

Aliviaderos con cajeros altamente convergentes. ¿Posible solución para la presa de Oroville?

San Mauro, J.^{a1}, Salazar, F.^{a2}, Morán, R.^{b1}, Peraita, J.^{b2}, Toledo, M.Á.^{b3}, Conde, M.J.^{c1}, Flórez, V.^{c2}, Labalde, B.^{c3} y Alcalde, F.^{d1}

^aCentro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). E-mail: ^{a1}jsanmauro@cimne.upc.edu, ^{a2}fsalazar@cimne.upc.edu
^bDepartamento de Ingeniería Civil, Hidráulica y Energética. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). E-mail: ^{b1}r.moran@upm.es, ^{b2}j.peraita@upm.es, ^{b3}matoledo@caminos.upm.es
^cServicios Técnicos FCC Construcción. E-mail: ^{c1}MConde@fcc.es, ^{c2}VFlorez@fcc.es, ^{c3}BLabaldeM@fcc.es
^dMatinsa. E-mail: ^{d1}FAlcalde@fcc.es

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

Los aliviaderos con cajeros altamente convergentes son una tipología innovadora que permite aumentar la capacidad de desagüe respecto a diseños tradicionales. Además son una solución apropiada como protección contra el descalce en zonas de ladera sin revestimiento próximas al pie de presa. Sin embargo para implementar esta solución es necesario un estudio específico para cada caso particular, pues no existen pautas generales de diseño. Con el objetivo de redactar criterios generales de diseño se está desarrollando el proyecto de investigación CALA. En el presente trabajo se muestran los primeros resultados del mismo, relativos al comportamiento de aliviaderos con cajeros altamente convergentes asimétricos y cuencos amortiguadores dentados. De acuerdo con los criterios obtenidos se ha propuesto un diseño para la reforma del aliviadero de emergencia de la presa de Oroville, basado en simulaciones numéricas 3D. La solución propuesta resulta ventajosa técnica y económicamente frente a otras actuaciones.

Palabras clave | Aliviadero; Cajeros convergentes; CFD; Oroville; Presas; Protecciones; Sobrevertido.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la demanda social de un aumento en la seguridad de infraestructuras críticas ha sido creciente, traducándose en normativas de seguridad más exigentes. En el ámbito de las presas, la actualización de los criterios de seguridad se ha visto reflejada en un aumento de los periodos de retorno considerados en las avenidas de diseño para las presas de nueva construcción. Sin embargo, las presas diseñadas con criterios más antiguos y menos exigentes siguen siendo mayoría, aspecto que provoca que un gran número de presas en explotación necesiten una adaptación en el diseño, para adecuar su nivel de seguridad a las exigencias actuales. En algunos casos la consideración de avenidas de mayor periodo de retorno podría dar lugar a vertidos por coronación, por el agotamiento de la capacidad de los órganos de desagüe y de los resguardos actuales, proceso que en presas de fábrica puede llegar a ocasionar daños por descalce en el pie de presa.

En Estados Unidos, la Federal Emergency Management Agency (FEMA) ha publicado una guía técnica sobre protecciones de presas frente al sobrevertido (FEMA, 2014). En el caso de las presas de fábrica esta guía recomienda construir en el pie del paramento de aguas abajo de la presa cajeros laterales de recogida, que además de proteger el pie de la presa de erosiones y un posible descalce, conduzcan los caudales recogidos a la estructura de disipación de energía. Estos cajeros presentarán en general una alta convergencia y pendientes variables, al seguir la estructura el perfil de corte del paramento de aguas abajo de la presa con el terreno. Un ejemplo de esta solución puede apreciarse en la presa de Tygart (Figura 1), donde se construyeron sendos cajeros laterales de recogida, como método para evitar erosiones en el pie de aguas abajo en escenarios de sobrevertido por coronación. Debido a la insuficiencia del aliviadero para evacuar los caudales de avenida, calculados según nuevos criterios de seguridad más exigentes que aquellos con los que fue diseñada la presa en los años 30 del siglo pasado.

Conviene resaltar que si bien los cajeros laterales de recogida son una tipología de protección recomendada por la guía americana FEMA, no se ofrecen criterios de diseño ni metodologías de cálculo, aspectos fundamentales para la implementación práctica de esta solución. De hecho, para la actuación en la presa de Tygart se debieron llevar a cabo ensayos en modelo reducido desde las fases iniciales de diseño, para definir las dimensiones de los cajeros y asegurar el correcto funcionamiento del cuenco amortiguador existente (Turner, 1999), siendo este último aspecto determinante para la viabilidad económica de la protección.



Figura 1 | Presa de Tygart (Virginia Occidental, EE.UU.). Superior: vista general de la presa previa a la construcción de la protección. Inferior: detalle de los cajeros construidos como sistema de protección ante el descalce. Fuente: Zaitsoff, 2013

Además de como protección contra el descalce por sobrevertido, la tecnología de los cajeros laterales altamente convergentes permite lograr un incremento en la longitud del labio de aliviadero por encima de la anchura del cauce o estructura de disipación de energía (generalmente cuenco amortiguador). Por lo tanto, gracias a los cajeros laterales de recogida es posible concentrar todo el caudal desaguado en una zona de mucha menor anchura a la del labio del aliviadero. Así, frente a soluciones de aliviadero recto tradicional, la implementación de cajeros altamente convergentes presenta fundamentalmente 3 ventajas: permite aumentar la capacidad de desagüe sin aumentar el nivel de embalse, mantener la capacidad de desagüe aumentando el resguardo de la presa, o aumentar la capacidad de embalse manteniendo constantes capacidad de desagüe y resguardos (Morera et al., 2014).

La tecnología de los cajeros laterales altamente convergentes se ha empleado en diversas presas, tanto de nueva construcción como en actualizaciones de presas existentes, con la intención de aprovechar alguna de las 3 ventajas antes descritas. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 2, donde puede apreciarse la disparidad de criterios de diseño de los cajeros laterales.



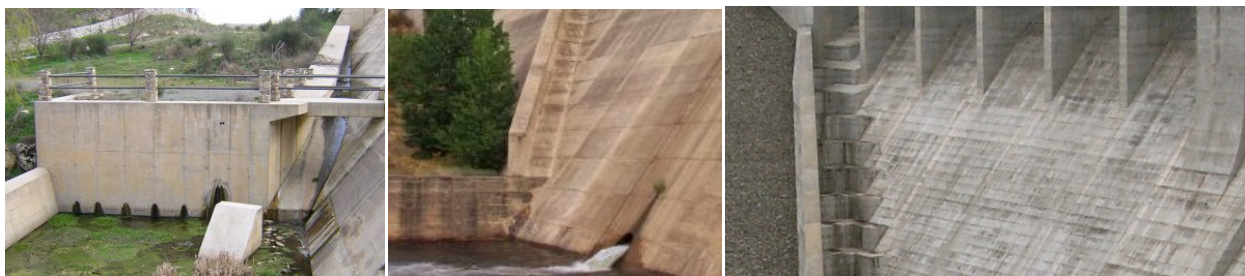


Figura 2 | Ejemplos de presas con cajeros altamente convergentes. Los canales laterales concentran los caudales vertidos por el labio de mayor longitud a la del cuenco amortiguador. Superior: vista general. Inferior: detalle cajeros. De izquierda a derecha: Presa de Zapardiel de la Cañada (España), nueva construcción. Presa Torre de Abrahán (España), recrecimiento. Presa de Chubetchu (Japón), nueva construcción.

