

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

AVENIDA CAUSADA POR LA ROTURA DE UNA PRESA DE ESCOLLERA DEBIDA A SOBREVERTIDO

Miguel Ángel Toledo, Rafael Morán y Ricardo M. Alves¹

RESUMEN: *Es importante prever la avenida que puede generar la rotura de una presa con objeto de delimitar las áreas potencialmente inundables y conocer el momento en que se produciría la inundación, con el fin de establecer los planes de emergencia que puedan evitar o reducir el número de víctimas en caso de rotura. Ya se dispone de modelos numéricos que permiten estimar la progresión de la brecha de rotura en presas homogéneas, pero la rotura de una presa de escollera con bajo contenido de finos se produce de una manera muy distinta y la onda de rotura generada puede diferir sensiblemente. En esta comunicación se describen los modos de rotura de una presa de escollera con núcleo central o con pantalla, incluyendo la pérdida del espaldón de escollera y la rotura del núcleo o pantalla, se dan pautas sobre el caudal necesario para la rotura catastrófica de la presa y se analiza la influencia de los mecanismos de rotura en la onda de avenida generada.*

¹ Universidad Politécnica de Madrid; Grupo de Seguridad de Presas y Aliviaderos (SERPA) (Código ORCID de los autores, respectivamente: 0000-0002-7594-7624; 0000-0002-0031-1605; 0000-0002-2059-1712)

1. PROCESO Y CAUDAL DE ROTURA

Muchas de las presas de materiales sueltos que generan más riesgo por su gran capacidad de embalse y altura son de escollera. Por otra parte, el sobrevertido es la mayor amenaza para la seguridad de las presas de materiales sueltos. La estimación acertada de la onda de avenida que podría liberarse en el caso de rotura de una presa de escollera por sobrevertido es importante para evaluar si el riesgo que genera es aceptable, para decidir si es necesario abordar alguna acción correctora, y también para establecer las áreas que resultarían inundadas y en qué momento, como base para el diseño de un plan de emergencia realista y eficaz.

La onda de rotura queda determinada por el proceso de rotura de la presa, que depende de sus características propias, y por la distribución en altura de la capacidad del embalse. Vamos a analizar el proceso de rotura de una presa de escollera, sus posibles variantes y su influencia en la previsible onda de rotura. Nos limitaremos aquí a las presas de escollera limpia, ya que la rotura de espaldones de materiales semipermeables no se ha investigado por el momento.

1.1. UNA VISIÓN GENERAL DEL PROCESO

En el esfuerzo por comprender y simular numéricamente la rotura de una presa de materiales sueltos, la atención de la comunidad técnica y científica se ha dirigido principalmente al proceso de erosión, que es esencial en presas homogéneas de material arcilloso o limoso, pero puede tener un papel secundario o irrelevante en ciertas presas de escollera. En la actualidad se desconoce todavía en qué presas de escollera el proceso de erosión puede jugar un papel significativo. Es claro que no en las presas de pantalla y escollera limpia, y bastante dudoso en las presas de núcleo formado por arcilla de cohesión moderada o alta y de anchura normal o reducida.

Cuando se inicia el sobrevertido, inicialmente con caudal reducido, el agua desciende con facilidad hacia la base del espaldón y sale por el pie de presa. El incremento del caudal de sobrevertido implica una elevación del nivel del agua en el espaldón, aumentando la presión intersticial y el gradiente hidráulico en la salida, así como la velocidad y fuerza de arrastre del agua que circula sobre el talud, inicialmente en la zona inferior, pero con una elevación progresiva del punto de emergencia del agua al talud de aguas abajo de la presa (Toledo, 1997a, 1997b).

