

Rotura de presas de escollera sometidas a sobrevertido. Movimiento incipiente de las partículas

BJÖRN SENNERFORS (*), ANDRÉS DIE MORÁN (**), MIGUEL ÁNGEL TOLEDO (***)

RESUMEN Los autores han llevado a cabo parte de la primera de dos fases de ensayo previstas. Aquí se presentan los resultados parciales obtenidos hasta el momento. Se ha utilizado una cámara de alta velocidad para estudiar el movimiento incipiente de partículas y el proceso de erosión del talud de aguas abajo durante un sobrevertido. El objetivo de la primera fase se ha conseguido: distinguir los diferentes mecanismos que participan en la rotura, pero es necesario realizar más ensayos para establecer unas conclusiones definitivas.

FAILURE OF ROCKFILL DAMS SUBJECTED TO THROUGHFLOW AND OVERFLOW. INCIPIENT MOTION OF PARTICLES

ABSTRACT *The authors have carried out part of the first of two test phases and the results are presented herein. A high speed camera has been used to study the incipient motion and the erosion progress on the downstream slope. The objective of this first phase: to distinguish between the different failure mechanisms, has been achieved, but more tests are needed to obtain final conclusions.*

Palabras clave: Sobrevertido, Movimiento incipiente, Filtración, Escollera, Estabilidad, Erosión.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre presas de escollera sometidas tanto a sobrevertido como a flujo a través del cuerpo de las mismas se centra principalmente en presas con protección del talud de aguas abajo. Algunos estudios y programas de ensayos relativos al arrastre de la escollera no han considerado el efecto del flujo a través de la misma, aunque el trabajo realizado por Mishra (1998) [2] es interesante, pues considera la complejidad hidráulica de la denominada zona de transición [3].

El flujo interno de agua juega un papel esencial en la estabilidad de cada partícula y debe considerarse al analizar su estabilidad. Hansen (1992) [1] investiga el flujo a través del cuerpo de la presa y las fuerzas que actúan sobre las partículas situadas en la zona de emergencia. Sin embargo, en su investigación emplea una malla de protección que impide que la escollera se mueva de su posición. La campaña ejecutada por H.M. Kjellesvig en 2002 [4], permitió estudiar el movimiento inicial en modelos cuyos taludes de aguas abajo no tienen protección contra la erosión, sometidos tanto a sobrevertido como a flujo a través de la escollera.

La presente investigación analiza el movimiento inicial, distinguiendo entre distintos mecanismos de rotura en una presa de escollera sin ningún tipo de sistema de protección contra la erosión. Para ello, se emplea un sistema de capta-

ción de imágenes de alta velocidad para estudiar con detalle el movimiento inicial de las partículas situadas en el talud aguas abajo. Los resultados presentados proceden de 6 de los 18 ensayos planificados para esta fase inicial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. EQUIPOS

El programa de ensayos se realiza en el Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Se emplea un canal con paredes de vidrio de 30,5 cm de ancho y 40 cm de alto, conectado con un depósito de agua de nivel constante. El nivel aguas abajo se ajusta con una compuerta al final del canal.

2.2. SISTEMAS DE MEDIDA

El caudal se mide sobre un vertedero de cresta delgada instalado al principio de cada canal. Los niveles de agua se miden con un limnómetro, una cinta de medida colocada en la pared del canal y, en un caso, con un medidor ultrasónico. Se ha dibujado sobre el cristal del canal una malla de 2x2 cm que permite al observador registrar la posición de la línea de saturación en el cuerpo de la presa, así como el punto de salida del agua al talud de aguas abajo.

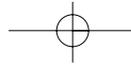
Se dispone, perpendicularmente al talud de aguas abajo del modelo, de un sistema de captación de imágenes de alta velocidad consistente en una cámara digital de tipo Basler A602f, con capacidad para registrar hasta 100 fotogramas por segundo.

Adicionalmente, se dispone de una cámara de vídeo digital colocada de manera oblicua al canal (aproximadamente 30°), cubriendo la vista del talud de aguas abajo.

