

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

ALIVIADERO CON BLOQUES EN FORMA DE CUÑA SOBRE LA PRESA DE BARRIGA (BURGOS)

**Rafael Morán¹, Miguel Ángel Toledo², José Luis Sevilla³, Jesús
García⁴.**

RESUMEN: La presa de Barriga (Burgos), de materiales sueltos de escollera con impermeabilización externa, constituye una referencia singular debido a su aliviadero, situado sobre el propio cuerpo de la presa, y por la tipología de la protección utilizada en su canal de descarga: bloques prefabricados en forma de cuña. El proyecto y construcción de esta obra ha involucrado investigaciones a nivel internacional (España, Portugal y Estados Unidos) durante casi dos años, con la intervención de equipos de experiencia contrastada en el análisis y aplicación de esta tecnología. El artículo resume las características más importantes de la obra, incluyendo los aspectos de diseño del bloque, su puesta en obra y el diseño de las distintas partes que componen el aliviadero. Finalmente, se analiza el campo de aplicación de la tecnología y se realiza una propuesta de las investigaciones a realizar en el futuro.

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de las Obras.

² Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. UPM.

³ Ingeniero Agrónomo. Dirección General de Infraestructuras y Diversidad Rural. JCYL.

⁴ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Constructora Hispánica, S.A.

1. EL PROYECTO DE LA PRESA DE BARRIGA

La presa de Barriga se enmarca dentro de un proyecto más amplio, financiado por la Dirección General de Infraestructuras y Diversidad Rural de la Consejería de Agricultura y Ganadería de la Junta de Castilla y León, cuyo objetivo es la puesta en regadío de unas 1000 Ha en la comarca del Valle de Losa, al Norte de Burgos. Además del embalse generado por la presa, que recoge las aportaciones de la cuenca (con una superficie de unos 20 km²) de los arroyos Horcón y Nabón, el proyecto incluye regulaciones adicionales mediante las balsas de Teza y Mambliga interconectadas mediante un sistema de conducciones, captaciones y bombeos. La presa, de escollera impermeabilizada con lámina en su paramento de aguas arriba, tiene una altura máxima de 17 m y genera un embalse de 0,5 hm³.

La cerrada y el vaso están formados por unas calizas tableadas muy karstificadas, de elevada permeabilidad, que obligan a impermeabilizar por completo la superficie inundada por el embalse. Desde el punto de vista hidrológico la cuenca se comporta como una torrentera, con caudales escasos o nulos en periodos de descarga del acuífero y aportaciones bruscas en invierno, cuando el acuífero está recargado, especialmente intensas cuando se combinan con episodios de deshielo. El caudal en avenida de proyecto es de 161 m³/s y de 229 m³/s en avenida extrema.



Foto 1. Presa de Barriga. (Autor: José Manuel Ruiz. Mayo 2008)

Tras el estudio de soluciones del aliviadero de la presa, que incluía un aliviadero convencional de hormigón armado por margen derecha, se consideró más ventajosa la alternativa de aliviadero por encima del cuerpo de presa, mediante una protección con bloques en forma de cuña de hormigón prefabricado. Esta solución fue ensayada en modelo reducido en los laboratorios de la

Colorado State *University* (Fort Collins, EE.UU.) y en el *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC)* (Lisboa, Portugal). En el primero de ellos, casi a escala real, se estudiaba el comportamiento singular del bloque, mientras que el segundo, a escala 1:25, sirvió para analizar el diseño de la embocadura y restitución del agua al cauce.

