

Las presas de escollera con pantalla de hormigón armado^(*)

Por J. L. DE JUSTO ALPAÑES

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones Especiales
de la E.T.S. de Arquitectura.

A. GONZALEZ MARTINEZ

Arquitecto. Universidad de Sevilla.

Se ha pasado revista a 48 presas de escollera con pantalla de hormigón armado.

Se han encontrado correlaciones entre el máximo asiento en coronación o el máximo corrimiento normal a la pantalla y las fugas a través de ésta.

Se dan regresiones para estimar estas dos deformaciones.

Se hacen consideraciones sobre algunos datos de interés para el proyecto de este tipo de presas.

1. HISTORIA

En este artículo el término pantalla se refiere a un elemento impermeable de material manufacturado, situado aguas arriba de la presa.

Como precedente se puede citar la presa española de La Granjilla, construida en 1660 (v. Adalid et al., 1973), de 13 m de altura, con paramentos (H:V) 0,16:1 agua arriba y 1:1 aguas abajo. Se trata de un muro-pantalla de sillería con mortero de cal, de espesor 1,60 m, y espaldón de tierras y escollera. Es más bien un muro de mampostería apuntalado por escollera.

Steele y Cooke (1969) sitúan el origen de las presas en las que el elemento resistente es fundamentalmente la escollera en las Montañas de Sierra Nevada en California. En la década que comienza en 1850 los mineros de oro precisaban presas en lugares inaccesibles en el granito glaciar de la Sierra, donde no había tierra, pero sí árboles y roca. Estas circunstancias combinadas con el conocimiento del uso de explosivos por dichos mineros condujeron lógicamente a las presas de escollera. Las primeras presas fueron de gaviones de madera rellenos de roca, lo cual permitía taludes empinados; la presa English construida en 1856 tenía 24 m de altura.

La presa de Bowman, de 29,3 m de altura,

escollera vertida y pantalla de madera, se construyó en 1876.

Por lo que respecta a España la primera presa en la que el elemento resistente es principalmente escollera es la de Domico (Adalid et al., 1973), construida en 1905, originalmente de 19,70 m de altura, con taludes 1:1 aguas arriba, y 1, 2:1 aguas abajo. La pantalla era en realidad un muro de mampostería de 1 m de grueso en la base y 0,50 m en coronación, apoyada sobre una zona de mampostería en seco de 6 m en la base y 1,50 m en coronación. Debía tener filtraciones, porque fue reparada en 1962 con una tela asfáltica protegida por una pantalla de hormigón de 30 cm.

La presa más antigua con pantalla de hormigón armado que tenemos recogida es la de Morrena (Cooke, 1984), de 54 m de altura, construida en 1895, con taludes 0,5 a 0,9:1 aguas arriba y 1,3:1 aguas abajo, de escollera vestida (granito) en la que el espesor de pantalla obedece a la ecuación:

$$e \text{ (cm)} = 0,23 + 0,003 H \text{ (cm)} \quad [1]$$

La cuantía de armaduras fue del 0,5 por 100 en cada dirección.

La presa española de Urdiceto, de 25,4 m de altura y construida en 1930, tiene taludes aguas arriba 1:1 en su parte inferior y 1:2 en su parte superior; aguas abajo el talud es 1,4:1. La pan-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1986.

talla era un muro de hormigón en masa de 4 m de espesor en su parte baja y 1,30 m en su parte alta. El muro pantalla descrito se agrietó con el transcurso del tiempo, dando lugar a filtraciones que si bien no eran peligrosas si suponían una apreciable pérdida de energía (Adalid, et al., 1973).

La presa de Bucks Creek se construyó en 1928, con 39 m de altura. Es interesante porque la pantalla de hormigón armado no tiene juntas y la armadura pasa continuamente de un lado a otro. Los taludes son 1,4:1 aguas arriba y 1,5:1 aguas abajo. El espesor de roca colocada oscila entre 90 y 180 cm. La pantalla no presenta grietas y las filtraciones han sido despreciables (Steele y Cooke, 1960).

El hormigón armado se utiliza por primera vez en España en 1934 en la presa de Plandescún, pero sobre una pantalla de hormigón en masa y mampostería ciclópea pobre. La primera presa de concepción moderna y cierta altura es la del Piedras (V. tabla I).

El primer empleo de escollera compactada que tenemos recogido corresponde a la presa alemana de Schwammenauel, de núcleo inclinado. La primera fase de esta presa, de 57 m de altura, se terminó en 1983. El relleno, escollera y grava con arcilla, se compactó con placas apisonadoras de 2,5 t, en capas de 1 a 1,5 m.

El primer empleo en presas con pantalla corresponde a la presa sueca de Nissaström (v. tabla I), de 15 m de altura, construida en 1950, compactada con rodillo de 10 t. y rodillo vibratorio de 1,6 t., en capas de 45 a 60 cm. Debido a la intensa compactación y a la escasa altura de presa el movimiento vertical postconstructivo de la coronación fue hacia arriba, de 7 mm, siendo nulo el movimiento horizontal.

2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Las ventajas e inconvenientes de las presas con pantalla han sido claramente indicadas por Sherard et al. (1963).

Refiriéndonos a las presas con pantalla de hormigón armado, sus ventajas han sido debidamente consideradas por Steele y Cooke (1969).

Cuando la cimentación es adecuada y existe roca en las proximidades de la presa, la presa con pantalla de hormigón armado suele ser la más económica. Ninguna presa de este tipo ha sufrido una rotura total (v. Thomas, 1976). Su talón de Aquiles está en las filtraciones, que han oscilado entre prácticamente nada y 11,3 m³/s en la presa de New Exchequer (v. Steele y Cooke, 1969).

El problema de estas presas es fundamentalmente un problema de deformabilidad: las deformaciones de la escollera pueden producir rotura de juntas y fractura de losas de la pantalla. Las filtraciones no han afectado a la estabilidad de la presa, pero las pérdidas de agua han sido, en ocasiones, importantes. Los movimientos que ocasionan estas filtraciones ocurren principalmente durante y poco después del primer llenado (v. Justo et al., 1985). Una vez reparadas han cesado, excepto para presas por encima de los 75 m de altura (v. Steele y Cooke, 1969).

La experiencia demuestra que cuando han ocurrido filtraciones el problema ha sido embarazoso desde el punto de vista técnico, pero el coste de las reparaciones ha sido despreciable comparado con el ahorro que supuso la construcción de una presa de este tipo.

El objeto de este artículo es examinar desde un punto de vista crítico la posibilidad de que se produzcan estas filtraciones e intentar cuantificarlas.

3. RECOPIACION DE DATOS DE PRESAS CON PANTALLA DE HORMIGON

En la tabla I se han recopilado, por orden alfabético, todas las presas de escollera con pantalla de hormigón que se han podido encontrar, de las que existen datos de deformaciones o al menos datos cuantitativos de filtraciones. Asimismo figuran en dicha tabla todos los datos de dichas presas de interés para este estudio.

En numerosos casos los taludes son valores medios.

En la mayoría de las presas de esta tabla en las que no se indica el terreno de cimentación, éste es roca.

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

RECOPIACION DE PRESAS CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO DE LAS QUE SE POSEEN DATOS DE DEFORMACIONES

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 VERTICAL)	CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kg/cm ²)	METODO DE COLOCACION	RELLENO VOL. AGUA	VOL. ESCOLLERA	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	PLACAS (m ²)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION VERTICAL HORIZONTAL			
											cm	cm	cm		
Alto (Alt) Anchicaya 1974		140	1,4		Diorita y hornfels	C. 4 cob. r. vib. 10t	0,6	0,2	2,28	23	14,4	16	0,0037	Max.mov.post.perp. 16 cm(2,5 años) p. simult. pedraplén	13
Bailey 1977		96	2	Ar. y lutitas	Lutitas (85%) y 2 cob. tamping roller con tr. D-8 4 cob. r. neum.	0,61								Estrido der. 1,6:1 " izq. 1,5:1	9
Bakhadda (Bak)		45	0,84		Ar. Bloques tetraédricos desde 10cm hasta 5t. (media 3t.)	Arreglada a mano			32		36,1	27,30,61			6
Bia (Bi) 1949		19	1,2	Ar. fi-surada	Roca s., d. y limpia. Todo uno desde 5 cm hasta 1/4 a 1/3 m ³ .	V. 2,5-3	8				9,1	8,80,46	0,253	Construida en 2 años y 5 meses max.mov.post.perpend. a la p. 15cm tras el per. desembalse	6
Bonito (antes de recrearse en 1943) (B) 1931		28	1,17								19,2	11	0,01		6
Bou Hanifa 1937	P.A. con P.H. de protección	55	0,8-1		Ar.s. y d. y co. Desde 10cm hasta 15t. (tamaño predominante 2-7t.) Sin superficies cóncavas.	Con la grúa; los inerticillos rellenos a mano con piedras.			26-27		6,3			Max.a. total 175cm. (10 años después de la construcción). Fisuras horizontales en la P.H.	6

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

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)	"A" - DTS DISTANCIA HORIZONTAL PARA VERTICAL ARRIBA ABAJADO	CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (MP/cm ²)	METODO DE COLOCACION	ESPESOR CAPAS (cm)	REGADO VOL AGUA	DENSIDAD SECAL (g/cm ³) O POSIBILIDAD (n) TRAS LA COLOCACION	DURACION PEDRA PLANADA (meses)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION	VERTICAL	HORIZONTAL	ANOS DE OBSERVACION			
Breaclach 1960		26,8	1,5 1,5		Micasquisto d. y duradero < 10% < 3/8"	c. por r. vib. de 3t.	0,8	A fondo				= 0	= 0	= 0		Sujeta al 85% de la max.carga hidrostática. Max.mov.perpend. 8-10cm. en la base	6
Cabin Creek (CC) 1966		76	1,3 1,3	Gneiss 1,75 meteorizado	a-a gn. sano a-o gn. meteor.	c. 3 cob.r.vib. 3,5t.	0,6	0				5,2	1,8	0,024	0,5		18
Candes 1966		46	1,4 1,3		g. de buena calidad (340-862)	c. con 6 cob. de r. vib. (8,5-9t.)	1 a-a 1 a-o 2	Parte del caudal del arroyo atravesará la e-superf. de cada capa se limpia con chorro.								P. ejecutada después del pedraplén	6
Cethana (Ce) 1977		110	1,3 1,3		Cu. sano < 610 mm. > 0,3 mm.	c. 4 cob. r. vib. 10t. a-o	1,35 0,9	0,15	2,07	24	6,9	4,1	0,037	0,83	0,017	P. cuando escollera 98 m. Llenado postcons. Apertura de 11,5mm. en la junta perimetral en el pie. Movimientos paralelos a la junta y hacia arriba	4
Cogoti (C) 1939		75	1,6 1,8	Roca firme	E. y gr.	V.					109			8		Asentó 42cm. en el terremoto de 1943.	6

