

Avances en la tecnología de aliviaderos de bloques en forma de cuña (WSB)

Caballero, F.J.^{a1}, San Mauro, J.^{b1}, Toledo, M.A.^{a2}, Morán, R.^{a3}, Ponce-Farfán, C.^{a4}, Salazar, F.^{b2}, Alves, R.M.^{a5}, Oliva, R.^{a6}, Ruano, L.^{c1}, Monterde, M.^{c2}, García-Ramos, J.L.^{d1}

^aGrupo de Investigación en Seguridad de Presas y Aliviaderos (SERPA), Universidad Politécnica de Madrid, ^bCentro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), ^cPREHORQUISA, ^dCentro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). E-mails: ^{a1}jcaballero@caminos.upm.es, ^{a2}matoleto@caminos.upm.es, ^{a3}r.moran@upm.es, ^{a4}cristian.ponce@upm.es, ^{a5}ricardo.monteiro@upm.es, ^{b1}jsanmauro@cimne.upc.edu, ^{b2}fsalazar@cimne.upc.edu, ^{c1}luis@prehorquisa.com, ^{c2}calidad@prehorquisa.com, ^{d1}j.l.garcia@cedex.es

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

Entre los años 2011 y 2017, la UPM, CIMNE y la empresa PREHORQUISA, con la colaboración del CEDEX, han pretendido complementar los conocimientos teóricos y prácticos de la tecnología de bloques en forma de cuña (WSB por sus siglas en inglés, wedge-shaped blocks), para hacer de la misma una opción más, a disposición de los profesionales, a considerar en el diseño de un aliviadero de un dique de tierras.

La comunicación pretende ofrecer un resumen de estos estudios, cuyas líneas principales se han centrado en: caracterizar las presiones hidrodinámicas ejercidas sobre el bloque; explicar el patrón de funcionamiento hidráulico de un canal conformado por estos WSB; definir un nuevo bloque, que sea capaz de mejorar el rendimiento de los actuales; dar respuesta a la demanda de cálculo y dimensionamiento de aliviaderos con esta solución concreta de protección de una forma integral, mediante una herramienta numérica; y estudiar la variación del tipo de material a emplear en la fabricación de los bloques, evaluando la utilización en dicho proceso de hormigones no convencionales.

Palabras clave | bloques en forma de cuña; WSB; wedge shaped blocks; sobrevertido; overtopping; caudal filtrado; presiones hidrodinámicas.

INTRODUCCIÓN

Estado del arte

El concepto original de protecciones de presas frente al sobrevertido mediante bloques prefabricados de hormigón en forma de cuña (WSB) colocados sobre el talud de aguas abajo del terraplén de diques de presas o balsas surge de la labor realizada por P.I. Gordienko, a finales de los años sesenta en el Instituto de Ingeniería Civil de Moscú (Hewlett et al., 1997). El profesor Y. Pravdivets tomó los primeros conceptos de Gordienko y continuó la investigación con Grinchuk (1977) y Slissky (1981). La investigación progresó a lo largo de las siguientes décadas con los trabajos de Baker, Hewlett et al., (1994-1997), Clopper (1989), Slovensky (1993), Gastón (1995), Frizell (1997-2007) y Thornton et al., (2006). A partir de estas experiencias fue publicada la primera guía para el diseño de aliviaderos de bloques en forma de cuña (Hewlett et al., 1997) y fue patentado por la empresa Contech, Inc de los E.E.U.U. un WSB probado en la Universidad Estatal de Colorado (Armorwedge™).

En 2007, la presa de Barriga en España (Morán y Toledo, 2014) fue la primera presa en explotación con un aliviadero de servicio de bloques en forma de cuña, usando una variante del modelo ArmorWedge™. Posteriormente se han ejecutado la presa de Bruton (Pether, Marsh y Cartwright, 2009), de Ogden (Booth, 2012) y de Norton Fitzwarren (Morton et al, 2008) en el Reino Unido y también el aliviadero auxiliar de la presa de Friendship Village en Missouri, Estados Unidos (FEMA, 2014).

En los primeros años del nuevo siglo, Relvas y Pinheiro (2008-2011) de la Universidad de Lisboa (Portugal) han profundizado en aspectos teóricos del comportamiento hidráulico de la tecnología WSB.

En los últimos años, en España, el Grupo de Investigación en SEguRidad de Presas y Aliviaderos (SERPA) de la UPM, CIMNE y PREHORQUISA, con el apoyo del CEDEX, están complementando los conocimientos teóricos y prácticos de la tecnología WSB (Caballero et al, 2015 y 2017).

Fundamento de la tecnología

La estabilidad de los bloques en forma de cuña se basa en la presión positiva del agua impactando sobre la cara superior de cada bloque, la superposición, y el desarrollo de presiones negativas en la base del bloque debido a las presiones negativas generadas en la contrahuella del escalón, que bien se transmiten generando succiones en dicha bases (**Figura 1a**) bien provocan el reintegro de caudales al aliviadero reduciendo la subpresión bajo los mismos (**Figura 1b**). Los WSBs han demostrado ser altamente estables incluso en condiciones muy desfavorables.

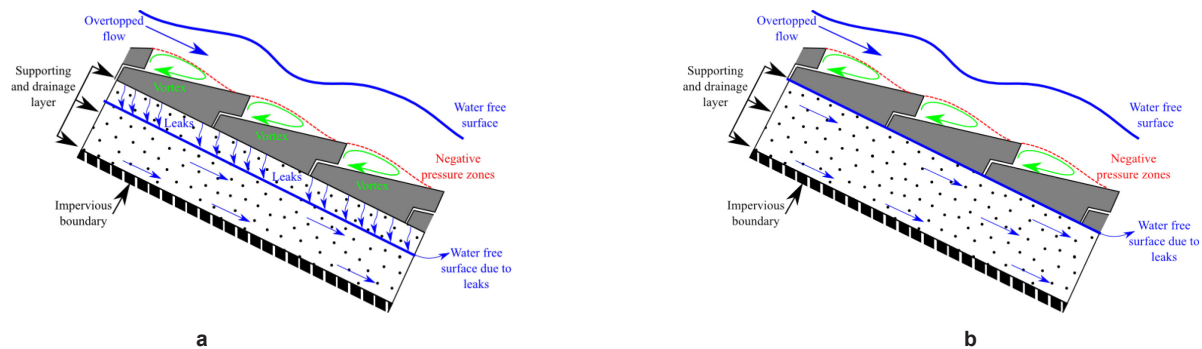


Figura 1| Esquema del funcionamiento hidráulico de un aliviadero de bloques en forma de cuña. Fuente: San Mauro et al. (2017)

Objetivos de la investigación

Entre los años 2011 y 2017, mediante la ejecución de los proyectos ACUÑA (IPT- 2011-0997-020000) y DIABLO (RTC-2014-2081-5), financiados por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España el consorcio UPM-CIMNE-PREHORQUISA, con la colaboración del CEDEX ha pretendido complementar los conocimientos teóricos y prácticos de la tecnología de WSB. Las líneas principales de dichos proyectos se han centrado en:

- Caracterizar las presiones en la cara superior del bloque y en la parte frontal de la contrahuella, estableciendo un criterio para determinar cuando existe riesgo de cavitación. En este sentido se han comparado los resultados obtenidos en el modelo físico ubicado en el CEDEX con los existentes hasta el momento y se han medido por primera vez valores en la contrahuella de los escalones.
- Explicar el patrón de funcionamiento hidráulico de este tipo de aliviaderos, verificando su estabilidad tanto desde el punto de vista de los bloques como de la capa de drenaje bajo los mismos para distintas tipologías de espaldón. Hasta el momento se ha obtenido tanto numérica como físicamente el comportamiento de los bloques y la capa de drenaje en el caso de ubicarse los mismos en el espaldón permeable de una presa de escollera, sin saturación del mencionado drenaje.
- En los próximos meses se prevé obtener resultados sobre presas homogéneas (espaldones no permeables) mediante ensayos físicos que servirán para validar los modelos numéricos ya realizados.
- Definir un nuevo bloque (WSB), que sea capaz de mejorar el rendimiento de los actuales, habiéndose presentado durante el año 2016 una patente con este producto (ES2595852, **Figura 4c** y **d**) que ya ha sido aprobada previo examen y publicada con fecha 8 de mayo de 2017 en el Boletín Oficial de Propiedad Industrial.
- Dar respuesta a la demanda de cálculo y dimensionamiento de aliviaderos con esta solución concreta de protección de una forma integral, mediante una herramienta numérica, de la que ya se dispone de una primera versión.
- Estudiar la variación del tipo de material a emplear en la fabricación de los bloques, evaluando la utilización en dicho proceso de hormigones no convencionales, tales como por ejemplo, hormigones con fibras; estando esta parte de la investigación actualmente en marcha.

