

Desarrollo de criterios de diseño para el incremento de la capacidad de desagüe en presas de fábrica mediante aliviaderos con cajeros altamente convergentes

(Proyecto ALCON)

*Dña. Blanca Martínez Catllá¹, D. Francisco Javier Caballero Jiménez¹,
D. Miguel Ángel Toledo Municio², D. Rafael Morán Moya², D. Fernando Salazar González³,
D. León Morera González², D. Hibber Campos Espinoza², Dña. Patricia Sanz Lázaro³*

¹*ALATEC Ingenieros Consultores y Arquitectos S.A.*

²*Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)*

³*Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)*

*bmartinez@alatec.es, jcaballero@alatec.es,
matoledo@caminos.upm.es, rmoran@caminos.upm.es, fsalazar@cimne.upc.edu,
lmorera@caminos.upm.es, hibber.campos@upm.es, psanz@cimne.upc.edu*

1 Introducción

Existe una tendencia en la sociedad actual encaminada a incrementar la exigencia en todos aquellos aspectos relacionados con la seguridad. La ingeniería civil, en todos sus ámbitos, no es ajena a esta circunstancia, y es en el campo de la ingeniería de presas donde se encuadra el objeto de la presente comunicación.

Las presas son estructuras que por su peculiar función son especialmente sensibles en caso de ocurrir una catástrofe. Es por tanto necesario controlar desde la fase de proyecto hasta la construcción y explotación, los aspectos vinculados con la seguridad. Para ello cabe mencionar una serie de puntos en los que se considera, a día de hoy, que es posible reforzar y mejorar el conocimiento y los medios disponibles para aumentar la confianza en estas infraestructuras.

En los últimos años se ha promovido desde la Administración del Estado la redacción de una Ley de *Seguridad de Presas*, que, aunque finalmente no ha alcanzado dicho rango, ha sido introducida como una Modificación del *Reglamento del Dominio Público Hidráulico* aprobado por Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, en el que incluye un nuevo título VII dedicado a la seguridad de embalses, presas y balsas, disponiéndose que las exigencias mínimas de seguridad de las presas y embalses se recogerán en tres *Normas Técnicas de Seguridad*, que deberán ser aprobadas mediante Real Decreto. Los borradores de las citadas Normas Técnicas están disponibles en la web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, se han difundido entre la comunidad presística, y están próximos a su aprobación.

Las *Normas Técnicas de Seguridad* establecerán los criterios básicos para la convalidación o adaptación de las actuaciones y exigencias de seguridad en las presas y embalses existentes, que se hubiesen realizado de acuerdo con normas anteriores a la entrada en vigor de las mismas.

En cualquier caso debe recordarse que el cambio de la normativa que regula los criterios de seguridad de las presas existentes en España comenzó con la aprobación del *Reglamento Técnico sobre seguridad de Presas y Embalses* en el año 1996 (en adelante *RTSPE/96*), y que provocó la necesidad de adaptar las presas españolas en explotación a unas nuevas y más conservadoras exigencias. Muchas de estas presas se encuentran, de hecho, aún en proceso de adaptación a los nuevos criterios.

Con el objeto de concretar recomendaciones acerca de estos nuevos criterios en el apartado de aliviaderos y desagües, el *Comité Nacional Español de Grandes Presas* redactó las Guías Técnicas nº4 “Avenida de Proyecto” y nº 5 “Aliviaderos y Desagües”.

Uno de los cambios más importantes que deben afrontar las presas en explotación es aumentar su capacidad de desagüe de acuerdo a los nuevos períodos de retorno recomendados y a los también nuevos y más conservadores

criterios en cuanto a resguardos. Además, todo ello se debe combinar con la necesidad de limitar los daños producidos aguas abajo por los caudales de avenida, una vez laminados por el embalse.

La variación planteada en los períodos de retorno de la Avenida de Proyecto que, en presas de categoría A, mayoritarias en España, pasó a ser 1.000 años en lugar de los 500 años exigidos por la antigua Instrucción, supone en la práctica incrementos en los caudales de diseño. En muchas ocasiones, la ampliación del aliviadero existente es muy costosa o plantea dificultades técnicas muy importantes. Por esta razón, han aparecido nuevas tipologías de aliviaderos, capaces de satisfacer las necesidades planteadas con los adecuados márgenes de seguridad. Como ejemplos pueden citarse, además de los aliviaderos con cajeros altamente convergentes, los aliviaderos en laberinto, en sifón, o fusibles. Dentro de las posibles actuaciones a desarrollar para aumentar la capacidad de vertido de las presas existentes, ALATEC Ingenieros Consultores y Arquitectos S.A. (en adelante ALATEC) junto a la Universidad Politécnica de Madrid (en adelante UPM) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (en adelante CIMNE) han comenzado en el año 2011 una investigación (Proyecto ALCON), con el objetivo principal de desarrollar y validar criterios para establecer una metodología de cálculo hidráulico y proyecto de aliviaderos con cajeros altamente convergentes en presas de fábrica. Esta tipología de aliviadero puede ser muy interesante como solución cuando resulta necesaria una longitud de vertedero sensiblemente mayor que la anchura de cauce disponible, tanto para presas de nueva planta como para aumentar la capacidad de desagüe en presas de fábrica existentes que tengan una capacidad insuficiente de acuerdo con los criterios de seguridad actuales, que como ya se ha comentado, resultan más exigentes que los utilizados al diseñar la mayor parte de nuestras presas.

