



Gestión de avenidas

Flood discharge

Revista de Obras Públicas
nº 3.536. Año 159
Octubre 2012
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Fernando Esteban García. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza (España). festeban@chebro.es

Alfredo Granados García. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid (España). a.granados@upm.es

Resumen: Las avenidas son un tema de gran interés por su relación directa con la seguridad de la presa. En la cuestión 94 del 24 Congreso de ICOLD las avenidas se han abordado desde el punto de vista de la gestión, muy importante en la fase de explotación de las presas. En el presente artículo se describen los trabajos presentados a la citada cuestión, en los cuales se muestran las experiencias y tendencias actuales sobre: nuevas metodologías y normativas de cálculo, riesgos específicos que se afrontan durante la evacuación de avenidas, impacto de los estudios actualizados en las presas existentes y acciones para su adaptación.

Palabras Clave: Capacidad de vertido; Avenida de proyecto; Adaptación de aliviaderos; Normas de explotación; Riesgos específicos; Obras de restitución

Abstract: Floods are a very interesting subject owing to their relationship with dam safety. Question 94 of the 24th ICOLD Congress has dealt with flood discharge, which is very important from the operation point of view. This article describes the submitted reports, in which present experiences and trends are shown: new methodologies and design standards, specific risks that arise during flood routing, impact of new flood computations on existing dams and upgrading actions.

Keywords: Discharge capacity; Design flood; Spillway upgrading; Operation rules; Specific risks; Energy dissipation structures

1. Introducción

La cuestión 94 del 24 Congreso Internacional de Grandes Presas, celebrado en junio de 2012 en Kyoto, se ha dedicado a la gestión de avenidas. Los temas relacionados con las avenidas han suscitado siempre un gran interés debido a que tienen una relación directa con la seguridad de la presa e influencia en el dimensionamiento, diseño de sus órganos de desagüe y establecimiento de usos y normas de explotación. Por ello se han abordado en repetidas ocasiones y desde distintos puntos de vista en diferentes congresos y boletines de ICOLD:

- Q.90. Brasilia 2009. Mejora de presas existentes.
- Q.87. Barcelona 2006. Evaluación y gestión de inundaciones y sequías.
- Q.79. Pekín 2000. Aliviaderos y seguridad de presas.
- Q.71. Durban 1994. Envejecimiento de aliviaderos y desagües.
- Q.63. San Francisco 1988. Avenida de proyecto y estrategia de laminación.
- Q.50. Nueva Delhi 1979. Aliviaderos y desagües de gran capacidad.
- Q.41. Madrid 1973. Control de avenidas y disipación de energía durante la construcción y la explotación de las presas.
- Q.12. Nueva Delhi 1951. Métodos de determinación de la máxima avenida. Selección y dimensionamiento de aliviaderos y desagües.
- Boletín 156. 2012. Gestión integrada del riesgo de avenidas.
- Boletín 142. 2011. Seguridad en la laminación de la avenida extrema.
- Boletín 108. 1997. Coste del control de avenidas en presas. Revisión de la literatura y recomendaciones.
- Boletín 82. 1992. Avenida de proyecto. Estado del arte.
- Boletín 58. 1987. Aliviaderos de presas.

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de diciembre de 2012.

Recibido: septiembre/2012. Aprobado: septiembre/2012



Tabla 1. Relación de informes Q.94

Informe	Autores	Título	País
R1	Satrapa L., Broucek M., y Pechar J.	Study on measures to increase the capacity of protective structures on Orlik dam	República Checa
R2*	Bergström S., Andréasson J. y Graham L.P.	Climate adaptation of the Swedish guidelines for design floods for dams	Suecia
R3	Kennewell Van A., Taylor M.J. y Hakin W.	Doing more with less: an innovative design approach to a new spillway control system	Australia
R4*	Herweynen R., Wallis M. y Griggs T.	Spillway design trends: some recent Australian case studies	Australia
R5*	Wiley J., Ewing T., Wark B. y Lesleighter E.	Complementary use of physical and numerical modelling techniques in spillway design refinement	Australia
R6*	Akalay M.B., Zakaria A. y Ferhan M.	Conception et dimensionnement de l'évacuateur de crue du barrage Wirgane	Marruecos
R7	Chraïbi A.F.	Protection contre les érosions à l'aval du bassin de dissipation du barrage de Mohamed ben Abdelkrim el Khattabi	Marruecos
R8*	Yang Y., Andreasson P.	Instability of embankment dams due to headward erosion caused by spillway flood discharge	Suecia
R9	Erpicum S., Machiels O., Piroton M., Nagel V. y Laugier F.	Piano key weir (PKW) solution to upgrade Raviege dam spillway (France)	Bélgica
R10	Kosik A.	Downstream erosion. Wloclawek dam. Characteristics of the process	Polonia
R11*	Drobot R. y Draghia A.F.	Design floods obtained by statistical processing	Rumanía
R12*	Bellendir E.N., Volynchikov A.N. y Sudolskiy G.N.	Boguchany HPP additional spillway: necessity of construction and peculiar features of design	Rusia
R13*	Leite Ribeiro M., Pfister M., Boillat J.L., Schleiss A.J. y Laugier F.	Piano key weirs as efficient spillway structure	Suiza
R14*	Aruppola S.R.K. y Palangasinghe P.S.	Victoria dam. Sri Lanka. Manual operation criteria for moderate flows over automated operations	Sri Lanka
R15	Boes R.M.	Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways	Suiza
R16	Frossard E. y Rabei M.	La reconfiguration de l'évacuateur du barrage de Koudiat-Acerdoun (Algérie)	Francia
R17*	Bollaert E.F.R., Duarte R., Pfister M., Schleiss A.J. y Mazvidza D.	Physical and numerical model study investigating plunge pool scour at Kariba dam	Suiza
R18	Geringer J., Nazzal M. y Saloojee A.	Spillway and energy dissipation design considerations for Metolong dam	Sudáfrica
R19	Hirschowitz P., Robinson B., Knoesen S. y Gibbons F.	A case study of flood lines for multiple dam failures	Sudáfrica
R20*	Nortje J.H.	Upper-bound estimation of extreme flood peaks by statistical analysis of regional record maximum flood peaks	Sudáfrica
R21*	Paquet E., Lang M. y Carre J.C.	SCHADEX method for extreme flood estimation: overview, applications and perspectives	Francia
R22*	Vermeulen J. y Laugier F.	Design and construction of new innovative labyrinth piano key weir spillways (PKW)	Francia
R23	Aigouy S., Albert C., Degoutte G., Deroo L., Doms E., Frossard E., Fruchart F., Lang M. y Le Delliou P.	Guidelines for design of dam spillways in France	Francia
R24	Dasgupta B., Das K., Basu D., Green R. y McGinnis R.	Computational approach to predict rock erosion in unlined spillways	Estados Unidos
R25	Kocahan H.T., Wyckoff R., y Kennewell, V.	Use of auxiliary spillways controlled with fusegates to upgrade dams with inadequate spillways	Estados Unidos



Tabla 1. Relación de informes Q.94 (continuación)

R26	Humar N. y Kryzanowski A.	The Drijsica case study. Restoration of the stilling basin for improvement of hydraulic conditions	Eslovenia
R27*	Lafuente R., Esteban F., Merino M., de Diego P., Martínez J.L. y Corchera L.J.	Heightening of Yesa Dam: an opportunity to upgrade flood control management	España
R28	Estrella S., Sánchez Juny M., Dolz J., Ibáñez de Aldecoa R., Rodríguez J. y Balairón L.	Recent trends in stepped spillways design: behavior without sidewalls	España
R29	Mateos C., Elvira V., Cordero D. y Ramos del Rosario T.	Regulated siphons for advance discharge in floods	España
R30*	Martín Carrasco F.J., Muñoz J.G. y Granados A.	Risks associated to flood control dams located on extremely dry areas	España
R31*	Kubo A., Fijisawa T., Higuchi A. y Yoshida H.	Redevelopment of Tsuruda dam	Japón
R32	Tochigi I., Nomoto K., Saito G., Hino T. y Ikeda, K.	A study on improving flood control methods for extraordinary floods	Japón
R33	Harada M., Takasu S., Yoshida H. y Ikeda T.	Overview of the planning of the Kanogawa dam tunnel spillway	Japón
R34*	Fujita A. y Kataoka K.	Dam inflow prediction system based on distributed rainfall-runoff model	Japón
R35	Kashiwayanagi M., Fujita Y., Nakano A., Uchida S., Odagawa M. y Yagome Y.	Hydrodynamic pressure action on spillway gates and waterway of hydropower plants during large earthquakes	Japón

* Informes seleccionados para su presentación en las sesiones del congreso

- Boletín 49a. 1986. Explotación del sistema hidráulico de las presas.

