

El empleo de rocas de baja resistencia en los espaldones de presas de materiales sueltos

Por J. L. DE JUSTO ALPAÑES

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Catedrático de Mecánica del Suelo (E.T.S. de Arquitectura de Sevilla)

PRAXEDES CAÑETE CRUZ

Ingeniero de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

JOAQUIN DEL CAMPO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El empleo de escolleras de roca blanda en presas de materiales sueltos puede ser, en ocasiones, un imperativo económico.

El principal problema que pueden presentar estos materiales es su compresibilidad.

Se ha pasado revista a varias presas construidas con este tipo de escollera y se ha estudiado su comportamiento, que ha sido variable.

Entre los ensayos que nos pueden dar una idea cualitativa del comportamiento de estas escolleras están los de resistencia a la acción del sulfato sódico y de desgaste de los Angeles.

Entre los ensayos que nos pueden dar un valor del módulo de deformación de la escollera destaca el ensayo de placa de carga, adecuado debido al desmenuzamiento que suelen sufrir estas rocas, aunque aún no se conoce con exactitud la relación entre este módulo de deformación y el que define las deformaciones de la presa.

Las tensiones y deformaciones del elemento impermeable se pueden calcular mediante un método de elementos finitos.

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

Debido a la extensión de la tabla I ha sido preciso utilizar las abreviaturas y símbolos que siguen, las cuales han sido utilizadas ya, también, en las tablas II y III.

Aparte de éstos se han utilizado los símbolos recomendados por la S.I. de Mecánica del Suelo y Cimentaciones:

- a. = asfáltico;
- a-a = aguas arriba;
- a-o = aguas abajo;
- ar. = arenisca;
- arc. = arcilla, arcillosa;
- c. = central;
- c. = compactada;
- ci. = cimentación;
- cob. = cobertura, pasada;
- der. = derecho;
- e. = escollera;
- eq. = equipo;

- esq. = esquisto;
- gn. = gneiss;
- gr. = grava;
- h. = hormigón;
- i. = inclinado;
- inf. = inferior;
- izq. = izquierdo;
- n. = núcleo;
- neum. = neumáticos;
- n.g.t. = núcleo grueso de tierras;
- p.h. = pantalla de hormigón armado;
- piz. = pizarra;
- r. = rodillo;
- sil. = silúrica;
- sup. = superior;
- t. = tierras;
- tr. = tractor;
- v. = vertida;
- vib. = vibratorio;
- w_o = humedad óptima Proctor;
- ρ_p = densidad máxima Proctor;

1. INTRODUCCION

Las cualidades ideales que deben reunir los espaldones de una presa de materiales sueltos son: elevado rozamiento interno, alta permeabilidad y, en general, baja compresibilidad. En las presas de núcleo central delgado conviene, además, que las compresibilidades de núcleo y espaldones sean semejantes para evitar problemas de fractura hidráulica.

La escollera reúne estas cualidades siempre que la roca sea sana y esté debidamente compactada. Thomas (1976) señala que «... se evitarán muchos problemas si se puede utilizar roca sana y resistente», que «está totalmente justificado recurrir a reconocimientos amplios para encontrar este tipo de roca», y que «las presas con pantalla de hormigón se comportarán satisfactoriamente si se construyen de y sobre roca sana».

En este sentido, en la mayoría de las presas de escollera ha existido una preocupación por encontrar roca sana, resistente y duradera, y en limitar la proporción de finos (v. Justo, 1968). Se exceptúan algunas presas antiguas de escollera vertida que han sufrido deformaciones importantes (p.e. Bowman n.º 1) y algunos daños de consideración (Crane Valley).

La mayoría de las escolleras empleadas en presas tienen porcentajes < 2 mm inferiores al 15 por 100. En general las especificaciones respecto a los finos han sido mucho más estrictas (v. Justo, 1968). En la presa de Quoich, por ejemplo, la escollera de esquisto procedía de la excavación del túnel, y todo el material inferior a 10 mm se eliminó mediante tamizado y lavado (Penman y Charles, 1976).

Sin embargo, el mismo Thomas señala más adelante que «es fácil especificar que la roca debe ser sana, limpia y sin meteorizar», pero que «no es tan fácil cumplir estas condiciones, ni siquiera definir claramente lo que es aceptable según la especificación». «Tomado literalmente, raras veces sería posible construir una presa».

El empleo de escolleras de roca sana y con un porcentaje pequeño de finos puede suponer un coste económico importante. Por ello en los últimos tiempos se están utilizando, con variada fortuna, escolleras de rocas blandas: esquistos, pizarras, areniscas friables, etc...

En realidad, en muchos casos, del estudio de la literatura técnica es difícil deducir la naturaleza de la escollera empleada. Creemos que términos como, argilita, limolita (siltstone), fangolita (mudstone) o lutita (shale) no están suficientemente definidos. Puede haber, además, una enorme diferencia entre la calidad de diversos tipos de pizarra, esquisto, areniscas, grauwackas, etc... Por todos estos motivos se precisan con urgencia ensayos que nos permitan establecer las limitaciones de una escollera y las medidas que habría que tomar para su empleo en presas.

En tiempos recientes se están construyendo o se han construido en España presas que están utilizando estas escolleras de baja resistencia, con el beneplácito de asesores tan cualificados como J. B. Cooke. Como ejemplo tenemos las presas del Piedras, Martín Gonzalo y las Yegüas.

El objeto de este artículo es pasar revista, de una forma crítica a los ensayos de laboratorio in situ efectuados sobre estas escolleras y examinar el comportamiento de las presas.

Vamos a ir examinando cada uno de los aspectos fundamentales de estas presas.