MODELOS FÍSICO Y NUMÉRICO. CAMPAÑAS DE INVESTIGACIÓN

Modelo físico. Descripción del recinto de ensayos

El modelo físico consiste en una rápida ejecutada en acero y metacrilato; de pendiente 2:1 y altura libre máxima de 4.70 metros (**Figura 2a**), con un canal rectangular de 0.5 m de ancho y 0.85 m de alto (dimensiones interiores) y que presenta una superficie de tramex antideslizante destinada al soporte de las piezas WSB de ensayo colocada a 0.2 m del fondo del canal (**Figura 2b**). La finalidad de esta superficie de tramex es poder ensayar las piezas en situación de drenaje y medir el caudal que se filtra entre las piezas y escurre por el fondo de la rápida. Este caudal filtrado se recoge en las proximidades del final de la rápida a través de un tubo que desagua en un aforador con vertedero triangular y luego es devuelto al circuito de bombeo. La rápida desemboca en una arquetao estanque amortiguador de dimensiones suficientes (**Figura 2c**) para tranquilizar el agua de forma que el caudal pueda ser aforado mediante un vertedero de pared delgada antes de ser devuelto al circuito.

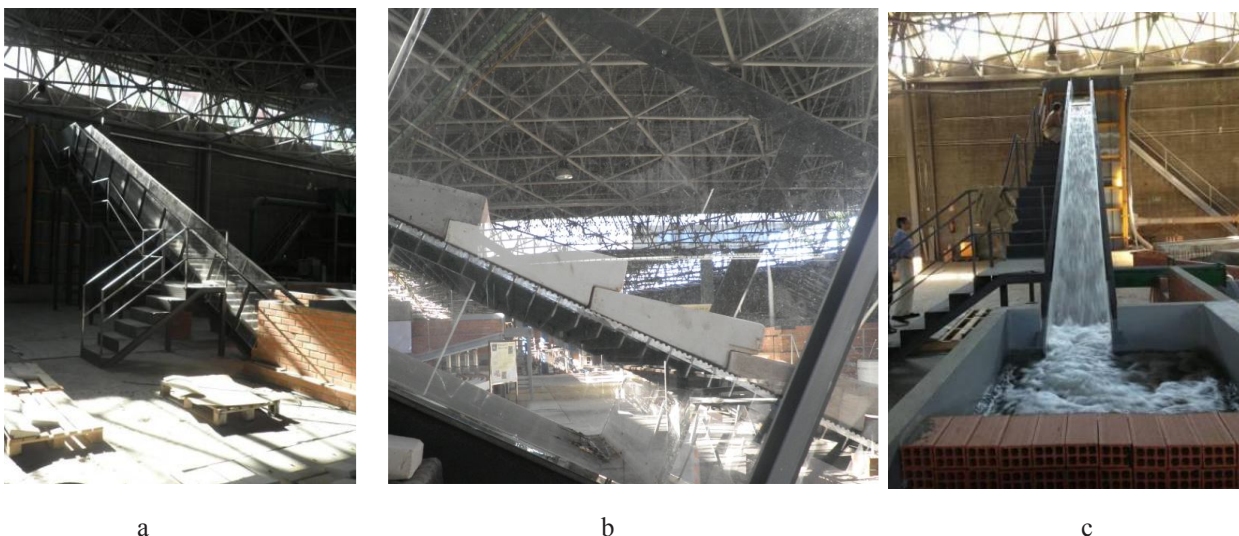


Figura 2 | Instalación de ensayos. Fuente: Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage, Ed. Balkema

La alimentación al modelo proporciona un caudal unitario máximo de $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ y se consigue a partir del acondicionamiento de un depósito existente en la nave de ensayos del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX. Se trata de un depósito prismático de sección $2.5 \times 2.5 \text{ m}^2$ y 6 m de altura. En su parte superior se ejecutó una ventana de 0.5 m de ancho y 0.7 m de alto en la pared del depósito a 4.7 m del suelo. Unas chapas metálicas ligeramente curvadas situadas en el interior del depósito a los lados de la ventana encauzan el agua que sale del mismo hacia el canal de WSB.

Para controlar mejor el punto donde se produce el calado crítico y para asegurar la adecuada salida de agua del depósito, la ventana desemboca en un canal horizontal de 0.5 m de anchura, 0.75 m de altura y 1.5 m de longitud. Tras este canal comienza la rápida de ensayos, de pendiente 1v:2h, unida al canal horizontal anterior mediante piezas laterales especiales de metacrilato y un fondo de cemento blanco.

Con las dimensiones adoptadas para los WSB ensayados la instalación presenta un total de 47 filas de bloques de forma de cuña. La medición de la filtración se presenta a la altura de la fila 32.

Los WSB no presentan ningún tipo de impermeabilización entre sus contactos ni longitudinal ni transversalmente. Únicamente se impermeabiliza el contacto de los cajeros de metacrilato del canal con la solera del canal

Instrumentación del modelo físico

La instrumentación que se ha dispuesto en el modelo físico puede agruparse en cuatro grandes bloques:

- Medida de niveles y de caudales circulantes:

- Caudalímetro electromagnético (en la bomba de alimentación).
 - Aforador con vertedero de pared triangular para medir el caudal de las filtraciones que se producen a través de las piezas para los distintos caudales de ensayo.
 - Limnímetros electromagnéticos (4), ya que ha sido necesario medir el nivel de la lámina de agua en distintos puntos: dentro del depósito, en el inicio de la rápida, en la arqueta de retorno y en el aforador de filtraciones.
- b) Sistema de medición de presiones. Para el que se cuenta con doce (12) transductores de presión sumergibles Messtech XA-700, que se encuentran instalados en uno de los bloques ensayados que está fabricado en metacrilato y un (1) scanivalve modelo DSA3207 de Scanivalve Corp. con dieciséis (16) tomas que se disponen en otro WSB de ensayo, también de metacrilato.
- Ambos tipos de dispositivos de medición se utilizan para registrar las presiones de agua en varios puntos de la huella, la base y la contrahuella de los WSB. Para ello se ha dispuesto de dos piezas de metacrilato idénticas a las piezas prefabricadas de hormigón en forma de cuña y que se diferencian de las mismas en el material y en la disposición en las mismas de los sensores de presión (**Figura 3**).
- c) Sistema de medición de concentración de aire en el flujo bifásico agua-aire. Permite obtener en cada punto de medida la concentración de aire y determinar así el calado de dicho flujo mediante la definición del límite de la denominada superficie libre con un criterio preestablecido.

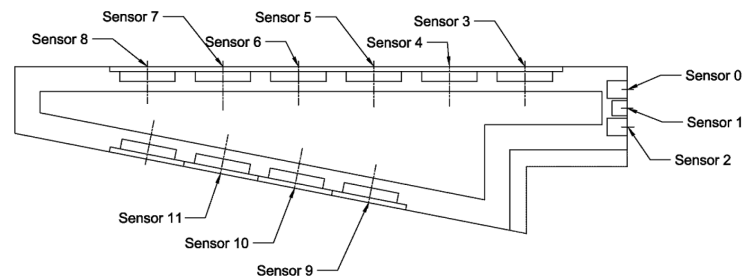


Figura 3 Localización de los sensores de presión en uno de los WSB de medición. Fuente: Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage, Ed. Balkema

La adquisición de datos se lleva a cabo en un intervalo de tiempo de 5 minutos por flujo ensayado mediante un equipo cDAQ. Adicionalmente se dispone de tres cámaras de fotos con función de video con sus correspondientes soportes para grabación de los ensayos.

