

Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas

Advances in the design of dam engineering in applied research through physical and numerical modeling

Balairón, L.^a, López, D.^b, Morán, R.^{c1}, Ramos, T.^d y Toledo, M.A.^{c2}

^aDirector del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX. Pº Bajo Virgen del Puerto, 3, 28005 Madrid, España E-mail: luis.balairon@cedex.es,

^bCoordinador de Programa Técnico Científico en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX. Pº Bajo Virgen del Puerto, 3, 28005 Madrid, España. David.lopez@cedex.es,

^cDpto. Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Univ. Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid. E-mail: ^{c1} rmoran@caminos.upm.es, ^{c2} matoledo@caminos.upm.es

^dInvestigadora en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX. Pº Bajo Virgen del Puerto, 3, 28005 Madrid, España. E-mail: tamara.ramos@cedex.es

Recibido: 25/06/2014

Aceptado: 23/07/2014

Publicado: 01/08/2014

RESUMEN

En la actualidad, y en todo el mundo, hay en desarrollo un muy importante número de proyectos de obras hidráulicas de diversa naturaleza (presas, canales, desaladoras, tanques de tormentas, centrales hidroeléctricas, obras de saneamiento, etc.), donde España es, en muchas ocasiones, el marco de referencia. En este artículo, se presentan algunas de las principales investigaciones en curso en el campo de la modelación física y numérica de la ingeniería de presas, con el objetivo de mejorar el conocimiento de los fenómenos hidráulicos que intervienen en su gestión y desarrollar nuevas herramientas de diseño que permitan dar solución a problemas hidráulicos complejos.

Palabras clave: Obras hidráulicas; presas; modelación física; modelación numérica.

ABSTRACT

Nowadays, an important number of hydraulic work projects as dams, channels, desalination plants, storm tanks, power plants, etc. have being carried out worldwide however Spain is frequently, the framework to look at. In this paper, the main ongoing applied researches on hydraulic enginery field of dam engineering will be presented regarding both physical and numerical modeling. The main purpose is to improve the knowledge of hydraulic phenomena and to develop new design tools for solving complex hydraulic problems.

Key words: Hydraulic structures, dams; physical modelling; numerical modelling.

INTRODUCCIÓN

España es un país de referencia en lo que se refiere al proyecto y construcción de grandes obras hidráulicas. Quizás el mejor exponente de lo anterior sean las más de 1300 grandes presas, que hay en servicio en nuestro país, muchas de ellas ejecutadas durante la segunda mitad del siglo pasado (unas 900), si bien en lo que va de siglo XXI se han construido otras 50 presas. Pero la experiencia española en el campo de las grandes infraestructuras hidráulicas no se limita únicamente al ámbito de las obras

de regulación, pues en otros campos de la ingeniería se han desarrollado también infraestructuras de referencia mundial, como puedan ser por ejemplo los grandes trasvases (véase el del Tajo-Segura o el conocido como minitransvase del Ebro), las obras de defensa contra inundaciones (por ejemplo, las importantes infraestructuras incluidas en el Plan Sur en Valencia, en el Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la antigua CH Norte o en el Plan General de Defensa Frente a Inundaciones en la cuenca del Segura, tras las avenidas sufridas en Valencia, Bilbao o Murcia en los años 1957, 1983 y 1987, respectivamente), las obras de regadío (con más de 3 millones de hectáreas en riego) o las obras de saneamiento y drenaje urbano (impulsando de manera decidida la construcción de colectores y plantas depuradoras en el marco del Plan Nacional de Saneamiento y Drenaje Urbano de 1995).

Además de lo anterior, en años recientes nuestra tecnología hidráulica ha sido también objeto de referencia unánime en otros sectores como el de la desalación, la hidroelectricidad o el de las grandes obras de saneamiento y drenaje urbano, entre otros. En el primero de ellos, el impulso dado a esta tecnología en nuestro país ha hecho que nos hayamos convertido en el cuarto país del mundo en capacidad de desalación instalada, con unos $3 \cdot 10^6$ m³/día donde solamente, la recientemente inaugurada desaladora de El Llobregat tiene una capacidad de producción de 60 hm³/año y una capacidad continua de $2 \cdot 10^5$ m³/d. En el campo de la hidroelectricidad, cabe citar el complejo hidroeléctrico de Cortes-La Muela, en servicio desde 2013, que con 2000 MW de potencia, será capaz de generar unos 5000 GWh y que se ha convertido en la mayor planta hidroeléctrica de bombeo de Europa. En el sector del drenaje urbano, la tecnología española está siendo un referente para otros países en estos primeros años de siglo XXI, sobre todo en lo que se refiere al sector de los grandes depósitos de laminación de tormentas. En este último cabe citar la construcción de 10 depósitos con una capacidad total de casi $5 \cdot 10^5$ m³ en Barcelona y el desarrollo del Plan de Mejora de la Calidad de las Aguas del Río Manzanares en Madrid con la construcción de 27 tanques de tormenta, con un volumen total de $1.3 \cdot 10^6$ m³; los depósitos de Arroyofresno y Butarque con $4 \cdot 10^5$ m³ cada uno.

Y si ampliamos la mirada al resto del mundo, observamos también un panorama en el que, en la actualidad, hay en desarrollo un buen número de obras hidráulicas de referencia, con participación activa, en muchas ocasiones, de la tecnología española, en mayor o menor medida. Por ejemplo, la ampliación del Canal de Panamá, que comporta la construcción del tercer juego de esclusas que unen los océanos Atlántico y Pacífico. O también en este ámbito, se encuentra en fase de proyecto el posible Canal de Nicaragua para unir el mar Caribe y el océano Pacífico, el cual supondrá, posiblemente, la infraestructura más ambiciosa en la historia de América Latina, con tres veces la extensión del canal de Panamá (unos 230 km). Otra obra hidráulica de referencia mundial en ejecución en la actualidad es el trasvase de agua Sur-Norte en China. El proyecto planea desviar 50000 hm³/año de agua del río Yangtse a través de sus canales oriental, central y occidental, con el fin de aliviar la escasez hídrica en el norte del país para 2050.

En el ámbito de la ingeniería tradicional de presas también hay actuaciones relevantes en el mundo en los últimos años asociadas, sobre todo, a grandes desarrollos hidroeléctricos. El mayor exponente es, sin duda, la presa de las Tres Gargantas en el curso del río Yangtsé en China, la cual se configura como la central hidroeléctrica más grande del mundo con una potencia instalada de 24000 MW. Así mismo, hay más complejos hidroeléctricos en desarrollo en casi todas las regiones del mundo, por ejemplo: el Sistema de Belo Monte en Brasil (11200 MW de potencia), el de Etalin en la India (3000 MW), o los sistemas Alto Tâmega (1000 MW de capacidad) y Alqueva (380 MW) en Portugal.

La desalación es también objeto de ambiciosos proyectos en ejecución en el mundo en la actualidad, como la desaladora de Adelaida (Australia) de $3 \cdot 10^5$ m³/día o la de Ashod (Israel), que será la mayor del mundo, de $3.84 \cdot 10^5$ m³/día. En el sector del drenaje urbano, pueden reseñarse como referentes mundiales los proyectos G-Cans Project en Tokyo (finalizado en 2009 con un depósito de $3.5 \cdot 10^5$ m³ de capacidad y un túnel de 10 m de diámetro y 6.3 km de longitud totalizando un volumen suplementario de otros $6.4 \cdot 10^5$ m³) o el Túnel Emisor Oriente TEO para evitar inundaciones en el valle de México (en ejecución en la actualidad y que tendrá una longitud aproximada de 62 km, 7 m de diámetro y una capacidad de hasta 150 m³/s).

En consecuencia, tanto en España como en el mundo hay en marcha importantísimos proyectos de obras hidráulicas de naturaleza diversa (presas, canales, desaladoras, tanques de tormenta, centrales hidroeléctricas, etc.) que hacen ver que, lejos de ser las obras hidráulicas algo del pasado, sigue siendo necesario su proyecto y construcción. Para el adecuado desarrollo de estas infraestructuras es necesario seguir avanzando en el conocimiento de los fenómenos hidráulicos que las gobiernan y desarrollar nuevas herramientas de cálculo, incluyendo técnicas de modelación física y numérica.