2 Antecedentes

A lo largo de la historia han sido construidas algunas presas con aliviadero de cajeros altamente convergentes (en adelante ACAC), especialmente en países como Japón. Sin embargo, pese a tratarse de una tecnología aplicada con éxito y fuertemente consolidada, existe una falta de criterios de diseño que permitan guiar a la comunidad técnica durante el proyecto de este tipo de aliviaderos.

Se ha comenzado a realizar la búsqueda bibliográfica de antecedentes y referencias relacionadas con este tipo de aliviaderos [1-10]. Destaca como hecho curioso no encontrar una terminología específica para denominar este tipo de aliviaderos. Martín Vide [1] estudia de forma genérica los ACAC constituyendo quizá el punto de inicio de esta línea de investigación. Por lo demás, únicamente se han localizado diversas memorias e informes de modelos físicos a escala reducida, realizados en laboratorio, que en su día sirvieron para contrastar o mejorar el diseño de alguna de las presas construidas, aunque la información más relevante que contienen, a nuestros efectos, se reduce a la identificación de ciertos rasgos del comportamiento hidráulico y de algunas limitaciones en el diseño.

Existen en España algunos ejemplos de presas con este tipo de aliviadero, como son Vilasouto, Baña, Doña Ana, Rambla Del Moro, Zapardiel de la Cañada y Torre Abraham.



Figura 1 De izquierda a derecha, presas de Vilasouto, Doña Ana y Torre Abraham

También se han encontrado casos en otras partes del mundo, como por ejemplo la presa de Pagade en Portugal o la de Hammam Grouz en Argelia así como un mayor número de ejemplos en Japón.



Figura 2 De izquierda a derecha, presas de Hammam Grouz (Argelia), Atagi y Tomada (Japón)

Pese a presentar todos ellos cajeros altamente convergentes en su aliviadero, si se observan con mayor grado de detalle se podrá apreciar una cierta disparidad de criterios en la forma en que fue adaptada cada una de las soluciones. Estas diferencias ponen de manifiesto la conveniencia del establecimiento de un conjunto firme de criterios de diseño y proyecto de este tipo de aliviaderos.

3 El proyecto ALCON

El proyecto ALCON se sitúa dentro del *Plan Nacional de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica 2008-2011* (nº exp: IPT-310000-2010-11).

Tres entidades participan en este proyecto. Por un lado ALATEC, empresa que en los últimos años ha desempeñado una intensa labor de redacción de documentos relacionados con la seguridad de presas. Por otra parte CIMNE, dando continuidad al desarrollo de nuevos métodos numéricos capaces de modelar la interacción fluido-estructura. Y finalmente la Universidad Politécnica de Madrid que de este modo prosigue con su línea de investigación sobre aumento de la capacidad de desagüe de aliviaderos y seguridad de presas. .

3.1 Objetivo principal. Fundamentos.

El objetivo principal del proyecto ALCON es el desarrollo y la validación de criterios que sirvan para establecer una metodología de cálculo hidráulico y proyecto de aliviaderos con cajeros altamente convergentes en presas de fábrica. Esta tipología de aliviadero se fundamenta en el incremento de la longitud del labio de vertido de manera que resulte sensiblemente mayor al ancho del cauce disponible en el pie de presa. La disposición resultante precisa de un cajero que haga converger el agua vertida en los vanos laterales hacia el cuenco amortiguador.

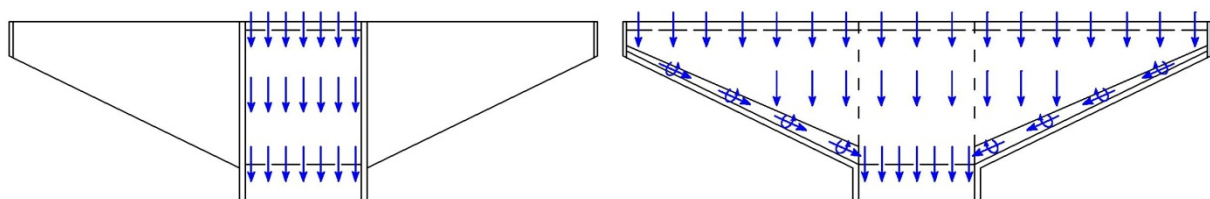


Figura 3 Planta comparativa de la solución convencional (izda.) y la de cajeros altamente convergentes (dcha.)

