

## **Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico**

*J. San Mauro, F. Salazar, R. Rossi, E. Oñate*

*Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Campus Norte. Edificio C1.  
C/ Gran Capitán S/N, 08034 Barcelona, España*

*M. A. Toledo, F. J. Caballero, C. Ponce*

*Departamento de Ingeniería Civil, Hidráulica y Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
C/Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España*

*T. Ramos*

*Centro de estudios hidrográficos del CEDEX  
Paseo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, España*

*C. Granell*

*Jesús Granell Ingenieros Consultores S.A.  
Calle del Cinca 34, 28002 Madrid, España*

*L. Ruano*

*VEMSA  
Polígono Industrial Allenduedero, P-49.  
Calle Salamanca s/n, 09400 Aranda de Duero (Burgos), España*

### **1. Introducción**

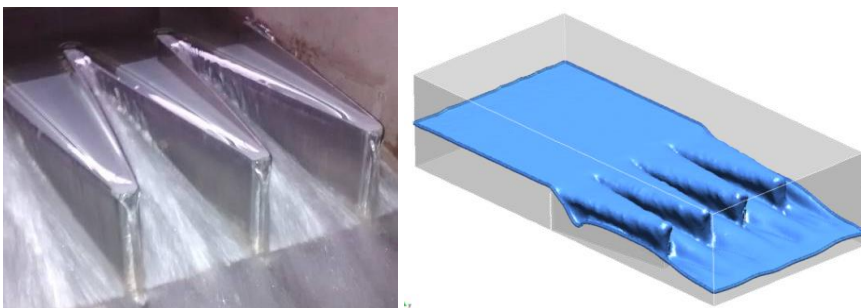
Un número importante de presas en España deben adaptarse a los nuevos criterios marcados por el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses del año 1996, que de manera general impone unos criterios de seguridad más exigentes en lo relativo a la capacidad de desagüe y resguardos exigidos. En este marco la actualización de aliviaderos de presas ya existentes se suele enfrentar a condicionantes geométricos o topográficos, que generalmente solo son abordables con soluciones tradicionales mediante importantes inversiones económicas. Por ello cada vez cobran más interés las soluciones de aliviaderos

no convencionales que permiten aumentar la capacidad de desagüe con una menor inversión.

Uno de esos condicionantes geométricos suele ser la limitación de la anchura máxima disponible. Una solución clásica para conseguir un aumento de capacidad sería la instalación de compuertas, que si bien aumentan la capacidad de embalse, requieren mayor atención para su operación y mantenimiento, con las desventajas que ello acarrea frente al vertido libre. Una solución alternativa e innovadora para afrontar el aumento de capacidad ante este condicionante geométrico sería la implementación de un aliviadero en laberinto.

Los aliviaderos en laberinto permiten aumentar la capacidad de desagüe manteniendo la simplicidad de operación del vertido libre. Se caracterizan por presentar una forma en planta generalmente trapezoidal y modular, lo que conduce a un aumento importante de la longitud de vertido. Soluciones de aliviaderos en laberinto ya han sido proyectadas y construidas tanto a nivel nacional (Presa de María Cristina) como internacional (Presa de Ute, EE.UU.), revelándose dos limitaciones fundamentales. En primer lugar ocupan un mayor espacio en planta que un vertedero recto, lo que dificulta su implementación en determinados casos. En segundo, con caudales de vertido unitario superiores a  $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  se incrementan en gran medida las cargas hidrodinámicas actuantes sobre los muros que conforman el aliviadero, y se hacen necesarias cuantías de acero de armado muy significativas (Blanc y Lempérière, 2001), que encarecen de manera importante el coste de estas soluciones.

Con el objetivo de desarrollar criterios de diseño óptimos de aliviaderos en laberinto, que soslayan las limitaciones observadas, se está desarrollando el proyecto POLILAB, en el marco del programa INNFACTO del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). En este proyecto participan Jesús Granell Ingenieros Consultores, VEMSA, CEDEX, UPM y CIMNE. En una primera etapa se pretenden estudiar las alteraciones que genera la inclusión de fondos poliédricos en aliviaderos en laberinto respecto al comportamiento de esos mismos aliviaderos con el fondo plano tradicional, en lo relativo a las condiciones de desagüe y a las distribuciones de carga en los muros que definen la geometría de los laberintos. En el proyecto se combinan la modelación física y numérica para alcanzar los objetivos planteados (Figura 1).



