

# Estudio de la rotura de presas de material granular grueso uniforme no cohesivo sin elemento impermeable. Fase de inicio

H. Campos, R. Morán & M.A. Toledo Municio

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España

**RESUMEN:** Se presentan los resultados obtenidos mediante modelación física de la rotura de presas de escollera por sobrevertido, los trabajos se enmarcan en el proyecto de investigación del Plan Nacional de I + D 2007/2011 denominado XPRES. Los ensayos en modelo físico han servido para evaluar el papel de una serie de parámetros como la altura de presa  $H$ , el talud aguas abajo  $N$ , y el diámetro medio de la escollera  $D_{50}$ . El material utilizado en estos ensayos tiene las características de un material granular grueso uniforme no cohesivo. En este proyecto participan de forma coordinada la UPM el CEDEX y el CIMNE.

**ABSTRACT:** We report the results obtained by physical modeling of rockfill dam failure due to overtopping, the works was framed in the National Research Program for I + D called XPRES 2007/2011. The physical model tests were used to assess the role of a number of parameters such as dam height  $H$ , the downstream slope  $N$ , and mean diameter  $D_{50}$ . The material used in these trials was noncohesive homogeneous. This project has been coordinated between the UPM, CEDEX and CIMNE.

## 1 INTRODUCCIÓN

Cuando se inicia el sobrevertido en una presa de escollera, la presa es capaz de evacuar un cierto caudal sin presentar daños apreciables en el espaldón de aguas abajo. Una vez superado ese caudal se iniciará la rotura de la presa con pequeños desplazamientos a pie de presa que irán creciendo hasta llegar a la coronación de aguas abajo. En este instante consideraremos que la fase de inicio de la rotura se ha completado. Una serie de ensayos en modelo físico se han llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.I. de Caminos de la UPM para estudiar el proceso de rotura de las presas de escollera y desarrollar criterios de diseño de protecciones eficaces. En esta comunicación se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de roturas de presas sin elemento impermeable.

### 1.1 Objetivos

El objetivo de este programa de ensayos ha sido:

- Identificar los mecanismos de rotura en una presa de escollera por sobrevertido.
- Determinar los parámetros más importantes en el proceso de rotura.
- Conocer la evolución del proceso rotura.

- Conocer el caudal de inicio de la rotura.
- Conocer el caudal de rotura de la presa, entendido como aquél que, mantenido un tiempo suficiente, completa la fase de inicio de la rotura, hasta que ésta alcanza la coronación de la presa y por tanto amenaza el elemento impermeable.

La figura 1 muestra las variables principales que miden el avance de la rotura en la presa.

Donde:

- $A$ : Avance de la pendiente inferior de la brecha desde el pie de aguas abajo.
- $B$ : Avance total de la brecha desde el pie de aguas abajo.
- $H$ : Altura de la presa.
- $h_u$ : Nivel de agua aguas arriba.
- $h_b$ : Nivel de agua aguas abajo.
- $M$ : Talud de aguas arriba.
- $N$ : Talud de aguas abajo.

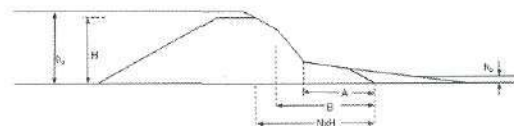


Figura 1. Esquema del avance de la rotura en la presa.

Cuadro 1. Campaña de ensayos.

Ensayo N°	$D_{50}$ (mm)	$H$ (m)	$N$
1	8,2	0,6	1,5
2	8,2	0,6	1,75
3	8,2	0,6	2,5
4	8,2	0,6	2,7
5	12,64	1,0	2,2
6	12,64	1,0	3,0
7	35	1,0	1,5
8	35	1,0	2,2
9	35	1,0	2,5
10	35	1,0	3,0

## 2 PLANTEAMIENTO GENERAL

Se han realizado ensayos en modelo físico de presas de escollera sin elemento impermeable, en los que se ha evaluado el comportamiento de la presa frente a una rotura por sobrevertido. El desarrollo de los ensayos se ha llevado a cabo por escalones de caudal hasta conseguir que la rotura llegue a la coronación. El incremento de caudal se ha realizado cuando la presa se encontraba nuevamente en un estado estacionario. El tiempo establecido para considerar que la presa ya no tiene más movimientos es variable dependiendo de la fase de la rotura en que se encuentre. Los tiempos son más cortos en la etapa inicial y más largos en la etapa final de la rotura. Se han realizado un total de 10 ensayos, manteniendo un talud aguas arriba  $M = 1,5$ ; un ancho de coronación  $C = 0,20$  m y un ancho de presa  $W = 2,46$  m.

Los ensayos se han realizado en un canal de grandes dimensiones al que llamaremos en adelante recinto de ensayos, construido exclusivamente para este proyecto. Las dimensiones del recinto son: 2,46 m de ancho  $\times$  1,3 de alto  $\times$  13,5 m de largo.