Es importante distinguir lo que se ha denominado *convergencia alta* de cajeros frente a la convergencia normal ya que de ello se derivan diferencias esenciales en el comportamiento hidráulico. En un cajero *altamente convergente* se aprecia la formación un rodillo de agua helicoidal que avanza hacia el cuenco como resultado del brusco cambio de dirección impuesto al agua vertida, mientras que para convergencias menores tiene lugar un fenómeno de otra naturaleza y que consiste en la formación de ondas de choque como consecuencia de la reflexión del fluido y cuya trayectoria se separa de la del cajero.

Los ACAC llevan consigo una serie de ventajas importantes. Desde el punto de vista de la seguridad de la presa, estos aliviaderos presentan una mayor capacidad de desagüe gracias al incremento de la longitud de vertido. Este incremento llevará asociado, en vertederos de labio fijo, una disminución de la capacidad de laminación del embalse.

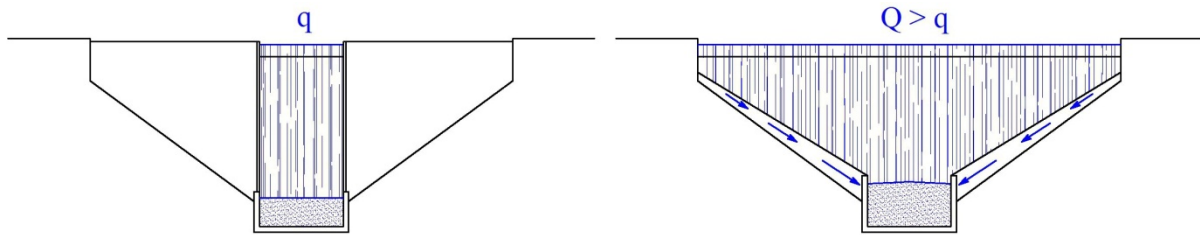


Figura 4 Alzado esquemático que refleja el incremento de la capacidad de desagüe que suponen los ACAC

Y desde el punto de vista de la explotación, los ACAC posibilitan un aumento considerable de la capacidad de embalse útil manteniendo fijos la altura de la presa y sus resguardos gracias a la reducción de la altura de lámina vertiente para un mismo caudal.

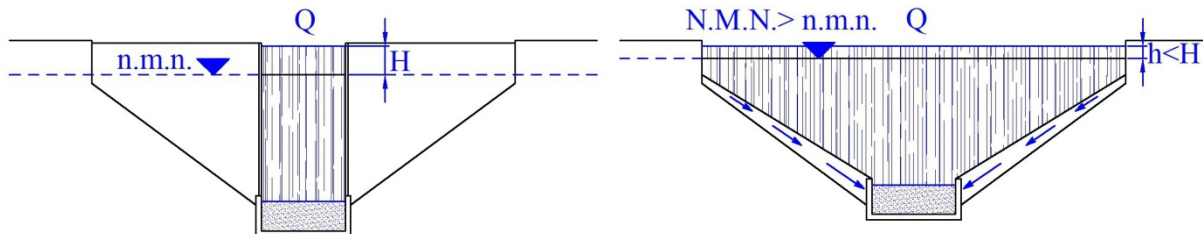


Figura 5 Alzado esquemático que refleja la reducción de la lámina vertiente que posibilitan los ACAC

3.2 Objetivos específicos. Metodología.

Para la consecución del objetivo principal, que no es otro que la fijación de un conjunto completo de criterios de diseño de los ACAC, se establecieron una serie de objetivos parciales que, resumidamente, se listan a continuación:

- 1) **Análisis de referencias existentes y del estado del arte** sobre el diseño de ACAC. Tal y como se mostró en el 2º apartado, pese a existir varios casos construidos en las últimas décadas, la bibliografía encontrada sobre el tema es escasa.
- 2) **Identificación de los parámetros fundamentales de diseño.** Inicialmente se han reconocido 18 parámetros relevantes en parte de los cuales se focalizarán los ensayos.
- 3) **Desarrollo de un nuevo método de cálculo que permita analizar el comportamiento hidráulico y estructural de los ACAC** teniendo en cuenta la interacción fluido-estructura así como la aireación del flujo. Para ello se está empleando una nueva técnica de modelación numérica basada en elementos finitos y partículas denominada PFEM desarrollada por CIMNE.
- 4) **Validación de los criterios de diseño** en base al análisis y contraste de los resultados de las pruebas experimentales en modelos físicos combinados con simulaciones por ordenador del comportamiento hidrodinámico y estructural del aliviadero mediante la técnica PFEM. El modelo experimental está siendo construido en la actualidad en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- 5) **Establecimiento del campo de aplicación de este tipo de aliviaderos** en cuanto a tipologías de presa y otra serie de factores, y determinación de los límites de funcionamiento.