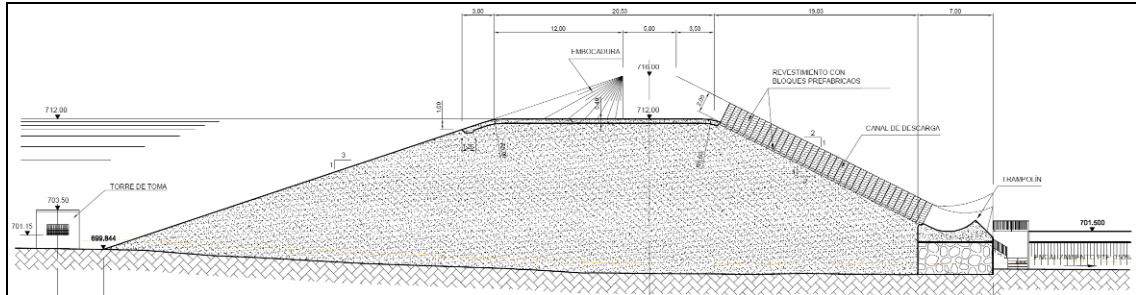


Fig. 1. Sección tipo de la presa de Barriga por el aliviadero

Hasta la fecha, el aliviadero ha entrado en funcionamiento en dos ocasiones, con caudales unitarios máximos de $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$. La dirección de las obras y su diseño definitivo fueron realizados por PYPESA, S.L. (grupo ALATEC), con la asesoría de la Universidad Politécnica de Madrid, y la construcción por CONSTRUCTORA HISPÁNICA S.A.

2. ANTECEDENTES DE ALIVIADEROS CON BLOQUES EN FORMA DE CUÑA

El fundamento de la tecnología de protección con aliviaderos en forma de cuña se basa en el desarrollo de presiones negativas en los aliviaderos escalonados sometidos a flujo rasante, inmediatamente aguas abajo de la contrahuella. Los orificios situados en la parte inferior de la contrahuella transmiten la presión negativa al contacto entre el bloque y la base de apoyo, originando una succión estabilizadora entre ambos. Los ensayos realizados hasta la fecha demuestran la estabilidad hidráulica de la solución.

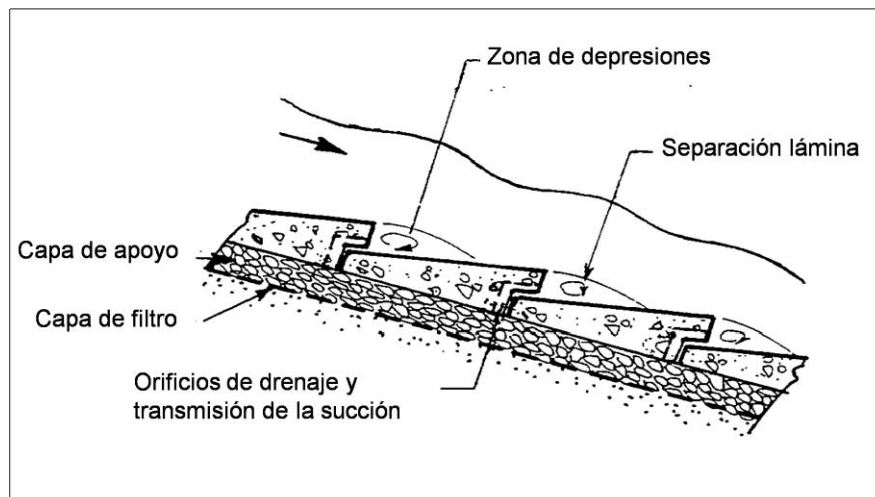


Fig. 2. Croquis de funcionamiento de los bloques en forma de cuña. (Fuente: C. Matías. 2004)

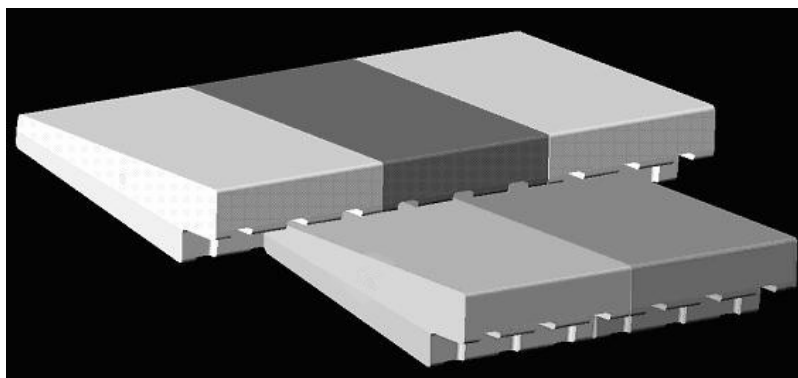


Fig. 3. Disposición de bloques tipo *Armorwedge*™ (Fuente: K. Frizell)

