

Q-66: Presas en cimentaciones difíciles

Por JESUS YAGÜE CORDOVA

Ingeniero de Caminos.

Secretario General del Comité Español de Grandes Presas.

1. DESGLOSE DE LA CUESTION 66

- a) Efecto de las cimentaciones difíciles en el proyecto y construcción (estanqueidad, estabilidad, licuefacción, etc.).
- b) Tratamiento no usual de cimentaciones.
- c) Comportamiento de la cimentación en el primer llenado y durante la explotación.
- d) Comportamiento insatisfactorio de las cimentaciones medidas correctoras y resultados.

2. INFORME DEL RELATOR GENERAL

En el Volumen III de las publicaciones para el XVII Congreso de Grandes Presas de Viena se incluyen los artículos relativos a la cuestión 66 y el informe del relator general. Esta cuestión es el tema que ha dado lugar a la redacción del mayor número de artículos de los presentados al Congreso con 99 artículos.

El informe del relator general Sr. Larocque (Canadá) es de gran categoría dada la dificultad de sintetizar un tema de alcance tan variado y complejo. Comentaremos por ello los aspectos principales de su desarrollo que se efectúa partiendo del establecimiento de las condiciones que hacen una cimentación difícil y los tratamientos que pueden considerarse usuales, posteriormente se analizan los cuatro apartados del temario para terminar con algunos comentarios generales sobre las tendencias actuales.

2.1. Cimentaciones difíciles

Se consideran cimentaciones difíciles las que reúnen alguna de las siguientes condiciones:

- Suelo de cimentación de capacidad portante baja.
- Suelos de cimentación de alta compresibilidad.
- Suelos de cimentación heterogéneos y de alta permeabilidad.

- Presencia de material susceptible de licuefacción.
- Presencia de suelo dispersivo.
- Superficie de roca muy irregular.
- Roca de cimentación heterogénea y muy permeable.
- Presencia de roca que se deteriora con su exposición al agua o al aire.
- Roca de cimentación de capacidad portante anormalmente baja.
- Presencia de planos principales de debilidad en la roca.
- Presencia de fallas potencialmente activas bajo la estructura.

2.2. Tratamientos usuales

Como tratamientos usuales de la cimentación se pueden considerar los siguientes:

- Remoción del recubrimiento.
- Realizar una pantalla plástica hasta alcanzar una formación impermeable.
- Limpieza y conformado de la roca de cimentación.
- Limpieza de diaclasas, fallas y grietas en la roca y relleno con hormigón.
- Utilización de hormigón u hormigón proyectado para corregir irregularidades y suavizar la superficie rocosa.
- Pantallas impermeables con inyección de cemento.
- Tapices de consolidación con inyecciones de cemento.
- Pantallas de drenaje en la roca.
- Tapices de drenaje y zanjas de drenaje en la parte aguas abajo de una presa de tierras.
- Medidas protectoras del canal de descarga y cuenco amortiguador del aliviadero.
- Instalación de un tapiz impermeable aguas arriba.
- Bajar el nivel del embalse.

De acuerdo con estos criterios los artículos presentados se dividirán en cuatro categorías: relati-

vos a cimentación normal, a cimentaciones difíciles, a tratamientos habituales y a tratamientos especiales, de acuerdo con la tabla 1 adjunta.

2.3. Efecto de las cimentaciones difíciles en el proyecto y construcción de la presa

Se analizan tres tipos de problemas por separado: estanqueidad, estabilidad y licuefacción. Los problemas encontrados son distintos en presas de

materiales sueltos o de hormigón y se consideran por separado.

La estanqueidad de la presa, cimienta y vaso, es esencial para el éxito del proyecto. Existen casos como la presa de Hales Bar Reservoir, en Estados Unidos, que está cimentada en calizas y tuvo que ser abandonada hace más de 20 años y la presa Lar, en Irán, cimentada en caliza y lava está con condiciones similares, aunque todavía con esperanzas de hacerla estanca.

TABLA 1
CLASIFICACION DE CIMENTACIONES Y TRATAMIENTOS DE ACUERDO CON LOS ARTICULOS PRESENTADOS

CATEGORIA	PRESAS DE HORMIGON		PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	NUMERO DE ARTICULOS EN LA CATEGORIA
	GRAVEDAD	ARCO Y COTRAFUERTES		
CIMENTACIONES HABITUALES	R-4, 15, 31, 44, 52, 70, 98 7	R-13, 41 2	R-3, 9, 11, 23, 24, 26, 29, 37, 49, 50, 55, 57, 58, 65, 66, 84, 91, 95, 99 19	28
CIMENTACIONES DIFICILES	R-6, 7, 10, 14, 16, 19, 20, 21, 25, 27, 32, 34, 35, 45, 51, 59, 61, 68, 77, 86, 89, 93, 94, 97 24	R-42, 43, 48, 71, 76, 79, 90 7	R-1, 2, 8, 12, 16, 20, 22, 25, 28, 30, 33, 36, 38, 39, 40, 45, 46, 47, 53, 56, 60, 62, 63, 64, 67, 69, 72, 73, 74, 75, 78, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 92, 94, 96 42	73
TRATAMIENTOS HABITUALES	R-4, 6, 7, 15, 19, 20, 21, 31, 34, 35, 52, 59, 89, 97, 98 15	R-13, 42, 79 3	R-1, 2, 8, 9, 12, 20, 22, 23, 25, 28, 30, 33, 36, 37, 38, 40, 50, 60, 63, 64, 65, 67, 72, 78, 81, 83, 84, 85, 88, 91, 92, 95, 99 33	51
TRATAMIENTOS ESPECIALES	R-10, 14, 16, 25, 27, 32, 44, 51, 61, 68, 94 11	R-41, 48, 90 3	R-3, 11, 16, 24, 25, 29, 39, 49, 53, 55, 56, 58, 62, 73, 74, 75, 80, 82, 87, 94, 96 21	35

Nota: Los artículos R-15, R-17, R-18, R-43 y R-54 tratan de condiciones difíciles que pueden ocurrir en la cimentación de cualquier presa.

