

APLICACIÓN DE MÉTODOS NUMÉRICOS A LA INNOVACIÓN EN HIDRÁULICA DE PRESAS

Javier San Mauro, Fernando Salazar, Joaquín Irazábal

Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)

Paseo General Martínez Campos 41, 28010, Madrid, España

e-mail: jsanmauro@cimne.upc.edu, fsalazar@cimne.upc.edu, jirazabal@cimne.upc.edu

Rafael Morán, Miguel Ángel Toledo, León Morera

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

e-mail: rmoran@caminos.upm.es, matoledo@caminos.upm.es, lmorera@caminos.upm.es

Resumen

El diseño de aliviaderos y desagües de fondo de presas se ha basado históricamente en los resultados de campañas de ensayos en modelo físico, debido fundamentalmente a la inexistencia de métodos de cálculo numérico adecuados. Aunque esta metodología sigue siendo la más utilizada en la actualidad, el avance registrado en los métodos numéricos y en los medios de computación permiten optimizar el proceso de diseño de forma relevante. Con esta idea, CIMNE y la UPM están trabajando conjuntamente en el marco de diversos proyectos de investigación cuyo objeto es el desarrollo de soluciones innovadoras para los órganos de desagüe de presas. En estos proyectos se combinan los modelos numéricos y los modelos físicos para sacar el máximo provecho de los recursos empleados. La comunicación resume algunos de los resultados más relevantes de este trabajo desde el punto de vista de la modelación numérica, con especial atención a lo relativo al diseño de aliviaderos con cajeros altamente convergentes (Proyecto «ALCON»).

Palabras Clave. hidráulica, presas, PFEM, Kratos, CFD, aliviaderos

APPLICATION OF NUMERICAL METHODS TO INNOVATION IN DAM HYDRAULICS

Abstract

The design of spillways and bottom outlets of dams has historically been based on the results of physical model tests, mainly due to the lack of suitable numerical methods. Although this methodology is still frequently used nowadays, the advance in numerical methods and computer performance allows to optimize the design process. With this idea, CIMNE and UPM are working together within the framework of various research projects aimed at developing innovative solutions for hydraulic structures. These projects combine numerical models and physical tests to take full advantage of both approaches. The paper summarizes some of the most important results of this work from the point of view of numerical modeling, with special attention to the design of spillways with highly converged chute walls («ALCON» Project).

1. Introducción

El análisis del comportamiento de un gran número de estructuras hidráulicas (aliviaderos, cuencos de amortiguación, desagües de fondo, etc.) se ha venido realizando a lo largo de los años en base a ensayos de laboratorio en modelo físico. Esta forma de actuar ha permitido desarrollar criterios de diseño que han sido aplicados profusamente por la comunidad técnica a nivel mundial. La generalización realizada en base a estos ensayos ha evitado en ocasiones tener que realizar modelos físicos para cada caso particular. Los cuencos de disipación analizados y tabulados por el U. S. Bureau of Reclamation [1] de Estados Unidos son un claro ejemplo de este hecho. Esta metodología, apoyada en la experiencia adquirida por la comunidad presística con el paso de los años, ha funcionado razonablemente bien. Existe un gran número de presas con estructuras hidráulicas similares, que siguen las recomendaciones del USBR y cumplen los criterios de seguridad. Por el contrario, ello ha dificultado el desarrollo de soluciones innovadoras que permitieran mejorar el funcionamiento de las tipologías convencionales. En la actualidad, en muchos países se están revisando las normativas de seguridad de presas, lo que hace necesario ampliar la capacidad de desagüe de muchos de los aliviaderos en servicio. En ocasiones, las tipologías convencionales no son técnicamente viables, lo que ha generado un creciente interés por soluciones innovadoras. Los métodos numéricos se presentan como una herramienta clave para el desarrollo de estudios específicos de dichas soluciones, que avalen su funcionamiento y faciliten su implementación.

En este marco, el CIMNE y la UPM han establecido una colaboración estable para reunir las capacidades en modelación numérica del primero con la experiencia en ingeniería de presas y en modelación física de la segunda. El objetivo final es el desarrollo de criterios de diseño de nuevas tipologías de aliviaderos.

En la comunicación se hace una breve introducción a los métodos numéricos utilizados en las investigaciones, con ejemplos de aplicación. A continuación se describen con mayor detalle los resultados obtenidos en el marco del proyecto «ALCON», en el desarrollo de criterios de diseño de aliviaderos con cajeros altamente convergentes.