Desde el punto de vista del diseño, la diferencia fundamental entre implementar esta solución en presas de nueva construcción o presas existentes consiste en que en una presa nueva la estructura de disipación se diseña y optimiza, teniendo en cuenta los flujos que generan los cajeros laterales de recogida. Sin embargo en las rehabilitaciones de presas la estructura de disipación ya existe, y los nuevos flujos que generan los cajeros laterales modificarán el funcionamiento del cuenco respecto a sus condiciones de diseño. La modificación del cuenco amortiguador puede resultar muy costosa, por lo que para que la solución sea competitiva económicamente se buscará modificar lo menos posible la estructura. Por otra parte, en presas de nueva construcción parece razonable buscar la simetría de los cajeros de recogida laterales, de tal forma que no se produzcan inestabilidades y asimetrías en el funcionamiento del cuenco amortiguador; sin embargo, en presas ya existentes la geometría del paramento de aguas abajo de la presa condicionará de manera importante las formas y posibles simetrías de los cajeros laterales de recogida.

En definitiva, la tecnología de los cajeros altamente convergentes se ha demostrado eficaz, y en consecuencia se han proyectado, y se siguen proyectando, presas con esta solución. Si bien la falta de criterios de diseño obliga a realizar estudios *ad hoc* para cada proyecto, desde las fases iniciales de diseño, lo que ha limitado de manera significativa el uso de esta tecnología.

En este marco, el proyecto de investigación CALA: “Mejora de la seguridad hidrológica e incremento de la capacidad de embalse de presas de fábrica mediante la implementación de canales laterales de recogida de vertidos”, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, tiene como objetivo fundamental el desarrollo de criterios y herramientas para el diseño de cajeros laterales de recogida y cuencos amortiguadores en presas de fábrica existentes o de nueva construcción. En aspectos como los efectos de la asimetría de los cajeros en el comportamiento de un cuenco amortiguador, los de la asimetría de caudales asociados a distintas cotas de vertido a lo largo del labio, condiciones óptimas de entronque de los cajeros en el cuenco amortiguador o efectos de la pendiente de los cajeros, entre otros. En el proyecto participan el Centro Internacional de Método Numérico en Ingeniería (CIMNE), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), FCC Construcción, Matinsa y Citechsa.

En esta comunicación se exponen en primer lugar algunos de los resultados iniciales del proyecto CALA, relativos a los efectos que produce la asimetría de los cajeros laterales en el comportamiento de un cuenco amortiguador. En segundo lugar se muestra un caso de estudio, en el que se aplican los primeros resultados obtenidos del proyecto CALA a un caso real. En concreto se plantea un diseño asimétrico, con cajero lateral altamente convergente y cuenco amortiguador con dientes de impacto, como protección frente al descalce del aliviadero de emergencia de la presa de Oroville.

METODOLOGÍA

Para obtener los resultados que se muestran en esta comunicación se ha llevado a cabo una campaña de modelación numérica y varios ensayos experimentales para la validación del modelo numérico empleado.

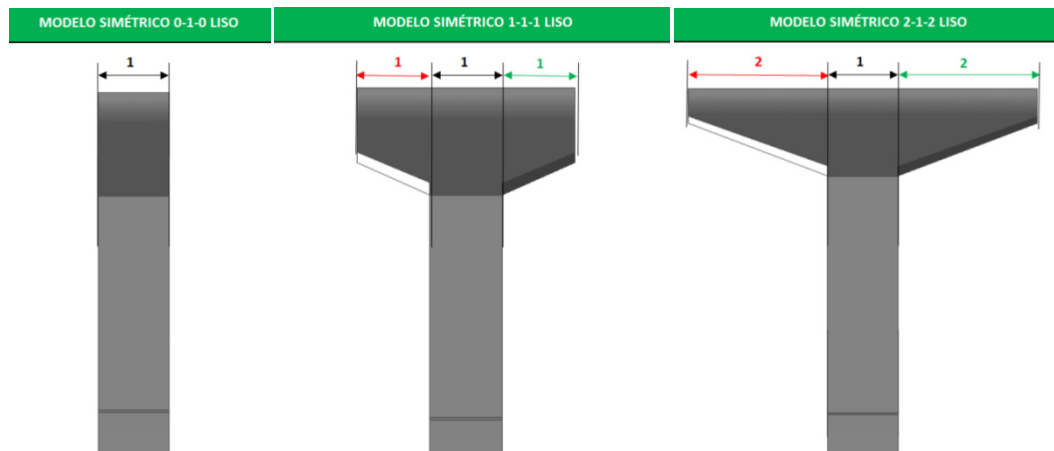
En concreto, en la campaña de modelación numérica se han simulado 6 configuraciones de aliviadero, para una presa de 1,5 m de altura desde el labio de vertido a la solera del cuenco amortiguador. Las condiciones de simetría o asimetría del

aliviadero se consiguieron modificando la longitud de vertido por embocadura, con longitudes de vertido que van de 1 a 5 m. La pendiente de los cajeros laterales es constante para todas las geometrías y viene definida por el talud del paramento de la presa en que se apoyan, de talud 0,8. Todas las configuraciones, excepto el modelo simétrico 0-1-0, presentan cajeros laterales de las mismas dimensiones, con anchura variable entre 0,1 m y 0,15 m y botaolas superior de 0,05 m. El ángulo de entronque de los cajeros laterales con el cuenco amortiguador fue de 68° respecto a la dirección del flujo frontal. En todas las configuraciones la solera de los canales laterales entronca 0,23 m por encima de la solera del cuenco amortiguador. La anchura del cuenco amortiguador fue de 1 m y la longitud de 3 m para todos los modelos calculados. La altura del bordillo de salida fue variable entre 0,1 y 0,25 m. Para cada una de las 3 geometrías asimétricas de aliviadero se modelaron tanto cuencos de solera lisa como con dientes de impacto, según un diseño con 2 filas de dientes de forma cúbica y 0,1 m de lado, con una separación entre ellos de 0,1 m. En resumen, en la campaña se modelaron 9 geometrías (Figura 3), 3 simétricas y 3 asimétricas con cuenco amortiguador liso y 3 asimétricas con cuenco con dientes de impacto. El caudal simulado para todas las geometrías fue de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. La nomenclatura empleada para nombrar los modelos hace referencia en primer lugar a si el modelo es simétrico o asimétrico, para a continuación indicar la anchura de embocadura a cada lado de la porción central de 1 m, que configura el aliviadero recto (Modelo simétrico 0-1-0 liso), para finalmente indicar si el cuenco es liso o dentado.

El código de cálculo utilizado en la campaña de simulación numérica es una de las aplicaciones de KRATOS, que es un entorno multifísico Open-Source desarrollado por CIMNE (Dadvand et al., 2010; Rossi et al., 2013). La aplicación empleada resuelve las ecuaciones completas de Navier-Stokes en 3D según una formulación Euleriana, discretizando el dominio mediante una malla de elementos finitos constante durante toda la simulación. Este código utiliza una Estabilización de Subescalas Ortogonales (OSS por Orthogonal Sub-scales Stabilization), descrita por Codina (2000). Dicha técnica permite modelar la turbulencia sin un modelo específico para tal efecto (Príncipe et al., 2010), como se ha comprobado en problemas similares (Salazar et al., 2013; Larese et al., 2015; San Mauro et al., 2016).