- 6) **Desarrollo de criterios de diseño para el proyecto de ACAC** mediante técnicas de diseño asistido por ordenador y modelación física.
- 7) **Análisis de la compatibilidad** existente entre esta solución y los diferentes elementos de disipación de energía convencionales así como del grado de disipación de energía producida en los propios cajeros.
- 8) **Desarrollo de una herramienta de *software*** para la definición geométrica de ACAC a partir de las variables particulares de cada caso.
- 9) **Elaboración de un plan de difusión y aplicación de los resultados del proyecto.**

Como aspecto sustancial del proyecto hay que destacar la fuerte interacción prevista entre la modelación física y la numérica. La utilización conjunta de ambas herramientas se está consolidando como una metodología científica de gran potencia, capaz de proporcionar resultados de la máxima utilidad.

4 Modelación numérica

En la actualidad, el diseño hidráulico de aliviaderos se realiza generalmente sobre la base de los resultados de campañas de ensayos en laboratorio. Poco a poco se está empezando a utilizar la modelación numérica, por el momento como apoyo para el diseño de los ensayos.

Como ya se ha indicado, el proyecto ALCON sigue esta forma de proceder, de modo que se prevé utilizar la modelación numérica como complemento a la campaña de experimentos en laboratorio. En esta primera fase previa a la construcción de la instalación de ensayo, se han realizado cálculos sobre la geometría que se prevé construir para comprobar el funcionamiento de los primeros diseños aproximados con los caudales previstos. Los aspectos a los que se está prestando más atención son:

- 1) La geometría de los cajeros de recogida.
- 2) La geometría del cuenco amortiguador.
- 3) La posible aparición de presiones negativas en el encuentro entre los cajeros y el cuenco.
- 4) La delimitación del rango de medida de la instrumentación del modelo físico.

Con estos primeros cálculos se pretende además comprobar si PFEM reproduce adecuadamente el funcionamiento de la estructura. Algunos de los resultados obtenidos se presentan en esta comunicación.

En fases posteriores del proyecto, una vez en marcha la campaña de ensayos en laboratorio, se definirán nuevos objetivos para la modelación numérica.

El método de cálculo que se está utilizando es el denominado Método de Partículas y Elementos Finitos (PFEM), que ha sido validado para su aplicación a estructuras hidráulicas [11]. Su descripción detallada no es el objetivo de la presente comunicación, si bien a continuación se describen sus principales características.

4.1 Sobre PFEM

Los métodos numéricos más utilizados en problemas de dinámica de fluidos con superficie libre pueden dividirse en dos grandes familias, en función del esquema numérico en que se basen.

Los *métodos eulerianos* son los que primero se desarrollaron. Se basan en una discretización del dominio de cálculo mediante una malla de elementos finitos que permanece constante a lo largo de toda la simulación. Las mayores dificultades de estos métodos son el tratamiento de los términos convectivos, que aparecen como consecuencia de usar una malla fija, y la detección de la superficie libre del fluido, para lo que en general se utiliza, o bien una función suave (tipo level-set) [12], o bien un escalar que refleja la porción del elemento finito que está ocupada por el fluido (técnica de volumen de fluido o VOF).

Una alternativa es utilizar una *descripción lagrangiana* para formular las ecuaciones de gobierno de los dominios del fluido y del contorno. En la formulación lagrangiana se sigue el movimiento de cada una de las partículas de líquido o del sólido de forma individual y, consecuentemente, los nodos en una malla de elementos finitos pueden considerarse como partículas en movimiento. Por consiguiente, el movimiento de la malla que discretiza el dominio total (incluyendo los dominios del fluido y de la estructura) se sigue durante la solución en el tiempo.

Una formulación lagrangiana muy utilizada en la comunidad científica es la denominada Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) [13]. Este método se ha desarrollado mucho en los últimos años, por su relativa sencillez de programación. Las dificultades principales de este método son la aplicación de las condiciones de contorno de una manera eficiente, y el cumplimiento de la condición de incompresibilidad.

En los últimos años, CIMNE ha desarrollado un tipo particular de formulación lagrangiana para resolver problemas de dinámica de fluidos, entre otros. El método se denomina Método de Partículas y Elementos Finitos (PFEM). El PFEM trata los nodos en la malla, tanto en los dominios del fluido como de la estructura, como partículas que pueden moverse libremente e incluso separarse del dominio principal del fluido, representando por ejemplo, el efecto de gotas o chorreones de agua. Una malla de elementos finitos conecta los nodos que definen el dominio discretizado donde se resuelven las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos (para el líquido) y de la mecánica de sólidos (para la estructura) en la forma estándar del MEF [14-16].