Tales situaciones se producen por alguna de estas razones: exploración previa insuficiente, atención inadecuada a las investigaciones y observaciones durante la construcción, escasez de auscultación de fenómenos que pueden producirse durante el primer llenado, implementación inadecuada de medidas correctoras o circunstancias impredecibles que resultan casi imposible de tratar con éxito.

Diez artículos mencionan que la cimentación expuesta durante las excavaciones resultó bastante diferente de lo previsto en función de las investigaciones del proyecto, lo que dio lugar a cambios importantes y costes adicionales sustanciales.

Aunque ciertas debilidades del cimiento son difíciles de detectar y algunas cimentaciones son tan complejas que incluso una detallada investigación no lo aclara todo, es evidente, en general, que las exploraciones que se realizan no proporcionan la información necesaria para una selección adecuada del eje de la presa, del tipo de presa a construir y del tipo de tratamiento del cimiento requerido.

2.3.1. Estanqueidad

Las presas de materiales sueltos, cimentadas en roca, requieren que el contacto del núcleo con la roca y la cimentación en profundidad sean impermeables. En el contacto, se limpian las discontinuidades y la superficie se trata con hormigón o lechada. Si la roca se deteriora al exponerla al aire o agua la superficie debe cubrirse muy rápidamente, por ejemplo con hormigón proyectado. Si el material del núcleo es dispersivo la impermeabilidad del contacto es aún más importante y suele construirse una losa de hormigón para sellar el contacto e impedir la erosión del núcleo.

La estanqueidad del cimiento suele conseguirse con una pantalla de inyecciones, con una o más filas según la dificultad del cimiento. En los cimientos que resultan difíciles de inyectar con lechada de cemento se utilizan inyecciones químicas o de otros productos. En ocasiones se construyen pantallas continuas en roca, bien aprovechando la existencia de nuevos equipos (hidrofresa) o bien mediante la ejecución de túneles en cimiento y estribos.

Las cimentaciones de presas de materiales sueltos, cimentadas en materiales permeables, se sellan mediante métodos tales como dentellón de pene-

tración total o parcial, pantalla de inyecciones o pantallas estancas continuas (plásticas o de hormigón). A veces no se hace nada para sellar el cimiento sino que se alarga el camino de filtración mediante un tapiz impermeable aguas arriba del núcleo que suele combinarse con un sistema de drenaje aguas abajo.

Las pantallas de hormigón plástico para absorber deformaciones constituyen una opción cada vez más atractiva.

Las presas de hormigón se cimientan generalmente en roca de buena calidad, y en tal caso la impermeabilidad se consigue con una pantalla de inyecciones. Si la roca está muy diaclasada, fracturada o meteorizada puede usarse, aunque es infrecuente, una pantalla de inyecciones no convencional o una continua de paneles de hormigón o pilotes.

2.3.2. Estabilidad

La estabilidad de una presa de materiales sueltos, cimentada en terrenos de recubrimiento, puede verse comprometida por la baja resistencia al corte del cimiento o por el desarrollo de gradientes hidráulicos elevados bajo la parte de aguas abajo del relleno. El primer problema es más difícil de evitar o corregir y suele estar asociado con cimientos de materiales granuales sueltos o de suelos arcillosos blandos. Las cimentaciones de materiales granulares sueltos pueden ser reforzadas con una serie de técnicas de compactación: vibratoria, dinámica o de voladura. Técnicas recientes para estabilizar ciertos materiales son las siguientes: jet grouting, columnas de suelo-cemento mezcladas in situ, columnas de balasto o microcolumnas de grava. Con distintos métodos todas consiguen crear elementos más rígidos en una masa menos rígida. Con cimentaciones de arcillas blandas, su resistencia debe ser cuidadosamente evaluada y, en caso necesario, se pueden utilizar drenes verticales para consolidar el cimiento más rápidamente y permitir la construcción de la presa por etapas. Si el cimiento es muy compresible, la presa de materiales sueltos debe proyectarse para compensar este efecto.

Cuando hay gradientes elevados aguas abajo conviene que sean reducidos a su salda bien con un dren, en el caso ordinario, o con pozos de alivio. Esta medida estabilizadora se complementa, a menudo, con una berma cuya parte inferior actúa como filtro invertido en relación al cimiento.

Las presas de materiales sueltos cimentadas en roca raramente presentan problemas de estabilidad. Por el contrario las presas de hormigón pueden presentarlos cuando en el cimientado existen zonas de falla, con roca muy fracturada, y planos de debilidad que pueden constituir superficies de deslizamiento. Las pantallas de drenaje pueden reducir la subpresión y asegurar la estabilidad.

Las presas de gravedad importantes y las de arco y contrafuertes pueden requerir inyección de consolidación en todo su cimientado para asegurar una reacción uniforme al ser puestas en carga e incrementar el módulo de deformación.

En algunos casos se utilizan llaves de hormigón colocadas en túneles excavados en la roca de cimentación para compensar la falta de resistencia de cualquier plano de debilidad existente. Este método parece estar ganando popularidad.

La técnica italiana del pulvino es un método especial de asegurar que el estribo sea homogéneo.

2.3.3. Licuefacción

Este fenómeno no tiene una definición universalmente aceptada y se considera en este informe como un movimiento o deformación importante resultante de cargas cíclicas en suelos saturados sin cohesión. Pocas presas se han roto por licuefacción aunque cabe citar como casos famosos las presas de Sheffield, Upper y Lower San Fernando. Estos casos permitieron el desarrollo de los métodos de análisis dinámico actualmente en uso que toman en cuenta la posibilidad de licuefacción de una presa de materiales sueltos y su cimientado. La propagación de una onda sísmica produce tensiones que causan deformaciones en el terreno. Si este es un suelo, tales deformaciones dependen del tipo de suelo, su saturación y densidad. Los suelos más susceptibles de licuefacción son las arenas finas homogéneas pero se requiere un grado de saturación superior al 90% para que se produzca la licuefacción. La densidad es el factor esencial en la licuefacción potencial de los suelos sin cohesión de modo que, de acuerdo con las observaciones existentes, no se producirá licuefacción con un sismo de magnitud inferior a 7,5 en la escala de Richter si la densidad relativa es superior al 75%.