2. Métodos numéricos

Aunque entre los objetivos de la comunicación no se encuentra la descripción detallada de las herramientas numéricas empleadas, parece conveniente hacer una breve reseña de las mismas, aportando las referencias esenciales para que el lector interesado pueda profundizar en ellas.

Los primeros esquemas numéricos que se desarrollaron para la modelación de problemas de este tipo utilizan una formulación Euleriana, que discretiza el dominio de cálculo con una malla de elementos finitos que se mantiene constante durante toda la simulación. La evolución de la superficie libre se calcula utilizando una función suave (level-set) [2], o bien mediante un valor escalar que representa la cantidad de fluido que ocupa una región determinada (métodos de volumen de fluido). El principal inconveniente de estos métodos es el tratamiento de los términos convectivos, así como la detección de superficies libres muy irregulares y variables en el tiempo. En CIMNE, se ha desarrollado una herramienta basada en esta técnica e implementada en el entorno Kratos Multi-Physics [3]. La descripción detallada del método (en adelante, Kratos) puede encontrarse en [4]. Sus principales ingredientes son los siguientes:

1. Discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible usando el enfoque tradicional del Método de los Elementos Finitos.
2. Uso de elementos de bajo orden: triángulos en 2D y tetraedros en 3D.
3. Integración temporal mediante una versión semiexplícita del método de pasos fraccionados.
4. Mejora de la conservación de la masa mediante el uso de una técnica de «recuperación de errores» que permite considerar (y corregir) los errores cometidos en los pasos de tiempo precedentes.

5. Método level-set para la definición de la posición de la superficie libre.
6. Una función de extrapolación que permite calcular los valores de velocidad, presión y gradiente de presión en la zona no ocupada por el fluido adyacente a la superficie libre.

El algoritmo sigue los siguientes pasos:

1. Extrapolación de la velocidad, la presión y el gradiente de presiones al dominio de extrapolación, que es la región adyacente a la superficie libre que en t^n no está ocupada por el fluido.
2. Convección de la función level-set que define la posición de la superficie libre a partir del campo de velocidades en los dominios de fluido y de extrapolación. De este modo, se obtiene la posición de la superficie libre en el instante t^{n+1} .
3. Reinicialización de la función distancia en todo el dominio, partiendo de la superficie libre calculada en el paso anterior, que tiene un valor nulo de dicha función.
4. Resolución de las ecuaciones de momento.
5. Imposición de la condición de presión de modo que tiene un valor nulo en la superficie libre antes calculada y que respete la incompresibilidad.
6. Cálculo de la presión.
7. Cálculo de la velocidad.
8. Vuelta al paso 1.

En la actualidad, el método está paralelizado para funcionar en sistemas con memoria compartida. Se ha aplicado Kratos para el cálculo de las curvas de desagüe del aliviadero de la presa de Oliana [5], que tiene dos vanos de 17 m de longitud regulados por compuertas. Se realizaron cálculos fijando la carga sobre el vertedero y la apertura de compuertas, y registrando el caudal desaguado en cada situación. A partir de los resultados se obtuvieron las curvas de desagüe, como se muestra en la Figura 1.

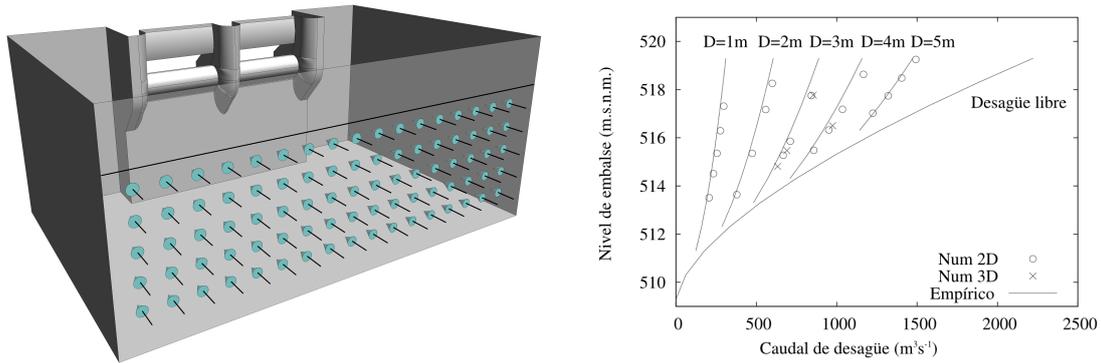


Figura 1: Modelación del aliviadero de la presa de Oliana con Kratos. Izquierda: dominio de cálculo. Derecha: curvas de desagüe [5]