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

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 LA VERTICALIDAD	CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kp/cm ²)	METODO DE COLOCACION	ESPESOR CAPAS (cm)	VOL. AGUA	VOL. ESCOLLERA	DENSIDAD SECA (g/cm ³)	OPOROSIDAD (n)	TRAS LA COLOCACION	DURACION PEDRA PLAFON (meses)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION			AÑOS DE OBSERVACION					
														VERTICAL	HORIZONTAL	%						
Contrada Sabetta (Con)	26			Al. de grano grueso	Roca calcárea s.	V.		Bien							2,1			4	0,012	A. max. perpend.p. 6,5cm.	6	
Courtright (Cou) 1958	96,5	1- Natu 1,3 tal a 1,4		Roca y bolos y gn. (15m pero con porcho (es parte inf. de trecho) g. más exfoliado y meteor.	g. en general muy competente	V. limpieza superf. capas	21 max	7kp/cm ²							85			12		Cons.p. durante pedraplenado. max.mov.perp.p.post. 1,45m.	6	
Dix (Di) 1925	84	1 1,4			cal. (700-1400)	V. E. mayor y mejor a-a.	37 max.	poco	Crecida de 10,9m. durante cons.cruzo presa						127 82 132	1,10 32 36			0,025 0,011	P. construida durante pedraplenado.	6	
Escoubous (Esc) 1953	20	0,8-1	1	Al. en parte		V.									2	7,2 0,36 6	2				6	
Fordyce recrecida (F) 1926	39,6	1 1,4			Granodiorita d. y sin finos	V.	Gran altura.	0							29,3 26,8 0,68 10				< 0,02		6	
Foz de Areia (Fo) 1980	160			B. y brecha b.	Basalto (380-2400)	c. 4 cob.r.vib. 10t.	0,8 1,6	0,25 2,12 25							41			0,7		max. mov.post.perp.p. 69cm.	12	

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

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)		VALORES DE LOS DATOS DE LA PRESA	CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kg/cm ²)	METODO DE COLOCACION	ESPESES CAPAS (m)	REARDO VOL AGUA	VOL ESCOLLERA	DENSIDAD SECA (g/cm ³) O POROSIDAD (n) TRAS LA COLOCACION	DURACION PEDRA (meses)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION				AÑOS DE OBSERVACION						
		HORIZONTAL	VERTICAL										VERTICAL	HORIZONTAL	%	cm						cm	%
Ghrib (Gh) 1935	P.H.	65	0,71 1,25 1		Mar. compresibles y ar. muy poco compresibles, poco cimentadas.	Buena cal. Gran proporción de bloques regulares. 1/3 bloques de 1,5 a 8t. 1/3 bloques de 0,2 a 0,5t. 1/3 bloques de 5 a 200kg.	Arreglada a mano				25-26		18 solo e. y la e. timen- ción.	33,5	0,52 13	A. ci. 14cm.		La p. de hormigón armado cayó, debido a la oxidación de los anclajes de acero. A. ci. post. 17cm. (10,5 años) La p. sufrió algunos desgarramientos locales. Para regularizar a. el par. a-a está formado por una capa de mampostería en seco de 5m. de espesor recubierta de mampostería ciclópea tomada con mortero de grava.	6				
Grandes Patures (Gr. Pat.) 1948	P.A.	20	0,35 1		Morrena G. 20-25m.		Colocada a mano				40 (a-a 20)		4	7	0,35 3			En algunos puntos se elevó la ci. debido a la subpresión	6				
Gréziolles 1951	P.H.	30	1-0,9 0,8		Bolos de g.	G.	V.				22	20		1	8			Al embalsar por 1a. vez se rompió la junta de unión de la p. con la p. de inyección	6				
Irill-Emda (IE) 1954	P.A. P.H.	75	1,6 1,5		Mar. esquistosas	Cal. de derrumbios, semianular (1.000)	C. con r. y a continuación, trineo vib. a-a 1 cob. del trineo centro 2 " " a-o 1 " " 1,00	0,25 0,50 1,00	si				3,6 solo la e.	2,2	0,03 2	3,25 max. a ci. 8,35cm. (con nivel de agua 17m por debajo del fin cons. max.)	0,002	A. post. perpend. p. 9,2cm. (componente vertical). La p. a-a y el ll. del embalse simult. con pedr. A total ci. 3,25 años después del fin cons. 9,4cm.	5 6				
Ishibuchi (Is) 1953	P.A.	53	1,3 1,6		Dacita (1290)		V. primero a-a y después a-o	29 max. presión 7kg/cm ²	2				21	12	0,23 5		≈ 0,019	Max. a. perp. p. debido al 1er. ll.: 40cm.	6				

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

DATOS DE LA PRESA				DATOS DE LA ESCOLLERA										PERIODO POSTERIOR A LA CONSTRUCCION				MOVIMIENTOS DURANTE LA CONSTRUCCION	VELOCIDAD DE LA 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 VERTICAL	CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kp/cm ²)	METODO DE COLOCACION	ESPAZAMIENTO DE CAPAS (m)	GRADO DE ACABADO	VOL. ESCOLLERA	SECCION DE LA ESCOLLERA	SECCION DE LA ESCOLLERA	DURACION PEDRA PLANADO (meses)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL	MOVIMIENTOS VERTICAL HORIZONTAL
Kangaroo Creek (Ka) 1969		59,4	1,3 1,4	Gn. y esq.	Esg. blando	4 cob.r.vib. 10t.	0,9	1	2,34	16	4,3									Estribos 40°-60°	9
Leichhardt 1957		20,5	1,25 1,25		Cu.	V.	< 9	Boquilla de 1" se mojaron las cables gas.	30		0									Solo hay 12 m de agua	6
Lower Bear (Rio de 1952)	Nº 1 (Lo 1)	67	1,3 1,4	G.sólido	Grano-diorita de grano fino (1000-1400) Todo uno entre 1 y 20t. > 50% < 10cm. 5%	V. Esc.	25 65	alta presión					40,3	32	0,48				0,014	A.post.perpend.p. 58cm. en 2 años.Se cerraron todas juntas horiz. excepto la sup.	6
	Nº 2 (Lo 2)	42	1 1,3	"		V. Durante cons. se usó como carretera para llevar material a Nº 1.	42						12	12	0,28				0,009	A.post.perpend.p. 15cm. en 5 años.	
Malpaso (Mal) 1936		78	0,5	1,5	Produc-tos flu con agua a presión arena y gr. ciar en los huecos de la e. (30m. en la sección central).	a-a con grúa y a mano a-o V.							38,4	77	0,99	11			0,02	A.ci. 1,10m., especialmente durante cons.	6
New Exchequer (New) 1967		149	1,4 1,4		Andesita dura (2100)	c. 4 cob.r.vib. 10t. a-o V. Ady. p.< 38cm. r.vib. 0,61 no 10t.	1,2-3 18 2	0,5					40	12					p.durante pedr. Junta con est. 0,02	Incorpora pie a-a presa gravedad 95m. Est.dcho. 1,5:1 (vert.)	6 18
Nissastrom 1950		15	1 1,4	Tierra 3-4m.	Voladura de túnel	c.con r. de 10t.(reducción espesor 12%), y a continuación con trineo vib. de 1,6t. (reducción 5%). Los huecos grandes se rellenaron con piedra.	0,45-0,6	>5	30		- 0,7	0	0	4							6
Naussac 1981		50	1,4	1,4	Granulit Gneiss <15% tay gneiss. <5mm. 0,8m. max.	C. 6 cob.r.vib. 15t.	1	0	2,08	7											

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

DATOS DE LA PRESA				DATOS DE LA ESCOLLERA										PERIODO POSTERIOR A LA CONSTRUCCION				CONSTRUCCION DURANTE LA	VELOCIDAD UNITARIA DEL ABSENTE VERTICAL, COMBINACION AL FINAL DEL PERIODO DE OBSERVACION (% ALTURA POR AÑO)	OBSERVACIONES	REFERENCIAS						
NOMBRE Y FECHA DE TERMINACION	TIPO	ALTURA (m)		VALORES (DISTANCIA HORIZONTAL PARA: ABRIL AGOSTO)		CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kg/cm ²)	METODO DE COLOCACION	CAPACIDAD (m ³)	VOL. ESCOLLERA	VOL. AGUA	DENSIDAD SECA (g./cm ³)	DENSIDAD TRAS LA COLOCACION		DURACION (días)	MOVIMIENTOS MAXIMOS EN CORONACION				MOVIMIENTOS VERTICAL	MOVIMIENTOS HORIZONTAL	MOVIMIENTOS ANGULARES	AÑOS DE OBSERVACION				
		ABRIL	AGOSTO	ABRIL	AGOSTO								cm	cm		%	cm	%									
Nozori (Nz) 1956		44	1,3	1,5			Andesitas y porfilitas (0,2-2t.) (2.400-3.200)	V.	13-17	4	12kg/cm ²				17	10,5	11	0,25	1,5				0,124	Cons.p.durante pedr. A.max. normal a lap. ≈28cm. A.roca colocada a mano desde fin pedr. en 25 días: max.(coronación 4,5cm.)	6		
Paloona (Pal) 1970		40	1,33	1,33			Pedral y pedernal arc.	r.vib. 10t. a-o	0,61 1,35							6				3			0,0175			19	
Paradela (Pa) 1958		110	1,3	1,3			G.	V. Limpieza superf. hasta 6m. a-a y 2m.a-a max.	66	4						100 130	50 50		13 13				< 0,02	Ll.embalse simult. con cons. Max.mov.perpend.p. desde cons. losa 2,04m. en 1,5 años	6		
Piedras (Pi) 1968		37	1,3	1,3			Grauwackas y piz. 20% < 25mm.	C.r.vib. 8-10 t. (2-4 cob.)	1 1,5						26	18										1 9 18	
Pinzanes (Pin) 1956		55	1,2	1,3			G. <2t.(0,25t.)	V. desde 15m. min.		7-10					24										P. sobre 2m. de roca colocada	6	
Quoich (Qu) 1955		38	1,3	1,4			Esq.de psamíticos y pelíticos a granulitas. <10% de bandas micaceas. Se eliminaron los finos <9,5mm.	C.con rodillo(compacción 4,3%) A continuación r.vib. de 3,5t. (1,9% mas)	0,60	> 4	27,1					2	2	2	4	15				< 0,016			6
Rama (Ra) 1969		100	1,2	1,5			Cal.(571 probetas cúbicas de 20cm; 1720 probetas de 5cm. secas; 1470 saturadas y 1290 tras 1 ciclo de helada)	C. con 8-10 cob.r.vib. (10,5t.) 1550 r.p.m.	1,5	0,252,104	vertido compactación													A.max. a mitad de altura 70cm.	Ll.comenzó cuando presa tenía 64% altura	6	