## 3 INSTALACIONES Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El recinto está alimentado desde un depósito de nivel constante a través de una tubería de 350 mm, dotada de un caudalímetro de ultrasonido. En la parte final incorpora una válvula motorizada que regula el caudal de entrada al modelo. El registro de los niveles aguas arriba, aguas abajo y en el vertedero de salida se realiza con sondas de nivel de ultrasonido. El ensayo se inicia con un caudal pequeño, que se va incrementando hasta que la rotura llegue a la coronación, momento en que finaliza el ensayo.

En cada escalón se registran el caudal de entrada, los niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa,

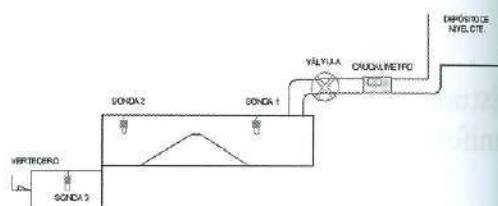


Figura 2. Esquema de las instalaciones de ensayo.

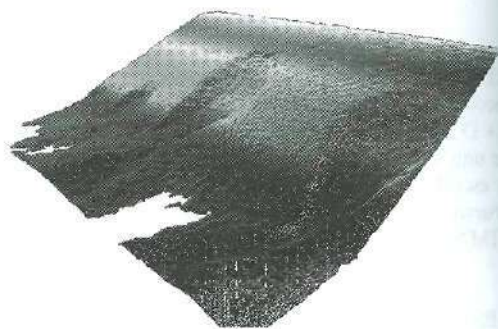


Figura 3. Modelo Digital del Terreno (MDT).

el caudal de salida y el grado de avance de la rotura de la presa. La incorporación de instrumentación se ha realizado de forma continua.

### 3.1 Instrumentación

Durante el desarrollo de los ensayos el recinto ha contado con un caudalímetro de ultrasonido, una válvula motorizada, 3 sondas de nivel de ultrasonido y un panel de 84 piezómetros para las lecturas de presión en la base de la presa. Se implementó un sistema de control a través de la captura de las señales eléctricas de los instrumentos y los ensayos son controlados desde un ordenador con software Labview.

### 3.2 Fotogrametría

La técnica de fotogrametría del objeto cercano acondicionando dos cámaras fotográficas sincronizadas, han permitido, sacando pares de fotos cada 10 segundos durante los ensayos, obtener el modelo Modelo Digital del Terreno (MDT) de la presa en cada escalón de rotura.

## 4 MATERIALES

Los materiales utilizados tienen gradación uniforme, dado que uno de los objetivos de este trabajo es analizar el efecto del tamaño de la partícula a través del  $D_{50}$ . Las características de los materiales utilizados se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características de los materiales.

Descripción (mm)	Material 1 M1	Material 2 M2	Material 3 M3
$D_{10}$	5,97	8,36	23,68
$D_{50}$	8,20	12,64	35,00
$D_{60}$	8,70	12,88	36,91
$C_u$	1,46	1,54	1,56

## 5 RESULTADOS

Para presentar los resultados obtenidos en el laboratorio definiremos algunas conceptos:

**Caudal de inicio de la rotura  $Q_r$ .** La presa puede evacuar un cierto caudal sin presentar cambios en su configuración inicial. Una vez superado ese caudal se iniciarán los primeros desplazamientos de parte del material del espaldón aguas abajo de la presa, lo que supone el inicio de la rotura.

**Caudal de rotura  $Q_r$ .** Es el mínimo caudal de sobrevertido que lleva la rotura hasta el extremo de aguas abajo de la coronación de la presa.

**Caudal de rotura interpolado  $Q_{ri}$ .** Como ya se comentó es complicado alcanzar el caudal de rotura exacto. Esta medida  $Q_{ri}$  nos da una aproximación más cercana al interpolar entre el valor anterior y posterior al alcance de la coronación.

**Camino de rotura  $CR$ .** Es el camino que caracteriza el avance de la rotura desde su inicio en el pie de presa hasta llegar a la coronación. Queda definido por el gráfico que tiene en abscisas el caudal correspondiente a cada escalón y en ordenadas el grado de avance de la rotura (B).

A continuación se muestran los resultados obtenidos en estos ensayos:

### 5.1 Material N°1 $D_{50} = 8,2 \text{ mm}$

Se realizaron pruebas para una presa de altura 0,60 m y cuatro taludes distintos aguas abajo,  $N = 1,5/1,75/2,5/2,7$ .

#### 5.1.1 $D_{50} = 8,2 \text{ mm talud } N = 1,5$

La rotura de esta presa con talud  $N = 1,5$  está gobernada por el deslizamiento en masa del espaldón. La duración del sobrevertido es generalmente suficiente para la saturación parcial o total del cuerpo de la presa y la instalación de un campo de presiones intersticiales correspondientes que produce el deslizamiento.

#### 5.1.2. $D_{50} = 8,2 \text{ mm talud } N = 1,75$

El mecanismo de rotura para esta presa con talud  $N = 1,75$  es un mecanismo combinado de deslizamiento en masa y arrastre de partículas, pero

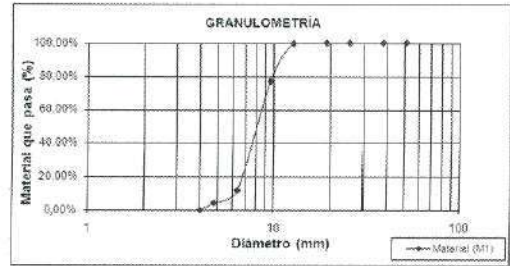


Figura 4. Material N°1.