Una alternativa a esta formulación es utilizar una descripción Lagrangiana para formular las ecuaciones de gobierno de los dominios del fluido y del contorno. En la formulación Lagrangiana se sigue el movimiento de cada una de las partículas de líquido o del sólido de forma individual y, consecuentemente, pueden considerarse como partículas cuyo movimiento se sigue durante la solución en el tiempo. En los últimos años, CIMNE ha desarrollado un tipo particular de formulación Lagrangiana para resolver problemas en los que interviene la interacción entre fluidos y sólidos. El método se denomina Método de Partículas y Elementos Finitos (PFEM). El PFEM trata los nodos en la malla, tanto en los dominios del fluido como de la estructura, como partículas que pueden moverse libremente e incluso separarse del dominio principal del fluido representando, por ejemplo, el efecto de gotas o chorreones de agua. Una malla de elementos finitos conecta los nodos que definen el dominio discretizado donde se resuelven las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos (para el líquido) y de la mecánica de sólidos (para la estructura) en la forma estándar del MEF [6], [7], [8]. Una ventaja de la formulación Lagrangiana es que los términos convectivos desaparecen de las ecuaciones del fluido. La dificultad, sin embargo, se transfiere al problema de mover adecuadamente (y eficientemente) los nodos de la malla. En general, suele ser necesario remallar a lo largo de la solución en cada paso de tiempo. El PFEM tiene ventajas frente a los métodos Eulerianos para seguir el movimiento de las partículas del fluido en flujos en donde la superficie libre es muy irregular y variable en el tiempo. Una de las primeras aplicaciones del PFEM a hidráulica de presas consistió en la simulación del funcionamiento del aliviadero de la presa de Itoiz (Figura 2). Se reprodujeron tanto el diseño original como el final, resultado de las

modificaciones realizadas tras la campaña de ensayos en modelo físico. En el diseño inicial, se observa la formación de ondas de choque junto a los cajeros, que confluyen justo a la entrada del cuenco, y pequeños sobrevertidos en el canal de descarga. En el diseño final se mantienen las ondas de choque, pero no llegan a confluir, con lo que el reparto del caudal es más uniforme en el cuenco y el comportamiento de éste más adecuado. Además, no hay sobrevertido. Estos mismos patrones de movimiento se observaron en los modelos físicos.

El PFEM se ha utilizado también en otros proyectos de investigación en el ámbito de la seguridad de presas para modelar fenómenos como el proceso de rotura por sobrevertido de presas de materiales sueltos [9], o el movimiento sobre aliviaderos de bloques en forma de cuña (Proyecto «ACUÑA»).

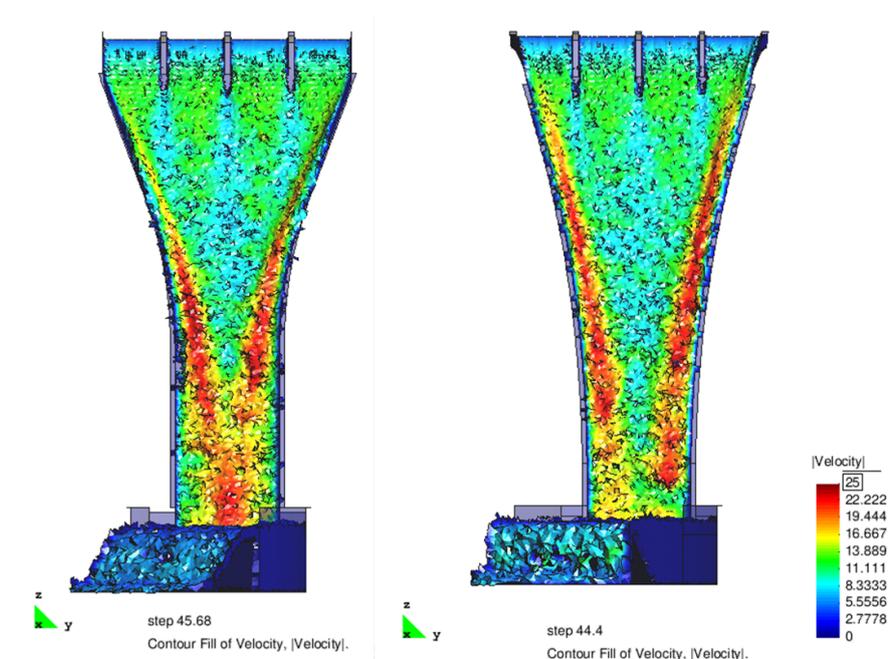


Figura 2: Vista en alzado del modelo numérico del aliviadero de la presa de Itoiz. Izquierda: diseño original. Derecha: diseño final

