

Estudio de remodelación del cuenco amortiguador de la Presa de Entrepeñas

Remodeling study of stilling basin in Entrepeñas Dam

Enrique Moreno Calle¹, M^a Estrella Alonso Tejedor², M^a Dolores Cordero Page³, Víctor Elviro García^{3*} y Tamara Ramos del Rosario³

Palabras clave

aliviadero;
desagües de fondo;
cuenco de resalto;

Sumario

La Presa de Entrepeñas, de 1956, se encuentra situada en el río Tajo, en la provincia de Guadalajara. Cuenta con un aliviadero de 5 vanos con compuertas y tres desagües de fondo situados sobre el propio cuerpo de presa que desaguan al cuenco.

Para la redacción de las Normas de Explotación se realizaron comprobaciones teóricas del cuenco. Las dimensiones parecían suficientes para el caudal desaguado por los desagües de fondo pero no con el vertido por el aliviadero.

Se ha construido un modelo reducido en el que se ha observado el funcionamiento y la disipación de energía en el cuenco. Se ha vaciado y tomado datos sobre su geometría real y su estado actual. Se han analizado sus dimensiones en relación con los cuencos teóricos y se ha visto la necesidad de realizar modificaciones, principalmente en la salida por los desagües, para que realice adecuadamente su misión optimizando su diseño dentro de los condicionantes existentes.

Los ensayos en modelo reducido han permitido dar pautas para la explotación de los órganos de evacuación de la presa, así como probar y decidir la remodelación del cuenco que es más conveniente y redactar el proyecto correspondiente.

Keywords

spillway;
bottom outlet;
stilling basin;

Abstract

Entrepeñas Dam, from 1956, is located on the Tagus River, in the Guadalajara province. The Dam has a spillway with 5 spans with gates and three bottom outlets placed on the dam body which drain into the stilling basin.

Theoretical checks of the stilling basin were performed for writing the Operation Rules. The dimensions appeared to be sufficient for draining the flow by the bottom outlets but not for the discharge through the spillway.

A dam reduced model has been built, in which the operation and energy dissipation in the stilling basin is observed. The stilling basin has been emptied and taken its data both actual geometry and current status. The stilling basin size in relation to the theoretical stilling basins has been analyzed and the need to make changes has been proved, mainly with the output drains, in order to properly fulfill its mission and optimize their design within existing constraints.

The scale model tests have allowed us to provide guidelines of the operation for the evacuation organs of the dam, and also they have tested and decided the most convenient remodeling way of the stilling basin, for writing the draft.

1. INTRODUCCIÓN

La presa de Entrepeñas cuenta con un cuenco amortiguador al pie de la misma que recibe los vertidos del aliviadero y de los desagües de fondo, donde se disipa la energía con que éstos llegan, antes de reincorporarse al cauce.

El caudal que habitualmente se sirve desde este embalse se turbinan en la central de pie de presa y, por tanto, se reincorpora al cauce aguas abajo del cuenco amortiguador. En escasas ocasiones el aliviadero ha llegado a verter pequeños caudales y en situaciones extraordinarias, con niveles de embalse reducidos, se han abierto los desagües de fondo. Por tanto, no se tiene constancia de que el cuenco

amortiguador funcione adecuadamente cuando estos órganos de desagüe trabajen a plena capacidad.

Con motivo de la 1^a Actualización del Documento XYZT de la presa, redactada en 2002, se realizó la comprobación hidráulica del mencionado cuenco mediante una serie de cálculos teóricos con los que conocer, de forma aproximada, el comportamiento del vertido por el aliviadero y por los desagües de fondo. Los cálculos efectuados ponen de manifiesto que, aunque las dimensiones del cuenco amortiguador parecen suficientes para una correcta disipación de la energía del caudal desaguado por los desagües de fondo, resultan insuficientes para un adecuado funcionamiento del mismo ante un vertido por el aliviadero.

La longitud del resalto calculada, según el *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators* del Bureau of Reclamation, para el vertido por el aliviadero es superior a la longitud del cuenco. El resalto donde se pierde la energía del caudal vertido se produce fuera de la estructura del

* Corresponding author: victor.elviro@cedex.es

¹ Confederación Hidrográfica del Tajo, Guadalajara, España.