Cuadro 3. Datos del ensayo N°1.

$N = 1,5$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_p$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	6,5	202	20	0	0
$E_2$	10,5	258	25	0	0,304
$E_3$	11,3	268	25	0,294	0,332
$E_4$	14,3	306	28	0,358	0,554
$E_5$	18,4	356	30	0,389	0,771
$E_6$	21,5	384	35	0,546	1,038
$Q_{ri}$	19,9	-	-	-	0,9

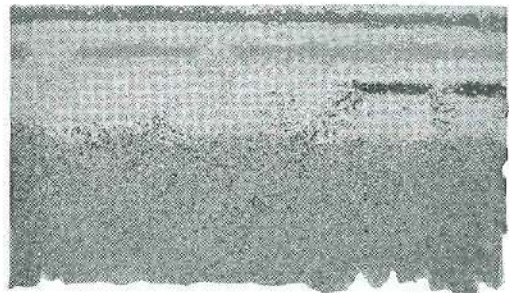


Figura 5. Foto ortogonal  $Q = 18,4 \text{ l/s}$ .



Figura 6. Foto ortogonal  $Q = 21,5 \text{ l/s}$ .

con claro predominio del deslizamiento en masa. Se aprecian unos ligeros arcos en la zona deslizada, que denotan la presencia del mecanismo de arrastre.

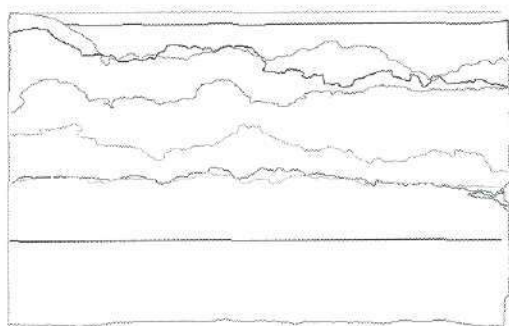


Figura 7. Avance en la rotura de la presa por escalones.

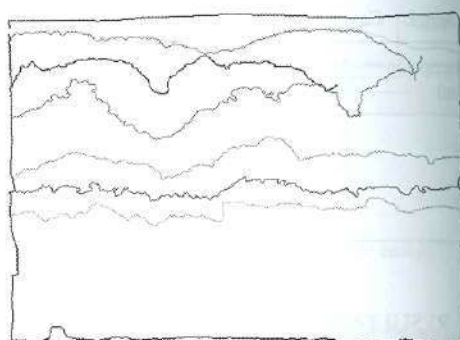


Figura 10. Avance en la rotura de la presa por escalones.

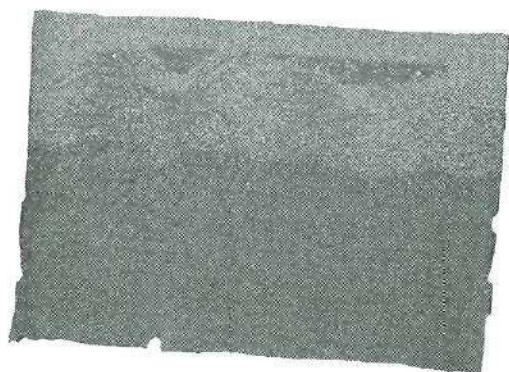


Figura 8. Foto ortogonal  $Q = 23,4$  l/s.



Figura 9. Foto ortogonal  $Q = 26$  l/s.

### 5.1.3 $D_{50} = 8,2$ mm talud $N = 2,5$

El mecanismo de rotura para esta presa con talud  $N = 2,5$  es un mecanismo con claro predominio del arrastre de partículas, las partículas son arrastradas de forma individual una vez que la tensión de arrastre vence la resistencia de la grava. El equilibrio de la partícula está gobernado por el balance de las fuerzas desestabilizadoras de sustentación y de arrastre, y de las fuerzas

Cuadro 4. Datos del ensayo N°2.

$N = 1,75$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_u$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	5	164	8	0	0
$E_2$	8	224	8,8	0	0
$E_3$	10,7	268	11,6	0	0
$E_4$	12,6	293	12	0	0
$E_5$	14,7	319	12	0	0,287
$E_6$	17,4	345	12,8	0	0,608
$E_7$	20,7	379	16	0	0,913
$E_8$	23,4	400	16,4	0	1,039
$E_9$	26	415	16,8	0	1,181
$Q_{cr}$	23,6	-	-	-	1,05

Cuadro 5. Datos del ensayo N°3.

$N = 2,5$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_u$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	5,6	170	14	0	0
$E_2$	8	253	19	0	0
$E_3$	11	296	23	0	0
$E_4$	12,6	320	28	0	0,658
$E_5$	15	341	29	0	0,821
$E_6$	18	371	35	0,899	1,235
$E_7$	21	392	45	1,239	1,681
$Q_{cr}$	19,78	-	-	-	1,5

estabilizantes de gravedad e imbricación de las partículas.