**Figura 1.** Ejemplo de ensayo físico y simulación numérica de aliviadero en laberinto del proyecto POLILAB.

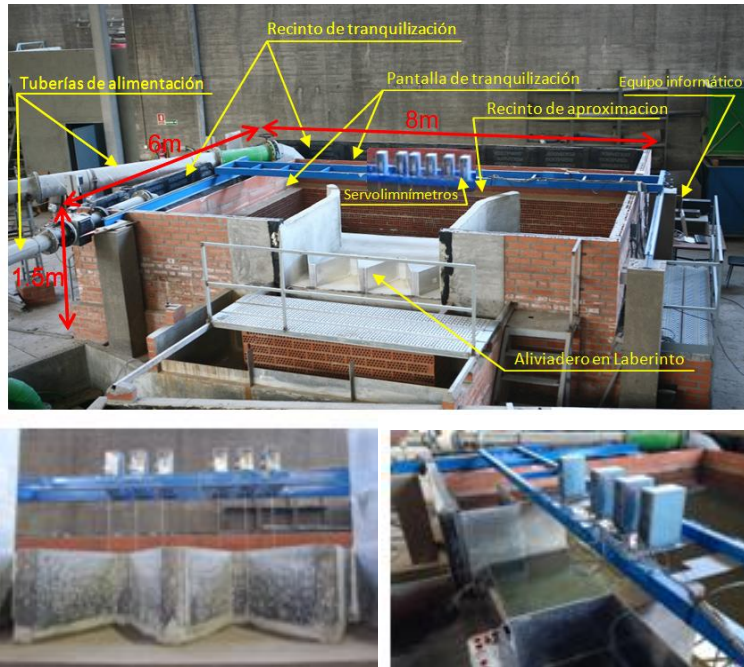
## 2. Modelación física

### 2.1 Instalaciones y equipos

La modelación física del proyecto POLILAB se está llevando a cabo por personal de la UPM y del CEDEX en las instalaciones del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. A continuación se resumen las dimensiones y características principales del modelo físico:

Se construyó un recinto de ensayo de planta rectangular de 8 m de ancho, 6 m de fondo y 1,5 m de altura en dimensiones interiores, que puede ser alimentado según distintas direcciones. La alimentación del caudal líquido se realiza mediante dos bombas, donde la primera es capaz de proporcionar un caudal que varía desde 17 l/s a 150 l/s y la segunda bomba hasta los 300 l/s. Cada bomba dispone de un caudalímetro electromagnético para aforo del caudal entrante. Las bombas descargan el agua en un recinto de tranquilización, a través del cual se introduce el caudal en el recinto de ensayo. La función del recinto de tranquilización es disminuir y homogeneizar la velocidad del agua tras su salida de las tuberías que la conducen hasta él, de modo que se introduzca en el recinto de ensayo de una forma “suave”. Variando la geometría del recinto de tranquilización, se cambian las condiciones de alimentación. El agua sale del recinto de ensayo por el vertedero tipo laberinto. Tras él se sitúa otro recinto de tranquilización, tras el cual se dispone un aforador rectangular para la medición de caudales. Posteriormente, el agua se reintroduce en el depósito inferior y se cierra el circuito. El recinto está equipado con 6 servolimnímetros o limnigrafos palpadores para la medida de calados sobre perfiles curvos de lámina de agua, además de 2 sondas de ultrasonidos montadas sobre un carro que desliza apoyado en los muros extremos, y que conectados a un equipo informático, permiten el registro continuo de los niveles en distintas zonas del embalse y del recinto de aproximación al vertedero del recinto de ensayo. También se dispone de un limnómetro manual de respaldo para la comprobación de niveles. En la Figura 2 se pueden apreciar todos los elementos antes comentados.