3. Proyecto ALCON

Los aliviaderos con cajeros altamente convergentes son una solución potencialmente ventajosa para el aumento de la capacidad de desagüe de presas de gravedad existentes.

Tiene la particularidad de que la longitud del vertedero es sensiblemente mayor que el ancho del cuenco amortiguador. Para conducir el caudal vertido al cuenco, se disponen unos cajeros con fuerte convergencia.

En presas de generación hidroeléctrica el aumento de la capacidad de desagüe permite elevar la cota del nivel máximo normal de explotación en el embalse manteniendo los resguardos. Esto se traduce en un incremento tanto de la altura del salto como del volumen de agua disponible para turbinación, aumentando por tanto la capacidad de producción de energía. La Figura 3 refleja esta ventaja.

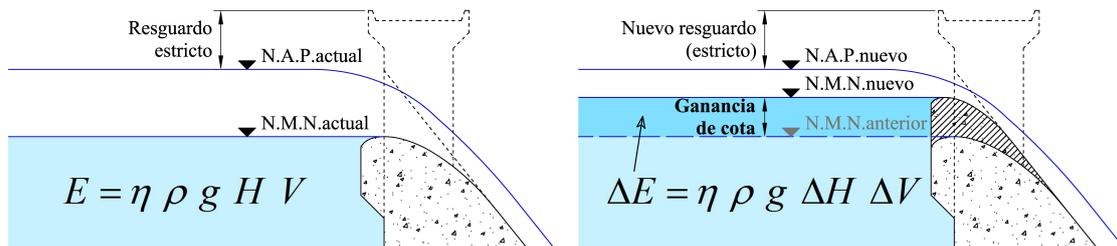


Figura 3: Incremento del potencial hidroeléctrico que posibilita la elevación del Nivel de Embalse Normal



Figura 4: Ejemplos de presas con cajeros altamente convergentes. Izquierda: presa de Chubetsu, Japón. Derecha: presa de Doña Ana, España.

Esta tipología ya ha sido utilizada en varias presas tanto en España como en el resto del mundo. En la Figura 4 se muestran dos imágenes como ejemplo de presas ya construidas con esta solución de aliviadero.

Sin embargo no existen referencias con criterios de diseño de carácter general, por lo que se hace necesario a la hora de proyectar un aliviadero de este tipo realizar ensayos

en modelo físico específicos en cada caso. Con el objetivo desarrollar una metodología para el cálculo hidráulico y proyecto de este tipo de aliviaderos se está llevando a cabo el proyecto ALCON, en el que se combinan ensayos en laboratorio con modelos numéricos.

3.1. Modelación física

La modelación física del proyecto ALCON se está llevando a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid. A continuación se resumen las características y dimensiones principales del modelo físico construido:

1. Caudal de diseño: 250 l/s
2. Altura de la presa con respecto al cuenco: 1,50 m
3. Longitud máxima del labio del aliviadero: 5,00 m
4. Talud del paramento: 0,8
5. Ancho del cuenco amortiguador: 1,00 m
6. Longitud del cuenco amortiguador: variable
7. Altura del vertedero final del cuenco: variable
8. Instrumentación empleada: 2 caudalímetros, 20 transductores de presión situados en la solera del cuenco, 1 sonda de nivel, limnímetros mecánicos y un sistema de adquisición de datos.

Una vista general del modelo físico se presenta en la parte izquierda de la Figura 5.