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

DATOS DE LA PRESA				DATOS DE LA ESCOLLERA							PERIODO POSTERIOR A LA CONSTRUCCION				MOVIMIENTOS DURANTE LA CONSTRUCCION		VELOCIDAD UNITARIA DEL ASIENTO VERTICAL MAXIMO EN COMPARACION AL FINAL DEL PERIODO DE OBSERVACION (% ALTURA POR AÑO)	OBSERVACIONES	REFERENCIAS		
NOMBRE Y FECHA DE TERMINACION	TIPO	TALUDES (DISTANCIA HORIZONTAL PARA 1 VERTICAL)		CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kg/cm ²)	METODO DE COLOCACION	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)	RELLENO (kg/cm ²)		
		ABRIDA	ABRIDA																		
S. Gabriel N° 2 (Coggswell) (San. 2) 1933	85	1,3	1,5		Gn. cúbico (464) Bien graduado 40% de trozos a 1.000 l b 30% (1000-3000 l b) 30% (3000-14000 l b)	V. Cerca del est. dcho < 7,5 capas altas	0												n=22,5% al final	6	
Salt Springs (Salt) 1931	100	1,3	1,4		G. de hornablen- dia de grano me- dio (1050-1350) Desde finos has- ta 25t. 1/2 vo- lumen entre 10 y 25t.	V.	20 56												0,017	Ll. sucesivos no - producen mov. apre- ciables. P. sé empezó antes de terminar relleno -- (unos 5 meses) A. post. max. normal p. 175cm.	6
Sassiére 1959	30	1,4	1,4		Cu. Granulometría continua Vol. max. 300l. (generalmente)	V.	30 4													A. post. max. normal p. 3cm. Altura e. A. ci. m. 16 6 17 3,5 16 11	6
Serpentine	40	1,5	1,5		Todo uno de cu. Esq. y esq.		1												0,016		19
Strawberry (St) 1915	43	1	1,35	Gr.	G. de hornablen- dia de grano me- dio	V. desde un cable grúa y parcialmente retoca- da con grúa. Altura de caída < 9m.	Peque- ño re- ro hu- bo u- na ave- nida im- por- tante durante												0,031		6

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN ARMADO

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)		CIMENTACION	TIPO DE ROCA Y RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE (kg/cm ²)	METODO DE COLOCACION	RECAUDO VOL. AGUA	VOL. ESCOLLERA	DENSIDAD SECA (g/cm ³) O POROSIDAD (%) TRAS LA COLOCACION			DURACION PEDRA PLENADO (meses)	MOVIMIENTOS EN MAXIMOS EN CORONACION			AÑOS DE OBSERVACION				
		AGUA ANTERIOR	AGUA ACTUAL						3 d	n	%		VERTICAL	HORIZONTAL	%	cm	cm			
Swift (Sw) 1914		38	1,2 1,33	Gr.									96	98	2,58	1,9	0,017		6	
Taum Sauk (TS) 1963		35	1,3 1,3		porfido rioliti V. co. Pequeña con excesivos finos			2					22			2,5			18	
Vilar (Vil) 1965		55	1- 1,3 1,2	G.alte-rado y migmatita, con fallas	G. de buena calidad > 50%. 0,5-10t < 5% < 0,1m.	V. Agua a 7 kp/cm ² .	2-3				24	37 16	28		1 3,75	0,01		Paramento 3,5m. de roca colocada	6	
Wilmot (Wil) 1968		35	1,33 1,33		Grauwacka dura	C.r.vib. 10t.	1,35					5,3			5		0,006		19	
Princip al (Wi) 1958		80	1- 1,3 1,4		Gr.s., d. y du-radero 50% entre 0,5 y 10t. y mayor max. 15t.	V. Esc.	25- 50, 7 kg/cm ²	3		32	23	63,4	46		0,58		0,0315	p. durante pedr. Max.a.post. normal a la p. 85cm. en 1 año. Mov. juntas muy pe-queño. A.max: 183cm.	6	
Late-ral (Wis) 1958		50,6	1									20,7	21,6		0,43		0,0314	p. durante pedr.		

Abreviaturas de la Tabla I

a.	=	asiento-s
a-a.	=	aguas arriba
ady	=	adyacente
al.	=	aluviones
a-o	=	aguas abajo
ar.	=	arenisca
arc.	=	arcilla arcillosa
b.	=	basalto
c	=	compactada
cal.	=	caliza
ci.	=	cimentación
co.	=	conglomerado
cob.	=	coberturas
cons.	=	construcción
cu.	=	cuarcita
d.	=	duro
dcho.	=	derecho
e.	=	escollera
esc.	=	escarificado de la superfi de cada capa.
esq.	=	esquisto, esquistoso-a
est.	=	estribo-os
g.	=	granito
gn.	=	gneiss
gr.	=	grava
horiz.	=	horizontal
inf.	=	inferior
izq.	=	izquierdo
ll.	=	llenado-s
ma.	=	masivo-a-os-as
mar.	=	margas
max.	=	máximo-a
meteor.	=	meteorizado-a
min.	=	mínimo-a
mov.	=	movimiento
neum.	=	de neumáticos
p.	=	pantalla
P. A.	=	pantalla asfáltica
P. H.	=	pantalla de hormigón a
par.	=	parámetro
pedr.	=	pedraplenado
perpend.	=	perpendicular
piz.	=	pizarra
post.	=	postconstructivo
r.	=	rodillo
s.	=	sano
simult.	=	simultáneo-a
sup.	=	superior-es
superf.	=	superficie-es
tr.	=	tractor-es
v.	=	vertida
vert.	=	vertical-es
vib.	=	vibratorio
vol.	=	volumen

El significado de las abreviaturas empleadas en esta tabla se indica al principio del artículo.

La mayoría de las referencias han sido tomadas de Justo (1968).

4. IMPORTANCIA DE LOS MOVIMIENTOS POSTCONSTRUCTIVOS

Los movimientos postconstructivos en coronación producen dos efectos negativos: pérdida de resguardo y deterioro del aspecto de la presa.

Por otro lado, como veremos más adelante se pueden establecer correlaciones entre los máximos movimientos postconstructivos y el agrietamiento o las filtraciones a través de la pantalla.

Vamos a examinar con detalle cada uno de estos aspectos y, como consecuencia de ello, vamos a tratar de calcular, más adelante, los máximos movimientos postconstructivos.

5. PERDIDA DE RESGUARDO

Una vez terminado el pedraplenado, debería darse a la presa suficiente contraflecha en la coronación para compensar el asiento postconstructivo sin pérdida del resguardo mínimo establecido a lo largo de ésta.

La importancia de este punto está sostenida por el hecho de que, según Middlebrooks (1953), de 206 presas de materiales sueltos con comportamiento insatisfactorio hasta 1953, en 60 la razón fue el vertido por encima de la presa.

Por esta razón, es preferible ser generoso en la contraflecha, pues en caso contrario podría ser necesario añadir pedraplén o un muro en coronación para mantener el resguardo exigido. Esto puede ser caro y dificultoso una vez retirada la maquinaria y con la presa en servicio.

Pero, por otro lado, suponiendo un valle en V de sección constante, el volumen de pedraplén es proporcional al cubo de la altura de la presa. Aunque la contraflecha no es un aumento constante de altura a lo largo del eje de la presa, si se da en exceso puede significar una cantidad innecesaria de dinero extra. Aunque sólo fuese por esta razón, sería conveniente po-

der estimar el máximo asiento postconstructivo y su distribución a lo largo del eje.

El problema era de enorme importancia en presas de escollera vertida mal regada (la presa de Cogswell tuvo un asiento postconstructivo del 6,3 por 100 de su altura), y aún en presas de escollera vertida bien regada (Paradela tuvo un asiento postconstructivo de 130 cm). Aunque en presas de escollera compactada la importancia del tema es mucho menor, hay, sin embargo, que tenerlo en cuenta en escolleras de roca de mala calidad, como lo demuestran los 39 cm de asiento postconstructivo en coronación en la presa de Scotts Peak, de 46 m de altura (v. Justo et al., 1985).

6. DETERIORO DEL ASPECTO DE LA PRESA

Si la coronación de una presa de materiales sueltos se construye horizontal, los asientos producirían una flecha en ella. Parece ser que esta flecha es antiestética (v. Tyson, 1966), por lo que si se quiere evitar este efecto habría que dar una contraflecha adecuada.

7. RELACION ENTRE EL MAXIMO ASIENTO POSTCONSTRUCTIVO EN CORONACION Y EL DETERIORO DE LA PANTALLA DE HORMIGON

En la tabla II se han ordenado las presas con pantallas de hormigón en orden creciente de asiento postconstructivo máximo (en posición), y se han indicado la aparición o no de grietas en la pantalla y las filtraciones medidas.

Hay que destacar el excelente comportamiento de la presa de Foz de Areia y el mal comportamiento de Alto Anchicaya. Ambos serán comentados más adelante.

Exceptuando el segundo caso, puede decirse que una pantalla de hormigón puede comenzar a agrietarse, en general, a partir de un asiento postconstructivo de 7 cm, se agrieta con seguridad, con pérdidas considerables, para un asiento postconstructivo superior a 41 cm, y casi con seguridad cuando dicho asiento supera los 12 cm.