Si se descubren materiales susceptibles de licuefacción en la cimentación de una presa, deben ser

excavados y reemplazados con materiales más adecuados o tratados para incrementar su densidad y, en consecuencia, su resistencia a la licuefacción. La compactación requerida puede obtenerse por compactación vibratoria, dinámica o por la introducción de elementos más rígidos en la masa suelta. También la voladura se ha usado, en algunos casos, para compactar suelos sueltos sin cohesión.

2.4. Tratamientos especiales

Las posibles consecuencias de unas condiciones difíciles de cimentación y los tipos de medidas apropiadas para los problemas que se presentan se mencionan a continuación.

2.4.1. Condiciones difíciles en roca

Pueden tener las siguientes consecuencias:

- Más filtración de la prevista porque la roca es demasiado permeable o la superficie se ha deteriorado: subpresión alta, erosión interna.
- Asientos diferenciales y agrietamiento consiguiente donde la superficie de roca es muy desigual.
- Deslizamiento de parte o toda la presa según un plano principal de debilidad en la roca.
- Desplazamiento del cimientado según una falla activa y agrietamiento del núcleo o membrana impermeable.
- Levantamiento de la roca aguas abajo causado por subpresión excesiva en los estribos y la cimentación.
- Erosión del canal y cuenco amortiguador del aliviadero.

2.4.2. Condiciones difíciles en suelos de recubrimiento

Pueden tener las siguientes consecuencias:

- Asientos excesivos o diferenciales del cimientado y relleno combinados con agrietamiento.
- Deslizamiento en la cimentación debido a baja resistencia al corte.
- Dificultades para controlar la filtración debido a suelos heterogéneos y altamente permeables.
- Erosión interna donde la estratigrafía facilita la filtración y altos gradientes hidráulicos.
- Licuefacción de materiales sueltos, saturados, finos y granulares bajo cargas sísmicas.

2.4.3. *Tratamientos especiales*

Se consideran aquellos que requieren, para su puesta en práctica, equipo especial o experiencia especial. Se incluyen los siguientes:

- Precarga para consolidación de suelos.
- Pantallas impermeables continuas en suelos o rocas.
- Compactación, consolidación o confinamiento de materiales granulares finos, sueltos y saturados.
- Sistema de drenaje para consolidar arcilla bajo la presa o drenar los horizontes permeables donde se desarrollen subpresiones desfavorables.
- Pantalla de inyección en suelos.
- Hormigonado para regularizar la superficie rocosa.
- Protección de la superficie rocosa para evitar su deterioro.
- Pantallas de inyección no convencionales en roca.
- Consolidación de la roca para hacerla capaz de soportar el peso de la presa y las tensiones que produzca.
- Instalación de anclajes para aumentar la fricción entre la roca de cimentación y el hormigón de la presa.
- Instalación de anclajes pretensados en la roca de estribos.
- Instalación de una o más llaves de anclaje de hormigón o diversos anclajes para aumentar la resistencia de un plano principal de debilidad en la roca.
- Instalación de una junta deslizante en la presa para facilitar un desplazamiento potencial según una falla subyacente.
- Adición de una membrana sintética impermeable.
- Instalación de una malla de protección contra la erosión.
- Adición de un pulvino.

La distribución de estos tratamientos en los artículos presentados se incluye en la tabla 2 adjunta.

2.5. **Comportamiento de la cimentación**

La estadística demuestra que un 25% de las roturas de presas son atribuibles a la cimentación. Las presas de materiales sueltos son más vulnerables;

por una parte, debido a los materiales utilizados pero, por otra, porque suelen disponerse en las cimentaciones más difíciles.

En presas de materiales sueltos se controlan durante el primer llenado la permeabilidad del cimientto y la efectividad del sistema de estanqueidad con datos de piezómetros. Los métodos de aforo son un elemento secundario en la detección de fugas que no suele facilitar el lugar donde éstas se producen. El ritmo de llenado es un factor de gran importancia en el comportamiento de la estructura y su cimiento.

Durante la explotación de estas presas puede producirse un incremento de la filtración causado por deterioro del cimiento, como resultado del agrietamiento ó erosión interna, degradación de la pantalla impermeable o disolución del material de cimentación en formaciones cársticas. Con la información sobre fugas y niveles piezométricos puede anticiparse cuando es el momento de intervenir para evitar un incidente o accidente.

La estabilidad de la presa queda también afectada por las deformaciones del cimiento. La experiencia demuestra que aún con cimientos muy deformables, las estructuras pueden ser seguras si se adoptan medidas apropiadas.

En las presas de hormigón también el primer llenado constituye una etapa crítica y en ella se deben controlar, fundamentalmente, las deformaciones y subpresiones para compararlas con las hipótesis de proyecto. Una filtración excesiva puede asociarse con problemas de la pantalla impermeable. Durante la explotación los datos de instrumentación proporcionan la información necesaria para evaluar la necesidad de tomar medidas.

2.6. **Medidas correctoras y resultados**

La aplicación de medidas correctoras requiere decisiones cuidadosas basadas en una amplia experiencia.

