investigaciones analizadas establecen como límite superior de funcionamiento un h/p de 0,50 a 0,70.
3. Se fijan una serie de parámetros de diseño:

$\frac{l}{w}$: "Length Magnification Ratio"

$\frac{w}{p}$: "Vertical Aspect Ratio".

$\frac{\alpha}{\alpha_{m\acute{a}x}}$: Relación de ángulos.

4. Como parámetro de funcionamiento se establece h/p .
5. Se describen los distintos fenómenos que inciden en el comportamiento hidráulico: Interferencia de láminas

y sumergencia del vertedero, así como las distintas fases de funcionamiento, para sobreellevaciones crecientes, en función de la aparición de estos fenómenos.

6. Se establece, asimismo, la importancia de las condiciones de alimentación al vertedero, exponiendo recomendaciones genéricas que son de aplicación para cualquier tipo de vertedero.
7. Se han considerado 3 procedimientos simplificados de cálculo de la capacidad hidráulica de los aliviaderos en laberinto. Estos procedimientos se basan en modelizaciones hidráulicas sobre ensayos físicos a escala reducida, cuyos resultados extrapolan hasta obtener unos ábacos, curvas o ecuaciones experimentales. Estos procedimientos ofrecen resultados similares para cuando h/p adopta valores bajos o cuando l/w adopta, asimismo, valores bajos y pueden llegar a ofrecer importantes diferencias cuando el laberinto tiene mucho desarrollo (l/w elevados).

Resumidos los aspectos más importantes analizados en el conjunto de investigaciones existentes, se va a realizar a continuación una breve valoración del estado del arte en materia de aliviaderos en laberinto:

1. En la actualidad se conoce a nivel cualitativo el comportamiento de un aliviadero en laberinto, y se han descrito con exactitud el conjunto de fenómenos que condicionan su comportamiento y limitan su aplicabilidad en ingeniería hidráulica.
2. No se han encontrado publicaciones sobre laberintos con vertederos en pared curva como el mostrado en apartados anteriores, que se considera que presenta ventajas frente a fenómenos erosivos y cavitatorios.
3. Los procedimientos de cálculo de las curvas de capacidad existentes resultan una herramienta útil en fase de proyecto, pero resulta necesario el ensayo hidráulico previo a la construcción del vertedero, al objeto de constatar la bondad del diseño o de efectuar las oportunas correcciones.
4. Finalmente se considera oportuno realizar una serie de comentarios sobre el parámetro p (altura del vertedero en su cara de aguas arriba), con relación a las condiciones de alimentación del vertedero:

En efecto, los aliviaderos en laberinto tienen un funcionamiento difícilmente asimilable a un flujo unidimensional, debido a las particulares condiciones de alimentación del vertedero, que establecen un campo de velocidades de aproximación al vertedero no calculable por los procedimientos simplificados de cálculo, y la disposición de cada aliviadero en cuestión, que sí que queda adecuadamente definido por los parámetros de diseño (sobre todo l/w y w/p).

- Las publicaciones examinadas establecen que cuanto mayor es la altura del vertedero en su cara de aguas arriba, mejor es el funcionamiento del laberinto (el parámetro de funcionamiento h/p es menor).
- Se considera que el aumento de la altura del vertedero por su cara de aguas arriba (y el consiguiente aumento de la excavación de la plataforma de alimentación) tiene sentido cuando las condiciones naturales de alimentación son desfavorables y sólo hasta un cierto valor en el que el campo de velocidades en la aproximación del vertedero solamente acusa la posición de éste y no la morfología de la alimentación. Más allá de ese valor, el aumento de p parece de efectividad.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

