

## FISURACION Y EROSION INTERNA EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Por MANUEL ROMANA RUIZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ALBERTO BERNAL RIOSALIDO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Los problemas de fisuración y erosión en presas de materiales sueltos resultan de actualidad y han sido discutidos en los dos últimos Congresos de Grandes Presas. Ninguno de los autores que allí los han tratado ha dado una serie de criterios concretos que puedan servir de guía al proyectista y/o al constructor. Nos ha parecido, por lo tanto, útil tratar de sintetizar adecuadamente lo escrito sobre el tema.

Para escribir este artículo se han recopilado los datos existentes sobre fisuración y "piping" en presas de materiales sueltos y los criterios sobre la materia expuestos por diversos autores; dichos datos han sido analizados para preparar nuevos criterios cualitativos y cuantitativos que completen los existentes. Al final del artículo se ofrecen unas conclusiones que pueden servir como criterios de proyecto.

Las observaciones de nuestros compañeros con experiencia en el proyecto y construcción de presas no sólo serán bien recibidas, sino que las juzgamos imprescindibles para poder completar un "state of the art" español sobre el tema.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Ebro y a INTECSA, quienes han permitido la utilización de informes de su propiedad para la redacción de este artículo. Asimismo, agradecen al profesor Jiménez Salas su aliento y estímulo durante la redacción del mismo.

### 1. Introducción. Definición del problema.

Los fenómenos de fisuración y erosión interna en presas de materiales sueltos, constituyen una de las causas más importantes de accidentes en las mismas.

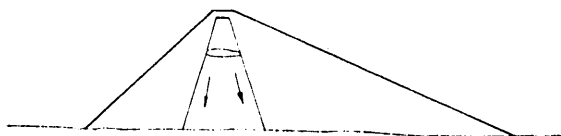
Existe gran variedad en la geometría de las fisuras observadas en las distintas presas, aunque para un estudio más racional puede aceptarse la clasificación que se indica esquemáticamente en la figura 1.

Se prescinde de un análisis más detallado porque no parece necesario a los fines de este artículo.

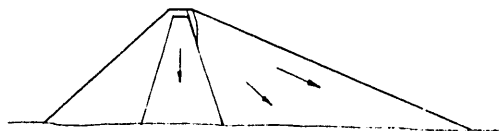
Las fisuras horizontales se producen por deformación (asiento) de la parte inferior del núcleo, quedando la parte superior colgada por efecto arco, de los espaldones.

Las fisuras longitudinales pueden aparecer si el espaldón aguas abajo tiene una deforma-

ESQUEMA DE FISURA HORIZONTAL



ESQUEMA DE FISURA LONGITUDINAL



ESQUEMA DE FISURA TRANSVERSAL



Fig. 1. — Esquema de los distintos tipos de fisuras.

(\*) Artículo enviado a la revista en abril de 1974.

ción elevada, que no puede ser seguida por el núcleo.

Las fisuras transversales aparecen en las zonas en que la coronación de la presa sufre deformaciones longitudinales de extensión en dirección del eje de la presa, que no pueden ser tomadas por el material del núcleo sin agrietarse.

No todas las grietas son igualmente peligrosas, puesto que alguna de ellas (por ejemplo las longitudinales), pueden ser fácilmente reparadas, mientras que otras (horizontales y transversales), al poner en comunicación el embalse con el talud aguas abajo de la presa pueden ser causa de importantes fugas; incluso si se asocian con fenómenos de erosión interna, pueden arruinar la obra.

Los fenómenos de erosión interna, *piping*, consisten en el arrastre progresivo del material a través de un conducto previamente establecido. El desarrollo de un arrastre tal exige, por tanto, la aparición previa de un camino preferente para el paso del agua, que puede ser debido a una grieta, una discontinuidad en el material, el contacto con el terreno, una conducción, una obra de fábrica o simplemente una zona más débil producida por una zanja para alguna conducción o una parada en la construcción, con desecación de la superficie que posteriormente no suelda con la continuación de la obra.

## 2. Criterios respecto a fisurabilidad de presas de materiales sueltos.

A continuación se exponen los criterios recientes sobre fisurabilidad. Algunos de ellos contemplan el problema general de la fisurabilidad, mientras que otros se centran en un tipo de fisuras determinado.

### 2.1. Leonards y Narain (1963).

Desarrollan sus criterios mediante ensayos de flexión en laboratorio y observación de la fisuración de varias presas homogéneas de pequeña altura y un terraplén experimental. Resumen su criterio para evitar la fisuración en la siguiente forma:

1. Si es posible, evitar el uso de arenas finas limosas, limos arcillosos y arcillas

limosas en presas homogéneas y en núcleos de no homogéneas.

2. Minimizar las discontinuidades en los taludes de las lagunas y en el fondo del valle.
3. Si es posible, sustituir o prehumedecer y precargar los materiales de cimentación susceptibles de colapso al humedecer.
4. Si no se pueden evitar las condiciones que favorecen el agrietamiento, construir filtros de importante espesor de arenas y gravas bien graduadas en ambos lados del núcleo impermeable.

### 2.2. Sherard (1963).

Indica la gran influencia que tiene en el agrietamiento la diferencia de compresibilidades entre distintas zonas de la cimentación o entre núcleo y espaldones y las discontinuidades y/o fuertes pendientes en las laderas.

Las características de los materiales más propensos al agrietamiento son:

- Granulometría contenida en el huso de la figura 2.
- Plasticidad reducida.
- Compactación del lado seco.

(Posteriormente, Sherard indica que al huso granulométrico anterior no debe dársele más que un valor orientativo.)

### 2.3. Biarez, Bordes y Londe (1970).

En primer lugar realizan un estudio de la fisurabilidad de materiales arcillosos. A partir del resultado de ensayos de laboratorio definen una condición de fisuración en tensiones y otra en deformaciones.

Para la primera utilizan el factor  $f$  de relación entre las diferencias de tensiones en rotura de pico y en rotura residual:

$$f = \frac{\sigma_m - \sigma_R}{\sigma_p - \sigma_R} = f \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_u}, w, IP, \% > 0,5 \text{ mm} \right)$$

donde:

- $\sigma_c$  = es la presión de consolidación;
- $\sigma_u$  = la tensión media;
- $w$  = la humedad;

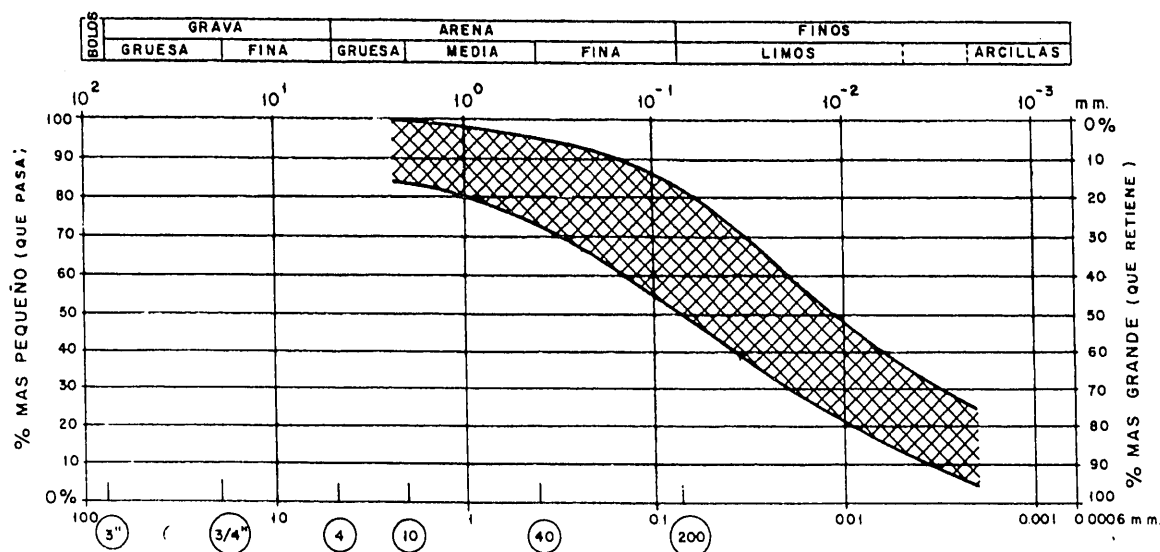


Fig. 2 — Huso granulométrico de los suelos más propensos al agrietamiento (según Sherard, 1953).

$IP$  = el índice de plasticidad;

$\% > 0,5 \text{ mm}$  = el porcentaje de material de diámetro equivalente mayor de 0,5 mm.

Para la segunda utilizan el valor  $\epsilon_f$ , deformación umbral de fisuración, que depende de los mismos factores que  $f$ .