² SERS, Consultores en ingeniería y Arquitectura, S.A., Madrid, España.

³ Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Madrid, España.



Figura 1. Presa de Entrepeñas. Aliviadero y cuenco amortiguador. Fuente: Documento XYZT.

cuenco existente, lo que conlleva un peligro de erosionabilidad de esta zona, que puede ocasionar un problema por descalzamiento del pie de aguas abajo.

Se propone por tanto, realizar un ensayo en modelo reducido en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX con objeto de observar el funcionamiento y la disipación de energía en el cuenco amortiguador, analizando si sus dimensiones son las adecuadas tanto para el vertido por el aliviadero como por los desagües de fondo y efectuar, en su caso, las modificaciones necesarias para que cumpla adecuadamente su misión, optimizando su diseño dentro de los condicionantes existentes. Es éste un proceso interactivo que requiere tanto del conocimiento experto de los técnicos del CEDEX, como del criterio de los responsables de la presa, que marcan las necesidades y situaciones a resolver.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA DE ENTREPEÑAS

La presa de Entrepeñas se encuentra ubicada en el río Tajo, en los términos municipales de Auñón y Sacedón en la provincia de Guadalajara. La cuenca vertiente a la misma tiene una superficie de 3.825 km² y una aportación media anual de 638 hm³, contando el embalse con una capacidad de 802,56 hm³ a la cota correspondiente al nivel máximo normal. Junto con la Presa de Buendía constituye un sistema de regulación entre los ríos Tajo y Guadiela. Considerando el conjunto de los dos embalses, comunicados por un túnel, se trata de uno de los aprovechamientos hidráulicos más importantes de España, además de ser la principal fuente de aportaciones al trasvase Tajo-Segura.

La presa fue proyectada originalmente en 1936 y el primer proyecto modificado fue realizado en 1941 por el ingeniero D. Benito Jiménez Aparicio. Las obras comenzaron en 1946, sufriendo el proyecto dos nuevas modificaciones en 1951 y 1954 y prolongándose los trabajos de acabado hasta enero de 1956, momento en que se inicia la explotación de la presa. Desde entonces se han llevado a cabo diversos trabajos de mantenimiento, como

la reperforación de drenes, la impermeabilización del cimiento o la reparación de las compuertas de los desagües de fondo.

La presa de Entrepeñas es de tipo gravedad-vertedero, con taludes 1H/20V aguas arriba y 0,76H:1V aguas abajo, una longitud de coronación de 315 m y una altura máxima sobre cimientos de 87,35 m, siendo la cota de coronación la 723,20.

El Nivel de Avenida Extraordinaria (N.A.E.) se define a la cota 720,50 y el correspondiente a la Avenida de Proyecto (N.A.P.) se fija a la cota 718,35. Por las limitaciones existentes por el mecanismo de accionamiento de las compuertas, se adopta como Nivel Máximo Normal (N.M.N.) la cota 718,00 en los periodos de primavera, verano y otoño, y la cota 712,10 para los meses de invierno.

Entrepeñas cuenta con un aliviadero con compuertas vagón con doble tablero, ubicado sobre el cuerpo de presa, formado por 5 vanos de 10,76 m bajo la coronación de la presa, con pilas entre vanos de 1,80 m de espesor, de lo que resulta un ancho total de 61,00 m y una luz libre de 53,80 m.

La cota del umbral del vertedero es la 715,00 y el perfil de vertido es de tipo Creager para una lámina de agua de 5,50 m (correspondiente a la avenida extrema) hasta la cota 708,29, inicio de la rápida. Los cajeros que acompañan la rápida tienen una altura de 4,74 m en la parte superior y 2,87 m en la inferior, donde comienzan los cajeros del cuenco.

Con una capacidad de 1.536 m³/s a la cota 720,50 (N.A.E.), permite laminar una avenida prevista con un caudal máximo instantáneo de 2.500 m³/s. El caudal desaguado a la cota 718,35 (N.A.P.) es de 683,52 m³/s.

El cuenco amortiguador se inicia a la cota 645,91 con una curva tangente a la rápida, de 12,185 m de radio y 8,24 m de longitud, a la que le sigue una recta de 7 m de largo con pendiente 4H:1V, otra curva de radio 25,56 m y longitud 6,26 m, una recta horizontal a la cota 639,00 de 16,01 m y finaliza en un diente a la cota 641,00.