De todo lo anterior, el presente artículo se va a centrar en los aspectos relacionados con la ingeniería hidráulica de las presas que en este momento son objeto de proyectos de investigación aplicada y de avance en los métodos de diseño en los principales grupos de investigación en España.

DE LA MODELACIÓN FÍSICA Y/O NUMÉRICA A LA MODELACIÓN HÍBRIDA

Introducción. El camino hacia la modelación híbrida

En el ámbito del diseño de las estructuras hidráulicas, la modelación física y la simulación matemática constituyen dos técnicas diferentes para la resolución de problemas hidráulicos complejos de muy diversa naturaleza que, en el inicio de cada una de ellas, discurrieron en paralelo sin apenas interferencia de la una en la otra. La primera de las dos técnicas citadas (la modelación física aplicada a los flujos en lámina libre) tuvo sus orígenes en los Estados Unidos de América en los primeros años del siglo pasado, asociada a los modelos reducidos en laboratorio llevados a cabo en el US Bureau of Reclamation con motivo de la construcción de las grandes presas de Hoover, Grand Coulee, Glen Canyon, Yellowtail y Morrow Point. En España, el principal exponente de esta tecnología es el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, donde se realizó el primer estudio en modelo reducido en 1927 en sus antiguas instalaciones ubicadas entonces en la Escuela de Ingenieros de Caminos, en su antigua sede junto al parque del Retiro. Sus actuales instalaciones en la ribera del Manzanares (que datan de los años 1960) han prestado y prestan un apoyo tecnológico de gran importancia sobre todo a la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

En paralelo a la modelación física para la resolución de problemas hidráulicos complejos, los ingenieros hidráulicos dispusieron de otra herramienta para la misma finalidad desde la década de los 60 del siglo pasado que era la aplicación general de los modelos matemáticos a la hidráulica del flujo en lámina libre, con el advenimiento y desarrollo de los ordenadores y métodos de programación.

El uso de la modelación matemática aplicada a los problemas de la ingeniería del agua, y de manera simplificada, tuvo, a su vez, dos posibilidades: la utilización de modelos comerciales desarrollados por instituciones públicas o privadas que tratan las ecuaciones de comportamiento de una forma bastante simplificada para hacer asequible su uso (convenientemente revisadas, eso sí) o la elaboración de modelos *ad hoc* con una aplicación válida, en el mejor de los casos, a un muy reducido número de casos que motivaron la necesidad de esos modelos específicos (estos modelos fueron desarrollados sobre todo desde centros de investigación y entornos universitarios).

Pese al tiempo transcurrido (casi quince años), las explicaciones expuestas en Mateos (2000) sobre el uso de ambas herramientas para la resolución de problemas hidráulicos complejos (las características de unos y otros, sus ventajas e inconvenientes o las prognosis de futuro sobre el empleo de ambos) tienen plena actualidad hoy en día (ver también Toobes y Chanson, 2011).

De esta manera, entre las ventajas de la modelación matemática se pueden destacar la reducción de tiempo y de costes de ejecución frente a los modelos físicos. Además permite abordar estudios con mayor generalidad que posibilitan acotar el estudio, aunque con menor precisión que la modelación física. La modelación matemática genera, además, información para todo el dominio de cálculo. También posibilita observar y analizar muchas variables del flujo como la velocidad, la presión, la disipación turbulenta y la vorticidad entre otras. La observación y cuantificación de ciertos fenómenos puede resultar muy difícil en los modelos físicos. Ello no significa que los modelos matemáticos puedan sustituirlos en cualquier tipo de obra hidráulica, sino por el contrario, pueden complementarse aprovechando la potencialidad que cada uno posee.

La modelación física, por su parte, sigue presentando importantes ventajas frente a la numérica, como por ejemplo, el no estar limitados por la potencia de cálculo, una mejor aproximación al proceso físico, al no tener que emplear métodos numéricos para resolver las ecuaciones que rigen el problema, una inmediata interacción con el modelo que facilita la búsqueda de mejoras hidráulicas y además permite visualizar e interpretar fenómenos hidráulicos de gran complejidad.

Con todo, en la actualidad se ha generalizado el empleo de modelos numéricos unidimensionales y bidimensionales en estudios de flujos en lámina libre, siendo menor, aunque con un crecimiento importante, el empleo de modelos numéricos tridimensionales para estudios de interacción de flujo con estructuras. Para todos estos estudios hay disponibles tanto modelos de carácter comercial¹ como desarrollados en centros de investigación públicos (Garrote *et al.*, 2008). El desarrollo de las nuevas técnicas de computación está permitiendo abordar el desarrollo y calibración de modelos numéricos tridimensionales para el estudio de detalle de flujo con estructuras, con resultados muy esperanzadores.

En cualquier caso, la evolución de las dos herramientas mencionadas (modelación física y numérica) siguió, inicialmente, caminos paralelos con escasos puntos en común, dando lugar a dos cuerpos de doctrina diferenciados a los que alternativamente se acudía, según el caso. Sin embargo, desde la década de los 80 ó 90 del siglo pasado, dichos caminos de aplicación práctica comenzaron a converger entre sí debido a la reconsideración de un conjunto de conceptos (la física del problema, el campo de aplicación de las leyes de semejanza, etc.)

Y es aquí donde la modelación híbrida tiene su importante papel (véase Fernández Bono, 1992 ó Balairón, 2011), puesto que el desfase entre la naturaleza tridimensional del problema real y la caracterización uni o bidimensional del análisis numérico se puede cubrir, y de hecho ya es una realidad en el campo que nos ocupa, mediante un análisis cíclico interactivo entre la modelación matemática y la modelación física. Así pues, ante un problema hidráulico complejo (como son las interacciones suelo – agua – estructuras, de manera inevitablemente tridimensional y turbulento), la técnica de la modelación matemática en la actualidad dispone de las herramientas suficientes para simular su comportamiento con un grado de aproximación suficiente, si bien sigue siendo incapaz de reproducir los efectos tridimensionales de las condiciones de contorno locales complejas.

En este aspecto, la modelación física, utilizando los resultados parciales de la simulación numérica previa, puede aportar la información que la hidráulica computacional necesita, iniciando un proceso de realimentación cíclica que permite mejorar la calidad de la información obtenida con ambas herramientas y avanzar hacia una solución extrapolable con la máxima fiabilidad al prototipo cuyo funcionamiento se estudia.

Esta modelación híbrida físico matemática en la hidráulica se ve potenciada en los últimos años de manera muy intensa con trabajos de calibración y toma de datos de forma directa y muy intensiva directamente en el prototipo en estudio en la naturaleza, lo que permite calibrar de manera más precisa que hace años los resultados de los modelos físicos o matemáticos con la realidad simulada. Esto es posible en buena medida gracias al abaratamiento y simplificación de las técnicas de instrumentación, toma de datos y posterior tratamiento y almacenamiento de la información registrada, lo que facilita enormemente el uso de los modelos físicos o numéricos en el campo de la ingeniería del agua, abriendo un camino imparables en el futuro.

Lógicamente, en la medida que avanza la calibración de los modelos numéricos y aumentan las capacidades de cálculo, irá aumentando su campo de aplicación. En cualquier caso la modelación física sigue siendo imprescindible para seguir profundizando en el conocimiento de fenómenos tan complejos como los flujos bifásicos emulsionados (aire-agua) y la física del transporte de sedimentos.