También realizan un análisis del comportamiento de varias presas de materiales sueltos, definiendo un criterio de fisuración relativo a la aparición de fisuras longitudinales en la cresta. Consideran dos parámetros, el primero de deformabilidad de los espaldones:

$$A = \alpha \cdot \frac{H^{3/2}}{1.000} \cdot \left[ e \cdot \left( 100 \frac{D_{10}}{D_{60}} \right)^{1/7} \cdot \frac{1}{\beta} \right]$$

y el segundo de fisuración del núcleo:

$$B = \left[ IP \left( \frac{w_s}{w_p} \right)^2 \right]$$

donde:

$\alpha$  = es un coeficiente que vale 1 para escollera y 1/2 para aluviones.

$H$  = la altura, en metros.

$e$  = el espesor de las capas con que se construye.

$\frac{D_{10}}{D_{60}}$  = el coeficiente de uniformidad.

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{1/2 (\beta_{agg} \cdot \text{arriba} + \beta_{agg} \cdot \text{abajo})}$$

$IP$  = el índice de plasticidad.

$w_s$  = la humedad de saturación para la densidad de puesta en obra.

$w_p$  = la humedad correspondiente al límite plástico.

Con los datos de un cierto número de presas estos autores dibujan el gráfico de la figura 3, de la que parece deducirse que los núcleos más expuestos a la fisuración son los que tienen el coeficiente  $B$ , comprendido entre 1 y 4. Los materiales correspondientes a esta zona son los materiales poco plásticos (limosos, ML, CL-ML, o arcillosos, CL, fuertemente compactados). Los materiales plásticos (CH y MH) y los arenosos, SC-SM, no quedan comprendidos en esta zona.

#### 2.4. Wolski, Fürstenberg, Mioduszewski, Reczek (1970).

Analizan el comportamiento de núcleos de presas construidos con material muy húmedo. El equipo de compactación era ligero y la consistencia obtenida floja. Analizan la posibilidad de aparición de fisuras horizontales debidas a la sustentación de la parte superior del núcleo por efecto arco.

Se basan en los ensayos cuyo esquema y re

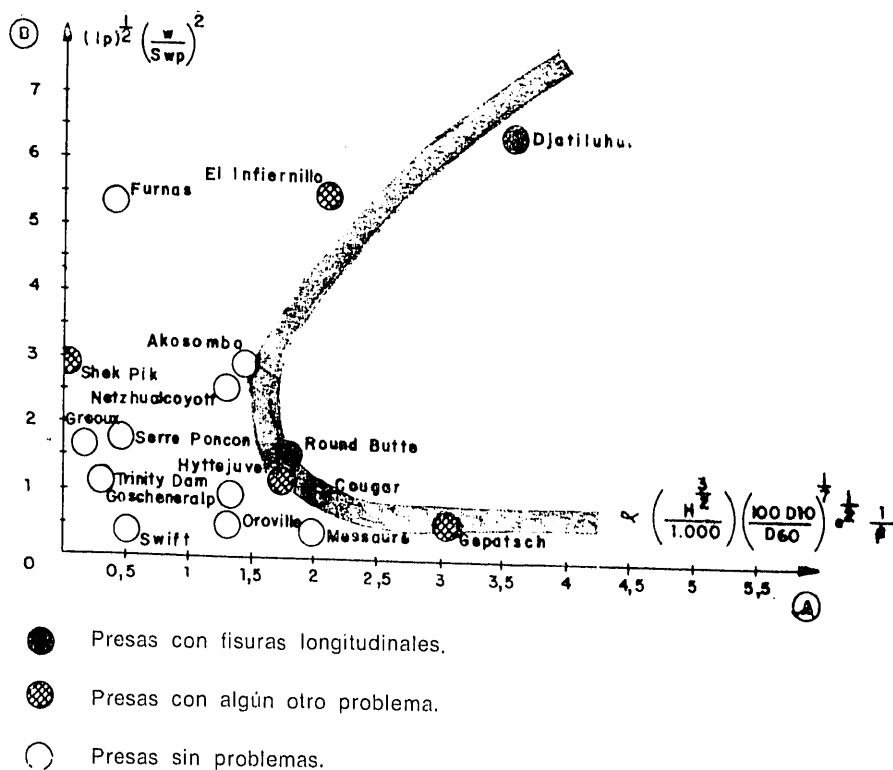


Fig. 3. — Intento de clasificación de algunas presas respecto del agrietamiento longitudinal (según Biarez, Bordés y Conde, 1970).

sultados aparecen en la figura 4. Puede observarse que al aumentar la humedad aumenta el desplazamiento necesario para que se produzcan grietas y disminuye la profundidad de éstas.

Como resultado de estos ensayos parece deducirse que no hay peligro de grietas por efecto arco en núcleos realizados con material de consistencia floja.

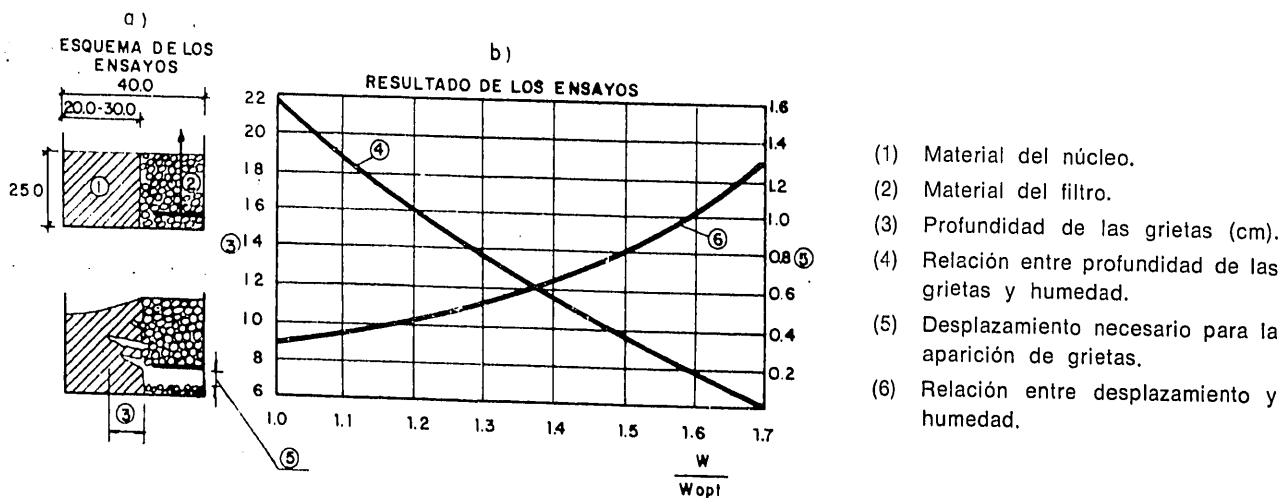


Fig. 4. — Resultado de los ensayos de agrietamiento (según Wolski y otros, 1970.)

## 2.5. Justo (1973).

Establece un criterio empírico para prever el agrietamiento transversal, en el que se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Geometría transversal de la presa (altura y módulo del talud de la ladera).
- Compresibilidad de la cimentación.
- Humedad de compactación del núcleo.

En la figura 5, se ha representado este criterio, con el que se confirma la antigua regla de que las presas de núcleo de tierra son más

susceptibles de agrietamiento si están compactadas del lado seco.

## 3. Criterios respecto a erosión interna o "piping" de presas de materiales sueltos.

A continuación se exponen los criterios recientes sobre las características geotécnicas que influyen (y en qué forma lo hacen), sobre la facilidad o dificultad que presenta un determinado material a la erosión interna.

### LEYENDA:

- (+) Presas sin grietas transversales.
- (-) Presas con grietas transversales.
- (1) Sin fisuras.
- (2) Fisuración transversal si la cimentación es muy compresible.
- (3) Fisuración de pantallas de hormigón armado sin junta perimetral.
- (4) Fisuración de pantallas de hormigón armado con junta perimetral y de pantallas bituminosas, en presas no compactadas. Posible fisuración de núcleos compactados del lado seco.
- (5) Posible fisuración en núcleos compactados del lado húmedo.

