

Estudio de protecciones frente al sobrevertido de presas de materiales sueltos mediante repié de escollera

Rafael Morán

Miguel Á. Toledo

Hibber Campos,

Jaime H. García

Departamento de Ingeniería Civil. Hidráulica y Energética, ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España

ABSTRACT: El contenido del artículo se enmarca dentro de la línea de investigación iniciada hace años por la unidad docente de presas de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (en adelante UPM), referente al estudio del vertido por coronación (también denominado sobrevertido u *overtopping*, en inglés) en presas de escollera. Este tema está adquiriendo importancia a nivel mundial y prueba de ello es que importantes organismos a nivel mundial están investigando y redactando manuales de protecciones de presas frente al sobrevertido. El objetivo principal de la investigación es estudiar el efecto de las protecciones de escollera sobre la seguridad de la presa en situación de sobrevertido, analizando la influencia de su geometría y tipo de material utilizado, con el fin de definir criterios de dimensionamiento de este tipo de protecciones que eviten la rotura de la presa por deslizamiento en masa. El trabajo objeto del artículo se basa en una serie de ensayos en modelo físico realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la UPM con motivo del trabajo de investigación tutelado llevado a cabo en 2008 dentro del Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética.

1 INTRODUCCIÓN

El trabajo descrito se basa en una serie de ensayos en modelo físico. Estos ensayos no están planteados como modelos a escala de un caso real sino que son en sí mismos el prototipo de estudio. Por lo tanto, el análisis dimensional y los denominados como efectos de escala, cuyo análisis corresponde a otro trabajo de investigación que se encuentra en ejecución, no son objeto de estudio. No obstante, las características geométricas y materiales utilizados en los ensayos están dentro de los rangos habitualmente manejados en la construcción de presas.

Como ya se ha adelantado, la protección a estudiar consiste en un repié de escollera, formado por una berma aguas abajo del espaldón de la presa principal de la misma anchura que la coronación de la presa (20 cm), rematada mediante un talud aguas abajo. En la campaña únicamente se han variado dos parámetros de la geometría de la protección: la altura de la berma (H_b) con relaciones H_b/H (siendo H la altura de la presa principal) de 0.6 y 0.4 y el talud de aguas abajo (N_b) con valores 1.5; 2.2 y 3.0. El material, también granular, es de 4.5 cm de tamaño medio.

Adicionalmente, se analiza el comportamiento de la presa sin protección alguna para comparar los daños de la presa protegida y sin proteger. Este caso,

unido a los seis anteriores, hace que el número total de ensayos realizados ascienda a siete.

2 DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

2.1 Instalación de ensayo

El recinto de ensayo se encuentra ubicado en el laboratorio de Hidráulica de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid y tiene unas dimensiones de 2.4 m de anchura, 1.4 m de altura y 13.7 m de longitud. Se trata de una obra de fábrica con solera horizontal, dotada de una ventana de inspección lateral de cristal en su cajero izquierdo, con dos lunas de 2.30 x 1.08 m², cada una de ellas.

2.2 Descripción de los modelos físicos

La sección de la presa y sus protecciones se mantiene constante a lo ancho del canal de ensayo. Por tanto, el estudio se limita a casos bidimensionales. La dimensión relativa de la anchura del canal (W) respecto de la altura de la presa es el factor crítico a la hora de evitar el efecto pared. En la campaña, este factor se mantiene constante $W/H= 2.4$. Dado que el comportamiento del modelo queda distorsionado en

las proximidades de las paredes del recinto se ha forzado que la rotura se produzca alejada de dichas paredes. Esto se ha conseguido colocando tela metálica junto a ellas para dificultar el movimiento de las piedras en esa zona.

La geometría de la presa que es objeto de protección en el ensayo se mantiene invariable. Se trata de un cuerpo de presa de taludes $M=1.5$ y $N=1.5$ aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, con una anchura de coronación C de 0.20 m y una altura H de 1 m. Se han elegido taludes del mismo orden de magnitud que los que se usan habitualmente en las presas de escollera.

El elemento impermeabilizante, también invariable en esta campaña, simula una pantalla externa y está formado por una lámina de PEAD de 1.5 mm montada sobre un marco de aluminio que descansa sobre el talud de aguas arriba y sellado en el contacto con cajeros y solera mediante una masilla elastomérica.



Figura 1. Vista lateral de la protección colocada antes de iniciar el ensayo

El caso de la presa sin protección ($H_b/H=0$) se ha ensayado como caso de referencia para poder analizar y comparar los daños con respecto a la presa protegida.

La geometría de la protección se ha caracterizado mediante dos parámetros cuya influencia en el fenómeno es mayor, esto es, el talud N_b y la altura de la protección H_b (Fig.1). Para facilitar el tratamiento de los datos obtenidos se ha optado por trabajar con la variable adimensional $H_b^* = H_b/H$. El ancho de la berma se ha mantenido constante, de 20 cm.