Asimismo el recinto de ensayo se encuentra preparado para adaptarse a distintas disposiciones y geometrías de vertedero (se han construido 12 vertederos tipo laberinto para su ensayo físico en el marco del proyecto POLILAB), diferentes alturas de aliviadero, disposiciones de aproximación en canal y en embalse, posiciones de aliviadero con los vértices extremos hacia aguas arriba y con los vértices extremos hacia aguas abajo; además la instalación permite modificar las condiciones de alimentación del vertedero mediante flujos frontales, laterales y oblicuos, así como modificar las condiciones de aproximación mediante distintas configuraciones de fondo de embalse.



**Figura 2.** Superior: elementos y dimensiones principales del recinto de ensayo. Inferior: detalles de servolínímetros instalados sobre deslizadera (se identifican en azul).

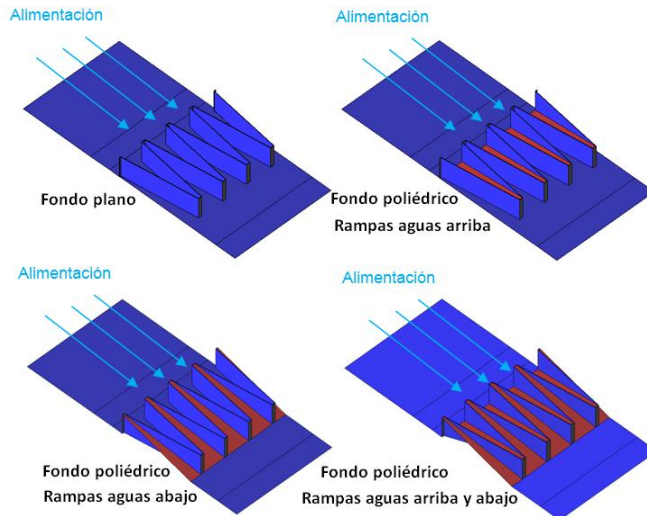
En concreto para la primera campaña de ensayos físicos del proyecto POLILAB, de la que se exponen sus resultados más relevantes en este trabajo, los ensayos se llevaron a cabo con una configuración de instalación para alimentación de caudal frontal, fondo de embalse plano y aproximación al vertedero en canal de 1 m de ancho. En la Figura 3 se muestra detalle del vertedero ensayado en esta campaña con las condiciones de aproximación descritas.



**Figura 3.** Detalle de ensayo físico con alimentación frontal y aproximación en canal de la primera campaña de ensayos del proyecto POLILAB.

## 2.2 Geometría del aliviadero

La geometría de aliviadero ensayado consiste en un laberinto de chapa de aluminio de 4 mm de espesor y 4 ciclos. Encaja en un vano de anchura 1 m y su altura desde la solera es de  $P=0,2$  m. El borde superior que define el labio de vertido es paralelo a la solera y perpendicular a las caras verticales de aluminio y forma ángulos vivos en los bordes. La longitud desarrollada del labio es de 6 m y el ángulo de las caras laterales con el eje longitudinal es de  $7,45^\circ$ . Esta geometría de aliviadero se ensayó tanto con fondo plano (solera horizontal) como con fondos poliédricos. En concreto los fondos poliédricos estudiados fueron 3, y su diseño se fundamenta en introducir rampas en el interior de los ciclos, tanto desde aguas arriba, como desde aguas abajo, y desde aguas arriba y aguas abajo. La posición de las rampas se definió como aquella que contuviera los 4 vértices interiores de un ciclo. En la Figura 4 se muestran dibujos esquemáticos de la geometría de aliviadero ensayada y los distintos fondos dispuestos.



**Figura 4.** Perspectivas de las geometrías de aliviaderos en laberinto con fondos planos y poliédricos, (rampas indicadas en rojo).

