

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## INVESTIGACIÓN MEDIANTE MODELO FÍSICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE ESCOLLERA ANTE UN VERTIDO SOBRE CORONACIÓN

Miguel Ángel Toledo<sup>1</sup>,  
Cristina Lechuga<sup>2</sup>,  
Rafael Morán<sup>3</sup>.

*RESUMEN: En esta comunicación se describen los trabajos que se están realizando en el marco del Proyecto XPRES, cuyo objetivo es caracterizar el proceso de rotura de las presas de escollera por sobrevertido y definir criterios para diseñar protecciones eficaces. Se esboza el planteamiento general del proyecto, se detalla el plan de ensayos y se resumen los resultados parciales y conclusiones preliminares obtenidas por el momento.*

---

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero de Caminos. ETS de Ingenieros de Caminos. UPM. [matoledo@caminos.upm.es](mailto:matoledo@caminos.upm.es)

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX.

<sup>3</sup> Ingeniero de Caminos. ETS de Ingenieros de Caminos. UPM. [rmoran@caminos.upm.es](mailto:rmoran@caminos.upm.es)

# 1. INTRODUCCIÓN

Las presas de materiales sueltos en general, y las presas de escollera particularmente, son muy vulnerables frente al paso de agua sobre su coronación, fenómeno que denominaremos “sobrevertido”. Los criterios de seguridad hidrológica han sido revisados resultando más restrictivos en la actualidad, lo que está obligando a la comunidad científico-técnica a realizar un esfuerzo por comprender en primer lugar un fenómeno que es complejo para poder obtener conclusiones de orden práctico que permitan analizar con mayor rigor el estado real de la seguridad de las presas, y definir criterios para proyectar protecciones seguras y económicamente abordables.

En esta línea, los objetivos del proyecto XPRES son:

- 1) Comprender cómo afectan al proceso de rotura y a la seguridad de la presa los distintos parámetros implicados.
- 2) Caracterizar el proceso de rotura.
- 3) Desarrollar un modelo matemático eficaz para el análisis de la rotura.
- 4) Definir criterios para el diseño de protecciones eficaces.

Se está estudiando la rotura de presas cuyos espaldones estén formados por material granular no cohesivo, típicamente presas de escollera, entendiendo el término escollera en sentido amplio, excluyendo los materiales no drenantes con un contenido de finos apreciable. La rotura de presas de materiales cohesivos responde a mecanismos completamente diferentes.

El estudio se centra en la denominada “fase de inicio de la brecha”, es decir, desde el momento en que se inicia el sobrevertido hasta que la rotura empieza a afectar al elemento impermeable, núcleo arcilloso o pantalla. La rotura del elemento impermeable responde a fenómenos físicos completamente diferentes de los responsables de la rotura del espaldón granular, y deberán ser objeto de un estudio aparte. El estudio de la “fase de inicio de la brecha” aportará información esencial con respecto a la seguridad hidrológica de la presa, el caudal de rotura, el tiempo de rotura y los criterios de diseño de protecciones.

## 2. PLANTEAMIENTO GENERAL

El estudio se basa esencialmente en la realización de ensayos en modelo físico. Algunos de ellos se considerarán prototipos, y otros pretenderán modelar a escala el prototipo correspondiente. La dificultad mayor del estudio reside en el complejo efecto de escala, al que se prestará especial atención. Una adecuada solución de este problema permitirá la correcta aplicación práctica de los resultados obtenidos. Otro aspecto importante es la consideración del ángulo de rozamiento de la escollera, parámetro esencial para el análisis de los deslizamientos sucesivos que se producen habitualmente durante el proceso de rotura. También a esto se dedicará una atención especial.

La realización de modelos físicos se verá completada con la utilización de modelos numéricos. CIMNE se está encargando de la modelación de la rotura por el método de elementos finitos y partículas (PFEM).

Los trabajos realizados hasta el momento han permitido valorar la influencia de algunos de los parámetros considerados fundamentales, pero hay algunos otros cuya influencia resultará presumiblemente importante y que no han sido analizados hasta el momento. La adecuada comprensión del grado de influencia de los diversos parámetros implicados es fundamental para valorar el peligro de fallo, comprender el proceso de rotura y definir criterios prácticos de análisis y diseño.

### Geometría

Los parámetros geométricos más significativos son:

- . Talud
- . Altura de presa
- . Ancho de coronación
- . Posición del elemento impermeable
- . Altura del elemento impermeable

De todos ellos, el TALUD es el parámetro fundamental, pues resulta determinante en el deslinde del papel relativo que juegan los dos mecanismos básicos de rotura: el arrastre de partículas y el deslizamiento en masa.