2. TALUDES

Un examen de la literatura técnica (v. tabla I) indica que el empleo de escolleras de baja resistencia ha llevado a muchos proyectistas a utilizar taludes más tendidos:

- Taludes de 1,5:1 en las presas de pantalla de hormigón armado de Serpentine y Martín Gonzalo, y de 2:1 en la de Bailey.
- Taludes aguas abajo entre 1,75:1 y 2:1 en las presas alemanas con pantalla asfáltica de Bigge, Eggberg y Steinbach.
- En presas de núcleo central delgado, talud aguas arriba de 2,1:1 en la presa de Llyn Brianne. Taludes aguas arriba de 2,5:1 y aguas abajo entre 2:1 y 2,25:1 en las presas de Misakubo y Muddy Run. Taludes de 3,8:1 aguas arriba y 2,7:1 aguas abajo en las presas de Balderhead.
- Taludes de 3:1 aguas arriba y 1,8:1 aguas abajo en la presa de núcleo inclinado de Scammonden.

ROCAS DE BAJA RESISTENCIA EN ESPALDONES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

TABLA I

Datos de diversas presas de materiales sueltos construidas con escollera compactada de roca de baja resistencia

DATOS DE LA PRESA					DATOS DE LA ESCOLLERA							PERIODO POSTERIOR A LA CONSTRUCCION			MOVIMIENTOS DURANTE LA CONSTRUCCION	VELOCIDAD UNITARIA DEL ASIENTO VERTICAL MAXIMO EN CORONACION AL FINAL DEL PERIODO DE OBSERVACION (% ALTURA POR AÑO)	OBSERVACIONES	REFERENCIAS	
NOMBRE Y FECHA DE TERMINACION	TIPO	ALTURA (m)	TALUDES (DISTANCIA HORIZONTAL PARA 1 VERTICAL)		CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kp/cm ²)	METODO DE COLOCACION	ESPESOR CAPAS (m)	REGADO VOL. AGUA VOL. ESCOLLERA	DENSIDAD SECA (ρ _s) O POROSIDAD (n) TRAS LA COLOCACION	DURACION PEDRA PLENADO (meses)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION		AROS DE OBSERVACION					
			AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO								VERTICAL	HORIZONTAL						
BAILEY 1.977	P.H.	96	2	2	AR. Y LUTITAS	LUTITAS (85%) Y AR.	2 COB. TAMPING ROLLER COR TR. D-B 4 COB. R. NEUM.	0,61		2,05 2,15							ESTRIBO DER. 1,6:1 " IZQ. 1,5:1	30 31	
BALDERHEAD 1.965	N.C.T.	48	3,8	2,7	LUTITAS Y ARC. GLACIAR	LUTITAS	C. 4 COB. RODILLO DE REJA 13,5 T. 0,93 P _p R. VIB. (8,5 T.) (0,96-1) P _p (2 COB.) (K=1,5 x 10 ⁻⁶ cm/s)	0,23		1,90 1,84	31		33					N. ARC. GLACIAR: w α w ₀ E _{oed} ≈ 100 kp/cm ² ρ = 1,02 P _p	20
BIGGE 1.962	P.H.	52	1,6	1,9		ESQ. ARCILLOSO Y GRAUWACKA ARCILLOSA.	PARTE INF. C. MEDIANTE APISONADO CON PLACA DE 3 T. PARTE SUP. C. CON PISON VIB. DE 5 T.	0,8 1,2					6,3				0,004		13
EGGBERG 1.964	P.H.	31,5	1,75	2	AR SILICEA POCO CEMENTADA Y GN. ALTERADO A G. GN. FRESCO. CON CAPAS DE ARC. Y GN. ALTERADO	AR. SILICEA POCO CEMENTADA Y GN. ALTERADO A G. GN. FRESCO.	C. R. NEUM.	0,40					11,9	2	A. CL. 2-5 cm		< 0,02		13
HÖLJES 1.961	N.I.	81	2	>1,4	ROCA MUY FIBRADA DIACLASA RELLENOS DE ARC.	DE ARCILLOSA Y DE PEQUEÑO TAMAÑO A DURA Y GRANDE. < 600 mm. Y MUCHOS FINOS	GR. (0,1-250 mm) C. CON 8 COB. DE R. VIB. DE 3 T. E. V. CERCA DEL FILTRO 1/2 DEL VOLVUMEN ES E.	0,40 5-10 2			2		4,9	3	0,04	2			13
KANGAROO CREEK 1.969	P.H.	59,4	1,3	1,4	GN. ESQ.	ESQ. BLANDO	4 COB. R. VIB. 10 T.	0,9		2,34	16		4,3					ESTRIBOS 40° - 60°	10
LLYN BRIANNE 1.971	N.C.T.	91	2,1	1,75		FANGOLITA PIZARROSA < 0,3 m LAJOSA < 25% < 4 mm 350-1000 N. ARCILLA GLACIAR	C. 4 COB. R. VIB. 13 T. 0,6 T	1	SI				15	3				N. + 1,5 E _{oed} ≈ 450 kp/cm ² FALTAN 30 m PARA LLENADO	2 23
MISAKUBO	N.C.T.	105	2,5	2	AR.	AR. PIZ SIL. Y LUTITAS	EMPUJADO POR TR. D-B Y C. EQ. TRANSPORTE.						3,4	6				N. + 3%	1
MUDDY RUN 1.966	N.C.T.	75	2,5	2,25	ESQ. CUARZOCLORITICO	ESQ. MICACEO DE SANO A METEORIZADO	N. R. NEUM. CTR. 20 T (R. VIBR. NO EFECTIVO)	0,225 0,3-0,9		2,095 2			18,3 N. 278,3 asc. 30 N.		0,55 2		0,36 0,05	N. E _{oed} = 600 kp/cm ²	35
PIEDRAS 1.968	P.H.	37	1,3	1,3		GRAUWACKAS Y PIZ. 20% < 25mm	C. R. VIB. 8-10 T	1,5				26	18						4 5 9
REVIN 1.973	N.G.T.	42	2	2,35		ESQ.	6 COB. R. VIB. 7 T	0,8		2,17 2,20			7,5						11
SCAMMONDEN 1.969	N.I.	80	3	1,8	LUTITAS Y ASPE- RON	AR. ARGILITA Y AR. GRANO FINO (550-800) < 0,9 m	V. A 4 m DEL BORDE Y EMPUJADA CON TR. C. CON 5 COB. R. VIB. (11,5 T) Ó 8 COB. DE DOS DE 5 T EN TANDEM. LUTITAS Y ARGILITAS	<1 0,5		2,02	25		23	10					22 23 34
SCOTTS PEAK	P.H.A.	46	1,7	1,33	ARGILITA	ARGILITA MUY BLANDA	4 COB. R. VIB. 10 T	0,9		2-2,2			38,8				0,017		3 7
SERPENTINE	P.H.	40	1,5	1,5	ESQ. CUARZOCLORITICO.	TODO UNO DE CU. Y ESQ.		1					5,6	2,5			0,016		28
STEINBACH 1.963	P.H.	40	1,75	1,75	TIERRA VEGETAL, ARC. Y ESQ. DESINTEGRADO EN FRESCO	ESQ. ALTERADO, CON TAMAÑO DE GR. ALGO ARENOSA Y LIMOSA. A-O MATERIAL DE CANTERA.	C. CON R. NEUM. PAR. CON R. VIB.						231 CL. 0	2,3	A. CL. 5-7 cm		0,038		13
WINSAR 1.974	P.H.A.	53	1,7	1,4	AR. DEL CARBONIFERO	AR. DEL CARBONIFERO	4 COB. R. VIB. 13,5 T	1,7		2,03	22								24 26