Panorama de la modelación física en el mundo

Como se ha indicado en el apartado anterior, la modelación física de estructuras hidráulicas y actuaciones fluviales sigue siendo una disciplina de plena actividad, tanto en alguna de sus misiones tradicionales como para enfrentarse a nuevos problemas o incluso como bancos de pruebas para los modelos matemáticos. Ello hace que países de todos los ámbitos geográficos sigan disponiendo de laboratorios de hidráulica en pleno funcionamiento adscritos en su mayoría al sector público. En estos momentos, los principales Laboratorios de Hidráulica del mundo se encuentran localizados en China (Nanjing Hydraulic Research Institute NHRI y China Institute of Water Resources and Hydropower Research IWHR, en Pekin).

En sentido contrario, en Europa, y analizado en su conjunto, los laboratorios de hidráulica continental han perdido algo de peso en los últimos años. El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX es, probablemente,

¹ Entre los principales modelos matemáticos comerciales empleados en el diseño hidráulico de estructuras hidráulicas complejas, pueden destacarse los modelos FLOW 3D, MIKE HD 3D, DELFT 3D, XFLOW ó ANSYS CFX.

el mayor de Europa en funcionamiento en estos momentos, manteniéndose también con bastante actividad LNEC (en Portugal) y ARTELIA y EDF (en Francia²). Institutos históricos como Wallingford (UK), DHI (Dinamarca), Deltares (Holanda), o VITUKI (Hungría) más recientemente este último, han abandonado sus actividades o las han reducido en todo o en parte en los últimos años³.

En España, los Laboratorios de Hidráulica de las Universidades Politécnicas también disponen de instalaciones para la modelación física, si bien con menor capacidad que la del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX: UP Cataluña, UP Valencia, UP Cartagena, UP Madrid y U Castilla La Mancha. Hay una buena coordinación con todos ellos (especialmente en el ámbito de la investigación aplicada y la difusión del conocimiento) a través de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España RLHE.

En Iberoamérica, los principales Laboratorios de Hidráulica que siguen activos son los siguientes: IMTA en México, INA en Argentina e INH en Chile. El resto de países iberoamericanos (Ecuador, Uruguay, Perú, Colombia, Cuba, y otros) tienen también Laboratorios de Hidráulica en servicio, si bien de carácter universitario. A través de la Red de Institutos Nacionales Iberoamericanos de Ingeniería e Investigación Hidráulica. RINIHH hay también mecanismos de colaboración entre todos ellos.

En América del Norte también hay importantes Laboratorios de Hidráulica en funcionamiento. En Estados Unidos, los tres más importantes son los siguientes: US Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory, el Bureau of Reclamation, y el Alden Research Laboratory (de carácter privado este último). Además de los anteriores, en USA hay algunos laboratorios de hidráulica universitarios de mucho prestigio, como los siguientes: Stanley Hydraulics Lab, Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory o el Colorado State University's Hydraulics Laboratory. En Canadá, el Laboratorio público de mayor referencia es el National Research Council NRC, si bien también hay laboratorios privados como el Northwest Hydraulic Consultants NHC.

En otras áreas geográficas también hay importantes Laboratorios de Hidráulica (imbricados en centros similares al CEDEX), como los siguientes: Japón (Port and Airport Research Institute PARI), Korea (Institute of Construction Technology KICT), India (Central Water and Power Research Station), Kuwait (Kuwait Institute for Scientific Research KISR), Marruecos. (Laboratoire Public d'Essais & d'Etudes LPEE) o Australia (Manly Hydraulics Laboratory MHL).

Modelación matemática tridimensional (CFD)

El estudio hidrodinámico mediante modelación numérica de estructuras hidráulicas entraña dificultades de diversa índole, como por ejemplo el hecho de que se trata de flujos a gran velocidad, con superficies libres muy deformables, donde la turbulencia y la aireación pueden desempeñar un papel importante. Hoy en día el conocimiento de las ecuaciones que rigen estos fenómenos no está aun completamente resuelto, pero pese a ello, gracias a los avances acaecidos en las últimas décadas, el empleo de estos modelos resulta de gran utilidad en el proceso de diseño y comprobación de estructuras hidráulicas.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, y de las que no se dispone de una solución general. Excepcionalmente, para ciertos tipos de flujo y en situaciones muy concretas, es posible hallar una solución analítica. Habitualmente ha de recurrirse al análisis numérico para obtener dicha solución. A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante el ordenador se la denomina dinámica de fluidos computacional (CFD, de su acrónimo anglosajón *Computational Fluid Dynamics*).

Dentro de la CFD existen dos tendencias para abordar este estudio: los modelos Eulerianos y los Lagrangianos. Los modelos Eulerianos estudian la evolución de las variables del movimiento en un volumen de control del fluido invariable en el tiempo (Euler, 1757), mientras que los Lagrangianos estudian la trayectoria de las partículas del fluido y la evolución de las variables del movimiento a lo largo de las mismas (Lagrange, 1788). Cada una implica unas técnicas diferentes de discretización del medio fluido y de tratamiento de las ecuaciones para su resolución.

² Además de los dos citados, en Francia hay otros laboratorios en servicio, no excesivamente grandes, pero sí relevantes por su actividad. Por ejemplo, la Compagnie Nationale du Rhône CNR (en Lyon) en donde se han modelado las esclusas de la ampliación del canal de Panamá.

³ Además de estos laboratorios, en Europa hay algunos otros más pequeños, pero muy especializados (y de carácter universitario). Por ejemplo: Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology VAW Zurich, Suiza, Laboratory for Hydraulic Machines LMH de la Escuela Politécnica federal de Lausana EPFL, Suiza o el Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Los métodos tradicionales de cálculo para el estudio del movimiento del agua se han desarrollado con modelos Eulerianos, pues se adaptan mejor a los métodos numéricos existentes y las capacidades de cálculo disponibles, en especial cuando los dominios de cálculo son extensos como es el caso de los cauces de los ríos. Con este tipo de modelos se suelen resolver las ecuaciones de Saint-Venant (Saint-Venant, 1870), que son las Ecuaciones de Navier- Stokes promediadas en profundidad, ya sea en 1D (la del eje del río) o en 2D para poder analizar el movimiento en una llanura de inundación donde tienen importancia las dos componentes horizontales de la velocidad. Para su resolución, se han implementado múltiples esquemas numéricos. Entre ellos se pueden destacar el tradicional método de las características, pasando por los esquemas en diferencias finitas o elementos finitos. Con este tipo de esquemas se ha desarrollado software comercial de uso común en las empresas de ingeniería. Dentro de los modelos Eulerianos, ha supuesto un gran avance la implementación de esquemas numéricos que permiten resolver de forma automática discontinuidades del flujo, como son frentes de onda o resaltos. Nos referimos a los esquemas numéricos de alta resolución (Blade y Gómez, 2006), que junto con la discretización en volúmenes finitos, están permitiendo abordar la práctica totalidad de estudios de propagación de avenida en cauces, determinación de zonas de dominio público, zonas de intenso desagüe, propagación de hidrogramas de avenida y determinación de zonas inundables, entre otros. Por otra parte, la implementación de ecuaciones de transporte sólido permite realizar estudios de hidráulica fluvial con mayor garantía, aunque en este campo aún queda mucho camino por recorrer, precisamente porque aún no se dispone de las ecuaciones necesarias para su tratamiento.

También existe software comercial para el análisis tridimensional de estructuras hidráulicas. En la actualidad, la mayoría de los códigos han migrado sus esquemas numéricos a esquemas de volúmenes finitos. En general, el módulo hidrodinámico se encuentra bastante bien validado y los resultados son más fiables cuanto menos deformable sea la superficie libre, pues en estos métodos la posición de la superficie libre es una variable de cálculo. Algunos de los paquetes comerciales incluyen análisis de flujos aireados, aunque ninguno aborda el transporte de sedimentos. Un inconveniente de estos modelos comerciales es que no se han adaptado a las nuevas técnicas de computación, lo que se traduce en tiempos de computación excesivamente grandes.

Dentro de los modelos Lagrangianos se han desarrollado multitud de métodos, que bajo el común denominador de “métodos sin malla” abordan la resolución de diferentes problemas con diversas formas de aproximación, como la integral, las diferencias finitas, o el método de Galerkin. En Liu y Liu (2003) se clasifican los diferentes métodos que aplicados a la fluido dinámica computacional, se agrupan bajo el epígrafe de “métodos de partículas”.