Más allá de la campaña de modelación numérica se llevaron a cabo varios ensayos experimentales en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Caminos de la UPM, con el objetivo de validar el modelo numérico empleado. Para ello se realizaron 2 ensayos redundantes con los llevados a cabo numéricamente y se compararon los resultados obtenidos tanto física como numéricamente, tanto desde un punto de vista cualitativo (comportamiento de flujo en cajeros laterales y estabilidad del resalto en el cuenco amortiguador) como desde un punto de vista cuantitativo, comparando las distribuciones de presiones registradas en la solera del cuenco amortiguador. En concreto se ensayó en laboratorio el modelo simétrico 1-1-1 liso, con alturas de bordillo de salida 0,1 m y 0,15 m, para un caudal de vertido de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Se realizaron las simulaciones numéricas sin conocer el resultado de los ensayos en laboratorio, para posteriormente comparar resultados numéricos y experimentales.

Una vez validado el comportamiento del modelo numérico se procedió a extraer resultados de las simulaciones llevadas a cabo, obteniendo para cada modelo numérico la variación de velocidad en el eje de simetría de la solera del cuenco amortiguador, de tal manera que se pudiera apreciar la disminución de velocidades que provoca el resalto hidráulico para distintas configuraciones de cuenco.



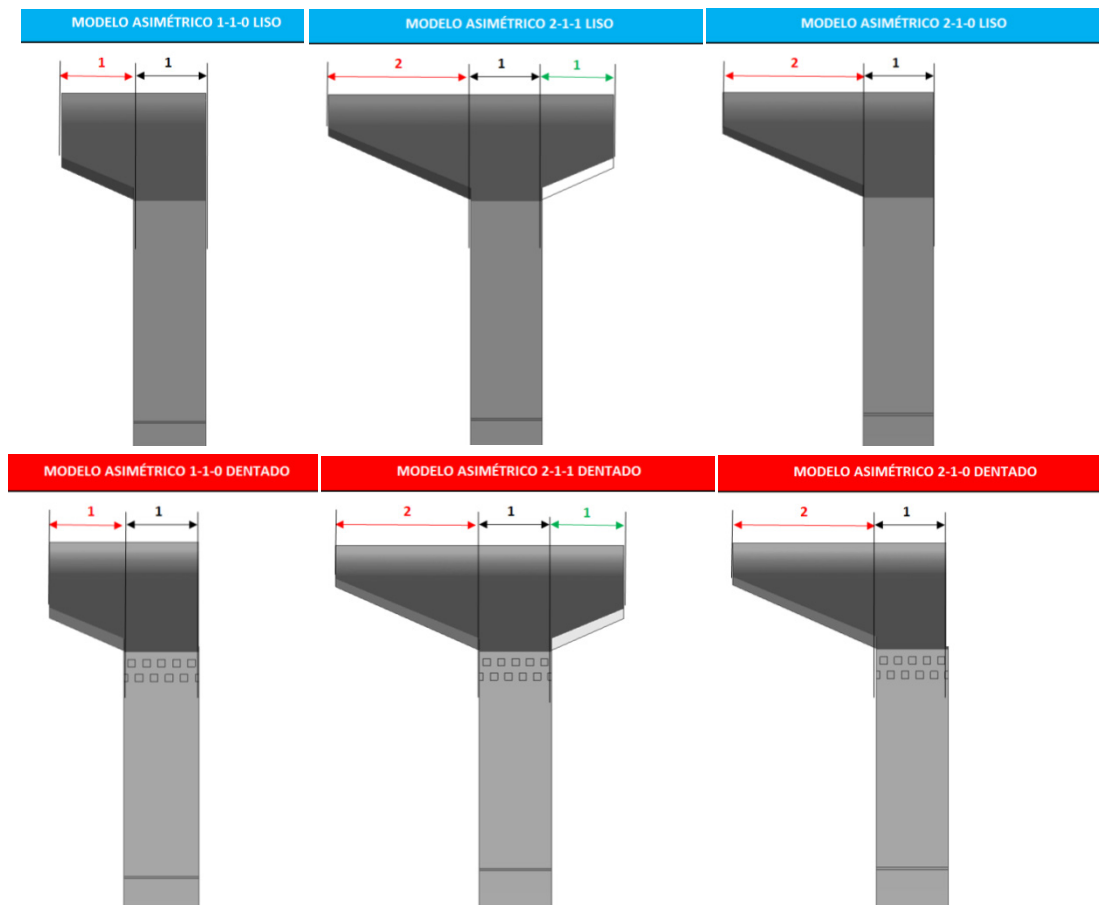


Figura 3 | Vista en planta de los modelos simulados numéricamente, agrupados según condiciones de simetría y tipo de cuenco amortiguador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo numérico

La validación del modelo numérico se llevó a cabo mediante comparaciones numérico-experimentales de carácter cualitativo y cuantitativo.

La comparación cualitativa consistió en la observación de las condiciones del flujo en los cajeros laterales y de estabilidad del resalto en el cuenco amortiguador (Figura 4 y Figura 5). Se observó la formación de un flujo helicoidal en los cajeros laterales, tanto en el modelo numérico como en el experimental. Por otra parte se constató que las condiciones de estabilidad del resalto en el cuenco fueron similares en ambos modelos. Sin embargo, se observó una cierta discrepancia en el tramo inicial del cuenco, donde se observa gran agitación en el modelo físico, con gran presencia de aire que no se considera en el modelo numérico. A pesar de ello, el funcionamiento general de los modelos físico y numérico fue similar como se ha indicado.

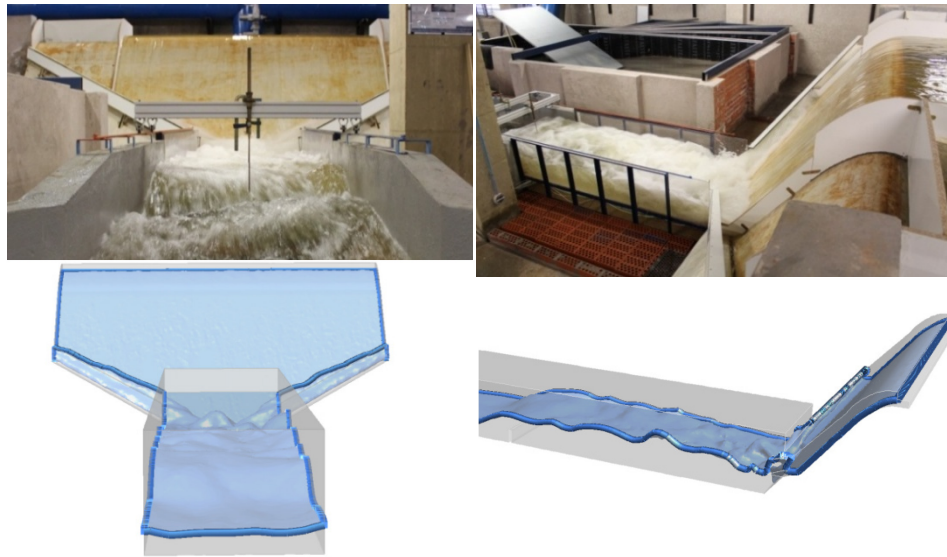


Figura 4 | Imágenes comparativas de los modelos con 0,15 m de altura de bordillo de salida.