### 5.1.4 $D_{50} = 8,2$ mm talud $N = 2,7$

El mecanismo de rotura para esta presa con talud  $N = 2,7$  al igual que la anterior es claramente un mecanismo de arrastre de partículas. A continuación se pone en una gráfica el camino de rotura de las 4 presas con diferente talud aguas abajo  $N$ .

En la gráfica se puede observar que una presa con un talud más tendido inicia la rotura con un caudal mayor.

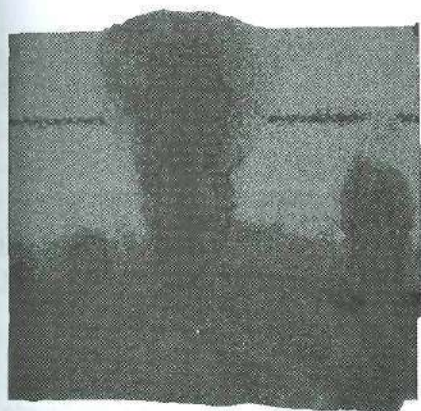


Figura 11. Foto ortogonal  $Q = 21$  l/s.

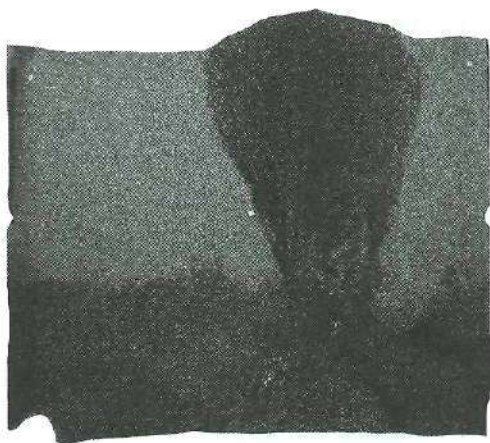


Figura 13. Foto ortogonal  $Q = 23$  l/s.

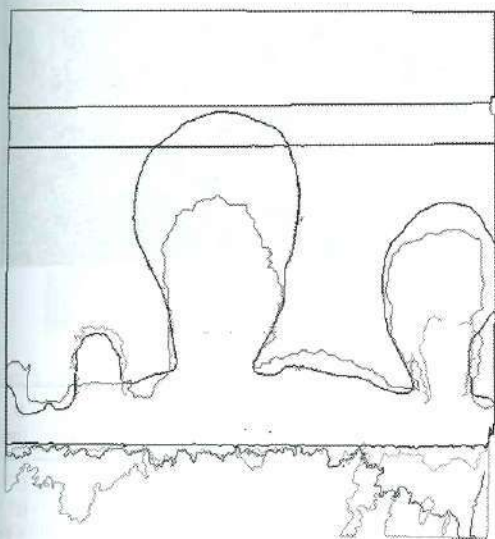


Figura 12. Avance en la rotura de la presa por escalones.

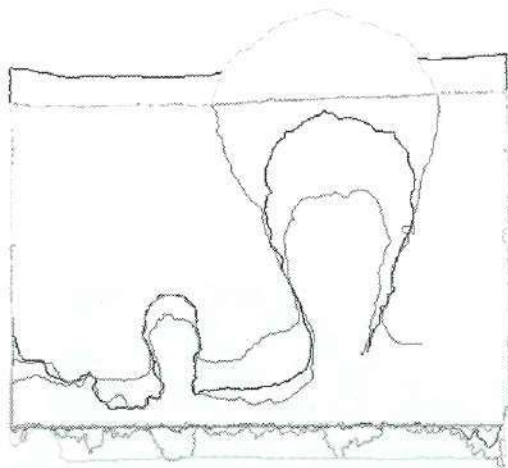


Figura 14. Avance en la rotura de la presa por escalones.

Cuadro 6. Datos del ensayo N°4.

$N = 2,7$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	5	193	15	0	0
$E_2$	7,6	252	21	0	0
$E_3$	11,3	313	25	0	0
$E_4$	14,3	348	30	0	0
$E_5$	17,5	380	30	0,936	1,142
$E_6$	20,2	359	30	1,148	1,539
$E_7$	23	—	—	1,314	2,053
$Q_{cr}$	20,64	—	—	—	1,62

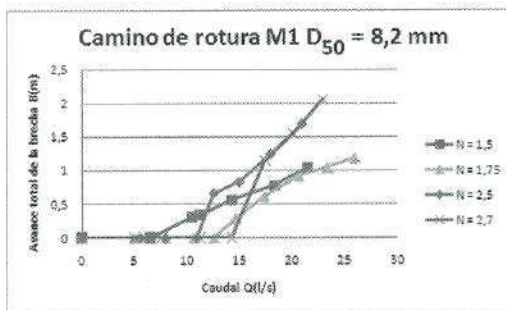


Figura 15. Camino de rotura M1.

### 5.2 Material N°2 $D_{50} = 12,64 \text{ mm}$

Se realizaron pruebas para una presa de altura  $H = 1,0 \text{ m}$  y dos taludes distintos aguas abajo,  $N = 2,2/3,0$ .