Tras un *período de incubación*, se comienzan a producir daños en el espaldón, por deslizamiento o por arrastre de partículas. La importancia de cada mecanismo depende fundamentalmente del talud del espaldón. El caso es que la rotura del espaldón progresa desde el pie hacia la coronación. Cuando la zona dañada alcanza la coronación de la presa se produce una situación crítica, ya que a partir de ese momento el núcleo (o pantalla) comienza a quedar desprotegido, perdiendo su apoyo. Denominamos al caudal necesario para llegar a este punto del proceso *caudal de rotura* del espaldón, aunque no haya quedado todavía totalmente destruido (Toledo, Moreno y Mateos, 2004; Campos, Morán y Toledo, 2011). Una vez que se crea un desnivel de caída aguas abajo del núcleo por pérdida de la parte superior del espaldón, el proceso de pérdida del soporte de escollera se acelera drásticamente, como consecuencia del impacto del agua, que crea un remolino de eje horizontal de gran capacidad de arrastre. Así, de manera rápida el núcleo pierde gran parte de su apoyo en un plazo breve.

Habiendo perdido su soporte, el núcleo queda expuesto a una eventual rotura estructural súbita. Dado que el proceso de pérdida de soporte del núcleo es rápido, cabe esperar que la rotura estructural se produzca antes de que la pérdida de ma-

terial del núcleo por erosión sea significativa, ya que la erosión es un proceso que requiere tiempo, a menos que el material que conforma el núcleo tenga una resistencia muy baja a la erosión.

1.2. LOS CASOS DE HANS STRYDOM Y TOUS

La ataguía de la presa de Hans Strydom (Sudáfrica), de escollera con núcleo, como la propia presa, se rompió en 1977. Después de que el núcleo perdiera su apoyo por eliminación del espaldón de escollera, aguantó todavía 20 minutos hasta que volcó. El plano de fallo se produjo tres metros por encima de la base del núcleo, que quedó intacto por debajo del mismo, a pesar del paso del agua del embalse. Como consecuencia del vuelco, el núcleo se fragmentó en grandes bloques que quedaron depositados a lo largo del río. Este caso evidencia la posibilidad de una rotura estructural súbita del núcleo (Odendaal y Van Zyl, 1979).

El proceso de rotura de la presa de Tous no está documentado como el anterior, al menos en documento publicado conocido por los autores. Sin embargo, se observan los dos mismos aspectos antes mencionados: aguas abajo del emplazamiento de la presa se encontraron grandes bloques del núcleo (Álvarez, 1982) y una parte del mismo, más importante en el caso de Tous que en de la ataguía de Hans Strydom, permaneció en buenas condiciones (Utrillas, Soriano y Sánchez, 2000). Queda abierta la cuestión de si pudo producirse una rotura estructural o si en el tiempo que duró el sobrevertido la erosión pudo tener un papel significativo en la pérdida de material.

1.3. EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DE LA ESCOLLERA

Durante la compactación de la escollera se produce una cierta fragmentación de la parte superior de la capa que recibe directamente el impacto del rodillo vibrante. Si la roca no es muy competente, el puede producirse un grado de fragmentación tal que provoque una reducción apreciable de la permeabilidad en esa zona superior de la capa, lo que dificulta el flujo del agua hacia la base del espaldón en caso de sobrevertido. En tal caso el agua encuentra salida preferente hacia el exterior en dirección horizontal, lo que altera el patrón de flujo en el interior de la escollera (Toledo 1997a; Morán, 2013) (Figura 1).

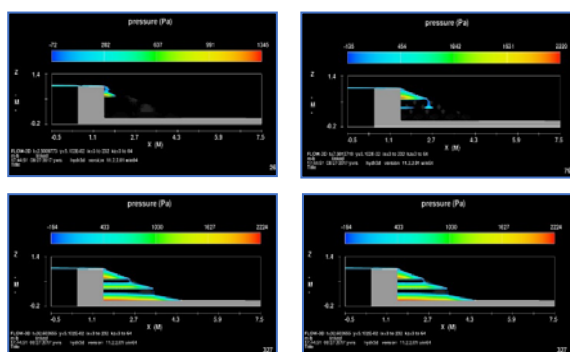


Figura 1: Proceso de saturación del espaldón con efecto significativo de la fragmentación de la escollera durante la compactación (Fuente: Díaz, Toledo y Morán, 2018)