En este congreso el tema se ha analizado desde el punto de vista de la gestión, muy importante hoy en día en el que se cuenta con un gran número de presas construidas y se va prestando progresivamente una mayor atención a la explotación, seguridad (de la propia presa y de lo situado aguas abajo) y aprovechamiento de los recursos.

La cuestión se desarrolló durante cuatro sesiones de trabajo, dos la tarde del día 7 y otras dos la mañana del 8. Para la presentación oral y discusión en las sesiones, los informes recibidos se agruparon en cuatro subtemas, que fueron tratados de forma individual en cada una de las cuatro sesiones de trabajo. Los subtemas seleccionados fueron:

- Evaluación, revisión y selección de las avenidas de proyecto y extrema.
- Tendencias actuales en el diseño y adaptación de aliviaderos.
- Riesgos específicos en la evacuación de avenidas: maniobra de compuertas, evacuación de elementos flotantes.
- Elementos de disipación de energía: cuencos amortiguadores y erosión aguas abajo.

La mesa presidencial estuvo compuesta por:

- Presidente: B.P. Machado (Brasil)
- Vicepresidente: E. Cifres (España)
- Relator general: J. Guo (China)
- Secretario: J. Kashiwai (Japón)

Se incluye a continuación un resumen general de las aportaciones y casos presentados en la cuestión 94.

2. Relación de informes presentados

Se recibieron un total de 35 informes provenientes de 16 países (ver Tablas 1 y 2), de los que se seleccionaron 17 para su presentación oral en las sesiones (1).

Tabla 2. Número de informes presentados por países

Informes presentados	País
5	Japón
4	Francia y España
3	Australia, Sudáfrica y Suiza
2	Estados Unidos, Marruecos y Suecia
1	Bélgica, Eslovenia, Polonia, República Checa, Rumania, Rusia y Sri Lanka

El informe general lo preparó la Doctora Jun Guo del China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) (2).

3. Evaluación, revisión y selección de las avenidas de proyecto y extrema

Determinar lo mejor posible las avenidas a las que puede estar sometida la presa es un campo en el que se producen avances de manera continua y que ha tenido un gran desarrollo en estos últimos años, debido a que se cuenta con un mayor conocimiento de los procesos físicos que definen el comportamiento hidrológico y con herramientas más potentes para su estudio y modelización. A la par de este desarrollo también se revisan periódicamente las normativas y estándares en los distintos países para adaptarlos al estado del arte en la materia. Los cambios en la legislación introducen condiciones más exigentes poniendo un mayor énfasis en la seguridad de la presa: avenidas de mayor periodo de retorno, mayores resguardos de seguridad, acciones y condiciones de desagüe no contempladas anteriormente, etc.

La razón principal que motiva estos avances es la incidencia que tienen las avenidas sobre la seguridad, ya que entre un cuarto y un tercio de las roturas de presas se producen por sobrevertido, llegando en las presas de materiales sueltos a ser de hasta tres cuartas partes del total. Existen también otras razones que propician la actualización y revisión de los estudios hidrológicos, entre las cuales cabe destacar: el estudio del impacto del cambio climático, la aplicación de nuevos modelos y la disposición de series de datos más largas y fiables, y el estudio particularizado de fenómenos que se producen en determinadas regiones del planeta como: la coincidencia de fuertes lluvias con el deshielo o el control de las avenidas y el aprovechamiento de sus recursos en zonas extremadamente áridas.

3.1. Revisión de la capacidad de vertido en presas existentes

Se observa que en muchos casos los resultados de estas actualizaciones dan avenidas de magnitud superior a las empleadas anteriormente, que unido a otros criterios que puedan venir impuestos por

cambios en la normativa hacen necesaria la revisión de la capacidad de vertido de las presas en explotación y la adecuación en su caso.

En función de las conclusiones de la revisión puede ser necesaria la realización de acciones en la presa para cumplir con las nuevas condiciones. Estas acciones están encaminadas a obtener: mayor capacidad de vertido, mayor capacidad de laminación y mayor resguardo; siendo las líneas principales de actuación las siguientes:

- Modificación del aliviadero de la presa: incremento del desarrollo del vertedero, incremento del calado vertiente o construcción de un nuevo aliviadero auxiliar.
- Recrecimiento de la presa. Aumento la capacidad del embalse.
- Restricciones en el llenado. Volumen destinado a laminación de avenidas.
- Combinación de varias de las acciones anteriores.

Algunos ejemplos de países en los que se han actualizado los estándares de diseño y están empezando a afrontar la adaptación de sus presas existentes son:

- Suecia (R2, R8). Normativa actualizada en el año 2007, se tiene en cuenta el impacto del cambio climático y los casos extremos en los que se suman las puntas de fuertes precipitaciones con el deshielo. Una proporción importante de los aliviaderos estudiados no cumple con las nuevas normas, que son más restrictivas y se incrementa la punta de los caudales entre el 15% y el 50%. Los criterios de diseño varían en función del riesgo o categoría en la que esté clasificada la presa.
- Republica Checa (R1). Presenta el caso de la presa de Orlik, en la cual la actualización de las avenidas a un periodo de retorno de 10.000 años ha hecho necesaria la revisión de la seguridad hidrológica de la presa y su capacidad de laminación y desagüe. Se realiza una descripción de las alternativas consideradas para su adaptación, que incluyen la posibilidad de reforzar la presa (de gravedad) para que admita vertidos por coronación.
- Australia (R3, R4). La selección de la avenida de proyecto se hace en base a una guía técnica



Tabla 3. Normativa para la selección de la avenida de proyecto (Australia)

Riesgo	Probabilidad de excedencia anual
Extremo	PMF (Probable Maximum Flood)
Alto - A	PMPDF (Probable Maximum Precipitation Design Flood)
Alto - B	Entre 10^{-4} y PMPDF o 10^{-6}
Alto - C	Entre 10^{-4} y PMPDF o 10^{-6}
Medio	Entre 10^{-3} y 10^{-4}
Bajo	Entre 10^{-2} y 10^{-3}

del Comité Australiano (ANCOLD) del año 2000. Los criterios de selección de la categoría de la presa varían en función del riesgo (ver Tabla 3). Se presenta como ejemplo la presa de Little Para, en la que tras la actualización era preciso considerar la PMF como avenida de diseño. Se comprobó que el aliviadero era insuficiente y se ha construido un aliviadero auxiliar dotado con compuertas fusibles.

- Francia (R9, R23). En Francia el periodo de retorno de la avenida de proyecto se fija en función de la tipología de presa (fábrica o materiales sueltos) de su altura y de su capacidad. Como ejemplo se detalla el estudio del nuevo aliviadero de la presa de La Raviège, necesario tras la actualización del estudio hidrológico y la evaluación de la capacidad de laminación y los resguardos.
- Rusia (R12). Incluye la descripción detallada de la necesidad de un nuevo aliviadero para la presa de Boguchany y sus características de diseño.
- Japón (R32). Constata que en los últimos años ha habido un cambio en los datos hidrológicos, las lluvias son más concentradas, lo que obliga a revisar los usos y estrategias de laminación de las presas.