ROCAS DE BAJA RESISTENCIA EN ESPALDONES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

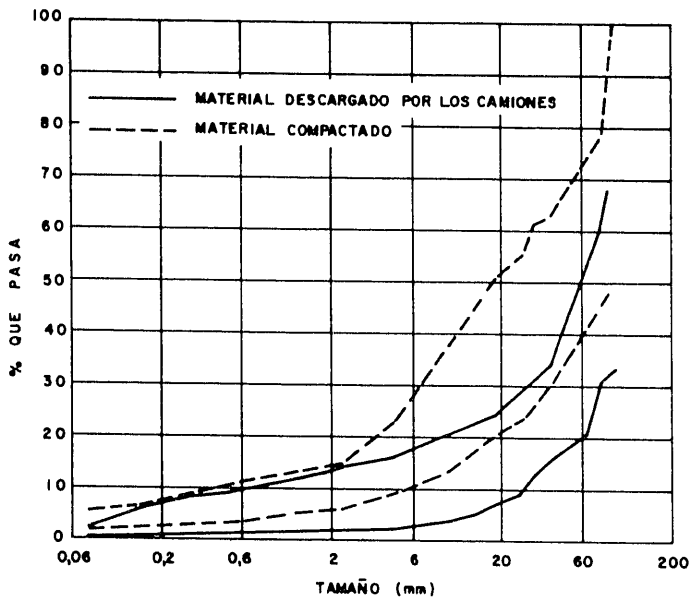


Figura 1.—Granulometría obtenidas en diversas presas con escollera de baja resistencia.

En total hemos citado en los párrafos anteriores 11 presas. En las otras seis presas incluidas en la tabla I los taludes son perfectamente normales.

3. GRANULOMETRIAS

La figura 1 muestra algunos de los ensayos granulométricos efectuados en escolleras de la tabla I.

Fijándose en los ensayos efectuados en la presa de Bailey puede verse como puede variar la granulometría del material excavado y del material compacto. En la mayoría de los casos, sin embargo, no se especifica cuándo se realizó el ensayo granulométrico, aunque creemos que debe entenderse que se realizó antes de compactar.

En la figura 2 puede verse que la escollera de la presa de Martín Gonzalo no tiene peor granulometría que muchas de las escolleras utilizadas en otras presas, y que el aumento de finos producido por la compactación es mucho menor que en la presa de Bailey.

4. DENSIDADES Y POROSIDADES

En la tabla I se indican las densidades secas obtenidas en las presas consideradas en este artículo.

Oscilan entre menos de 1,90 t/m³. en la escollera de lutita de Balderhead y más de 2,30 en Kangaroo y Llyn Brianne.

En todos los casos salvo en Balderhead la densidad seca fue ≥ 2 t/m³.

Las porosidades oscilan entre el 15 y el 16 por 100 de Llyn Brianne y Kangaroo y el 31 por 100 de Balderhead.

Como término comparativo, en la Presa de Martín Gonzalo se han conseguido densidades secas del orden de 2,05 t/m³.

5. COMPACTACION

La presa alemana de Bigge se compactó mediante apisonado con placas y pisonos vibratorios de peso estático comprendido entre tres y cinco toneladas, con espesores del orden del metro.

Las presas de Eggberg, Bailey y Steinbach se compactaron con rodillo de neumáticos con espesores comprendidos entre 0,3 y 0,9 metros.

Las presas de Höljes, Scotts Peak, Kangaroo, Winscar, Piedras, Llyn Brianne, Scammonden, Balderhead y Revin se compactaron total o parcialmente con rodillo vibratorio de peso estático entre 3 y 13,5 toneladas. El número de coberturas osciló entre dos y ocho (para tres toneladas), con espesor de capas entre 0,4 y 1,7 metros (para rodillo de 13,5 toneladas).