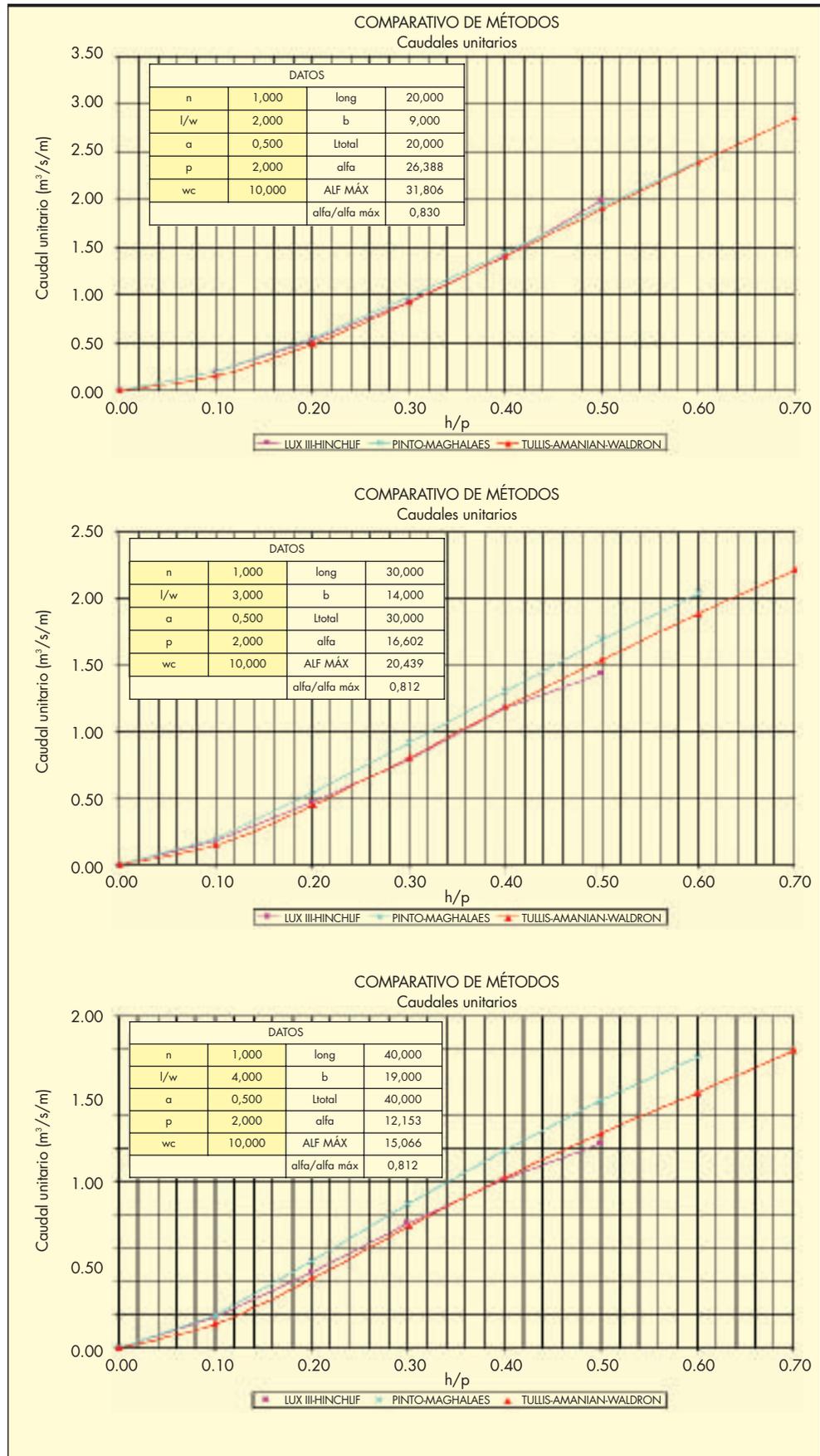


FIGURA 10. Variación de l/w.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

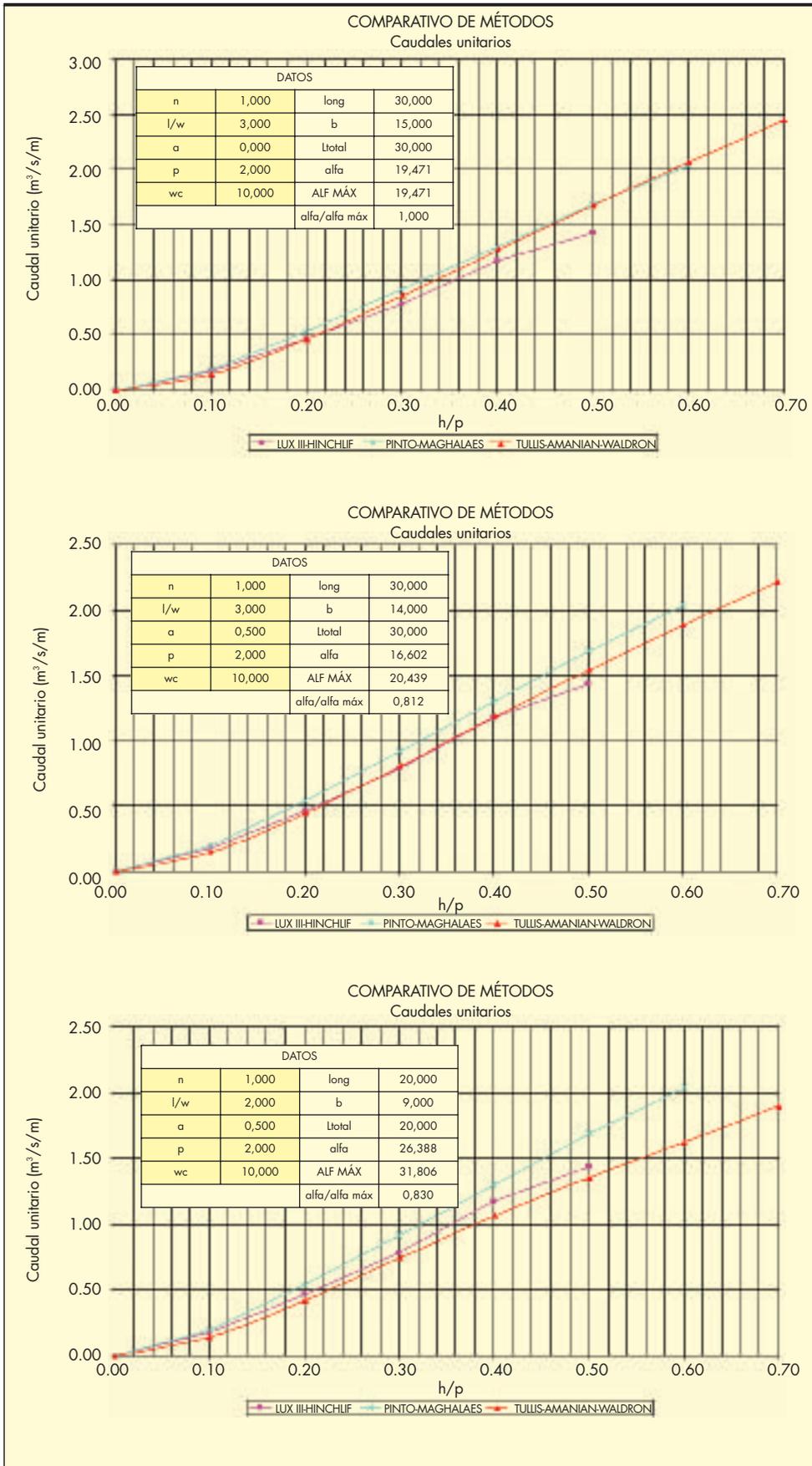


FIGURA 11. Variación de la relación de ángulos.