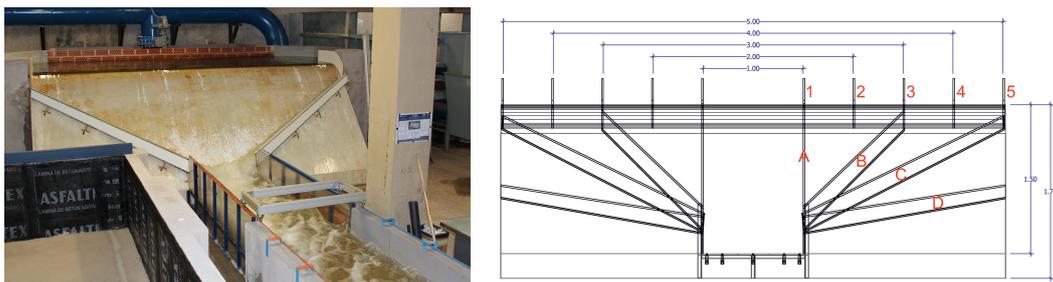


Figura 5: Vista general del modelo físico funcionando (izquierda). Alzado descriptivo de las configuraciones planteadas para la primera campaña de ensayos (derecha).

3.2. Modelación numérica

Los objetivos de la modelación numérica son los siguientes:

1. Validar el modelo numérico.
2. Completar la información obtenida de los modelos físicos.
3. Comprobar el funcionamiento de diseños diferentes de los ensayados en laboratorio.

Se ha realizado un ensayo de calibración que consiste en la reproducción de un modelo físico sencillo realizado en las instalaciones de la UPM. Este ensayo consistió en permitir el desagüe libre sobre un vertedero con la forma de típica del aliviadero de una presa de gravedad, dispuesto sobre un canal rectangular. El calado aguas abajo se controló mediante la variación de la apertura de una compuerta, de modo que se forzó la formación de un resalto hidráulico. La Figura 6 muestra una imagen del ensayo y su reproducción con el modelo numérico.

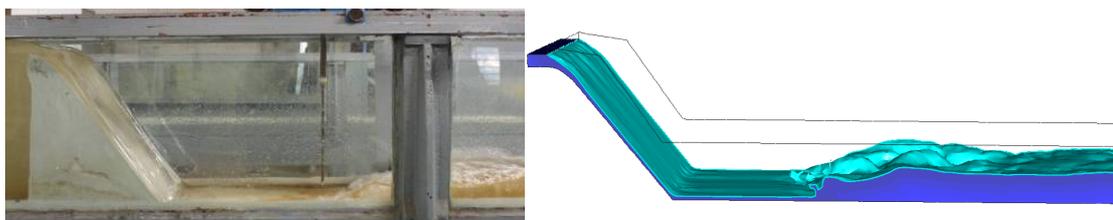


Figura 6: Izquierda: resalto forzado en el modelo físico. Derecha: reproducción del caso con el modelo numérico.

3.3. Información complementaria a los modelos físicos

Los modelos numéricos tienen la ventaja de poder obtener de manera sencilla valores de magnitudes de difícil medida en un ensayo en modelo físico. Por ello se han realizado simultáneamente varios ensayos en modelo físico y numérico de la misma geometría de aliviadero, con los mismos caudales de vertido y mismas características del cuenco amortiguador, con la finalidad de completar la información obtenida de los ensayos en modelo físico. En la Figura 7 se muestra el resultado de una de estas configuraciones. Como validación previa a la toma de datos del modelo numérico, se realizaron comparaciones cualitativas y cuantitativas con el modelo físico. Por una parte, se observó el comportamiento del agua en el cuenco amortiguador (formación o no de resalto) y en los

canales laterales de descarga. Por otra, se compararon los registros de calados y presiones en solera en casos análogos. En la Figura 8 se muestra la presión media en el eje del cuenco medida en laboratorio y su comparación con la registrada en el modelo numérico correspondiente.