El método de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (*Smoothed Particle Hydrodynamics*, SPH) es un método de partículas dentro de los denominados métodos sin malla. SPH se caracteriza, en primer lugar, por la discretización Lagrangiana del medio continuo, mediante un conjunto de partículas o parcelas de fluido y, en segundo lugar, por la reducción del problema al estudio de la interacción entre las mismas. Esto se hace mediante un esquema de promediado que, partiendo de los valores puntuales correspondientes, permite obtener los valores de campo continuo de las variables de interés (presión, densidad, velocidad o posición, entre otras). Una síntesis de los autores más destacados en cada una de ellas se presenta en Crespo, 2008.

La sencillez conceptual de SPH y sus escasas restricciones lo hacen atractivo para su aplicación en el campo de la hidrodinámica en estructuras hidráulicas como son aliviaderos y desagües de fondo en presas, rotura de presas y fluido-dinámica de cauces (López, 2010). El CEDEX (Grassa, 2004) ha desarrollado un software propio MDST con el que ha realizado diversos estudios de validación con modelo físico y en prototipo (López y Marivella, 2009; López et al., 2009 y 2010). Recientemente se ha mejorado la versión inicial del código, haciéndola apta para su empleo en tarjetas gráficas, lo que ha permitido reducir enormemente los costes computacionales de esta herramienta, circunstancia que hasta ahora suponía un gran inconveniente (López y Cuéllar, 2013).

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ACTIVAS EN EL CAMPO DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE PRESAS

La Reglamentación básica en materia de diseño hidráulico y seguridad hidrológica de las presas en España está regulada básicamente por la Instrucción de Grandes Presas (de 1967) y por el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses (de 1996), estando prevista próximamente la aprobación por parte del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

de 3 nuevas Normas Técnicas de Seguridad de Presas que sustituirán a los dos documentos anteriores. Estas nuevas Normas Técnicas introducirán nuevos criterios de seguridad hidrológica más exigentes que los regulados por la Instrucción de 1967, lo que demandará en nuestro país una importante actividad en el campo de la adecuación de órganos de desagüe de presas existentes a las nuevas Normas, ampliando su capacidad hasta dar cumplimiento a la nueva Reglamentación.

Efectivamente, mientras que la Instrucción de 1967 exigía proyectar las presas para ser seguras ante una única avenida de diseño, la asociada a 500 años de periodo de retorno (T), en las nuevas Normas Técnicas la Avenida de Proyecto será la asociada a un T mayor o igual a 1000 años (presas de Categoría A o B); además hay que considerar una Avenida Extrema, de T mínimo 5000 años para presas de fábrica (Categorías A o B). Para esta última, las NTS admiten un agotamiento parcial o total del resguardo lo que lleva, en el caso de las presas de fábrica, a admitir vertidos sobre coronación siempre que se justifique que tales vertidos no comprometen la seguridad de la presa.

Teniendo en cuenta que los órganos de desagüe de la mayoría de las presas españolas fueron diseñados y construidos bajo unos condicionantes de seguridad menos restrictivos de los que se utilizarían hoy en día, y por supuesto en el futuro (conforme a lo explicado en los párrafos precedentes), la revisión de la seguridad de las presas más antiguas, para adaptarlas a los nuevos caudales de diseño, sin duda mayores, se configura como una línea de claro interés para el futuro, en aspectos como los siguientes:

- Aumento de capacidad de órganos de desagüe de presas existentes. La aplicabilidad de lo anterior requiere la caracterización y análisis experimental del funcionamiento hidráulico de dispositivos para el incremento de capacidad de los aliviaderos existentes en las presas actuales, así como de las estructuras de disipación de energía (aliviaderos en laberinto, en sifón, fusibles, en tecla de piano, ampliación de cuencos de resalto, aliviaderos con cajeros altamente convergentes, flujos aireados en rápidas, etc.)
- Seguridad de presas de materiales sueltos ante potenciales vertidos por coronación. Aunque se han realizado algunos proyectos de investigación en esta materia, la complejidad del fenómeno hace necesario destinar mayores esfuerzos en investigación en este ámbito, que permitan por un lado el desarrollo y calibración de herramientas numéricas y por otro el diseño de refuerzos o protecciones que mejoren la seguridad frente a vertidos por coronación en esta tipología, muy presentes en el parque español de presas.

Pero, además de lo anterior, son muchas las líneas de investigación aplicada en el campo de la ingeniería hidráulica de las presas que en el medio plazo será necesario aumentar de forma importante. En estos momentos, ya hay proyectos en marcha en España con resultados prometedores. Por ejemplo, los siguientes:

- Mecanismo de generación de la onda de avenida generada por la rotura de una presa o una balsa. Aunque se dispone de herramientas adecuadas para estudiar la propagación de la onda de rotura de una presa o embalse, se carece de un método adecuado para calcular los hidrograma de rotura. Los hidrogramas calculados mediante la normativa técnica actual quedan muy del lado de la seguridad y en consecuencia, los tiempos de propagación no son realistas y no sirven de base para la coordinación de actuaciones de protección civil. Una investigación dirigida a la mejora del conocimiento del proceso de rotura permitiría caracterizar mejor el proceso de rotura y por ende ajustar los hidrogramas de rotura.
- Desarrollo de técnicas para evaluar la seguridad de presas frente a deslizamientos de ladera y sismo. Ante la falta de medios adecuados estas acciones se han venido calculando mediante formulaciones empíricas. Las mejoras de capacidades de cálculo de los modelos numéricos tridimensionales, permitirían abordar estudios de este tipo con mayor rigor. Sin embargo, se requiere un esfuerzo para la adaptación y calibración de estos modelos.
- Mejora en los sistemas de auscultación de presas. El desarrollo de técnicas no convencionales para el análisis de los registros de auscultación proporciona nuevas herramientas que facilitan la gobernanza en la explotación y conservación de las presas.

INVESTIGACIÓN APLICADA EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA DE PRESAS

Aumento de capacidad de órganos de desagüe

Como se ha indicado en el apartado anterior, la investigación aplicada en torno a las tecnologías posibles para el incremento de capacidad de los órganos de desagüe de presas existentes, se configura como un campo de claro interés en la actualidad, en aspectos como los siguientes:

- Aliviaderos mediante dispositivos especiales (aliviaderos en laberinto y en tecla de piano; aliviaderos en sifón; etc.)
- Aliviaderos con cajeros altamente convergentes
- Adaptación del diseño de cuencos amortiguadores de pie de presa a caudales superiores a los de diseño

Aliviaderos en laberinto y en tecla de piano; Aliviaderos en sifón

Los conocidos como “aliviaderos especiales” (aliviaderos en laberinto, en tecla de piano, laberintos fusibles o sifones, entre otros) constituyen una tecnología que en los últimos años está siendo objeto de numerosos estudios mediante modelación física y numérica en muchas partes del mundo, buscando mejorar los criterios de diseño de estas estructuras, ante el claro interés que se percibe que tendrán en un futuro inmediato.

En España, los avances más representativos desarrollados en este campo son seguramente los derivados de dos proyectos de investigación desarrollados por el CEDEX, la Universidad Politécnica de Madrid y la empresa Jesús Granell Consultores SA (entre otros)⁴ para cuyo desarrollo, el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ha construido unas instalaciones experimentales para la investigación aplicada en el campo de los aliviaderos en laberinto y sifón susceptibles de ser utilizadas para nuevos proyectos de investigación en estas materias.