El PFEM presenta ventajas frente a los métodos eulerianos para la modelación de problemas en los que la superficie libre es muy irregular, y variable en el tiempo. Esta es la razón por la que se ha seleccionado para el presente trabajo.

4.2 Geometría de los modelos

Como se ha indicado anteriormente, los modelos numéricos realizados hasta el momento tienen como finalidad principal el dimensionamiento de la geometría de base de los ensayos en laboratorio, especialmente en lo que se refiere a los cajeros de recogida y al cuenco amortiguador. Para ello, se ha partido de una geometría definida por la UPM en base a una extrapolación del proceso de dimensionamiento utilizado habitualmente para cuencos convencionales. Los datos de entrada para la aplicación de esta metodología vienen dados por el espacio disponible en el laboratorio, y por la capacidad máxima del sistema de alimentación (250 l/s).

El aliviadero calculado tiene el umbral a una cota de 1,50 m sobre la solera del cuenco y una longitud total de vertido de 5,0 m. De éstos, 1,0 m corresponde a la zona central, y el resto a sendas zonas laterales de 2,0 m a cada lado. El resto de parámetros geométricos del modelo se describe en la sección siguiente, por lo que se evita repetirlo aquí. La figura 6 muestra una imagen del modelo numérico, con sus dimensiones principales.

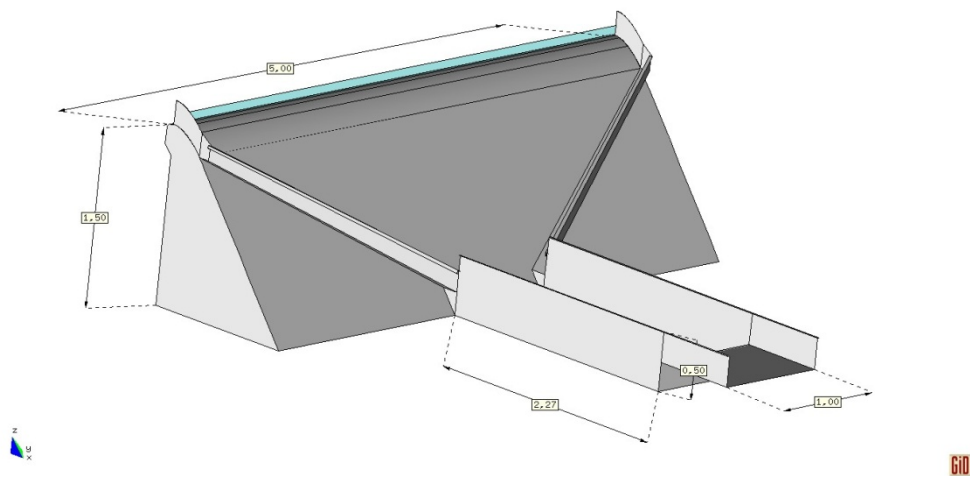


Figura 6 Geometría del modelo

4.3 Condiciones de contorno

La condición de contorno aguas arriba consiste en una entrada de caudal sobre el umbral del vertedero. Se ha impuesto un calado igual al crítico para cada caudal, con la velocidad de entrada correspondiente. Esta velocidad se define con módulo y dirección constante a lo largo de todo el umbral, lo que no se corresponde exactamente con la realidad, si bien se considera una simplificación adecuada teniendo en cuenta que el objetivo es el diseño de los cajeros y el cuenco, y no la optimización de la forma de los estribos ni de la embocadura.

Los caudales utilizados en los cálculos presentados son de 150 y 250 l/s.

El cuenco se ha diseñado introduciendo un bordillo que tiene por objeto provocar la formación de un calado superior al conjugado, de modo que se forme un resalto hidráulico. Aguas abajo de este bordillo, el método simplemente elimina los nodos que salen del dominio de cálculo.

El tamaño de malla para todo el dominio de los modelos que se han realizado hasta el momento ha sido de 2 cm. Otro de los objetivos de esta fase es la definición del tamaño de malla más adecuado, que puede ser variable dentro del dominio de cálculo, o bien dependiente del caudal de entrada.

4.4 Primeros resultados

En relación al comportamiento de los cajeros de recogida, y al patrón de movimiento del agua en esta zona, se ha comprobado que el modelo numérico reproduce las trayectorias helicoidales esperadas, mostradas en la figura 7.