La idea original de esta tecnología y los primeros trabajos con este tipo de protección comenzaron en los años 70 en el Instituto de Ingeniería Civil de Moscú (Rusia) de la mano del profesor Yuri Pravdivets. Es en este país donde se construyen los primeros modelos a escala (1:100, 1:50 y 1:6) y diversos prototipos como el construido sobre el río Dniéper (Pravdivets, Slissky 1981), con condiciones de funcionamiento extremas, con cargas hidráulicas de 35 m y caudales unitarios de 60 m²/s.

El profesor R. Baker, de la Universidad de Salford (Reino Unido), continúa el desarrollo de la tecnología con nuevos estudios (Baker, Gardiner 1995) que culminan con la construcción de un prototipo en la presa de *Brushes Clough (Greater Manchester)* (Baker, Gardiner 1994) y la redacción de un manual de diseño publicado por el *Construction Industry Research and Information Association (CIRIA)* (Hewlett et al. 1997). El caudal unitario máximo ensayado en la presa de *Brushes Clough* fue 2,2 m²/s circulando sobre un talud de 3.



Foto 2. Aliviadero de la presa de *Brushes Clough*. (Autor: Ch. Wild. Marzo 2007)

El *U.S Bureau of Reclamation* ha realizado ensayos en modelo físico en el canal de ensayo que dispone la *Colorado State University* en Fort Collins, con un talud de 2 y caudales unitarios máximos por encima de los 4 m²/s. De estas experiencias ha surgido una patente de bloque para EE.UU. denominada

Armorwedge™, basada en esta misma tecnología. La patente está en poder de la empresa *Armortec, Inc.*

El *Instituto Superior Técnico de Lisboa* junto al *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil* (Portugal) mantienen actualmente abierta una línea de investigación sobre este tipo de tecnología.

Las referencias de instalaciones en prototipo recogidas en el manual de diseño de *CIRIA*, todas ellas previas a la construcción de la presa de Barriga, son: Bolshhevik, Klinbeldin, Maslovo, Sosnovski, Central Hidroeléctrica en el Dniéper, Dneister, Kolyma, Transbaikal, Jelyevski, en Rusia; Jiangshe Wanan, en China; Wadi Sahalnawt, en Omán y Brushes Clough en Reino Unido.

En España se dispone de referencias de aliviaderos sobre presas de materiales sueltos, si bien la protección ha sido realizada utilizando otras técnicas, como pueden ser la presa del Molino de la Hoz o la presa de Llodio, ambas con canal de descarga formado mediante losas convencionales de hormigón armado.

3. EL BLOQUE

El diseño y fabricación del bloque fue realizado durante la construcción de las obras. Inicialmente se partió del bloque estándar tipo *Armorwedge™* que fue el ensayado (Thornton, Robeson, M.D., Varyu, D.R. 2006) en modelo físico en la *Colorado State University* (en adelante *CSU*) y, por lo tanto, el diseño preliminar a partir del cual se realizaron las modificaciones que dieron origen al bloque utilizado en la presa de Barriga (Armortec Erosion Control Solutions 2006). Las diferencias principales entre ambos se presentan en la Tabla 1.

	<i>Armorwedge™</i>	Bloque Barriga
Dimensiones máximas	45,7 x 30,4 x 13,0.	73,0 x 50,0 x 20,0.
Masa	22,7 Kg	111,0 Kg
Ranuras de aireación	3 de 3,8 x 1,3 cm ²	3 de 5,0 x 2,0 cm ²
Hormigón	HM20 en vía seca	HM50. Resistencia a tracción 9,5 N/mm ² . Vía húmeda
Orificio transversal.	No	Sí. Ø 22 mm.
Contornos laterales	Superficies laterales verticales	Superficies laterales convergentes para el desmolde