El fundamento de los aliviaderos en laberinto reside en la forma del vertedero, que es asimilable a un “zig-zag”. Esta especial morfología incrementa la longitud de vertedero “a encajar” en un determinado “espacio disponible”, con el fin de aumentar la capacidad de evacuación respecto a la de un vertedero recto convencional ubicado en el mismo espacio y para igual carga hidráulica. Sin embargo, esta supuesta ventaja —mayor capacidad hidráulica para iguales condiciones de espacio disponible y carga hidráulica— se hace incierta cuando la carga hidráulica sobre el umbral del vertedero crece por encima de determinados valores. En efecto, las diversas investigaciones analizadas establecen como límite de funcionamiento aquél en el que la máxima sobreelevación de la lámina sobre el vertedero es entre 0.50 y 0.70 veces la altura del vertedero.

Las principales herramientas para el cálculo y diseño de aliviaderos en laberinto se presentan en Magalhães (1983), Tullis *et al.* (1995), y Granell y Toledo (2010). Estas herramientas suponen una aproximación insuficiente del comportamiento de estos vertederos pues no son capaces de cubrir toda la gama de variables que intervienen en el proceso de cálculo y diseño.

El aliviadero en tecla de piano presenta la misma forma en planta que un aliviadero en laberinto rectangular pero su diferencia reside en su fondo inclinado que además avanza en voladizo con respecto a los límites de la base del vertedero, este aspecto incrementa la longitud del vertedero con respecto a un vertedero en laberinto de muros verticales y mismas dimensiones de base, lo que le confiere especial interés para aplicaciones con limitado espacio en planta.

El aliviadero en tecla de piano, aun siendo una estructura hidráulica relativamente nueva en cuanto a investigación y aplicación práctica, ha despertado un creciente interés que en los últimos años que se ha traducido en numerosas publicaciones. Pese a ello, el conocimiento es limitado y no existen procedimientos de construcción uniformes debido al gran número de parámetros geométricos que influyen en su diseño y funcionamiento. (Tullis *et al.* 1995; Lempérière y Ouamane, 2003; Blancher *et al.*, 2011; Laugier *et al.*, 2011; Pralong *et al.*, 2011).

⁴ Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón y aliviaderos en laberinto (029/RN08/04.5) y Proyecto POLILAB Diseño del prototipo de una compuerta fusible recuperable tipo laberinto de fondo poliédrico para la mejora de la seguridad hidrológica de las presas (IPT-2012-0185-380000).

El principal objetivo de las investigaciones que se están llevando a cabo en el CEDEX junto con la UPM y CIMNE en materia de aliviaderos en laberinto y tecla de piano, consiste en la caracterización de la influencia de la geometría y su optimización a fin de lograr una metodología y unas herramientas para el análisis, construcción y explotación de estos aliviaderos.

Los aliviaderos en sifón presentan tres características que los hacen muy adecuados para aumentar la capacidad de desagüe de presas existentes: a) al trabajar en depresión pueden situarse incluso por encima del nivel normal de embalse, b) se adaptan a cualquier nivel máximo de explotación, c) al circular en carga su conducto de descarga soporta con comodidad cualquier condicionante en su trazado de salida.

En Novak (1990) se expone con suficiente detalle el funcionamiento de un sifón tradicional sin regulación. Sin embargo, el principal inconveniente de estos dispositivos reside en su rígido funcionamiento, es decir que pasan bruscamente de evacuar pequeños caudales a caudales considerables una vez se haya cebado el sifón, es por esto que las investigaciones llevadas a cabo en el CEDEX se han centrado en la posibilidad de regular la descarga de sifones mediante la aportación gradual de aire al flujo, consiguiendo así una ley gradual de desagüe del sifón. Los principales resultados y leyes de descarga obtenidas pueden consultarse en Mateos y Cordero (2008), Mateos *et al.* (2008, 2009 y 2011) y en Ramos *et al.* (2013).

Aliviaderos con cajeros altamente convergentes

En las presas de gravedad el aliviadero resulta generalmente más económico si se dispone sobre el cuerpo de la presa. El ancho del cuenco de restitución del agua al cauce queda entonces limitado por la anchura del cauce, si se desea evitar la excavación y posible descalce de las laderas. Por otra parte, la longitud del vertedero por el que entra el agua al aliviadero se fija con criterios diferentes, teniendo en cuenta el efecto laminador y la altura de lámina resultante. Cuando la longitud más adecuada para el vertedero resulta mucho mayor que el ancho del cauce, el diseño del aliviadero puede resolverse disponiendo unos cajeros que recojan el agua procedente de las zonas laterales del vertedero, que no desaguan directamente al cuenco. Estos cajeros, que tienen un alto grado de convergencia, introducen el agua en el cuenco en forma de chorros de alta velocidad. El conjunto resultante se denomina “Aliviadero con Cajeros Altamente Convergentes” (ACAC) y tiene dos particularidades respecto de un aliviadero convencional: a) en los cajeros altamente convergentes, que funcionan como canales de recogida del flujo lateral, se establece un movimiento helicoidal de caudal variable y alta velocidad; b) el cuenco de disipación de energía tiene una entrada frontal convencional (agua procedente de la zona central del vertedero) y los chorros procedentes de los cajeros laterales entran por ambos laterales, dando como resultado un funcionamiento hidráulico complejo.

En España existen diversos aliviaderos de este tipo, como los de las presas de Zapardiel de la Cañada, Bayona, Torre Abraham, Vilasouto, La Campañana, Doña Ana, y Rambla del Moro. Ante la carencia de criterios claros de diseño, este tipo de aliviaderos se proyecta con el apoyo de un modelo físico. En Japón existen numerosos aliviaderos de este tipo, como los de las presas de Chubetsu, Kodama, Fukutomi, Yasutomi si bien, en este país los canales de recogida laterales suelen ser escalonados, a diferencia de la práctica habitual en España.

Los aliviaderos de tipo ACAC existentes son mayoritariamente aliviaderos de primer diseño. Sin embargo los ACAC se configuran como una alternativa interesante para el incremento de la capacidad de aliviaderos de presas de gravedad existentes, o bien para el incremento de la capacidad de embalse, o de cota del nivel máximo normal para la producción de energía, sin aumento del nivel del agua en avenida. Para ello basta con ampliar la zona de embocadura, mediante demolición y construcción del perfil correspondiente, y construir los cajeros laterales sobre el cuerpo de presa. Naturalmente, es necesario también estudiar el funcionamiento hidráulico del cuenco en la nueva situación para su posible adaptación.

Dada la potencialidad de este tipo de aliviadero, en el marco de un proyecto del Plan Nacional de Investigación, se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos de la UPM una instalación de ensayo especialmente diseñada para su estudio sistemático que permite medir las oscilaciones de presión originadas por la intensa turbulencia en el cuenco. El objetivo es definir criterios de diseño de los aliviaderos con cajeros altamente convergentes y establecer los límites de aplicabilidad (Martínez *et al.*, 2011; San Mauro *et al.*, 2013).

Adaptación del diseño de cuencos amortiguadores de pie de presa a caudales superiores a los de diseño

Sea cual sea la solución empleada para el aumento de la capacidad de desagüe de un aliviadero de una presa de gravedad, la obra de disipación de energía debe ser también adaptada a los nuevos caudales de diseño, lo cual en ocasiones es tan complejo o más como la reforma del aliviadero en sí mismo, pues tanto los cuencos amortiguadores de resalto como los trampolines semisumergidos son obras con diseños muy estrictos en cuanto al intervalo de caudales para los que la obra funciona correctamente (longitud suficiente y buen ratio de disipación de energía).

En este contexto se plantea el uso de la aireación forzada del flujo supercrítico en la rápida como medida general de actuación para mejorar el funcionamiento hidráulico de las obras de disipación de energía de pie de presa preexistentes, frente a caudales superiores a los de diseño y así facilitar su adaptación. La aireación artificial, además de disminuir o minimizar el riesgo de daños por cavitación, aumenta el calado del flujo y le hace perder velocidad. Por esto disminuye el número de Froude, generándose unas condiciones de entrada al cuenco menos exigentes para caudales mayores a los de diseño. Este es el hecho que hace posible extender el campo de aplicación de los cuencos y permite la utilización de una determinada obra para caudales mayores.