Aguas abajo del cuenco de hormigón existe una estructura de cierre frontal, realizada como obra de emergencia y

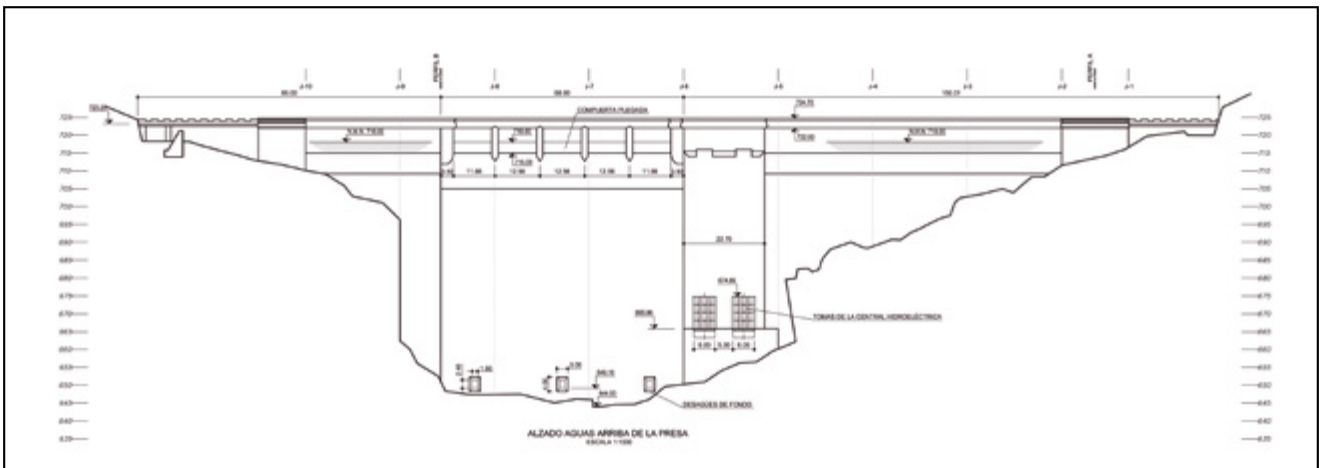


Figura 2. Presa de Entrepeñas. Alzado aguas arriba. Fuente: Documento XYZT.