Tabla 1. Diferencias entre el bloque *Armorwedge™* y el de la presa de Barriga

Las modificaciones realizadas tenían como objetivo principal mejorar la seguridad global de la presa. La justificación técnica del cambio en las dimensiones de la pieza se basó en el factor de escala (1,6) entre los calados de proyecto y los que se pudieron llegar a ensayar en el canal de *CSU* (Frizell 2007). Además, estas dimensiones mejoraban la vulnerabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo y la seguridad frente al vandalismo. En el ensayo de *CSU* se realizó

una medida de la fuerza necesaria (entre 200 kp y 1000 kp, para el bloque *Armorwedge™* de 22,7 kp de peso) para extraer un bloque de su ubicación una vez colocado. La mejora de la calidad del hormigón permite aumentar la resistencia al impacto, importante para soportar posibles golpes de cuerpos flotantes.

El orificio interno, transversal al bloque, permite incluir en su interior un cable para solidarizar el bloque con los de su misma fila, dificultando su posible extracción por causas imprevistas. Además resulta muy útil para el transporte y colocación del bloque. La convergencia de las caras laterales opuestas y el remate redondeado de las aristas se adoptaron para facilitar el desmolde de las piezas y la rotura de los bordes en arista viva.

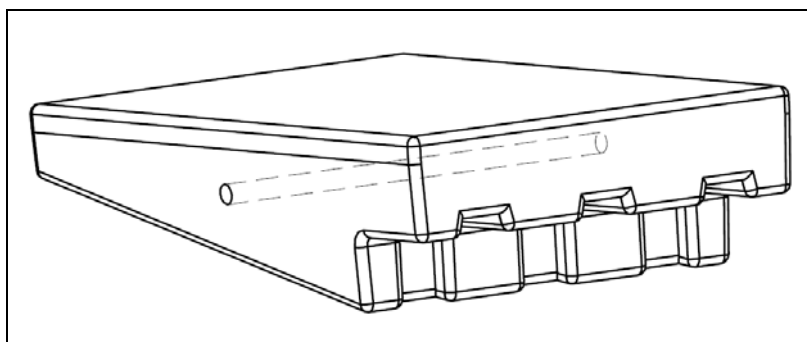


Fig. 4. Vista 3D del bloque del aliviadero de Barriga. (Fuente: Armortec, Inc.)

4. LA EMBOCADURA

La embocadura del aliviadero tiene unas características particulares que ha motivado su ensayo en modelo a escala reducida en el *LNEC*. Las formas definitivas de las transiciones fueron diseñadas en base a tanteos de diferentes geometrías, sobre el propio modelo (LNEC 2006). Se pudo comprobar la gran diferencia entre el comportamiento de la solución sin abocinamiento y la finalmente adoptada, reduciendo las sobreelevaciones de la lámina, las ondas de choque propagadas hacia aguas abajo y aumentando la capacidad de desagüe del aliviadero. El modelo también sirvió para confirmar el diseño de la salida hacia el canal de descarga, con una correcta orientación del caudal.

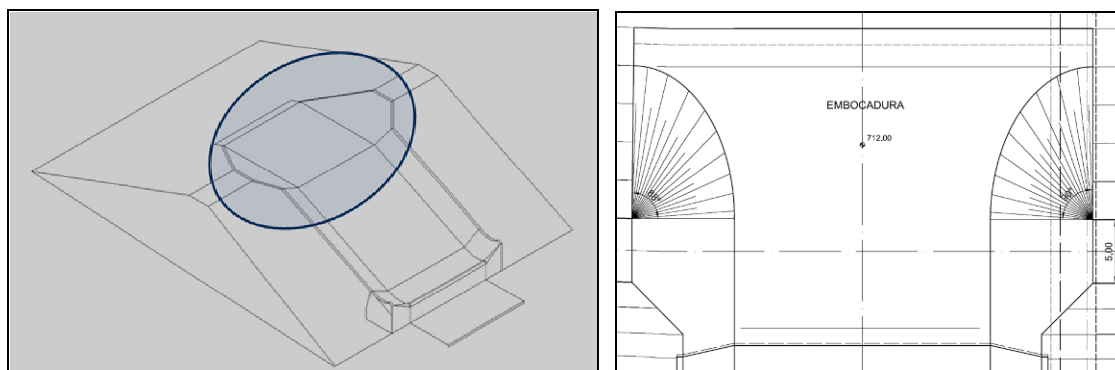


Fig. 5. Embocadura del aliviadero. Croquis 3D y vista en planta

En planta, su geometría se define por un abocinamiento elíptico que enlaza con tramo recto del canal de alimentación de sección trapezoidal. La anchura de

la entrada, medida sobre la losa, pasa de 35,8 m a 20 m. La losa inferior es horizontal y los taludes laterales de la sección trapecial tienen un valor de 2. El conjunto de la embocadura hasta el inicio del canal de descarga se construyó en hormigón armado.