### Material

El material queda caracterizado por los siguientes parámetros:

- . Granulometría (tamaño, uniformidad y continuidad)
- . Tipo de árido (anguloso o rodado)
- . Forma (redondeado, alargado...)

Como consecuencia de lo anterior quedan definidos dos parámetros esenciales: PERMEABILIDAD y ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO. Ambos tienen un papel preponderante en todo el proceso de rotura.

A efectos del análisis del proceso de rotura se considera esencial, además de los dos antes indicados, el TAMAÑO de la escollera superficial, lo que no significa en modo alguno que los demás parámetros tengan una influencia pequeña. De hecho algunos de ellos tienen una influencia notable. El tamaño de la escollera superficial influye de forma decisiva en que el inicio de la rotura se produzca por arrastre de partículas o por deslizamiento en masa.

### Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos principales son:

- . Hidrograma de sobrevertido (caudal punta, duración y forma)
- . Niveles aguas arriba y aguas abajo
- . Aireación del movimiento en superficie sobre el talud de la presa

Aunque el CAUDAL PUNTA de sobrevertido es un parámetro fundamental, no cabe duda de que la duración del sobrevertido tiene una influencia apreciable

en el proceso de rotura. Los ensayos realizados demuestran que para alcanzar el umbral máximo de efecto destructivo correspondiente a un caudal de sobrevertido es preciso mantener dicho caudal durante un tiempo apreciable. Los ensayos se han realizado hasta el momento por escalones de caudal mantenidos hasta el umbral máximo de rotura, lo que queda del lado de la seguridad, pero una correcta evaluación de la seguridad de la presa exigiría tener en cuenta la duración del sobrevertido.

#### Parámetros constructivos

Como parámetro constructivo más destacable debe señalarse el siguiente:

- . Energía de compactación

La ENERGÍA DE COMPACTACIÓN es un parámetro fundamental por su influencia en la resistencia a cortante de la escollera y por la anisotropía que introduce en el material, producto del proceso de compactación.

### **3. PLAN DE ENSAYOS**

La realización de ensayos en modelo físico se ha estructurado en diversas campañas, según se describe y justifica a continuación.

#### CAMPAÑA PREVIA

La campaña previa incluye todos los ensayos necesarios para abordar la campaña general en condiciones óptimas, extrayendo de ella la máxima cantidad de información fiable. Comprende esta campaña previa dos tipos de ensayos:

#### Instalaciones y efecto de la aleatoriedad

Los ensayos se han realizado en las diversas instalaciones disponibles en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEDEX en adelante) y en el Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos de la UPM (UPM en adelante). A continuación se resumen sus dimensiones, indicando en primer lugar el ancho y luego la altura.

En CEDEX:

- . Canales pequeños, de 40x60 cm<sup>2</sup> de sección
- . Canal mediano, de 100x110 cm<sup>2</sup> de sección
- . Canal grande, de 150x140 cm<sup>2</sup> de sección

En UPM:

- . Canales pequeños, de 30x40 cm<sup>2</sup> de sección
- . Recinto de ensayo de 250x130 cm<sup>2</sup> de sección

En una comunicación aparte se describen con detalle las instalaciones y técnicas de ensayo utilizadas en la UPM.

Por una parte, es necesario saber en qué medida serán comparables los resultados de ensayos de presas de la misma altura realizados en instalaciones de

distinta anchura y con distintos sistema de alimentación y control. Además, es preciso determinar si el mismo ensayo realizado varias veces en la misma instalación y en idénticas condiciones arrojará resultados “similares”, es decir, conocer y acotar el efecto de la aleatoriedad en un fenómeno tan complejo como el que se está estudiando.

Ambos objetivos se han cubierto realizando un ensayo en condiciones idénticas tres veces en cada una de las instalaciones mayores (canales media-no y grande de CEDEX y recinto de ensayo de UPM), con 1 m de altura de presa, y otros tres ensayos también en idénticas condiciones en cada una de las instalaciones menores (canales pequeños de CEDEX y UPM), con una altura de presa de 30 cm.

#### Influencia de los parámetros implicados

Antes de realizar ensayos costosos y que requieren un tiempo dilatado de preparación, conviene utilizar los canales pequeños (tanto de CEDEX como de UPM) para realizar ensayos rápidos y económicos que permitan apreciar la mayor o menor influencia de los distintos parámetros, tanto geométricos como del material, hidráulicos o constructivos.