4. APLICACIÓN PRÁCTICA. PRESA DE MARÍA CRISTINA

4.1. INTRODUCCIÓN

Con el vertedero en laberinto puede conseguirse una reducción notable de la altura de la lámina, por lo que puede ser una solución útil para la ampliación de la capacidad de un aliviadero existente.

El coeficiente de desagüe, menor que el normal, depende de la altura de lámina y de la forma y ángulo en planta de los tramos del laberinto, y requiere concretarlo en un modelo reducido que, por otra parte, es necesario para el conjunto del aliviadero.

La presa de María Cristina se encuentra situada al este de la península Ibérica, sobre la Rambla de la Viuda, afluente del río Mijares que vierte sus aguas al mar Mediterráneo en la provincia de Castellón.

Para adecuar el aliviadero a la normativa vigente desde 1996 y de acuerdo con los nuevos estudios hidrológicos, la Confederación Hidrográfica del Júcar considera necesario el diseño de un nuevo aliviadero, con un vertedero en laberinto que aumente la capacidad del existente en la actualidad, y su comprobación mediante el ensayo en modelo físico reducido que ha sido construido y ensayado en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

La presa es del tipo arco-gravedad de planta circular con radio de 142 m, altura de 56,5 m y volumen de embalse de 19,59 hm³.

Durante su construcción en 1920 se produjo un vertido por encima de las obras. En 1946 otra avenida originó el deterioro del aliviadero original situado en un collado en la margen derecha, arrancando parte de la solera del canal de descarga.

Debido al peligro que suponía el aliviadero en esas condiciones, la Confederación Hidrográfica del Júcar, propietaria de la presa, decidió inutilizar el aliviadero original y construir un nuevo aliviadero junto al estribo de la margen derecha de la presa con una capacidad de 560 m³/s.

En 1962 y 1969 dos nuevas avenidas ocasionaron vertidos sobre coronación, lo que motivó la modificación del nuevo aliviadero para ampliar su capacidad hasta los 600 m³/s actuales. En 2000 se produjo un nuevo vertido por coronación.

4.2. NORMATIVA VIGENTE

Normativa vigente en relación con las avenidas y resguardos en presas:

- Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas 1967.
- Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones 1995.
- Reglamento Técnico sobre la Seguridad de Presas y Embalses 1996.

En el Art. 3.2 del Reglamento Técnico sobre la Seguridad de Presas y Embalses se clasifican las presas en función del riesgo potencial que pueda derivarse de su posible rotura o de su funcionamiento incorrecto, de acuerdo con el Art. 3.5.1.3 de la Directriz, en alguna de las siguientes categorías A, B o C.

En el proyecto y en la explotación de la presa se determinan, en función de su clasificación, dos tipos de avenidas afluentes al embalse según las definiciones del Art. 11. "Avenidas a considerar" del Reglamento: Avenida de Proyecto y Avenida Extrema.

El Reglamento no especifica qué periodos de retorno se deben adoptar en cada caso, pero existen unas recomendaciones, incluidas en las Guías Técnicas de Seguridad de Presas, que complementan y desarrollan la normativa oficial.

En las Guías, n° 4 "Avenida de proyecto" y n° 5 "Aliviaderos y desagües", publicadas por el Comité Nacional Español de Grandes Presas y el Colegio de Ingenieros de Caminos, se recomiendan, en función de la clasificación de la presa, los periodos de retorno a considerar.

	Avenida proyecto	Avenida extrema
Categoría A	1.000 años	5.000 - 10.000 años
Categoría B	500 años	1.000 - 5.000 años
Categoría C	100 años	100 - 500 años

TABLA 1. Determinación del periodo de retorno.



FIGURA 12. Vertido por coronación en la Presa de M^{ra} Cristina. Castellón.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

En las fases de proyecto y explotación se definen los niveles de embalse siguientes según el Art. 12 del Reglamento: Nivel Máximo Normal (NMN); Nivel para la Avenida de Proyecto (NAP); Nivel para la Avenida Extrema (NAE).

En el Art. 13 del Reglamento se especifican los resguardos, entendiéndose por resguardo la diferencia entre el nivel de agua del embalse en una situación concreta y la coronación de la presa.

De acuerdo con los niveles de embalse establecidos en el Art. 12, se definen los resguardos para las dos situaciones principales del embalse:

- Resguardo normal: Es el relativo al Nivel Máximo Normal (NMN). Este resguardo, además de ser suficiente para el desagüe de las avenidas, será igual o superior a las sobreelevaciones producidas por los oleajes máximos, incluyendo los debidos a los efectos sísmicos.
- Resguardo mínimo: Es el relativo al Nivel para la Avenida de Proyecto (NAP). Este resguardo será igual o superior a las sobreelevaciones producidas por los oleajes en situaciones de avenida, y para su determinación se tendrá en cuenta el desagüe de la avenida extrema.

Para la avenida extrema se tolerará un agotamiento parcial o total del resguardo.