Planificación de las campañas de ensayos de modelación física

Los ensayos se ejecutan con dos tipos de WSB diferentes. En una primera fase se dispuso del bloque tipo ArmorwedgeTM (fase w1) que fue el empleado en la ejecución de la presa de Barriga y que en los ensayos se ha escalado físicamente a un tercio de las dimensiones dispuestas en dicha obra. Con posterioridad se han realizado ensayos sobre el nuevo bloque resultante del proyecto ACUÑA (fase w2) y que ha sido patentado recientemente (ES2595852).

Además se han planificado diferentes fases de ensayo en función de si se ejecutaba la campaña pensando en la disposición de los WSB sobre un espaldón de elevada permeabilidad, y para lo cual no se ha dispuesto material drenante bajo los WSB (d1) o, por el contrario, si se disponían sobre un talud de un dique impermeable, para lo cual se ha planificado la colocación del mismo sobre diferentes capas drenantes (d2), contando con que todas ellas deben cumplir la condición de filtro con sus capas adyacentes.

A fecha de redacción de la presente comunicación se han ejecutado las campañas de modelación física w1-d1 y w2-d1.

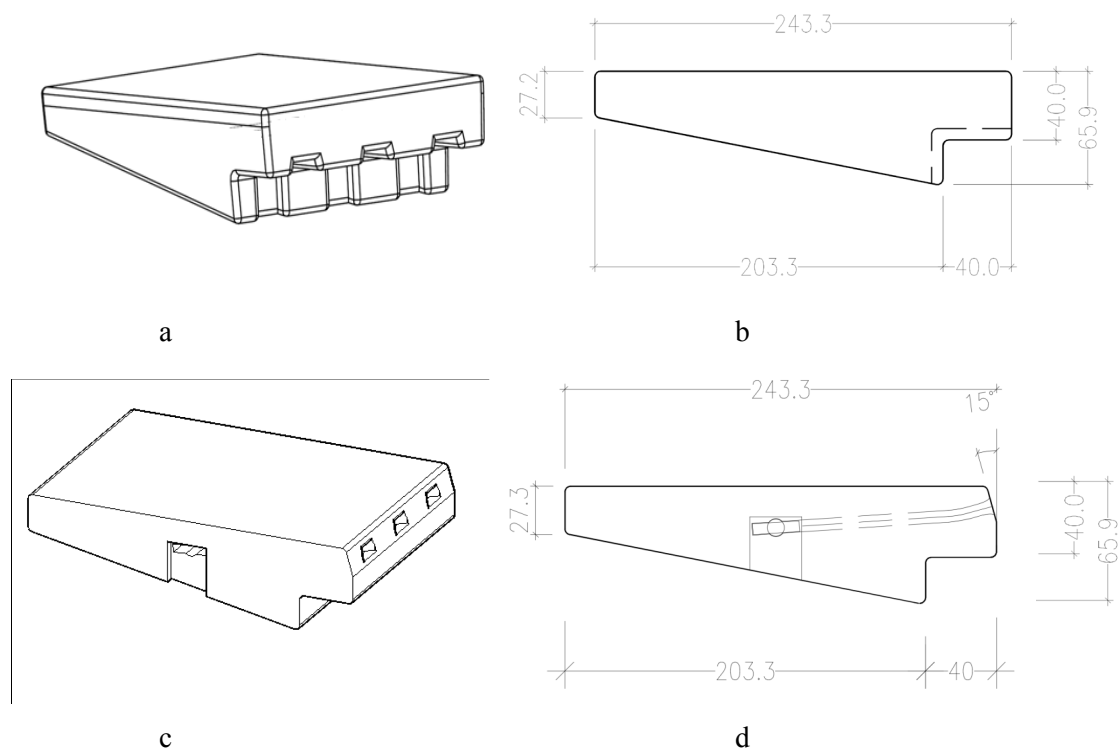


Figura 4 | WSB Armorwedge™. (a) Vista 3D; (b) Sección longitudinal; WSB ACUÑA (patente ES2595852): (c) Vista 3D; (d) Sección longitudinal (cotas en mm. Anchura de ambos bloques: 165 mm)

La instalación presenta un total de 47 filas de bloques en forma de cuña. Los bloques de medición de presiones de metacrilato se han instalado en diferentes ensayos en las filas 5, 10, 15, 25, 30 y 35. Este documento muestra algunos resultados de los registros de presión en la fila 25 que se encuentra aproximadamente a 2.5 metros en vertical bajo el umbral del vertedero.

El flujo filtrado a través de las juntas entre los bloques y los agujeros de aireación/drenaje se ha medido empleando el vertedero triangular descrito en párrafos anteriores.

Así mismo, se ha medido de forma separada el flujo filtrado a través de las juntas de contacto entre los bloques longitudinales, transversales y los huecos de los orificios de aireación/drenaje. Para ello y con las dos tipologías de bloque se realizaron los ensayos de medición de las filtraciones en tres situaciones:

- Sin sellado (únicamente el sellado de los contactos laterales de la solera del canal con los cajeros)
- Sellando los contactos longitudinales entre los WSB pero sin sellar los transversales ni los orificios
- Sellando los contactos longitudinales y transversales entre los WSB pero sin sellar los orificios

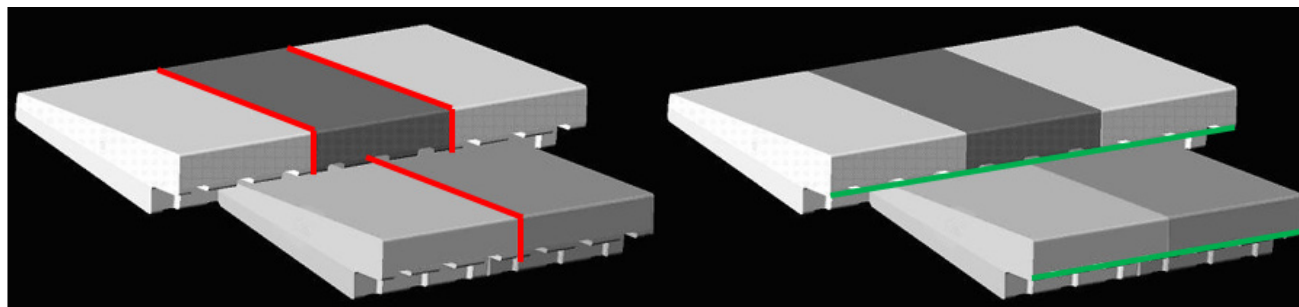


Figura 5 | Localización de juntas longitudinales (rojo) y juntas transversales (verde) entre bloques. Fuente: Adaptada a partir de Frizell (2007)

Además, con el fin de comparar los resultados de diferentes autores en los WSB, se expresaron los mismos de forma adimensional, siguiendo los criterios de Relvas y Pinheiro (2011).

Tabla 1 | Ensayos realizados; h_c representa el calado crítico; h_s es la dimensión de la altura o contrahuella del escalón (ver **Figura 6**); q representa el caudal unitario

$h' = h_c/h_s$	4.51	3.99	3.44	2.84	2.52	2.17	1.37
q (m^2/s)	0.24	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08	0.04

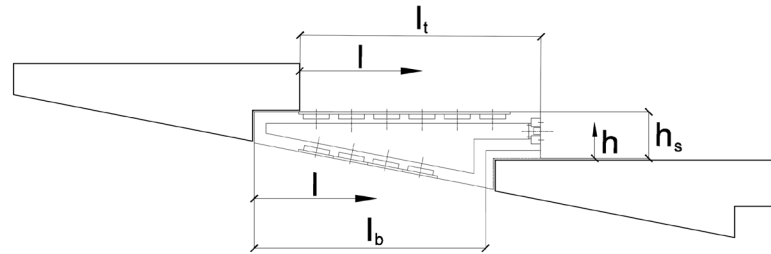


Figura 6 | Parámetros geométricos utilizados para caracterizar el perfil longitudinal escalonado

Planteamiento de la campaña de la campaña de modelación numérica

Se han empleado dos herramientas numéricas para modelar el flujo sobre los WSBs, que reproducen tanto el comportamiento global como los fenómenos específicos cerca de la superficie del bloque, como por ejemplo la interacción aire-agua o la vorticidad.