#### CAMPAÑA GENERAL

Se trata de la campaña principal, con ensayos de tamaño grande (1 m de altura de presa), control detallado y variación sistemática de los parámetros principales. Se han elegido los parámetros esenciales siguientes: talud de aguas abajo, tamaño de partícula y posición de la pantalla. Si bien está claro que los dos primeros son verdaderamente esenciales, la posición de la pantalla (externa o núcleo interno) puede resultar de importancia menor. La altura de presa se fija en 1 m. Se combinarán los siguientes valores de los parámetros elegidos:

- . Pantalla: sin pantalla, núcleo interno y pantalla externa
- . Talud: 1,5 – 2,2 – 3,0
- . Tamaño de partícula: 7 – 15 – 30 mm

Con ello, el número de ensayos a realizar es de 27, que resulta abordable a pesar del tamaño del ensayo. Algunos de los ensayos se repetirán variando los diversos parámetros que no se varían sistemáticamente, para conocer su efecto en ensayos de gran tamaño y control estricto.

#### CAMPAÑAS ESPECÍFICAS

La limitación del número de ensayos de la campaña general, condicionado por el tiempo y el presupuesto necesario para realizar ensayos de tamaño importante (1 m de altura de presa), aconseja realizar campañas específicas que aborden los aspectos no esclarecidos en la campaña general, y que son importantes para un adecuado tratamiento del problema. La limitación de la campaña al estudio de un solo parámetro permite realizar el análisis con un número relativamente reducido de ensayos. En principio, se consideran las siguientes campañas específicas:

- . Efecto de escala

- . Características del material (tamaño, granulometría, tipo y grado de compactación)
- . Evolución de caudales
- . Estabilidad de partículas
- . Anchura de coronación
- . Diseño de protecciones

La adecuada consideración del EFECTO DE ESCALA es esencial para aplicar los resultados del estudio a presas reales. Ya se mencionó que esta es la mayor dificultad del trabajo. Por eso se considera de la mayor importancia esta campaña específica, que incluirá la realización de ensayos a distintas escalas en las diversas instalaciones disponibles. Además, se dispondrá de un recinto de ensayo que permitirá ensayar presas de hasta 3 ó incluso 4 m de altura en la nave del Centro de Estudios Hidrográficos. La presa ensayada en esta instalación servirá como prototipo para análisis del efecto de escala y aumentará considerablemente la fiabilidad de las conclusiones obtenidas.

También es esencial la campaña de DISEÑO DE PROTECCIONES, que permitirá definir criterios para diseñar protecciones eficaces y de bajo costo que podrán aplicarse a multitud de casos de presas existentes con capacidad insuficiente de su aliviadero, y también al diseño de presas de nueva planta más seguras.

En todas las campañas específicas se prevé utilizar canales de diverso tamaño, realizando un mayor número de ensayos en los canales pequeños.

#### **4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES PRELIMINARES**

El tiempo transcurrido desde el inicio del proyecto se ha dedicado fundamentalmente a la puesta a punto de las instalaciones y procedimientos de ensayo. También se ha realizado la campaña previa de ensayos, una parte de la campaña general y una primera fase de la campaña especial de diseño de protecciones. Igualmente está en ejecución la campaña especial para el estudio del efecto de escala. Aunque la mayor parte de las conclusiones son preliminares y están sujetas a revisión una vez que se completen todos los ensayos previstos, se resumen a continuación las más relevantes.

##### CAMPAÑA PREVIA

De los ensayos realizados pertenecientes a esta campaña se derivan dos conclusiones fundamentales: a) El efecto de la aleatoriedad en el proceso de rotura es moderado, y por tanto es factible abordar el estudio del proceso con un número de ensayos razonable. Por otra parte, es también posible abordar la modelación matemática mediante métodos deterministas; b) Los caudales unitarios, por unidad de longitud de la coronación de la presa, necesarios para producir la rotura son en las instalaciones del CEDEX del orden de un 25% mayores que en las instalaciones de la UPM. Cabe atribuirlo en principio a la menor anchura del canal utilizado en el CEDEX, si bien este aspecto debe analizarse con mayor profundidad.

## CAMPAÑA GENERAL

Queda todavía un número elevado de ensayos por realizar pertenecientes a esta campaña. No obstante, podemos adelantar algunas conclusiones de carácter cualitativo:

- a) El mecanismo de rotura predominante se identifica con claridad en los taludes de aguas abajo extremos. Para talud 1,5 la rotura se produce por deslizamiento en masa. Se trata de deslizamientos de escasa profundidad sucesivos que comienzan en el pie de presa y ascienden a medida que lo hace la línea de saturación. La rotura afecta a la presa en toda su anchura. En cambio, para talud 3, la rotura se produce predominantemente por arrastre de partículas, concentrándose en una serie de canales de erosión que progresan de pie de presa a coronación. Para el talud 2,2 el comportamiento es intermedio, y denota una participación más equilibrada de los dos mecanismos de rotura.
- b) La modelación matemática del proceso de rotura debe, por tanto, considerar el modo en que se combinan los dos mecanismos de rotura básicos: arrastre de partículas y deslizamiento en masa, aspecto que está siendo analizado a partir de los resultados que se van registrando en los sucesivos ensayos. El papel fundamental del en ese reparto de protagonismo del talud se aprecia con claridad. Falta por esclarecer el papel desempeñado por el material de la presa: su tamaño y granulometría.
- c) El deslinde del papel jugado por cada uno de los dos mecanismos de rotura puede realizarse utilizando parámetros indirectos completamente objetivos y que se consideran muy indicativos: número de zonas de rotura y, especialmente, área de la zona de aguas abajo de la presa cubierta por los depósitos en relación a una superficie de referencia.
- d) El caudal de rotura es independiente del número de escalones de caudal utilizados en el ensayo, siempre que cada escalón de caudal se mantenga el tiempo suficiente para que el proceso de rotura se detenga. Este tiempo es bastante variable, entre 10 y 60 minutos, lo que dificulta la realización del ensayo y limita el número de escalones de caudal.