(*) M. Sc. Ing., Doctorando. Universidad Politécnica de Madrid.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

(***) Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Madrid.



ROTURA DE PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A SOBREVERTIDO. MOVIMIENTO INCIPIENTE DE LAS PARTÍCULAS

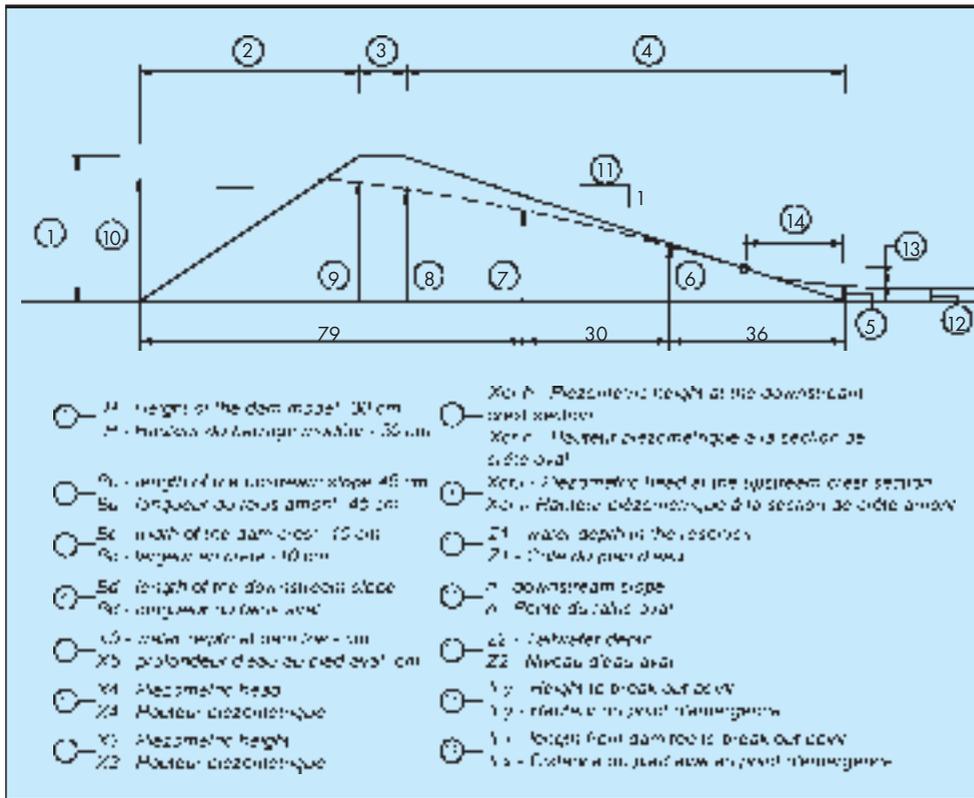


FIGURA 1. Configuración del modelo y puntos de medida.

2.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Los modelos tienen una altura de 30 cm con un ancho de coronación de 10 cm y un talud aguas arriba de 1V:1,5H en todos los casos. Se ha asegurado que la superficie del talud de aguas abajo presente un aspecto relativamente uniforme sin presencia de partículas sobresalientes. Los taludes de aguas abajo que se adoptan en los ensayos se recogen en la Tabla 1.

Los ensayos se ejecutan incrementando los caudales a intervalos de 0,5 l/s. Cuando se alcanza el régimen permanente, se registran las medidas de acuerdo con los puntos establecidos en la Figura 1. Asimismo, se registra cualquier otro movimiento observado visualmente durante el ensayo. La toma de imágenes mediante el sistema de alta velocidad se concentra en los periodos de actividad, aproximadamente

1,5 a 2 minutos por intervalo. Los incrementos de caudal se suceden hasta que se produce la rotura de la coronación de la presa.

2.4. MATERIALES

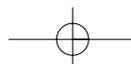
Se ha empleado árido machacado de tres granulometrías distintas. El tamaño medio de la partícula, D_{50} , y el coeficiente de uniformidad, C_u , se presentan en la Tabla 1. La forma de las partículas es mayormente esférica. Para caracterizar la forma se emplea el diagrama Zingg [1].