Cuando se lleva a cabo una actualización de las avenidas es conveniente analizar los resultados obtenidos y comprobar que son lógicos. Para ello es útil la realización de estudios de sensibilidad de los parámetros y el contraste de distintas metodologías. El aumento de la magnitud de las avenidas puede suponer la modificación de los órganos de desagüe, de la presa en sí o de sus usos y normas de explotación, con el consiguiente coste. Esta comprobación

es necesaria para que las medidas correctoras a establecer sean adecuadas y evitar sobredimensionar los elementos del sistema.

3.2. Metodologías de cálculo y estimación de avenidas

En las ponencias recibidas se comprueba que los métodos probabilísticos y determinísticos (PMF) siguen siendo de amplia aplicación (R11, R20). Si bien se observa que se están desarrollando y se emplean cada vez más los modelos de simulación lluvia-escurrimiento, que se complementan con la realización de análisis estocásticos y permiten obtener un set de avenidas, distintas en punta y volumen pero asociadas a una misma probabilidad, con el que se puede caracterizar mejor el riesgo hidrológico y dimensionar los órganos de desagüe de la presa (R21, R34).

Se señala también la importancia de que los métodos empleados consideren las características particulares de cada caso. Aparte de los procesos convencionales (precipitación, infiltración y transporte), en los estudios de avenidas se deben tener en cuenta otros factores como el efecto del cambio climático o las situaciones específicas de zonas concretas (deshielo, ocurrencia de eventos convectivos, etc.); que pueden suponer variaciones importantes en los resultados, con el consiguiente incremento del riesgo en la seguridad de la presa (R2).

Los estudios sobre el impacto del cambio climático son importantes para tener una visión a largo plazo de la evolución del comportamiento hidrológico, tanto desde el punto de vista de las aportaciones como de las avenidas. A día de hoy se conoce el fenómeno y se tiene una idea de qué causas puede provocar, pero existen todavía incertidumbres importantes, por lo que el análisis de sus resultados debe efectuarse con cautela. Conforme avancen los modelos y se disponga de una mayor cantidad de datos, se irán obteniendo resultados más fiables y se entenderá mejor el fenómeno.

En el informe R23 se exponen los criterios que se emplean en Francia para el cálculo de avenidas y el dimensionamiento de aliviaderos. En lo referente a metodología cabe destacar la tendencia al desarrollo y utilización de modelos hidrológicos de simulación del proceso lluvia-escurrimiento y en cuanto a criterios de diseño la recomendación de analizar el comportamiento del embalse cuando se presentan diversas



Fig. 1. Recrecimiento de la presa de Yesa. Vista general de las obras.

avenidas seguidas, lo cual puede tener un efecto equivalente o incluso más desfavorable que la ocurrencia de otras de mayor periodo de retorno.

Un tipo particular de avenida entrante, que se genera de manera totalmente distinta a las producidas por la precipitación, son las ondas de rotura de presas situadas aguas arriba (R19). Las ondas de rotura no se determinan mediante modelos hidrológicos, sino mediante modelos en los que se simula la rotura de la presa y el posterior tránsito del flujo hacia aguas abajo. Es importante conocer los hidrogramas que puede recibir la presa como consecuencia del fallo de otras situadas aguas arriba. En general, estos hidrogramas de entrada no se emplean de forma específica para diseño de presa y sus órganos de desagüe, pero sí para establecer los ries-

gos que se afrontan y los planes de emergencia que deriven de ello.

3.3. Mejora de funcionalidad y seguridad a partir de un recrecimiento

El recrecimiento de una presa es una magnífica opción para la mejora global de los aspectos relativos a su funcionalidad y seguridad. Supone un incremento del vaso del embalse, tanto en volumen almacenado como en superficie inundada. Por lo que todas las funciones en las que tienen influencia estos parámetros se ven beneficiadas. La ventaja de este tipo de intervención es que no solo permite atender la finalidad principal sino que además tiene beneficios adicionales en las otras facetas.



Un buen ejemplo de recrecimiento y de las mejoras adicionales que ofrece es el de la presa de Yesa (R27). La presa sirve para el abastecimiento de la ciudad de Zaragoza y los riegos del canal de las Bárdenas. Se trata de un recrecimiento de 30 m de altura, cuya finalidad principal es completar la regulación del río Aragón. El río Aragón tiene una aportación media anual de 1.322 hm³. La presa existente tiene una capacidad de 447 hm³ y va a pasar a 1.079 hm³.

La necesidad de recrecimiento para aumentar la capacidad de regulación se aprovecha también para mejorar su seguridad y la gestión de avenidas. Para ello, además del propio recrecimiento de la estructura, se han considerado las siguientes cuestiones a la hora de diseñar el nuevo aliviadero y fijar los resguardos:

- Adaptación a la nueva normativa de seguridad, en la cual se establecen criterios más restrictivos a los existentes en el momento de construcción de la presa.
- Actualización del estudio hidrológico y de avenidas, con series de datos más largas y de mayor calidad.
- Actualización del estudio de laminación. Es importante reseñar que una vez recrecida la presa se dispone de una mayor superficie inundable, lo que redundará en una mejor laminación de las avenidas, ya que las aportaciones de la riada se pueden almacenar transitoriamente en el embalse con una sobreelevación menor.
- Condicionantes aguas arriba de la presa. La sobreelevación en avenidas no debe afectar a las poblaciones existentes en la cola del embalse (Sigües).
- Condicionantes de laminación y protección de las poblaciones situadas aguas abajo. En concreto Sangüesa, situada en la confluencia de los ríos Irati y Aragón. Realización de un estudio de laminación conjunta de las presas de Itoiz y Yesa. Debido a que la presa de Itoiz tiene un aliviadero de labio fijo, se decide que dos de los cuatro pozos que conforman el aliviadero de Yesa estén regulados con compuertas, de tal forma que se cuente con un control de los vertidos y se puedan minimizar los riesgos aguas abajo.

El nuevo aliviadero se dispondrá recreciendo los cuatro pozos con que cuenta el aliviadero actual,

que han tenido un comportamiento satisfactorio en sus 50 años de servicio. En su momento el diseño se ayudó de un modelo reducido que se realizó *in situ*. Para el recrecimiento se ha realizado un modelo de uno de los pozos en las instalaciones del CEDEX (Madrid, España)

4. Tendencias actuales en el diseño y adaptación de aliviaderos

En este subtema se agrupan ejemplos prácticos sobre intervenciones realizadas en aliviaderos y trabajos de investigación en laboratorio para la caracterización de nuevas tipologías. El estudio de nuevas variantes es de interés de cara al diseño de nuevos aliviaderos y muy especialmente para la adaptación de los existentes.

Existen dos restricciones básicas que condicionan los diseños y las alternativas a plantear en los proyectos de adaptación de aliviaderos: la ubicación y configuración del nuevo aliviadero y la restitución al cauce de los nuevos caudales.

En cada proyecto se debe realizar un estudio de alternativas ajustado a sus características particulares (R1). Para la selección de la alternativa más efectiva es habitual tener en cuenta la evaluación económica y el análisis de riesgos, a los cuales según el caso se pueden añadir otros criterios: medioambientales, tecnológicos, complementariedad con otros usos, plazo de ejecución, etc.

4.1. Aliviadero auxiliar

La construcción de un aliviadero adicional es una opción muy empleada para incrementar la capacidad de vertido de una presa. En varios de los casos presentados se adopta esta solución.

En general se mantiene el aliviadero existente como aliviadero principal. Es decir, que el aliviadero existente es el que se emplea de forma habitual en explotación ordinaria (por ejemplo, hasta la avenida de proyecto) y el aliviadero adicional se diseña como un aliviadero de emergencia que entra en funcionamiento para evacuar las crecidas extraordinarias. Al aliviadero principal se le exige un buen comportamiento en todos sus elementos: embocadura, canal de descarga y estructura de disipación de energía y restitución al cauce. Mientras que al aliviadero de emergencia solo se le exige

seguridad, tal que en eventos extremos se le puede permitir el agotamiento puntual de los resguardos, pequeñas erosiones locales, etc.