Ambos se basan en el método de elementos finitos y en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D. Sin embargo, uno de ellos se basa en una formulación de Lagrange (el método de partículas de elementos finitos, PFEM) mientras que el otro utiliza una formulación euleriana (aplicación de software de código abierto Kratos Multi-physics).

El código euleriano se ha aplicado ya en el cálculo de aliviaderos (San Mauro et al, 2016, Salazar et al 2013), entre otros problemas de ingeniería. Los detalles sobre la aplicación numérica se pueden encontrar en Dadvand et al (2010) y Rossi et al (2013).

El código lagrangiano se basa en el método PFEM desarrollado por CIMNE (Oñate et al, 2004). PFEM permite considerar la interacción entre varios fluidos y estructuras (Oñate et al, 2011), por lo que se utiliza para modelar el fenómeno de la interacción aire-agua. PFEM ha sido validado para la simulación de diversos problemas hidráulicos en el campo de la hidráulica de presas (Larese et al, 2008).

En resumen, se realizaron varias campañas numéricas, con los objetivos de caracterizar el flujo en las inmediaciones del bloque y evaluar el efecto producido por los orificios de la contrahuella, para distintas posiciones y formas de bloque, modelando para ello la interacción agua-aire.

RESULTADOS

Flujo en las inmediaciones del bloque

Las simulaciones numéricas han permitido obtener el campo vectorial de velocidades y presiones en todo el dominio de cálculo considerado. De esta manera se pudieron observar las características que presenta el flujo de agua en las inmediaciones de los contornos de los bloques.

El comportamiento observado consistió en la formación de un vórtice próximo a la unión cóncava de la huella y la contrahuella, con ligeras oscilaciones espaciales a lo largo de la simulación. Este vórtice genera una zona de presión negativa en la superficie de la contrahuella, con valores mínimos en el tercio superior de la misma. Las características del vórtice determinarán las distribuciones de presión en huella y contrahuella del bloque, así como las condiciones de funcionamiento de los orificios de aireación y drenaje. En la **Figura 7** se ilustra a modo de ejemplo el flujo observado en un instante de una de las simulaciones llevadas a cabo.

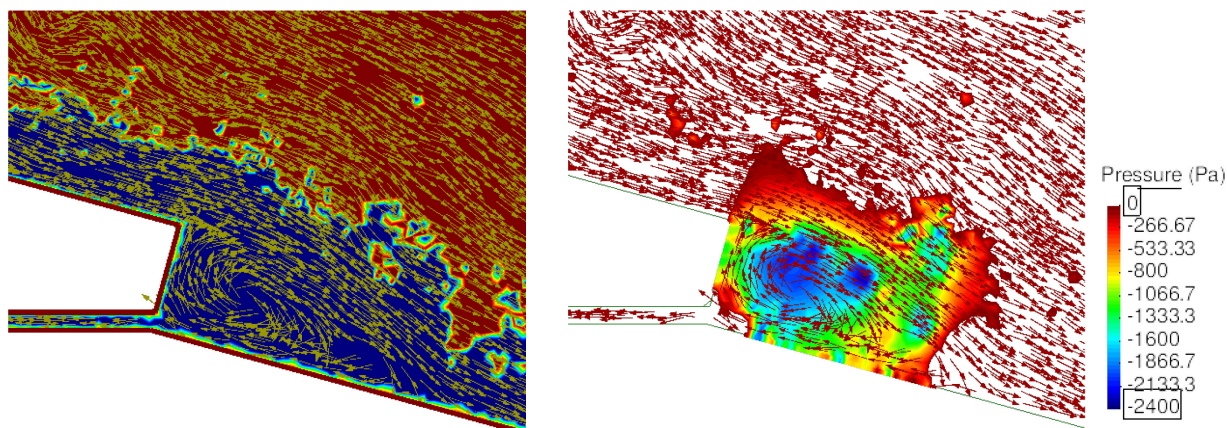


Figura 7 | Izquierda: Azul representa agua y rojo aire. Flujo con indicación de los vectores de velocidad para vertido con número de Froude $F=3$, talud 2. Derecha: distribución de presiones negativas, donde se observa que están asociadas al remolino fundamentalmente.

Presión hidrodinámica

Presiones en la huella.

Para comparar los registros de presión obtenidos en la modelación física con los registrados por diferentes autores, los resultados se expresan en forma adimensional (criterios de Relvas y Pinheiro, 2011). La **Figura 8** muestra las presiones medias registradas en los sensores ubicados en la huella del WSB de la fila 25 para descargas unitarias entre 0.04 a 0.24 m^2/s . Se reflejan también los resultados obtenidos por Bramley y Baker (1989), Slovensky (1993) y Relvas y Pinheiro (2011) para un régimen de flujo uniforme. El parámetro (l) se refiere a la medida desde el extremo de la huella del WSB aguas abajo, a la contrahuella del bloque ubicado inmediatamente aguas arriba, mientras que el parámetro (l_t) se refiere a la longitud total de la misma en el WSB (ver **Figura 6**); para obtener el parámetro adimensional (l/l_t). Del mismo modo, la presión (p/γ) se refiere a la altura de la contrahuella del bloque (h_s) para obtener el parámetro adimensional ($p/\gamma/h_s$).

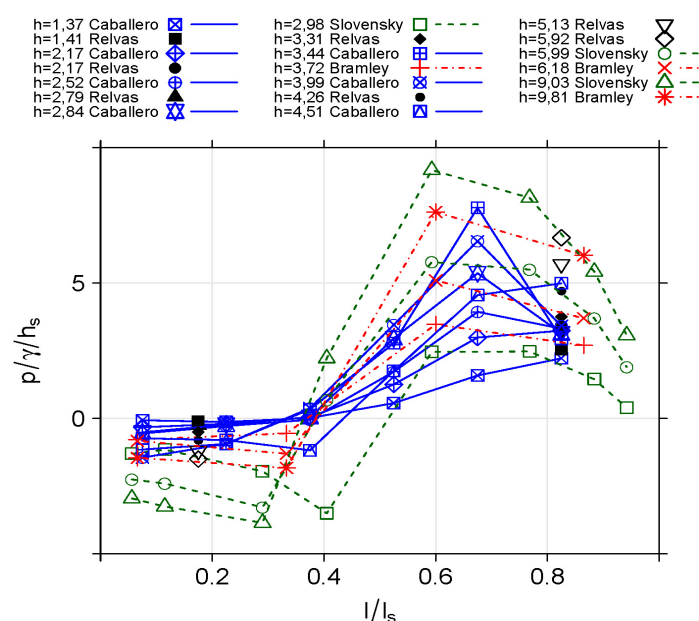


Figura 8 | Presiones medias máximas sobre la huella del bloque en la fila 25 para descargas unitarias de 0.04 a 0.24 m^2/s (Caballero et al), y los reportados por diferentes autores ($h' = h_c/h_s$). Fuente: Caballero et al. (2017)

Puede observarse que:

- La obtención de presiones negativas o próximas a cero en la zona de intersección huella-contrahuella coincide con los resultados obtenidos por el resto de investigadores, y son acordes a los modelos numéricos previos realizados en el proyecto ACUÑA para caracterización del flujo en las inmediaciones de los bloques.
- Los resultados obtenidos son también acordes con las conclusiones de Slovensky (1993) situándose el límite entre las presiones negativas y positivas en la huella entre 30% y 40% de la longitud de dicha huella; y registrándose sistemáticamente las máximas presiones positivas entre el 52% y 67% de la longitud de la huella.

Presiones en la base de apoyo del bloque.

Las investigaciones precedentes han realizado mediciones de presión en la parte inferior del bloque. Sin embargo, aparentemente, estas mediciones no han estado encaminadas a comprobar una supuesta aspiración en la parte inferior o base del bloque sino a un intento de caracterizar el flujo a través de la capa de drenaje, como se desprende por ejemplo de las presiones medidas por Slovensky (1993) cuyos sensores no se ubicaban en la base de los bloques, sino en el interior de la capa de drenaje (0.15 m. de espesor), concretamente en su zona media.