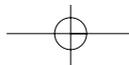
3. RESULTADOS

En esta sección se presenta una selección de las observaciones más relevantes de los ensayos (Tabla 2). El intervalo de

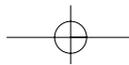
Prueba	Material, D_{50} [mm]	C_u	Talud de aguas abajo	Nivel de agua, aguas abajo h_{NW} [cm]
1	28	1,4	1V:3H	7-15
2	28	1,4	1V:2H	3,4-17,5
3	28	1,4	1V:1,5H	3-7
4	20	1,6	1V:3H	2,8-8
5	20	1,6	1V:2H	2,1-7,3
6	20	1,6	1V:1,5H	1,6-5,3

TABLA 1. Programa de ensayos.




ROTURA DE PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A SOBREVERTIDO. MOVIMIENTO INCIPIENTE DE LAS PARTÍCULAS

N°	Q [l/s]	Observaciones
1	1,5	Mientras se alcanza el régimen uniforme para 1,5 l/s, no se registra ningún movimiento. Durante el incremento a 2,0 l/s se movió una partícula.
	5,5	Movimientos observados, aunque de varias partículas. Algunas de la coronación y otras de la zona de emergencia. El talud de aguas abajo está totalmente saturado.
	8,0	El perfil de agua en la sección de X4 es bien definido, mientras el de la sección X3 es poco definido. Algunas partículas vibran, otras se mueven.
	9,0	Varias partículas se mueven en el centro del talud. Presencia de burbujas de aire en el flujo.
	11,0	Varias partículas se salen e impactan contra otras, causando un reacomodo de partículas aguas abajo y haciendo que el nivel del embalse descienda a Z1=33,5. El perfil de agua es poco definido en la sección X4.
	15,0	El movimiento de varias partículas hace que el nivel de embalse descienda. El área de coronación pierde material formándose un tramo horizontal desde la sección X4, de 10 a 11 cm de espesor.
	17,0	Más partículas en la coronación se salen y desplazan hasta el tramo horizontal. La posición del nivel superior de la coronación cambia a 2,5 cm por debajo de la coronación inicial 4 cm aguas arriba respecto a Xcr,i.
2	3,5	Antes de alcanzar el régimen permanente, se registra el movimiento de una partícula cerca de la sección X4.
	4,0	Movimiento de partículas en el pie de presa, en la zona de emergencia.
	6,5	Movimiento en masa en el centro del talud. El talud aguas abajo se encuentra totalmente saturado.
	9,0	La coronación falla. Las partículas de la coronación se reacomodan a unos 10 cm aguas arriba respecto a la sección X3. El nivel máximo de Z1 registrado antes de la rotura es de 32,5 cm.
3	1,5	3 piedras se salen y caen al fondo del canal.
	3,0	Una partícula se mueve cerca del pie de presa.
	3,5	En el nivel de 24,0 (Z1) se registra un movimiento en masa de varias piedras cerca del pie de presa.
	4,0	Movimiento mayor de piedras en la zona de emergencia.
	5,6	Para Z1=29,3 surge un movimiento importante.
	7,0	Al alcanzar Z1=31,2 la presa sufre un sobrevertido total y se rompe. El ensayo se interrumpe.
4	1,5	Una partícula se mueve en el pie de presa.
	2,0	Varias partículas se mueven en el pie de presa.
	4,0	Ninguna observación. El nivel de agua está cerca de la coronación de la presa.
	4,5	Una partícula vuelca 90° respecto al talud.
	5,5	Movimiento de partículas individuales en la sección X3.
	7,0	Con Z1 a 32,8 varias partículas impactan contra el pie, dejando un "hueco" en el centro del talud.
	9,5	A las 10.32, movimiento en el talud que deja un "hueco" en la sección X3 y algo de la coronación.
	13,5	A las 10.54, rotura completa antes de poder efectuar las mediciones.
5	1,5	Movimiento en masa en el pie de la presa.
	2,5	Para Z1=21,3 algunas partículas se mueven en el pie de la presa. Para Z1= 22,4 algunas partículas se mueven en la sección X4.
	4,0	Algunas partículas se mueven. Se observa un movimiento de varias partículas produciéndose un flujo "escalonado".
	5,5	Rotura parcial con Z1=30,9.
	7,5	Falla la coronación de la presa.
6	1,0	Movimientos de partículas individuales se registran en el pie de la presa.
	2,0	Movimiento registrado en el pie de la presa. Algunas partículas en la parte derecha se mueven. La longitud de la zona de emergencia se mantiene constante respecto al intervalo anterior.
	3,0	Se registra movimiento en el pie de presa antes de alcanzar el régimen permanente. Un pequeño escalón se forma a 4 cm aguas abajo de la sección X3. Longitud de cuña unos 23 cm.
	5,0	Para Z1=29,54 se observa un pequeño movimiento en masa, comenzando a unos 12 cm aguas arriba de la sección X3. La forma de la cuña cambia.
	6,0	Rotura de la presa. No se pueden registrar medidas antes de la rotura, la cual debe analizarse utilizando la cámara.