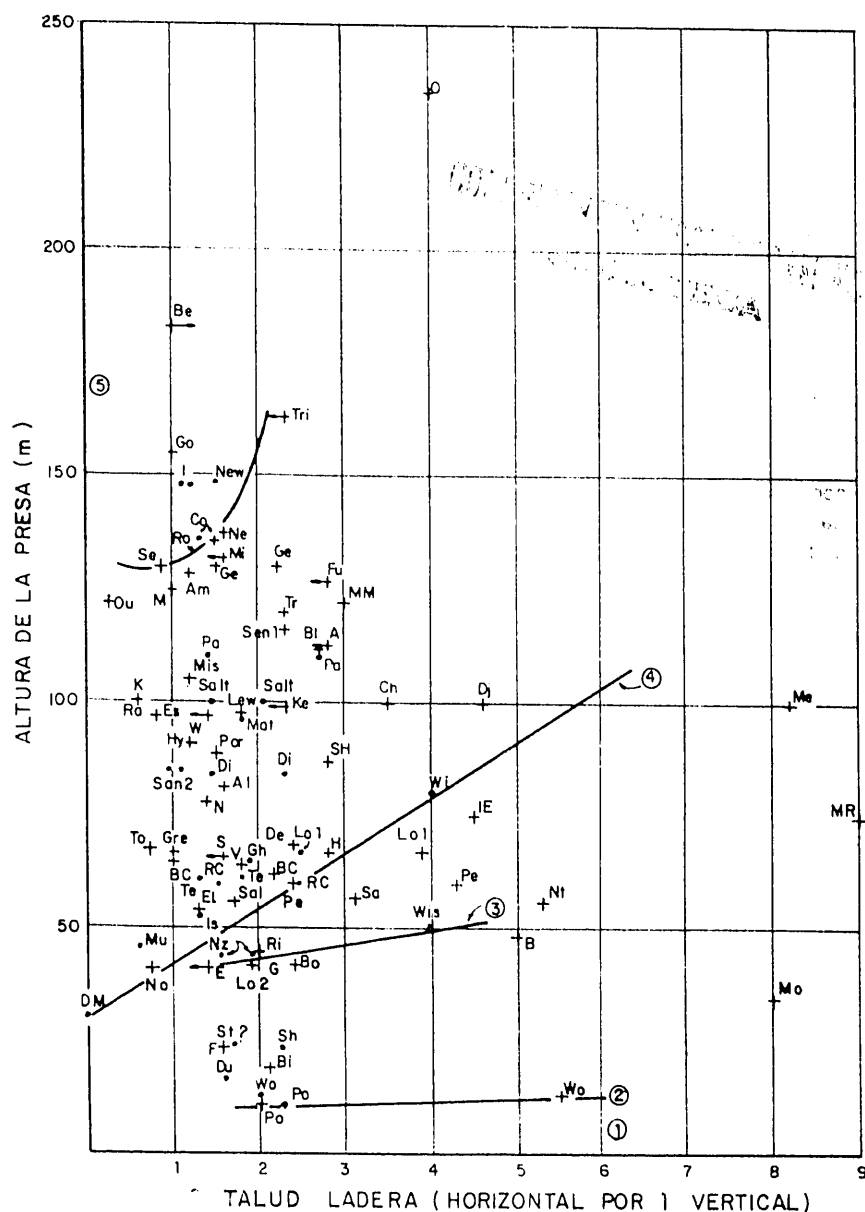


Fig. 5. — Criterio de agrietamiento transversal de presas de materiales sueltos (según Justo, 1973).

3.1. Sherard (1963).

Clasifica los distintos materiales según se indica en la tabla 1, en la que se observa que los suelos menos propensos a la erosión interna son los arcillosos muy plásticos, y los más propensos, los suelos finos poco o nada plásticos.

TABLA 1. — Resistencia a la erosión interna de diferentes tipos de suelo (según Sherard, 1969).

Mejor resistencia a la erosión interna:	1. Arcilla de alta plasticidad ( $IP > 15$ ). Bien compactada.
	2. Arcilla de alta plasticidad ( $IP > 15$ ). Mal compactada.
	3. Arena bien graduada o mezcla de grava y arena con finos arcillosos de media plasticidad ( $IP > 6$ ). Bien compactada.
Media resistencia a la erosión interna:	4. Arena bien graduada o mezcla de grava y arena con finos arcillosos de media plasticidad ( $IP > 6$ ). Mal compactada.
	5. Mezcla de grava, arena y limo bien graduada ( $IP < 6$ ). Bien compactada.
	6. Mezcla de grava, arena y limo bien graduada ( $IP < 6$ ). Mal compactada.
Peor resistencia a la erosión interna:	7. Arena fina muy uniforme sin cohesión ( $IP < 6$ ). Bien compactada.
	8. Arena fina muy uniforme sin cohesión ( $IP < 6$ ). Mal compactada.

3.2. Wolski, Fürstenberg, Mioduszewski, Reczek (1970).

Analizan el comportamiento de núcleos de presas constituidos con material muy húmedo compactado con maquinaria ligera, por lo que la consistencia obtenida era floja.

Para analizar el fenómeno del *piping* realizaron ensayos de extrusión del material a emplear en el núcleo. De estos ensayos se deduce el criterio para diseñar la granulometría del material del filtro que se expone en la figura 6.

3.3. Sherard, Decker, Ryker (1972).

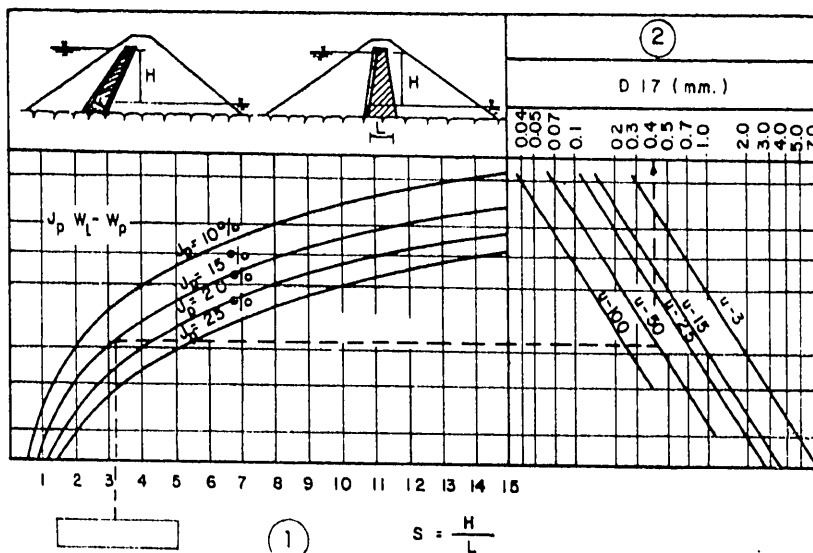
Estudian la erosionabilidad de materiales que denominan arcillas dispersivas, en las que por su particular composición química pueden producirse fenómenos de erosión por defloculación.

Estos autores indican que no parece existir correlación con los parámetros geotécnicos usuales y que el fenómeno está gobernado por el contenido en sales y especialmente en sodio.

La presencia de montmorillonitas suele comunicar a la arcilla características dispersivas, y lo mismo sucede con algunas illitas, siendo raro que suceda con las caolinitas.

4. Nuevo criterio de fisurabilidad transversal de presas de materiales sueltos.

En la tabla 2 se resume la información recogida sobre presas de materiales sueltos. Con esta información se han representado las figu-



- (1) Esbeltez del núcleo.
- (2) Granulometría del filtro,

$$u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Fig. 6. — Criterio de elección de la granulometría del filtro (según Wolski y otros, 1970.)

ras 7 a 9. En la primera aparecen las curvas granulométricas de los materiales utilizados en los núcleos de diversas presas. Se han indicado de trazo grueso las correspondientes a las que han sufrido fisuración.

Todas las curvas granulométricas se acercan a una recta muy tendida. Los materiales están muy bien graduados con representación de todos los tamaños. El coeficiente de uniformidad  $\frac{D_{60}}{D_{10}}$  toma valores generalmente comprendidos entre 100 y 1.000.

Parecen distinguirse dos husos. El superior, con proporción de elementos menores de 80  $\mu$  de 60-75 por 100, y el inferior, con 10-35 por 100 del material de tamaño menor que el mencionado.

En ambos husos existen curvas granulométricas de núcleos de presas que han tenido problemas de fisuración, no siendo posible definir, en base a esta figura, un huso de granulometría más desfavorable.

La figura 8 muestra los puntos representativos de la plasticidad de los materiales utilizados en distintos núcleos. Se han distinguido los correspondientes a núcleos de presas que han tenido problemas de fisuración. Puede observarse

que el material del núcleo de la mayor parte de las presas, queda en las zonas CL, CL-ML, ML, donde lógicamente existen más presas con problemas de fisuración. Hay que hacer notar que también entre las presas de material más plástico han surgido problemas de aparición de fisuras.

La figura 9 ilustra las características de compactación de los materiales empleados en los núcleos de las distintas presas estudiadas. En ella se han representado los puntos de humedad óptima-densidad seca máxima en el ensayo de compactación, y humedad-densidad en la puesta en obra, diferenciándose los puntos correspondientes a presas con problemas. Se observa que no hay una zona del plano  $\gamma_d - \omega$  que corresponda a núcleos de presas más propensos al agrietamiento. En la figura 10 se indica la humedad de puesta en obra y la energía de compactación en forma de porcentaje de la densidad seca máxima. Proctor obtenida en obra. Parece que son más propensos al agrietamiento los materiales compactados del lado seco o ligeramente húmedo y los que se compactan hasta una densidad menor o igual que la máxima en el ensayo de compactación.