#### 5.2.1 $D_{50} = 12,64 \text{ mm}$ talud $N = 2,2$

El mecanismo de rotura es el arrastre de partículas, se forma un canal de erosión que avanza hasta la coronación.

#### 5.2.2 $D_{50} = 12,64 \text{ mm}$ talud $N = 3,0$

El mecanismo de rotura es el arrastre de partículas. Se forma un canal de erosión que avanza hasta la coronación.

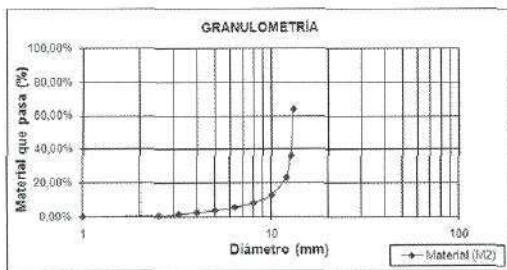


Figura 16. Material N°2.

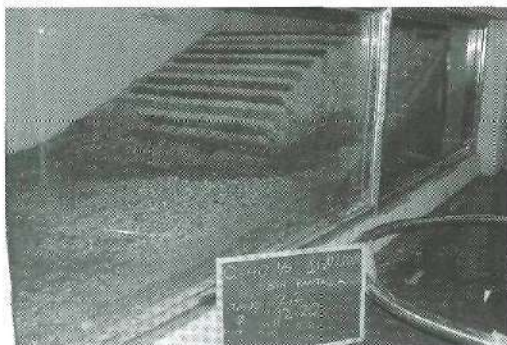


Figura 17. Foto lateral  $Q = 38,47 \text{ l/s}$ .

Cuadro 7. Datos del ensayo N°5.

$N = 2,2$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_0$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	10,35	300	17,2	0	0
$E_2$	19,04	431,8	24,4	0,3	0,3
$E_3$	30,63	550	29,9	1,06	1,19
$E_4$	38,47	607	31,9	1,51	2,21
$Q_{cr}$	38,39	784	-	-	2,2

### 5.3 Material N°3 $D_{50} = 35 \text{ mm}$

Se realizaron pruebas para una presa de altura  $H = 1,0 \text{ m}$  y cuatro taludes distintos aguas abajo,  $N = 1,5/2,2/2,5/3,0$ .

#### 5.3.1 $D_{50} = 35 \text{ mm}$ talud $N = 1,5$

La rotura de esta presa con talud  $N = 1,5$  está gobernada por el deslizamiento en masa del espaldón. Vuelve a observarse el proceso de deslizamientos sucesivos que progresa hasta llegar a la coronación.

#### 5.3.2 $D_{50} = 35 \text{ mm}$ talud $N = 2,2$

El mecanismo de rotura para esta presa con talud  $N = 2,2$  es un mecanismo combinado con

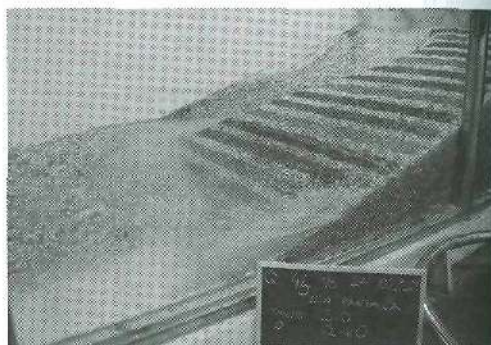


Figura 18. Foto lateral  $Q = 40,42 \text{ l/s}$ .

Cuadro 8. Datos del ensayo N°6.

$N = 3,0$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_0$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	10,62	333	17,3	0	0
$E_2$	19,29	475	23,3	0	0
$E_3$	29,63	572	26,3	1,83	2,15
$E_4$	34,83	602	32,3	2,23	2,72
$E_5$	40,42	641	32,3	-	3
$Q_{cr}$	40,42	559	-	-	3

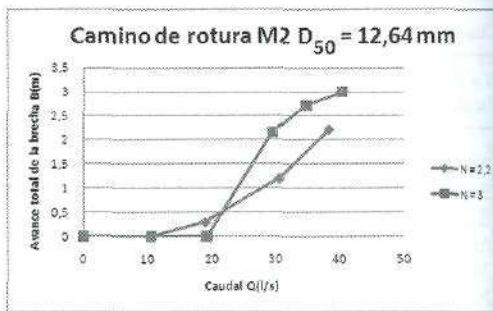


Figura 19. Camino de rotura.

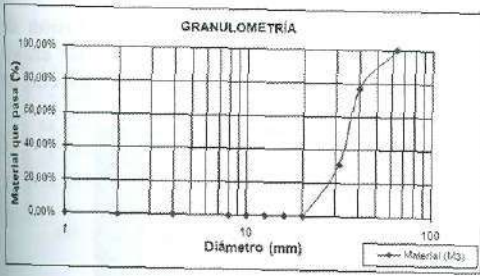


Figura 20. Material N°3.