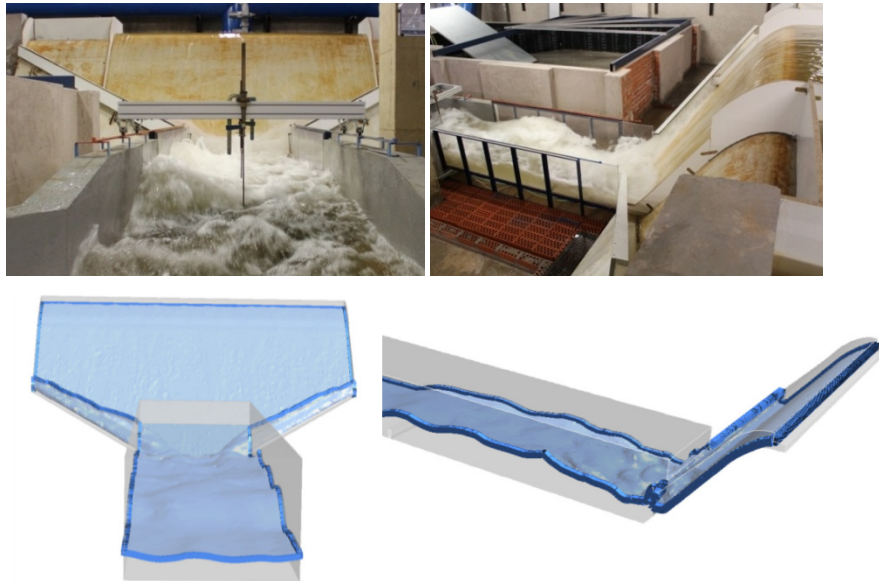


Figura 5 | Imágenes comparativas de los modelos con 0,1 m de altura de bordillo de salida.

La validación cuantitativa se realizó por comparación de presiones en el eje de la solera del cuenco (Figura 6). En el modelo con bordillo de 0,15 m los valores medios presentan discrepancias inferiores en general a 100 Pa, salvo el último sensor, que llega a 800 Pa. En el caso con bordillo de 0,10 m la discrepancia es mayor en el inicio del cuenco (hasta 800 Pa, un 37%), y más pequeña en la zona de aguas abajo (en torno a 200 Pa, que es aproximadamente el error de lectura de los sensores de presión).

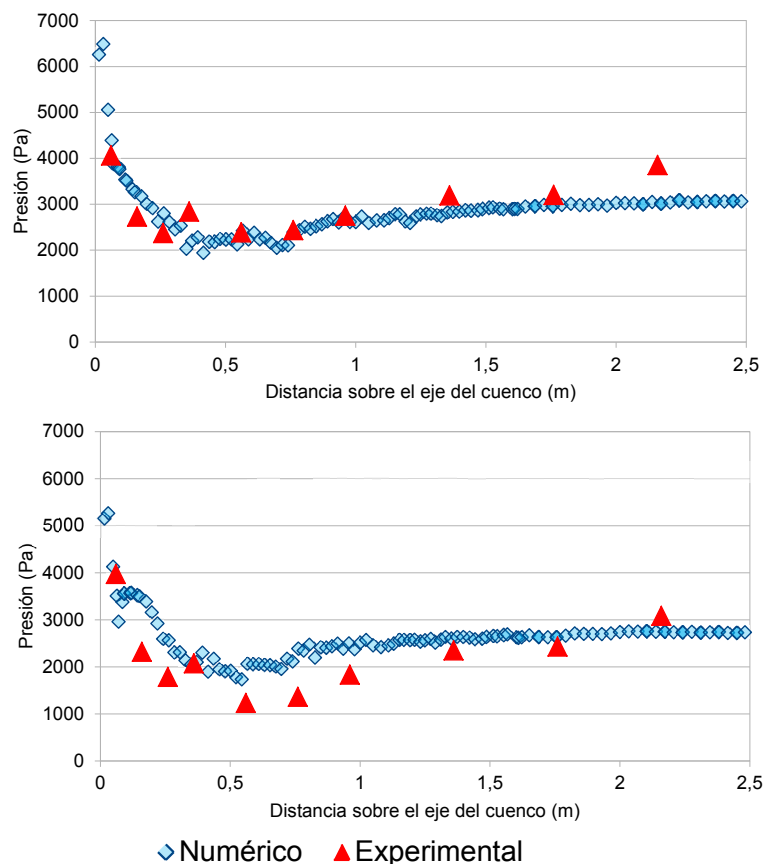


Figura 6 | Comparación entre la presión registrada a lo largo del eje del cuenco amortiguador en los modelos físicos y numéricos (valor medio). Superior: altura de bordillo de salida 0,15 m. Inferior: altura de bordillo de salida 0,10 m.

Los resultados de la validación se consideran satisfactorios teniendo en cuenta que la comparación cualitativa se considera positiva, ya que tanto los modelos físicos como los numéricos presentan patrones de funcionamiento similares. Por otra parte los registros de presión experimentales también coinciden sensiblemente con los resultados de los modelo numéricos.

Disipación de velocidad en el cuenco amortiguador

Los resultados que se muestran en los gráficos siguientes (Figura 7) indican la variación de velocidad longitudinal en el eje de la solera del cuenco amortiguador, para distintas alturas de bordillo de salida. Esta variación de velocidad indica la eficacia del resalto hidráulico y el efecto de los canales laterales en la disipación de energía.