Con todos los datos anteriores se ha pre-

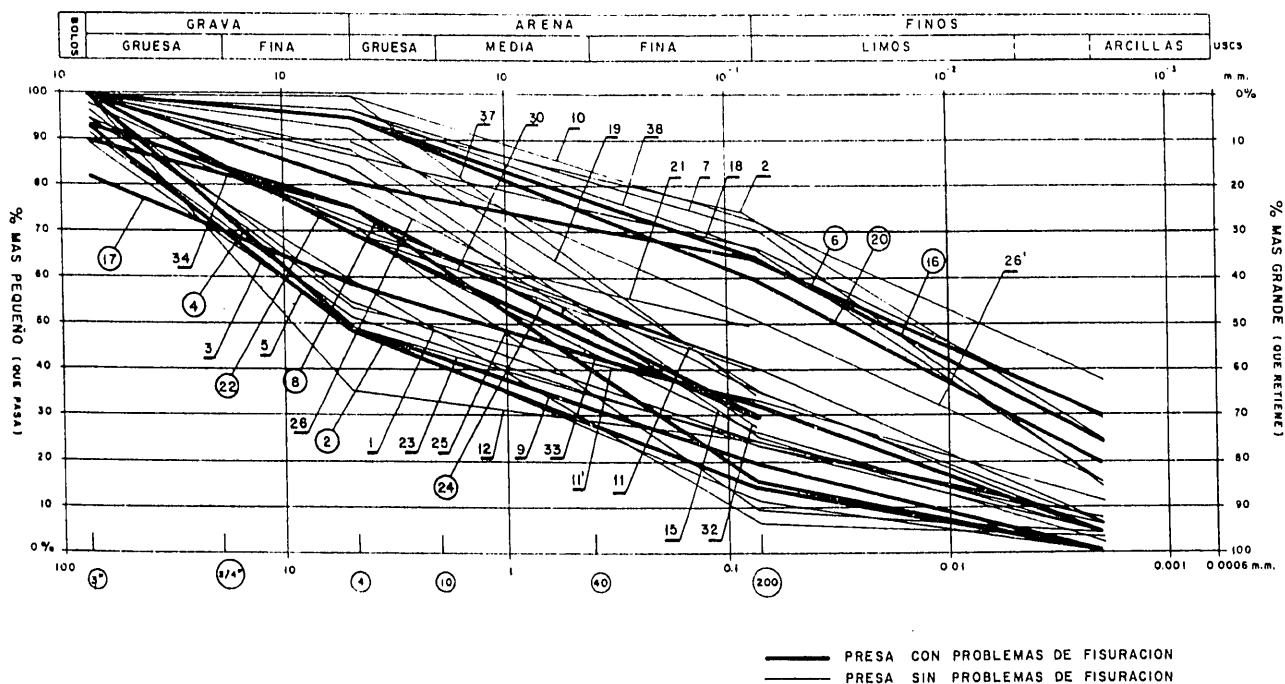


Fig. 7.— Resumen de granulometrías de los núcleos de las presas estudiadas (la numeración corresponde al orden en que aparecen en la tabla 2).

TABLA 2.— Características de las presas estudiadas. Presas con núcleo impermeable.

Nº	NOMBRE DE LA PRESA	ALTURA (m)	ESPALDONES			MODULO TALUD LADERA	CIMENTACION		PROPIEDADES DEL MATERIAL										DEL NUCLEO				CONSTRUCCION DEL NUCLEO				CONSTRUCCION DE ESPALDONES				COMPORTAMIENTO		REFERENCIA							
			ESPE- SOR ALUVION (m)	TRATAM- IENTO (2)	GRANULOMETRIA						LIMITES				PROCTOR		Cv	K	MAQUINA- RIA — (3)	ESPE- SOR TONGADA (m)	C	S	d	ω	MAQUINA- RIA — (4)	ESPE- SOR TONGADA (m)	GRANULOMETRIA				ASIENTO CRESTA (cm)	FISURAS (5)								
					70mm		5mm	80µ	2µ	ω <sub>L</sub>	ω <sub>P</sub>	ω <sub>F</sub>	ω <sub>T</sub>	%	T <sub>d</sub> T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	ω <sub>P</sub> %											cm/m <sup>2</sup>	m/m <sup>2</sup>	%	%				T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	%	D <sub>max</sub>	D <sub>80</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>10</sub>	
1	ORDVILLE	224	A	2.75	2.00	4			CL a CL-ML	100	55	25	8	28	21	7									N 100 4	0.25	8	95	2.2		Y 2	0.60	620	80	40	2.5	5.8	NO	X ICOLD 0.36.R.3	
2	KREMASTA	165	A						ML		95	75	25	27	19	8	2.69		16	5.10								93	1.8	-1	50	0.30 0.40	200				11.3	NO	idem	
3	GOSCHENERALP	155	A	3	2	2.8		R-I		93	52	24	5	20	15	5	2.72	2.18	6	5.10				35-45	0.30	6	86	2.2	0		2.50		950	500	10	230	NO	idem		
4	GEFATSCH	153	C	1.5	1.5	2.25	50	R-I	-1)	100	50	20	1	31	21	10	2.66		8.8	2.510				N 40 6	0.30	8.8	92	2.1	0	8.5 4	2.00		500	230	5	110	L S	idem		
5	SWIFT	153	A	2.5	2		60	R-I	SC-SM	92	50	12	1				5	1.9	12	2.10				N 50 4	0.37 0.54	10	63	1.87	2	50 4			55	20	0.15		NO	idem		
6	EL INFIERNILLO	148	C	1.75	1.75	1.1		I	CL	100	95	65	25	49	24	25	2.75	1.69	19				-8 15	PC 15	0.15	23	87	1.59	4	D8 4	0.60 1.00	600	200	88	7	37	T S	idem		
7	NETZAHVALCOYOTL	137	C	2	2	1.6	30	R	ML	100	97	71	15	55	35	20		1.68	19				V 4 6	0.20	25	95	1.60	7	D8 4	0.50 1.00		45	28	0.25	24	NO	idem			
8	COUGAR	138	E	1.8	1.6	1.3	10	R-I	ML	90	76	16	1	40	30	10		1.89	14				-7 4	N 50 4	0.30	15	94	1.89	1	D8 4	0.90	500	150	75	10	82.5	T.L. N	idem		
9	MIBORO	131	C	2.5	1.75	1.6	8	P-R	ML	95	60	7	4	35	30	5	2.63		7				-5 20	PC 20	0.20	8	83	2.05	1	D8 4	4.00 8.00				43	NO	idem			
10	FURNAS	127	C	2	1.8				I	CH a CL	100	100	73	38	50	25	25						N 50		23	89	1.6		D8 2	0.60		75	50	0.1	13	NO	idem			
11	SERRE-PONCON	123	A	2.5	3	0.85	100	I	ML	95 97	73 54	41 34	7 12	26 4	19.7	6 7		12 10	0.5				-7 3.10 -6 2.10	N 35 8	0.30	14 11	91 88	2 2.03	2 1	N 45 4	0.60		65	50	0.5	255	NO	idem		
12	TRINITY	122	A	2.5	2.5	2.3				CL-ML	100	36	25	7	28	22	6	1.90	15									13	87	1.90	-2	D8 4	0.30 0.45	100	50	20	0.1		NO	idem
13	MUD MOUNTAIN	122	C	2	2	3.0																								1.20		35	7	82.2	D N	idem				
14	AKOSOMBO	113	C	1.7	1.75	2.8	30	I	CL					40	18	22			13				-8 20	N 50 E	0.25 0.30	14	90	1.9	0.5	3.5 4	0.90		50	125	10		NO	idem		
15	MESAURE	103	C	1.75	1.65		60	R	SC-SM	100	85	26	3	27	22	5							-8 5.10	D-8	0.25		90		4	N	0.30	6	0.8	0.48	0.125	42.8	NO	idem		
16	DJATILUHUR	100	C	1.75	1.35	4.7				CH	100	81	64	30	64	26	38	2.73	1.63	22			-8 10	N 45 E	0.35	24	92	1.58	2	D8 4	1.00	200	115	10	72.5	L N	idem			

ABREVIATURAS UTILIZADAS EN LA TABLA 2:

- (1) A: Aluviones.  
C: Producto de cantera.  
M: Morrena glaciar.  
(2) P: Pantalla.  
R: Rastrillo.  
I: Inyecciones.

- (3) y (4): Primera línea: tipo de maquinaria.  
N: Neumáticos.  
PC: Pata de cabra.  
V: Rodillo vibrante.  
D: Escollera vertida.  
A: Escollera compactada con agua.  
Segunda línea: peso en toneladas.  
Tercera línea; número de pasadas.

- (5) L: Longitudinales.  
T: Transversales.  
I: Internos.  
S: Superficiales.  
N: Afectan al núcleo.



TABLA 2. — Características de las presas estudiadas. Presas con núcleo impermeable.