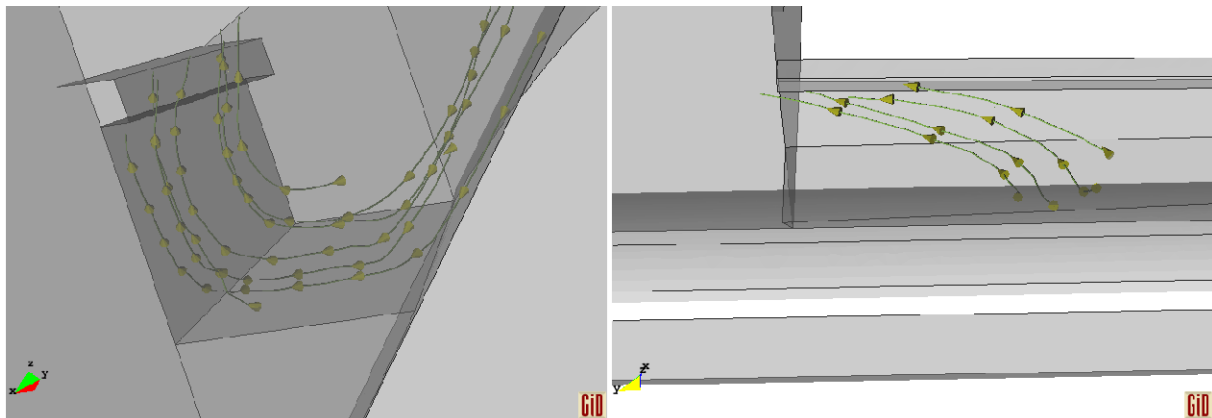


Figura 7 Líneas de corriente helicoidales en los cajeros laterales. Izquierda: vista en la dirección del eje del cajero. Derecha: vista desde coronación.

Las figura 8 muestra un corte longitudinal del cuenco siguiendo el eje del aliviadero. Se observa la alta agitación en la entrada al cuenco, provocada por el choque entre el caudal conducido por los cajeros laterales y el que llega por la zona central del canal de descarga. En la mitad final del cuenco el calado es más uniforme, y las velocidades más bajas. Se ha comprobado que en esta zona el número de Froude es menor que la unidad, por lo que se produce resalto hidráulico.

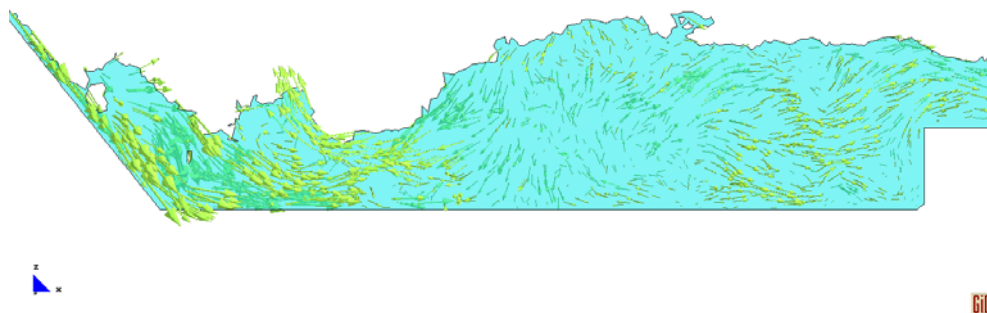


Figura 8 Sección longitudinal por el eje del cuenco mostrando los vectores velocidad

También se ha comprobado que en el encuentro entre los cajeros laterales y el cuenco aparecen presiones negativas, debido a que la solera de los cajeros en este punto queda a cierta distancia sobre la solera del cuenco. Se van a repetir los cálculos modificando la geometría de este encuentro, de modo que la entrada en el cuenco se produzca a la cota de la solera de éste. Además, se va a estudiar con detalle la evolución de la presión en dicha zona en función de la altura de escalón y de la geometría del perfil longitudinal del cajero.

5 Modelación física

Como parte fundamental del proyecto ALCON, se está construyendo un modelo experimental de una presa con aliviadero de cajeros altamente convergentes en el *Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid*. El modelo se ha dimensionado en base a los diseños y proporciones de varias de las presas ya construidas y se han efectuado una serie de cálculos hidráulicos para afinar la geometría de algunas partes críticas de la presa como son el perfil del aliviadero [17], los cajeros laterales y el cuenco amortiguador. El tamaño del modelo se ha establecido conforme a la disponibilidad de espacio y de caudal del propio laboratorio. Como se explica en el apartado anterior, este diseño inicial ha sido comprobado y mejorado mediante modelos numéricos, proporcionando resultados iniciales satisfactorios.