TABLA II

RELACION ENTRE EL MAXIMO ASIENTO POSTCONSTRUCTIVO EN CORONACION Y EL DETERIORO DE LA PANTALLA DE HORMIGON

P R E S A	S_{\max} (cm)	Fugas (l/s)	Grietas
Alto Anchicaya (Alt)	0,8	1.800	Si
Quoich	2,0	≈ 0	No
Sassiere	2,5	≈ 0	No
Kangaroo (ka)	4,3	9	No
Cabin Creek (CC)	5,2	51	No
Piedras (Pi)	7,0	110	Si
Vilar (Vil)	7,5	35	Si
Bia (Bi)	9,1	3,5	No
Nozori (Nz)	10,5	23	Si
Cethana (Ce)	12,0	45(10)	No
Lower Bear 2 (Lo 2)	12,0	—	No
Vilar (Vil)	12,7	130	Si
Wishon (lat) (Wis)	20,7	—	Si
Ishibuchi (Is)	21,0	226	Si
Taum Sauk (TS)	22,0	227	Si
Courtright (Cou)	30,0	nominal	No
Courtright (Cou)	32,0	nominal	Si
Paradela (Pa)	40,0	382	Si
Lower Bera 1 (Lo 1)	40,3	57	Si
Foz de Areia (Fo)	41,0	236	No
New Exchequer (New)	46,0	8.500	Si
Wishon (main) (Wi)	63,4	—	Si
Dix	78,0	2.700	Si
Paradela (Pa)	80,0	3.020	Si
Courtright (Cou)	81,0	1.260	Si
Salt Springs (Salt)	82,0	570	Si
S. Gabriel 2 (San 2)	177,0	—	Si
S. Gabriel 2 (San 2)	533,0	3.700	Si

La figura 1 muestra la relación entre las fugas totales y s_{\max} . Se observa el valor anómalo de Alto Anchicaya, que ha sido excluido de la regresión. La figura indica que hasta asientos del orden de unos 5 cm las filtraciones son poco importantes (< 10 l/s), para asientos mayores de 12 cm suelen ser considerables (> 100 l/s), y para asientos que superan los 40 cm pueden ser desastrosos (> 1000 l/s).

El caso de New Exchequer, anómalo por las fuertes filtraciones, merece comentario aparte.

No parece existir relación importante entre el deterioro de la pantalla y los taludes de los estribos.

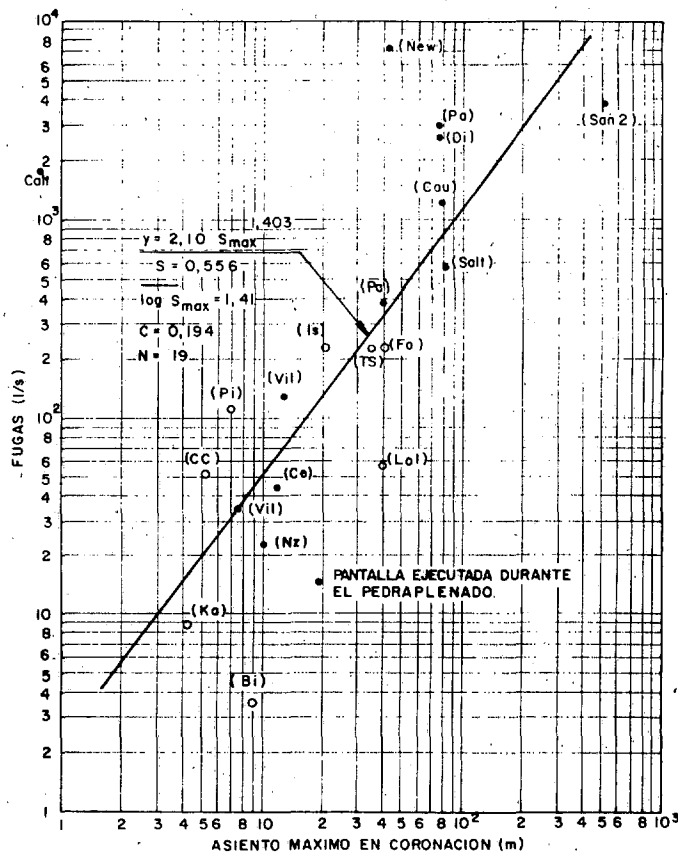


Fig. 1. — Relación entre las fugas y el máximo asiento postconstructivos en coronación.

8. RELACION ENTRE LA MAXIMA DEFORMACION NORMAL A LA PANTALLA Y EL DETERIORO DE DICHA PANTALLA

En la tabla III se han ordenado las presas en orden creciente de deformación máxima normal a la pantalla, indicando la aparición o no de grietas en ésta.

Puede verse, si no tenemos en cuenta el caso anómalo de Foz de Areia, que la aparición de grietas en la pantalla corresponde claramente a deformaciones comprendidas entre 15 y 28 cm.

La figura 2 muestra la relación entre las fugas totales y δ_{\max} . Se observa el valor anómalo de New Exchequer, que será comentado más adelante, y que no se ha incluido en la regresión.

La regresión es:

$$y \text{ (l/s)} = 0,297 \delta_{\max}^{1,562} \text{ (cm)} \quad [2]$$

siendo y la filtración.

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

TABLA III
 RELACION ENTRE LA MAXIMA DEFORMACION NORMAL A LA PANTALLA Y SU DETERIORO

PRESA	δ_{\max} (cm)	Fugas (l/s)	Grietas
Sassiere	3	0	No
Kangaroo (Ka)	5,2	9	No
Cethana (Ce)	12	45(10)	No
Bia (Bi)	15	3,5	No
Lower Bear n.º 2 (Lo 2) ..	15	—	No
Nozori (Nz)	28	23(10)	Sí
Ishibuchi (Is)	40	226(220)	Sí
Vilar (Vil)	55	130	Sí
Lower Bear n.º 1 (Lo 1) ..	58	57	Sí
New Exchequer (NE)	60	8.500	Sí
Foz de Areia (Fo)	62	236	No
Wishon 1 (Wi)	85	—	Sí
Paradela (Pa)	120	382	Sí
Courtright (Cou)	122	pequeñas	Sí?
Salt Springs (Salt)	154	566	Sí
Courtright (Cou)	159	1.260	Sí
Paradela (Pa)	195	3.020	Sí

El error normal respecto a la regresión es:

$$s = 0,417$$

Error normal de un futura predicción:

$$E. N. = 0,417 \sqrt{1,04 + 0,372 (\log \delta_{\max} - 1,67)^2} \quad [3]$$

Dentro de los valores de la tabla III, el mínimo de (3) será:

$$(E.N.)_{\min} = 0,463$$

Y el máximo:

$$(E. N.)_{\max} = 0,454$$

En el c.d.g.:

$$E. N. = 0,425$$

Puede verse que la variación es pequeña. En el c.d.g., el límite de confianza superior correspondiente al 95 por 100 será:

$$+ 1,81 \times 0,425 = + \log. 5,9$$

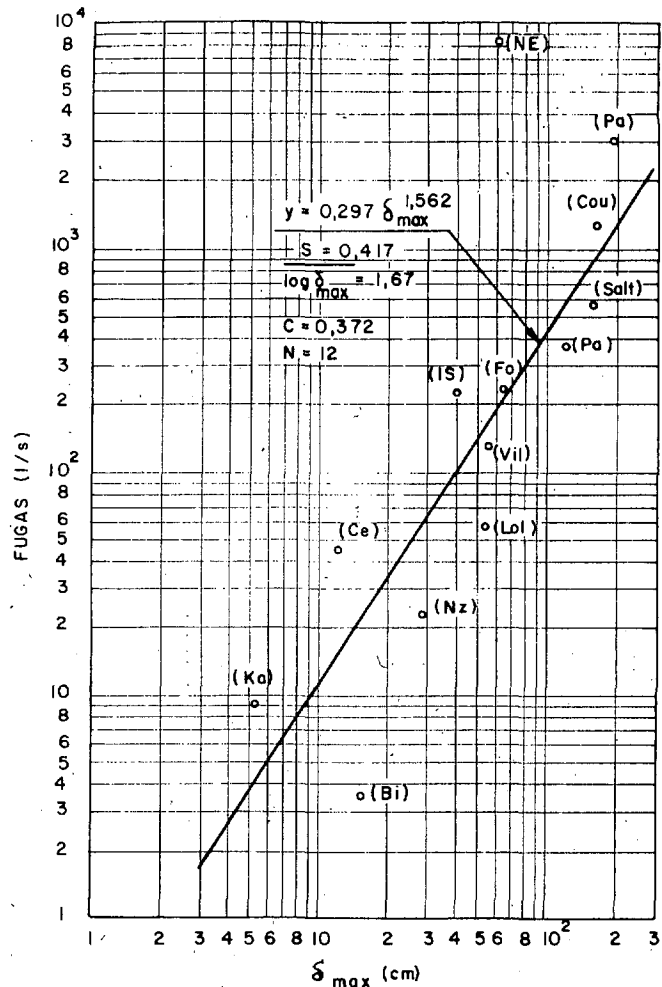


Fig. 2. — Relación entre las fugas y la máxima deformación normal a la pantalla.

Para la figura 1 el error normal respecto a la regresión es 0,556. Puede verse que δ_{\max} está mucho mejor correlacionado con daños y filtraciones que s_{\max} .

9. ESTIMACION DEL MAXIMO ASIENTO POSTCONSTRUCTIVO EN CORONACION

La tabla IV muestra los módulos edométricos medidos, durante la construcción, en una serie de presas con pantalla de hormigón armado.

En presas de escollera compactada oscila entre 300 y 1.300 kp/cm².

Existe una correlación débil entre el módulo edométrico y la porosidad o la densidad seca.

TABLA IV
MODULOS EDOMETRICOS MEDIDOS,
DURANTE LA CONSTRUCCION EN PRESAS
CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

PRESA	E_{oed} (kp/cm ²)	n %	ρ_d (t/m ³)	coloca- ción
Alto Anchicaya	1.000-1.700 (1.300)	23	2,28	c
Serpentine	1.100-1.500			c
Cethana	1.100-1.800 (1.280)		2,07	c
Iril-Emda	500-2.000 (1.170)	20,3	2,15	c
Wilmot	980			c
Paloona	700-900			c
Quoich	690	27,1		c
Rama	450-840		2,10	c
Candes	590			c
Naussac	583		2,08	c
Foz de Areia	339	25	2,12	c
Contrada Sabetta ...	290			v
Bou Hanifia	170	26,5	2,28	c

c = compactada.

m = colocada con guía o a mano.

v = vertida.

Los valores de E_{oed} 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 y con la carga, por lo cual los valores de la tabla IV deben tomarse sólo como valores medios.

En principio, el asiento postconstructivo debe ser inversamente proporcional al módulo edométrico, por lo que en la figura 3 se ha dibujado $s_{max} \cdot E_{oed}$ en función de la altura de la presa y se ha hallado la recta de regresión. Se han agrupado presas con distinto tipo de pantalla.