5. EL CANAL DE DESCARGA

El canal de descarga, de sección trapecial, de 20 m de anchura en el fondo, está formado por las filas de bloques en forma de cuña. El fondo del canal es paralelo al talud aguas abajo de la presa (Fig. 1), y su altura es de 2 m, medidos hacia el interior del espaldón. Los taludes laterales que delimitan la sección transversal también se protegen con bloques y tienen un valor de 2.

La disposición de los bloques entre filas sucesivas se realiza de tal forma que no coincidan las juntas correspondientes a hileras consecutivas (Fig. 3) para disminuir las filtraciones en estos planos. Para ello se utilizan *medios* bloques en los extremos de filas alternas (Fig. 7). Los puntos singulares que forman las uniones entre las distintas zonas de protección se corresponden con la unión entre la solera y los taludes del canal de descarga; la embocadura y el canal de descarga (en la parte superior del canal), y el canal de descarga y el trampolín (en la parte inferior del canal).

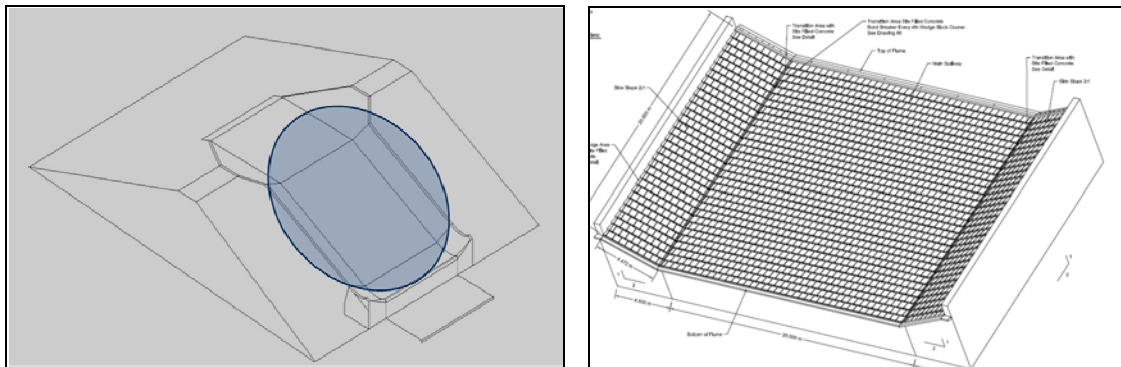


Fig. 6. Vista del canal de descarga y de la disposición general de los bloques.

Este aspecto fue objeto de análisis durante la fase de diseño y tras el estudio de referencias anteriores y su discusión por parte del equipo de proyecto se decidió optar por las siguientes soluciones:

1. Unión entre solera y taludes. Se diseñó mediante un cordón de hormigón armado con juntas cada 3 m, dando continuidad al escalonado de ambos planos (Fig. 7).
2. Unión entre embocadura y canal de descarga. El objetivo era que la fila superior de bloques quedara fijada en su extremo superior por la losa de hormigón armado, iniciando desde este punto el escalonado y buscando la orientación adecuada en la salida para evitar despegues de la lámina (Fig. 7) .