Cuando el tratamiento inicial del cimiento, de una presa de materiales sueltos, ha sido solo parcial, como es el caso de un tapiz aguas arriba o de una pantalla impermeable que no llega a una formación impermeable, una excesiva filtración puede producir inestabilidad lo que puede evitarse por

TABLA 2
TRATAMIENTOS ESPECIALES CONTEMPLADOS
EN LOS ARTICULOS PRESENTADOS

T E M A	PRESAS DE HORMIGON		PRESAS DE TIERRA
	GRAVEDAD	ARCO Y CONTRAFUERTES	
Precarga para consolidación de suelos			
Protección e impermeabilización de la superficie rocosa	R-68		
Hormigón de regularización de la roca			
Pantalla de inyección no convencional en roca	R-4	R-6	R-73, 86, 95
Pantalla de inyección en suelo	R-25		R-3, 24, 25
Pantalla continua en suelo	R-68		R-2, 9, 24, 25, 29, 49, 53, 55, 75, 80, 87, 91, 94, 99
Pantalla continua en roca	R-94		R-11, 60, 73, 74, 94
Compactación o confinamiento de material suelto	R-32, 51, 89		R-29, 39, 62, 75
Sistema de drenaje para consolidación de arcilla	R-97		R-38, 39, 83
Sistema de drenaje para horizontes permeables	R-93, 97		R-62, 63, 86
Consolidación de la roca, aumento del módulo de deformación	R-94	R-6, 13, 19.	
Refuerzo de plano de debilidad en la roca: • Llaves de hormigón • Contrafuertes, bloques de hormigón, anclajes y cables	R-52 R-61, 79	R-14, 18	R-10, 20, 27, 90
Junta de deslizamiento en la presa			R-10
Adición de una membrana sintética impermeable	R-21	R-41	
Malla de protección contra la erosión			R-96
Adición de un "pulvino"		R-42	

alguno de los siguientes medios:

- Construir o ampliar un tapiz aguas arriba.
- Añadir aguas abajo una berma estabilizante.
- Instalación de pozos de drenaje o de alivio para reducir la subpresión.

La presa de Tarbela dispone de varias de las medidas citadas. Los caudales de filtración alcanzaron los 64001/s durante el primer llenado y después de aplicar diversas medidas correctoras son actualmente despreciables.

Quando el tratamiento inicial del cimientto es total, en presas de materiales sueltos, y se requiere actuar sobre él, el trabajo corrector puede hacerse desde la coronación, a través del núcleo central, o desde el tapiz impermeable aguas arriba. Este puede consistir en la ejecución o refuerzo de una pantalla impermeable, columnas de suelo estabilizado con cemento, etc.

Las presas de hormigón requieren cimientos estables para impedir movimientos diferenciales y concentración de tensiones en el hormigón que

TABLA 3 CLASIFICACION DE ARTICULOS PRESENTADOS
DE ACUERDO CON LOS CRITERIOS DEL INFORME GENERAL

ART. Nº	TIPO DE PRESA PG-Gravedad VA-Bóveda ER-Escollera TE-Tierras	CIMIENTO (U) Habitual (D) Difícil	TEMA a) Proyecto b) Tratamiento c) Comportamiento d) Corrección	PROBLEMAS W) Estanqueidad S) Estabilidad L) Licuefacción	ACTIVIDADES Y TRATAMIENTOS
					(U) Habitual (S) Especial
R-1	TE	D	c	S	U/S Analogía eléctrica y control de subpresión
R-2	TE	U	b	W	S Pantalla rígida en suelo
R-3	ER	D	b y c	W	S Pantalla de inyecciones profunda en suelo: comportamiento satisfactorio
R-4	PG	D	b y c	W	S Pantalla de inyecciones en karst: más fugas de lo esperado; importancia hidrogeología
R-5		U/D	a	W	U/S Ensayos Lugeon y fractura hidráulica
R-6	VA	D	a	W y S	U/S Consolidación de roca y pantalla inyección en roca
R-7	PG	U	c	S	U Auscultación de expansión en roca
R-8	TE	D	c	S	U/S Auscultación de asientos y resistencia al corte
R-9	ER	D	c y d	W y S	U/S Pantalla plástica en núcleo e inyección contacto
R-10	PG	D	a y b	S	S Junta deslizante en presa y llaves de hormigón
R-11	TE	D	a y b	W	S Pantalla plástica en roca
R-12	TE	D	a	S y L	U Excavación de material licuefactable
R-13	VA	D	a y b	S	S Inyección para aumentar módulo de deformación de la roca
R-14	VA	D	c y d	S	S Adición de contrafuertes para estabilizar la roca
R-15	PG-VA	D	c y d	W	U Pantalla de inyección compleja en roca
R-16	PG, TE	D	a y b	S	U Pantalla de inyección en roca: auscultación: reducción fugas
R-17	Variedad	U/D	a	W	U/S Programa de ordenador para filtraciones en roca
R-18		U/D	a	W	U/S Nuevos criterios inyección
R-19	Variedad	D	a y b	W y S	S Consolidación en roca
R-20	Variedad	D	a, b y c	W y S	S Llaves de hormigón en roca y método de investigación
R-21	PG	D	a y b	W y S	S Membrana aguas arriba, bloques de hormigón para la presa
R-22	TE	D	a	W, S y L	U Excavación de material licuefactable y creación de pantalla impermeable
R-23	ER	D	b y c	W	U Pantalla de inyección en roca
R-24	ER	U	a y b	W y S	S Pantalla plástica en suelo, tapiz, inyección con cemento fino
R-25	PG, ER	D	a, b y c	W	S Pantalla de inyección en suelo y roca, pantalla continua en suelo
R-26	ER	U	a, b y c	W	U/S Reducción de permeabilidad de pantalla de inyección en roca con asientos
R-27	PG	D	b	S	S Llaves de hormigón en roca
R-28	TE	D	a	W	U Ajustes de proyecto y pantalla inyección en roca
R-29	ER	U	d	W y S	S Pantalla en suelo, columnas de jet-grouting
R-30	TE	D	d	S y L	U Berma aguas arriba
R-31	PG	U	a y d	S	U Drenaje para reducir subpresión
R-32	PG, TE	D	d	S y L	U/S Excavación, columnas de jet-grouting y anclajes
R-33	TE	U	a	S	U Excavación adicional