TABLA 2. Observaciones durante los ensayos.


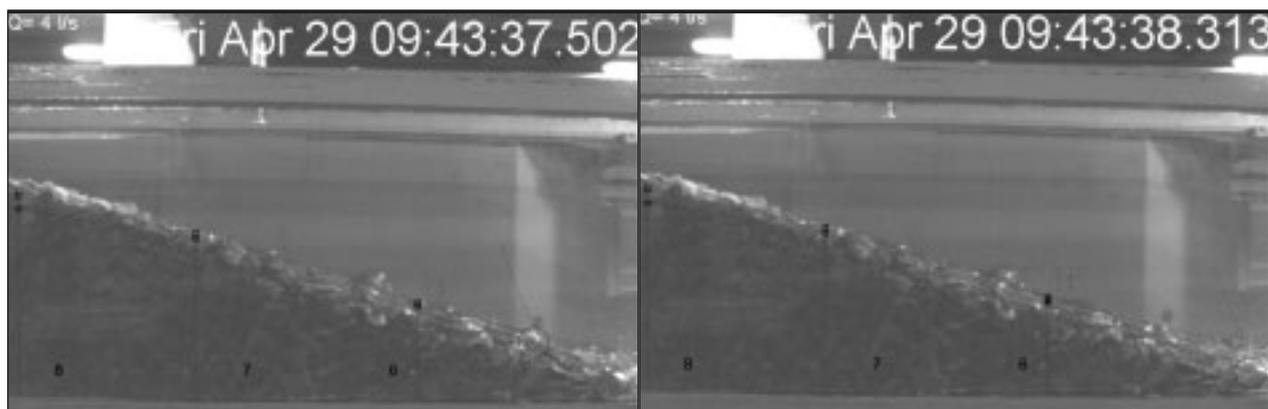

ROTURA DE PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A SOBREVERTIDO. MOVIMIENTO INCIPIENTE DE LAS PARTÍCULAS


FIGURA 2A-B. Movimiento inicial de una partícula y subsiguientes impactos contra una piedra en el pie de la presa. Prueba 4.
a) 29/04/2005. 09:43:37.502. b) 29/04/2005. 09:43:38.313.

caudal adoptado es, como se mencionó con anterioridad, de 0,5 l/s. Para la nomenclatura empleada en esta investigación se remite a la Figura 1.

Un resultado representativo obtenido con el sistema de captación de imágenes se presenta en la siguiente secuencia de fotos que se expone en las Figuras 2 y 3., que corresponde a la prueba 4 para $Q=4$ l/s y prueba 6 para $Q=2$ l/s respectivamente (ver Tabla 2). Estas fotos muestran un movimiento inicial donde las partículas comienzan a moverse, Figura 2a) y finalmente impacta contra otra partícula Fig. 2b). Es difícil distinguir la partícula por lo que ha sido marcado con una cruz en un círculo. En este caso, se produce un ligero reacomodo de las partículas en la zona de emergencia en el pie de la presa, el cual no se aprecia en la foto, ya que se captó con anterioridad al impacto. Fig 3a-b) muestran un deslizamiento típico en el pie de la presa que se puede distinguir comparando las posiciones de las partículas en el pie de la presa de las fotos.