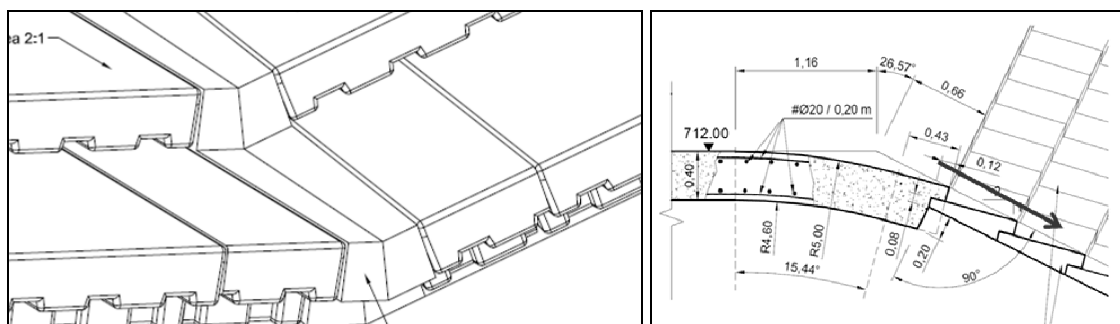


Fig. 7. Uniones entre solera y taludes y entre embocadura y canal de descarga.

3. Unión entre canal de descarga y trampolín. La fila inferior de bloques queda apoyada sobre el trampolín de lanzamiento que restituye los caudales al río. Para su ejecución se dejó una hendidura en la zona de encuentro del trampolín donde, una vez nivelada, se recibió la fila de bloques con mortero de cemento (Fig. 7). Una vez colocada esta primera fila se disponen sucesivamente el resto, de abajo a arriba.

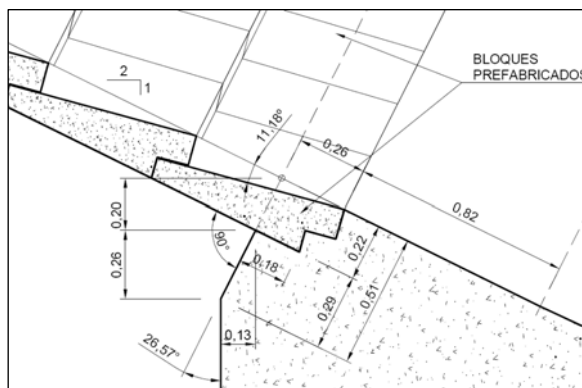


Fig. 8. Unión canal de descarga-trampolín

Los bloques se apoyan sobre una capa de material granular que debe cumplir varias funciones: regularización para un correcto apoyo del bloque, drenaje del caudal filtrado por las juntas entre bloques, filtro del material del cuerpo de presa para evitar la migración de partículas a causa de la succión. A su vez, el material del cuerpo de presa debe ser filtro del material de apoyo de los bloques. Si no es así debería disponerse una transición entre ambos.

6. RESTITUCIÓN DEL AGUA AL CAUCE

La restitución del agua al cauce se realiza mediante un trampolín de lanzamiento. El trampolín, cuyo diseño se basa en la idea original del Catedrático D. Alfonso Álvarez, cumple con otras funciones relacionadas con la estabilización y drenaje del cuerpo de presa. Con esta solución se pretende separar hidráulicamente la restitución al río de los bloques que forman el canal de descarga, de modo que los bloques estén sometidos exclusivamente al flujo de caídas sucesivas o rasante, y en ningún caso a turbulencias originadas en el elemento de restitución del agua al río.

El trampolín se apoya sobre 4 bloques centrales y dos laterales, de hormigón en masa, que dejan unos huecos de drenaje entre ellos rellenos de escollera gruesa (Foto 3). Estos grandes orificios facilitan el drenaje de los caudales que pudieran filtrarse bien a través del aliviadero o bien a causa de una posible fuga por rotura en la impermeabilización del dique. La capacidad de drenaje queda asegurada incluso en situación de avenida extrema, al quedar el nivel

del agua en tal caso por debajo de la cota superior de los orificios. Con ello se evita el peligro de que se desarrollen subpresiones en la capa de apoyo de los bloques. Los bloques laterales tienen la función de orientar la salida del agua hacia el cauce para evitar erosiones en las márgenes del río.