Como consecuencia de esa dificultad de descenso del agua hacia niveles inferiores, pueden producirse situaciones de inestabilidad o arrastre de partículas en la zona superior del espaldón, en las proximidades de la coronación de la presa. De esta manera el proceso de compactación puede causar la pérdida temprana del apoyo del núcleo, y provocar su rotura para un caudal de sobrevertido menor (Díaz, Toledo y Morán, 2018).

1.4. CAUDAL DE ROTURA

El caudal necesario para que se produzca la rotura catastrófica de la presa es el que provoca la rotura de su elemento impermeable: núcleo o pantalla, pues mientras no falle este elemento, el agua liberada provendrá únicamente de la avenida natural, no del agua embalsada previamente.

Una vez que la rotura del espaldón afecta a la zona de coronación de la presa, la rotura del núcleo (o de la pantalla) está muy cerca. No es necesario que se produzca una elevación significativa del caudal para desencadenar el fallo del núcleo por falta de apoyo. Por tanto, el *caudal de rotura* del espaldón puede ser una estimación razonable del caudal necesario para el fallo del elemento impermeable y, en consecuencia, para la rotura catastrófica de la presa.

El grado de avance de la rotura desde el pie de presa hacia la coronación depende básicamente de la altura del agua en el interior del espaldón. Por tanto, en ausencia de un efecto significativo de alteración del flujo interno por el proceso de compactación, el *caudal de rotura* del espaldón viene determinado principalmente por la permeabilidad de la escollera y la altura de la presa. Es mayor para presas de escollera más permeable y más altas. El talud tiene una influencia menor. Cabe esperar que en cerradas estrechas el caudal de rotura sea menor que en cerradas anchas, dado que la concentración del caudal en la zona de la base provocará una elevación del nivel del agua en el interior del espaldón.

Se puede realizar una estimación del caudal de rotura del espaldón, válido para el tamaño de laboratorio, pues se ha obtenido a partir de ensayos con presas de un metro de altura (Alves, Toledo y Morán, 2017). La determinación del caudal de rotura puede también abordarse mediante la utilización de modelos numéricos de base física si el mecanismo de rotura prevalente es el deslizamiento en masa (Larese et al., 2013; Larese, Rossi y Oñate, 2015).

2. ROTURA ESTRUCTURAL DEL NÚCLEO

Como sucedió en el caso de Hans Strydom, la rotura del núcleo puede ser estructural y súbita, previsiblemente más rápida en muchos casos que el tiempo necesario para que se llegue a producir una pérdida de material por erosión apreciable.

2.1. ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Realizamos tres ensayos en el canal de ensayo de rotura de presas del Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid (UPM) (Toledo, Alves y Morán, 2015). El objeto fue materializar, a tamaño de laboratorio, el proceso de rotura del núcleo de una presa de escollera. Para ello se realizaron dos ensayos con presas de 67 cm de altura, y con dos núcleos de distinto espesor: 10 y 20 cm en la base, a los que llamaremos núcleo delgado y núcleo ancho. Ambas presas perdieron progresivamente el espaldón, formado por grava, en un proceso ya conocido por ensayos anteriores, y los dos núcleos arcillosos fallaron por rotura estructural.