En la presa de Muddy Run se comprobó que un rodillo vibratorio de 20 toneladas no era efec-

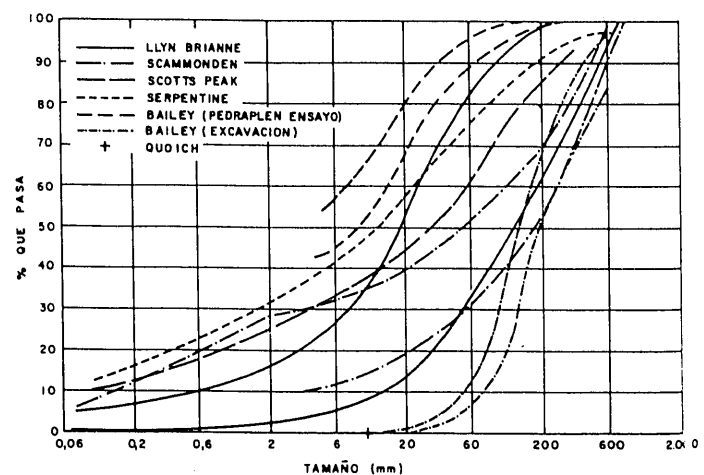


Figura 2.—Escollera de la presa de Martín Gonzalo.

tivo para compactar el esquisto (de sano a meteorizado) y se utilizó un tractor de 20 toneladas.

Por el contrario en Balderhead se compactó inicialmente con cuatro pasadas de un «grid roller». Como las densidades in situ obtenidas por este método no se consideraron satisfactorias, se sustituyó por la compactación con dos pasadas de un rodillo vibratorio de 8,5 toneladas en capas de 0,76 metros.

6. RESISTENCIA

Como señalan Penman y Charles (1976) la resistencia en presiones efectivas de escollera de roca blanda puede ser casi tan alta como la de una escollera de roca sana.

En la arenisca de Scammonden se midieron valores de ϕ' de 49° para una presión externa efectiva de 1 kp/cm^2 y de 37° para una presión de 17 kp/cm^2 . En las lutitas de Balderhead $\phi' = 39^\circ$ para $\sigma'_3 = 0,8 \text{ kp/cm}^2$ y $\phi' = 35^\circ$ para $\sigma'_3 = 1,7 \text{ kp/cm}^2$.

Ensayos de corte directo in situ en los esquistos de Muddy Run dieron valores de $\phi' = 40^\circ$ para $\sigma' < 1 \text{ kp/cm}^2$ y 34° para $\sigma' = 3 \text{ kp/cm}^2$.

En las pizarras y grauwackas voladas de Martín Gonzalo se han obtenido valores de ϕ de 46 a 48° para presiones efectivas bajas y de 40 a 44° para σ' del orden de 4 kp/cm^2 .

En ensayos efectuados anteriormente con escollera ripada, los parámetros encontrados fueron (Justo y Manzanares, 1983):

$$\begin{array}{ll} c' = 8 \text{ t/m}^2 & c' = 0 \\ \phi' = 32^\circ & \phi' = 45^\circ \\ 1 \text{ kp/cm}^2 < \sigma' < 6 \text{ kp/cm}^2 & \sigma' < 1 \text{ kp/cm}^3 \end{array}$$

7. PERMEABILIDAD

Ensayos de permeabilidad in situ han dado valores de k del orden de 10^{-3} cm/s en Balderhead.

En Llyn Brianne se midió un coeficiente de permeabilidad de 3×10^{-1} en el pedraplén de ensayo y de 3×10^{-3} a $9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ en la presa.

En Scammonden los valores fueron de 1 cm/s y $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$.

En Muddy Run se obtuvo un valor mínimo de 10^{-1} cm/s .

Ensayos de permeabilidad in situ realizados en la presa de Martín Gonzalo indican que el material drena libremente (free draining). En los ensayos de permeabilidad in situ realizados anteriormente en un pedraplén de ensayos con escollera ripada se encontraron valores de k entre 3×10^{-4} y 10^{-1} cm/s .

8. COMPRESIBILIDAD

En la tabla II se incluyen los módulos edométricos de algunas de estas presas durante la construcción. Los valores se han obtenido dividiendo el peso por unidad de superficie de la escollera situada sobre un punto de una capa por el asiento unitario de la capa en dicho punto.

Siempre que ha sido posible se han hallado los valores del módulo de deformación en puntos situados bastante hacia el interior de la presa, con objeto de no hallarnos muy lejos de las condiciones del edómetro.

El módulo edométrico varía de un punto a otro con la carga, por lo cual los valores de la tabla II deben tomarse tan sólo como valores medios.

Como puede verse no parece que exista relación alguna entre este módulo edométrico y la densidad seca o las granulometrías de la figura 1.

Sí parece influir fuertemente el tipo de roca. Cuando las partículas son de cuarcita el módulo es muy alto. Las areniscas, aunque sean friables, dan módulos en general, aceptables. Esto mismo es señalado por Westenberger (1967) al comparar las presas de Eggberg y Steinbach. La diferencia de módulos entre Scammonden y Winscar habría que atribuirla, en principio, al elevado espesor de capa utilizado en Winscar (1,70 metros), pues se trata de rocas de la misma serie. Ensayos de laboratorio realizados en un edómetro de gran tamaño indicaron que la escollera de Winscar es algo más compresible (Penman et al., 1982), pero la diferencia no es tan alta como la que se indica en la tabla II.

A pesar de lo que indican Wilson y Marano (1968), es evidente que la presa de Muddy Run

TABLA II

Módulos edométricos medidos, durante la construcción, en presas construidas con escollera de baja resistencia

Nombre	Material	ρ_d (t/m ³)	q_u (kp/cm ²)	E_{oed} (kp/cm ²)
Serpentine	Cuarcita y esq.			1.100-1.500
Eggberg	Ar. friable y gn. alterado			760
Bigge	Lutita y grau-wacka arcillosa			450
Scammonden	Ar. friable	2,02	550-800	430
Steinbach	Esq. alterado			370
Scotts Peak	Argilita muy blanda	2-2,2	80-300	350
Llyn Brianne	Fangolita pizarrosa	2,35	350-1000	300-333
Balderhead	Lutitas	1,84		300
Winscar	Ar. carbonífero	2,03		260
Muddy Run	Esq. micáceo de sano a meteorizado.	2,00		100