COMITE ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS. INFORME GENERAL

TABLA 3 (Continuación)

ART. Nº	TIPO DE PRESA PG-Gravedad VA-Bóveda ER-Escollera TE-Tierras	CIMIENTO (U) Habitual (D) Difícil	TEMA a) Proyecto b) Tratamiento c) Comportamiento d) Corrección	PROBLEMAS W) Estanqueidad S) Estabilidad L) Licuefacción	ACTIVIDADES Y TRATAMIENTOS
					(U) Habitual (S) Especial
R-34	PG	D	a	S y L	U Rebajamiento del nivel freático
R-35	PG	U	a y b	W y S	U Excavación, pantalla de inyecciones y drenaje
R-36	ER	D	a, b y c	S	U/S Adición de bermas, sustitución local de roca
R-37	ER	U	c y d	W	U Inyección de cemento y bentonita en la coronación del núcleo -
R-38	TE	U	a, b y c	S	U/S Tapiz de drenaje y drenes: comportamiento satisfactorio
R-39	TE	D	a y b	S y L	S Compactación por vibración de microcolumnas de grava y consolidación de arcilla
R-40	ER	D	a y b	W y S	U/S Desplazamiento del eje, pantalla de inyección y tapiz
R-41	VA	U	d	W y S	S Membrana sintética en la base de la bóveda (tensiones de tracción)
R-42	VA	D	a y b	S	S Pulvino y junta perimetral: reducción filtración
R-43	VA	D	b	W	S Programa ordenador para definir pantalla de inyecciones
R-44	PG	U	d	W y S	U Inyección, drenaje y supervisión: comportamiento satisfactorio
R-45	Variedad	D	d	W y S	U Inyección y comportamiento satisfactorios
R-46	ER	D	c	W y S	U Pantalla inyección: comportamiento satisfactorio
R-47	ER	U/D	b	W	U Pantalla inyecciones
R-48	CB (Contra-fuerzas)	U/D	c y d	S	S Bloques hormigón como soporte: buen comportamiento
R-49	ER	U/D	d	W y S	S Pantalla rígida a través del núcleo anclada en la roca; inyección
R-50	ER	U	d	W y S	U Reconstrucción de partes del relleno próximas a los estribos: buen comportamiento
R-51	PG	D	a y b	S y L	S Columnas de balasto para compactar arena suelta
R-52	PG	D	a y b	S	U/S Llaves de hormigón en roca: tensiones en hormigón
R-53	TE	D	c	W, S y L	S Doble pantalla rígida en suelo: buen comportamiento
R-54		U/D	a y d		S Nuevas herramientas de trabajo
R-55	ER	U/D	a y b	W	S Doble pantalla plástica en aluvial
R-56	TE	D	d	S	S Reubicación de túnel roto
R-57	ER	U	c	S	U Supervisión
R-58	TE	D	d	S	U Cambio de proyecto a presa de hormigón compactado
R-59	PG	D	a	S	S Modelo geotécnico de cimiento
R-60	TE	D	b, c y d	W y S	U/S Pantalla inyecciones, drenaje y pantalla continua en roca: buen comportamiento
R-61	PG, ER	D	a, b, c y d	W y S	S Bajar nivel de embalse, contrafuertes de hormigón e inyección: comportamiento satisfactorio
R-62	TE	D	b y d	W y L	S Columnas de suelo-cemento mezcladas in situ
R-63	TE	D	a, b, c y d	W, S y L	U Bermas y pozos de drenaje: buen comportamiento
R-64	TE	D	d	L	S Bajar nivel de embalse
R-65	Variedad	U	a	W y S	S Proyecto de pantalla de inyecciones por el método de elementos finitos
R-66	ER	U	c y d	W	S Investigación de fugas: pantalla de inyecciones inadecuada

COMITE ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS. INFORME GENERAL

TABLA 3 (Conclusión)

ART. Nº	TIPO DE PRESA PG-Gravedad VA-Bóveda ER-Escollera TE-Tierras	CIMIENTO (U) Habitual (D) Difícil	TEMA a) Proyecto b) Tratamiento c) Comportamiento d) Corrección	PROBLEMAS W) Estanqueidad S) Estabilidad L) Licuefacción	ACTIVIDADES Y TRATAMIENTOS
					(U) Habitual (S) Especial
R-67	ER	D	d	W y S	U Pantalla inyecciones, drenaje y bermas: comportamiento satisfactorio
R-68	PG	D	a y b	W	U/S Tapiz de arcilla, tapiz de hormigón proyectado, pantalla continua y drenes
R-69	ER	D	a	L	S Varios métodos de evaluar estabilidad
R-70	PG	U/D	a y b	L	U Cambio de eje, aumento de excavación
R-71	VA	U/D	a y b	S	U Cambio de proyecto y cambio de eje
R-72	TE	U	c y d	W y S	U Extensión del tapiz, inyección y drenaje: buen comportamiento
R-73	Variedad	D	c y d	W	U/S Pantallas de inyección y drenaje en roca, pantalla continua
R-74	Variedad	U/D	a y b	W	S Pantalla continua en roca
R-75	TE	D	a y b	W, S y L	S Pantalla plástica en suelo y columnas de balasto
R-76	VA	D	a	S	U/S Modelos físicos y matemáticos
R-77	PG	U	a y b	W	U Ensayos Lugeon insuficientes
R-78	TE	D	c	W y S	U Aumento de filtración: Inspección de la presa
R-79	PG	D	a y b	S	U Excavación, sistema de drenaje y túnel de observación
R-80	TE	D	a y b	W	S Pantalla de bentonita-cemento en suelo y roca, drenaje
R-81	TE	D	a, b y c	S y L	U Tapiz de drenaje horizontal, supervisión
R-82	TE	D	a, b y d	S	U Suavizar taludes, inyección de roca, tapiz aguas arriba y drenaje
R-83	TE	D	a y b	S	U/S Bermas y drenes de arena verticales
R-84	ER	U	a y c	W	U/S Programa de llenado para control de filtraciones: comportamiento satisfactorio
R-85	ER	U/D	b y d	W	U Inyección adicional
R-86	PG, TE	D	a y b	W y S	S Inyección adicional, drenaje y ventilación
R-87	TE	D	a y b	W y S	S Zanja rellena con mezcla autofraguante in situ, tapiz y galería de desagüe de fondo articulada
R-88	ER	U/D	c y d	S	U Estudio del potencial de deslizamiento y aumento de la capacidad del aliviadero
R-89	PG	U	d	W y S	U/S Inyección de capa suelta y permeable: comportamiento satisfactorio
R-90	PG, VA	D	b	S	S Excavación adicional, llaves de hormigón para resistir cortante e inyección
R-91	ER	U/D	a y b	W	S Pantalla continua en suelos
R-92	TE	D	a, b y c	S	S Zonas plastificadas en el cimiento
R-93	VA	D	a y b	S	S Reducción de presiones y sistema de lanzamiento de la lámina en un aliviadero
R-94	Variedad	D	a, b, y c	W y S	U/S Excavación adicional, pantallas, consolidación y drenaje
R-95	TE	D	d	W y S	S Relleno de grietas con asfalto, inyección: reducción de filtración
R-96	TE	D	a y b	S	S Malla de protección contra erosión, ataguía de bolsas de arcilla
R-97	PG, TE	U/D	a, b y c	W y S	S Túnel de drenaje y estructuras flexibles de hormigón: comportamiento satisfactorio
R-98	PG	U/D	a y b	S	U Selección de sistemas de disipación de energía del aliviadero con modelos hidráulicos y matemáticos
R-99	Variedad	U/D	a y b	W y S	S Pantallas rígidas y plásticas en suelos