Figura 2: Secuencia de rotura del núcleo grueso

El núcleo ancho sufrió un único episodio de rotura, volcando en toda la anchura del canal de ensayo, con

plano de rotura a una profundidad bajo la coronación del 35% de la altura del núcleo (Figura 2). En núcleo más estrecho, en cambio, sufrió dos episodios de rotura estructural (Figuras 3 y 4). El primero de ellos provocó una brecha de menor profundidad que la del núcleo ancho, del 18 a 23% de la altura del núcleo, y afectó únicamente a una parte del núcleo que había quedado sin soporte por pérdida del espaldón. Tras un cierto tiempo se produjo el segundo episodio, abriendo una brecha más profunda. A diferencia de lo sucedido con el núcleo ancho, en los dos episodios de rotura estructural del núcleo estrecho se observó una fisura vertical centrada en la zona sin apoyo donde se abrió la brecha, cayendo la parte del núcleo que se desprendió del resto en dos partes, cada una de ellas girando en torno a su extremo, con giro de eje sensiblemente vertical, como puertas abatibles de doble hoja.



Figura 3: Secuencia del primer episodio de rotura del núcleo delgado



Figura 4: Secuencia del segundo episodio de rotura del núcleo delgado

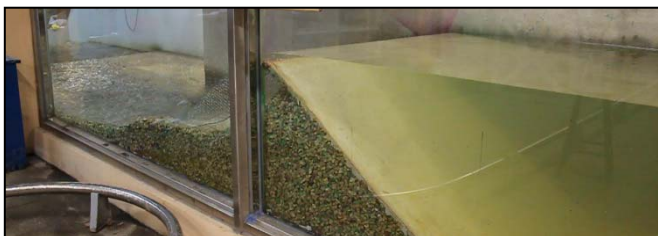


Figura 5: Pantalla resistiendo en ménsula antes del primer episodio de rotura

Además de los dos ensayos de presas con núcleo central arcilloso realizamos un tercer ensayo de una presa de escollera con pantalla aguas arriba. La pantalla se materializó mediante una capa fina de mortero. En este caso, la pérdida del material de apoyo en una altura reducida ya provoca la rotura de la pantalla, produciéndose una brecha de menor profundidad que en el caso del núcleo estrecho, como corresponde a la menor resistencia de la pantalla. No obstante, la pantalla aguantó en ménsula sin apoyo hasta que el descalce fue suficiente para causar ese primer episodio de rotura (Figura 5). Hubo además otros dos episodios de rotura que profundizaron la brecha

siguiendo el mismo proceso de descalce, resistencia en ménsula y rotura.

Considerando los tres ensayos conjuntamente, se observa un patrón general: cuanto mayor es la resistencia del elemento impermeable, núcleo o pantalla, el primer episodio de rotura genera una brecha más profunda, y cuanto menor es su resistencia, más episodios sucesivos de rotura se producen hasta la estabilización del proceso.

2.2. MECANISMOS DE ROTURA ESTRUCTURAL DEL NÚCLEO

Existen diversos mecanismos de rotura que pueden provocar un fallo de tipo estructural cuando el núcleo pierde, parcial o totalmente, su apoyo sobre el espaldón. El mecanismo prevalente dependerá de la magnitud de los diversos esfuerzos en

juego, de la geometría de la presa y de las características resistentes del material del núcleo.

Dado que la resistencia a tracción del material arcilloso del núcleo es muy reducida, pequeñas tracciones podrían desencadenar la rotura estructural y es más bien la resistencia a cortante que debe vencerse en las caras de la brecha la que gobierna el modo en que se produce la rotura estructural.

A falta de una coacción lateral importante, cabe esperar que se produzca el vuelco a partir de la fisuración horizontal del paramento de aguas arriba, con eje de giro horizontal en las proximidades de la cara de aguas abajo del núcleo. Esto es lo que sucedió en el ensayo con núcleo ancho, en el que antes de la rotura se perdió buena parte del espaldón de aguas abajo hasta la cota de rotura. En cambio, la coacción lateral puede inhibir el vuelco por fricción y cohesión en las caras verticales de la brecha potencial, lo que sucede cuando el descalce del núcleo se reduce a una parte de su longitud entre estribos, y en tal caso puede resultar más desfavorable la rotura a partir de una grieta vertical abierta en el paramento de aguas abajo, en el centro de la zona desprotegida, con giros de eje vertical de las dos mitades alrededor de sus extremos, como una puerta abatible de doble hoja. En este caso, observado en el ensayo de la presa con núcleo estrecho, debe vencerse la fricción y cohesión en el plano horizontal de la brecha.