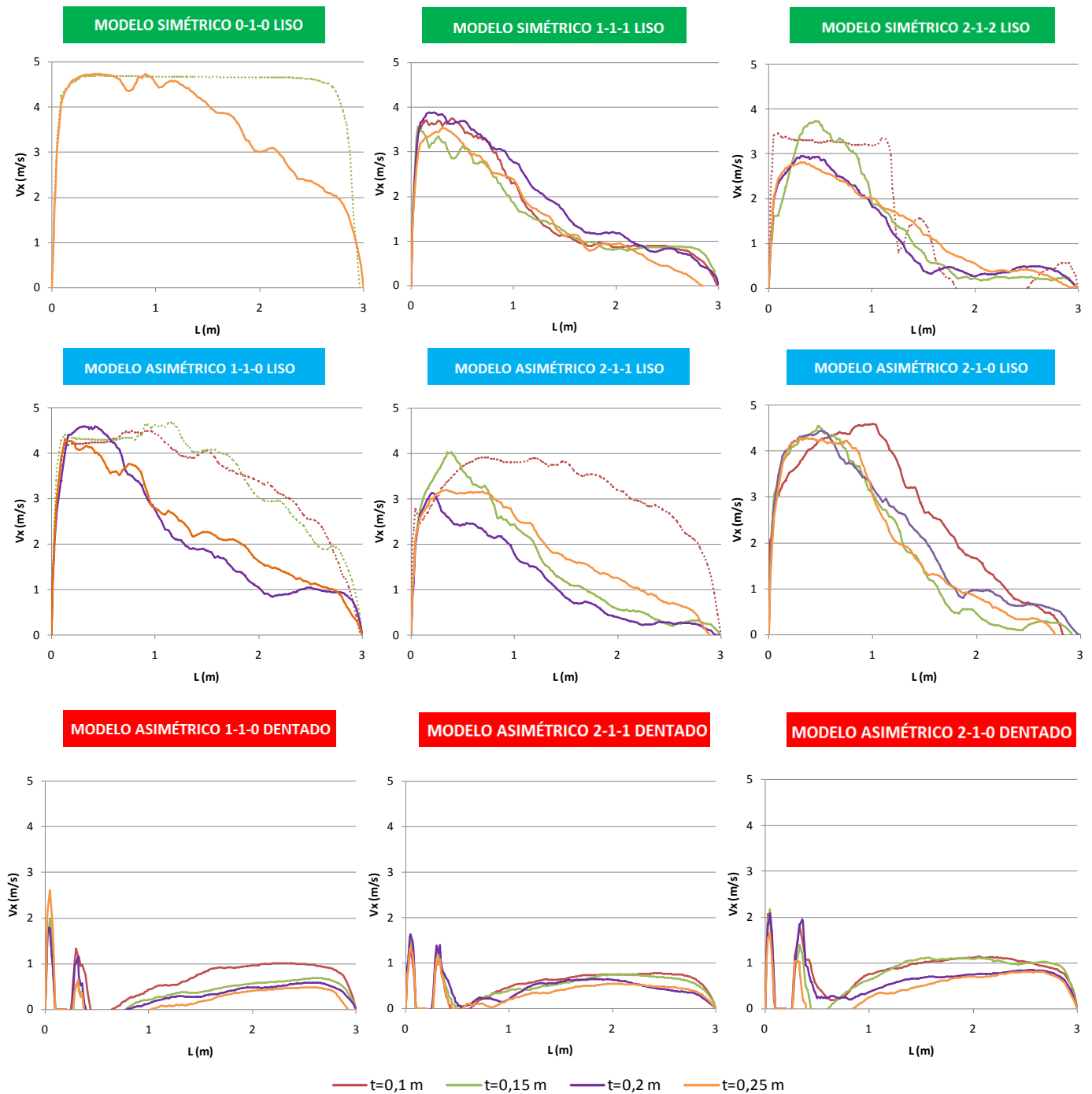


Figura 7 | Gráficos de variación de velocidad longitudinal en el eje de la solera del cuenco amortiguador. $Q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. L es la distancia desde el pie del aliviadero (inicio del cuenco), t la altura del bordillo de salida y v_x la velocidad longitudinal. Líneas punteadas indican situaciones de resalto parcialmente barrido.

De los resultados expuestos cabe señalar que cualquier geometría altamente convergente, ya sea simétrica o asimétrica, mejora la disipación de energía respecto a un modelo recto tradicional (modelo simétrico 0-1-0 liso), como se aprecia en la Figura 8. Así mismo se observa cómo la simetría en los canales laterales favorece la disipación de energía en la zona inicial del cuenco respecto a geometrías completamente asimétricas, aunque si existe simetría en los canales laterales pero esta no es total (modelo asimétrico 2-1-1 liso), la disipación de energía en la zona inicial del cuenco será ligeramente inferior a la de un modelo completamente simétrico (modelo asimétrico 2-1-2 liso), como se indica en la Figura 9. Finalmente se observa cómo los dientes de impacto favorecen la disipación de energía y la estabilidad del resalto, en comparación con los cuencos lisos, especialmente para pequeñas alturas de bordillo de salida.

Cuenca liso y bordillo de salida t=0,15 m

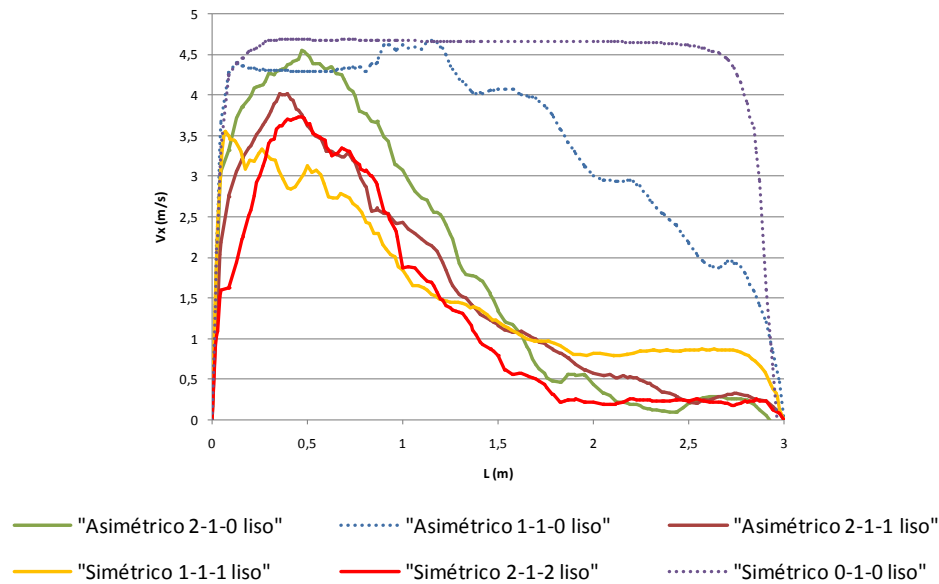


Figura 8 | Ejemplo de efectos de los cajeros altamente convergentes. Gráfico de variación de velocidad longitudinal en el eje de la solera del cuenco amortiguador para altura de bordillo de salida 0,15 m. Q 0,15 m³/s. L indica la longitud del cuenco y v_x es la velocidad longitudinal. Líneas punteadas indican situaciones de resalto barrido.

Cuenca liso y bordillo de salida t=0,25 m

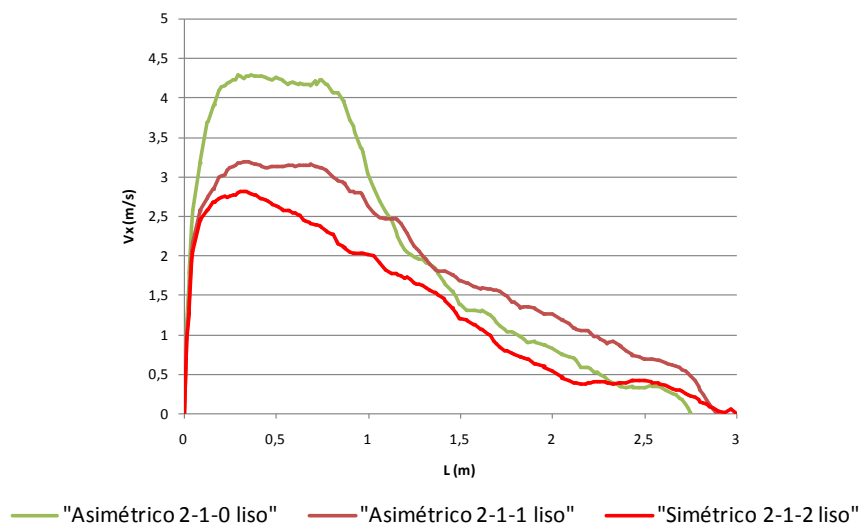


Figura 9 | Ejemplo de efectos de asimetría de canales laterales. Gráficos de variación de velocidad longitudinal en la solera del eje del cuenco amortiguador. Altura de bordillo de salida 0,25 m. Q 0,15 m³/s. L indica la longitud del cuenco y v_x es la velocidad longitudinal.