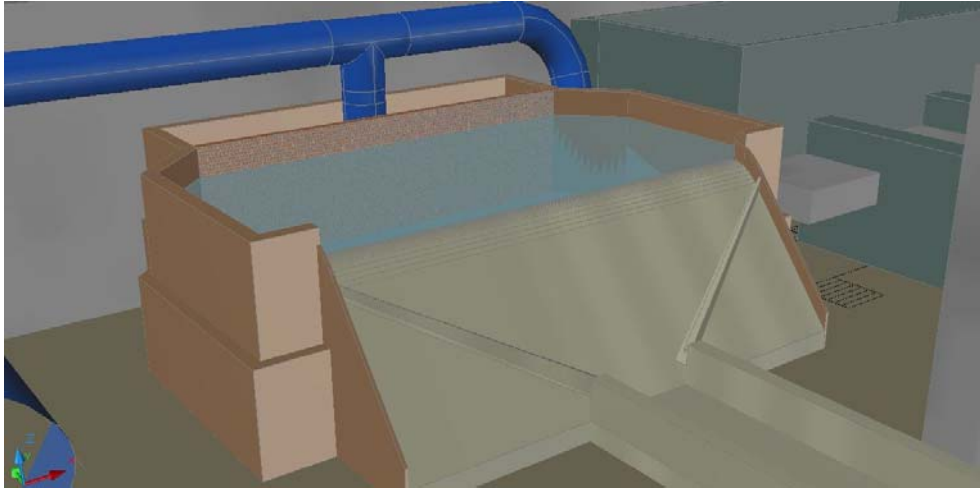


Figura 9 Representación del aspecto final del modelo físico del proyecto ALCON

Algunas de las características del modelo físico se exponen a continuación:

- Caudal de diseño: 250 l/s
- Longitud del labio de vertido: 5 m
- Altura de presa: 1,5 m
- Talud: 0,8
- Ancho de la solera de los cajeros laterales: crece linealmente desde los 10 cm hasta los 15 cm
- Ancho del cuenco amortiguador: 1 m
- Capacidad del depósito: 22 m³

Para la confección de la campaña de ensayos el primer paso ha sido la identificación todos los parámetros intervinientes en el fenómeno. De este gran conjunto inicial se han seleccionado aquellos parámetros que se estiman cruciales en la caracterización hidráulica y que serán objeto de variaciones durante la campaña. Los resultados se analizarán con el objetivo de identificar relaciones adimensionales entre variables que conduzcan a unas pautas de diseño óptimas.

Se ha decidido establecer cierta separación entre el estudio de los cajeros y el del cuenco amortiguador de manera similar a como se está haciendo en los modelos computacionales:

- Con respecto al comportamiento hidráulico de los cajeros laterales, destaca la necesidad de profundizar en el conocimiento de los rodillos de agua helicoidales que en ellos se forman, siendo conveniente la variación y ajuste de ciertos parámetros como son la propia convergencia, las dimensiones de la sección del canal que constituye el cajero y la geometría del botaolas situado sobre él, resultando necesarias mediciones tanto de presiones como de niveles en diferentes puntos situados a lo largo de cada cajero.
- En cuanto al estudio del cuenco amortiguador, interesa centrar la atención en las condiciones de entrada de las diferentes masas de agua concurrentes en él [18-21]. En este caso los parámetros de interés serán los caudales laterales, el caudal central, el ángulo de incidencia del canal lateral sobre el cuenco y el propio ancho del cuenco. Por otra parte el calado aguas abajo del río será ajustado en cada caso de forma que el

resalto hidráulico se inicie justo al pie de la presa de manera estable. Para estos análisis se efectuarán mediciones de calados en diferentes puntos de entrada al cuenco y del propio resalto, y se colocarán sensores de presión en diversos puntos de la solera del cuenco.

En cuanto a la organización cronológica de la campaña de ensayos, se distinguen dos fases:

- 1) **Fase preliminar**, en la que se afinarán algunos aspectos críticos del diseño como son la geometría de los cajeros laterales o el detalle de la incorporación de estos al cuenco, aspectos necesarios antes de proseguir con la batería de ensayos principales. También se establecerán las condiciones necesarias para la formación de un resalto hidráulico estable con el inicio a pie de presa. En esta fase se ensayarán sólo algunas de las configuraciones posibles previstas en el modelo. Se variará la longitud de vertido lateral y la trayectoria de aproximación al cuenco desde los canales laterales para lo que habrá que emplear piezas especiales intercambiables.
- 2) **Campaña general**, de carácter más sistemático, en la que se pretende determinar las relaciones existentes entre los parámetros de diseño y estudiar en qué medida afectan al comportamiento hidráulico. Para ello se procederá a ensayar diferentes configuraciones geométricas de manera que los distintos valores que se adopten de los parámetros se combinen de la manera más representativa posible. Los resultados de la fase preliminar contribuirán a la elección de las configuraciones a ensayar. Finalmente se abordarán algunos casos singulares como son el vertido asimétrico o el escalonamiento de la solera de los cajeros de recogida.

6 Conclusiones

Como se ha comentado en el desarrollo de la comunicación, en España se está siguiendo una línea de actuación que pretende ampliar los criterios de seguridad de las presas, tanto en fase de proyecto como en ejecución y explotación. Por este motivo, se abre un amplio campo de trabajo para la revisión del estado de dichas infraestructuras.