## CAMPAÑA ESPECIAL: DISEÑO DE PROTECCIONES

La primera fase de esta campaña se ha completado y, por tanto, puede aportarse una información más completa, restringida por el espacio disponible en esta comunicación. Se han realizado 7 ensayos con modelos físicos de 1 m de altura en el recinto de ensayo de la UPM. Los modelos se han considerado prototipos. El primero es una presa sin protección con taludes 1,5 aguas arriba y aguas abajo. Los 6 restantes tienen una protección formada por un repié de escollera y en ellos se combinan dos alturas de protección: del 40% y del 60% de la altura de la presa, con tres taludes de aguas abajo: 1,5; 2,2 y 3,0. Tanto el material de la presa como el de la protección se han mantenido invariables en esta primera fase. Se trata de materiales granulares de granulome-

tría uniforme y tamaño de 35,0 mm el material de la presa y 45,5 mm el de la protección.

Las conclusiones principales se pueden resumir en los siguientes epígrafes:

- a) Las protecciones ensayadas permiten mejorar sensiblemente la estabilidad frente al deslizamiento en masa provocado por el sobrevertido en resas de escollera.
- b) Sólo se admitió el deslizamiento dentro del material de protección por lo que el ángulo de rozamiento movilizado ha sido siempre el de ésta última. El ensayo es representativo por tanto siempre que el ángulo de rozamiento de la presa sea tal que no lleguen a formarse círculos de rotura en su interior.
- c) Los volúmenes de material de protección por metro lineal necesarios para conseguir un nivel de daños moderado y resistir caudales que romperían la presa en caso de “no protección” están en el rango del 10 al 15% de los volúmenes de la presa, también por metro lineal. Con superficies entre el 5 y el 10% se llegaba a un nivel de protección menor, con resistencia de caudales unitarios de entre el 60% y el 80% del caudal de rotura de la presa.
- d) La altura de la protección en el rango de variación ensayado tiene una influencia menor en comparación con el talud de la protección.
- e) El talud 1,5 ha ofrecido resultados muy pobres mientras que el talud 3,0 se ha comportado como un talud estable, incluso en condiciones de saturación completa de la protección. El talud 2,2 no llega a ser estable en condiciones de saturación aunque como es lógico mejora su comportamiento frente al talud 1,5. Sería interesante tantear taludes intermedios entre 2,2 y 3,0 para localizar el mínimo talud estable en condiciones de saturación completa.
- f) La solución más eficiente de los casos ensayados ha sido: altura de protección del 40% y talud 3,0. Garantiza un alto nivel de protección con una sección de protección moderada (12% de la sección de la presa).
- g) El buen ajuste obtenido ente los modelos físicos y los modelos matemáticos justifica la utilización del método de Bishop y la ley de Darcy para realizar un estudio paramétrico amplio con el objeto de caracterizar el efecto de las diversas variables implicadas.

La fase inicial de la campaña especial de diseño de protecciones ha constituido el trabajo de investigación de Rafael Morán para la obtención del título de suficiencia investigadora.

## 5. INVESTIGACIONES FUTURAS

Se trata de un proyecto de investigación en marcha y, por consiguiente, en el futuro inmediato se continuará con los trabajos descritos en esta comunicación. Además de eso, se prevé realizar la realización de un proyecto complementario para el estudio del inicio del movimiento combinando la modelación física con la modelación numérica 3D partícula a partícula.



## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia, cuyo proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D 2007 2011 con código de identificación BIA2007 68120 C03 021 y titulado “Caracterización de la rotura de las presas de escollera por sobrevertido y desarrollo de criterios para evaluar la seguridad del conjunto presa-área afectada durante una avenida” es el marco de actuación para este trabajo de investigación.

Al personal del laboratorio de hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPM.

Al laboratorio de puertos de la ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPM, en la persona de Vicente Negro, por facilitarnos parte de sus instalaciones para el acopio de material de ensayo.