## 2.3 Curvas de desagüe experimentales

La capacidad de desagüe de un aliviadero en laberinto viene determinada por la ecuación [1], que relaciona el caudal de vertido con un coeficiente de desagüe ( $C_d$ ), que resulta específico para cada geometría de aliviadero. Este coeficiente solo se encuentra tabulado para geometrías sencillas de aliviadero en laberinto (Crookston y Tullis, 2013), pero no para aliviaderos en laberinto de fondo poliédrico, por lo que debe ser obtenido mediante ensayo, bien físico o numérico.

$$Q = L \cdot C_d \cdot H_t^{1.5} \quad [1]$$

Donde:

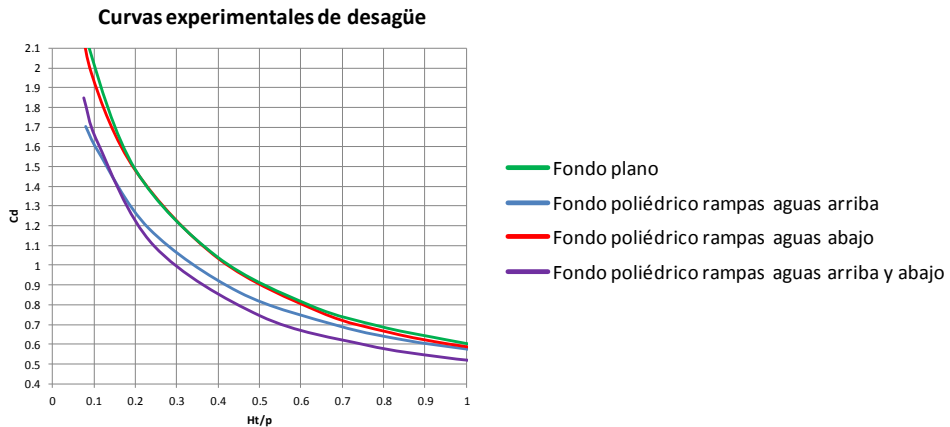
$Q$  es el caudal de vertido ( $m^3/s$ ).

$L$  es la longitud del aliviadero desarrollado (m).

$C_d$  es el coeficiente de desagüe.

$H_t$  es la carga hidráulica sobre el umbral del vertedero (m).

Sobre la geometría de aliviadero en laberinto con las distintas configuraciones de fondos descritas se han realizando campañas intensivas de ensayos físicos, los cuales permitieron obtener la evolución del valor de  $C_d$  para distintos caudales de vertido, o lo que es lo mismo para distintas alturas adimensionales de sobrevertido ( $H_t/P$ ), definiéndose así las curvas de desagüe para cada configuración que se muestran en la Figura 5. Se observa que a pesar de la modificación de la geometría de los fondos (plano y poliédricos) la forma de las curvas obtenidas siguen el mismo patrón descendente conforme aumenta la relación  $H_t/P$ . Por otra parte cabe destacar que las configuraciones con fondo plano y fondo poliédrico con rampas aguas abajo resultan ser las más eficientes de entre las ensayadas. La configuración de fondo poliédrico con rampas aguas arriba y aguas abajo es la que mostró una menor capacidad de desagüe.



**Figura 5.** Curvas de desagüe obtenidas por modelación física, para aliviadero en laberinto con fondos plano y poliédricos.