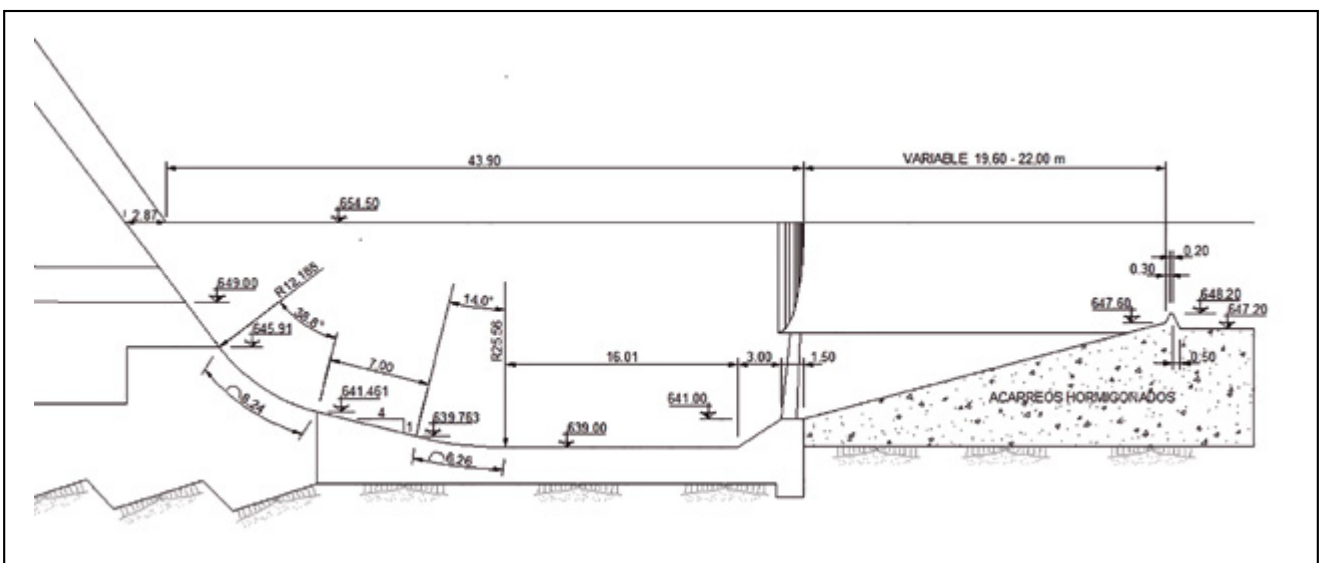


Figura 3. Presa de Entrepeñas. Sección del cuenco amortiguador.



Figura 4. Presa de Entrepeñas. Cierre frontal del cuenco.

de la que se desconoce su proceso de ejecución. Se observa que fue construida con material de acarreo someramente hormigonado, de longitud variable entre 19,60 y 22,00 m hasta la cota 647,60. Esta estructura termina con un murete de 0,60 m de altura a la cota 648,20.

El cajero de la margen derecha tiene dos alturas, 655,50 en la zona de la central hidroeléctrica y 651,00 aguas abajo de ésta. El de la margen izquierda, a cota 654,50, es vertical en la zona del cuenco y con talud variable en la zona de acarreo hormigonados.

El desagüe de fondo de la presa de Entrepeñas consta de tres conductos de sección rectangular de 1,50 m de ancho por 2,40 m de alto, dispuestos en tres bloques diferentes en el cuerpo del vertedero, con una separación entre ejes de 24,50 m y con salida a la cota 649,00, proporcionando un caudal de 96,35 m³/s cada uno cuando la cota del embalse es 718,00, correspondiente al máximo nivel normal, siendo así la capacidad total de 289,05 m³/s.

Cada conducto está equipado con dos compuertas Bureau y blindajes metálicos en el tramo desde el abocinamiento de entrada hasta las mencionadas compuertas.

La presa de Entrepeñas también cuenta con dos tomas de agua que alimentan sendas turbinas en la central hidroeléctrica a pie de presa existente, con una capacidad de 33 m³/s cada una de ellas a máximo nivel normal de embalse (718,00). La restitución al cauce de los caudales turbinados se produce mediante túnel.

Fuera del cuerpo de presa, existe una toma de agua para riego, actualmente en desuso, y dos instalaciones de bombeo que, con el fin de abastecer de agua las dos márgenes de la presa, elevan el agua desde una toma colocada en el paramento de aguas arriba de la presa, pudiendo suministrar un caudal de 1.000 litros/minuto cada una.

3. MODELO FÍSICO DE LA PRESA DE ENTREPEÑAS

Para realizar los estudios propuestos sobre la presa de Entrepeñas, se ha realizado, en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, un modelo físico a escala 1/50 del aliviadero, los desagües de fondo y el cuenco amortiguador. En el modelo se ha reproducido también una zona del embalse y de río aguas abajo.

3.1. Trabajos previos a la construcción del modelo

Para la construcción del modelo, además de analizar la documentación existente en las oficinas de la Confederación Hidrográfica del Tajo en Guadalajara (1ª Actualización del documento XYZT y sus planos, Normas de explotación y cartografía asociada y Plan de emergencia), se consultaron en el Archivo técnico de la presa de Entrepeñas documentos correspondientes al proyecto de construcción, sus posteriores modificaciones y a las distintas liquidaciones de la obra.

Se realizaron trabajos de topografía en campo con objeto de confirmar la ubicación y las dimensiones de los diferentes elementos a representar en el modelo y la topografía circundante. Para posibilitar el levantamiento topográfico del cuenco amortiguador y la estructura de cierre aguas abajo del mismo (piezas clave en el modelo a ensayar), el

equipo de mantenimiento de la presa procedió al vaciado del cuenco amortiguador de la misma.