Cuando se produce vuelco, éste puede ser rígido o plástico. Si el vuelco es rígido las fuerzas actuantes llevan a la apertura de una fisura horizontal que progresa desde la cara de aguas arriba del núcleo hacia la de aguas abajo. Al reducirse la sección de contacto entre la parte volteada y la que permanece debajo la tensión de compresión aumentará progresivamente y cabe esperar que en la fase final del volteo se produzca plastificación. Las fuerzas actuantes desencadenan el vuelco, que a su vez provoca la plastificación. En cambio, cuando el vuelco es plástico, la plastificación del núcleo en las proximidades de su cara de aguas abajo precede al vuelco y es su causa. Para que el vuelco sea plástico debe superarse la tensión de plastificación del material que conforma el núcleo, por lo que no cabe esperar este tipo de rotura a tamaño de laboratorio con material arcilloso convencional.

Si la plastificación del núcleo afecta a una zona reducida e insuficiente para provocar el vuelco plástico, no cabe esperar una rotura catastrófica de la presa y se produciría un incidente sin rotura, aunque el sistema de auscultación debería registrar deformaciones anómalas.

Finalmente, cabe calificar de rotura estructural el fallo por deslizamiento en masa de una parte del núcleo, por superación de la resistencia a cortante en la superficie de deslizamiento.

La realidad de la rotura puede ser más compleja que lo expuesto anteriormente, y no adaptarse de forma nítida a ninguno de los mecanismos descritos, participando varios de ellos de manera simultánea o sucesiva.

2.3. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA ROTURA

La modelación numérica detallada del proceso es complicada, pero es posible comprobar la posible aparición de los mecanismos de rotura descritos a partir de las fuerzas globales actuantes. Realizamos un modelo relativamente sencillo, implementado en una hoja de cálculo, para comprobar a qué profundidad cabe esperar la rotura. La primera versión de este modelo implementa los mecanismos de vuelco rígido y plástico, y también el deslizamiento según un plano horizontal.

Al aplicar este modelo a las dos presas de escollera con núcleo ensayadas en laboratorio se obtuvieron unas profundidades del plano de rotura del 27% y 19% de la altura de la presa para los casos de núcleo ancho y estrecho respectivamente. Si comparamos estos resultados con los valores de 35% y 18 a 23% medidos en los ensayos, y teniendo en cuenta el grado de simplificación realizado, los resultados son alentadores, si bien es necesario completar el modelo, realizar más ensayos de verificación y contrastar los resultados con casos reales, en la medida de lo posible, o con ensayos de gran tamaño (Ricoy, Toledo y Morán, 2017).

3. EL HIDROGRAMA DE ROTURA

Conocer el caudal de sobrevertido y el tiempo necesario para que se produzca la rotura catastrófica de la presa y, en caso de producirse, la evolución del proceso de rotura, tiene varias utilidades. Evaluar de forma realista el peligro de rotura ante un episodio de avenida, y la onda de avenida que resultaría de ello, permite conocer el riesgo realmente generado por la presa, lo que a su vez facilita tomar decisiones de forma fundamentada sobre la necesidad de realizar actuaciones para reducir el riesgo. Otra utilidad importante es la posibilidad de planificar de manera acertada las actuaciones a desarrollar en caso de emergencia por el peligro de sobrevertido, en base al conocimiento de las consecuencias reales que cabe esperar de los sucesivos incrementos del caudal de sobrevertido. Por tanto, el conocimiento del proceso de rotura debe conducir a una mejor valoración de si se producirá rotura catastrófica y, en caso de preverse dicha rotura, a una mejor estimación de la avenida de rotura resultante.