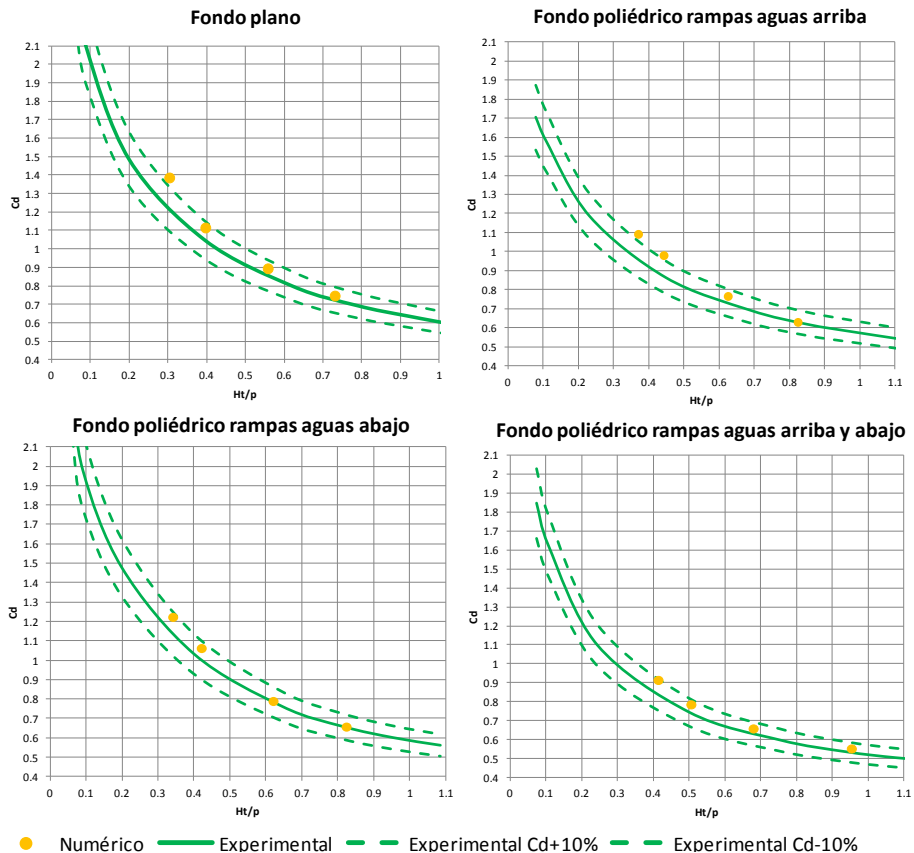
### 3. Modelación numérica

CIMNE desarrolla la modelación numérica del proyecto POLILAB, con el objetivo de estudiar las modificaciones que genera la inclusión de fondos poliédricos en un aliviadero en laberinto, en lo relativo al patrón de flujo y a las acciones hidrodinámicas que aparecen sobre los muros del aliviadero. Todas las simulaciones numéricas se realizaron en 3D ya que

el patrón de movimiento del agua en esta tipología de aliviaderos es tridimensional. El código de cálculo utilizado es una de las aplicaciones de KRATOS (Dadvand et al., 2010; Rossi et al., 2013), desarrollado por CIMNE, que resuelve las ecuaciones completas de Navier-Stokes en tres dimensiones sobre una malla de elementos finitos que discretiza el dominio.

### 3.1 Validación

Para la validación del modelo numérico implementado se empleó el método del ensayo ciego, comparando las curvas de desagüe experimentales, ya expuestas, con las curvas de desagüe obtenidas a partir de la simulación numérica de las configuraciones de aliviadero descritas. En la Figura 6 se muestra la comparación. Se observa que la discrepancia máxima entre los resultados experimentales y numéricos se encuentra en torno al 10 %, esta discrepancia máxima tiende a reducirse conforme aumenta la relación  $H_t/P$ . Por tanto se consideró que la aproximación lograda con el modelo numérico empleado resultaba suficiente para poder alcanzar los objetivos planteados en la investigación.