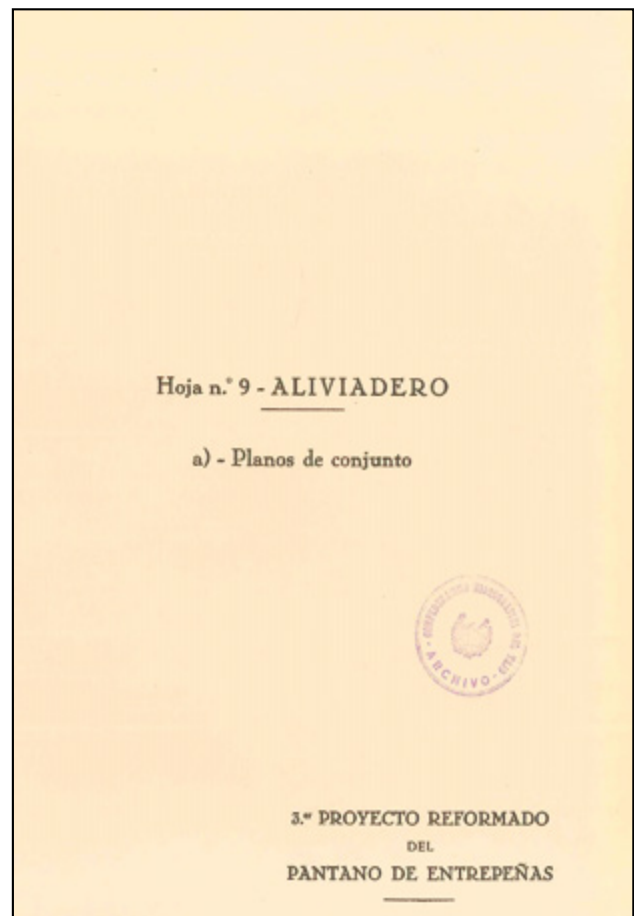


Figura 5. 3er Proyecto reformado del pantano de Entrepeñas.

3.2. Ensayos en modelo físico de la situación actual

Se realizaron ensayos de vertido por aliviadero, sin compuertas, para distintos caudales, hasta alcanzar el correspondiente a la avenida extraordinaria.

Para el caudal relativo a la avenida de proyecto (683,52 m³/s), se aprecia un funcionamiento disimétrico del cuenco amortiguador, el flujo sobrepasa ampliamente el muro inferior de la margen derecha y en la margen izquierda el nivel alcanza el camino de acceso a la presa a la salida del cuenco.

Elevando el caudal hasta los 1.000 m³/s, se puede apreciar que el flujo sobrepasa el cajero de la margen izquierda y alcanza el camino de acceso a la central hidroeléctrica por la margen derecha. El cuenco se considera corto para este caudal.

El funcionamiento del modelo con el caudal correspondiente a la avenida extrema (1.536 m³/s) no se considera satisfactorio, el cuenco amortiguador se aprecia insuficiente.

Al evacuar los desagües de fondo el caudal correspondiente a embalse a N.M.N, es decir, 96 m³/s cada uno, el funcionamiento del cuenco amortiguador se aprecia insuficiente. La energía no se pierde en el propio cuenco y se observa como parte del flujo sale del mismo sin tranquilizar.

En ambos casos, al no disponerse de una única curva de gasto del río se ha procedido a fijar los niveles de



Figura 6. Modelo de la presa de Entrepeñas. Situación actual. Vertido por aliviadero de la avenida de proyecto (683,52 m³/s).



Figura 7. Modelo de la presa de Entrepeñas. Situación actual. Desagües de fondo con caudal máximo.

acuerdo con las cuatro curvas analizadas: dos de ellas corresponden a la sección final del cuenco y otras dos a una sección ubicada 461 m aguas abajo, fuera de los límites del modelo. En cada sección una curva corresponde a un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,035 y la otra a 0,070.

3.3. Estudio de soluciones

A la vista de los problemas que se generan en el cuenco, tanto por el vertido por el aliviadero como por el funcionamiento de los desagües de fondo, se han ensayado una serie de modificaciones con objeto de solventar tales problemas, evitando, en la medida de lo posible, invadir el cauce aguas abajo de las infraestructuras actuales.

- Eliminación del material de acarreo hormigonado

Como primer paso, se eliminó la estructura de acarreos hormigonados ubicada aguas abajo del cuenco de hormigón, dando continuidad a éste hasta el murete final y fijando la solera de esta zona a la cota 641m, cota de coronación del diente final del cuenco de hormigón existente.