En la Guía Técnica nº 4 "Avenida de proyecto", en su apartado 4.5 se recomienda que en las presas de categoría A, estos resguardos sean como mínimo de 0,5 m a 1 m en presas de hormigón, sin tener en consideración la existencia de parapetos. En relación con el vertido sobre coronación recomienda que sea el correspondiente a láminas y caudales relativamente pequeños y durante cortos períodos de tiempo, justificando en todo caso que dicho vertido no ha de producir daños importantes a la presa o su cimentación, y no se ponga en riesgo la seguridad de la presa.

5. ALIVIADERO EN LABERINTO DE 9 MODULOS

Proyectar un aliviadero en laberinto manifiesta la necesidad de lograr una elevada capacidad de desagüe y desarrollar la longitud de vertido en una zona limitada. De acuerdo con las anteriores consideraciones se ha diseñado el nuevo aliviadero en laberinto de la presa de M^a Cristina.

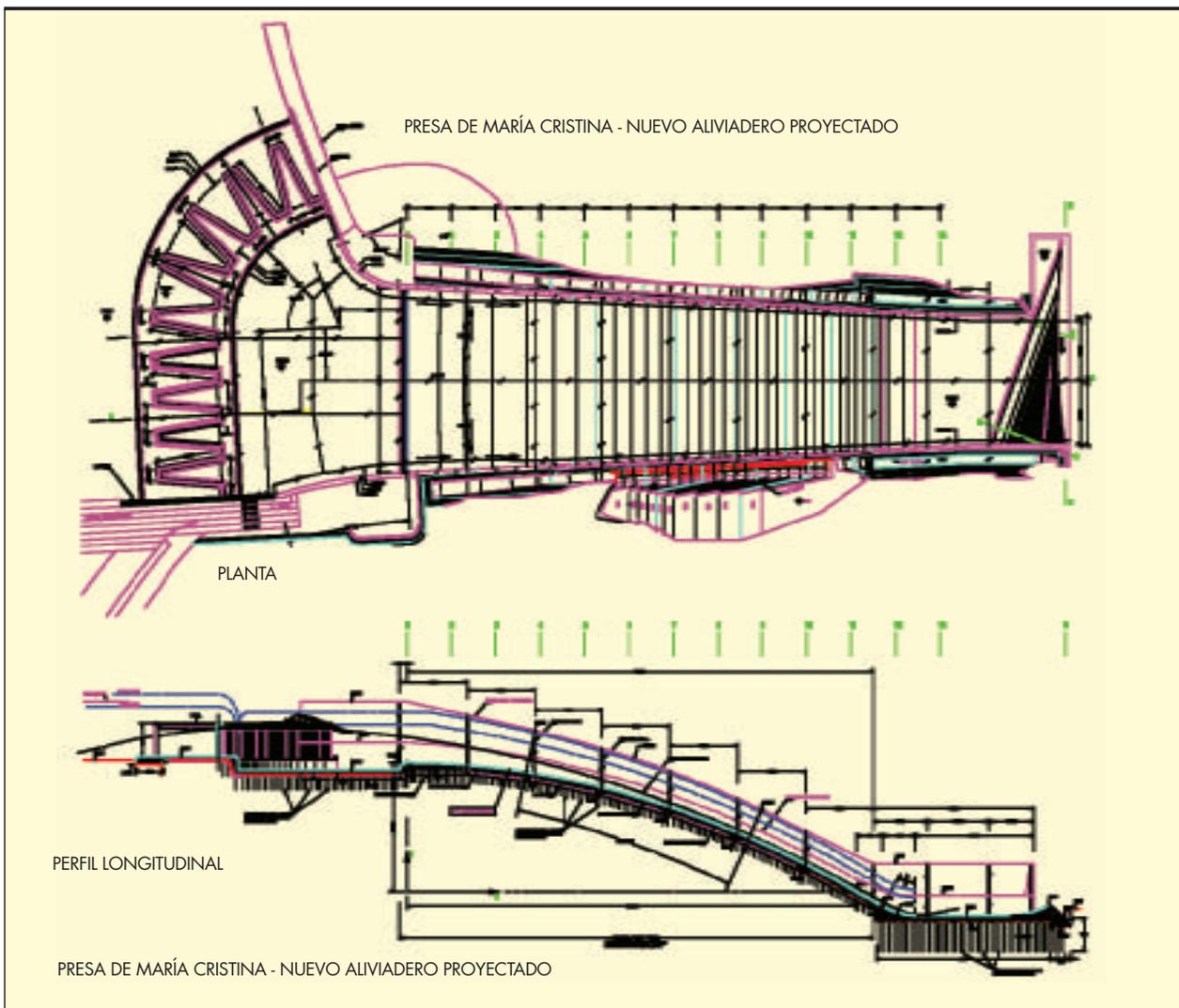


FIGURA 13. Planta y perfil longitudinal laberinto de 9 módulos.

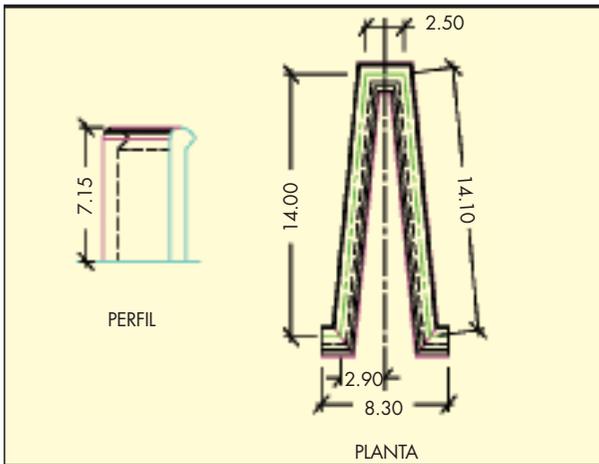


FIGURA 14. Módulo del aliviadero en laberinto.