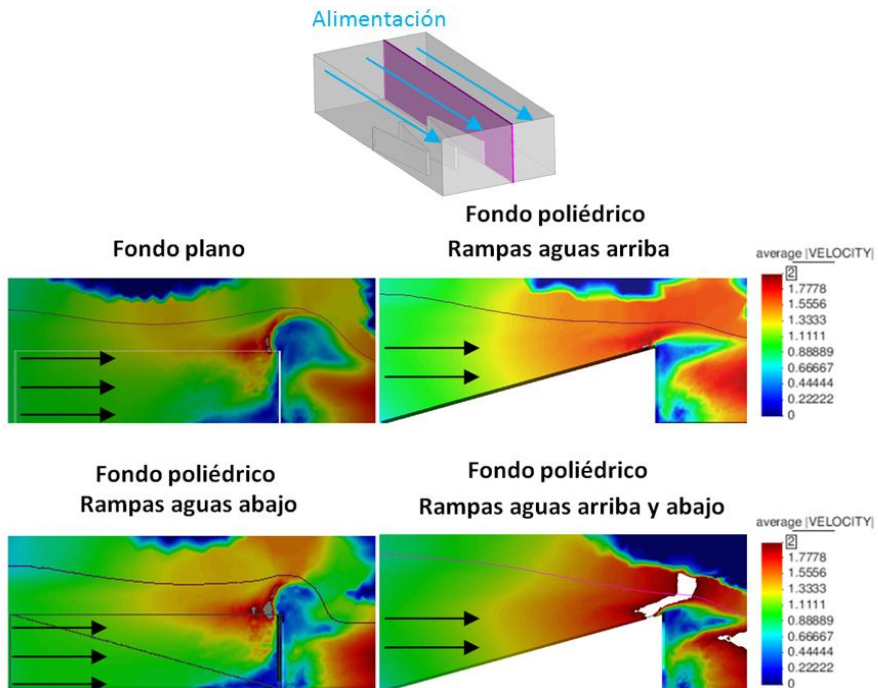


**Figura 6.** Comparación numérico-experimental de curvas de desagüe. Se indican con líneas punteadas un aumento del 10% y una disminución del 10% en los valores experimentales de  $C_d$ .

### 3.2 Patrón de flujo

El patrón de flujo que aparece en el aliviadero se estudió en base a los resultados de las simulaciones numéricas, para cada configuración de fondo y para las mayores relaciones de  $H_v/P$  calculadas. Se observaron 2 patrones de flujo característicos, uno para las configuraciones con fondo plano y fondo poliédrico con rampas aguas abajo, y un segundo para las configuraciones con fondo poliédrico con rampas aguas arriba y con rampas aguas arriba y aguas abajo. Estos distintos patrones de flujo repercuten en la forma de la superficie libre y en las distribuciones de velocidades.

En la Figura 7 se muestra la posición de la superficie libre y la distribución de velocidades en una sección paralela al sentido de alimentación del aliviadero, para las distintas configuraciones de fondos planteadas, poniéndose de manifiesto las repercusiones de los patrones de flujo antes apuntadas. En concreto cabe destacar que en las configuraciones de fondo con rampas aguas arriba, y con rampas aguas arriba y abajo la velocidad tiende a aumentar uniformemente conforme el agua avanza por el ciclo. Por el contrario en las configuraciones con rampas aguas abajo y con fondo plano la velocidad permanece significativamente constante hasta las proximidades del umbral de vertido, donde se acelera marcadamente. Además se aprecia cómo cambia la forma de la superficie libre entre las configuraciones que tienen rampas aguas arriba y las que no.

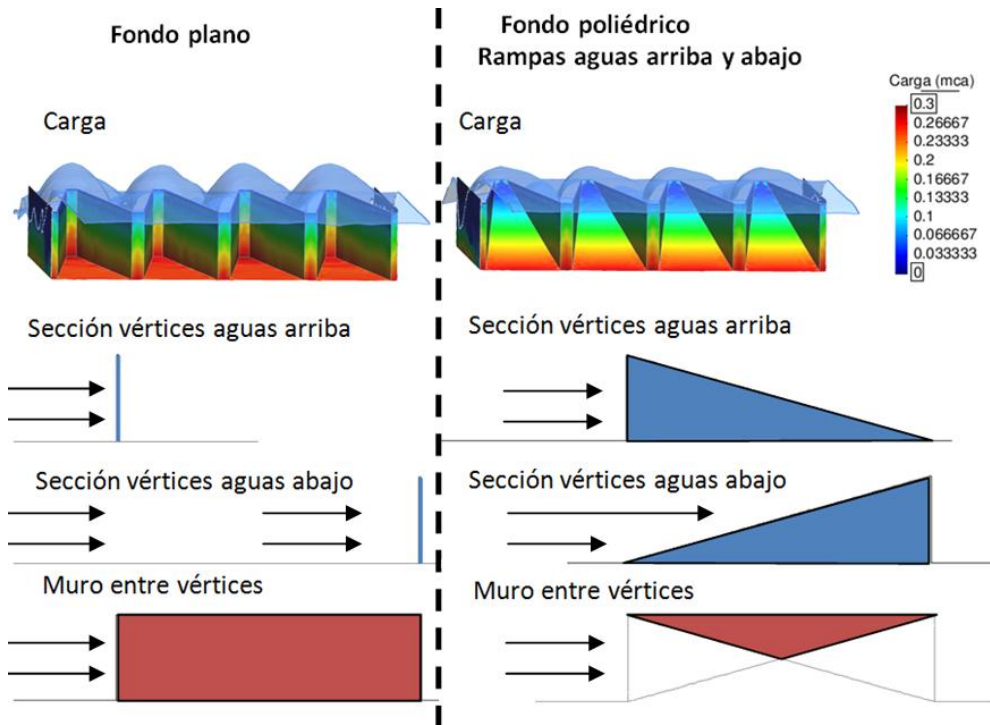


**Figura 7.** Superior: sección de estudio del patrón de flujo. Inferior: Distribución de velocidades en la sección de estudio, para las mayores  $H_v/P$  modeladas. Se indica en magenta la superficie libre.