Nº	NOMBRE DE LA PRESA	ALTURA (m)	ESPALEONES		MODULO TALUD LADERA	CIMENTACION		PROPIEDADES DEL MATERIAL DEL NUCLEO										CONSTRUCCION DEL NUCLEO					CONSTRUCCION DE ESPALDONES					COMPORTAMIENTO		REFERENCIA						
			MATE- RIAL (1)	TALUDES		ESPE- SOR ALUVION (m)	TRATAM- ENTO— (2)	CLASIFI- CACION—	GRANULOMETRIA				LIMITES			Y <sub>s</sub> Tm/m <sup>3</sup>	Y <sub>d</sub> Tm/m <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> %	C <sub>v</sub> cm <sup>2</sup> /kg	K cm <sup>2</sup> /kg	MAQUINA- RIA — (3)	ESPE- SOR TONGADA (m)	Q %	S %	d Tm/m <sup>3</sup>	Q <sub>v</sub> %	MAQUINA- RIA — (4)	ESPE- SOR TONGADA (m)	GRANULOMETRIA				ASIENTO CRESTA (cm)	FISURAS (5)		
				ARriba					ABAJ0	75mm	5mm	80µ	2µ	W <sub>L</sub>	W <sub>p</sub>														I <sub>p</sub>		PC-221 N-45T 5	D <sub>max</sub>			D <sub>80</sub>	D <sub>60</sub>
17	HYTTEJUVET	93	C	1.6	1.45	1.2		CL-IL	82	59	33	5	21	15	6	2.76	2.17	8	0.8	7.10	D7 5	0.25	8	2.15	0		0.50	250	130	40	0.8	18	I	X ICOLD 0.36 - R.3		
18	PRESIDENTE MIGUEL ALEMAN	76	C	2.5	2		P-I	CH	100	67	67	30	70	34	3E		21					24	24	1.50	3						141	NO	idem			
19	TOOMA	68	C	2.75	2.5	0.7		ML	100	93	36	5	30	21	9	2.73	1.73	18	0.5.10					80	1.70	2 1	D A	3.00	150				NO	idem		
20	SHEK PIK	55	A	3.6	2.8		50	I	GL	100	95	60	20	37	25	12		1.76	16	2.51 10 <sup>-7</sup>	PC-221 N-45T 5	3.23	18	82	1.65	2			12	0.5	0.08	0.001	6	I	idem	
21	GREQUX	67	A	1.8	1.85	1.0	6	R-I	ML	100	70	50		27	17	10				N 40			11	67	2.0		V 8.5	0.60		60	50	0.5		NO	idem	
22	ROUND BUTTE	132	C	1.8	1.7	1.2		CL-ML	100	70	30		25	20	5								12.7	82	1.90	1		0.60	450		125	25		N	idem	
23	MONT CENIS	120	A	3.0	1.4			SC	90	50	20		NP	NP	NP		2.2	7		10 <sup>-5</sup>		0.40	7		2.13	0		0.80						X ICOLD 0.36- R-4		
24	MATTMARK	120	M	1.6	1.4	1.115	30	I	SC	93	48.5	15	2.2	NP	NP	NP	2.95	2.40		10 <sup>-5</sup>	N 80	0.30	2.7 8.3		2.47				800		100		T	X ICOLD 0.42- R-30		
25	OUTARDES 4	119	C	1.85	1.75	0.27		SC	98	72	10	5	NP	NP	NP		2.24			10 <sup>-6</sup>	N 50	0.25	8										NO	X ICOLD 0.36 - R-28		
26	VIDRA LOTRU	121	C	1.75	1.75		I	SC CL		80 90	36 52	7 15	39	21	18		1.82	16		10 <sup>-6</sup>			17 20		1 4									X ICOLD 0.36-R-33		
27	BRIDLE DUFT	51	C	3.0	1.3			CL				30	39	16	23		1.82 1.68	16.1 20.5		P.C		15.6 20		1.84 1.70	0.5	V 10	1.00 1.50							X ICOLD 0.36 -R-18		
28	NANJIRENJI	60	C	2.2	1.3							48 22	52 31	18 11	34 20		1.72 2.03	17.8 11.1	2x10 <sup>-4</sup> 6.10 <sup>-4</sup>	P.C		15		3										X ICOLD 0.36 -R-18		
29	DUNCAN	36	M	3.0 5.0 8.0	2.0 5.0 8.0	1.3	380	P	CL			10		18	13	5	2.05	9.8				10.8		2.05	1					0.0073	440	T	X ICOLD 0.36 - R-25			
30	MICA	244		2.25	2.0			SW	100	70	40		26	21	5		2.15	9.4		10 <sup>-7</sup>			8.7		2.10	0.7	V 9	0.30	300	100	50	2		X ICOLD 0.36-R-29		
31	ESTREITO	97	C	2	2	0.8		CL			20 28	17								N				1.84	1.0								NO	X ICOLD 0.36-R-44		
32	BENNET	183	M	2.5	2	1.0		SW	100	88	28		NP	NP	NP		2.08				V 90		6.9		2.05							15"	NO	X ICOLD 0.36-R-40		

TABLA 2. — Características de las presas estudiadas. Presas con núcleo impermeable.

Nº	NOMBRE DE LA PRESA	ALTURA (m)	ESPALEONES			MODULO TALUD LADERA	CIMENTACION		PROPIEDADES DEL MATERIAL DEL NUCLEO										CONSTRUCCION DEL NUCLEO					CONSTRUCCION DE ESPALDONES					COMPORTAMIENTO		REFERENCIA			
			MATERIAL (1)	TALUDES			ESPE- SOR (m)	TRATAM- IENTO (2)	CLASIFI- CACION	GRANULOMETRIA				LIMITES			PROCTOR T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	C <sub>v</sub> %	K	MAQUINA- RIA — (3)	ESPE- SOR (m)	ω %	S %	d T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	ω - ω <sub>p</sub> %	MAQUINA- RIA — (4)	ESPE- SOR (m)	GRANULOMETRIA				ASIENTO CRESTA (cm)	FISURAS (5)	
				ARriba	Abajo					75mm	5mm	80 μ	2 μ	ω <sub>L</sub>	ω <sub>p</sub>	ω <sub>p</sub>												T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	%				cm <sup>2</sup> /kg
33	MAUTHAUS	61		1,5 1,75	1,5 1,75			S M	100	70	27	5				2,75			10 <sup>-4</sup>	N 40 10	0,20 0,25			1,97									XI ICOLD 0,42 - R.12	
34	BLENHEIM GILBOA	48	M	3,0	2,5		25	R	S C S M	95	72	42		18	15	4	2,70	2,02	10,5														XI ICOLD 0,42 - R.12	
35	JOHN MARTIN	46		3,0	2,0				PC																									
36	MCNARY	51																																
37	CAMANCHE	49		2,5	2,25				S C	100	100	35		18	14	4				10 <sup>-6</sup>	PC													
38	CONCHAS DIXES	72		3,0	3,0				M L	100	97	62	15				1,80	13		5-6	0,23	15												
39	VERMILLION	50		2,25 3,0	2,5		40																											
40	WANAPUM	21		2,0	2,0		15	P																										

TABLA 2. — Características de las presas estudiadas. Presas homogéneas.

Nº	NOMBRE DE LA PRESA	ALTURA (m)	ESPALDONES		MODULO TALUD LADERA	CIMENTACION		PROPIEDADES DEL MATERIAL DEL NUCLEO										CONSTRUCCION DEL NUCLEO					CONSTRUCCION DE ESPALDONES					COMPORTAMIENTO		REFERENCIA					
			MATERIA L (1)	TALUDES		ESPE- SOR (m)	TRATAM- IENTO (2)	CLASIFI- CACION	GRANULOMETRIA				LIMITES			PROCTOR T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	C <sub>v</sub> %	K	MAQUINA- RIA — (3)	ESPE- SOR (m)	ω %	S %	d T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	ω - ω <sub>p</sub> %	MAQUINA- RIA — (4)	ESPE- SOR (m)	GRANULOMETRIA					ASIENTO CRESTA (cm)	FISURAS (5)		
				ARriba					Abajo	75mm	5mm	80 μ	2 μ	ω <sub>L</sub>	ω <sub>p</sub>												ω <sub>p</sub>	T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>	T <sub>m</sub> /m <sup>3</sup>		%			cm <sup>2</sup> /kg	cm/kg
41	BONNY	48		3.0 3.5	2.0 4.25		10	TIPO HOMOGENEO																											
42	SALINE COUNTY	13		2.0 3.0	2.0 3.0			TIPO HOMOGENEO									1.73	17		10 <sup>-6</sup>					0					25					
43	WASHINGTON COUNTY	10		3.0	2.5			TIPO HOMOGENEO																								T			
44	PORTLAND	11		3.0	2.0	2.8	7	R						29	21	6	1.79	16.3		P C 10	0.15	13.5	1.78	3								L T	Leonards y Narison		
45	RECTOR CREEK	45		2.5	2.25	1.5	15	R						38	22	16	1.65	19.8		P C 10	0.75		1.60 1.78	4						60		T	idem		
46	WOOD CREST	13		2.5	2.0	1.7	15							NP	NP	NP	2.03	10.2				8.5	1.88 2.01	3								T	idem		
47	SHELL OIL	24		2.0	2.0	2.2								31	20	11	1.76	16.4		P C 16	0.15			1						40		T	idem		