No se observó mejora en el funcionamiento del cuenco con el vertido por el aliviadero ni por los desagües de fondo, pero de este modo se elimina la posibilidad de que el vertido socave la zona de escollera.

Con el fin de poder observar si la salida del flujo podría ocasionar desplazamientos del árido de aguas abajo del nuevo cuenco, se sustituyó el árido representado en

el modelo por otro de menor tamaño en una longitud de 50 m, no observándose ningún movimiento.

- Colocación de dientes en el cuenco

Con el fin de acortar la longitud del resalto, se han colocado dientes de 2 m de alto por 2 m de ancho en el cuenco original, se ha reducido la cota del murete final en 1 m y aguas abajo de éste se ha eliminado el árido de mayor tamaño, en una longitud equivalente a 25 m de prototipo.

El funcionamiento del cuenco para el vertido por aliviadero del caudal correspondiente a la avenida de proyecto (683,52 m³/s) ha mejorado notablemente, puesto que se ha reducido la longitud de resalto y el flujo sale del cuenco sin agitación, no observándose movimientos en el árido situado aguas abajo. Sin embargo, no se aprecia mejora tan acusada cuando se trata de la avenida extrema (1.536 m³/s).

Cuando entran en funcionamiento los desagües de fondo, no se aprecia ningún efecto de los dientes del fondo del cuenco, puesto que el flujo no impacta contra ellos, sino que desliza sobre la superficie de agua alojada en el cuenco, no desarrollándose totalmente el resalto en su interior.

- Colocación de dientes al final de cuenco

Se han efectuado diversas modificaciones en el modelo intentando reducir la longitud del resalto cuando entran en funcionamiento los desagües de fondo, para ello se han colocado dientes de distintas alturas al final del cuenco original manteniendo el situado al final del mismo.

Para el vertido por aliviadero del caudal correspondiente a la avenida de proyecto (683,52 m³/s) no se aprecia ningún cambio y, aunque para el funcionamiento de los desagües de fondo se nota alguna mejora, no se ha conseguido el efecto buscado, por lo que finalmente se ha desechado esta modificación.

- Variación en la salida de los desagües de fondo

Encaminando los ensayos hacia la reducción de la longitud del resalto producido por el vertido de los desagües de fondo se optó por modificar su salida.

El desagüe derecho se modificó en alzado, inclinándolo su eje en la salida hacia abajo, de modo que el flujo desagüado impactase directamente contra el agua retenida en el cuenco. Se observó una notable mejoría, pero se apreciaron impactos no deseables del chorro contra el cajero del cuenco.

El desagüe izquierdo se modificó tanto en alzado como en planta, inclinándolo su eje en la salida hacia abajo, igual que en el desagüe derecho, y hacia el interior del cuenco. Se apreció en este desagüe un comportamiento mucho mejor que en los otros dos, el derecho con la rectificación únicamente en alzado y el central sin reformar.

A la vista de estos resultados se optó por realizar la modificación tanto en alzado como en planta en los dos desagües laterales y desagüe central, apreciándose una notable mejoría en el funcionamiento del cuenco amortiguador.

- Disposición de escollera hormigonada a la salida del cuenco

A la salida del cuenco se ha dispuesto una zona de escollera hormigonada de 1 m de diámetro en 10 m de longitud y un espesor mínimo de 3 capas con el fin de proteger el cuenco ante una posible entrada de material y de la erosión aguas abajo del umbral terminal.

3.4. Ensayos en modelo físico de la solución propuesta

3.4.1. Definición de la solución propuesta

El nuevo cuenco queda enmarcado dentro de los límites de la obra existente, manteniendo el cuenco amortiguador original y aumentando su longitud al eliminar la estructura de cierre frontal construida aguas abajo. Esta ampliación del cuenco se proyecta en hormigón, con solera horizontal a la cota 641, cota de coronación del diente final del cuenco original, dando continuidad a éste hasta el murete final existente que mantiene su forma y cota original (648,20).

En la solera del cuenco original se han dispuesto dientes de 2 m de ancho y 2 m de alto, con una separación entre ellos también de 2 m.