Un ejemplo de aliviaderos adicionales diseñados con este criterio, es la alternativa que se se ha empleado en algunas presas de gravedad de Australia (R4) disponiendo este aliviadero adicional en los bloques de los estribos. Son aliviaderos con mucha longitud de vertedero y caudal específico muy bajo, en los que la restitución es básicamente una losa de protección del pie de presa.

En otros casos este tipo de aliviaderos de emergencia se disponen independientes del cuerpo de presa y se regulan mediante de compuertas fusibles (R25).

4.2. Aliviaderos escalonados

Los aliviaderos con paramento escalonado han tenido un gran desarrollo en paralelo al de las presas de hormigón compactado. Su estudio se ha realizado con profusión en distintos centros de investigación y universidades con objeto de poder aprovechar mejor sus ventajas y limitar sus problemas. Su principal ventaja es que el flujo pierde velocidad en la caída, por rozamiento con los remolinos que se forman en los escalones, disipándose una parte importante de energía, de forma que se pueden realizar cuencos amortiguadores más pequeños. Su desventaja más representativa son los problemas de durabilidad, debido a que se puede producir cavitación y desgaste de los escalones.

La ventaja que supone una mayor disipación de energía en el canal de descarga se ha tenido en cuenta en el diseño del nuevo aliviadero de superficie de la presa de Boguchany, en Rusia (R12). La disposición de un aliviadero escalonado ha permitido encajar un cuenco más pequeño y con un diseño no convencional, con la solera inclinada que se adapta a la excavación existente.

En el R15 se hace una revisión del estado del arte sobre aliviaderos escalonados, resumiéndose sus características básicas de funcionamiento y los criterios generales de diseño: tipos de flujo, aireación, diseño del escalonado inicial y disipación de energía, y se detallan las últimas investigaciones llevadas a cabo en el laboratorio del ETH (Zúrich, Suiza) centradas en la disposición y diseño de aireadores para prevenir la cavitación.

En España, el Instituto FLUMEN de la UPC (Barcelona) continúa los estudios para la caracterización de este tipo de aliviaderos. En el R28, presenta los primeros resultados de análisis realizados sobre aliviaderos escalonados sin cajeros laterales. La ausencia de cajeros puede suponer una reducción de costes en la construcción. Su funcionamiento se caracteriza por el que flujo al no tener constricciones laterales se expande, produciéndose una disminución del caudal específico a lo largo del canal de descarga y una mayor pérdida de energía al pie de presa. La estructura de restitución al cauce puede ser más económica que la de un aliviadero con cajeros. Se ha efectuado una campaña de ensayos en el modelo ALIVESCA, estudiándose distintos anchos de vertedero (7,5 m, 15 m y 22,5 m) y registrándose la distribución de caudales, las velocidades, los caudales y la concentración de aire a lo largo y ancho del canal de descarga. En los resultados obtenidos se comprueba que se produce una reducción del caudal específico en el pie de presa de entre un 50% y un 70%. Se pretende continuar con los trabajos de esta nueva línea de investigación (regiones con riesgo de cavitación, campo de presiones en los escalones, campo de velocidades y de flujo en la entrada a la obra de restitución, introducción de cajeros convergentes en la parte inferior del aliviadero, etc.) para poder definir mejor las características hidráulicas de funcionamiento en ausencia de cajeros y posibilitar su aplicación efectiva.

Prescindir del escalonado en el canal de descarga de una presa de hormigón compactado puede ser necesario bajo determinadas condiciones, una de ellas es por razones ambientales, para facilitar el paso de los peces (R4). En otros casos, en los que no sea posible eliminar el escalonado y se considere importante el paso de peces, se establecen normas de explotación tratando que los vertidos sean en régimen *skimming* el mayor tiempo posible; ya que en régimen *nappe* se registran mayores tasas de muerte debido al golpeteo de los peces contra los escalones del aliviadero.

4.3. Aliviaderos tipo tecla de piano (PKW)

Otro tema de desarrollo reciente que está siendo investigado y que ha sido empleado en algunas presas en Francia (Goulours, Saint-Marc, L'Étroit y Gloriettes) son los aliviaderos con vertedero de tipo



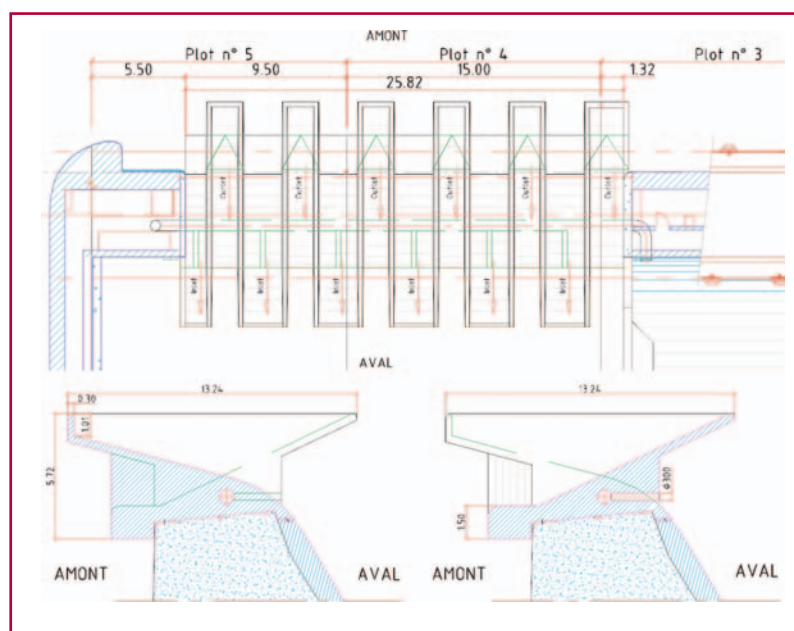


Fig. 2. Presa de La Raviège. Planta y secciones del aliviadero auxiliar tipo PKW.

tecla de piano (PKW - Piano Key Weir). Este tipo de vertedero es una variante de los aliviaderos en laberinto, con planta recta, más compacta, y que ocupa una superficie menor, de manera que pueden acoplarse bien en el ancho de coronación de una presa de gravedad (R22).

Al igual que los aliviaderos en laberinto se caracterizan por contar con un labio de gran desarrollo y tener por tanto mayor capacidad que un vertedero convencional. Es un tipo de aliviadero útil en cerradas estrechas o sitios de espacio limitado y puede serlo en la adaptación de presas existentes en las que sea necesario contar con una mayor capacidad de vertido.

Al ser una tipología de aliviadero relativamente reciente, existe un gran campo en la caracterización hidráulica de su funcionamiento y en la optimización de su diseño mediante ensayos sistemáticos en laboratorio (ULg - Lieja, Bélgica y EPFL - Lausana, Suiza). Los estudios hidráulicos se centran en el análisis del espesor de los muros, la geometría de los módulos, las embocaduras de inlets y outlets, los módulos o teclas laterales y en la formulación de modelos teóricos de funcionamiento (R9, R13).

Un caso práctico de aplicación es el nuevo aliviadero de la presa de La Raviège, en Francia (R9), que precisaba un aumento de su capacidad de vertido consecuencia de la actualización del estudio hidrológico. Este aumento se conseguirá mediante la construcción de un nuevo aliviadero com-

plementario, que se instalará sobre el cuerpo de presa anexo al existente. Debido al reducido espacio con el que se contaba para su ubicación se optó por un aliviadero tipo PKW, que se ha estudiado en detalle en modelo reducido. Los resultados muestran la mayor de capacidad de este tipo de vertedero (hasta tres veces en comparación a un vertedero convencional de igual longitud) y su buen comportamiento, resaltando la buena aireación en su incorporación al canal de descarga.