El uso de la aireación forzada en aliviaderos de presas es una idea que ha sido estudiada ya desde hace tiempo, pudiendo destacarse los estudios de Gutiérrez y Palma (1994) o de Fernández Bono y Vallés (2006), si bien en la actualidad cobra fuerza en el marco de un Proyecto de Investigación (conocido bajo el acrónimo de EMULSIONA) desarrollado entre la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad Politécnica de Cartagena y el CEDEX⁵.

Seguridad de presas de materiales sueltos ante potenciales vertidos por coronación

El estudio del modo en que se produce la rotura de presas de escollera cuando se produce un vertido sobre su coronación (fenómeno que denominamos sobrevertido) es también un campo activo de investigación en muchos laboratorios de hidráulica en el mundo y que en España ha sido línea de investigación prioritaria del Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética de la Universidad Politécnica de Madrid desde hace más de una década (Toledo 1997, 1998; Toledo *et al.*, 2004). El Centro de Estudio Hidrográficos (CEH), del CEDEX, hizo suya esta línea también en el año 2004 y desde entonces la colaboración entre ambos organismos ha sido continua (Lechuga *et al.*, 2008), abordando el problema mediante realización de ensayos sistemáticos en modelo físico. En el año 2008 se unió al estudio de este complejo problema CIMNE, aportando su capacidad de modelación numérica, de modo que la alianza de estas tres entidades está facilitando el avance en el conocimiento de un problema tan complejo en el marco de diversos proyectos de investigación aplicada desarrollados al respecto⁶.

Las investigaciones llevadas a cabo tienen por objetivo la caracterización del inicio y proceso de rotura de las presas de escollera debido a un sobrevertido y desarrollar criterios para obtener un modelo matemático para su análisis y seguimiento (Larese *et al.*, 2010, 2013; Larese, 2012).

Los resultados obtenidos han permitido caracterizar el proceso de rotura del espaldón de aguas abajo de una presa de escollera, necesario para que el fallo alcance al elemento impermeable. A medida que aumenta el caudal de sobrevertido se ha identificado una fase de incubación, sin rotura, y una fase de avance progresivo de la rotura del espaldón, mediante dos mecanismos básicos: arrastre de partículas y deslizamientos sucesivos. Cuando la rotura, que se inicia en el pie de presa, alcanza la coronación, se inicia una fase nueva, de rotura del núcleo o pantalla. Se han realizado también ensayos de rotura de ambos elementos de impermeabilización que parecen indicar que la rotura de la pantalla se produce de forma escalonada, generando sucesivas puntas de caudal en el hidrograma de rotura. En cambio, la rotura del núcleo es más frágil, pudiendo en algún caso asimilarse el proceso de rotura a una rotura instantánea. Los trabajos se orientan a la modelación del proceso completo de rotura. Uno de los resultados más interesantes será la determinación de los hidrogramas de rotura en función de las características de cada presa, de modo que

5 Estudio de la aireación natural y forzada en modelo físico de grandes dimensiones y análisis de su influencia en el funcionamiento de los cuencos de resalto hidráulico (BIA2011-28756).

6 Proyecto XPRES Desarrollo de un método para estudio del proceso de rotura de presas de escollera por sobrevertido combinado (BIA 2007-68120-C03-03) y Proyecto EDAMS Métodos numéricos y experimentales para la evaluación de la seguridad y protección de las presas de materiales sueltos en situación de sobrevertido (BIA2010-21350-C03-02)

los hidrogramas utilizados para desarrollar planes de emergencia sean más ajustados a lo que puede esperarse en el caso de que la rotura se llegara a producir. Otro importante será la determinación del caudal mínimo necesario para que la rotura pueda iniciarse.

Protecciones de presas mediante repiés de escollera y bloques en forma de cuña

En diversos países como Suecia, Noruega o Estados Unidos, y también en España, existe una preocupación creciente por la seguridad hidrológica de las presas de materiales sueltos, especialmente por aquéllas que fueron diseñadas con criterios menos exigentes que los actualmente vigentes. La seguridad de las presas frente al sobrevertido puede aumentarse incrementando la capacidad del aliviadero o mejorando la resistencia de la presa frente a un eventual rebase. Ambos enfoques pueden también combinarse. El incremento de la capacidad del aliviadero, mediante técnicas convencionales, exige generalmente una inversión importante, lo que hace inviable la aplicación de una solución de este tipo a un parque presístico amplio. Por ello se están investigando soluciones ya aplicadas en diversas presas en el mundo, pero de uso aún poco extendido, tanto de aliviaderos no convencionales como de protecciones frente al sobrevertido. A veces la frontera entre ambos tipos de soluciones es difusa. En Estados Unidos la solución generalmente adoptada es el revestimiento de las presas de materiales sueltos mediante una protección de hormigón compactado con rodillo (PCA, 2002; Hudock y Semerjian, 2010). En Suecia existen diversos casos de presas protegidas mediante repiés de escollera, una solución sencilla y económica que es eficaz para caudales moderados (Nilsson y Norstedt, 1998; Bartsch y Nilsson, 2004; Nilsson y Rönnqvist, 2004; Nilsson, 2004, 2009; Odemark, 2004; EBLK, 2005). En la Universidad de Trondheim (Noruega) se están estudiando protecciones mediante “rip-rap” orientado (Lia *et al.*, 2013).

En España, la Universidad Politécnica de Madrid ha desarrollado criterios de diseño de repiés de escollera, verificados mediante ensayos en modelo físico en su Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos (Morán y Toledo, 2011; Morán *et al.*, 2011; Morán, 2013). Partiendo de un caudal de diseño de la protección, dichos criterios permiten determinar la altura y el talud del repiés de escollera. Hay que tener en cuenta que la función de estos repiés es estabilizar el cuerpo de la presa cuando se produce una circulación de agua imprevista por el espaldón de escollera. En el talud exterior del repiés debe disponerse una protección tipo “rip-rap” para evitar el arrastre de material. Se trata de una protección efectiva también si la eventual circulación de agua se produce como consecuencia de un problema de erosión interna o fisuración del elemento impermeable de la presa. Para la evacuación sin daño de caudales importantes sobre el cuerpo de la presa deben disponerse protecciones de hormigón. Aparte de la mencionada solución de HCR, se pueden diseñar también protecciones de losas convencionales, como las dispuestas en la presa del Molino de la Hoz y en la presa de Llodio. Recientemente se han construido varias presas, una de ellas en España, la presa de Barriga (Couto *et al.*, 2006; Morán y Toledo, 2008), en las que se utilizó la tecnología de los bloques en forma de cuña (BFC). Se trata de una tecnología con origen en la extinta Unión Soviética durante los años 80 del siglo pasado (Pravdivets Slissky, 1981; Powledge y Pravdivets, 1994), donde se pueden citar las siguientes realizaciones: Bolshevik, Klinbeldin, Maslovo, Sosnovski, Central Hidroeléctrica en el Dniéper, Dneister, Kolyma, Transbaikal y Jelyevski. Posteriormente fue desarrollada en Reino Unido, Estados Unidos y Portugal (Baker y Gardiner, 1994, 1995; Hewlett *et al.*, 1997; Frizell *et al.*, 2000; Relvas y Pinheiro, 2008). Los bloques en forma de cuña son elementos prefabricados con forma adecuada para colocarse de manera similar a las tejas. Cada pieza monta sobre la colocada inmediatamente aguas abajo creándose un pequeño escalón. Esta disposición es muy favorable para la estabilidad de cada pieza y del conjunto, lo que permite evacuar de forma segura grandes caudales.

Dado que este tipo de solución, sencilla y económica, tiene potencialmente amplia aplicación para la protección de balsas y presas, el Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética de la UPM impulsó un proyecto de investigación⁷ con objeto de desarrollar criterios de diseño basados en un profundo conocimiento de las acciones hidrodinámicas sobre el bloque y de la aireación que se produce a través de las acanaladuras que cada bloque incorpora, y que comunican el hueco del escalón con el cuerpo de la presa. El Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) se ocupa de realizar la modelación numérica y Prehorskisa suministra los bloques a ensayar. Para realizar los ensayos sistemáticos en modelo físico se firmó un convenio con el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en cuyo laboratorio se implementó una instalación de grandes dimensiones (5 m de altura y 15 m de longitud). La campaña de ensayos programada estaba en marcha cuando se redactó este artículo.