El primer aliviadero propuesto constaba de 9 módulos distribuidos, cuatro sobre un arco de circunferencia y los otros cinco sobre una recta, con el fin de adecuarse mejor a la zona del aliviadero actual, entre la ladera derecha y el cuerpo de presa.

Cada módulo estaba formado por dos muros diagonales de 14,10 m y por otros dos transversales de 2,50 m. La altura del vertedero (p) era de 7,15 m, manteniendo el umbral a la misma cota (133,65) que el aliviadero actual. La longitud proyectada de un módulo era $w = 8,30$ y la relación de longitudes $l/w = 4$.

Aguas abajo del vertedero en laberinto se dispone un cuenco de ancho variable, cuyo valor medio es de 50 m, limitado aguas abajo por un azud de control.

En el azud de control se inicia una rápida de 105 m de longitud, de ancho y pendiente variable, que finaliza con una estructura de restitución al cauce.

6. ENSAYO EN MODELO REDUCIDO

Debido a las dificultades para ajustar un aliviadero de este tipo de forma teórica, encajado entre la ladera y el cuerpo de presa, donde el flujo no está alineado con los módulos del laberinto y con planta curva, se han realizado los ensayos en modelo físico.

Para ello se ha construido un modelo reducido a escala 1/50 en la nave de ensayos del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Antes de la construcción del modelo propiamente dicha se realizó el proyecto constructivo del modelo, donde se determinaron sus límites, la zona erosionable y de lecho fijo, el instrumental necesario para la toma de resultados y el estudio de adaptación a la infraestructura del Laboratorio.

Una vez realizado el proyecto constructivo y fijado el lugar de su emplazamiento, se procedió al replanteo y a la construcción con fábrica de ladrillo perfectamente impermeabilizada. Posteriormente se realizó un levantamiento topográfico del terreno, la implantación de la presa y el aliviadero, la alimentación del caudal líquido en circuito cerrado, y por último la instalación de la instrumentación necesaria para fijar las condiciones de contorno y realizar la toma de resultados.

Los primeros ensayos correspondieron a la obtención de la curva de capacidad del aliviadero proyectado. La curva obtenida experimentalmente depara resultados con menor capacidad que los conseguidos teóricamente. En el gráfico de la curva de capacidad experimental se observan varios cambios de pendiente que corresponden con cambios en el funcionamiento del vertedero en laberinto.

Con caudales menores a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ se obtiene una lámina de agua sobre el umbral del vertedero $h < 0,7 \text{ m}$, y una relación $h/p < 0,1$.

En un valor próximo a los $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ se advierte un aumento en la pendiente de la curva de capacidad, esto nos indica una disminución en el coeficiente de desagüe.



FIGURA 15. Modelo reducido.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

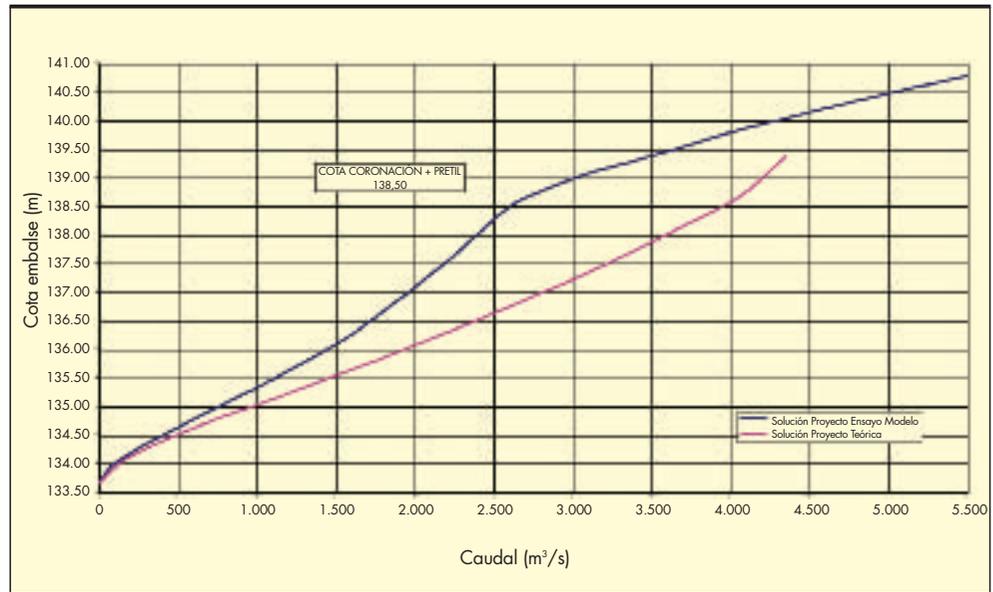


FIGURA 16. Curva de capacidad 9 módulos teórica y experimental.