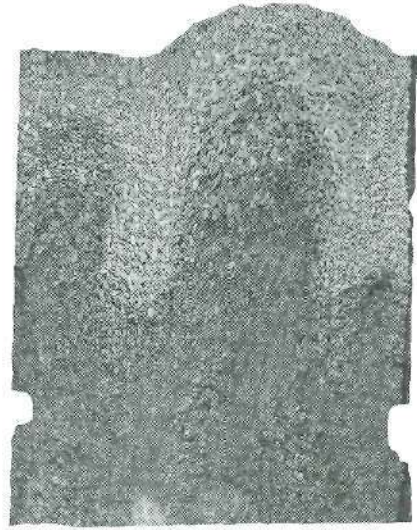


Figura 22. Foto ortogonal  $Q = 90,68$  l/s.



Figura 21. Foto ortogonal  $Q = 90,68$  l/s.

Cuadro 9. Datos del ensayo N°7.

$N = 1,5$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	25,46	351	25,6	0	0
$E_2$	40,87	469,	33,4	0	0,615
$E_3$	51,75	537	39,4	0	0,71
$E_4$	69,07	632,	48,4	0	1,078
$E_5$	90,68	720	49,4	1,415	1,556
$Q_c$	88,15	-	-	-	1,5

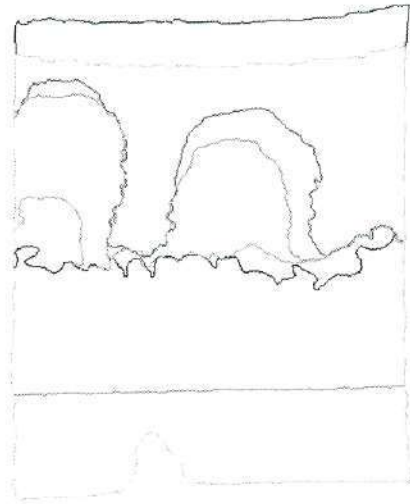


Figura 23. Avance en la rotura de la presa por escalones.

predominio del deslizamiento en masa. Se aprecian unos ligeros arcos en la zona deslizada, que denotan la presencia del mecanismos de arrastre.

### 5.3.3 $D_{50} = 35$ mm talud $N = 2,5$

El proceso de rotura de esta presa con talud  $N = 2,5$  se observa un claro predominio de arrastre de partículas.

Cuadro 10. Datos del ensayo N°8.

$N = 2,2$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	27,16	411	20,6	0	0
$E_2$	38,99	509,5	26,4	0	0
$E_3$	50,42	555	29,4	0	0
$E_4$	69,07	686	37,4	1,177	1,319
$E_5$	90,68	767	48,4	1,625	2,066
$Q_c$	94,56	-	-	-	2,2

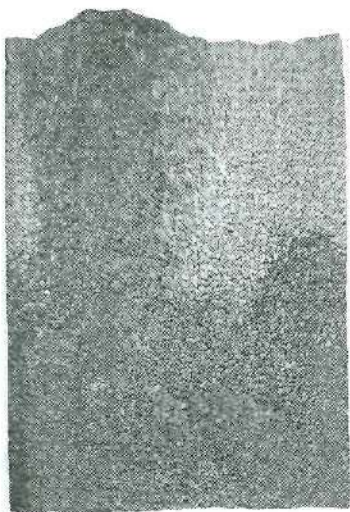


Figura 24. Foto ortogonal  $Q = 90,68$  l/s.

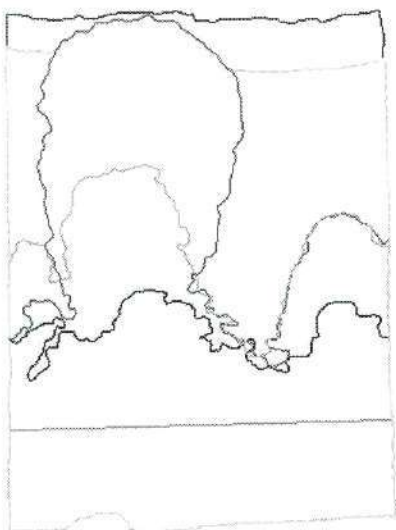


Figura 25. Avance en la rotura de la presa por escalones.

Cuadro 11. Datos del ensayo N°9.

$N = 2,5$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	26,80	432	25,4	0	—
$E_2$	35,80	498,2	30,2	0	—
$E_3$	49,10	598	35,4	0	0,935
$E_4$	81,69	669	40,4	2,09	2,438
$E_5$	90,68	746	40,4	2,422	2,721
$Q_{cr}$	83,66	899	—	—	2,5

#### 5.3.4 $D_{50} = 35$ mm talud $N = 3,0$

El predominio del fenómeno es la erosión de partículas. El caudal de rotura es similar en los 4 casos. El inicio de la rotura se produce con un



Figura 26. Foto ortogonal  $Q = 82,47$  l/s.