La instalación experimental de los proyectos ACUÑA y DIABLO presenta una diferencia fundamental en referencia a las empleadas por otros investigadores: el tramex antideslizante permite ubicar los WSB a 0,2 m sobre el fondo del canal (**Figura 2b**), de forma que puede evaluarse la hipótesis de no saturación de la capa de drenaje situada bajo los mismos, siempre que se garantice la salida libre del caudal drenado sin entrar en carga. Esta han sido las condiciones impuestas en la investigación en la fase d1 en donde se registraron presiones negativas en la parte inferior o base de apoyo de los bloques (**Figura 9**). Este resultado sugiere que una capa de drenaje bien diseñada, no sólo puede evitar una presión positiva mediante el drenaje, evitando así la generación de subpresiones, sino también mejorar la estabilidad del bloque debido a la presión negativa (succión) en la parte inferior o base de apoyo de dicho bloque.

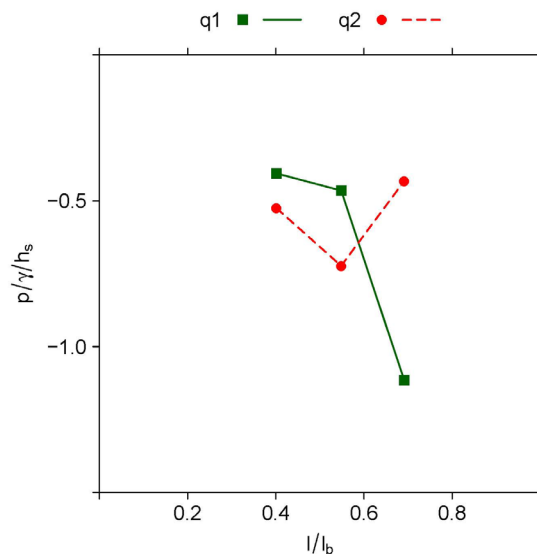


Figura 9 | Presiones medias máximas: a) sobre la base de apoyo del bloque en la fila 25 para descargas unitarias de: $q_1=0.16 \text{ m}^2/\text{s}$; $q_2=0.24 \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Caballero (2017)

Presiones en la contrahuella.

Bramley Baker (1989) y Slovensky (1993) midieron presiones en la contrahuella. Sin embargo lo hicieron de forma puntual, es decir, sin establecer una ley de distribución de presión a lo largo de la contrahuella. En el proyecto ACUÑA se colocaron tres sensores en la contrahuella en los bloques de medición (Figura 4) con objeto de caracterizar por primera vez mediante modelación física la distribución de presión en la contrahuella. Como era de esperar, las presiones medidas sobre la contrahuella han sido negativas o próximas a cero, con un valor mayor de la aspiración en la parte superior de la misma (Figura

10). Dado que los orificios de drenaje/aireación del WSB Armorwedge™ (fase w1 de los ensayos) se encuentran en la base de la contrahuella, una presión positiva en esa área, aunque baja, implica que el flujo circule hacia la capa de drenaje a través de los agujeros de aireación/drenaje, como es el caso del bloque ubicado en la fila 25 para un vertido de $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ (**Figura 10**).

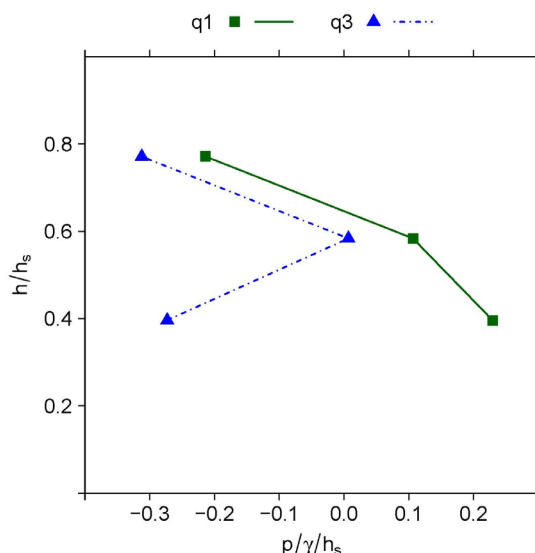


Figura 10 | Presiones medias máximas sobre la contrahuella del bloque en la fila 25 para descargas unitarias de: $q1=0.16 \text{ m}^2/\text{s}$; $q2=0.20 \text{ m}^2/\text{s}$. Fuente: Caballero (2017)

A la vista de estos resultados se planteó la posibilidad de modificar la posición de los orificios de drenaje/aireación en el nuevo bloque a definir en el proyecto ACUÑA. Para ello se planificó una campaña de modelación numérica que estudiase el patrón de movimiento en diferentes alternativas de geometría, ubicación en el bloque y en el canal y flujos evacuados por el canal.

Comportamiento de los orificios de aireación y drenaje

Se llevaron a cabo a lo largo de la investigación diversas campañas de modelación numérica, destinadas a determinar cuál era la posición más adecuada para situar el orificio de aireación y drenaje. Para ello se modelaron geometrías con orificios en la zona alta de la contrahuella y en la zona baja, para distintos caudales de vertido y taludes de aliviadero. Así mismo se definió y simuló una geometría de bloque con un biselado en la zona superior de la contrahuella, con la finalidad de optimizar el funcionamiento de los orificios.

De la comparación entre modelos con aireador en la zona superior e inferior se concluyó que el funcionamiento del orificio dependía de las condiciones hidráulicas del vertido, pudiéndose producir infiltraciones de agua o entrada de aire tanto si el orificio estaba en la zona alta como en la baja de la contrahuella, como se aprecia en la **Figura 11**. Sin embargo se observó que para las mismas condiciones hidráulicas, en los modelos con el conducto situado en la zona superior, la infiltración de caudales era menor que cuando el orificio estaba situado en la zona baja de la contrahuella. Lo contrario sucede para la entrada de caudales, cuando el orificio está en la zona superior, el caudal de aire succionado es mayor que cuando el orificio se encuentra en la zona baja (**Figura 12**). Esto parece indicar que el posicionamiento de los orificios en la zona alta de la contrahuella del bloque mejora su eficiencia.

Así mismo se realizó una campaña de modelación para determinar los efectos de la introducción de un biselado en el diseño de los bloques en forma de cuña. De esta forma se observó que el bisel generaba una depresión local (**Figura 13**), lo que favorecería el correcto funcionamiento de un orificio de aireación y drenaje colocado en esa zona.

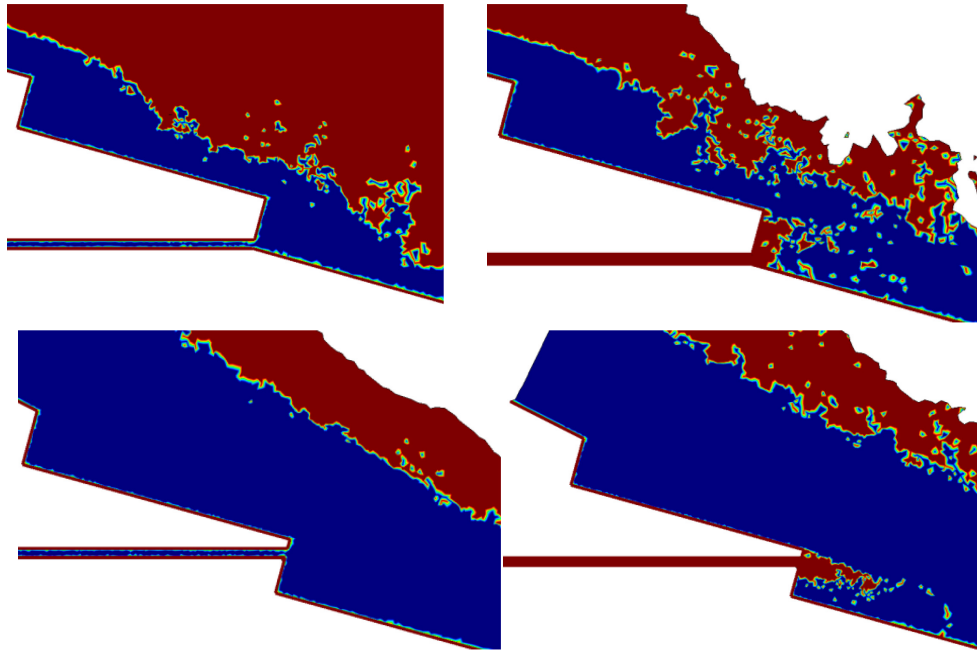


Figura 11 | Comportamiento del orificio para distintas posiciones y caudales de vertido. Azul representa agua y rojo aire. N° de Froude F. Talud 2. Superior: orificio en zona baja, izquierda F=3, derecha F=7. Inferior: orificio en zona alta, izquierda F=1,66, derecha F=3,9.