pueden producir agrietamiento. En cimientos difíciles las presas de hormigón son más vulnerables a la concentración de tensiones y requieren medidas especiales para garantizar su integridad. Una vez que se requiere aplicar medidas correctoras estas pueden ser, en el caso de cimentación en suelos de recubrimiento, inyección de cualquier tipo, anclajes, jet-grouting y columnas de suelo-cemento y, en el caso de cimentación de roca, pantallas de inyecciones reforzadas o ampliadas, inyecciones de consolidación para mejorar la resistencia e impermeabilidad del cimiento y anclajes pretensados o añadir bloques de hormigón para incrementar la estabilidad de la estructura.

En relación con las presas bóveda y de contrafuertes son más difíciles de tratar una vez construidas. El uso de bloques, para mejorar la estabilidad, o membranas para incrementar la estanqueidad de la roca han sido algunas soluciones adoptadas.

2.7. Conclusiones

En la tabla 3 se incluye una síntesis del contenido de los artículos presentados en respuesta a la cuestión 66, de acuerdo con la estructura del informe del relator general.

El avance tecnológico permite, cada vez más, plantearse alterar las condiciones naturales del cimiento en los estudios de alternativa del proyecto. Las inyecciones, convencionales o no, en la roca pueden no sólo aumentar el módulo de deformación sino reducir la permeabilidad. La utilización de lechadas especiales y hormigones plásticos son cada vez más populares. Con los nuevos equipos disponibles son fáciles de ejecutar las pantallas continuas en roca y terrenos de recubrimiento. También existen ahora métodos para mezclar el suelo con lechada de bentonita-cemento o utilizar columnas de balasto, microcolumnas o jet grouting para formar columnas capaces de soportar cargas, rigidizar capas de suelo sueltas o formar una pantalla impermeable. Todos estos métodos son opciones atractivas durante la construcción pero también son útiles como trabajos de reparación.

Las inyecciones continúan siendo el método de corrección más popular para corregir la filtración excesiva. El uso de llaves de hormigón en cimentaciones de roca es una opción cada vez más utilizada con presas de hormigón para incrementar su es-

tabilidad. Estas llaves incrementan la resistencia al corte de planos de debilidad en la roca. También los anclajes pretensados son cada vez más populares, tanto para estabilizar la roca de los estribos como para unir la presa y su cimientos. Estos métodos de estabilización se usan tanto durante la construcción como en trabajos correctores.

En Nueva Zelanda se ha construido una junta deslizante en una presa situada encima de una falla, proyectada para absorber desplazamientos diferenciales del cimiento.

La cimentación juega un papel primordial en el comportamiento de la estructura ante cargas sísmicas.

3. DESARROLLO DE LAS SESIONES DEL CONGRESO

La exposición del Relator General se ajustó bastante al informe incluido en los volúmenes del Congreso. Propuso como debate analizar las ventajas e inconvenientes de los siguientes temas:

- a) Aumento del módulo de deformación.
- b) Instalación de llaves de esfuerzo cortante en planos de roca débil y juntas en presas cimentadas encima de una falla.
- c) Realización de una pantalla de inyecciones o una pantalla continua de hormigón.
- d) Instalación de diversos tipos de columnas y pantallas en suelos licuefactables para mejorar su inestabilidad potencial.

El experto Sr. Dodd (U.S.A.) hizo una introducción del primer tema de debate en la que partiendo de una clasificación general de los trabajos de mejora del terreno se analizaba si cada una de esas actividades de mejora pertenecía a alguno de los temas de debate propuestos. En la tabla 4 se muestra esta clasificación y una breve explicación de cada concepto.