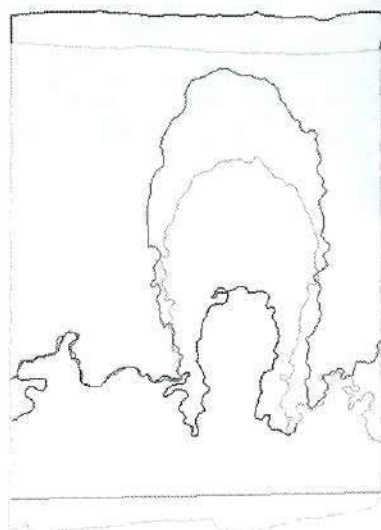


Figura 27. Avance en la rotura de la presa por escalones.

Cuadro 12. Datos del ensayo N°10.

$N = 3$ Escalón	$Q$ (l/s)	$h_a$ (mm)	$h_b$ (mm)	$A$ (m)	$B$ (m)
$E_1$	31,87	475	29,2	0	0
$E_2$	48,23	602	38,2	0	0
$E_3$	60,57	684	39,2	0	1,378
$E_4$	75,54	737	44,2	2,139	2,25
$E_5$	82,47	736	44,2	2,39	2,842
$Q_{cr}$	84,32	693	—	—	3



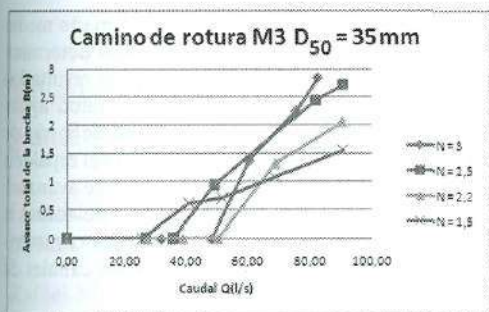


Figura 28. Camino de rotura M3.

menor caudal para una presa con el talud más inclinado.

## 6 PROCESO DE ROTURA

Los dos mecanismos de rotura que se aprecian en los ensayos son el deslizamiento en masa y el arrastre de partículas. Para los taludes intermedios se observa una combinación de ambos mecanismos.

### 6.1 Arrastre de partículas

En las presas de escollera, con espaldón de aguas abajo constituido por material granular no cohesivo, la resistencia al arrastre se produce principalmente por el peso de cada partícula o escollera considerada aisladamente y también por la imbricación de las partículas.

Dubuat en 1779 (Dubuat, L.G. 1779) introdujo por primera vez el concepto de esfuerzo cortante en el lecho y realizó experimentos sobre el movimiento de las partículas que lo componen. A partir de entonces se han propuesto varias expresiones, basadas en su mayoría en el criterio del esfuerzo cortante crítico, para predecir las condiciones del inicio de movimiento de partículas. La relación más conocida para describir el inicio de este movimiento fue propuesta por Shields en 1936, que determinó el esfuerzo cortante crítico adimensional en función del número de Reynolds de las partículas. No obstante, el inicio del movimiento de partículas en las presas de escollera por sobrevertido tiene características diferentes: a) una gran pendiente y b) un flujo emergente del cuerpo de la presa.

Por ello, el movimiento de partículas en este caso particular ha de ser objeto de una investigación complementaria.

### 6.2 Deslizamiento en masa

La rotura por deslizamiento en masa se genera por la instalación de un campo de presiones

intersticiales en el cuerpo de la presa como consecuencia del sobrevertido. El deslizamiento se inicia en el pie de presa y avanza aguas arriba hasta que la rotura llega a la coronación. A medida que avanza el deslizamiento en las fases previas, se amplía y asume una forma cuasicircular que mejora la estabilidad de la zona deslizada de la masa del espaldón. Entre los factores que influyen en el inicio del deslizamiento del espaldón están: el talud de la presa, el tipo y tamaño de la escollera y el grado de saturación del espaldón.

### 6.3 Combinación de los mecanismos de rotura

Para taludes intermedios se puede observar que existe una combinación de ambos mecanismos en el proceso de rotura. Toledo (Toledo 2004) ha estudiado la relación entre los dos mecanismos básicos de rotura, obteniendo conclusiones acerca de las circunstancias en las que la rotura se inicia por cada una de ellas. En 1961, Tinney y Hsu (Tinney, R.E. and Hsu, Y.H. 1961) establecieron pruebas de lavado en el laboratorio y concluyeron que el tipo de lavado es una función del tamaño de grano de los materiales, es decir, cuanto mayor sea el tamaño, más lenta es la velocidad de lavado. Simmler y Sametz (Simmler, H. and Sametz, L. 1982) estudiaron el desarrollo de la erosión de una presa por sobrevertido y propusieron una ecuación para la descarga a través de la brecha como una función del volumen de la brecha. Chinnarasri (Chinnarasri, C. 2000) investiga la erosión en diques homogéneos debido a sobrevertido mediante la realización de experimentos en laboratorio y mediante el uso de modelos numéricos (Tingsanchali, T. and Chinnarasri, C. 2001). Para el rango de la pendiente del dique aguas abajo entre 1V: 2,5H y 1V: 5H concluyen que los parámetros esenciales que afectan el proceso de erosión son las propiedades del material de la presa, como el tamaño, la dureza, la erosionabilidad y la graduación del material que compone la presa. La geometría de la estructura, la ubicación del elemento impermeable, y la magnitud del volumen aguas arriba también afectan la tasa de erosión. Aunque este trabajo es interesante como punto de partida, su ámbito de aplicación es limitado y debe todavía esclarecerse el papel de algunos parámetros. Según los ensayos en modelo reducido realizados por el propio Chinnarasri, el ajuste del modelo matemático es todavía pobre, aunque sin duda mejor que el proporcionado por ejemplo por el programa comercial Dam Breach.