El rango de variación de la altura de la protección viene delimitado fundamentalmente por dos factores. El primero es el tamaño medio del material de protección, que la limita inferiormente con el objetivo de asegurar un funcionamiento asimilable a un continuo. La relación entre el tamaño de la partícula y las dimensiones del conjunto debe estar limitada para que los efectos de imbricación y colocación re-

lativa entre las partículas no influyan en exceso. De Cea y Olalla (1991) aconsejan que esta relación sea como mínimo 6 . En los ensayos se ha limitado la relación entre el tamaño de partícula y la altura de protección (d_{50b}/H_b) a 8 .



Figura 2. Vista desde aguas arriba de la disposición del modelo con la impermeabilización con lámina de PEAD.

El segundo factor que se ha tenido en cuenta a la hora de plantear la altura máxima de la protección es la zona de salida prevista para el caudal de filtración del espaldón. Tal y como señala Toledo en el cálculo de la ley de intercambio de caudal, con los taludes habitualmente utilizados en presas de escollera (rango entre 1.5 y 2.0) dicha zona de salida se limita a aproximadamente el 60% de la longitud del talud (Toledo 1997) y por lo tanto de la altura de presa. Por ello se adopta como límite superior $H_b^* = 0.6$. Además, la zona con presiones relativas más altas está por debajo de esa altura, con lo que la estabilidad frente al deslizamiento queda garantizada por encima de ella.

Los taludes del repié (N_b) utilizados en el ensayo son 1.5 ; 2.2 y 3.0 . El objeto es analizar un rango de taludes amplio para poder extraer conclusiones en función del mecanismo de rotura que predomine, bien el deslizamiento en masa, mayor en taludes bajos, o bien la erosión por arrastre de las partículas, predominante cuando la estabilidad en masa está garantizada.

En resumen, los casos a ensayar desde el punto de vista de la geometría son los siguientes:

- Caso $H_b^* = 0$. Presa sin protección
- Caso $H_b^* = 0.6$; $N_b = 1.5$
- Caso $H_b^* = 0.6$; $N_b = 2.2$
- Caso $H_b^* = 0.6$; $N_b = 3.0$
- Caso $H_b^* = 0.4$; $N_b = 1.5$
- Caso $H_b^* = 0.4$; $N_b = 2.2$
- Caso $H_b^* = 0.4$; $N_b = 3.0$

El caudal máximo disponible en la instalación está limitado a unos 95 l/s con la disposición actual

del sistema de alimentación del recinto de ensayo. La serie de caudales a ensayar se organiza en 6 escalones como máximo, parando el ensayo una vez que se produce la rotura total de la protección. El caudal se incrementa bruscamente en cada escalón, manteniéndolo constante durante un mínimo de 20 minutos. El criterio para iniciar el cambio de escalón es que no se produzca movimiento de piedras en 10 minutos consecutivos. Los caudales de los escalones se aumentan de forma diferente en función de cada caso, tratando de mantener como incremento medio los 15 l/s.

2.3 Datos obtenidos

Las lecturas se realizan inmediatamente antes del cambio de escalón de caudal.

2.3.1 Caudal

El caudal de alimentación es un parámetro fundamental, por ello se ha medido por 3 procedimientos distintos.

1. Mediante caudalímetro de ultrasonidos ubicado en la tubería de alimentación.
2. Mediante un dispositivo tipo Venturi instalado en dicha tubería.
3. Mediante una sonda de nivel aguas arriba del vertedero situado a la salida del canal de ensayo.

2.3.2 Calados en el canal

Se han medido los niveles aguas arriba de la presa y en el extremo de aguas abajo del canal, antes de la entrada del agua al desarenador. Para ello se utilizan dos sondas de nivel situadas en estos emplazamientos.

2.3.3 Presiones en la base

Se han realizado lecturas de los piezómetros situados a lo largo de la base ocupada por el material de presa y protección. Se han tomado las medidas de la línea más cercana del eje longitudinal del canal.

2.3.4 Línea de saturación

Se han tomado medidas de la altura de la línea de saturación en el muro izquierdo del recinto, haciendo uso de la ventana de cristal situada en el cajero izquierdo. Las medidas se han realizado directamente mediante una escala milimétrica. Estas medidas se han utilizado como comprobación tras la calibración del modelo numérico de filtración. Se han tomado medidas en los siguientes puntos.

- En el remanso aguas arriba de la coronación de la presa, en la vertical del extremo de aguas arriba de la coronación.
- En los puntos que definen los extremos de la berma de la protección.
- En el punto donde la línea llega a la superficie libre.

2.3.5 Altura de los daños producidos

Una vez producidos los daños sobre la protección se ha medido la altura, medida desde el fondo del canal, hasta donde ha progresado la erosión o deslizamiento sobre el espaldón.

La rotura se considera en el momento en que la brecha o deslizamiento llega a la coronación de la presa (rotura de la presa). Se considera rotura de la protección cuando los daños alcanzan la berma de la protección o bien cuando el material de la presa comienza a verse afectado.



Figura 3. Ensayo de protección con talud 3 ($N_b=3$) y altura del 40% de la altura de la presa ($H_b^*/H=0.4$). Nivel de daño 1.