Gran parte de los participantes no se ajustaron excesivamente a los temas de discusión sugeridos ni al orden de los mismos. Algunas de las intervenciones más destacadas se comentarán a continuación:

A. Carrère (Francia) expuso que en los estudios del proyecto de la presa de Gomal Zam (Pakis-

TABLA 4

CATEGORIAS DE TRABAJOS DE MEJORA DEL TERRENO	ENCONTRADAS EN LA CIMENTACION DE PRESAS EN:	
	ROCA	SUELO
1. Remoción del terreno	Si	Si
2. Llenado de huecos		
a. Huecos grandes y cavidades superficiales	Si	No
b. Huecos pequeños	Si	Si
3. Reducción de huecos	No	Si
4. Refuerzos		
a. Compresión	No	Si
b. Tracción	Si	No
c. Corte	Si	No
5. Sustitución		
a. Suplantación	Si	No
b. Pantallas	Si	Si
6. Protección	Si	Si
7. Drenaje	Si	Si
8. Cambio químico	No	No
9. Cambio térmico	No	No
10. Estabilización externa	Si	Si

NOTAS:

1. **Remoción de terreno indeseable.** Es un trabajo rutinario en la cimentación de una presa. Incrementa el módulo de deformación.
2. **Relleno de huecos del terreno.** Si son grandes se utiliza hormigón en masa, mortero o lechada. Si son pequeños se usan distintos tipos de inyección. La pantalla de inyección es uno de los temas a considerar. También se considera aquí la consolidación del terreno que incrementa el módulo de deformación.
3. **La reducción de huecos del terreno.** Se consigue por densificación del terreno y aumenta el módulo de deformación.
4. **Refuerzo del terreno con pilotes, columnas de arena y grava, anclajes, llaves de esfuerzo cortante, etc.**
5. **Sustitución de terreno inadecuado por otro material** como pilotes, tierra, mortero, hormigón, pantallas continuas. Un ejemplo de sustitución son las cavernas rellenas de arcilla que se limpian y sustituyen por un mortero para aumentar el módulo de deformación. Es un tratamiento caro.
6. **Protección del terreno ante cargas y agentes externos.** El pulvino puede ser una protección de una presa bóveda para distribuir adecuadamente las cargas que impone la presa en el terreno. Los tapices también son protecciones contra gradientes excesivos.

7. **Drenaje** es un tratamiento habitual del terreno.
8. **Cambio químico** de arcillas; tiene poca aplicación en presas.
9. **Cambio térmico** del terreno como congelación, calentamiento, etc. No se usa en presas.
10. **Estabilización externa** del terreno. Incluye muros de retención, contrafuertes, bermas estabilizantes. Se usan, a veces, para soporte del estribo de presas.

tán), de gravedad de planta curva de 135 m. de altura, en la que la deformabilidad de los estribos jugaba un papel esencial se ha puesto en evidencia que todos los métodos de investigación in situ relativos a la obtención del módulo de deformación son poco eficaces y poco representativos de la escala de cargas. Los métodos geofísicos son más globales pero su calibración es ineficaz. Propone usar sistemáticamente resultados de la instrumentación de presas existentes (péndulo inverso o, mejor aún, extensómetros especialmente localizados y orientados como indica la Fig. 1) para calibrar los métodos globales, como la pequeña sísmica, y evaluarlos.

A. Iziqel (Francia) presenta el caso del refuerzo del estribo derecho de la presa Turkwell (Kenya), bóveda de 155 m. de altura, que presenta en la parte superior del estribo, en contacto con los últimos 15 m. de la presa, dos niveles separados por las discontinuidades M1-3 y M1-4. La roca está fisurada y el módulo de deformación obtenido al excavar el estribo es notablemente inferior al obtenido más aguas arriba durante la etapa previa de estudios (en ambos casos se habían empleado métodos sísmicos).

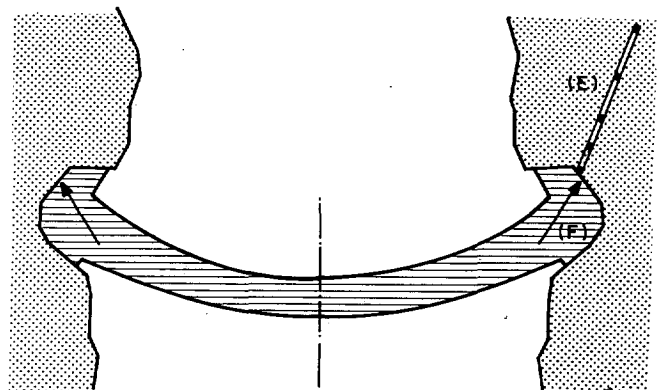


Figura 1. Sistema de auscultación especial propuesto.
(E) Extensómetro de puntos múltiples.
(F) Empuje en estribos.

El módulo estático del nivel superior era inferior a 5GPa que reducía las presiones del arco en la sección superior y obligaba a añadir un estribo de hormigón y estabilizarlo con 32 anclajes a la roca de 66 Tons. También se ha inyectado la roca en esta zona hasta una profundidad de 15 m. para mejorar su módulo, aunque todavía no se dispone de resultados (Figura 2).

E. Luca (Rumanía) presenta el caso de unos diques de tierra, de poca altura, cimentados en turba. Se mejoran las condiciones de deformación y resistencia al corte del cemento mediante columnas de balasto.

G. Oberti (Italia) expuso las ventajas del "pulvino" para presas bóveda altas si el cemento es difícil. En su opinión el tratamiento del cemento para mejorar su módulo de deformación no es suficiente y el pulvino, debidamente reforzado, produce un reparto más homogéneo, supera las diaclasas, permite disponer una galería para inyectar más tarde, en caso necesario, y reduce el riesgo de agrietamiento aguas arriba de la presa. Indica que la construcción del pulvino resulta cara inicialmente, pero luego se obtienen ventajas durante la construcción y explotación, concluyendo que cada vez es más importante el pulvino, en este tipo de presa, con cementos difíciles.