En las citadas figuras, se introduce el perfil piezométrico junto con los valores observados durante los ensayos (nomenclatura en Fig. 1).

4. DISCUSIÓN

El uso del sistema de captación de imágenes de alta velocidad muestra la posibilidad de distinguir entre distintos movimientos de piedras y su evolución, posibilitando la clasificación de diferentes mecanismos de rotura.

Roturas, tanto locales como globales, tanto debido a deslizamientos profundos o someros como a la erosión del talud aguas abajo se han observado en todos los ensayos. Para poder establecer lo que se debe considerar como un deslizamiento, se definió como un movimiento en el que todas las partículas se mueven sensiblemente de forma simultánea. Sin embargo, si no se recurre al sistema de captación de imágenes de alta velocidad, resulta muy difícil determinar si el movimiento ocurre de forma simultánea o si se trata de una secuencia sucesiva de movimientos.

Se han ejecutado dos ensayos por cada talud aguas abajo (ver Tabla 1). Modelos con el mismo talud muestra un comportamiento similar.

En todos los ensayos, como se indica en Figura 3, se observa que las partículas en la parte inferior de la zona de emergencia comienzan a moverse en una fase muy temprana. Esto causa normalmente pequeños reacomodos entre

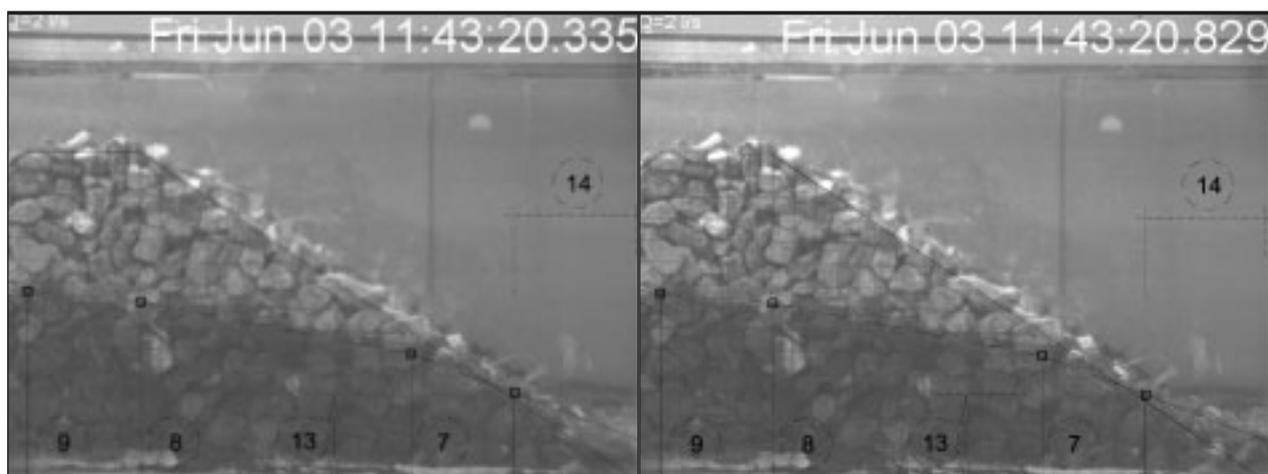
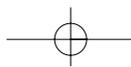


FIGURA 3A-B. Movimiento inicial en el pie de aguas abajo durante la Prueba 6.
a) Situación de estabilidad en el pie de presa. Prueba 6. a las 11.43.20.335
b) subsiguiente movimiento de las partículas en el pie de presa, Prueba 6. a las 11.43.20.829.



las partículas en el área del pie de aguas abajo. Estos reacomodos probablemente hubiesen sido pequeños deslizamientos someros si el tamaño medio, D_{50} , fuese inferior. Esto se observa en ensayos paralelos ejecutados dentro del presente programa de investigación en los que se emplea material más fino [7]. Parece que el tamaño juega un papel esencial en el comportamiento durante el inicio de la rotura.