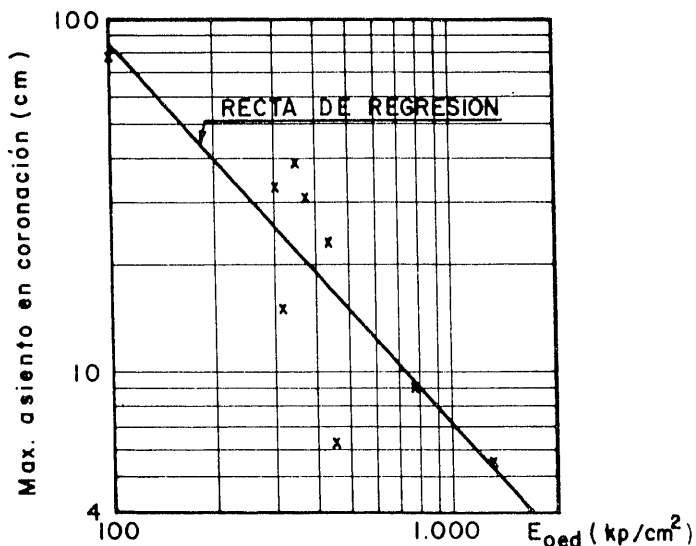


Figura 3. — Correlación entre el máximo asiento postconstructivo y el módulo edométrico durante la construcción.

TABLA III

Asientos postconstructivos máximos en coronación en presas con escollera de roca de baja resistencia

Nombre y fecha de terminación	Máx. asiento en coronación (cm)	Tipo de roca
Kangaroo Creek (1969)	4,3	Esquisto blando.
Holjes (1961)	4,9	De arcillosa y de pequeño tamaño a dura y grande.
Serpentine	5,6	Cuarcita y esquistos.
Bigge (1962)	6,3	Lutita y grau-wacka arcillosa.
Revin (1973)	7,5	Esquisto.
Eggberg (1964)	~9	Ar. friab. y gn. alterado
Llyn Brianne (1971)	15,0	Fangolita pizarrosa
Piedras (1968)	18,0	Pizarra y grau-wacka
Scammonden (1969)	23,0	Arenisca friable.
Steinbach (1963)	31,0	Esquisto alterado.
Balderhead (1965)	33,0	Lutitas.
Misakubo	34,0	Arenisca, pizarra silúrica, lutitas.
Scotts Peak (1972)	38,8	Argilita muy blanda.
Muddy Run (1966)	78,3	Esq. micáceo de sano a meteorizado.

no quedó debidamente compactada con el tractor de 20 toneladas.

9. ASIENTOS POSTCONSTRUCTIVOS

Las presas de la tabla I oscilan entre 31,5 (Eggberg) y 105 metros de altura (Misakubo). Para este intervalo se ha comprobado que no existe ninguna correlación entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura de la presa, lo que significa que hay otros factores mucho más importantes que la altura.

La tabla III muestra los asientos postconstructivos máximos en coronación en esas presas.

La figura tres indica que existe una correlación entre el máximo asiento postconstructivo y el módulo edométrico durante la construcción, aunque son de destacar los bajos asientos postconstructivos de las presas de Bigge y Llyn Brianne.

En realidad hay que confesar nuestra impotencia para dar una explicación satisfactoria a

la enorme diferencia entre los asientos postconstructivos de Kangaroo y Muddy Run.

La recta de regresión entre el máximo asien-

to postconstructivo y el módulo edométrico durante la construcción es:

$$\log s \text{ (cm)} = 4,1 - 1,1 \log E_{\text{oed}} \text{ (kp/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

10. PRESIONES INTERSTICIALES EN LA ESCOLLERA

Penman y Charles (1976) señalan que no hubo presiones intersticiales positivas durante la construcción ni en Scamonden ni en Llyn Brianne. En Balderhead fueron pequeñas y se disiparon con rapidez. Como consecuencia de esto consideran que 10^{-3} cm/s es el límite inferior razonable para la permeabilidad que puede ser aceptable en la escollera.

11. COMPORTAMIENTO

La tabla IV indica las filtraciones sufridas por alguna de las presas de la tabla I.

En las de la presa de Muddy Run se incluyen aguas procedentes de manantiales y escorrentía superficial. Se supone que la filtración a través del terraplén es despreciable (v. Wilson y Marano, 1968).

Las filtraciones de la presa de Scott Peak exigieron la reparación a fondo de ésta (Cole y Fone, 1979). La pantalla asfáltica se desgarró en diversos puntos, sobre todo en el contacto de un montículo de grava de baja compresibilidad, situado en el pie de agua arriba, y la escollera compresible del resto de la presa.

La presa de Balderhead presentó un grave problema de erosión interna debido a la colocación de un filtro aguas abajo del núcleo que se apartaba fuertemente de las condiciones de

filtro de Terzaghi (v. Ripley, 1978). El problema no tuvo nada que ver con la compresibilidad de la escollera.

En la presa de Piedras, con motivo de una pequeña riada durante la ejecución de las placas, sin consecuencias ostensibles en el cuerpo de presa, se produjeron unos primeros asientos con agrietamiento de unas placas en la proximidad de la junta perimetral. Esta advertencia natural llevó a ligeras modificaciones de la forma y espesores de dicha junta, en sentido de reforzarla (Dirección Gral de Obras Hidráulicas, 1973a).

También nos han llegado noticias de que la pantalla de la presa de Bailey se ha agrietado, sin que sepamos con exactitud los detalles del daño, aunque parece que están relacionados con una mala compactación del material de aguas arriba de la presa.

Así pues, de las presas de la tabla I, sólo tres, han sufrido daños que podrían estar relacionados con la alta compresibilidad de la escollera (todas ellas con pantalla). De ellas, sólo en Scotts Peak se ha comprobado esto fehacientemente. Ya se ha hablado del problema de Balderhead. En las 12 presas restantes el comportamiento ha sido totalmente satisfactorio.

12. ENSAYOS DE CARGA

Hemos visto que el problema principal que pueden presentar las escolleras consideradas en este artículo es el problema de la compresibilidad.