Además de la caracterización hidráulica es importante conocer también su comportamiento estructural para asegurar una buena durabilidad, ya que son estructuras relativamente esbeltas, mucho menos robustas que las que conforman los aliviaderos convencionales.

4.4. Uso de compuertas fusibles

Las compuertas fusibles son otra posibilidad que se puede emplear en la adaptación y mejora de aliviaderos, especialmente para afrontar condiciones extremas. Este tipo de compuertas son piezas prefabricadas que conforman el vertedero, que pueden tener forma plana o en laberinto y que en unas condiciones determinadas de nivel de embalse se desestabilizan (habitualmente de manera secuencial), de forma que se abren vanos con mayor calado vertiente y mayor capacidad de vertido.

Una aplicación concreta de su uso a la que se hace referencia en los artículos presentados es para regular los aliviaderos secundarios o de emergencia. En el R25 se presentan dos casos significativos en lo relativo a evolución de este tipo de compuertas (tanto en dimensiones como en materiales). El primero es el aliviadero auxiliar de la presa de Canto, en Estados Unidos en el que se han instalado compuertas fusibles de hormigón de 9,75 m de altura; y el segundo es la presa de Little Para en Australia, en cuyo aliviadero auxiliar se han empleado compuertas de 4,95 m fabricadas con acero inoxidable del tipo duplex LDX 2101.

4.5. Aliviaderos en presión

Otra de las alternativas que se presentan para mejorar la capacidad de descarga de una presa existente es mediante la construcción de un aliviadero en presión. Se trata de una alternativa muy útil

en lugares de orografía abrupta y cerradas estrechas en las que no es posible disponer aliviaderos más grandes. En su configuración, se puede optar por la ejecución de conductos de gran diámetro en el propio cuerpo de presa o bien por la construcción de un túnel en uno de los estribos de la presa. Ejemplos de estas soluciones son los trabajos realizados en las presas de Tsuruda y Kanogawa en Japón.

En la presa de Tsuruda (R31) se van a construir 5 nuevos conductos de 5 m de diámetro, 3 para su uso como desagües de fondo y 2 como toma hidroeléctrica. En el informe presentado se describen los problemas principales que se afrontan durante la construcción: vibraciones que se producen al horadar el cuerpo de presa, tensiones que se pueden generar en los bloques (de 15 m de anchura) e instalación de un escudo frontal y una estructura de rejas y ataguía.

En la presa de Kanogawa (R33) se ha construido un túnel en la margen derecha de 11,5 m de diámetro. La comunicación describe los condicionantes y la solución adoptada haciendo hincapié en los problemas específicos de diseño que pueden tener este tipo de soluciones: trazado, altas velocidades de circulación, durabilidad del revestimiento, entrada de sedimentos y restitución al cauce.

4.6. Aliviaderos en sifón

Los aliviaderos en sifón son otra opción aplicable cuando se precisa mejorar la capacidad de desagüe de una presa (R29). El diseño de este tipo de aliviaderos y la posibilidad de regularlos y hacer un uso avanzado de los mismos para la gestión de avenidas es una de las líneas de investigación que se vienen desarrollando durante los últimos años en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

Una de las ventajas que ofrecen los aliviaderos en sifón regulables es la posibilidad de realizar vertidos cuando el embalse se encuentra por debajo del labio del aliviadero, de manera que en una fase temprana de la avenida se puede realizar un vaciado preventivo y conseguir una mejor laminación. Para poder realizar estas operaciones el sifón debe ser regulable, para ello se utilizan diseños con dos cámaras separadas por un deflector y un sistema de bombeo que permite inyectar agua del embalse para su cebado y accionamiento.

Estas maniobras preventivas de vertido, al igual que las que se pueden efectuar con las compuertas de un aliviadero o de un desagüe de fondo, podrían ocasionar problemas aguas abajo, por lo que deben estar claramente definidas en las normas de explotación. Para reducir el riesgo de mal funcionamiento de estos sifones regulables se recomienda:

- Que el cebado de los distintos sifones que compongan el aliviadero se realice de manera secuencial.
- Que esta opción de uso avanzado (preventivo) sea empleada únicamente en situaciones extraordinarias. Para lo cual se activará de forma manual, mientras que en las situaciones ordinarias el aliviadero tendrá un funcionamiento automático.
- Que la estrategia se apoye en un modelo de decisión bajo la supervisión de una autoridad con conocimiento de la situación hidrológica en la cuenca, tanto aguas arriba (previsión de avenidas) como aguas abajo (caudales circulantes y previsión de daños).

4.7. Uso de modelos CFD

En los últimos años ha habido un avance muy importante en el uso de los modelos numéricos de simulación de flujo (CFD - Computational Fluid Dynamics) y su aplicación al sistema hidráulico de las presas: desvío del río, aliviadero, desagües de fondo, tomas, escalas de peces, etc. El uso creciente de estos modelos se debe fundamentalmente a dos razones: por un lado al desarrollo de herramientas mejores y más potentes, que son accesibles y comprensibles para un público mayor; y por otro, a que permiten realizar experimentos de forma rápida, económica y productiva.

Las ventajas de los modelos CFD es que son rápidos y económicos. Se pueden desarrollar y adaptar en poco tiempo y se pueden emplear en todas las fases del diseño. En las fases preliminares (predimensionamiento y comparación de soluciones) se emplean modelos más básicos, calibrados a partir de la experiencia previa o mediante fórmulas; y para las fases de proyecto, construcción y explotación se utilizan modelos más finos y detallados. En estas fases de detalle es recomendable complementar los modelos CFD con modelos reducidos de laboratorio.



En el informe R5 se hace un análisis sobre el uso de los modelos CFD y su comparación con los modelos físicos, resultando muy interesantes las conclusiones obtenidas, que son:

- Los modelos CFD producen muy buenos resultados en zonas de velocidad baja.
- Con mallas gruesas se obtienen resultados aceptables, útiles para los diseños preliminares y los estudios de comparación de soluciones.
- La experimentación con modelos CFD es fácil y rápida. Se puede aplicar al estudio de soluciones innovadoras sin necesidad de realizar inversiones significativas.
- Los modelos CFD tienen que progresar en lo relativo a determinación de presiones, flujo turbulento, aireación vibraciones y resalto hidráulico.
- En la práctica es recomendable el uso conjunto y complementario de los modelos CFD. De forma que se puedan calibrar los parámetros, comparar los resultados y refinar los diseños finales.

5. Riesgos específicos en la evacuación de avenidas: maniobra de compuertas y evacuación de elementos flotantes

En los informes presentados se incluyen experiencias y recomendaciones relativas a los riesgos que pueden producirse en la gestión y evacuación de avenidas en relación a fases de vida o emplazamientos particulares de las presas.

5.1. Riesgos por erosión en relación a la maniobra de compuertas

La presa Victoria en Sri Lanka (R14), es una presa bóveda, que cuenta con un aliviadero regulado con compuertas de 8 vanos. Al tratarse de un aliviadero ancho en relación al cauce los vertidos de los vanos laterales inciden sobre las laderas produciendo erosión, con el consiguiente riesgo para la seguridad de la presa. Para evitar que siga avanzando esta erosión se han modificado las compuertas, que han pasado de funcionamiento automático a manual; y se ha modificado la secuencia de apertura de las mismas, antes de margen derecha a margen izquierda y actualmente del centro hacia los lados. Complementariamente se han revisado las normas

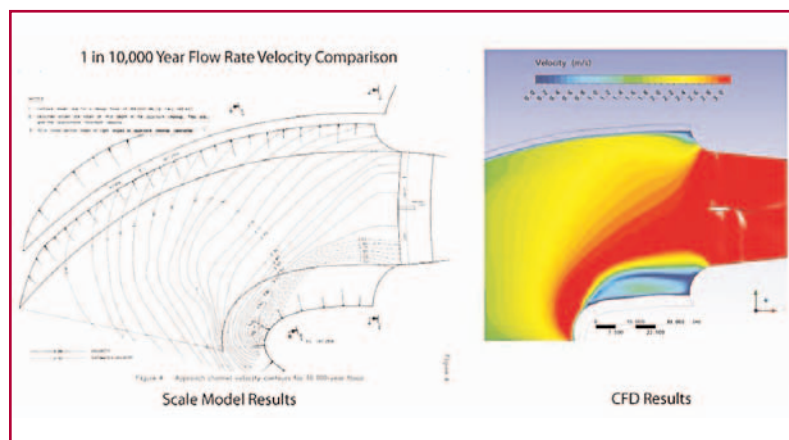


Fig. 3. Presa de Blue Rock. Comparación de resultados. Modelos físico y CFD.

de explotación para disponer de una metodología de laminación que tenga en cuenta el riesgo de erosión en las laderas, intentando evitar el uso de las compuertas laterales.