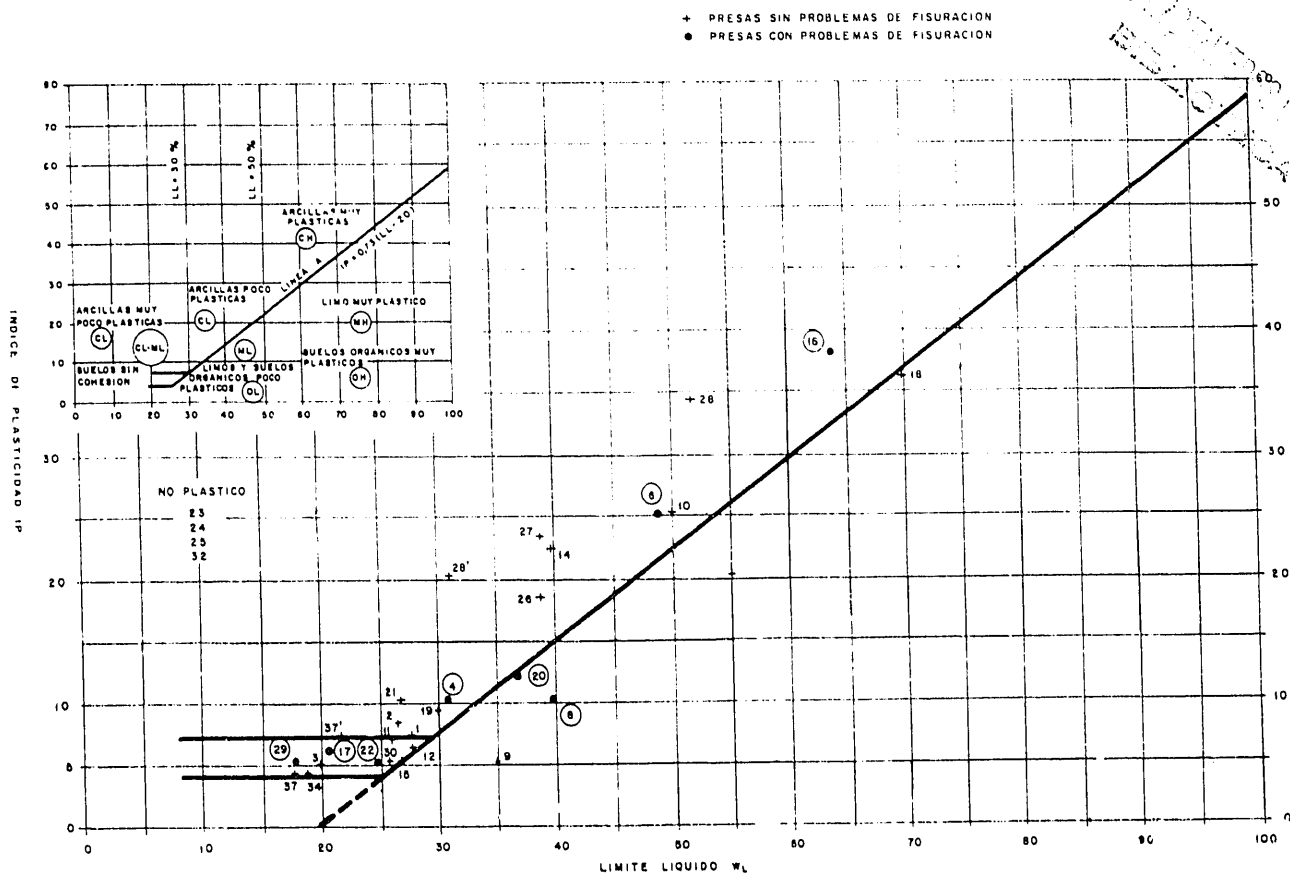


Fig. 8. — Resumen de plasticidades de los núcleos de las presas estudiadas (la numeración corresponde al orden en que aparecen en la tabla 2).

parado el nuevo criterio para analizar la fisurabilidad transversal de presas de materiales sueltos que se expone en la figura 11. En ella aparece en ordenadas el factor:

$$\alpha \cdot \left( \frac{H}{100} \right)^{3/2} \cdot \frac{1}{m}$$

adaptado del factor de deformabilidad de Biares (1970), en el que:

$\alpha$  es un coeficiente de valor 0,5 para espaldones constituidos por aluviones y 1,0 para los constituidos por material de cantera.

$H$  es la altura de la presa en metros.

$m$  es el módulo del talud de la ladera ( $m$  horizontal por 1 vertical).

En abscisas se ha llevado la humedad de compactación ( $\omega - \omega_{op}$ ), y la plasticidad ( $IP$ ).

Se distingue en la representación entre las presas que han sufrido fisuración transversal, las que han sufrido algún tipo de problemas y las que no han tenido problemas.

Se observa separación clara entre las presas que han sufrido fisuración transversal y las demás (la 29 es una excepción. Ahora bien, esta presa está cimentada sobre un gran espesor de depósito glacial, por lo que su deformabilidad es muy superior a la definida por el coeficiente utilizado. Por tanto, su ordenada en la representación de la figura 11 debería ser mayor, y muy bien puede quedar en la zona de presas con fisuración transversal).

En los casos observados, las grietas aparecieron en zonas con elevadas deformaciones de extensión, debidas generalmente a asentamientos diferenciales causados por la acción de uno o varios de los siguientes hechos: elevada deformabilidad de la cimentación, elevada deformabilidad de la presa, discontinuidades en la ci-

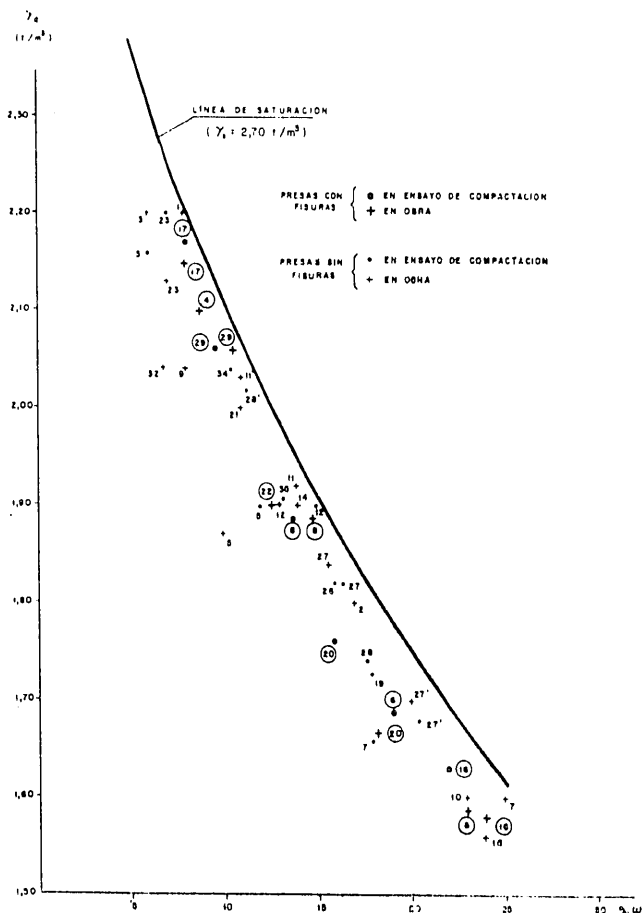


Fig. 9. — Características de compactación de los núcleos de las presas estudiadas. (Puntos densidad-humedad.) (La numeración corresponde al orden en que aparecen en la tabla 2.)

mentación, discontinuidades o fuertes pendientes en las laderas (para fisuración transversal).

Como se deduce de las figuras anteriores, son varios los factores que influyen en la fisurabilidad transversal de una presa de materiales sueltos. De estos factores, el que tiene mayor influencia es la deformabilidad transversal de la presa (que depende de la altura y del módulo del talud de la ladera). Con menor importancia, pero también con una cierta influencia están las características geotécnicas del material del núcleo y las condiciones de compactación. Entre las características del núcleo, la granulometría utilizada es siempre muy extendida, y dentro de este tipo, no parecen influir ni el porcentaje de finos ni el diámetro eficaz (fig. 7); la plasticidad tiene una pequeña influencia, como puede verse en la figura 11.

Entre las condiciones de compactación, la más importante es la humedad de compactación, como puede observarse en las figuras 8 a 10. Según la figura 11, su influencia en la fisurabilidad es mucho menor que la de la deformabilidad transversal y algo mayor que la de la plasticidad del núcleo.