Los controles de compactación se han aplicado al tipo de compactador, espesor de tongada, número de pasadas, densidad seca o porosidad y humedad.

En muy raras ocasiones se han utilizado los ensayos de placa de carga como control de compactación en presas de escollera.

En la presa de Iril Emda (Guilhamon y Castelnau, 1955) se utilizó este sistema para decidir el sistema de compactación. Los módulos edométricos obtenidos en medidas de deformaciones de la presa durante la construcción fueron más del doble de los módulos de elasticidad obtenidos en ensayos de placas de carga. La relación entre módulos de elasticidad fue de 1,7 aproximadamente.

TABLA IV

Filtraciones recogidas en algunas de las presas de la tabla I

PRESA	FUGAS
Kangaroo	9
Muddy Run	85
Piedras	110
Scotts Peak	125
	6 tras reparación

ROCAS DE BAJA RESISTENCIA EN ESPALDONES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Ensayos de placa de carga se utilizaron también como control de compactación en la presa de Svartevann (Valstad y Strom, 1975).

En la presa de Martín Gonzalo se ha utilizado desde el principio el ensayo de placa de carga como control de compactación. Los materiales son pizarras y grauwickas.

Se han calculado dos valores del módulo de deformación. Uno E_1 , entre la presión de asiento (generalmente $0,2 \text{ kp/cm}^2$) y unos 5 kp/cm^2 . El segundo, E_2 , entre cinco y diez kp/cm^2 . Los valores medios se indican en la tabla V.

En descarga y recarga se ha hecho lo mismo, siendo los valores correspondientes del módulo de deformación E_3 y E_4 .

Se apreció poca diferencia entre compactar con ocho pasadas en capas de 40 centímetros, con diez pasadas en capas de 60 centímetros y hacerlo con seis pasadas en capas de 80 centímetros. Se utilizó un rodillo vibratorio de diez toneladas.

Los diversos valores del módulo de deformación para distintos tipo de escollera y tamaños

de placa reflejan probablemente diversas humedades de compactación debidas a las condiciones meteorológicas.

En descarga el módulo de deformación es muy superior al de carga, sobre todo en las zonas más cargadas de la presa. Los módulos de recarga son semejantes a los de descarga para el primer intervalo de tensiones (0 a 5 kp/cm^2). En el segundo intervalo (5 a 10 kp/cm^2) los módulos de recarga son intermedios entre los de carga y descarga.

Se deduce de todo esto que los posibles daños a una pantalla de hormigón armado se producirán probablemente en el primer llenado del embalse. Tras una reparación posterior, los daños subsiguientes serían muy pequeños.

13. ENSAYOS QUE REFLEJEN LA CALIDAD DE UNA ROCA COMO ESCOLLERA

Marsal (1975) recomienda ensayos como la absorción, desgaste de los Angeles y resistencia a la acción del sulfato sódico para conocer

TABLA V
Valores medios de deformación en ensayos de carga en la presa de Martín Gonzalo

Lugar	Escollera	Humedad	N.º de ensayos	Diám. de placa (cm)	Carga		Recarga		Tongada
					E_1 kp/cm ²	E_2 kp/cm ²	E_3 kp/cm ³	E_4 kp/cm ²	
Pedraplén de ensayo .	Ripada	Compactación	2	30	280				
Pedraplén de ensayo ..	Ripada	Saturado	3	30	190				
Pedraplén de ensayo ..	Volada	Compactación	12	30	225	310			
Pedraplén de ensayo ..	Volada	Saturado	12	30		225			
Presa	Volada	Compactación	10	30	200	330	600*	2.800*	1. ^a a 4. ^a
Presa	Volada	Saturado	5	30	135	225	515*	2.400*	1. ^a a 4. ^a
Presa	Volada	Compactación	14	45	340	860			5. ^a a 9. ^a
Presa	Volada	Saturado	2	45			560	820	6. ^a
Presa	Volada	Compactación	9	45			830	1.300	6. ^a a 9. ^a
Presa	Volada	Compactación	7	60	190	115			
Presa	Volada	Compactación	6	60			570	360	12. ^a a 15. ^a
Presa	Volada	Compactación	3	40	280	110	875	430	
Cuadrada									
Medias		Compactación			240	265	600*	2.800*	
Medias		Compactación					725	590	
Medias		Saturado			150	225	515*	2.400*	
Medias		Saturado					560	820	

* En descarga.

ROCAS DE BAJA RESISTENCIA EN ESPALDONES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

TABLA VI

Valores de los índices de solidez de la roca obtenidos en algunas presas con escollera blanca. Entre paréntesis valor máximo.

PRESA	ROCA	Humedad-Sequedad (%)	Absorción (%)	Sulfato sódico (%)	Los Angeles (%)
Kangaroo (Australia).....	Esquistos		2,4 (3,0)	45 (67)	
	Gneiss		2,3 (3,4)	17 (44)	
Martín Gonzalo (España).....	Pizarra	3	2,3	52	53
	Grauwacka		1,8	21	77
Las Piedras (Méjico).....	Tobas		2,1	74	36
Yeguas (España).....	Pizarra			3-10	37-47
	Grauwacka			1,5-2,0	26

de forma preliminar la solidez de la escollera.

En la tabla VI se incluyen los valores medios de estos índices y del de humedad-sequedad para diversas presas.

Creemos que de ellos deben retenerse, por ahora, la resistencia a la acción del sulfato sódico, como índice de la meteorización de una roca, y el ensayo de desgaste de los Angeles como índice de su fracturación.