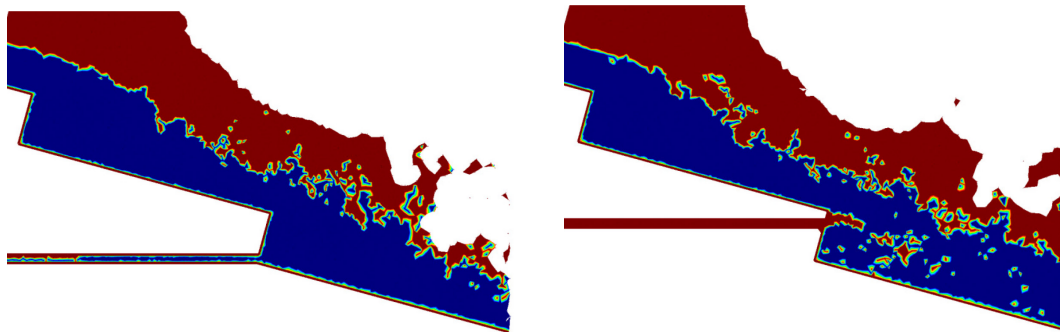


Figura 12 | Comportamiento del orificio para las mismas condiciones de vertido y distinta posición de orificio. Azul representa agua y rojo aire. N° de Froude F. Talud 2. Izquierda: orificio en zona baja. Derecha: orificio en zona alta.

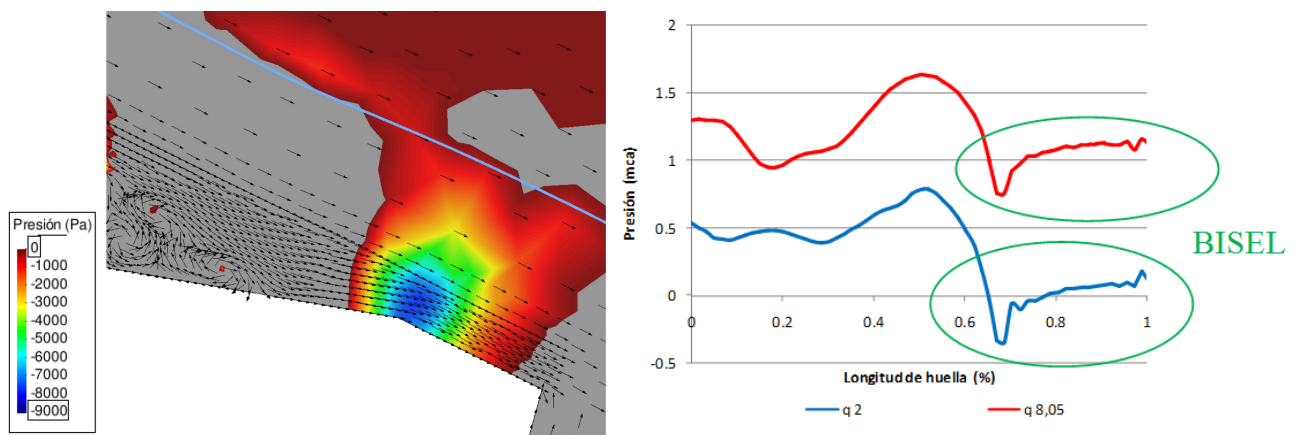


Figura 13 | Izquierda: Ejemplo de distribución de presiones y velocidades (vectores) en bloque con bisel. Derecha: resultados de presiones medias en la huella de bloques con bisel para $q = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ y $q = 8,05 \text{ m}^2/\text{s}$ y talud 2. Se indica en verde la zona del biselado.

Definición del nuevo bloque ACUÑA

A partir de los resultados obtenidos en los modelos de la fase de ensayos w1-d1, las alternativas planteadas en los modelos numéricos sobre la ubicación idónea de los orificios de aireación/drenaje, y los efectos de introducir un biselado en el extremo aguas abajo de la huella se definió un nuevo bloque prefabricado en forma de cuña (**Figura 4c y d**).

Con este nuevo bloque, se pretendía mejorar el comportamiento del WSB ArmorwedgeTM situando los orificios de drenaje/aireación en la parte superior del bloque, de forma que se garantizaran en los mismos las presiones negativas, lo que redundaría en una mayor succión y una filtración inferior hacia el dique en la hipótesis de drenaje no saturado (d1).

Con objeto de comprobar el comportamiento del nuevo bloque se desarrolló la fase de modelación física w2-d2.

Caudales de filtración y de drenaje

En referencia al comportamiento del bloque frente a las filtraciones se han obtenido resultados que favorecen al WSB ACUÑA respecto al WSB ArmorwedgeTM que se reflejan en el presente apartado.

Relvas y Pinheiro (2010) son los únicos autores que han reportado hasta la fecha resultados de caudales drenados para diferentes descargas unitarias, llegando a la conclusión de que *"la infiltración del agua a través de las juntas y orificios de los bloques es mucho menor que la descarga (menos del 0.25% para las descargas más elevadas, que representa a los regímenes de flujo rasante de más interés para prototipos de rampas escalonadas)"* (**Figura 14**). En sus resultados se observa una clara disminución del caudal de drenaje a medida que aumenta el caudal descargado por el aliviadero. Este hecho puede ser debido a que la capa de drenaje bajo los WSB se encuentre saturada, y una fracción de la corriente de drenaje vuelve al flujo superficial en el canal debido a la presión de succión en los orificios que se encuentran en la base de la contrahuella y en la cara aguas arriba de la huella, donde la presión es negativa. Así, cuanto más aumenta la presión negativa en los agujeros, más se reduce el caudal drenado hacia las capas de apoyo sobre la superficie del espaldón.

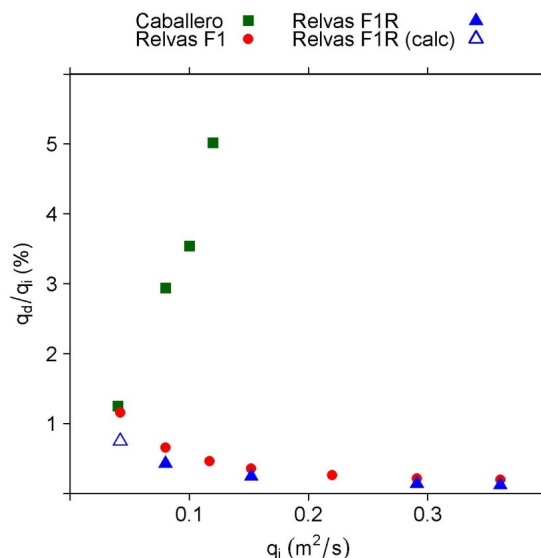


Figura 14 | Caudal drenado unitario (q_d) expresado como porcentaje del caudal unitario descargado (q_i), para diferentes descargas unitarias (q_i). Fuente: Caballero (2017)

Como se ha indicado previamente, durante la fase d1 de modelación física del proyecto ACUÑA, se dispuso de capa de 0.20 m de espacio libre bajo de los bloques. Dado que no se dispuso ninguna capa de drenaje bajo de los bloques, esa capa no llegó a saturarse, y el retorno del agua de drenaje a la superficie del canal no era posible, siendo el flujo de drenaje evacuado y medido en un vertedero triangular. A diferencia de los resultados reportados por Relvas y Pinheiro (2010), las primeras pruebas muestran que el flujo drenado aumenta con el caudal de descarga (**Figura 14**).