### Conclusiones.

El agrietamiento de presas de materiales sueltos es debido sin duda a la aparición de elevadas deformaciones de extensión que no pueden ser tomadas por el material del núcleo.

Un método teórico de prever el agrietamiento de una presa consistirá en estimar (mediante cálculo) las deformaciones de extensión que se van a producir en la presa, averiguar (mediante ensayos) la deformación de extensión que produce el agrietamiento del material y comparar ambos valores.

Debido a las dificultades de este método, pueden utilizarse otros que estiman las deformaciones de la presa y la deformabilidad sin

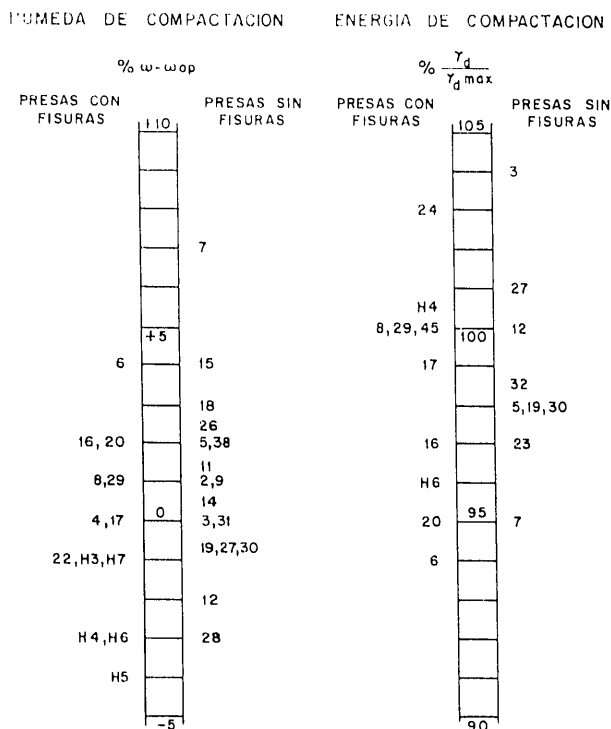


Fig. 10. — Características de compactación de los núcleos de las presas estudiadas, humedad y energía de compactación. (La numeración corresponde al orden en que aparecen en la tabla 2.)

rotura del material mediante parámetros semiempíricos. Las deformaciones de la presa se estiman a partir fundamentalmente de la geometría. La deformabilidad en extensión sin rotura del material del núcleo se estima a partir de unos parámetros geotécnicos sencillos y de otros que definen las condiciones de compactación.

En el cuadro adjunto se establecen cualitativamente los criterios que permiten evaluar la posibilidad de fisuración longitudinal y transversal de una presa determinada.

Para una estimación cuantitativa de la misma existen varios criterios que pueden considerarse utilizables en la actualidad:

- Para el agrietamiento longitudinal, el de Biarez, Bordes y Londe.
- Para el agrietamiento transversal, el de Justo y el nuevo criterio expuesto en este artículo.

La erosión interna (*piping*), o arrastre de las partículas del suelo, requiere para su forma-

ción unos factores desencadenantes, consistentes en la circulación de agua por un camino previo, a través del cual pueda producirse el arrastre del material. Las características del material que gobiernan su erosionabilidad son la granulometría y la plasticidad. Para evitar que un determinado material pueda ser erosionado debe adoptarse una granulometría extendida, con presencia de todos los tamaños, que lo haga autocolmatable, de forma que si se produce un conducto para el arrastre sea relleno en primer lugar por las partículas más gruesas, que a su vez retengan a las más finas. Con esta condición no parece que una plasticidad reducida sea motivo suficiente para desechar un determinado material.

Si los suelos de que se dispone no presentan las características granulométricas antes indicadas, puede lograrse un material autocolmatable por mezcla de suelos de diferentes características. Tal técnica ha sido utilizada en diferentes presas, de las que el ejemplo más significativo quizá sea el de la presa de Tarbela.

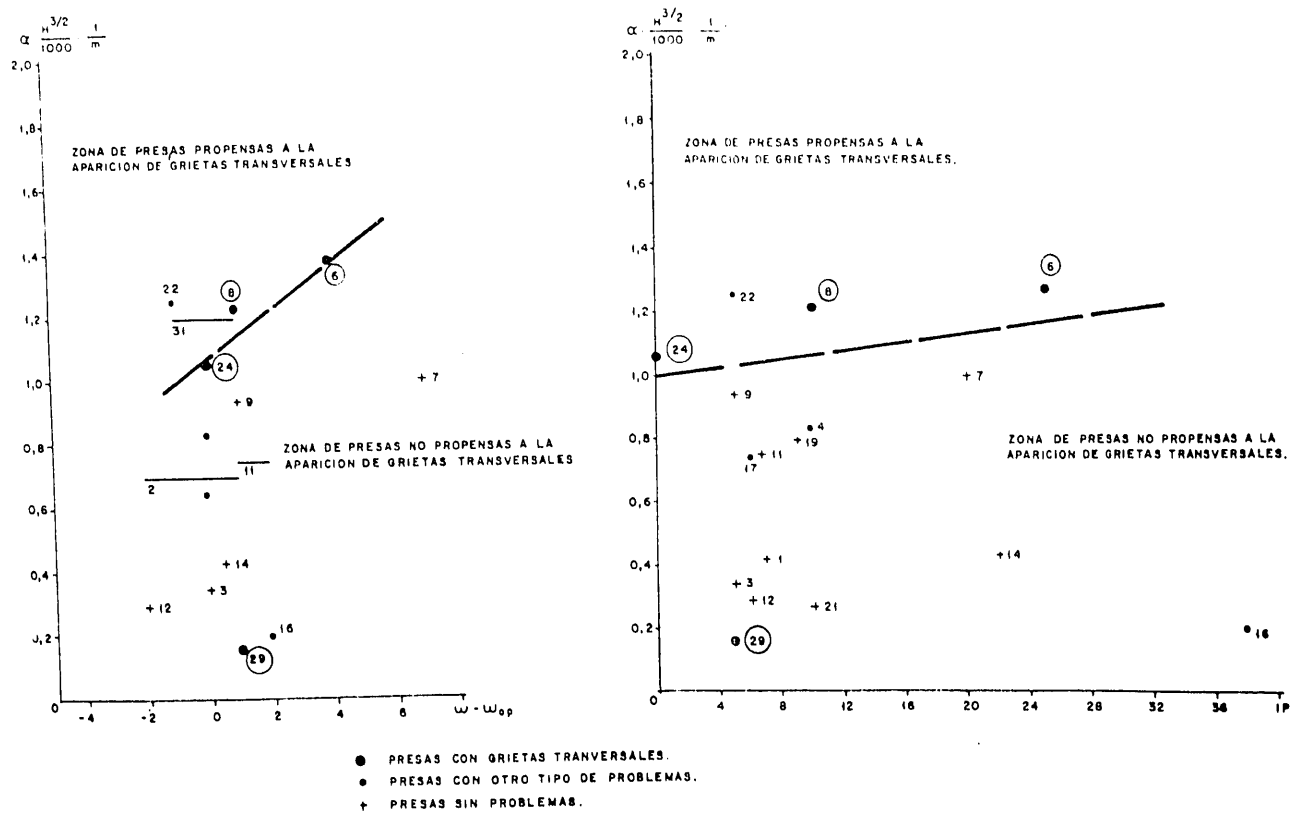


Fig. 11. — Influencia de la Geometría transversal, de la humedad de compactación y de la plasticidad en la aparición de grietas transversales. (La numeración corresponde al orden de aparición en la tabla 2.)

# CRITERIOS PARA EVALUAR CUALITATIVAMENTE LA POSIBILIDAD DE FISURACION DE UNA PRESA DE MATERIALES SUELTOS

FACTORES QUE DEFINEN LA DEFORMABILIDAD DE LA PRESA. FACTORES QUE DEFINEN LA DEFORMACION DE EXTENSION ADMISIBLE EN EL NUCLEO				
Comportamiento de la presa ante la fisuración	1. Cimentación	2. Geometría del conjunto.		4. Compactación del núcleo.
		De presa y cerrada (1).	De la sección tipo (2).	
Menor probabilidad de aparición de fisuras	Regular y poco compresible.	Regular. Laderas tendi- das. Altura de la pre- sa pequeña.	Taludes amplios. Es- paldón aguas abajo poco deformable.	Elevada en la par- te inferior y mo- derada en la parte superior.
Mayor probabilidad de aparición de fisuras	Irregular y/o muy compre- sible .....	Con discontinuidades. Laderas muy pendien- tes o con cambios, bruscos de pendiente. Altura de la presa grande.	Predominio de algún ta- maño. (En especial, si es tamaño limo.) (3)	Reducida en la parte inferior y elevada en la parte superior.