Aguas abajo del murete final se ha dispuesto un tramo de 10 m de escollera hormigonada de 1 m de diámetro, con el fin de evitar una posible erosión en la zona y la consecuente entrada de material al cuenco amortiguador.

Para evitar la entrada del flujo en la zona de salida de la central hidroeléctrica se ha elevado la segunda parte del cajero derecho hasta la cota 655,50, quedando igualado en altura a la zona del muro de la central hidroeléctrica.

La salida de los desagües de fondo laterales se ha reformado en planta y alzado, inclinándolo su eje hacia abajo y hacia el interior del cuenco. La modificación del desagüe central coincide con la definición de la solera de los desagües laterales pero varía la definición de la clave y los laterales. Finalmente termina con una sección de 1,51 m de altura y 2,30 m de ancho en la salida.

3.4.2. Ensayos sobre la solución propuesta

Se realizaron de nuevo ensayos de vertido por aliviadero, sin compuertas, para distintos caudales, hasta alcanzar el correspondiente a la avenida extraordinaria.

Para el caudal relativo a la avenida de proyecto (683,52 m³/s), se aprecia una notable mejoría respecto al funcionamiento actual. El efecto de los dientes en la solera del cuenco hace disminuir la longitud del resalto y la elevación del cajero inferior de la margen derecha elimina en gran medida el funcionamiento disimétrico.

El funcionamiento del cuenco para el caudal de 1.000 m³/s es satisfactorio. Se percibe claramente la influencia de los dientes disminuyendo de forma considerable la longitud del resalto.

El funcionamiento del modelo con el caudal correspondiente a la avenida extrema (1.536 m³/s) no se considera del todo satisfactorio, ya que a pesar de los dientes el cuenco sigue resultando corto.

En el funcionamiento del cuenco cuando se abren los desagües de fondo, considerando el embalse a N.M.N. y,



Figura 8. Modelo de la presa de Entrepeñas. Solución propuesta. Vertido por aliviadero de la avenida de proyecto ($683,52 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figura 9. Modelo de la presa de Entrepeñas. Solución propuesta. Desagües de fondo con caudal correspondiente a $96 \text{ m}^3/\text{s}$ por desagüe.

por tanto, un caudal desaguado por cada conducto de $96 \text{ m}^3/\text{s}$, se observa una mejora significativa en relación con la situación actual.

El funcionamiento del cuenco es satisfactorio tanto para la apertura unitaria de cada uno de los desagües como para la apertura conjunta de los tres desagües al mismo tiempo. Cuando son sólo dos los desagües de fondo abiertos, se puede apreciar que el funcionamiento del cuenco es mejor si se abren los dos laterales.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos en modelo reducido realizados en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX han permitido definir la mejor solución a adoptar sobre los elementos de desagüe de la presa de Entrepeñas para asegurar el correcto

funcionamiento de su cuenco amortiguador y, por tanto, la estabilidad de la estructura.

A partir de la definición de la solución propuesta, se redacta el proyecto de construcción necesario para ejecutar sobre la propia presa de Entrepeñas las modificaciones descritas anteriormente sobre el cuenco amortiguador y los desagües de fondo. Se incluye además en este proyecto:

- Los dientes a disponer en el cuenco que se definen según las especificaciones generales del Bureau of Reclamation.
- El murete final del cuenco, que en el modelo ha mantenido su forma original, y se define como una recta paralela a la presa a una distancia de 22 m, correspondiente al punto del murete más alejado de ésta.

- Ampliación del cajero de la margen izquierda y su cimentación en la zona de ampliación del cuenco, actualmente de mampostería y con talud variable.
- Blindaje de la salida de los desagües de fondo que proteja en especial la transición entre el conducto existe y el tramo de nueva construcción

El estudio mediante ensayo en modelo reducido ha permitido ajustar con detalle el análisis realizado a la complejidad de la realidad, difícil de representar mediante técnicas de modelización numérica. Es destacable el efecto del chorro del desagüe de fondo deslizando sobre la superficie

de agua alojada en el cuenco o los grandes remolinos de eje vertical que se producen en el cuenco, que representan fenómenos inestables difíciles de calcular por métodos numéricos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido presentado como comunicación oral en la “X Jornadas Españolas de Presas” organizadas por el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), celebradas del 18 al 20 de febrero de 2015 en Sevilla.