Debe indicarse que sí se produce la coincidencia entre los flujos drenados en el proyecto ACUÑA y los flujos medidos por Relvas y Pinheiro para el caudal vertido más bajo. Este resultado sugiere que la capa de drenaje en los ensayos realizados por Relvas y Pinheiro no estaba completamente saturada para caudales bajos. Cabe señalar que es posible la comparación entre los resultados del proyecto ACUÑA y los resultados medidos por Relvas y Pinheiro ya que la longitud total de juntas en los WSBs para las pruebas bajo etiqueta Relvas FIR en la **Figura 14** coincide exactamente con la longitud total de juntas en las pruebas ahora divulgadas para el proyecto ACUÑA.

Así mismo, una vez realizados estos primeros ensayos se ha discretizado el flujo filtrado por los bloques diferenciando entre la filtración a través de las juntas de contacto entre los bloques longitudinales, transversales y los huecos de los orificios de aireación/drenaje tanto en la fase w1-d1 como en la fase w2-d1.

Los resultados obtenidos en la modelación física reflejan una clara predominancia del flujo filtrado a través de las juntas de contacto transversal entre bloques. Así, tanto para el WSB ACUÑA respecto al WSB Armorwedge™ las juntas longitudinales (**Figura 5**) asumen entre el 55 y el 69% del total del caudal, mientras que el resto de filtración se produce por los contactos transversales entre bloques y por sus orificios de aireación/drenaje.

Debe mencionarse además que en el caso del WSB ACUÑA la filtración por los orificios de aireación/drenaje es prácticamente inexistente para caudales evacuados por el aliviadero de hasta $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ y se encuentra en un rango de entre el 1 y el 2 % de la filtración total para caudales superiores a los señalados y hasta $0.24 \text{ m}^2/\text{s}$. Los resultados obtenidos suponen una reducción sobre el total del caudal filtrado respecto al WSB Armorwedge™ de entre el 15% y el 18% para caudales evacuados por el canal de descarga de entre 0.1 y $0.24 \text{ m}^2/\text{s}$.

A partir de los resultados obtenidos se pretende complementar la modelación física mediante la calibración y validación del modelo numérico, evaluando posteriormente mediante el mismo el comportamiento de ambos bloques con diferentes caudales y taludes a los que no se puede llegar mediante la modelación física con la instalación actualmente disponible.

DISCUSIÓN

Slovensky (1993) y Relvas (2008) analizaron la estabilidad de los WSBs sometidos a fuerzas hidrodinámicas. En ambos casos los patrones de resultados son acordes con la presente investigación, asegurando la estabilidad de los mismos incluso en condiciones muy desfavorables.

Debe destacarse que los autores mencionados realizaron sus estudios trabajando con la capa de drenaje saturada, lo que puede originar subpresiones que generen una fuerza desestabilizadora de los bloques y que pueda llegar a provocar el fenómeno definido por Bramley (1991) como "block waving" (**Figura 15**).

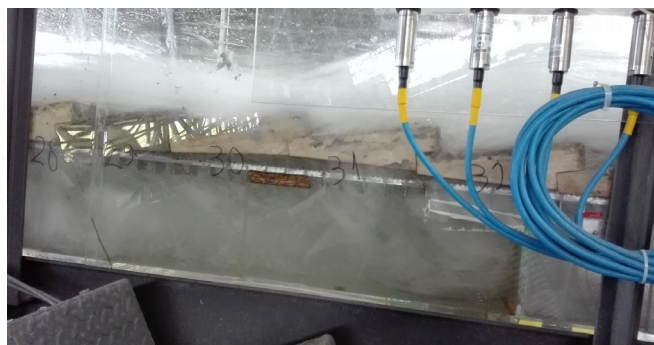
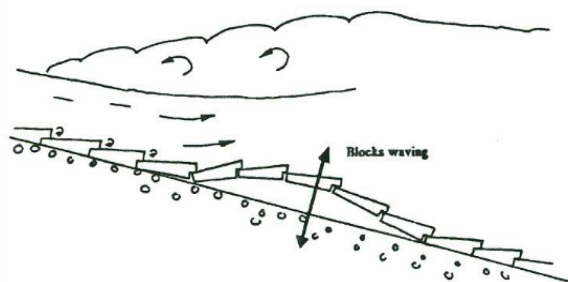


Figura 15 | Esquema de "block waving" (Bramley 1991) y simulación del mismo mediante cierre del drenaje en instalación experimental de los proyectos ACUÑA-DIABLO.

Es en este punto donde se puede establecer la principal discusión de la investigación y que hace referencia al dimensionamiento de la capa de drenaje. Si la capa de drenaje se encuentra saturada, el valor de la subpresión dependerá fundamentalmente de la capacidad de la succión desarrollada aguas abajo contrahuella de los WSB sometidos a la misma para reintegrar al menos parte del flujo al canal de descarga y reducirla (esquema de funcionamiento en **Figura 16a**). Sin embargo, si

la capa de drenaje está diseñada con una capacidad suficientemente elevada como para evitar la saturación, no se desarrollarán subpresiones en ningún caso, mejorando la estabilidad de la estructura (**Figura 16b**). Por lo tanto, uno de los aspectos a discutir será si la saturación de la capa de drenaje se debe considerar como una situación normal o accidental.

El fenómeno de saturación o no de la capa de drenaje responde no solo al diseño de la misma, sino que también se ve condicionado por la correcta evacuación de los caudales drenados aguas abajo, donde influirá decisivamente la adecuada elección y dimensionamiento de la estructura terminal del aliviadero.

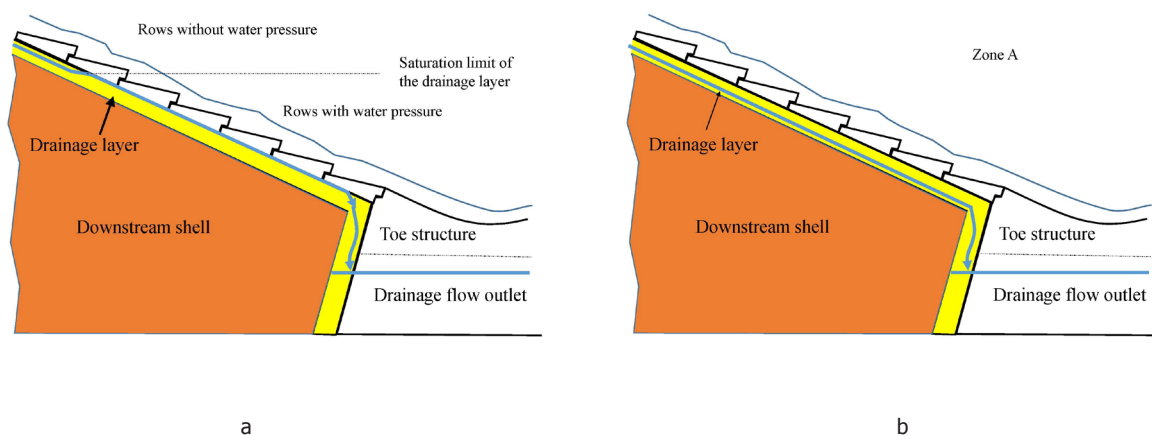


Figura 16 | Esquema de funcionamiento de la capa de drenaje bajo los WSB: a) saturada b) sin saturación. Fuente: Caballero et al. (2017)

CONCLUSIONES

Aunque la investigación aún no ha concluido, se pueden establecer algunas conclusiones preliminares en función de los resultados expuestos en la presente comunicación.

En primer lugar debe mencionarse que el estudio experimental presenta dos características singulares con respecto a otras investigaciones anteriores:

- La capa de drenaje fue modelada por un espacio completamente vacío simulando un drenaje diseñado para evitar la saturación. Ese espacio fue limitado por debajo por el canal de metacrilato y en la parte superior, por los bloques de cuña. El contacto entre los bloques y los cajeros del canal fueron sellados manualmente con una masilla impermeable.
- Se instalaron tres sensores de presión en la contrahuella de los bloques de medición con objeto de caracterizar el patrón de presión en la misma.