14. CALCULO DE LAS DEFORMACIONES DE LA PRESA Y DE LA PANTALLA

A partir de los módulos de elasticidad obtenidos en ensayos de carga (v. apartado 12), de los módulos edométricos obtenidos en edómetros de gran tamaño (Penman y Charles, 1976

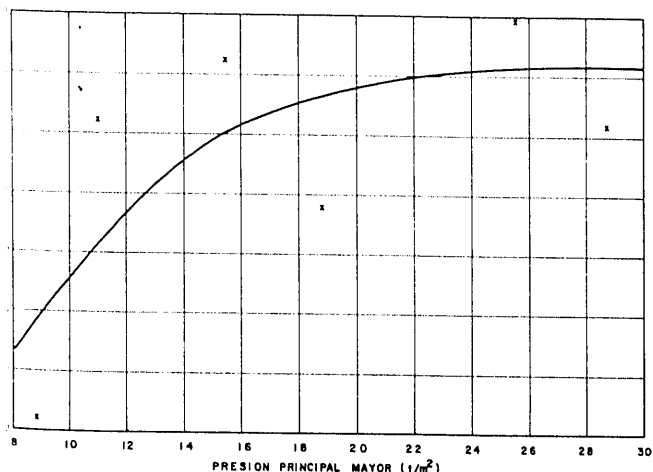


Figura 4. — Módulo edométrico obtenido a partir de los deformómetros de asiento en función del nivel de tensiones.

y 1978; Justo y Saura, 1983) o en ensayos de corte directo in situ (*) (Wilson y Marano, 1968) se pueden hallar las deformaciones de la presa durante la construcción.

Utilizando los valores anteriores o los deducidos de medidas en presa durante la construcción, se pueden deducir las deformaciones de la presa y el elemento impermeable al embalsar (Justo y Saura, 1981 a y b, 1983 y 1984).

15. DEFORMACIONES DE LA PRESA DE MARTIN GONZALO DURANTE LA CONSTRUCCION

Se están midiendo en esta presa las deformaciones durante la construcción mediante deformómetros de asiento e inclinómetros.

En la figura 4 se muestra la relación entre el módulo edométrico deducido a partir de las lecturas de los deformómetros y el nivel de tensiones (columna de pedraplén sobre la capa considerada). Parece que el módulo edométrico crece con el nivel de tensiones, por lo cual, por el momento, no se puede establecer una comparación con los módulos de elasticidad deducidos de ensayos de carga, aunque parece que estos últimos son mayores.

El módulo edométrico se ha calculado a partir de la fórmula simplista:

$$E_{oed} = \frac{\gamma z H}{S}$$

(*) En este último caso el módulo edométrico durante la construcción fue del orden del doble del obtenido en el ensayo.

siendo:

γ = peso específico

z = altura de pedraplén sobre la parte superior de la capa considerada.

H = espesor de la capa considerada.

s = asiento de la placa superior respecto a la inferior en la placa considerada.

16. CONCLUSIONES

Aunque es deseable, siempre que se pueda, utilizar, en espaldones de presas, escollera de roca sana, esto puede suponer, en ocasiones, tal incremento de costes que hagan inviable la construcción de la presa.

La mayoría de las escolleras de roca blanda utilizadas hasta el momento en presas han sido perfectamente satisfactorias desde los puntos de vista de resistencia y permeabilidad.

Han existido, a veces, importantes problemas de compresibilidad. Ni la granulometría ni la densidad han sido, hasta el momento índices importantes para catalogar la futura compresibilidad de una escollera.

El método de compactación más usado ha sido el rodillo vibratorio de 8 a 11,5 toneladas de peso estático, con espesores de capa entre 80 centímetros y un metro, con un número de pasadas comprendido entre cuatro y seis. El rodillo de neumáticos, el tractor y el grid roller no ha dado, en ocasiones, el resultado apetecido.

Es posible que algunos ensayos utilizados para catalogar la calidad de áridos, como la resistencia a la acción del sulfato sódico o el ensayo de desgaste de los Angeles estén correlacionados con la futura compresibilidad de la escollera.

La mejor forma de medir la compresibilidad de una escollera es, probablemente, mediante ensayos de carga realizados en un pedraplén de ensayo, aunque todavía no existe suficiente experiencia para conocer la relación entre el módulo de deformación obtenido a partir de estos ensayos y el que define las deformaciones de la presa.

Según J. D. Cooke el módulo de deformación horizontal de una presa puede ser hasta tres veces el vertical. Sin entrar en polémica so-

bre este punto, tanto la experiencia acumulada hasta ahora como la razón parecen indicar que esto no es así, y que desde luego, el módulo de deformación que define las deformaciones de la presa no está, ni mucho menos, en esta proporción con el deducido de ensayos de carga verticales, como lo demuestran los análisis de las presas de Iril Emda, Infiernillo, Venemo, Scammonden y Llyn Brianne. La misma opinión es sostenida por Eisenstein y Law (1979).

El módulo de deformación en recarga es mucho mayor que en carga. Por ello es probable que las presas construidas con estos materiales, si sufren daños en el elemento impermeable, esto ocurra en el primer llenado del embalse, y que tras su reparación no vuelvan a producirse daños de importancia.

El módulo de deformación en primera carga nos permite estimar mediante la ecuación uno el máximo asiento postconstructivo, que está a su vez correlacionado con los posibles daños al elemento impermeable (Justo, 1973 a y b).

Por otro lado, los posibles daños al elemento impermeable se pueden estudiar mediante una aplicación del método de elementos finitos. En el caso de presas con pantalla de hormigón armado queda por resolver el problema de una adecuada modelización de las juntas.