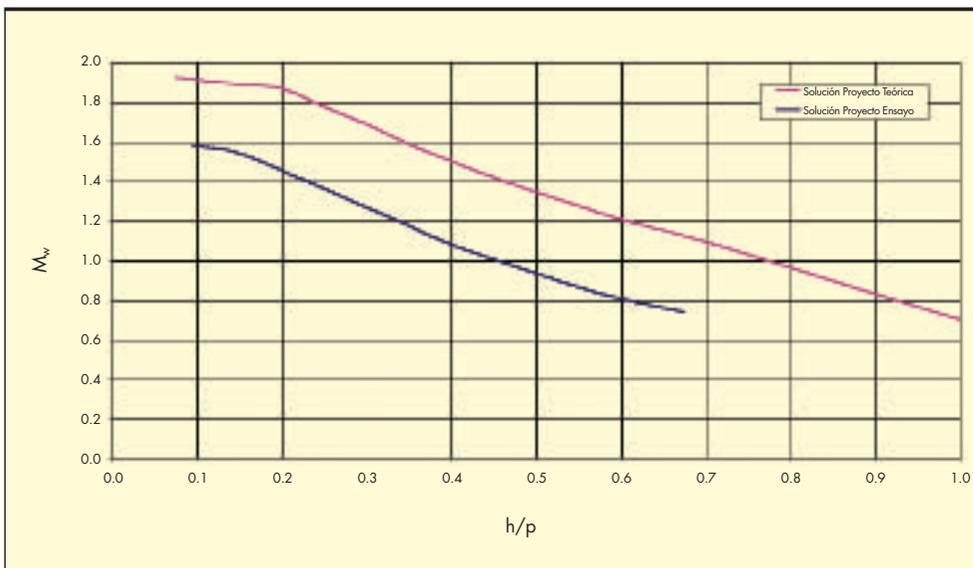


FIGURA 17. Coeficiente de desagüe 9 módulos teórico y experimental.

A partir de $2.600 \text{ m}^3/\text{s}$ se produce el vertido por coronación (incluido pretil de $0,50 \text{ m}$) dando lugar a un nuevo punto de inflexión. Al aumentar la longitud de vertido la pendiente de la curva de capacidad disminuye notablemente.

Para el caudal de la Avenida de Proyecto, $3.073 \text{ m}^3/\text{s}$, la cota alcanzada según la curva teórica era de $137,3 \text{ m}$, mientras que según los resultados experimentales la cota obtenida en el embalse fue $139,1 \text{ m}$. Este nivel supone 60 cm por encima de la cota del pretil de coronación fijado en $138,50 \text{ m}$.

Según aumenta el caudal, el coeficiente de desagüe μ_w disminuye debido a la interferencia entre las láminas vertidas por los muros diagonales y transversales.

Los resultados obtenidos experimentalmente ponen de manifiesto la necesidad de proyectar un nuevo aliviadero con mayor capacidad de vertido que permita cumplir las condiciones de la normativa actual.

7. ALIVIADERO EN LABERINTO DE 7 MODULOS

Con el propósito de aumentar la capacidad de desagüe del vertedero en laberinto, se procedió a comparar los resultados teóricos y los experimentales, estudiándose cuatro posibilidades: un laberinto con seis módulos y otros tres laberintos con siete módulos.

Se opta por ensayar un aliviadero con siete módulos formados por dos muros longitudinales de $20,85 \text{ m}$ de longitud y dos muros transversales de $3,00 \text{ m}$. En planta, seis de estos módulos se encuentran sobre un arco de circunferencia y uno está situado sobre una recta. Se aumenta la altura del vertedero (p) a $8,15 \text{ m}$ pero se conserva el umbral a la cota $133,65$.

Se seleccionó esta alternativa al considerarse que era la solución en planta que mejor se adaptaba al flujo y a la zona disponible para situar el aliviadero entre el cuerpo de presa y la ladera derecha.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

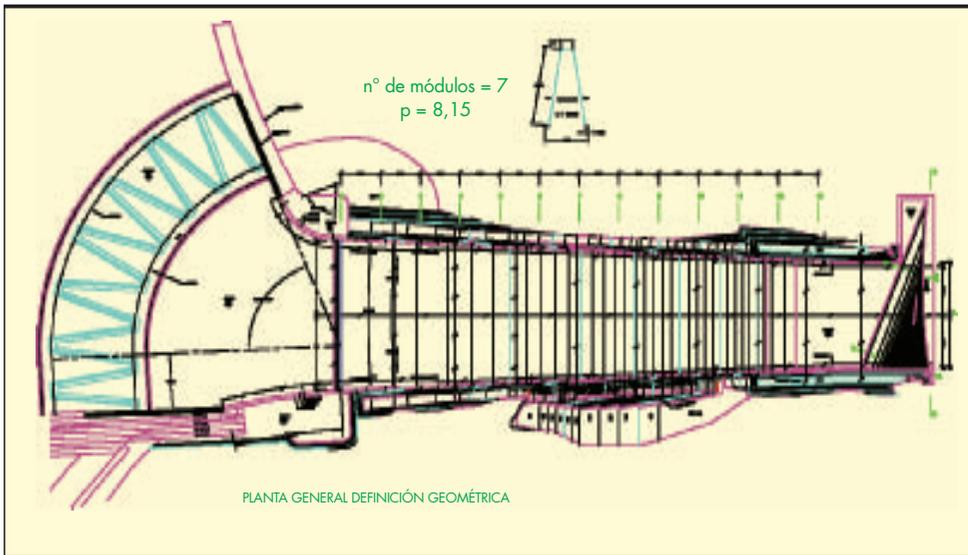


FIGURA 18. Planta del laberinto de 7 módulos.

8. ENSAYO EN MODELO REDUCIDO DEL LABERINTO DE 7 MODULOS

Los caudales del nuevo aliviadero de 7 módulos han variado, de acuerdo con los cálculos de laminación, respecto a la solución inicial de 9 módulos, pasando para la Avenida de Proyecto, con periodo de retorno de 1000 años, de $3.073 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2.855 \text{ m}^3/\text{s}$, y para la Avenida Extrema de 5.515 a $5.548 \text{ m}^3/\text{s}$.