⁷ Proyecto ACUÑA 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

Mejora en los sistemas de auscultación de presas

La interpretación de los datos de auscultación de presas se ha realizado tradicionalmente a partir de la representación gráfica de la evolución a lo largo del tiempo de las distintas magnitudes medidas o de la relación entre magnitudes relacionadas. En algunos casos se han utilizado modelos estadísticos sencillos de carácter predictivo, que permiten anticipar la respuesta de la presa (movimientos, deformaciones, filtraciones, etc.) en términos estadísticos, dadas unas variables causales, típicamente el nivel del embalse y la temperatura ambiente. En diversas ramas del conocimiento, tan dispares como la ingeniería industrial o la sociología, ha ido creciendo la aplicación de diversas técnicas de análisis de datos que se engloban bajo la denominación general de “minería de datos”, incluyendo tanto técnicas estadísticas como otras asociadas generalmente a la inteligencia artificial. Algunas de las más utilizadas han sido las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y las Redes Bayesianas (RB), pero la lista de modelos es larga. Ya se han realizado diversas aplicaciones de dichas técnicas al campo de la ingeniería civil (Flood and Kartam, 1994), y particularmente al análisis de datos de auscultación de presas (Nedushan y Chouinard, 2003).

El Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) han impulsado, en colaboración con diversas empresas como Ofiteco o Dacartec, una línea de investigación para la aplicación de diversas técnicas de minería de datos a la interpretación de los datos de auscultación de las presas⁸ donde se pretende valorar la utilidad de las diversas técnicas de tratamiento de datos disponibles en la actualidad para la interpretación de los datos de auscultación de presas, así como desarrollar criterios específicos de uso en este campo de la ingeniería. Los resultados obtenidos hasta el momento ponen de manifiesto la ventaja del uso, en presas con datos suficientes, de la minería de datos, que permite disponer de modelos predictivos más precisos que los estadísticos tradicionalmente utilizados (Santillán *et al.*, 2010; Roa, 2013; Salazar *et al.*, 2013). Modelos más precisos permiten detectar las anomalías de comportamiento con mayor antelación, facilitando su análisis en estadios iniciales de un posible incidente o rotura y, en caso de resultar necesario, la adopción de medidas correctoras para evitarlo.

CONCLUSIONES

Pese al elevado grado de madurez alcanzado por las infraestructuras hidráulicas en España en particular y en el mundo en general, hay en desarrollo una gran cantidad de proyectos de investigación en este campo (y en particular en el de la ingeniería de las presas). Ello es debido a varios factores, entre otros la complejidad de los problemas a los que se enfrenta el diseño de las nuevas infraestructuras hidráulicas o la enorme potencialidad que ofrecen hoy en día las técnicas de la modelación física y numérica

REFERENCIAS

- Ahmadi, B., Chouinard, L.E. 2003. Use of artificial neural networks for real time analysis of dam monitoring data. *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. June 4-7, Moncton, Brunswick, Canada.
- 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*, September 14-17, University of Exeter, UK, 214-223.
- Baker, R., Gardiner, K.D. 1995. Building blocks. *International Water Power and Dam Construction*. 47(11), 2.
- Balairón, L. 2011. Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial. *II Jornadas de Ingeniería del Agua*. October 5-6, Barcelona, Spain.

⁸ Proyecto SEPRISIS: Estudio de la seguridad de presas e identificación de escenarios de riesgo mediante sistemas inteligentes. (048/RN08/04.5), Proyecto iCOMPLEX: Desarrollo del software iCOMPLEX para el control y evaluación de la seguridad en infraestructuras críticas. (IPT-2012-0183-390000) y Proyecto AIDA: Definición de umbrales de emergencia para seguridad de presas mediante inteligencia artificial y una métrica no euclídea de evaluación de la afinidad. (BIA2013-49018-C2-2-R)

- Blade, E., Gómez, M. 2006. *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monografía CIMNE N° 97. ISBN: 84-95999-98-6.
- Blancher, B., Montarros, F., Laugier, F. 2011. Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways. *Proceedings of the international Conference of Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2011*. February 9-11, Liege, Belgium. 141-150, ISBN 978-0-415-68282-4.
- Couto, L.T., Pinto-Magalhães, A., Toledo, M.A., Morán, R. 2007. A new solution for a concrete spillway over a rockfill dam. Hydraulic model study of Barriga Dam in Spain. *Proceeding of the 5th International Conference on Dam Engineering*, February 14-16, Lisbon, Portugal. ISBN 978-981-05-7585-4.
- Crespo, A., 2008. *Development of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics*. PhD Thesis. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Vigo.
- Euler, L.P. 1757. General principles concerning the motion of fluids. Originalmente publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 11, 1757, 274-315. Opera Omnia: Series 2, Volume 12, 54-91.
- Fernández-Bono, J.F. 1992. La modelación híbrida como técnica de análisis y diseño óptimo de las obras hidráulicas de defensa contra inundaciones en entornos urbanos. *Congreso Iberoamericano sobre Técnicas Aplicadas a la Gestión de Emergencias para la Reducción de Desastres Naturales*, December 1-4. Valencia, Spain. 245-50
- Fernández-Bono, J.F., Vallés-Morán, F.J. 2006. Criterios metodológicos de adaptación del diseño de cuencos de disipación de energía a pie de presa con resalto hidráulico, a caudales superiores a los de diseño. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, October 9-14, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Flood, I., Kartam, N. 1994. Neural networks in civil engineering I: principles and understanding. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8(2), 131-148. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(1994)8:2(131)
- Frizell, K.H., Matos, J., Pinheiro, A.N. 2000. Design of concrete stepped overlay protection for embankment dams. *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, March 22-24, Zurich, Switzerland, 155-161.
- Garrote, L., Trueba, J., Laguna, F. 2008. Comparación entre diferentes modelos matemáticos comerciales. *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial*, March 3-7, Madrid, Spain.
- Granell, C., Toledo, M.A. 2010. Los aliviaderos tipo laberinto. Un nuevo enfoque para su cálculo hidráulico. *Congreso Internacional de Rehabilitación de Presas*. SEPREM. September 28-30, Zaragoza, Spain.
- Grassa, JM. 2004. El método SPH. Aplicaciones en ingeniería marítima. *Revista de ingeniería civil*, 133.
- Gutierrez, R.M., Palma, A. 1994. *Aireación en las estructuras hidráulicas de las presas: Aliviaderos y desagües profundos*. Premio José Torán. Comité Nacional Español de Grandes Presas, España.
- Hewlett, H., Baker, R., May, R., Pravdivets, Y.P. 1997. Design of stepped block spillways. *Construction Industry Research and Information Association*. London, U.K.
- Hudock, G.W., Semerjian, J. 2010. Performance of the Yellow River Roller compacted concrete overtopping spillways during the september 2009 Georgia Floods. *Dam Safety Proceedings, ASDSO*. September 19-23, Seattle, Washington, USA.
- Lagrange, J.L. 1788. *Mécanique analytique*. Paris, France.
- Larese, A. 2012. *A coupled Eulerian-PFEM model for the simulation of overtopping in rockfill dams*. Ph.D. Thesis, Univ. Politècnica de Catalunya (UPC BarcelonaTech), Barcelona, Spain.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., Toledo, M. 2010. Physical and numerical modelization of the behavior of rockfill dams during overtopping scenarios. *Dam maintenance and rehabilitation II*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 479-487.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., Toledo, M., Morán, R., Campos, H. 2013. Numerical and Experimental Study of Overtopping and Failure of Rockfill Dams. *International Journal Geomechanics*. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000345