Con todo ello, respecto a las presiones hidrodinámicas ejercidas sobre el bloque:

- Se muestra una concordancia tanto en la modelación física como en la modelación numérica con estudios precedentes en los patrones de comportamiento obtenidos sobre la huella de los bloques.
- Se registraron presiones negativas de succión en la base del bloque, lo que favorece la estabilidad de los mismos.
- Los registros de presión en la contrahuella resultaron, como se esperaba, negativos o próximos a cero, localizándose las mayores presiones negativas en el tercio superior de la misma. En algunos casos la presión, aunque baja, es positiva en la parte inferior de la contrahuella, lo que provoca para el caso del sistema de aireación/drenaje del WSB Armorwedge™ que el agua se filtre hacia la capa de drenaje, aumentando el flujo de la misma.

Respecto a la discretización de los caudales circulantes por el canal de descarga y la capa de drenaje, el estado no saturado de esta última capa evita uno de los efectos de los sistemas de aireación/drenaje de los WSB, que mediante la succión generada por la presión negativa que tiene lugar en el espacio entre la contrahuella del escalón y la huella del siguiente, produce el reintegro de parte del flujo circulante por la capa de drenaje al canal de descarga. En consecuencia, en la investigación realizada aumenta el flujo de drenaje cuando el caudal de descarga es mayor, lo opuesto a lo reportado por autores anteriores.

En este aspecto parece que el comportamiento del nuevo WSB ACUÑA respecto al WSB Armorwedge™ resulta más ventajoso dado que la filtración que se produce por los orificios de aireación/drenaje, y por lo tanto la filtración total hacia la capa de drenaje, se ve reducida notablemente.

Se prevé la ejecución de nuevos ensayos durante las anualidades 2017 y 2018, relacionados fundamentalmente con la fase de la investigación en la que los bloques se dispondrán apoyados sobre una capa de material granular y que permitirán ampliar las conclusiones obtenidas hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se han realizado dentro de los proyectos ACUÑA (IPT-2011-0997-020000) y DIABLO (RTC-2014-2081-5), financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad, en el marco del “Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica”. Además, el proyecto ACUÑA ha sido parcialmente financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Comisión Europea.



REFERENCIAS

Publicaciones periódicas

- Baker, R. and Gardiner, K.D. (1995). “Building blocks”, International Water Power and Dam Construction, vol. 47, n.º 11.
- Booth, N. (2012). “Technical visit: Grane Valley reservoir spillway improvements”. Dams and Reservoirs 2012 volume 22, issue 3-4, september 2012, pp. 113–115. <http://dx.doi.org/10.1680/dare.13.00009>. Institution of Civil Engineers (ICE) Publishing.
- Bramley, M. and May, R. and Baker, R. (1989, 1991). Performance of wedge-shaped blocks in high velocity flow. CIRIA Research Project 407. Stage 1 Report- July 1989 and Stage 2 Report- July 1991.
- Dadvand, P., Rossi, R., Oñate, E. (2010). An object-oriented environment for developing finite element codes for multidisciplinary applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 253-297.
- Frizell, K. H. (1997, September). “Protecting embankment dams with concrete stepped overlays”. *Hydro Review*, 16, 36-45.
- Grinchuk, A.S. and Pravdivets, Y. P. and Shekhtman (1977). “Test of earth slope revetments permitting flow of water at large specific discharges”. Translated from *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, n.º4, pp. 22-26, April, 1977.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., & Idelsohn, S. R. (2008). Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows. *Engineering Computations*, 25(4), 385-425.
- Morán, R., and Toledo, M. A. (2014). “Design and construction of the Barriga dam spillway through an improved wedge-shaped block technology”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(10), 924-927.
- Morton, D. et al (2008). “Norton Fitzwarren flood alleviation dam” <http://www.hyderconsulting.com/insights/Documents/>
- Oñate, E., Idelsohn, S. R., Del Pin, F., & Aubry, R. (2004). The particle finite element method—an overview. *International Journal of Computational Methods*, 1(02), 267-307.
- Oñate, E., Celigueta, M. A., Idelsohn, S. R., Salazar, F., & Suárez, B. (2011). Possibilities of the particle finite element method for fluid–soil–structure interaction problems. *Computational Mechanics*, 48(3), 307-318.

- Pether, R., Marsh, P., and Cartwright, P. (2009). "An innovative new spillway for Bruton flood storage reservoir". *Dams and Reservoirs*, 19, 67-72.
- Pravdivets, Y. P., and Slissky, S. M. (1981). "Passing floodwaters over embankment dams". *International WaterPower and Dam Construction*, 33(7), 30-32.
- Relvas, A.T. and Pinheiro, A.N. (2008). "Inception Point and Air Concentration in Flows on Stepped Chutes Lined with Wedge-Shaped Concrete Blocks". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.134, issue 8, 1042-1051
- Relvas, A.T. and Pinheiro, A.N. (2010). "Closure of "Inception Point and Air Concentration in Flows on Stepped Chutes Lined with Wedge-Shaped Concrete Blocks". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.136, issue 1, 86-88
- Relvas, A.T. and Pinheiro, A.N. (2011). "Stepped chutes lined with wedge-shaped concrete blocks: hydrodynamic pressures on blocks and stability analysis". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 338-349
- Rossi, R., Larese, A., Dadvand, P. y Oñate, E. (2013). An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 71, 687–716. Doi: 10.1002/fld.3680
- Salazar, F., Morán, R., Rossi, R., Oñate, E. (2013). Analysis of the discharge capacity of radial-gated spillways using CFD and ANN—Oliana Dam case study. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 244-252.
- San Mauro, L., Salazar, F., Toledo, M. A., Caballero, F. J., Ponce-Farfán, C., Ramos, T. (2016). Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico. *Ingeniería del Agua*, 20(3), 127-138.

Libros

- FEMA. (2014). Technical manual: Overtopping protection for dams U.S. Department of Homeland Security.
- Hewlett, H., Baker, R., May, R., and Pravdivets, Y. P. (1997). Design of stepped-block spillways. London, U.K.: Construction Industry Research and Information Association.

Capítulos de libro

- Caballero, F.J.; Toledo, M.A.; San Mauro, J. and Salazar, F. (2015). "Physical and numerical modeling for understanding the hydraulic behavior of wedge-shaped-blocks (WSB) spillways". *Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage*. CRC Press/ Balkema, ISBN 978-1-138-02808-1, pp. 193-206

Congresos

- Baker, R., and 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*, 214-223.
- Caballero, F.J.; San Mauro, J.; Toledo, M.A.; Moran, R. and Salazar, F. (2017). Advances in the understanding of the hydraulic behavior of wedge-shape block spillways. 2nd International Seminar on Dam Protections against Overtopping. Protections 2016. Colorado State University (CSU). <https://dspace.library.colostate.edu/handle/10217/179778>
- San Mauro, J.; Larese, A.; Salazar, F.; Irazábal, J.; Morán, R.; Toledo, M. Á. (2017). Hydraulic and stability analysis of the supporting layer of wedge-shaped blocks. 2nd International Seminar on Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage. Protections 2016. Colorado State University (CSU). <https://dspace.library.colostate.edu/handle/10217/179778>

Informes

- Clopper, P.E. (1989). Hydraulic stability of articulated concrete block revetment systems during overtopping flow.

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

Thornton, C.I. and Robeson, M.D., Varyu, D.R. (2006). Armorwedge™ Data (Confidencial).

Tesis doctorales

Slovensky Jr, G.G. (1993). Near-prototype testing of wedge-block overtopping protection. M.S. thesis, Colorado State University, United States.

Relvas, A.T. (2008). Descarregadores de Cheias de Blocos de Betão Prefabricados em Forma de Cunha sobre Barragens de Aterro (in portuguese). Ph.D. Thesis, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Gaston, M. L. (1995). Air entrainment and energy dissipation on a stepped block spillway. M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.