CASO DE ESTUDIO: ALIVIADERO DE EMERGENCIA DE LA PRESA DE OROVILLE

Introducción

La presa de Oroville se encuentra en la cuenca del río de las Plumas (California, Estados Unidos). Es una presa de materiales sueltos con núcleo impermeable de 230 m de altura, la cual se finalizó en 1968. La presa cuenta con un aliviadero principal de compuertas y un aliviadero de emergencia de vertido libre contiguo al principal. El aliviadero de emergencia tiene una altura máxima de 21 m y cuenta con una longitud total de 518 m, si bien solo en los 282 m iniciales cuenta con un vertedero hidrodinámico, siendo el resto de la longitud un mero muro vertical con una escasa capacidad hidráulica (USBR, 1965). Este aliviadero vierte directamente sobre la ladera sin revestir (Figura 10).



Figura 10 | Presa de Oroville. Izquierda: vista general desde aguas abajo. Se aprecian cuerpo de presa, aliviadero principal con canal de descarga y aliviadero de emergencia. Derecha: detalle del aliviadero de emergencia. Se aprecia en la zona superior el tramo con perfil hidrodinámico y en la inferior el muro. Fuente: DWR, 2017a

La presa operó sin incidentes reseñables hasta el año 2017, cuando una serie de averías de consideración afectaron a sus órganos de desagüe, en un escenario de precipitaciones anormalmente altas en su cuenca. El incidente comenzó el 7 de febrero cuando el aliviadero principal abrió sus compuertas y comenzó a desaguar para reducir el nivel del embalse y aumentar el volumen disponible, para así poder gestionar las avenidas esperadas en los siguientes días. Sin embargo, a las pocas horas de estar operando el aliviadero se observó que se estaba produciendo un daño importante en el canal de descarga, con pérdida del revestimiento de hormigón, lo que condujo a una importante erosión y socavación en el terreno subyacente. Si bien el daño se encontraba lejos del aliviadero y del cuerpo de la presa las autoridades decidieron cerrar las compuertas del aliviadero principal, y operar con el aliviadero de emergencia si fuera necesario, ante el temor de que la erosión en el terreno bajo el canal de descarga fuera remontante. El aliviadero de emergencia no había entrado en funcionamiento nunca desde su construcción hasta el día 11 de febrero de 2017, cuando el nivel de embalse alcanzó la cota del labio de vertido. Tras unas horas de funcionamiento se observaron importantes erosiones en el pie del vertedero, existiendo el peligro de descalce y colapso del aliviadero de emergencia si la erosión continuaba avanzando. En consecuencia, y de manera preventiva, las autoridades dieron la orden de evacuar a la población de la zona inundable aguas abajo de la presa (unas 200.000 personas). Para reducir la erosión aguas abajo del aliviadero de emergencia se volvieron a abrir parcialmente las compuertas del aliviadero principal, para reducir así el caudal desaguado por el aliviadero de emergencia. Tras varias horas de operación del aliviadero principal se observó que el daño en el canal de descarga, que se produjo con el vertido del día 7 de febrero, se había estabilizado y no era remontante. De tal manera que se decidió aumentar el caudal vertido por el aliviadero principal hasta su máxima capacidad, y así dejar de operar el aliviadero de emergencia a la mayor brevedad posible. Durante el día 12 de febrero el aliviadero de emergencia dejó de verter y comenzaron a realizarse reparaciones de urgencia para consolidar el pie de este aliviadero. El día 14 de febrero se revocó la orden de evacuación de la población. Hasta el día 27 de febrero el aliviadero principal estuvo vertiendo, dándose por finalizada la crisis en esa fecha.

Las principales consecuencias del incidente fueron por una parte la destrucción de un tramo significativo del canal de descarga del aliviadero principal, la socavación de la ladera subyacente y el depósito en el cauce de un volumen significativo del material erosionado. Por otra parte se produjeron importantes erosiones en la ladera de aguas abajo del aliviadero de emergencia, con especial importancia de aquellas zonas cercanas al pie del vertedero, que podrían haber provocado el descalce de la estructura durante la crisis del mes de febrero (Figura 11).



Figura 11 | Presa de Oroville, consecuencias de la crisis de 2017. Izquierda: estado final del canal de descarga del aliviadero principal y del cauce. Derecha: erosión generalizada en la ladera de aguas abajo del aliviadero de emergencia. Fuente: DWR, 2017a

El 17 de abril de 2017 se adjudicó a la empresa estadounidense Kiewit los trabajos de reparación del canal de descarga del aliviadero principal, la protección frente al descalce del aliviadero de emergencia, y el dragado de los materiales erosionados y depositados en el cauce, por un importe total cercano a los 245 millones de Dólares (Kiewit, 2017). La solución licitada como protección frente al descalce del aliviadero de emergencia (Figura 12) consiste en la construcción de un refuerzo escalonado y continuo a lo largo del vertedero, mediante hormigón compactado con rodillo (RCC en terminología inglesa). El presupuesto para esta actuación es 42 millones de Dólares. Cabe destacar que el escalonado propuesto no contempla una transición progresiva hasta la unión con el labio de vertido, lo que puede afectar a la eficiencia hidráulica del vertedero. Además esta solución sigue dejando gran parte de la ladera aguas abajo del vertedero expuesta a la erosión.

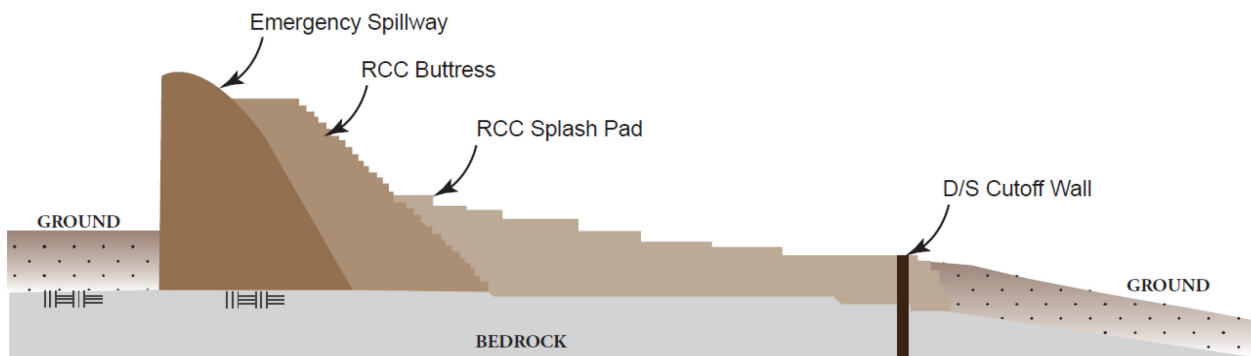


Figura 12 | Esquema de la alternativa de restauración licitada para el aliviadero de emergencia de la Presa de Oroville. Fuente: DWR, 2017b

A la luz de los primeros resultados del proyecto CALA relativos a los aliviaderos con cajeros altamente convergentes asimétricos, esta tipología podría haber sido una solución adecuada para la restauración del aliviadero de emergencia, a la vista de la geometría del vertedero y la topografía de ladera. La implementación de esta solución innovadora habría permitido realizar una obra de menor entidad para la protección frente al descalce, y la disipación de una parte importante de la energía de vertido, así como concentrar el caudal desaguado, reduciendo por tanto la zona de ladera a proteger frente a la erosión.