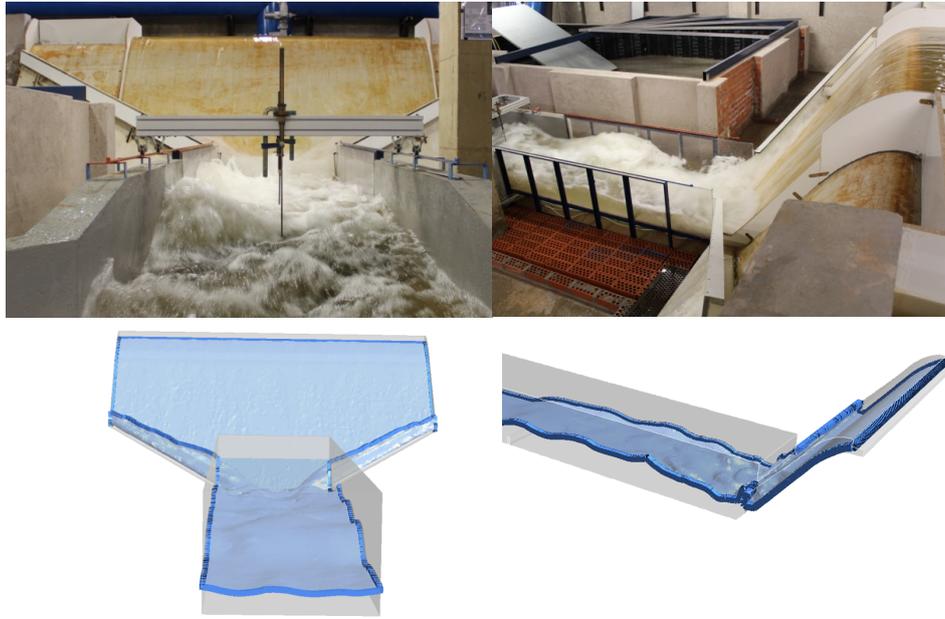


Figura 7: Comparación entre modelo físico y numérico

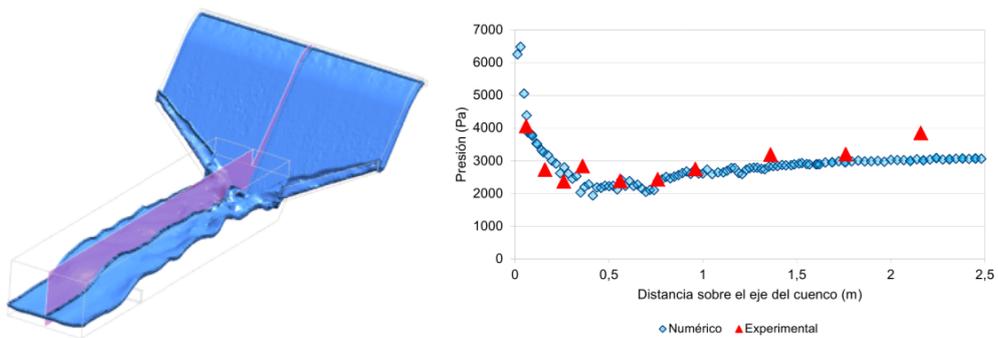


Figura 8: Izquierda: situación de la sección de control de presiones en la solera del cuenco. Derecha: comparación de la presión media en el eje de la solera del cuenco en uno de los casos analizados.

3.4. Comprobación del funcionamiento de distintas geometrías

Los modelos numéricos han permitido modelar situaciones que quedan fuera de las posibilidades de la modelación física o le generan dificultades importantes. La posibilidad de modificar la posición y geometría de los canales laterales de descarga en los modelos numéricos de manera sencilla ha permitido estudiar el régimen helicoidal que se forma en ellos y sus condiciones de desbordamiento. Se ha comprobado cómo al reducirse la pendiente de los canales laterales aumenta el calado y por tanto es necesario disponer una sección mayor. Como ejemplo se muestra en la Figura 9 un modelo con caudal de vertido superior al que puede proporcionar el equipo de bombeo del laboratorio de la UPM con dos configuraciones de cuenco amortiguador. También se resalta la trayectoria helicoidal del agua en los canales laterales de descarga, y se aprecia que no existen desbordamientos para esta configuración de canales laterales y caudal de 250 l/s.

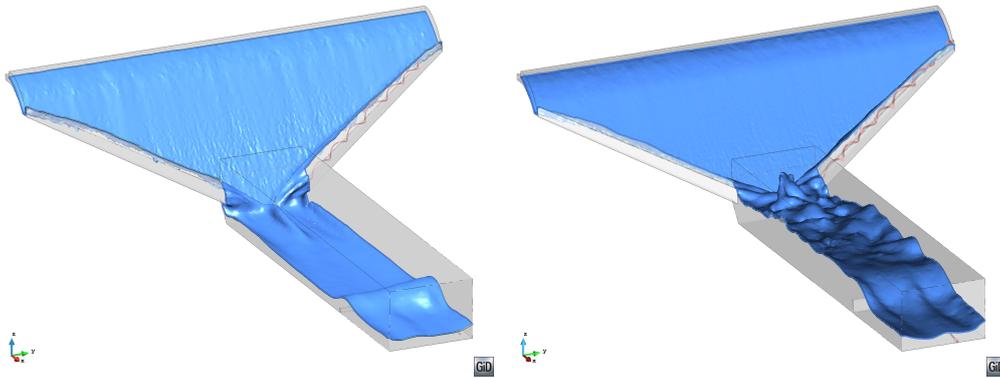


Figura 9: Perspectiva de la superficie libre de dos modelos numéricos para una situación de vertido de 250 l/s. Izquierda: bordillo de salida de 0,05 m; resalto barrido. Derecha: bordillo de salida de 0,15 m; se forma resalto en el cuenco.