Se trata también en este artículo sobre los aspectos tecnológicos en países en vías de desarrollo; incidiendo en que se deben emplear elementos que sean baratos, robustos y fáciles de utilizar, dejando en un segundo plano posibilidades más complejas y avanzadas.

El aliviadero de la presa de Wirgane (Marruecos) presentaba un problema similar (R6). Se trata de una presa de gravedad, con un aliviadero de 4 vanos, que restituye las aguas al cauce mediante un trampolín. Se había detectado que en la salida del trampolín una parte del chorro se expandía lateralmente e impactaba sobre las laderas y no en el cauce. Para su corrección se efectuó un estudio apoyado en un modelo reducido a partir de cuyos resultados se optó por disponer cajeros laterales en cada uno de los vanos y así reconducir mejor el flujo hasta la salida, con un reparto más homogéneo. También se establecieron normas de operación de las compuertas para la evacuación de avenidas estableciendo un orden de apertura del centro hacia los extremos.

5.2. Riesgos durante la construcción y adaptación de presas

Las fases de construcción o de adaptación de las presas son momentos singulares en los que se afrontan riesgos específicos que han de ser tenidos en consideración. En el informe R4 se ajuntan una serie de recomendaciones al respecto:

- Seleccionar alternativas que minimicen estos riesgos.
- Prestar atención al plan de obra, evitar la época de mayor riesgo.
- Rebajar el nivel de embalse si es posible y disponer de un sistema de control y alerta que permitan una reacción rápida.
- Disponer un plan de emergencia específico.

5.3. Riesgos en presas situadas en zonas extremadamente frías

En la comunicación R12, referente a la presa de Boguchany (Rusia), se exponen los riesgos que se pueden generar debido a las condiciones de frío extremo y cómo se han tenido en cuenta en el diseño del nuevo aliviadero. Para impedir la congelación de los mecanismos se dispone un conjunto ataguías por delante de las compuertas de forma que estas se encuentren en un recinto seco durante el periodo invernal. Este recinto cuenta con un sistema para el drenaje de las fugas de la ataguía y otro de calefacción para evitar la formación de hielo. Las compuertas son del tipo vagón y se maniobran mediante un pórtico grúa. La huella de los escalones del aliviadero tiene una pendiente del 4% para evitar que se acumule agua en su superficie. Adicionalmente, se instalan barreras aguas arriba de las ataguías para evitar el vertido de grandes placas de hielo por el aliviadero.

5.4. Riesgos en presas de laminación en zonas extremadamente áridas

Existen regiones extremadamente áridas en las que los cauces pueden estar varios años con una aportación mínima o completamente secos y de repente sobrevenir fuertes avenidas que producen grandes daños en cultivos y poblaciones. Esta situación se produce en el Sureste de España. Son zonas con pluviometría media muy baja pero concentrada en eventos convectivos extremos, denominados localmente Gota Fría. Para la protección ante avenidas de estas zonas se han ejecutado planes como el del Segura (1987-1997). Entre las infraestructuras de protección destacan las presas de laminación de avenidas, que afrontan una serie de riesgos específicos derivados de su función y de las características climáticas de la zona (R30):

- Las tormentas de gran intensidad producen un flujo muy erosivo, que puede taponar y dejar fuera de servicio los desagües de fondo de la presa.
- No se puede realizar un primer llenado lento y controlado, debido a que la aportación es mínima o nula.
- La presa está inactiva durante largos periodos de tiempo y puede llenarse en horas durante una avenida.

En el informe se incluye una serie de recomendaciones para el diseño y explotación de este tipo de presas. Estas recomendaciones se asientan sobre dos ideas principales: que los equipos y estrategia deben sencillos y efectivos y que se debe intentar aprovechar los recursos hídricos, muy valiosos en estas zonas.

- La tipología de presa y su equipamiento deben ser lo más robustos posibles y estar preparados para largos periodos de inactividad.
- Se aconseja el diseño de aliviaderos de labio fijo y la instalación de compuertas en los desagües de fondo.
- Se indica la estrategia de laminación con los desagües de fondo cerrados, porque es simple, minimiza el riesgo de taponamiento y posibilita el uso posterior del agua.
- La estrategia de vaciado del embalse se debe evaluar teniendo en cuenta la previsión de avenidas y el estado global del resto de presas y cauces en la cuenca.

5.5. Riesgos específicos en zonas sísmicas

Se presenta un estudio sobre la respuesta al sismo de determinados elementos de la presa realizado en Japón (R35). Se analizan las compuertas del aliviadero, los conductos alojados en el cuerpo de presa y las chimeneas de equilibrio de las centrales hidroeléctricas, determinándose las cargas hidrodinámicas que soportan durante un terremoto. Se trata de un estudio teórico en el que se comparan los resultados obtenidos en un modelo numérico con un modelo físico, con el objeto de conocer mejor el comportamiento de estos elementos ante el sismo y establecer una guía sobre la prevención de fallos en componentes sensibles de las presas.





Fig. 4. Presa de Los Rodeos. Avenida del 30 de septiembre de 2009.

6. Elementos de disipación de energía: cuencos amortiguadores y erosión aguas abajo

La disipación de energía y la restitución de los caudales al cauce es otro tema que suscita amplio interés, tanto por su relación con la seguridad como por su incidencia sobre el medio ambiente; y en cuyo contexto se han presentado diversas comunicaciones en las que se relacionan experiencias concretas en explotación normal y extraordinaria y trabajos de investigación.

6.1. Cuenco amortiguador y trampolín de lanzamiento

La presa de Koudiat-Acerdoune en Algeria (R16) se diseñó con un aliviadero rematado con un tram-

polín de lanzamiento de dintel liso. En comprobaciones posteriores de la geología del punto de impacto se observó que el impacto podría socavar al pie de la ladera izquierda y producir un deslizamiento importante. Para solucionar el problema, se ha diseñado un nuevo trampolín en el que cada uno se ha dividido el flujo prolongando los cajeros de cada vano hasta el trampolín y a su vez se ha modificado el diseño del dintel para cada uno de los vanos, con el propósito de que se voltee la lámina y se distribuya mejor longitudinalmente; de forma que la restitución se reparta sobre una superficie mayor y el caudal específico de impacto y el riesgo de socavación sean menores.

En el informe R18 se presentan los trabajos de ensayo en modelo reducido para el diseño del aliviadero de la presa de Metolong (Sudáfrica). Se trata

de una presa de HCR de planta recta. El problema principal en el proyecto del aliviadero es el encaje del cuenco amortiguador en un cauce estrecho y el diseño de los cajeros, que deben ser convergentes ya que el vertedero tiene una longitud mayor. Se analizan varias soluciones en modelo reducido y se aprovechan los trabajos para comparar los resultados obtenidos en el modelo físico con modelos CFD y con los modelos teóricos resultantes de las investigaciones del ETH y la UPC.