## 7 CAUDAL DE ROTURA

El caudal de rotura es un parámetro esencial, pues el elemento impermeable de la presa no resultará

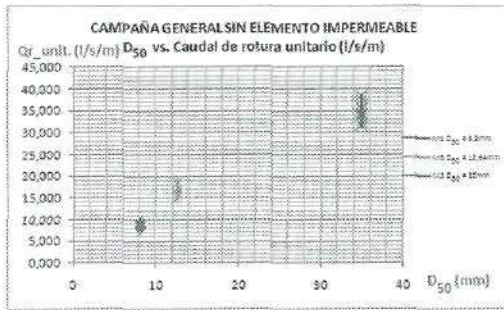


Figura 29. Diámetro medio Vs. Caudal de rotura unitario.

afectado por la rotura si el caudal de sobrevertido es menor que el de rotura y, en tal caso, puede excluirse la posibilidad de una rotura catastrófica.

Los resultados de los ensayos muestran claramente que el caudal de rotura depende del tamaño del material, con mayor valor en los materiales más gruesos, y de la altura de la presa, siendo mayor en las presas más altas. En cambio, no se observa una clara dependencia del talud de aguas abajo. Debe tenerse en cuenta que la precisión en la determinación del caudal de rotura es limitada. Por limitación de tiempo en una jornada, el número de escalones de caudal se limita a unos 6 ó 7, no disponiéndose de información para otros caudales que no correspondan a uno de los escalones elegidos. Consideramos que la precisión en la determinación del caudal de rotura ha sido insuficiente para captar la dependencia respecto del talud, que por otra parte es de segundo orden en comparación con la influencia del material y la altura de presa. Cabe pensar lo mismo en lo que se refiere a la dependencia del tipo de elemento de impermeabilización.

## 8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En todos los casos los movimientos de partículas aisladas o en grupo, tienen un carácter sensiblemente superficial. El inicio de la rotura se origina en el pie de presa y avanza hasta llegar a la coronación. En el caso de una rotura por deslizamiento en masa este crecimiento es homogéneo a lo largo de toda la presa. En el caso de fallo por arrastre, la rotura se concentra en uno o varios canales de erosión que progresan hasta llegar a la coronación. Un componente que parece determinante en la rotura es el nivel de saturación en el cuerpo de la presa. En todos los casos la rotura ha llegado hasta la coronación cuando la presión en la zona de coronación se encontraba entre el 50% El talud aguas abajo de la presa determina el mecanismo de rotura y caudal de inicio de la

rotura. La altura de la presa  $H$  y el tamaño medio  $D_{50}$  del material que compone la presa determina el caudal de rotura de la presa. De los resultados obtenidos se puede asegurar que el talud aguas abajo es determinante para el caudal de inicio de la rotura y para el nivel de saturación del espaldón a partir del cual se iniciará la rotura que avanzará hasta la coronación. El mecanismo de rotura a través del arrastre de partículas esta caracterizado por la aparición de uno o varios canales de erosión.

La profundidad de estos canales de erosión está relacionada con el tamaño medio del material, con mayor profundidad para un  $D_{50}$  menor. La ubicación del canal de erosión y el número de ellos en el caso de rotura por arrastre no ha tenido influencia en el caudal de rotura.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación, como entidad financiadora de la campaña de ensayos en modelo físico, que constituye la base de estos estudios. Dicha campaña se enmarca dentro del proyecto de investigación del Plan Nacional de I + D 2007-2011 denominado "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", (XPRES) con código de identificación BIA2007-68120-C03-021.

A los profesores A. Díez Galilea y J. Aguirre de Mata y su equipo, quienes hicieron posible la obtención de los planos de rotura de las presas.

## REFERENCIAS

- Chinnarasri, C. (2000). Experimental investigation of embankment breaching erosion and prediction by numerical models. Asian Institute of Technology, Thailand.
- Dubuat, L.G. (1779). Principes d'hydraulique et de pyrodynamique. Paris, Francia.
- Simmier, H. and Sametz, L. (1982). Dam failure from overtopping studied on a hydraulic model. ICOLD, Fourteenth Congress, Vol. I, Q.52, R.26, pp. 427-445.
- Tingsanchali, T. and Chinnarasri, C. (2001). Numerical modeling of dam failure due to flow overtopping. Hydrological Sciences Journal, International Association for Hydrological Sciences, U.K., vol. 46, no. 1, pp. 113-130.
- Tinney, R.E. and Hsu, Y.H. (1961). Mechanics of Washout of an Erodible Fuse Plug. J. Hydraul. Div. ASCE 87(3), 1-29.
- Toledo M.Á. (2004). Physical and mathematical modeling of embankment dam failure due to overtopping. International Seminar on Stability and Breaching of Embankment Dams, Oslo, Norway.