En la figura de la 4 a la 7 se ha dibujado la regresión entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura en presas con pantalla de escollera colocada, vertida mal regada, vertida bien regada y compactada de ro-

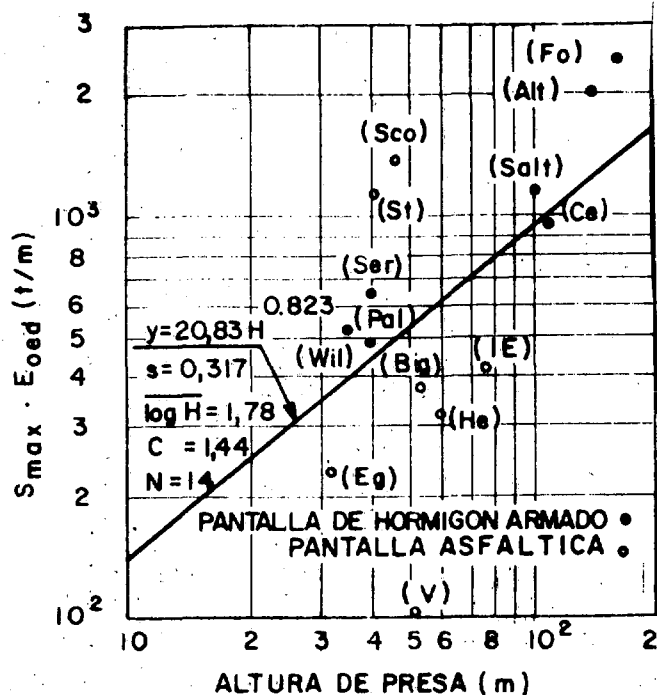


Fig. 3. — Regresión entre $s_{max} E_{oed}$ y la altura en presas con pantalla.

ca de minerales de red cristalina tridimensional. Las ecuaciones correspondientes se indican en la tabla V.

No se han considerado en la regresión presas de escollera compactada de altura inferior a 30 m, pues su asiento postconstructivo en coronación puede ser nulo o negativo (v. Breaclich y Nissastrom).

Comparando la tabla V con la figura 3 puede verse que el error normal respecto a la regresión, s , es menor en la tabla V, por lo que el máximo asiento postconstructivo se estimará mejor a partir de las figuras 4 a 7 que a partir de la figura 3, a pesar de que esta figura tiene en cuenta el valor del módulo edométrico.

Sin embargo, no se han podido encontrar relaciones entre s_{max} y H en presas de escollera con minerales de red cristalina tridimensional (argilitas, esquistos, pizarras y grauweekas).

En estas presas para predecir el máximo asiento postconstructivo en coronación es imprescindible realizar ensayos de carga durante la construcción, o medidas con placas de asiento, y utilizar la figura 3.

En la figura 8 se han dibujado conjuntamente las líneas de regresión para distintos modos

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

de colocación de la escollera. Puede verse como disminuyen los asientos en el orden: escollera vertida mal regada, escollera colocada, escollera vertida bien regada y escollera compactada.

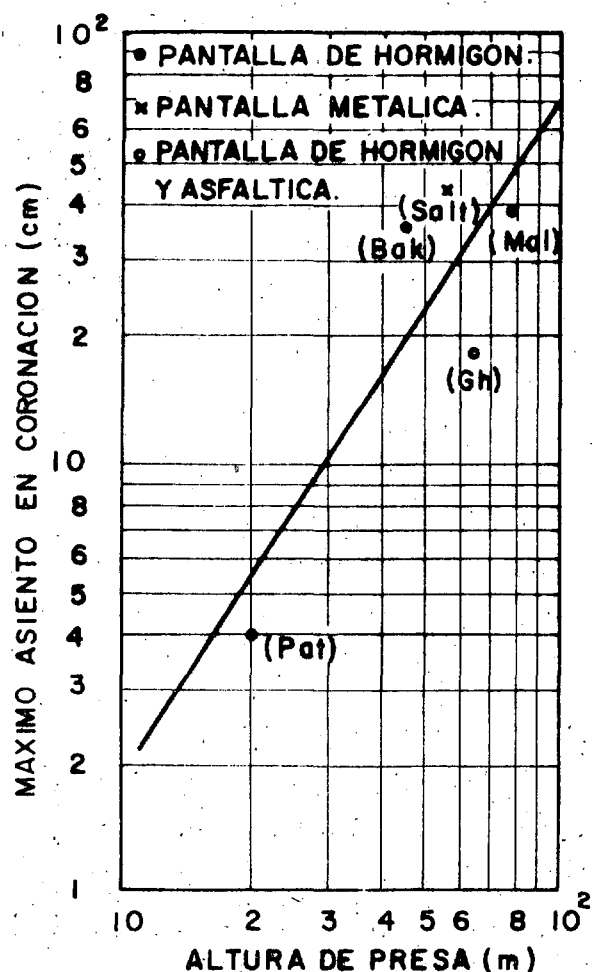


Fig. 4.—Regresión entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura en presas con pantalla de escollera colocada.

Se comparan los resultados con los de Clements (1984) y Soydemir y Kjaernsli (1975). El primero considera conjuntamente todas las presas de escollera vertida hayan sido bien o mal regadas, lo cual es, evidentemente, improce-

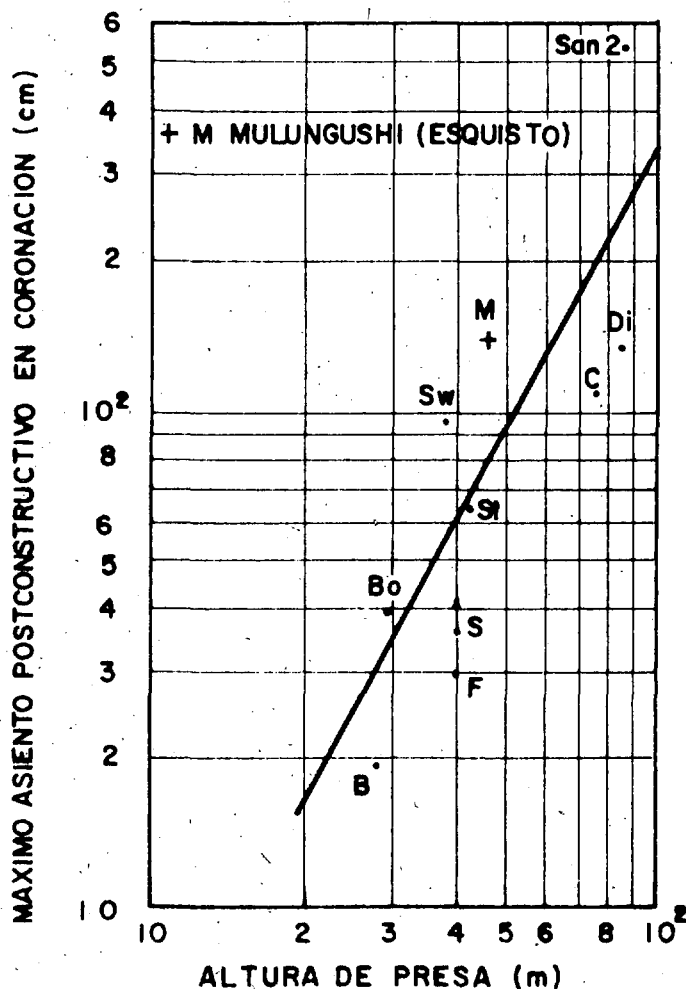


Fig. 5.—Regresión entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura en presas con pantalla de escollera vertida mal regada.

TABLA V

REGRESIONES ENTRE EL MAXIMO ASIENTO POSTCONSTRUCTIVO, $S_{\text{máx}}$ (cm), Y LA ALTURA, H (m), EN DISTINTOS TIPOS DE PRESA CON PANTALLA

Colocación de la escollera	Regresión	E. N. respecto a la regresión s	$\log H$	N	C
Escollera colocada	$S_{\text{máx}} = 4,63 \times 10^{-2} x H^{1,584}$	0,270	1,68	5	4,72
Escollera vertida mal regada	$S_{\text{máx}} = 5,66 \times 10^{-2} x H^{1,878}$	0,270	1,68	9	3,59
Escollera vertida bien regada	$S_{\text{máx}} = 4,25 \times 10^{-3} x H^{2,157}$	0,215	1,69	14	1,25
Escollera compactada	$S_{\text{máx}} = 2,46 \times 10^{-2} x H^{1,319}$	0,299	1,81	14	1,28
(roca no arcillosa)					

E. N. = error normal.

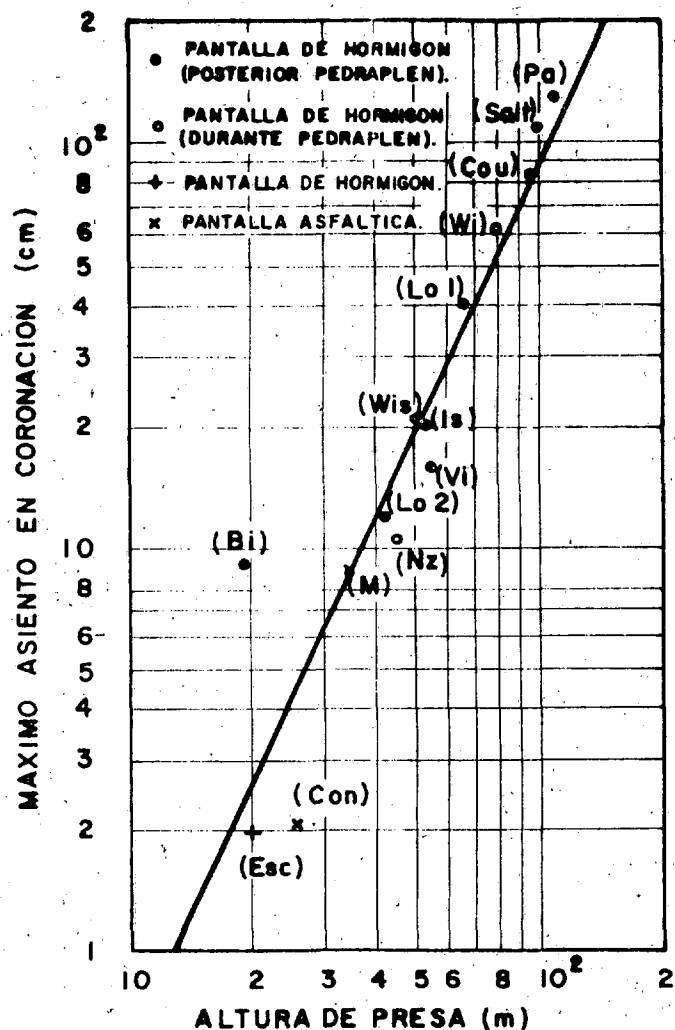


Fig. 6. — Regresión entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura en presas de escollera vertida, bien regada, sin excesivos finos.

dente; en cuanto a la escollera compactada, introduce en la regresión escolleras de pizarra, esquistos y grauweekas, lo cual también es imprecendente. Ambos autores basan sus resultados en menos datos, por lo cual consideramos nuestros resultados más elaborados, fiables, y basados en datos más depurados.