Al igual que en el ensayo anterior, se ha obtenido la curva de capacidad para este nuevo aliviadero. Los resultados experimentales demuestran un aumento de la capacidad y del coeficiente de desagüe en el aliviadero de 7 módulos respecto al laberinto original de 9 módulos. Comparando las dos curvas obtenidas se observa que para los mismos caudales, los niveles alcanzados en el embalse son menores en el caso del laberinto de 7 módulos.

La forma general de ambas curvas es muy similar, se producen las mismas inflexiones debidas a los cambios de funcionamiento del laberinto: para pequeñas láminas sin interferencias utilizando la longitud total del vertedero; y para láminas mayores, con disminución del coeficiente de desagüe, donde se aprecian interferencias entre las láminas de los distintos módulos; hasta llegar al anegamiento cuando el laberinto funciona como un vertedero en pared gruesa y su longitud se reduce a la distancia entre sus estribos.

El vertido por coronación se produce para un caudal próximo a los $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$, inferior al correspondiente a la Avenida de Proyecto. Para esta avenida el nivel alcanzado en el embalse no cumple con el resguardo recomendado en el la Guía Técnica n° 4 "Avenida de proyecto" por lo que es necesario pensar en tres posibles opciones: permitir el vertido por coronación, recrecer la presa o rebajar la cota del vertedero.

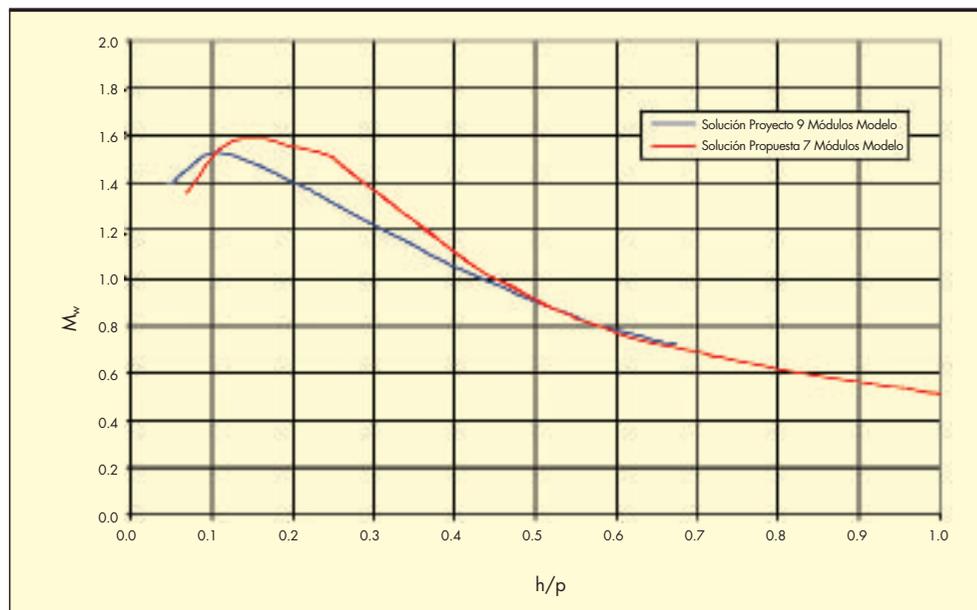


FIGURA 19. Coeficientes de desagüe del laberinto de 9 y 7 módulos obtenidos en modelo reducido.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA



FIGURA 20. Modelo reducido del laberinto de 7 módulos.

La primera de las opciones es permitir el vertido por coronación canalizando el flujo por las laderas de acuerdo con el capítulo 13 "Adaptación y reforma de aliviaderos y desagües" de la Guía Técnica nº 5.

La segunda sería subir la cota de coronación y la tercera rebajar la cota del umbral del vertedero, en ambos casos hasta conseguir que el caudal de la Avenida de Proyecto tenga un resguardo de 1 m y se agote dicho resguardo con la Avenida Extrema. Para valorar estas dos alternativas en el modelo físico se recreó la presa para obtener la curva de capacidad del aliviadero sin permitir el vertido por coronación.

La cota de coronación para tener un resguardo de 1 m con la Avenida de Proyecto es la 139,50, esto supone un recrecimiento de 1,5 m por encima de la coronación actual. Para esa cota el caudal máximo que desagua el aliviadero es menor de 3.500 m³/s, inferior a la Avenida Extrema fijada en 5.444 m³/s.

Para conseguir desaguar la Avenida Extrema agotando el resguardo, sería necesario bajar considerablemente la cota del umbral del vertedero y se tendrían láminas de agua superiores a los 10 m. Estos valores están fuera del rango de funcionamiento del laberinto donde su funcionamiento es similar a un vertedero en pared gruesa de escasa longitud. Al tratarse de un embalse de poca capacidad, a la que hay que descontar el volumen de fangos, parece poco atractiva esta tercera opción.

Una combinación de las dos primeras alternativas quizá fuese la solución a este problema, recreciendo la presa hasta tener 1 m de resguardo para la Avenida de Proyecto, y permitiendo el vertido por coronación para avenidas superiores.

Este es un problema que se planteará en el futuro en numerosas ocasiones al intentar adecuar las antiguas presas existentes a la normativa actual.