Foto 3. Vista del aliviadero desde aguas abajo

Los ensayos en modelo reducido de lecho móvil realizados en el *LNEC* se plantearon para extraer conclusiones acerca de los daños que podría producir la erosión aguas abajo del trampolín, sobre la orientación y dispersión lateral del manto de agua y el remanso producido por el puente existente aguas abajo de la presa. Como consecuencia del análisis del modelo se decidió añadir al diseño 5 dientes de reparto de caudal. Con ello se consiguió reducir la erosión en casi un 50%. Los dientes se equiparon con unos tubos de aireación para mejorar el funcionamiento hidráulico del lanzamiento. El lanzamiento se produce con caudales por encima de los 12 m³/s, y deja de producirse alrededor de los 10 m³/s cuando los caudales van decreciendo, comprobándose la histeresis del fenómeno.

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE INVESTIGACIONES FUTURAS

El trabajo realizado en el diseño y construcción del aliviadero de la presa de Barriga ha permitido conocer la problemática global de este tipo de tecnología. Ha sido necesario investigar acerca del proceso de fabricación de los bloques, sus materiales, el control de calidad, la puesta en obra, el dimensionamiento de las capas de apoyo de los bloques y las uniones entre las distintas partes del aliviadero.

Como conclusión general se puede hablar de una solución prometedora, que si bien tiene todavía un campo de aplicación necesariamente acotado, permite pronosticar una ampliación del referido campo de aplicación.

El campo de aplicación actual puede ceñirse a la ampliación de la capacidad de desagüe de aliviaderos en presas existentes, para caudales de avenidas extraordinarias; aliviaderos principales de balsas sin aportación natural y aliviaderos principales de presas de tamaño moderado.

La investigación en este tipo de tecnología puede llevar a ampliar aún más este campo de aplicación. Las líneas de investigación que se proponen para ello son:

1. Profundización en el conocimiento del comportamiento hidráulico y dependencia de las formas y dimensiones del bloque.
2. Optimización de formas desde el punto de vista hidráulico.
3. Estudio de nuevos materiales o aditivos del hormigón para mejorar el comportamiento mecánico del bloque.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo queremos agradecer a todas las instituciones involucradas en este proyecto su apoyo y dedicación para que finalmente llegara a buen fin. En especial, se quiere destacar la atención y el exquisito trato recibidos durante las visitas a Estados Unidos y Portugal por parte de Kathleen Frizell, del *U.S. Bureau of Reclamation*; Clayton Fawcett, Fernando Pardo y Robert McDonald, de *Armortec, Inc.*; Christopher Thornton, de *Colorado State University*; Michael Messaros, de *Applied Design Corporation*; Pinto Magalhaes, Lucia Couto, Teresa Viseu y José Falcao de Melo, del *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil* de Lisboa y Antonio Pinheiro, del *Instituto Superior Técnico* de Lisboa.

REFERENCIAS

Armortec Erosion Control Solutions 2006, *Pre-cast concrete units. Barriga dam project. Burgos. Spain.*, Submittal documents edn. (Confidencial)

Baker, R. & Gardiner, K. 1994, "Construction and performance of a wedge block spillway at Brushes Clough reservoir", *Proceedings of the 8th Conference of the British Dam Society on Reservoir Safety and the Environment* Thomas Telford Services Ltd, Exeter, UK, pp. 214.

Baker, R. & Gardiner, K.D. 1995, "Building blocks", *International Water Power and Dam Construction*, vol. 47, no. 11, pp. 2.

Frizell, K.H. 2007, *Armorwedge™ analysis report: block size scaling and bedding information*. (Confidencial)

Hewlett, H., Baker, R., May, R. & Pravdivets, Y.P. 1997, *Design of stepped-block spillways*, Construction Industry Research and Information Association, London, U.K.

LNEC 2006, *Presa de Barriga. Estudo hidráulico em modelo reduzido do descarregador de cheias*, Lisboa, Portugal. (Confidencial)

Pravdivets, Y.P. & Slissky, S.M. 1981, "Passing floodwaters over embankment dams", *International Water Power and Dam Construction*, vol. 33, no. 7, pp. 30-32.

Thornton, C.I. & Robeson, M.D., Varyu, D.R. 2006, *Armorwedge™ Data Report 2006 Testing for Armortec Erosion Control Solutions, Inc.* (Confidencial)