- (1) Para fisuración transversal únicamente.  
(2) Para fisuración longitudinal únicamente.  
(3) No incluye el porcentaje de finos ni el diámetro eficaz.

Asimismo, ha sido recomendado por los autores de este artículo para los materiales a utilizar en el núcleo de la presa de Rialp (figs. 12 y 13).

Además de las precauciones indicadas respecto de la granulometría del material del núcleo, el mejor comportamiento del conjunto de la presa se obtendrá disponiendo a ambos lados del núcleo sendos filtros de material adecuadamente seleccionado, que debe cumplir los siguientes requisitos: ser poco propenso al agrietamiento, ser autocolmatable, presentar elevada permeabilidad al agua, no permitir el paso del material del núcleo a través de sus huecos.

Como resumen, puede decirse que el fenómeno más peligroso que hay que prevenir es la erosión interna, que para desarrollarse necesita un factor desencadenante previo que puede ser una fisura. De éstas, las más peligrosas son las horizontales y transversales, puesto que atraviesan (o pueden atravesar) el núcleo. Para prevenir la fisuración transversal debe prestarse especial atención a la geometría de la cerrada y a la cimentación de la presa, mejorándose el comportamiento de un determinado material, compactándolo del lado húmedo.

El peor comportamiento ante la erosión in-

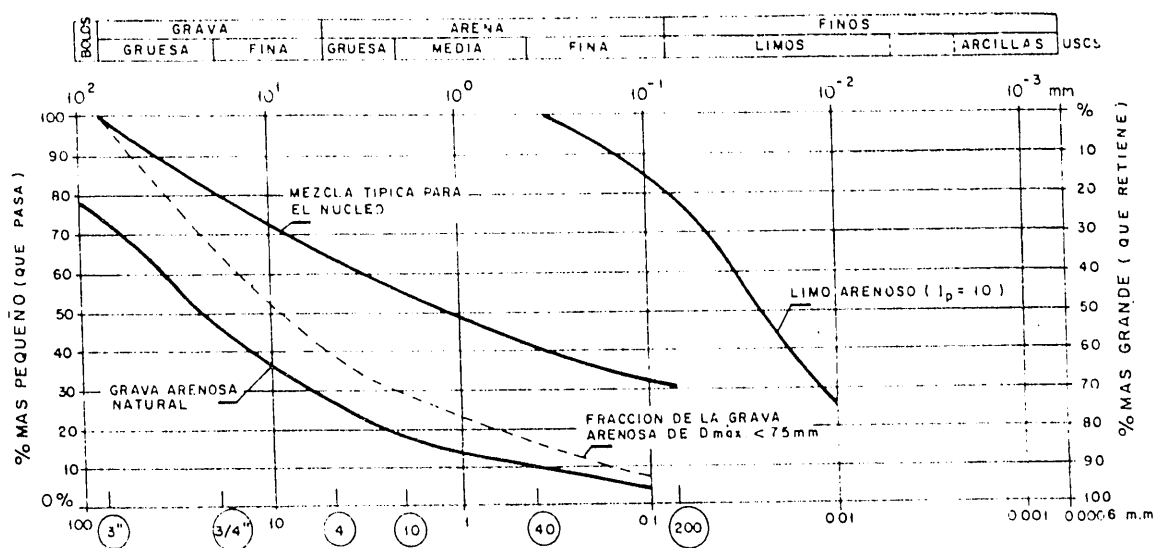


Fig. 12. — Granulometría del núcleo impermeable de la presa de Tarbela.

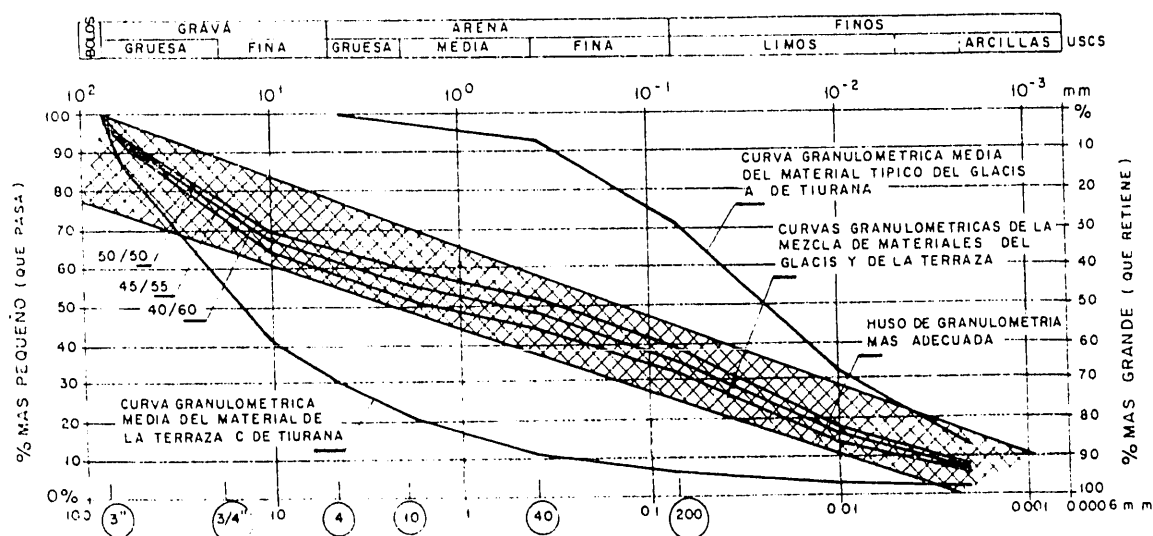


Fig. 13. — Huso granulométrico recomendado para el núcleo de la presa de Rialp. Ejemplos de granulometría de la mezcla de limos del glacis con grava de la terraza.

terna lo tienen los suelos limosos poco plásticos. Sin embargo, no parece que deba desecharse la utilización de un determinado material para núcleo de una presa de materiales sueltos únicamente en razón de su baja plasticidad. Po-

niendo especial cuidado en su granulometría (para que sea autocolmatable), y disponiendo a ambos lados del núcleo filtros de material de granulometría adecuada y suficiente espesor, tal material puede ser utilizado.

## CRITERIOS PARA EVALUAR LA POSIBILIDAD DE EROSION INTERNA EN UNA PRESA DE MATERIALES SUELTOS

FACTORES DESENCADENANTES	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL EN RELACION CON SU EROSIONABILIDAD	PRECAUCIONES A TOMAR PARA EVITAR EL "PIPING"
<p>Camino preferente al paso del agua. Producido por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Fisuración transversal u horizontal.</li> <li>— Contacto con terreno u obra de fábrica.</li> <li>— Discontinuidad en el material del núcleo que lo atravesase, debida a alguna zanja excavada durante la obra para introducir algún conducto o a una parada en la construcción con desecación de la superficie, etc.</li> </ul> <p>Circulación de agua por ese camino con capacidad de arrastre de partículas.</p>	<p>Material más propenso al "piping": Suelos de granos finos uniformes y plasticidad reducida (generalmente suelos limosos).</p> <p>Material menos propenso al "piping": Suelos de plasticidad elevada y suelos de granulometría extendida (material autocolmatable).</p>	<p>Evitar que pueda producirse alguno de los factores desencadenantes. Utilizar un material de granulometría extendida (autocolmatable).</p> <p>Disponer filtros de granulometría adecuada que permitan el paso del agua, pero no del material del núcleo.</p>

## BIBLIOGRAFIA

BIAREZ, J.; BORDES, J. L.; LONDE, P.: "La fissuration des noyaux des barrages en enrochements or en alluvions". X Congreso Internacional de Grandes Presas. Q.36, R-3 (1970).

INTECSA: "Investigación de las terreras para la presa de Rialp". Informe para la Confederación Hidrográfica del Ebro. No publicado.

JUSTO ALPAÑES, J. L.: "The cracking of earth and rock-fill dams". XI Congreso Internacional de Grandes Presas. C.11. (1973).

LEONARDS, G. A.; NARAIN, J.: "Flexibility of clay and cracking of earth dams". J. Soil Meck and Found. Div., A.S.C.E. Marzo 1963.

LOWE, J.: "Recent development in the design and construction of earth and rockfill dams". X Congreso Inter-

nacional de Grandes Presas. Q.36, General Report (1970).

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVENGER, W. A.: "Earth and Earth-Rock dams". Ed. John Wiley and Sons (1963).

SHERARD, J. L.; DECKER, R. S.; RYKER, N. L.: "Piping in earth dams of dispersive clay". Proceedings on the Speciality Conference on Performance of earth and earth supported structures. Purdue University, junio 1972.

WOLSKI, W.; FURSTEMBERG, A.; MIODUSCEWSKI, W.; RECZEK, J.: "Protection against piping of dams core made of flysh origin cohesive soils". X Congreso Internacional de Grandes Presas, Q.36, R-34 (1970).

Rapports de los Congresos Internacionales de Grandes Presas.