3.1. FASE DE INCUBACIÓN DE DAÑOS A LA ESCOLLERA

Una vez que los órganos de desagüe de la presa agotan su capacidad, con el nivel del agua a la cota de la coronación de la presa, se inicia el sobrevertido. A partir de ese instante, el hidrograma de sobrevertido queda definido por la evolución del caudal desaguado sobre la coronación de la presa a lo largo del tiempo.

Para que se produzca el inicio del daño en el espaldón de escollera es necesario que el *caudal de sobrevertido* supere un cierto umbral, el *caudal de incubación*. Durante el período de tiempo necesario para que el caudal alcance dicho valor la presa no sufre daños apreciables, y el caudal saliente hacia aguas abajo coincide con el caudal de sobrevertido más el evacuado por los órganos de desagüe. Podemos denominar a este período *fase de incubación*.

3.2. FASE DE DAÑOS A LA ESCOLLERA

Una vez que el espaldón comienza a sufrir daños, éstos van incrementándose a medida que aumenta el caudal de sobrevertido. Como se comentó más arriba, esos daños se inician en el pie de la presa y progresan hacia la coronación de la presa, a no ser que la fragmentación producida por el proceso de compactación altere el patrón del flujo interno del agua a través de la escollera. En cualquier caso, el caudal saliente sigue manteniéndose igual al de sobrevertido más el evacuado por los órganos de desagüe mientras núcleo (o pantalla) de la presa no se vea afectado.

Esta fase concluye cuando los daños a la escollera alcanzan la zona de coronación y el núcleo comienza a quedar sin apoyo en su zona superior, para lo que el *caudal de sobrevertido* debe alcanzar el valor correspondiente al *caudal de rotura* del espaldón.

3.3. FASE DE INCUBACIÓN DE LA ROTURA DEL NÚCLEO

Una vez iniciada la pérdida de la escollera en la zona de coronación, el núcleo pierde su apoyo en una altura significativa de manera rápida, como se indicó más arriba. No obstante, como se observó en la ataguía de Hans Strydom (el núcleo resistió 20 minutos sin soporte), y también en los ensayos realizados en laboratorio, la rotura no es instantánea, y el núcleo aguanta durante un tiempo sin soporte hasta que se produce su rotura estructural.

Durante esta fase el caudal saliente sigue coincidiendo con el caudal de sobrevertido más el evacuado por los órganos de desagüe, que sigue su evolución temporal en función del hidrograma de avenida que entra en el embalse, de la capacidad de laminación del mismo y de la capacidad de los órganos de desagüe de la presa.

Naturalmente, durante esta fase el núcleo está sometido también a un proceso de erosión, que puede alterar el esquema mencionado si el material que conforma el núcleo permite una pérdida de material apreciable en el tiempo en que se mantiene esta situación. En relación con esto, hay que tener en cuenta que el agua se despega del núcleo en el extremo de aguas abajo de su base superior y muy probablemente caiga directamente sobre la escollera, dados los taludes habituales en los núcleos, por lo que el talud de aguas abajo estará sometido a erosión fundamentalmente en su parte inferior, por encima de la cota de escollera, donde se forma un remolino si el calado de aguas abajo es suficiente para ello.

Cabe esperar que el proceso erosivo domine la evolución de la rotura si el material del núcleo es muy erosionable o el núcleo muy grueso y resistente frente a una rotura estructural.

3.4. FASE DE ROTURA ESTRUCTURAL DEL NÚCLEO

Una vez finalizada la fase de incubación de la rotura del núcleo, el fallo estructural del mismo es repentino. La fase de incubación favorece que cuando se produzca la rotura estructural el núcleo esté ya desprotegido en una altura importante, lo que puede dar origen a brechas relativamente profundas.

La profundidad y anchura de la parte del núcleo que cae hacia aguas abajo, y que determina el tamaño de la brecha originada por la rotura, depende fundamentalmente de la amplitud de la zona del núcleo que ha quedado sin protección del espaldón y del espesor y resistencia del núcleo. Cabe esperar que, como se ha observado en los ensayos realizados en laboratorio, las brechas sean más profundas en los núcleos más gruesos y resistentes, que requieren una mayor profundidad de descalce para su rotura.