3 RESULTADOS

Los caudales unitarios que han sido soportados por las protecciones son los siguientes, expresados adimensionalmente con respecto al caudal que rompe completamente la presa sin protección, son los siguientes.

Para un nivel de daño 1, definido como el estado en que se ha producido una recolocación de las piedras superficiales con algún movimiento de piedras singulares, sin variación de la geometría apreciable:

	$N_b=1.5$	$N_b=2.2$	$N_b=3.0$
$H_b^*/H=0.4$	0.35	0.56	1.10
$H_b^*/H=0.6$	0.67	0.61	1.10

Tabla 1. Caudales unitarios adimensionales que soporta la protección con nivel de daño 1, en función del talud (N_b) y de la altura adimensional (H_b^*/H) de la protección.

El caudal unitario máximo de alimentación es 1.1. La aparición de este resultado indica que no se pudo llegar al caudal límite soportado por la protección, al quedar limitados por el caudal de alimentación del laboratorio.

Para un nivel de daño 3, definido como el estado en que se ha producido la rotura de la protección o

bien cuando se empieza a ver afectado el material del espaldón de la presa a proteger:

	$N_b = 1.5$	$N_b = 2.2$	$N_b = 3.0$
$H_b^*/H = 0.4$	0.67	0.92	1.10
$H_b^*/H = 0.6$	0.88	1.09	1.10

Tabla 2. Caudales unitarios adimensionales que soporta la protección con nivel de daño 3, en función del talud (N_b) y de la altura adimensional (H_b^*/H) de la protección.



Figura 4. Ensayo de protección con talud 2.2 ($N_b=2.2$) y altura del 40% de la altura de la presa ($H_b^*=0.4$). Nivel de daño 3.

4 CONCLUSIONES

Las conclusiones se pueden resumir en los siguientes epígrafes:

1. Las protecciones ensayadas permiten mejorar sensiblemente la estabilidad frente al deslizamiento en masa provocado por el sobrevertido en presas de escollera. Las condiciones para este resultado han sido:
 - a. La granulometría de las protecciones garantizaba la estabilidad interna del material.
 - b. El tamaño del material seleccionado para la protección evitaba el arrastre para los caudales unitarios disponibles en la alimentación del canal.
 - c. La permeabilidad (con ley de resistencia lineal) del material de protección era 1.7 veces mayor que la de la presa.
 - d. El ángulo de rozamiento del material de presa es de 40° mientras que el de la protección se acerca a los 43° .
2. 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 rozamien-

to de la presa sea tal que no lleguen a formarse círculos de rotura en su interior.

3. 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 valores entre el 5 y el 10% se llegaba a un nivel de protección menor, resistiendo caudales unitarios de entre el 60% y el 80% del caudal de rotura de la presa. En este análisis, se está suponiendo que la presa y la protección mantienen la misma sección a lo largo de todo el eje de la presa. Esto ofrece unos valores más altos que los reales por lo que, en un caso real, los volúmenes de protección necesarios serán inferiores
4. El talud $N_b = 1.5$ ha ofrecido resultados muy pobres mientras que el talud $N_b = 3.0$ se ha comportado como un talud estable, incluso en condiciones de saturación completa de la protección.
5. La solución más eficiente de los casos ensayados ha sido: $H_b^*=0.4$, $N_b=3.0$. Es la solución que ha tenido menor nivel de daño en comparación con el material que ha sido necesario utilizar para su construcción.

5 INVESTIGACIONES FUTURAS

Las nuevas investigaciones a realizar deberían incluir una mayor cantidad de parámetros a variar y un mayor detalle en los parámetros variados en este trabajo. Lógicamente en muchos casos será necesario apoyarse en modelos numéricos dada la complejidad, el tiempo necesario y el costo de los modelos físicos. Se propone el estudio de:

1. Comportamiento ante la variación del rango de taludes de presa, N . Desde 1.3 a 1.8, cubriendo el rango habitual de la tipología de presa de escollera.
2. Variación del parámetro anchura de la berma de protección, B .
3. Ampliación de los casos de talud de protección N_b , especialmente en el rango entre 3.0 y 2.2.
4. Variación de los parámetros de ángulo de resistencia al corte de la presa y de la protección.
5. Variación del coeficiente de uniformidad de la protección.
6. Variación de la permeabilidad relativa de la protección con respecto a la de la presa.
7. Análisis del efecto de la forma del valle.

Inicialmente se plantea la realización de un estudio paramétrico utilizando modelación matemática. Posteriormente los resultados deberán ser validados mediante modelación física. El objeto final de la in-

vestigación es la propuesta de unos criterios concretos de diseño de protecciones de escollera.

6 AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia, 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-C03-02.

7 REFERENCIAS

- De Cea, J. C., & Olalla, C. 1991. "Monografía M 18. Resistencia Al Corte De Escolleras." 95.
- Morán, R., & Toledo, M. A. 2008. "*Protecciones de escollera frente al sobrevertido en presas de materiales sueltos*". Monografía CIMNE. Nº111.
- Parkin, A. 1971. "Field Solutions for Turbulent Seepage Flow." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 209-218.
- Toledo, M. A. 1997. "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." Tesis Tables