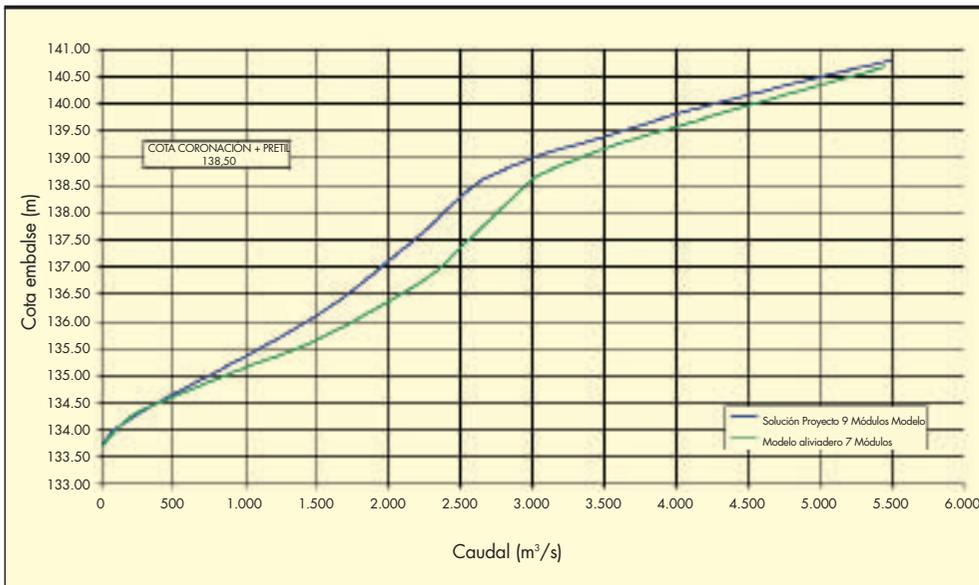


FIGURA 21. Curvas de capacidad experimentales 7 y 9 módulos.

ALIVIADEROS EN LABERINTO. PRESA DE MARÍA CRISTINA

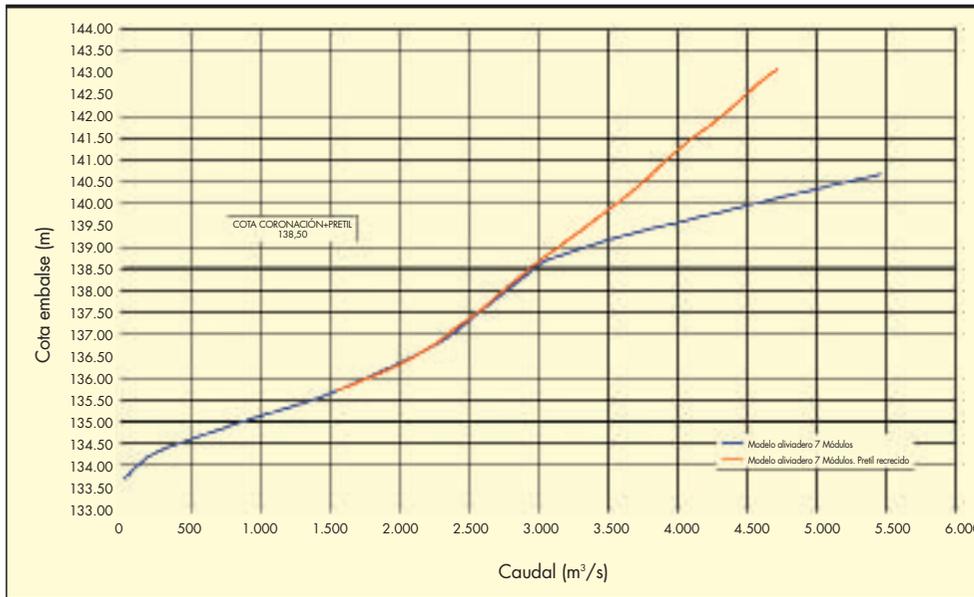


FIGURA 22. Curva de capacidad experimental 7 módulos con recrecimiento.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Performance and design of labyrinth weirs November 1970 N. Hay and G. Taylor Journal of the hydraulics division, Proceedings ASCE.
2. Discharge over polygonal weirs March 1975 H. Indlekofer and G. Rouvé Journal of the hydraulics division, Proceedings ASCE.
3. Descarregadores em laberinto 1983 A.P. Magalhães LNEC (Portugal).
4. Discharge characteristics over labyrinth spillways 1984 F. Lux III Journal of the hydraulics division, Proceedings ASCE.
5. Hydraulic design and application of labyrinth spillways January 1984 L. Hinchliff and L. Houston USCOLD Lecture dam safety and rehabilitation.
6. Design and construction of labyrinth spillways 1985 F. Lux III and D.L. Hinchliff Quinzisième Congrès des Grands Barrages, Lausanne.
7. Boardman labyrinth crest 1985 J.J. Cassidy, C.A. Gardner, R. T. Peacock Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(3), 398-416.
8. Design of labyrinth spillways March 1995 J.P.Tullis, N.Amanian, D. Waldron Journal of Hydraulic Engineering, Vol 121, No 3.
9. Modelling the performance of labyrinth spillways 1996 D. Yildiz and E. Üzüzec Hydropower and Dams, Issue three, 1996.
10. Estudio en modelo reducido del prediseño del aliviadero de vertido lateral con vertedero tipo laberinto. Presa de Biscarrués Febrero de 2001 V. Elviro García. CEH Informe elaborado con motivo del Concurso de Proyecto y Obra de la presa de Biscarrués.
11. Labyrinth Spillways have a promising future 2001 P. Blanc, F. Lemperiere Hydropower and Dams, Issue four, 2001.
12. Labyrinth spillways: The experience of the BUREAU of Reclamation 2005 Kathleen Frizell 1ª Jornada de Aliviaderos no Convencionales organizada por SEPREM, noviembre de 2004.