Por lo general, se ha observado que partículas individuales giran 90° respecto al talud y son arrastradas por el flujo, rodando hacia el pie de la presa, y que en algunas ocasiones impactan contra otras partículas. La Figura 2 muestra este tipo de impacto, el cual, en algunas ocasiones, produce más movimientos de otras partículas causando así una cadena de movimientos sucesivos de partículas aisladas.

El talud más tendido 1V:3H, tal y como han informado varios autores, [1], [7], es estable frente al deslizamiento en masa y la erosión del talud tiende a caracterizarse como un flujo con perfil escalonado. Esto ha sido informado también por Aberle & Smart [6] y Linford y Saunders [8]. Este fenómeno, aunque no tan pronunciado, podía observarse en taludes menos tendidos 1V:2H y 1V:1,5H.

Los ensayos con taludes de 1V:2H y 1V:1,5H presentan un comportamiento similar en lo que se refiere al movimiento inicial y el proceso de erosión de la presa. El progreso de la rotura en estos casos era más rápido y la rotura definitiva casi instantánea.

Se destaca que todo movimiento inicial y deslizamientos someros se registran debido al flujo a través de la presa, lo que indica la importancia de la filtración en la estabilidad global del talud aguas abajo y en las partículas individuales.

En esta fase, la investigación se encuentra todavía en una fase muy temprana y es todavía pronto para sacar conclusiones definitivas respecto a los distintos mecanismos de rotura. Sin embargo, se puede concluir que la técnica empleada en los ensayos permite a los autores distinguir entre los distintos mecanismos.

5. RESUMEN

Los autores han ejecutado la primera parte de ensayos y los resultados se presentan en este artículo. Se ha empleado un sistema de captación de imágenes de alta velocidad para estudiar el movimiento inicial y el progreso de la erosión en el talud aguas abajo. Se ha logrado el objetivo de esta primera fase de distinguir entre los diferentes mecanismos de rotura con el método descrito. Sin embargo, aún no se pueden presentar conclusiones definitivas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean transmitir su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia, que financia la presente investigación. (BIA203-09631-CO2-02). Adicionalmente, el primer autor desea agradecer también a TYPESA su contribución financiera y apoyo.

7. REFERENCIAS

- [1] Hansen, D.: The behaviour of flowthrough rockfill dams. In partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Ottawa. Canada. 1992.
- [2] MISHRA, S. K, Riprap design for overtopped embankments. In partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad del Estado de Colorado, Fort Collins, Colorado. UMI Dissertation services, 48106-1346. 1998.
- [3] Li, B and GARGA, V.K.: Theoretical Solution for seepage flow in overtopped rockfill. ASCE. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 124, No 2, Feb 1998.
- [4] Kjellesvig, H.M.: Dam Safety. The passage of floods that exceed the design flood. NTNU Trondheim Norwegian University of Science and Technology. Dr. Ing. Thesis 2002:84. Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología IVB Report B2-2002-5. 2002.
- [5] Toledo, M.A., Die Moran, A., Pisfil, M., "Initiation phase of rockfill dams breaching by overtopping", Q86, **R32**. 22 Congreso de Grandes Presas, Barcelona, Junio 2006.
- [6] Aberle, J. & Smart, G.M. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. International Association of Hydraulic Engineering and Research. Journal of Hydraulic Research Vol 41, No3, (2003), pp 259-269
- [7] Li, B.: Flowthrough and overtopped rockfill dams. A dissertation submitted to school of graduates studies, Dept. of Civ. Engrg. Ottawa Univ, Canada K1N6N5. ISBN 0-315-85780-3.1995.
- [8] Linford, A. & Saunders, D.H.:A hydraulic investigation of through and overflow rockfill dams. The British Hydro-mechanics Research Association. RR 888. March 1967.