El tamaño de la brecha provocada por la rotura súbita del núcleo determinará la cuantía del incremento repentino del caudal desaguado, que en esta fase se separa ya bruscamente del caudal correspondiente al hidrograma de sobrevertido como consecuencia de la liberación de agua embalsada.

3.5. FASE DE LIBERACIÓN DEL AGUA DEL EMBALSE

La evolución posterior del hidrograma de rotura dependerá fundamentalmente del tamaño del embalse. Un embalse se considera *grande*, en relación con el problema analizado, si durante el proceso de rotura el descenso del nivel del embalse es reducido. En este caso la evolución temporal de la rotura no afecta significativa-

mente al caudal punta del hidrograma de rotura, ni por tanto a las áreas inundadas, ya que dicho caudal punta vendrá dado por las dimensiones finales de la brecha, puesto que el nivel del agua no varía significativamente durante el proceso de apertura de la misma. Lo que sí se verá afectado es el instante en que el pico de la onda de rotura va alcanzando los diversos lugares afectados por la inundación, dato también importante a la hora de elaborar el plan de emergencia.

En cambio, en un embalse *pequeño*, en el sentido antes definido, el proceso de rotura afecta sensiblemente al valor máximo alcanzado por el caudal saliente durante la rotura, puesto que las sucesivas profundizaciones o ensanches de la brecha se producirán con niveles ya mermados por el agua previamente liberada del embalse.

3.6. EVOLUCIÓN DE LA ROTURA DEL NÚCLEO

Como se comentó más arriba, pueden producirse varios episodios de rotura estructural a medida que el núcleo va quedando sin soporte por la pérdida de la escollera del espaldón. Cada uno de estos episodios provocaría un incremento súbito del caudal saliente. La evolución del hidrograma de rotura entre episodios dependería de la evolución del nivel del agua en el embalse, como se ha comentado antes.

También es posible una apertura progresiva de la brecha por erosión si las características del material permiten una pérdida de masa significativa durante la duración de la evacuación del agua del embalse sin que se produzcan previamente episodios de rotura estructural.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las presas de escollera, sometidas a un sobrevertido, sufren un proceso de rotura característico, muy distinto del de las presas homogéneas. Durante un período, que puede alargarse varias horas tras el inicio del sobrevertido, la presa pasa por una fase en la que no hay daño, otra fase en la que comienzan a producirse daños en el espaldón de escollera hasta alcanzar la zona de coronación, seguidamente se inicia el descalce del núcleo (o pantalla), y todavía se añade una fase más durante la cual el núcleo resiste en pie aún sin el soporte del espaldón. Durante todo este período la presa resiste con daños, pero sin provocar una onda de rotura. Este tiempo es valioso para reducir las víctimas en caso de rotura. La rotura se produce finalmente de forma repentina por fallo estructural del núcleo, jugando la erosión un papel menor, salvo que el material del núcleo sea muy erosionable o el núcleo tenga una resistencia estructural elevada que impida su fallo estructural rápido.

Este proceso de rotura determina la forma y dimensiones del hidrograma de rotura por sobrevertido, junto con la capacidad de almacenamiento del embalse. La rotura estructural súbita conduce a una elevación repentina del caudal desaguado y por tanto a un hidrograma de rotura que puede ser muy destructivo si la fase previa no se ha aprovechado para realizar una evacuación rápida de la población que ocupa las zonas inundables. El peligro de rotura repentina es cierto y real en el caso de una presa de escollera sometida a sobrevertido, si bien viene precedido de un período durante el cual la presa resiste el sobrevertido sin liberación de agua del embalse.