10. ESTIMACION DEL MAXIMO CORRIMIENTO NORMAL A LA PANTALLA

En la figura 10 se ha dibujado $\delta_{\max} \cdot E_{\text{oed}}$ en función de la altura de presa y se ha hallado la curva de regresión.

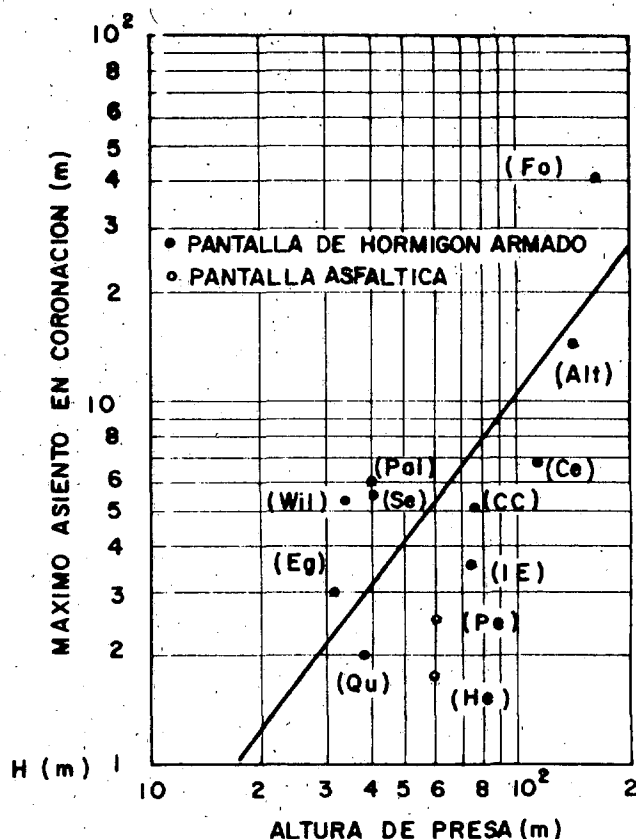


Fig. 7. — Regresión entre el máximo asiento postconstructivo en coronación y la altura en presas de escollera compactada no arcillosa.

En las figuras 9 y 11 se ha dibujado la regresión entre el máximo corrimiento normal a la pantalla y la altura, en presas con pantalla de escollera vertida bien regada, y compactada de roca de minerales de red cristalina tridimensional. Las ecuaciones correspondientes se indican en la tabla VI.

Comparando la figura 9 con la tabla VI puede verse que el error normal respecto a la regresión, s , es menor en la figura 9, por lo que δ_{\max} se estimará mejor a partir de ésta, aunque para ello se precisa conocer el valor del módulo edométrico durante la construcción.

En la figura 12 se han dibujado conjuntamente las líneas de regresión de las figuras 10 y 11. Puede verse que la compactación disminuye las deformaciones máximas por un factor que puede estar comprendido entre 10 y 20.

LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGON ARMADO

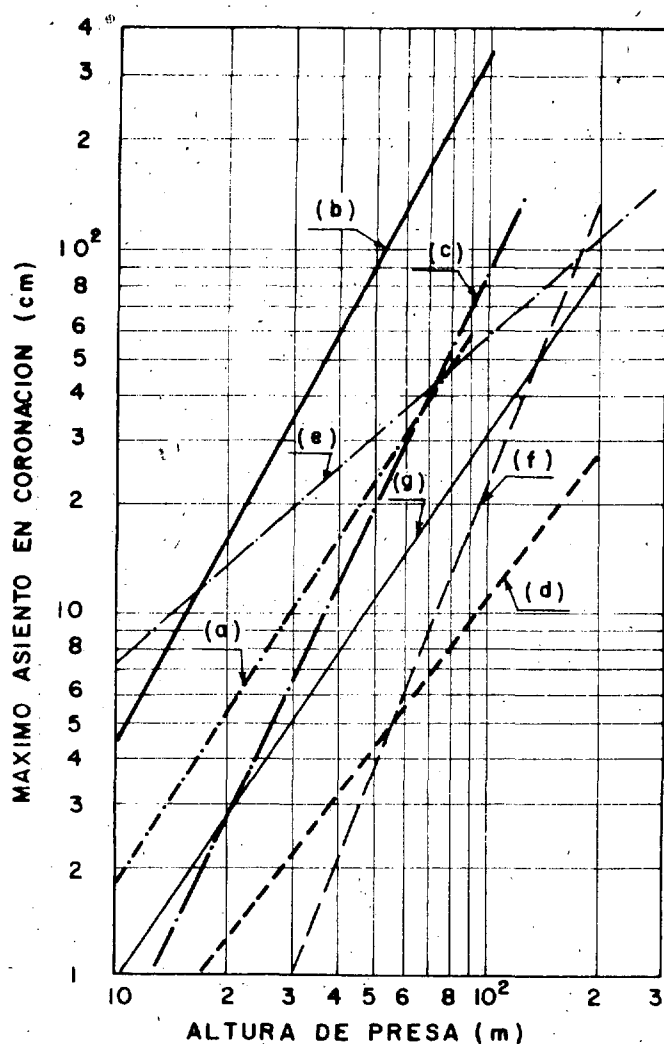


Fig. 8. — Líneas de regresión correspondientes a distintos modos de colocación de la escollera.

- a) Escollera colocada.
- b) Escollera vertida mal regada.
- c) Escollera vertida bien regada.
- d) Escollera compactada (roca no arcillosa).
- e) Escollera vertida (Clements, 1984).
- f) Escollera compactada (Clements, 1984).
- g) Escollera compactada (Soydemir y Kjaernsli, 1975).

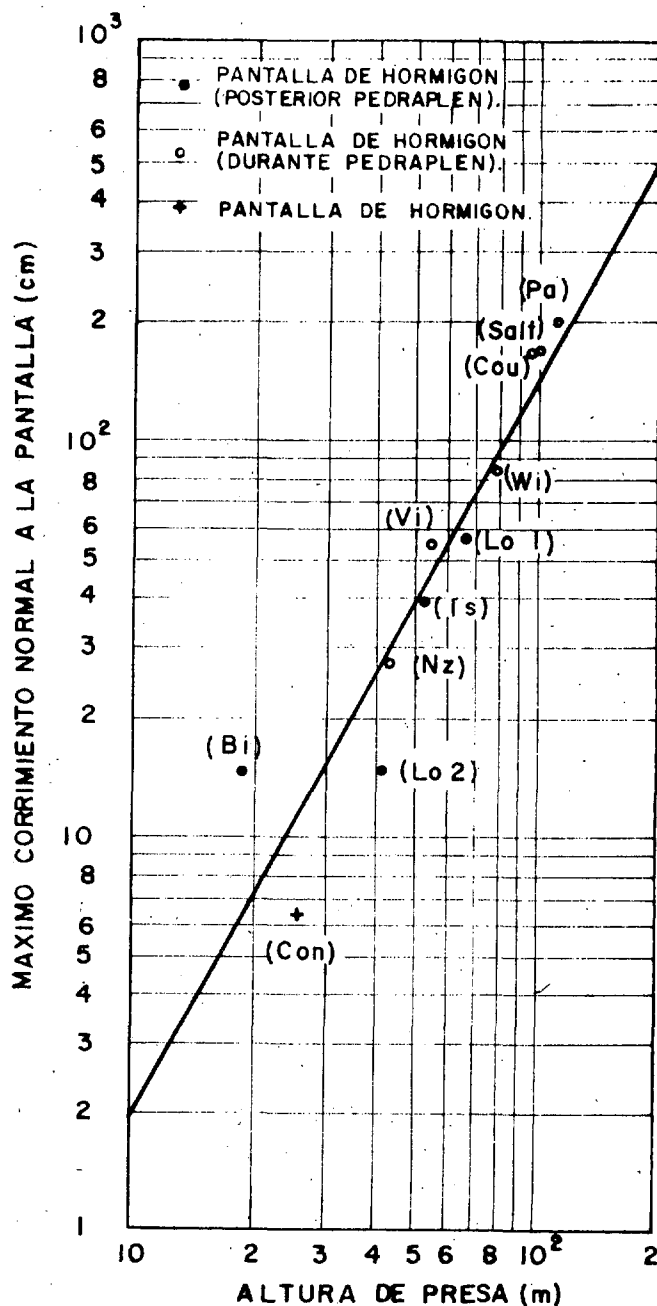


Fig. 9. — Máxima deformación normal al elemento impermeable en presa con pantalla de escollera vertida bien regada.

TABLA VI

REGRESION ENTRE EL MAXIMO CORRIMIENTO NORMAL A LA PANTALLA, $\delta_{\text{máx}}$ (cm), Y LA ALTURA, H (m), EN DOS TIPOS DE PRESA CON PANTALLA

Colocación de la escollera	Regresión	E. N. respecto a la regresión	log H	N	C
Escollera vertida bien regada	$\delta_{\text{máx}} = 2,5 \times 10^{-2} \times H^{1,880}$	0,187	1,74	11	1,68
Escollera compactada (roca no arcillosa)	$\delta_{\text{máx}} = 2,49 \times 10^{-5} \times H^{2,822}$	0,228	2,01	5	7,35

E. N. = error normal

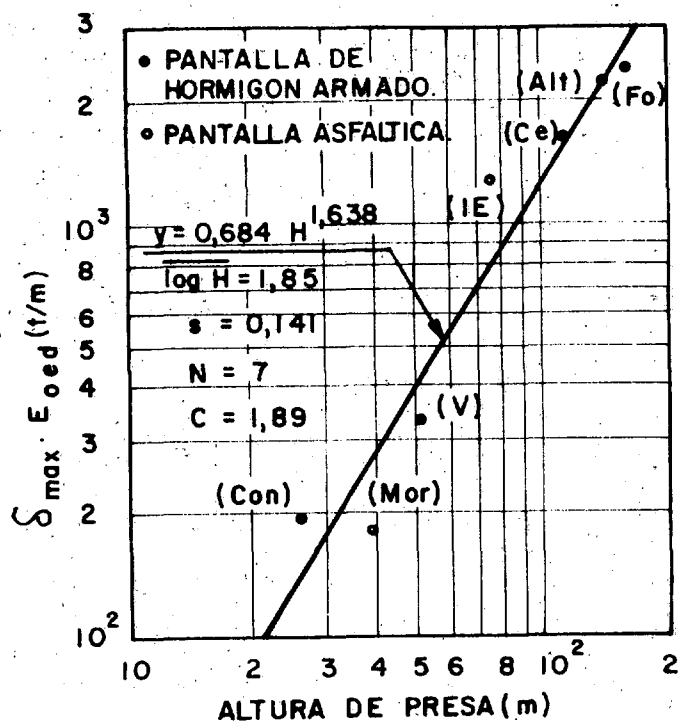


Fig. 10. — Regresión entre $\delta_{\max} \cdot E_{oed}$ y la altura de la presa.