Una de las aplicaciones de los aliviaderos altamente convergentes es el aumento de la capacidad de desagüe de presas existentes, en las cuales los elementos de restitución del agua al cauce ya están construidos. Recogiendo esta idea se han modelado numéricamente aliviaderos rectos con distintos caudales de vertido y configuraciones de cuenco amortiguador y se han comparado con lo obtenido para cuencos amortiguadores idénticos pero alimentados por cajeros altamente convergentes. En la Figura 10 se muestra un aliviadero recto de 1 m de embocadura vertiendo 50 l/s y un aliviadero altamente convergente con 5 m de embocadura vertiendo 250 l/s. Ambos modelos tienen asociado el mismo cuenco amortiguador, pero presentan distinto comportamiento.

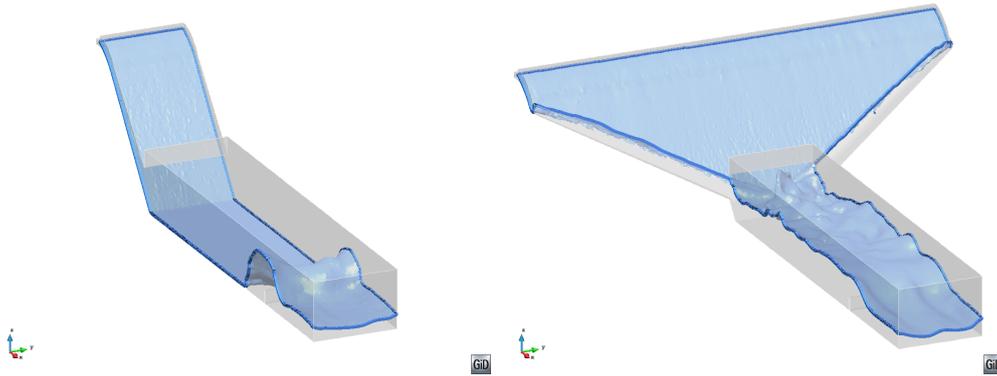


Figura 10: Izquierda: perspectiva del funcionamiento de un aliviadero recto de 1 m de ancho vertiendo 50 l/s. No se produce resalto, porque el calado aguas abajo es insuficiente. Derecha: mismo caudal unitario, con 5 m de longitud de vertido y 250 l/s. La disipación que se produce en los canales laterales favorece el funcionamiento del cuenco, que es idéntico en ambos casos: 3 m de longitud y altura de bordillo de 0,15 m.

3.5. Estructuras especiales

Teniendo en cuenta la práctica habitual en el diseño de cuencos amortiguadores de introducir elementos de disipación de energía para mejorar el funcionamiento de los mismos, se han llevado a cabo unas primeras pruebas con estos elementos. En la Figura 11 se muestra un ejemplo en el que se han introducido unos dientes de disipación en un caso en el que no se formaba resalto con la geometría convencional. Se observa que los dientes favorecen la disipación, y facilitan la formación del resalto.

Elementos de este tipo pueden favorecer la disipación de energía en estas estructuras. Hasta el momento solo se han hecho pruebas en modelo numérico, si bien es una de las líneas de investigación abiertas para el futuro.

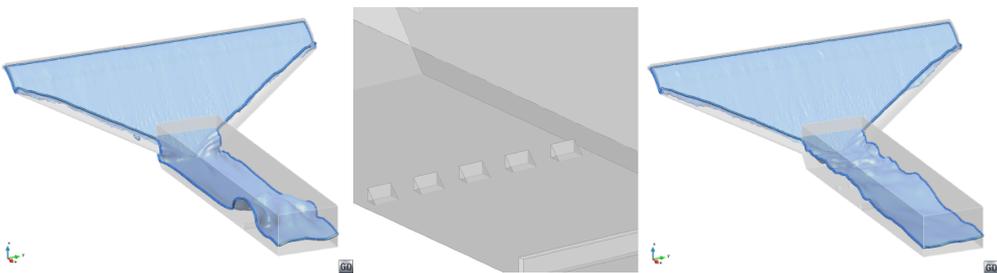


Figura 11: Funcionamiento del cuenco. Izquierda: modelo con cuenco liso. Centro: detalle de dientes de impacto. Derecha: los dientes provocan la formación del resalto.