- Laugier, F., Pralong, J., Blancher, B. 2011. Influence of structural thickness of sidewalls on PKW spillway discharge capacity. *Proceedings of the international Conference of Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2011*. February 9-11, Liege, Belgium. ISBN: 978-0-415-68282-4. 159-166
- Lechuga, C., Toledo, M. A., Morán, R., 2008. Investigación mediante modelo físico del comportamiento de las presas de escollera ante un vertido sobre coronación. *VIII Jornadas Españolas de Presas 2008*, November 26-28, Córdoba, Spain, p21.
- Lempérière, F., Ouamane, A. 2003. The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower & Dams*. 5, 144-149.
- Lia, L., Vartdal, E.A., Skoglund, M., Campos, H.E. 2013. Rip Rap protection of downstream slopes of rock fill dams - A measure to increase safety in an unpredictable future climate. *9th ICOLD European Club Symposium*, April 10-12, Venice, Italy.
- Liu, G.R., Liu, M.B. 2003. *Smoothed Particle Hydrodynamics. A meshfree particle method*. World Scientific Eds., Singapore. pp. 472 doi:10.1142/9789812564405
- López, D. 2010. *Aplicaciones de la Hidrodinámica Suavizada de las Partículas al Estudio de Fenómenos Hidráulicos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España, <http://oa.upm.es/5526/>
- López, D., Cuéllar, V. 2013. Paralelización CUDA del método SPH. Aplicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*. October 23-24, Valencia, Spain. ISBN 978-84-267-2071-9.
- López, D., Marivela, R., Aranda F. 2009. Calibration of SPH model using prototype pressure data from the stilling basin of the Villar del Rey dam, Spain. *33rd IAHR Congress*, August 9-14, Vancouver, Canada, ISBN: 978-90-78046-08-0.
- López, D., Marivela, R. 2009. Applications of the SPH Model to the design of fishways. *33rd IAHR Congress*, August 9-14, Vancouver, Canada ISBN: 978-90-78046-08-0
- López, D., Marivela, R., Garrote, L. 2010 Smooth Particle Hydrodynamics Model Applied To Hydraulic Structures: A Hydraulic Jump Test Case. *Journal of Hydraulic Research*. Vol 48. Extra Issue (2010), 142-158. ISSN: 0022-1686.
- Magalhães, A.P. 1983. *Descarregadores em labirinto*. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
- Martínez, B., Caballero, F. J., Toledo, M. A., Morán, R., Salazar, F., Morera, L., Campos, H., Sanz, P. 2011. Desarrollo de criterios de diseño para el incremento de la capacidad de desagüe en presas de fábrica mediante aliviaderos con cajeros altamente convergentes. *II Jornadas de Ingeniería del Agua*, October 5-6, Barcelona, Spain.
- Mateos, C. 2000. La modelación física en las obras hidráulicas. *Ingeniería del Agua*, 7(1), 55-70.
- Mateos, C., Cordero, D. 2008. Aliviaderos con sifones regulados. *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, September 2-6, Cartagena de Indias, Colombia.
- Mateos, C. Cordero, D., Elviro, V. 2009. Prevention of cavitation in siphons. *33rd IAHR Congress*, Congress, August 9-14, Vancouver, Canada, ISBN: 978-90-78046-08-0.
- Mateos, C., Elviro, V., Cordero, D. 2008. Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón *VIII Jornadas Españolas de Presas*, November 26-28, Córdoba, Spain.
- Mateos C., Elviro V., Cordero D., Ramos T. 2011. La demanda de aire en los sifones regulables. *II Jornadas de Ingeniería del Agua*, October 5-6, Barcelona, Spain.
- Morán, R., 2013. *Improvement of the Safety of Rockfill Dams During Through-flow Processes Using Downstream Rockfill Toes*, PhD. Thesis, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid.
- Morán, R., Campos, H., García, J., Toledo, M.A., 2011. Estudio de protecciones frente al sobrevertido de presas de materiales sueltos mediante repié de escollera. *Dam Maintenance & Rehabilitation II*. November 18, Zaragoza, Spain:
- Morán R., Toledo M.A. 2008. Wedge-shaped blocks spillway upon Barriga Dam (Burgos). *VIII Jornadas españolas de presas*, November 26-28, Córdoba, Spain.

- Morán, R., Toledo, M.A., 2011. Research into protection of rockfill dams from overtopping using rockfill downstream toes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(12), 1314-1326.
- Nedushan B.A., Chouinard L.E. 2003. Use of artificial neural networks for real time analysis of dam monitoring data. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, June 4-7, Moncton, Brunswick, Canada, 1987.
- Novak P. et al., 1990. Hydraulic structures. In: *Siphon spillways* (Taylor & Francis) Unwin Hyman, London, 226-228
- Portland Cement Association (PCA). 2002. *Design Manual for RCC spillways and overtopping protection*, Prepared by URS Greiner Woodward Clyde, Skokie, Illinois.
- Powledge, G.R. y Pravdivets Y.P. 1994. Experiences with Embankment Dam Overtopping Protection, *Hydro Review Magazine*.
- Pralong, J., Montarros, F., Blancher, B. Laugier, F. 2011. A sensitivity analysis of Piano Key Weirs geometrical parameters based on 3D numerical modeling. *Proceedings of the international Conference of Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW 2011*,. February 9-11, Liege, Belgium. 133-140, ISBN 978-0-415-68282-4. doi:10.1201/b12349-21
- Pravdivets, Y.P., Slissky, S.M. 1981. Passing floodwaters over embankment dams. *International Water Power and Dam Construction*. 33(7), 30-32.
- Ramos, T., Cordero, D., Elviro, V., Mateos, C. 2013. Sifones regulados para vertido anticipado en avenidas. *Ingeniería Civil*, 172, 39-44.
- Relvas, A.T., Pinheiro, A.N. 2008, Inception Point and Air Concentration in Flows on Stepped Chutes Lined with Wedge-Shaped Concrete Blocks, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (8), 1042-1051. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1042)
- Roa, A. 2013. *Modelos para el análisis de seguridad de obras hidráulicas basadas en redes bayesianas*. Tesis fin de Máster Universitario en Inteligencia Artificial. Universidad Politécnica de Madrid.
- Saint-Venant, A.J.C.B. 1870. Démonstration élémentaire de la formule de propagation d'une onde ou d'une intumescence dans un canal prismatique ; et remarques sur les propagations du son et de la lumière, sur les ressauts, ainsi que sur la distinction des rivières et des torrents. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 71, 186-195.
- Salazar, F., Oñate, E., Toledo, M.A. 2013. Posibilidades de la inteligencia artificial en el análisis de auscultación de presas. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*, October 23-24, Valencia, Spain. ISBN 978-84-267-2071-9.
- San Mauro, J., Morera, L., Salazar, F., Rossi, R., Toledo, M. A., Morán, R., Martínez, B., Caballero F.J., Oñate, E. 2013. Modelación física y numérica de aliviaderos con cajeros altamente convergentes. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*, October 23-24, Valencia, Spain. ISBN 978-84-267-2071-9.
- Santillán, D. , Morán, R., Fraile, J.J., Toledo, M.Á. 2010. Forecasting of dam flow-meter measurements using artificial neural networks. Romeo García et al. (eds) *Dam Maintenance and Rehabilitation II*, CRC Press, Londres, UK, 183-189.
- Toledo, M. 1997. *Presas de escollera sometidas a sobrevertido. Estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa*. Ph.D. Thesis, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid.
- Toledo, M. 1998. Safety of rockfill dams subject to overtopping. *International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety*, June 17-19, Barcelona, Spain.
- Toledo, M., Moremo, J., and Mateos, C. 2004. Physical and mathematical modelling of embankment dam failure due to overtopping. *International Seminar on Stability and Breaching of Embankment Dams*, October 21-22, Oslo, Norway.
- Toobes, L., Chanson, H. 2011. Numerical limitations of hydraulic models. *34th IAHR World Congress*. June 26-1, Brisbane, Australia.
- Tullis, J.P., Amanian, N., Waldron, D. 1995. Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 247-255. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247)