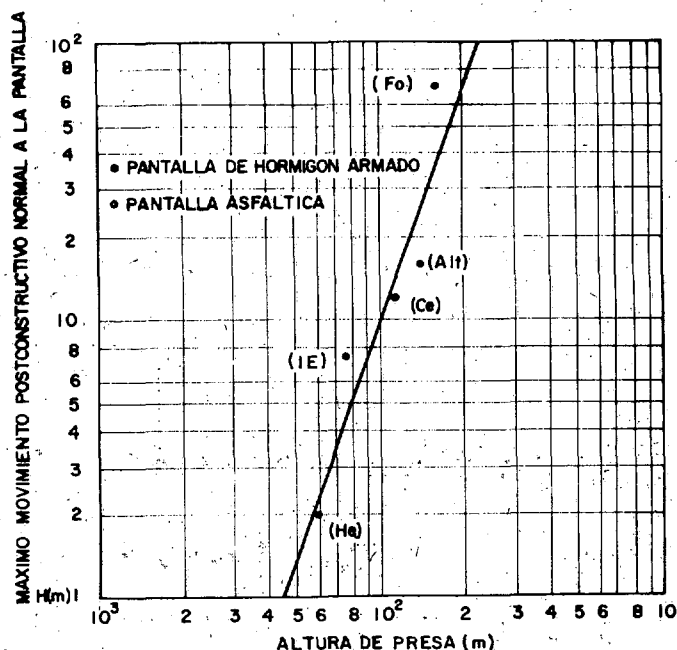


Fig. 11. — Máximo corrimiento normal a la pantalla en presas con pantalla de escollera compactada y roca no arcillosa.

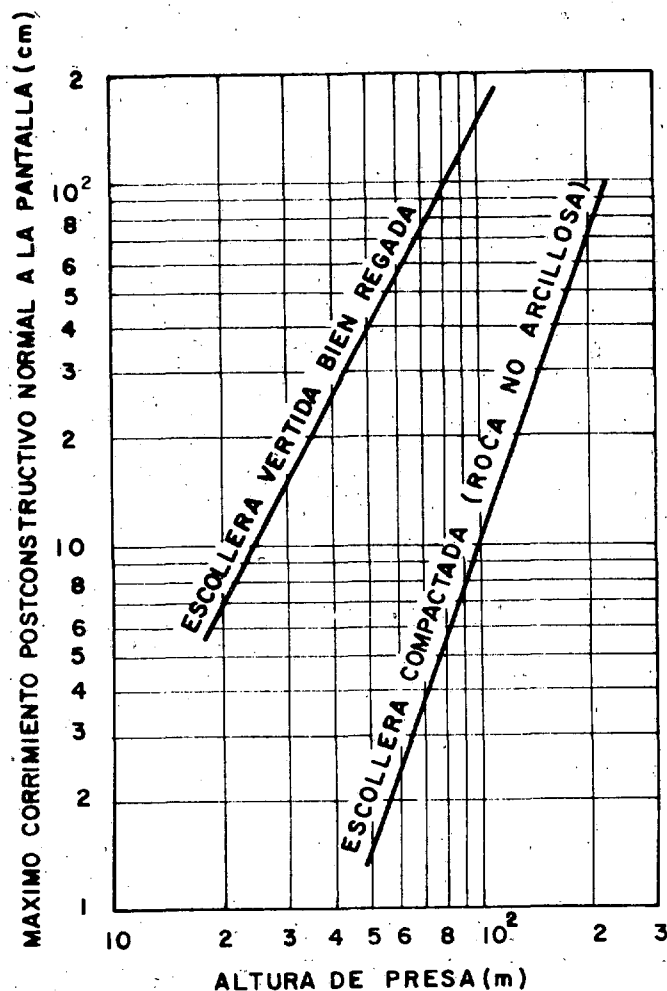


Fig. 12. — Líneas de regresión de δ_{\max} en función de H correspondiente a las dos formas modernas de colocación de la escollera.

11. ESTUDIO DE ALGUNAS PANTALLAS CON COMPORTAMIENTO ANOMALO

En apartados anteriores hemos hecho referencia a algunas presas con comportamiento no normal por el lado bueno o por el lado malo.

Se pueden destacar las elevadas filtraciones de la presa de New Exchequer y Alto Anchicaya y las bajas filtraciones de la presa de Bia (v. figuras 1 y 2).

En la presa de New Exchequer (Steele y Cooke, 1969) sólo se compactó la mitad de la escollera, lo cual hizo que los asientos fueran importantes e intermedios entre los correspondientes a escolleras compactada y vertida. Una presa de esta altura debió de compactarse en su totalidad.

La capa de regularización colocada debajo de

la pantalla tenía tamaños comprendidos entre 5 y 40 cm, lo cual permitía el drenaje libre y aumentó las fugas al agrietarse la pantalla.

La pantalla se construyó durante el pedraplenado, como en muchas otras presas (v. figura 1), pero en este caso se colocaron algunas placas con el pedraplén aguas abajo 30 m por debajo del borde superior de la placa. Durante la construcción se apreciaron ya aperturas de juntas de los estribos de varias pulgadas y cierre excesivo de juntas en el tercio central de la presa.

Las juntas verticales se rellenaron al principio de asfalto, lo cual provocó un cierre excesivo de las juntas centrales. Desde la cuarta fila de placas (a partir de la coronación) se cambiaron las siete juntas centrales colocando relleno de secoya, con lo cual ni estas juntas verticales, ni las horizontales, que tenían el mismo relleno se aplastaron durante la construcción.

Otro hecho desafortunado (por lo que respecta a la integridad de la pantalla) es el apoyo de la pantalla contra la presa de gravedad preexistentes que hizo que el gradiente de deformaciones en dicho apoyo fuera muy fuerte.

Según Steele y Cooke (1969) las filtraciones llegaron a 11,3 m³/s. Tras colocar bajo agua 18.000 m³ de una mezcla bien graduada de grava, arena, tierra y bentonita las filtraciones descendieron hasta menos de 300 l/s.

La pantalla de Alto Anchicaya (Regalado et al., 1982) se construyó también durante el pedraplenado, lo cual es impropio para una presa de esta altura.

Esto hizo que, durante la construcción, la avenida de un arroyo situado en la margen izquierda, lavara el filtro situado bajo la junta perimetral de este estribo, que se recompactó mal. Pero los daños no pueden achacarse sólo a esta causa, sobre todo en la doble junta perimetral. No se colocó lámina de cobre y la junta de goma se soltó del hormigón en mucho puntos.

Conviene advertir, sin embargo que tras un tratamiento económico las filtraciones se han estabilizado en 180 l/s.

El material de transición situado bajo la pantalla era bastante más grueso que el material semipermeable que recomienda Cooke (1984).

En contraposición merece destacarse el buen comportamiento de la presa de Foz de Areia

(Pinto et al., 1982). Sólo se colocó una junta perimetral, y no se hicieron juntas horizontales, de acuerdo con la tendencia moderna en estas pantallas. En la junta perimetral se colocó una doble línea de defensa: junta de goma y lámina de cobre; se cubrió la junta con mastic y un tubo de neopreno. La lámina de cobre, colocada en el fondo de la junta, se situó sobre la banda de neopreno, y ésta a su vez sobre un apoyo de arena y asfalto.

La presa Bia (Pahud, 1951) fue construida en 1949. la pantalla se colocó contra una capa de escollera colocada con grúa de 2,50 m de espesor en la base y 1,50 m en coronación, los bloques de 3/4 de m³ eran cuidadosamente escogidos en cantera, y colocados al modo de una mampostería. Los 30 cm próximos a la pantalla eran mampostería en seco colocada a mano. A esta capa se le dio una superficie lisa igualando con un mortero 1:6 sobre el que se colocó una capa de 2 mm de espesor que permitiera un cierto deslizamiento entre la pantalla y la escollera. Se colocaron dos capas de armaduras en la pantalla. Se colocó una rótula con lámina de cobre y armadura en la unión de la pantalla con el plinto. Se utilizaron juntas horizontales y verticales, con bandas de cobre, betún aguas arriba de la banda y otro producto aguas abajo.

12. RELACION ENTRE EL MODULO DE DEFORMACION DURANTE LA CONSTRUCCION Y EL MODULO DE DEFORMACION BAJO CARGA DE AGUA

Cooke (1984) señala que «en Cethana, Anchicaya, Areia y Murchison se ha comprobado que el módulo de compresibilidad de la escollera, calculado a partir del movimiento de la pantalla durante el llenado, es unas 3 veces el medido verticalmente en la escollera mediante medidores de asiento de nivel de agua, es decir el movimiento de la pantalla es un tercio del calculado usando el módulo vertical. Así pues, la escollera parece sustancialmente más rígida en dirección horizontal que vertical.

Con objeto de examinar con detalle este aspecto, se ha estudiado detenidamente las presas de escollera con pantalla en las que se han tomado medidas de deformaciones durante la

TABLA VII
MODULOS DE DEFORMACION EN DIVERSAS FASES EN PRESAS CON PANTALLA

Presas	Taludes estribos	Construcción E'_{oed} (kp/cm ²)	Llenado E''_{oed} (kp/cm ²)	$\frac{E'_{oed}}{E''_{oed}}$	Placas de carga E (kp/cm ²)
Alto Anchicaya	1,5:1 0,75:1	1.300	2.570	2	
Cethana	0,93:1 1,25:1	1.280 (1.460)	2.840	2,2 (2)	
Foz de Areia	1,3:1	340	970	2,9	
Iril Emda	4,5:1	1.170 (780)	620 (1.850)	0,5 (2,4) 1,6	500
Martín Gonzalo		145			240
Venemo	1,8:1	170	665	4	

construcción, con los resultados que se indican en la tabla VII.