6.2. Erosión aguas abajo

Entre las ponencias recibidas se distinguen dos procesos básicos de erosión en la restitución de los caudales al río:

- El primero es debido al impacto de los chorros en el terreno y a su acción combinada con un flujo altamente turbulento. Se produce en los trampolines de lanzamiento y en los vertidos libres desde las presas bóveda. Un ejemplo muy conocido es el caso de la presa de Kariba (Zambia/Zimbabue), una presa bóveda de 128 m de altura en la que existe un socavón de unos 80 m de profundidad a pie de presa.
- El segundo es un proceso más lento, menos espectacular, que se produce en una gran parte de las presas en explotación debido a las turbulencias que se forman a la salida de los cuencos amortiguadores y los trampolines sumergidos.

A los procesos del primer tipo (impacto) se les suele prestar mayor atención, tanto en la etapa de diseño como en la de explotación. Se efectúan estimaciones y se realizan cálculos basados en resultados empíricos, se reproducen modelos físicos y se comparan con las observaciones obtenidas. Mientras que los segundos (erosión progresiva) solo son objeto de vigilancia cuando empiezan a producir problemas durante la explotación. Están menos estudiados en el campo de las presas, aunque se trata un problema analizado en otras disciplinas como la hidráulica fluvial (encauzamientos blandos, cimentación de estructuras, etc.).

Respecto a la erosión derivada del impacto directo de los vertidos se generan dos cuestiones importantes: cómo se produce y hasta dónde puede desarrollarse. Se trata de un proceso complejo que

debe ser particularizado para la geología concreta de cada caso.

En el laboratorio de hidráulica de la EPFL se lleva tiempo analizando el fenómeno de la erosión y se ha desarrollado un modelo que se ha aplicado a la presa de Kariba (R17). Como se ha indicado, es un caso muy conocido, dada la importancia de la presa y sobre todo de su embalse, de 180 km³ de capacidad. Se trata de un modelo híbrido (físico-teórico-numérico) que se desarrolla en cuatro fases: estudio de la geometría actual, desarrollo futuro del cuenco de erosión, verificación de los resultados obtenidos y ajuste al comportamiento histórico y establecimiento de medidas correctoras.

En la comunicación R24 se efectúa también un análisis teórico sobre los mecanismos de erosión y deslizamiento en aliviaderos sin revestir. Combina un modelo CFD para simular el flujo y obtener el campo de presiones con otro geomecánico que reproduce el desprendimiento de bloques de roca. Como casos de estudio se han seleccionado el socavón de la presa de Kariba y el aliviadero de la presa de Canyon Lake (EEUU). Este segundo es un caso de erosión regresiva, similar al ocurrido en la presa de Ricobayo (España).

El proceso de erosión progresiva, se trata también en varios de los informes presentados, en los que se resalta que habitualmente es infravalorada y que se manifiestan cuando se evacúan las primeras avenidas de cierta magnitud, entre el 30% y el 50% de la avenida de proyecto.

En Suecia se ha realizado una investigación con modelos reducidos de 4 presas para caracterizar es-

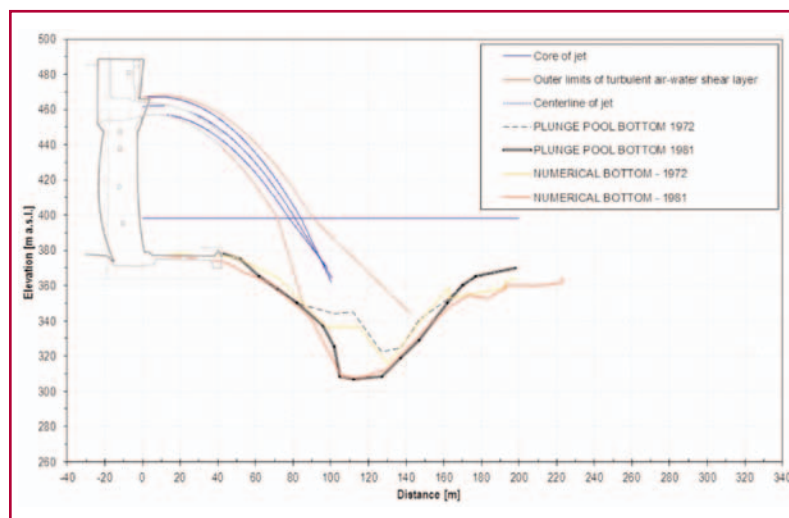


Fig. 5. Presa de Kariba. Sección por el aliviadero. Resultados del modelo (EPFL).

tos procesos erosivos (R8). En dicho estudio se ha comprobado que la descarga caudales de avenida superiores a los que circulan habitualmente por el río produce una serie de remolinos y oleaje que puede provocar la erosión progresiva de las orillas, justo aguas abajo del cuenco amortiguador. Una vez comienza este tipo de erosión, la geometría varía pudiendo formarse un remolino que potencie y amplifique el efecto erosivo rápidamente. Concluye que es importante dimensionar bien los muros que delimitan el cuenco amortiguador y su salida, en previsión de que en esos puntos se produzcan erosiones locales, que los desestabilicen y puedan dar lugar a averías más graves.

Un caso representativo de este tipo de proceso es el acaecido en la presa de Mohamed Ben Abdelkrim El Khattabi en Marruecos (R7). La primera vez que se vertió una avenida relevante (caudal punta del 34% del de diseño) se produjo una socavación muy importante a la salida del cuenco amortiguador, mayor que lo previsto en los modelos hidráulicos empleados para su proyecto. Para su corrección se ha diseñado un canal revestido que aleja el punto de restitución a unos 180 m del pie de presa.

Otro caso es el expuesto en el artículo R26, en el que se pone de manifiesto la importancia de la restitución al cauce de los caudales evacuados por el aliviadero. Se trata de la presa de Drtjiscica en Eslovenia. Es una presa de materiales sueltos para laminación de avenidas, cuyo aliviadero principal es una galería en presión con salida inmediatamente a pie de presa. En un episodio de avenida se produjo una socavación del pie de presa. Tras el estudio posterior se determinó que el cuenco amortiguador no estaba ni bien dimensionado, ya que no se habían calculado correctamente los calados del río aguas abajo y el resalto no estaba confinado; ni bien ubicado, ya que estaba justo a pie de presa, agravándose el efecto de la erosión.

Otro enfoque de la erosión aguas abajo es cuando se analiza un tramo de gran longitud, no solo de la zona contigua a la presa. Para ello se emplean herramientas de hidráulica fluvial. En el informe R10 se presenta un estudio de este tipo, para la presa de Wloclawek, en Polonia, en el río Vístula. El análisis de los procesos se hace a otra escala, e interesa tanto la erosión como la sedimentación. El objetivo es determinar la influencia global que la presa tiene aguas abajo (variación del nivel del río, disminución

de producción hidroeléctrica, aportes sólidos a otras presas o tomas de agua, etc.) y establecer las medidas correctoras necesarias.

7. Conclusiones

La gestión de avenidas ha adquirido en los últimos años una importancia creciente, debido a su relación directa con la seguridad y explotación de la presa.

Se realizan actualizaciones periódicas de los estudios de avenidas atendiendo a las causas siguientes: ajuste a las nuevas normativas que se van estableciendo en los distintos países, empleo de nuevas metodologías y uso de series de datos más largas y de mejor calidad, y análisis de nuevas acciones como el impacto del cambio climático u otras particulares, características de determinadas zonas del planeta cuyos procesos físicos se conocen y modelizan mejor.

Como resultado de estas revisiones es habitual la obtención de avenidas de mayor magnitud a las empleadas para el diseño de la presa, lo que obliga a revisar su capacidad de laminación, niveles extraordinarios y resguardos de seguridad. Como consecuencia de ello muchas presas se tienen que adaptar. Las formas básicas para llevar a cabo esta adaptación son: modificación del aliviadero de la presa para que tenga mayor capacidad (mayor vertedero, mayor calado o aliviadero auxiliar); modificación de las normas de explotación, estableciendo un volumen destinado a laminación; recrecimiento de la presa y aumento del volumen de embalse; o una combinación de varias de las medidas anteriores. Las soluciones de recrecimiento son muy potentes y aunque pueden representar un coste superior permiten la intervención y mejora de todas las facetas básicas de la presa: capacidad de regulación, capacidad de laminación, seguridad estructural y resguardos. Para la selección de las alternativas de adaptación se emplean fundamentalmente los criterios económicos y el análisis de riesgos, si bien se consideran también otros factores como los medioambientales, la adaptabilidad de la solución, etc.