Alternativa para el aliviadero de emergencia de la presa de Oroville

El aliviadero de emergencia de la presa de Oroville presenta una geometría particular, debido a la topografía de la ladera aguas abajo del mismo. Esta ladera presenta un perfil escalonado de manera longitudinal al aliviadero, con tres zonas sensiblemente horizontales y dos escalones casi verticales, como se puede apreciar en la Figura 11 derecha. La zona de ladera horizontal de menor cota se encuentra en el tramo más próximo al aliviadero principal y tiene una longitud aproximada de 85 m, a continuación existe un escalón vertical de unos 10 m, donde comienza la siguiente zona de ladera horizontal. Por último, y coincidiendo con el final del vertedero hidrodinámico, existe otro escalón vertical de unos 2 m que da comienzo a la última zona de ladera horizontal.

Esta geometría resulta adecuada para el encaje de un cuenco amortiguador en la zona de terreno horizontal de menor cota, y un cajero lateral altamente convergente en la zona horizontal de cota intermedia, de tal forma que toda el agua vertida por el labio del vertedero sea recogida y conducida hacia el cuenco, de mucha menor anchura que el labio del vertedero. Por último, para el tramo de aliviadero contiguo a la zona horizontal de terreno de mayor cota se propone su recrecimiento, ya que al carecer este tramo de un perfil hidrodinámico su eficacia de vertido es muy limitada, y por tanto la repercusión en los calados de desagüe será mínima. Sin embargo, este recrecimiento favorece de forma significativa un diseño adecuado de aliviadero altamente convergente.

Para llevar a cabo el prediseño de esta solución se ha recurrido a la modelación numérica. El código empleado fue la misma aplicación del entorno KRATOS validada en el proyecto CALA, para reproducir el comportamiento de aliviaderos con cajeros altamente convergentes.

Tras llevar a cabo una serie de simulaciones con diferentes diseños de cajero y cuenco se llegó al diseño consistente en un cajero lateral de ancho variable, con 6 m de altura y un botaolas de 4 m. Este cajero se apoya en el terreno por lo que su pendiente es variable en función de la topografía. Se ha comprobado que este diseño del cajero es suficiente para que no se produzcan desbordamientos para el caudal de avenida de proyecto de 4250 m³/s.

El cuenco amortiguador quedaría encajado en la zona de menor cota del terreno aguas abajo del vertedero. Teniendo en cuenta los resultados antes expuestos del proyecto CALA, relativos al comportamiento de cuencos amortiguadores alimentados por cajeros altamente convergentes asimétricos, se han simulado numéricamente varios diseños de cuencos dentados, siendo el diseño que tuvo un mejor comportamiento en cuanto a estabilidad del resalto y disipación de energía el que contaba con 3 filas de dientes con dimensiones de 4 m de ancho y 3 m alto, con 4 m de espaciado entre dientes, con una longitud de cuenco de 40 m y una altura del bordillo de salida 5,5 m, siendo su anchura variable entre 90 m y 75 m, según las condiciones topográficas (Figura 13). La adecuada combinación de dientes de impacto y el bordillo de salida ha permitido conseguir un colchón de agua suficiente que permite una adecuada disipación de energía para el flujo que procede del cajero lateral, pero sin que ese colchón sea de tal altura que anegue el cajero provocando su desbordamiento.

Se ha observado que para el caudal de avenida de proyecto, este diseño de cuenco amortiguador disiparía una parte importante de la energía del agua (Figura 14), si bien la pendiente de la ladera aguas abajo del mismo aconseja disponer algún sistema de protección ante la erosión (Hepler, 2015), ya sean tipo escollera, bloques articulados (ACBs) o bloques en forma de cuña (Morán y Toledo, 2014; Caballero et al., 2016). En todo caso, la extensión a proteger será más reducida que de no haber seleccionado una solución de cajero altamente convergente, el cual concentra el flujo en una zona de escasa extensión en comparación con la longitud total del labio de vertido (Figura 15), y favorece la disipación de energía.

Se ha estimado un coste de construcción de la solución propuesta inferior a los 12 millones de Dólares, incluyendo el cuenco amortiguador dentado y el cajero lateral.

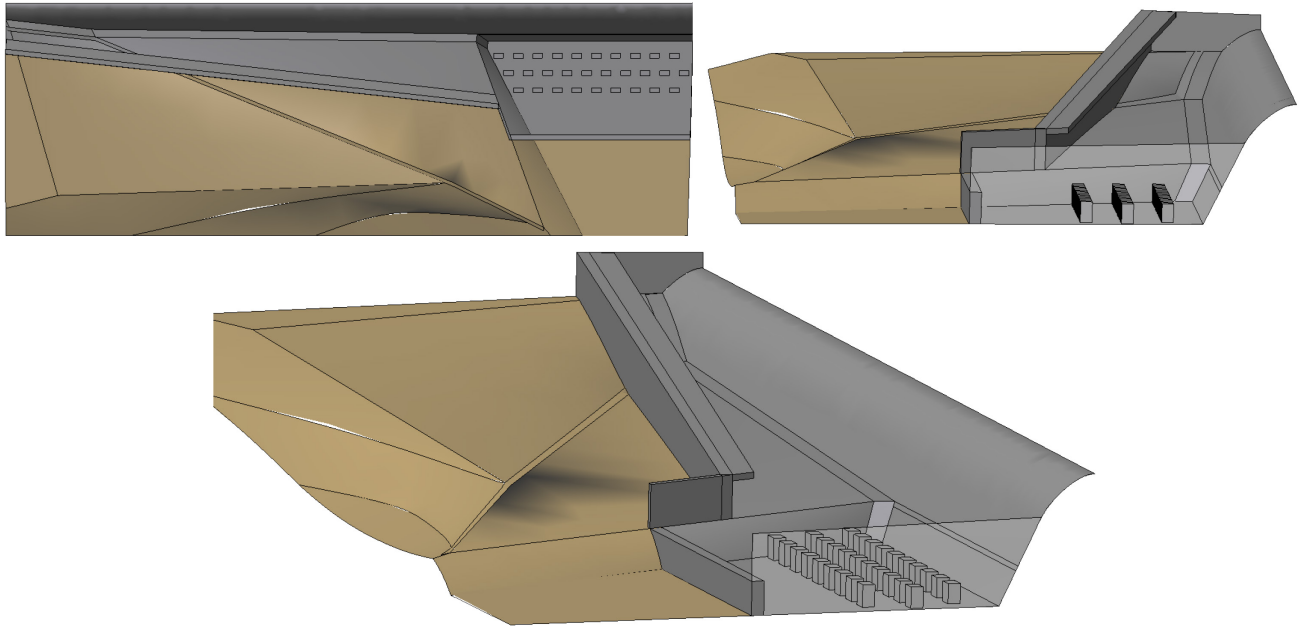


Figura 13 | Solución de cajero altamente convergente y cuenco dentado para el aliviadero de emergencia de la presa de Oroville. Vista en planta, vista lateral y perspectiva.