La tabla VII requiere una explicación a fondo.

El módulo edométrico durante la construcción se ha hallado por el procedimiento indicado en el apartado 9.

El módulo edométrico durante el llenado se ha hallado suponiendo que una columna de escollera, normal a la pantalla, que va desde el punto de máximo corrimiento normal a ésta a la cimentación se deforma bajo una presión constante igual a la carga en dicho punto.

En la presa de Cethana se incluyen dos valores, el primero corresponde a un período que llega hasta el principio del llenado; el segundo hasta el momento en que se para el pedraplenado para empezar a construir la membrana. En cuanto al llenado, Fitzpatrick et al. (1973) dan un módulo de deformación de 2.080 kp/cm², que no dicen como ha sido obtenido, pero que se corresponde con el módulo edométrico de 3.800 kp/cm² para un coeficiente de Poisson de 0,3.

En la presa de Iril Emda el primer módulo edométrico durante la construcción ha sido obtenido en los pozos situados en el eje de presa, y el segundo con los puntos situados sobre la pantalla; en ambos casos se ha tenido en cuenta una elevación parcial simultánea del nivel del agua. Se han tenido en cuenta las tensiones originadas simultáneamente por ambos fenómenos mediante un procedimiento aproximado (v. Guil-

hamon y Castelnau, 1955). Los valores correspondientes al llenado corresponden a los últimos 10 m de elevación del nivel del agua; el primer valor corresponde a la señales de los pozos, y el segundo a diversos puntos de la pantalla. El cociente entre ambos módulos se ha obtenido tomando puntos del mismo emplazamiento (0,5 para los puntos del eje y 2,4 para los de la pantalla). Pero haciendo como en otras presas (puntos del eje para la construcción y de la pantalla para el llenado) obtenemos un valor de 1,6. El módulo de deformación obtenido con las placas de carga, 500 kp/cm², corresponde a un módulo edométrico de 670 kp/cm² para $\nu = 0,3$.

En los cálculos de los módulos edométricos de la tabla VII no se ha tenido en cuenta el efecto tridimensional que suponen los estribos de la presa.

En una presa con taludes de estribo 1:1 y de presa 1,75:1, a mitad de altura, en el centro y eje de la presa, para $\nu = 0,2$ ó 0,3, tenemos, a mitad de altura (v. Saura, 1979):

$$\frac{\sigma_z}{\gamma H} = 38 \%$$

en lugar del 50 % que supusimos en el apartado 9.

Para los mismos taludes y $\nu = 0,2$, tenemos:

$$\epsilon = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)] =$$

$$= \frac{1}{E} \gamma H [0,36 - 0,2(0,073 + 0,13)]$$

$$\epsilon_z = 0,32 \frac{\gamma H}{E}$$

$$E = 0,32 \frac{\gamma H}{\epsilon_z} \quad [4]$$

Por otro lado el módulo edométrico durante la construcción calculado en la tabla VII obedece a la fórmula:

$$E'_{\text{oed}} = \frac{0,5 \gamma H}{\epsilon_z} \quad [5]$$

De las ecuaciones 4 y 5 se deduce:

$$E = 0,64 E'_{\text{oed}} \quad [6]$$

En realidad es:

$$E = \frac{1 - \nu - 2 \nu^2}{1 - \nu} E_{\text{oed}} = 0,9 E_{\text{oed}}$$

$$\text{para } \nu = 0,2$$

$$\text{o sea: } E_{\text{oed}} = 0,7 E'_{\text{oed}} \quad [7]$$

Por otro lado, en la presa de Venemo (v. tabla VII), de taludes 1,7:1 aguas arriba y 1,4:1 aguas abajo, Justo y Saura (1981 a y b) han encontrado que la estimación del máximo corrimiento normal a la pantalla es correcta tomando:

$$E = 306 \text{ kp/cm}^2$$

$$E_{\text{oed}} = 367 \text{ kp/cm}^2$$

$$\nu = 0,25$$

Comparando con la tabla VII esto nos da:

$$E = \frac{306}{665} E''_{\text{oed}} = 0,46 E''_{\text{oed}} \quad [8]$$

Vemos pues que, teóricamente:

$$\frac{E''_{\text{oed}}}{E'_{\text{oed}}} = 1,4$$

Sin embargo, la tabla VII indica que, en la

práctica este cociente es muy superior y vale, como media, 2,5.

De este factor, sólo 1,4 puede adscribirse al efecto tridimensional, mientras que parece que el módulo de deformación que hay que introducir en un cálculo tridimensional por elementos finitos de la deformada de la pantalla bajo la carga de agua es del orden de 1,8 veces el obtenido, durante la construcción, también mediante un método de elementos finitos tridimensional.

Si se hacen cálculos simplistas unidimensionales, como los indicados al principio de este apartado, la relación entre los correspondientes módulos edométricos es del orden de 2,5.

La causa de esta diferencia es difícil de establecer.

13. CONCLUSIONES

Se han establecido ecuaciones para estimar el máximo asiento en coronación y el máximo corrimiento perpendicular a la pantalla en presas de escollera con pantalla. Ello nos permite calcular la contraflecha que hay que dar a la presa y estimar las fugas a través de la pantalla de hormigón armado y el deterioro de ésta.

Si se desea que las fugas y el deterioro de la pantalla tras el primer llenado sean pequeños hay que procurar que el máximo asiento postconstructivo en coronación no supere los 5 cm, y, sobre todo, que el máximo corrimiento normal a la pantalla no supere los 28 cm.

Quiere esto decir que no se deben construir presas de pantalla de hormigón armado de más de 10 m de escollera vertida con riego insuficiente (práctica de cualquier modo indeseable), ni de más de 25 m de escollera vertida bien regada.

La construcción con éxito de la presa de Foz de Areia, de 160 m de altura, indica que es factible construir presas de esta altura, de escollera compactada de buena calidad, siempre que se observen las precauciones adoptadas en dicha presa: construcción de la pantalla posterior al pedraplenado, precauciones en las juntas según se indica en el apartado 11 y utilización de una escollera de calidad razonable.

La construcción de la pantalla simultáneamente con el pedraplenado produce tensiones y defor-

maciones importantes en la pantalla durante esta fase, que sumadas a las del llenado pueden producir la fisuración de la pantalla y fugas importantes, como se ha demostrado en numerosas presas, entre las que destacan New Exchequer, San Gabriel 2, Paradela, Dix, Alto Anchicaya, Courtright y Salt Springs.

También es importante evitar la existencia de fuertes gradientes de deformaciones en la unión de la pantalla con el plinto, como sucedió en New Exchequer.

BIBLIOGRAFIA

- ADALID ELORZA, J. L.; ALONSO FRANCO, H.; NIETO CUFI, R.: 1973 «Comentario sobre las presas de Materiales Suelos con Pantalla en España». Dirección Gral de Obras Hidráulicas, Madrid.
- CLEMENTS, R. P.: 1984. «Post-construction deformation of rock-fill dams». J. Geotech. Eng., ASCE, 110:7:821-840.
- COOKE, J. B.: 1984 «Progress in rockfill dams». J. Geotech. Eng., ASCE, 110:10:1383-1414.
- FITZPATRICK, M. D.; LIGGINS, T. B.; LACK, L. J. y KNOOP, B. P.: 1973 «Instrumentation and performance of Cethana dam». 11.º Cong. Grandes Presas, Madrid, 3:145-164.
- GUILHAMON, J.; CASTELNAU, H.: 1955. «Tassement des matériaux constitutifs et de la fondation (Barrage de L'Irill-Ermda)». 5.º Cong. Grandes Presas, París, 3:389-454.
- JUSTO, J. L.: 1968. «Deformación de las presas de escollera». Fundación Juan March, Madrid.
- JUSTO, J. L.; y SAURA, J.: 1981a. «Behaviour of Venemo's dam by three-dimensional F.E.» 11.º Cong. Int. Mec. Suelo, Estocolmo, 3:449-452.
- JUSTO, J. L. y SAURA, J.: 1981b. «Análisis del comportamiento de la pantalla de la presa de Venemo mediante elementos finitos tridimensionales». Bol. Soc. Esp. Mec. Suelo, 54:29-35. Bol. Lab. Carreteras y Geotecnia, 148:29-37.
- JUSTO, J. L.; CAÑETE, P. y DEL CAMPO, J.: 1985. «El empleo de roca de baja resistencia en los espaldones de presas de materiales sueltos». Número extraordinario de la Revista de Obras Públicas con motivo del Congreso de Grandes Presas.
- MIDDEBROOKS, T. A.: 1953. «Earth dam practice in the United State». Trans. ASCE, Centennial volume, 697.
- PAHUD, G.: 1951. «Barrage Bia en enrochements sur la Lufira Katanga-Congo Belge». 4.º Cong. Grandes Presas, Nueva Delhi, Q. 13, R. 95, 475-494.
- PINTO, N. L. S.; MATERON, B. y LAGOS MARQUES, P.: 1982. «Design and performance of Foz de Areia concrete membrane as related to basalt properties». 14.º Cong. Grandes Presas, Río de Janeiro, Q. 55, R. 5º, 873-905.
- REGALADO, G.; MATERON, B.; ORTEGA, J. W. y VARGAS, J.: 1982. «Alto Anchicaya concrete face rockfill dam. Behaviour of the concrete membrane». 14.º Cong. Grandes Presas, Río de Janeiro, Q. 15, R. 30, 517-535.
- SAURA, J.: 1979. «Estudio tridimensional de tensiones y deformaciones en presas de materiales sueltos». Tesis Doctoral: Universidad Politécnica de Madrid.
- SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F. y CLEVENGER, W. A.: 1963. «Earth and Earth-Rock Dams». Wiley, N. Y.
- SOYDEMIR, C. y KJAERNSLI, B.: 1975. «A treatise on the performance of rock fill dams with unyielding foundations in relation to the design of Storvass dam». N G I, Oslo.
- STEELE, I. C. y COOKE, J. B.: 1960. «Rockfill dams: Salt Springs and Lower Bear River concrete face dams». Trans. ASCE, 125:2:74-116.
- STEELE, I. C. y COOKE, J. B.: 1961. «Concrete-face rock-fill dams». Sección 19 del libro «Handbook of Applied Hydraulics». Mc Graw-Hill, N.Y.
- THOMAS, H. H.: 1976. «The Engineering of large Dams». 2.ª parte. Wiley, Londres.

Fig. 1.—Relación entre las fugas y el máximo asiento postconstructivos en coronación.