En lo relativo a metodologías para el estudio de avenidas se debe resaltar el empleo creciente de los modelos lluvia-escorrentía, que combinados con técnicas de simulación estocástica permiten la ob-



tención de un abanico de avenidas distintas en punta y aportación, pero asociadas a un mismo periodo de retorno, con las que se puede realizar una estimación más precisa del riesgo hidrológico y un mejor dimensionamiento de la presa y sus órganos de desagüe.

En la adaptación de aliviaderos se presentan una serie de condicionantes de cara al estudio de alternativas. Los más importantes son la implantación en cerradas estrechas y la restitución al río de caudales más altos. Por ello las tendencias actuales de diseño y las líneas de investigación se centran en tipologías que tienen ventajas en estos sentidos. Las principales son: el empleo de aliviaderos escalonados para aprovechar la disipación de energía que se produce en el canal de descarga, lo que posibilita la construcción de estructuras de restitución más reducidas; el desarrollo de aliviaderos tipo PKW, con la misma idea que los aliviaderos en laberinto pero más compactos, de manera que pueden ubicarse sobre la coronación de presas de gravedad; el uso de compuertas fusibles para la regulación de aliviaderos auxiliares; la construcción de aliviaderos en presión, en túnel o en el propio cuerpo de presa para poder disponer de mayor capacidad de desagüe en valles angostos; y el uso de aliviaderos en sifón, con las posibilidades de explotación avanzada que ofrecen de cara a la evacuación preventiva de avenidas.

Se observa el auge que ha experimentado el uso de los modelos numéricos CFD en el estudio de los elementos del sistema hidráulico de las presas y en concreto en el diseño de nuevos aliviaderos y en la intervención en los existentes. Este auge es debido a que se trata de una herramienta rápida, económica y que proporciona buenos resultados. Se pueden preparar modelos básicos para la fase de estudio de alternativas y más finos y complejos para las de diseño y construcción, en las que se recomienda su uso conjunto con los modelos físicos.

Los riesgos que se producen en la evacuación de avenidas en relación a fases de vida y emplazamientos particulares de las presas se deben de tener en cuenta en el diseño y establecimiento de las normas de explotación. La estrategia de laminación se debe analizar con cuidado de cara a mitigar posibles problemas de erosión en el cauce aguas abajo. En climas extremadamente fríos se han de tomar medidas para evitar la congelación de los mecanismos de accionamiento de las compuertas y el vertido de grandes placas de hielo por el aliviadero. En zonas extremadamente áridas en las que se pueden producir lluvias de gran intensidad y corta duración se recomienda la adopción de tipologías de presa muy robustas, el uso de aliviaderos de labio fijo, la disposición de válvulas en los desagües de fondo y el establecimiento de normas de explotación muy sencillas, que permitan laminar eficazmente las riadas y aprovechar los recursos hídricos que aportan.

Las estructuras de restitución de caudales y disipación de energía son elementos muy importantes en relación a la seguridad de la presa, por lo que es conveniente conocer lo mejor posible los procesos de erosión que pueden desarrollarse en las mismas. En general estos procesos se pueden clasificar en dos tipos: la erosión que se produce por impacto directo del chorro, característica en trampolines de lanzamiento y en vertidos de presas bóveda; y la erosión progresiva que se produce a la salida de cuencos amortiguadores y trampolines sumergidos. Tradicionalmente ha preocupado más y se ha prestado más atención al primer tipo, mientras que el segundo solo era objeto de análisis una vez mostraba sus efectos después de alguna avenida significativa. Hoy en día se están desarrollando muy buenas herramientas que permiten conocer mejor los mecanismos de desarrollo de ambos procesos y establecer medidas preventivas y correctoras de los mismos. ♦

Referencias:

- (1) Q.94. Flood discharge, Proceedings 24th ICOLD Congress, Kyoto, 2012.
- (2) GUO J., General report Q.94. Flood discharge, Proceedings 24th ICOLD Congress, Kyoto, 2012.



Q94. Flood discharge

Question 94 of the 24th ICOLD Congress has dealt with flood discharge. This article describes the submitted reports, in which present experiences and trends are shown: new methodologies and design standards, specific risks that arise during flood routing, impact of new flood computations on existing dams and upgrading actions.

Flood discharge is a subject of increasing importance because of its direct relationship with safety and dam operation.

Flood computations are revised periodically due to the existence of new standards and regulations, new methodologies, new data series and new processes (as the impact of the climate change) that were previously ignored or misunderstood.

As a result of these updates it's common to obtain larger floods than the ones that were used for the original design. Thus, a general revision of the flood routing, spillway capacity and safety freeboards is necessary. As consequence of this revision several dams need to be adapted. The basic adaptation alternatives are: upgrading the spillway (making it larger or deeper or installing an auxiliary one), changing the operation rules setting a flood routing pool, heightening the dam to have a larger reservoir or a combination of the previous. The heightening alternative is powerful; although it may be the most expensive it permits the upgrading of all basic features of the dam: conservation, flood routing and structural safety. The selection between the different alternatives is usually done with economic and risk analysis criteria, while in particular cases other factors as the impact on the environment or the adaptability of the alternative are also considered.

Rain-runoff models are spreading as a very useful tool for determining design floods. The combined use of these models with stochastic simulation makes possible to obtain a set of floods (different in peak and volume but same in frequency) that could be used for a more accurate estimation of the hydrologic risk and a better design of the dam and its hydraulic system.

The main constraints that arise in spillway upgrading to new requirements are: the location and the general arrangement of the new spillway and the energy dissipation of higher flows. Thus, the trends and research topics in spillway design are focused on typologies that have advantages in those subjects. The main ones are: the use of stepped spillways for dissipating energy through the channel, making possible the construction of smaller stilling basins; the development of PKW spillways,

based on the same idea of the labyrinth ones, but more compact so they could be placed on smaller places as a gravity dam crest; the use of fusegates for controlling emergency spillways; the construction of tunnel spillways or large outlets in the dam body, to improve the discharge capacity in dams located on narrow valleys; and the use of adjustable siphons, that offer the possibility of an advance operation to make preventive discharges for flood routing.

It's remarkable the growing use of CFD models for the study of the hydraulic system of dams and specifically of the spillways. This rise is due to their efficiency, being a fast and economic tools. Basic models could be useful during the preliminary design phases for comparing alternatives, while more detailed models are used for the final design and construction phases, in which it's recommended its combined use with the physical laboratory models.

Submitted reports stress also on the specific risks that may face flood discharge in particular regions of the planet or during particular phases of the dam life. Those specific risks should be taken into account in design and operation. Specific operation rules and emergency plans should be established during construction or upgrading phases. Flood routing strategies of controlled spillways should analyze in detail possible erosion problems downstream. In extremely cold regions actions for avoiding the freezing of the mechanisms and the discharge of large ice plates should be implemented. In extremely arid regions where flash floods may occur, it's recommended the design of flood control dams of the more robust types, the use of uncontrolled spillways and the installation of control valves in the outlets. It's also recommended to route floods with the outlets closed, because it's an easy and effective strategy, it minimizes the risk of clogging and it enables the use of water resources.

The energy dissipation structures and the erosion downstream have been also topics of wide interest. It's convenient to improve knowledge on the erosion processes due to its relationship with the dam safety. Erosion processes could be classified into two main types: the first is the produced by direct impact of flow, it may arise in sky jumps and arch dams; and the second one is the observed just downstream stilling basins and submerged bucket dissipators. Traditionally the first has received much more attention and the second has been underestimated. In the present, new models have been developed. These models could help for the better understanding of both types, so they could be better predicted and remedial actions better design. ♦