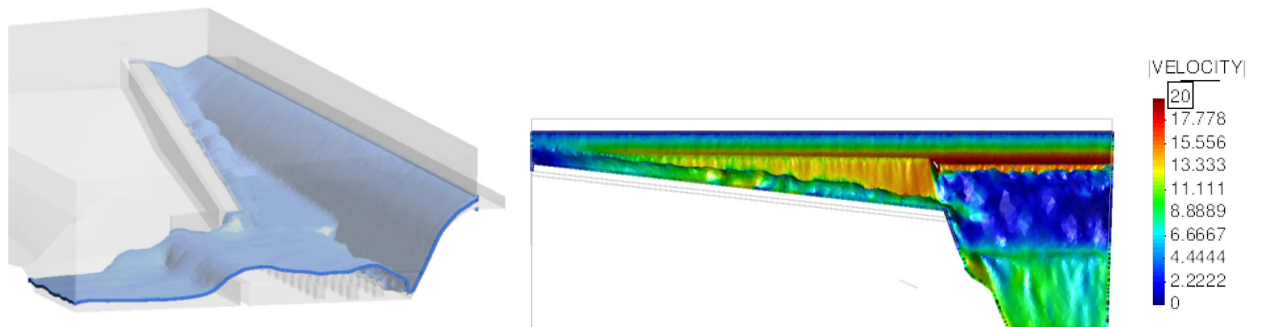


Figura 14 | Simulación numérica de la solución de aliviadero propuesta para el caudal de avenida de proyecto de $4250 \text{ m}^3/\text{s}$. Izquierda: vista general con posición de la superficie libre. Derecha: vista en planta del modelo donde se muestra la velocidad en la superficie libre.



Figura 15 | Izquierda: vista aérea del aliviadero de emergencia de la presa de Oroville antes del incidente de 2017. Centro: situación después del incidente, donde se observa erosión generalizada en la ladera. Derecha: Simulación numérica de la solución propuesta, donde se aprecia la concentración del vertido en una zona reducida, aguas abajo de la cual debería implementarse el sistema de protección frente a la erosión. Como se aprecia la zona a proteger es de mucha menor extensión que en un escenario sin cajero lateral (imagen central).

CONCLUSIONES

A pesar de que es la propia guía estadounidense FEMA la que propone los cajeros laterales como protección frente al descalce de presas de fábrica, la solución finalmente adoptada para la reparación del aliviadero de emergencia de la presa de Oroville consiste en un refuerzo escalonado mediante hormigón compactado con rodillo. La implementación de una solución con cajeros laterales, como recomienda la propia guía técnica, habría requerido de una campaña de estudios específicos para su diseño, ante la falta de criterios generales para su cálculo, lo que ha resultado incompatible con la urgencia requerida a la reparación, la cual debe estar completada según pliego antes de la próxima temporada de lluvias.

En esta comunicación se ha mostrado cómo una solución con cajero lateral altamente convergente podría haber sido adecuada para la restauración del aliviadero de emergencia, con unos costes menores a la solución que se va a llevar a cabo. El proyecto CALA, a pesar de estar en sus etapas iniciales, ha conseguido ofrecer las pautas para el diseño de la solución propuesta, gracias a las campañas de caracterización de cajeros asimétricos y cuencos dentados.

De esta manera se ha puesto de manifiesto cómo la existencia de herramientas y criterios de diseño para la implementación de soluciones no convencionales podría permitir invertir los recursos de forma más eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad que ha financiado este trabajo a través del proyecto CALA de la convocatoria Retos Colaboración (RTC-2016-4581-5), así como el apoyo económico a CIMNE vía el programa CERCA de la Generalitat de Cataluña.

REFERENCIAS

- Caballero, F. J., Toledo, M. Á., Morán, R., San Mauro, J., Salazar, F. 2016. Advances in the understanding of the hydraulic behavior of wedge-shape block spillways. *Proceedings of the 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping and Accidental Leakage*. September 7-9. Fort Collins, Colorado, USA.
- Codina R. 2000. Stabilization of incompressibility and convection through orthogonal sub-scales in finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 190:1579–1599.
- Dadvand, P., Rossi, R., Oñate, E. 2010. An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 253-297.
- DWR, 2017a. *Photo gallery*. Department of Water Resources, State of California, USA. Access June 3. 2017. <<https://pixel-ca-dwr.photoshelter.com/galleries/C0000OxvlgXg3yfg/G00003YCcmDTx48Y/Oroville-Spillway-Incident>>.
- DWR, 2017b. *Oroville spillway recovery: Plans Under design*. Department of Water Resources, State of California, USA.
- FEMA, 2014. *Technical Manual: Overtopping Protection for Dams*. Federal Emergency Management Agency, US Department of Homeland Security, Washington DC, USA
- Hepler, T. E. 2015. Technical manual: Overtopping protection for dams. *Proceedings of the 1st International seminar on Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage*. November 24-26. Madrid, Spain.
- Kiewit Co. 2017. *Bid for spillways Oroville emergency recovery*. Specification No. 17-09 Contract No. C51544. California Natural Resources Agency. Department of Water Resources. State of California, USA.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E. 2015. Finite element modeling of free surface flow in variable porosity media. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 22(4), 637-653.

- Morán, R., Toledo, M. A. 2014. Design and construction of the Barriga Dam spillway through an improved wedge-shaped block technology. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(10), 924-927.
- Morera, L., San Mauro, J., Salazar, F., Toledo, M. Á. 2014. Highly-converging chutes as an overtopping protection for concrete dams: physical and numerical modelling. *Proceedings of the 1st International seminar on Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage*. November 24-26. Madrid, Spain.
- Principe, J., Codina, R., Henke, F. 2010. The dissipative structure of variational multiscale methods for incompressible flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 199(13), 791-801.
- Rossi, R., Larese, A., Dadvand, P., Oñate, E. 2013. An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 71, 687–716. Doi: 10.1002/flid.3680
- Salazar, F., Morán, R., Rossi, R., Oñate, E. 2013. Analysis of the discharge capacity of radial-gated spillways using CFD and ANN–Oliana Dam case study. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 244-252.
- San Mauro, L., Salazar, F., Toledo, M. A., Caballero, F. J., Ponce-Farfán, C., Ramos, T. 2016. Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico. *Ingeniería del Agua*, 20(3), 127-138.
- Turner Jr, H. O. 1999. *Dam Safety Assurance Model Study of Tygart Dam, Tygart River, Grafton, West Virginia (No. WES/TR/CHL-99-7)*. Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- USBR, 1965. *Hydraulic model studies of the flood control outlet and spillway for Oroville Dam. Report No. Hyd-510*. United States Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, USA.
- Zaitsoff, M. P. 2013. Overtopping Modifications to Tygart Dam. *Proceedings of the National Dam Safety Technical Seminar: Overtopping Protection for Dams*. February 20-21, Emmitsburg, Maryland, USA.