### 3. 3 Acciones hidrodinámicas sobre muros

Las configuraciones de aliviadero en laberinto con fondos poliédricos reducen la superficie mojada de los muros que conforman el aliviadero, lo que conlleva a una reducción en las cargas hidrodinámicas a las que se encuentran sometidos éstos. Por otra parte las rampas que configuran los fondos poliédricos suponen a su vez un refuerzo estructural para los muros del laberinto, de tal forma que en los vértices del laberinto convierten secciones rectangulares en trapeciales y en los muros laterales entre vértices reducen la luz entre empotramientos. Por lo tanto la inclusión de los fondos poliédricos tiene 3 efectos positivos desde un punto de vista estructural, la disminución de cargas, el reguesamiento de secciones y la disminución de luces entre empotramientos. A modo de ilustración de lo anteriormente expuesto se muestran en la Figura 8 la comparación de las configuraciones con fondo plano y con fondo poliédrico con rampas aguas arriba y aguas abajo, en lo relativo a cargas, secciones resistentes en vértices y luz entre empotramientos en muros entre vértices.



**Figura 8.** Comparación entre las configuraciones con fondo plano y con fondo poliédrico con rampas aguas arriba y aguas abajo, para las mayores H/P modeladas. Superior: distribución de cargas hidrodinámicas, vista desde aguas arriba. Central: vistas laterales de las secciones resistentes en los vértices indicadas en azul. Inferior: vistas laterales de la luz entre empotramientos en muros entre vértices indicadas en rojo.

## 4. Conclusiones

De los resultados anteriormente expuestos se puede concluir que la inclusión de fondos poliédricos en un aliviadero en laberinto produce una modificación en el patrón de flujo del agua, con respecto a configuraciones de fondo plano. Esta modificación del patrón afecta tanto a las distribuciones de velocidades como a la forma de la superficie libre. Se ha constatado que la modificación del patrón de movimiento no mejora la capacidad de desagüe de los aliviaderos con fondos poliédricos respecto a una solución de fondo plano. Por otra parte los fondos poliédricos producen varios efectos positivos desde un punto de vista estructural, como son: la disminución de cargas hidrodinámicas, el reguesamiento de secciones en los vértices del laberinto y la disminución de luces entre empotramientos. Estas mejoras en el comportamiento estructural pueden conllevar un abaratamiento de los costes de construcción respecto a una solución tradicional de aliviadero en laberinto con fondo plano, por la vía de la reducción de cuantías de acero de armado necesarias.

Por tanto, a la hora de decidir si incluir fondos poliédricos en un aliviadero en laberinto se debe tener en cuenta tanto la disminución de capacidad de desagüe observada como el posible abaratamiento de costes que provoca su inclusión, debiéndose llegar a un compromiso entre ambos factores.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad por su apoyo en la financiación del proyecto de investigación: "POLILAB. Diseño del prototipo de una compuerta fusible recuperable tipo laberinto de fondo poliédrico para la mejora de la seguridad hidrológica de las presas". En el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (2008-2011). Programa Nacional de Cooperación Público-Privada. Subprograma INNPACTO (IPT- 2012-0185-380000).

## Referencias

- Blanc, P., y Lempérière, F. 2001. Labyrinth spillways have a promising future. *Int. J. on Hydropower and Dams*. 8(4), 129-131.
- Crookston, B.M., Tullis, B.P. 2013. Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. *J. Irrig. Drain. Eng.* 139(5), 363-370.
- Dadvand, P., Rossi, R., Oñate, E. 2010. An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Arch. Computational Meth. Eng.* 17, 253-297.
- Rossi, R., Larese, A., Dadvand, P. y Oñate, E. 2013. An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 71: 687–716. doi: 10.1002/fld.3680