4. Conclusiones

Se han presentado ejemplos de aplicación de herramientas de cálculo numérico para la resolución de problemas relacionados con la hidráulica de presas. Los resultados permiten afirmar que la modelación numérica puede ser una herramienta fundamental para la mejora del diseño de órganos de desagüe de presas, así como para el desarrollo de soluciones innovadoras.

La utilización conjunta de métodos numéricos y experimentales en el marco de la colaboración CIMNE-UPM ha mostrado ser provechosa para alcanzar los objetivos planteados, permitiendo optimizar los recursos necesarios.

Los aliviaderos con cajeros altamente convergentes pueden ser una solución ventajosa para el incremento de la capacidad de desagüe de presas de gravedad. Los canales laterales favorecen la disipación de energía, lo que permite su implementación con pequeñas mejoras sobre un cuenco convencional. La introducción de dientes de impacto pueden mejorar la disipación, aspecto que se prevé investigar con más detalle en el futuro.

La combinación entre modelos numéricos y experimentales ha resultado muy positiva en el marco de los proyectos de investigación, ya que ha permitido optimizar los recursos empleados y extraer el máximo de información de los ensayos.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Raimundo Lafuente, Director Técnico de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), por facilitar la información necesaria para la modelación del aliviadero de Itoiz; a Gonzalo Rabasa (CHE) y Francisco Riquelme (INHISA), por promover la modelación numérica del aliviadero de Oliana.

También al Ministerio de Ciencia e Innovación por su apoyo en la financiación de los siguientes proyectos de investigación:

1. «Rotura del elemento impermeable de presas de materiales sueltos en situación de sobreevertido y análisis de protecciones combinando modelación física e inteligencia artificial» de código BIA2010-21350-C03-03, perteneciente a la convocatoria de 2010 del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental No Orientada.

2. «Desarrollo de un prototipo de bloque en forma de cuña y de la metodología para su uso como protección frente a la erosión en presas o balsas de materiales sueltos» de código IPT-2011-0997-020000, perteneciente a la convocatoria de 2011 del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del Subprograma INNPACTO.
3. «Desarrollo de criterios de diseño para el incremento de la capacidad de desagüe en presas de fábrica mediante aliviaderos con cajeros altamente convergentes» de código IPT-310000-2010-11, perteneciente a la convocatoria de 2010 del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del Subprograma INNPACTO.

Referencias

- [1] B. of Reclamation (1977). Design of small dams. *Washington. DC: Govt. Print. Off.*
- [2] S. Osher, R. P. Fedkiw (2001). Level set methods: an overview and some recent results. *Journal of Computational physics*, 169(2):463–502.
- [3] P. Dadvand, R. Rossi, E. Oñate (2010). An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Archives of computational methods in engineering*, 17(3):253–297.
- [4] R. Rossi, A. Larese, P. Dadvand, E. Oñate (2012). An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. *Aceptado*.
- [5] F. Salazar, R. Morán, R. Rossi, E. Oñate (2013). Analysis of the discharge capacity of radial-gated spillways using cfd and ann-oliana dam case study. *Journal of Hydraulic Research*, (ahead-of-print):1–9.
- [6] S. Idelsohn, E. Oñate, F. D. Pin, N. Calvo (2006). Fluid–structure interaction using the particle finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(17):2100–2123.
- [7] E. Oñate, S. R. Idelsohn, F. Del Pin, R. Aubry (2004). The particle finite element method—an overview. *International Journal of Computational Methods*, 1(02):267–307.
- [8] E. Oñate, S. R. Idelsohn, M. A. Celigueta, R. Rossi (2008). Advances in the particle finite element method for the analysis of fluid–multibody interaction and bed erosion in free surface flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(19):1777–1800.

- [9] A. Larese de Tetto (2012). *A coupled Eulerian-PFEM model for the simulation of overtopping in rockfill dams*. Ph.D. thesis, UPC.