El proyecto ALCON pretende que, a la finalización del mismo, la comunidad técnica disponga de una metodología y sus correspondientes herramientas para proyectar aliviaderos con cajeros altamente convergentes adaptándose a las necesidades de cada caso concreto.

El producto obtenido a la finalización del proyecto permitirá, bien adaptar muchos de los aliviaderos de presas o balsas preexistentes a los nuevos estándares de seguridad y de funcionalidad que la sociedad actual demanda, bien diseñar nuevas infraestructuras de una forma más económica.

Desde el punto de vista empresarial, el valor inducido del proyecto, consistirá en que a la finalización del mismo, ALATEC, como empresa con experiencia en diseño de presas y balsas, se situará en un lugar privilegiado entre las ingenierías hidráulicas para acometer este tipo de proyectos.

7 Agradecimientos

El trabajo presentado se ha realizado dentro del proyecto ALCON (IPT-310000-2010-11) correspondiente al *subprograma INNPACTO*, financiado por el *Ministerio de Ciencia e Innovación*, en el marco del "*Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011*". El citado proyecto ha sido parcialmente financiado por el *Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)* de la Comisión Europea.



8 Bibliografía

- [1] Martín Vide, J.P. (1995). "The design of converging overfall spillways". *Hydropower & Dams*.
- [2] Martínez, E. (2011). "Optimización de Cuencos Amortiguadores con Cajeros Altamente Convergentes". Tesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] Martín Vide, J.P. (1993). "Estudio Hidráulico en Modelo Reducido del Aliviadero de la Presa de Pagade en el Río Coura". Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] Hunt, S.L. , Kadavy K.C. y Temple, D.M. (2006). "Converging RCC Stepped Spillways". ASCE.
- [5] Hunt, S.L. , Kadavy K.C., Abt, S.R. y Temple, D.M. (2008). "Impact of Converging Chute Walls for RCC Stepped Spillways, ASCE.
- [6] Dhattrak, A.I., Tatewar, S.P. y Sakhalkar, S.V. (2010). "Discussion of "Impact of Converging Chute Walls for RCC Stepped Spillways"". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*.
- [7] Woolbright, R.W. (2008). "Model study of RCC Stepped Spillways with Sloped Converging Training Walls". ASABE.
- [8] *American Society of Civil Engineers*.(1994). "Alternatives for Overtopping Protection of Dams".
- [9] *Federal Emergency Management Agency*. "Overtopping protection for dams" (Borrador). pp. 37-38.
- [10] Ya Kun, L. y Han Gen, N. (2006). "Abrupt Deflected Supercritical Water Flow in Sloped Channels". *Dalian Univ. of Tech. Science Direct Journal*.
- [11] Larese, A., Rossi, R., Oñate, E. and Idelsohn, S.R. (2008). "Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows". *Int. J. for Computer-aided Engineering and Software*. Vol. 25, nº 4, pp 385-425.
- [12] Osher, S. y Fedkiw, R. (2001), "Level set methods: an overview and some recent results", *Journal of Computational Physics*, Vol. 169, pp. 463-502.
- [13] Liu, M.B., Liu, G.R. (2010). "Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments". *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(1), 25-76.
- [14] Idelsohn, S.R., Oñate, E., Del Pin, F. y Calvo, N. (2006) "Fluid-structure interaction using the particle finite element method". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, pp. 2100-2123.
- [15] Oñate, E., Idelsohn, S.R., Del Pin, F. y Aubry, R. (2004). "The particle finite element method: an overview". *International Journal on Computational Methods*. 1:267-307.
- [16] Oñate, E., Idelsohn, S.R, Celigueta, M.A., y Rossi, R. (2008). "Advances in the particle finite element method for the analysis of fluid-multibody interaction and bed erosion in free surface flows". *Comp. Methods in Appl. Mech. And Eng.*, Vol. 197, 1777-1800.
- [17] *U.S. Bureau of Reclamation*. (1987). "Design of Small Dams", Cap. 9: "Spillways".
- [18] Chen, J., Zhang, J., Xu, W. y Wang, Y. (2010). "Scale Effects of Air-Water Flows in Stilling Basin of Multi-horizontal Submerged Jets". *Journal of Hydrodynamics. Science Direct*.
- [19] Bohrer, J.G., Abt S.R. y Wittler, R.J. (1998). "Predicting Plunge Pool Velocity Decay of Free Falling, Rectangular Jet". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*.
- [20] Sanders, J. (1988). "Jet Dispersion in Channels". Tesis, NE London Polytechnic.
- [21] Al Naib, S. y Sanders, J. (1997). "Oblique and Vertical Jet Dispersion in Channels". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*.