BIBLIOGRAFIA

1. ASAO, I.: «Design and construction of Misakubo dam». 'World Dams Today, 70'. The Japan Dam Ass, 1979.
2. CARLYLE, W. J.: «The design & performance of the core of Brianne dam». 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 3:431-455, 1973.
3. COLE, B.A. y FONE, P. J. E.: «Repair of Scotts Peak dam, Tasmania». 13.º Cong. Grandes Presas, Nueva Delhi, Q. 49, R. 15, 211-231, 1979.
4. DIRECCION GRAL. DE OBRAS HIDRAULICAS, 1973a.: «Comentario sobre presas de materiales sueltos con pantalla en España», 1973a.
5. DIRECCION GRAL. DE OBRAS HIDRAULICAS: «Un testimonio de las Presas Españolas», 1973b.
6. EISENSTEIN, Z., y LAW, S. T. C.: Influence of anisotropy on stresses and displacements in embankments». 3er. Cong. Int. Métodos Numéricos en Geotecnia, Aachen, 2:709-715.
7. FITZPATRICK, M. D.: «Scotts Peak dam cracking

ROCAS DE BAJA RESISTENCIA EN ESPALDONES DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

- of bituminous concrete face». 12.º Cong. Grandes Presas, Méjico, 5:54-60, 1976.
8. GOMEZ LAA, G.; ALONSO FRANCO, M., y ROMERO, J. L.: «Reflections on some incidents in Spanish dams». 13.º Cong. Grandes Presas, Nueva Delhi, Q.49, R.47, 721-740, 1979.
 9. GONZALEZ y DIEZ DE LA CORTINA, A.: Información verbal, 1985.
 10. GOOD, R. J.: «Kangaroo Creek dam. Use of a weak schist as rockfill for a concrete faced rockfill dam». 12.º Cong. Grandes Presas, Méjico, 1:645-665, 1976.
 11. GROUPE DE TRAVAIL DU COMITE FRANCAIS DES GRANDS BARRAGES: «Utilisation de roches de qualité médiocre pour la construction de digues». 12.º Cong. Grandes Presas, Méjico, 1:417-436, 1976.
 12. GUILHAMON, J., y CASTELNAU, H.: «Tassements des matériaux constitutifs et de la fondation (Barrage de L'Iril-Emda)». 5.º Cong. Grandes Presas, París, 3:389-454, 1955.
 13. JUSTO, J. L.: «Deformación de las presas de escollera». Tesis doctoral, Fundación Juan March, 1968.
 14. JUSTO, J. L.: «The cracking of earth and rockfill dams». 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 4:921-945, 1973a.
 15. JUSTO, J. L.: Discusiones 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 5:523-528, 1973b.
 16. JUSTO, J. L., y MANZANARES, J. L.: «Informe sobre las características de los materiales utilizables en la presa de Martín Gonzalo y su repercusión en el diseño de la misma», 1983.
 17. JUSTO, J. L., y SAURA, J.: «Behaviour of Venemo dam by three-dimensional FE». 11.º Cong. Int. Mec. Suelo, Estocolmo, 3:449-452, 1981a.
 18. JUSTO, J. L., y SAURA, J.: «Análisis del comportamiento de la pantalla de la presa de Venemo, mediante elementos finitos tridimensionales». Bol. Lab. Carreteras y Geotecnia y Bol. Soc. Esp. Mec. Suelo, 148:29-37, 1981b.
 19. JUSTO, J. L.; SAURA, J., y SEGOVIA, F.: «Un método de elementos finitos tridimensional para el estudio del comportamiento de presas de materiales sueltos con núcleo delgado durante la construcción y el llenado del embalse». An. Ing. Mecánica, Madrid, 2:1:1-7, 1984.
 20. KENNARD, M. F.; PENMAN, A. D. M., y VAUGHAN, P. R.: «Stress and strain measurements in the day core at Balderhead dam». 9.º Cong. Grandes Presas, Estambul, 3:129-151, 1967.
 21. MARSAL, R. J.: «Resistencia y compresibilidad de enrocamientos y gravas». Cap. 10 del libro «Presas de Tierras y Enrocamiento». Limusa, Méjico, 1975.
 22. PENMAN, A. D. M., y MITCHELL, P. B.: «Initial behaviour of Scammonden dam». 10.º Cong. Grandes Presas, 1:723-747, 1970.
 23. PENMAN, A. D. M., y CHARLES, J. A.: «Effect of the position of the core on the behaviour of two rockfill dams». 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 3:315-339, 1973.
 24. PENMAN, A. D. M. y CHARLES, J. A.: «The quality and suitability of rockfill in dam construction». 12.º Cong. Grandes Presas, Méjico, 1:533-556, 1976.
 25. PENMAN, A. D. M. y CHARLES, J. A.: «Constructional deformations in a rockfill dam». «Dams and Embankments». BRE Building Research Series, 6:18-45, 1978.
 26. PENMAN, A. D. M.; CHARLES, J. L., y HUMPHREYS, J. D.: «Sandstone rockfill in two dams». 14.º Cong. Grandes Presas, Río de Janeiro, Q.55, R.16, 279-281, 1982.
 27. RIPLEY, CH. F.: «Revelstoke project-filter zones for and stage upstream cofferdam and main earth dam». Informe interno, 1978.
 28. THOMAS, H. H.: «The Engineering of Large Dams». Wiley, Londres, Vol. II, 1976.
 29. VALSTAD, T., y STROM, E.: «Investigation of the mechanical properties of rockfill for the Svartevann dam, using triaxial, oedometer and plate bearing tests». Norwegian Geotechnical Institute, Publication 110, 3-8, 1976.
 30. VITHALANI, J., y BEENE, R. R. W.: «The use of soft rock for R.D. Bailey dam». 12.º Cong. Grandes Presas Méjico, 1:321-335, 1976.
 31. VITHALANI, J.: Discusiones. 12.º Cong. Grandes Presas, Méjico, 5:91-95, 1976.
 32. WESTENBERGER, F.: «Measurement of settlements and displacements, in soil embankments». 9.º Cong. Grandes Presas, Estambul, 5:653-682, 1967.
 33. WILKINS, J. K.: Discusiones. 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 5:406-410, 1973.
 34. WILLIAMS, H., y STOTHARD, J. N.: «Rock excavation and specification trials for Lancashire-Yorkshire Motorway, Yorkshire (West Riding) section». Proc. I.C.E., 36:607-631, 1967.
 35. WILSON, S. D., y MARANO, D.: «Performance of Muddy Run embankment». J. Soil Mech., 94:SM4:859-881, 1968.