La correcta modelación del proceso de rotura permitirá delimitar con mayor rigor las áreas inundables y estimar de forma más realista los tiempos de llegada de la onda de rotura a los distintos lugares afectados, lo que se traducirá en una mejor

estimación del riesgo real, en una toma de decisiones mejor fundamentada y en una mejor planificación y gestión de las situaciones de emergencia por sobrevertido.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos descritos en este artículo han sido financiados por el Gobierno de España, a través de varios proyectos de distintas convocatorias del Plan Nacional de I+D+i; actualmente el proyecto HIRMA (RTC-2016-4967-5) del Ministerio de Economía y Competitividad, junto el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Comisión Europea, y anteriormente los proyectos eDAMS (BIA2010-21350-C03-03) y XPRES (BIA2007-68120-C03-02).



REFERENCIAS

- Álvarez, A. (1982). Comunicación personal al autor Miguel Ángel Toledo, tras la vista de Alfonso Álvarez al emplazamiento de la presa de Tous después de la rotura.
- Alves, R.M., Toledo, M. Á., & Morán, R. (2017). Overflow for the complete failure of the downstream shell of a rockfill dam. In *Protections 2016. 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping*; Colorado State University. Libraries. <http://hdl.handle.net/10217/179800>.
- Campos, H., Morán, R. & Toledo, M. Á. (2011). Estudio de la rotura de presas de material granular grueso uniforme no cohesivo sin elemento impermeable. Fase de inicio. *Dam Maintenance & Rehabilitation II. CRC Press. Taylor & Francis Group. Balkema 2011. ISBN 978-0-415-61648-5*.
- Díaz, J.C., Toledo, M.Á. & Morán R. (2018). Influence of the anisotropy of the material on the pore water pressures within the downstream shell of a rockfill dam in overtopping scenario. In *Protections 2018. 3rd International Conference on Protection against Overtopping. United Kingdom (en revisión)*.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., Toledo, M. Á., Morán, R., & Campos, H. (2013). Numerical and experimental study of overtopping and failure of rockfill dams. *International Journal of Geomechanics*, 15(4), 04014060.
- Larese, A., Rossi, R. & Oñate, E. (2015). Simulation of the beginning of failure in rockfill dams caused by overtopping. *Dam Protections Against Overtopping and Accidental Leakage*, 89; CRC Press.
- Morán, R. (2013). Mejora de la seguridad de las presas de escollera frente a la percolación accidental mediante protecciones tipo repié. España (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, <http://oa.upm.es/14833/>).
- Odendaal, W. & Van Zyl F. C. (1979). Failure of a cofferdam due to overtopping. XII ICOLD Congress on Large Dams, (Vol. 49, pp. 141-156).
- Ricoy, L. F., Toledo, M. Á., & Morán, R. (2017). A model for the analysis of the structural failure of the clay core in rockfill dams due to overtopping. In *Protections 2016: 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping*. Colorado State University. Libraries. <http://hdl.handle.net/10217/179801>
- Toledo, M.Á. (1997a). Presas de escollera sometidas a sobrevertido. Estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa. España. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid; <http://oa.upm.es/730/>).
- Toledo, M. Á. (1997b) Embankment dams slip failure due to overtopping. "Transactions of the 19th International Congress on Large Dams". pp. 317 -330. ISBN 10-6048-253-958.

- Toledo, M. Á., Moreno, V.M. & Mateos, C. (2004). Physical and mathematical modelling of embankment dam failure due to overtopping. *"International seminar on stability and breaching of embankment dams"*, Oslo. EBL kompetanse. ISBN: 8243605142. NO-OsNB (990502099654702202)
- Toledo, M.Á., Alves, R.M., & Morán, R. (2015). Structural failure of the clay core or the upstream face of rockfill dams in overtopping scenario. *Dam Protections Against Overtopping and Accidental Leakage*, 89; CRC Press.
- Utrillas, J.L., Soriano, A. & Sánchez, F.J. (2000). La presa de Tous. España. MOPTyMA.