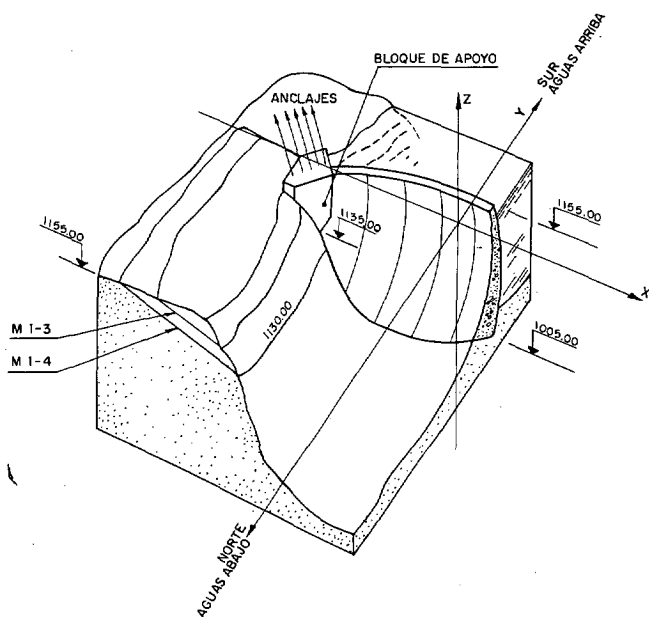


Figura 2. Presa de Turkwel. Estribo derecho. Vista general de la presa y bloque de apoyo

J. W. Hatton (Nueva Zelanda) plantea un interesante aspecto de proyecto en una presa de gravedad (Clyde Dam) cimentada sobre una falla con posible desplazamiento vertical, además de un posible desplazamiento secundario transversal. Las consecuencias de no hacer previsiones para este desplazamiento de la falla en el proyecto no son fáciles de predecir pero pueden ser de graves consecuencias por lo que una solución sencilla es crear una junta deslizante en la presa como continuación de la falla. Se pensó inicialmente en una junta vertical cerrada pero no se acomodaba a los movimientos inversos de la falla por lo que se adoptó una junta abierta, que se adaptaba a movimientos de la falla de hasta 1 m., sellada aguas arriba con un tapón en cuña que se adapta a los movimientos de la junta (En las Figuras 3 y 4 adjuntas se observan los detalles de lo mencionado).

S. Buchegger (Austria) presentó el problema de la presa de gravedad de Cheurfas II en Argelia. Esta presa se construyó muy próxima a otra que quedó destruida cinco años después de ser construida por mala interpretación geológica del cemento. En el cemento rocoso hay capas débiles de arcilla poco consolidada y arena, hasta cierta profundidad, lo que exigió excavar el material alterado y cimentar la presa a más de 30 m. de profundidad, por debajo del lecho del río, en una capa algo más competente. El proyecto de la presa exigió la construcción de un talón de talud suave aguas arriba para aumentar su resistencia al deslizamiento, una pantalla de inyección de una a tres filas y una pantalla de drenaje.

M. Fernández Bollo (España) expuso la forma de evaluar la eficacia del tratamiento del cemento de la presa bóveda de José Torán a partir del registro de discontinuidades geológicas en relación con el aumento del módulo de elasticidad producido por la inyección. Mediante geofísica sísmica se puede obtener el módulo de elasticidad antes de hormigonar para decidir si la roca es adecuada como cemento y se puede obtener dicho módulo después del tratamiento con lo que se puede deducir la mejora del cemento y el grado de eficacia de la inyección.

P. Schöberl (Austria) expuso algunos problemas de la cimentación en la presa bóveda de Zillergründl en Austria, de 186 m. de altura. El granito alterado exigió grandes excavaciones (1,7 millones de m³

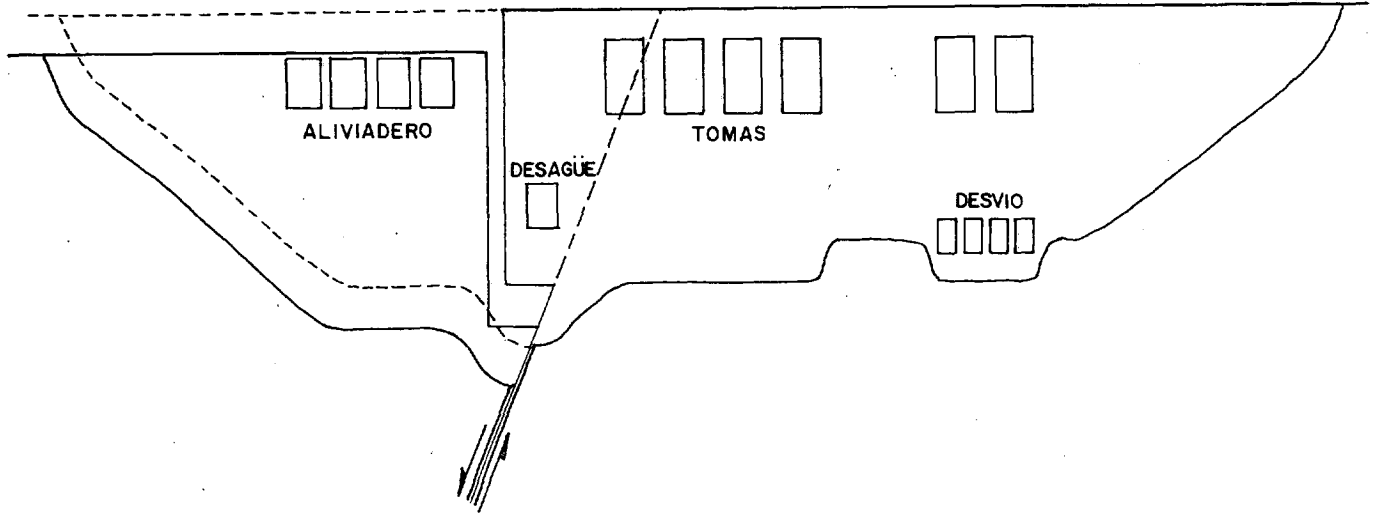


Figura 3. Presa de Clyde. Desplazamiento de la falla en el cauce. Posible solución.

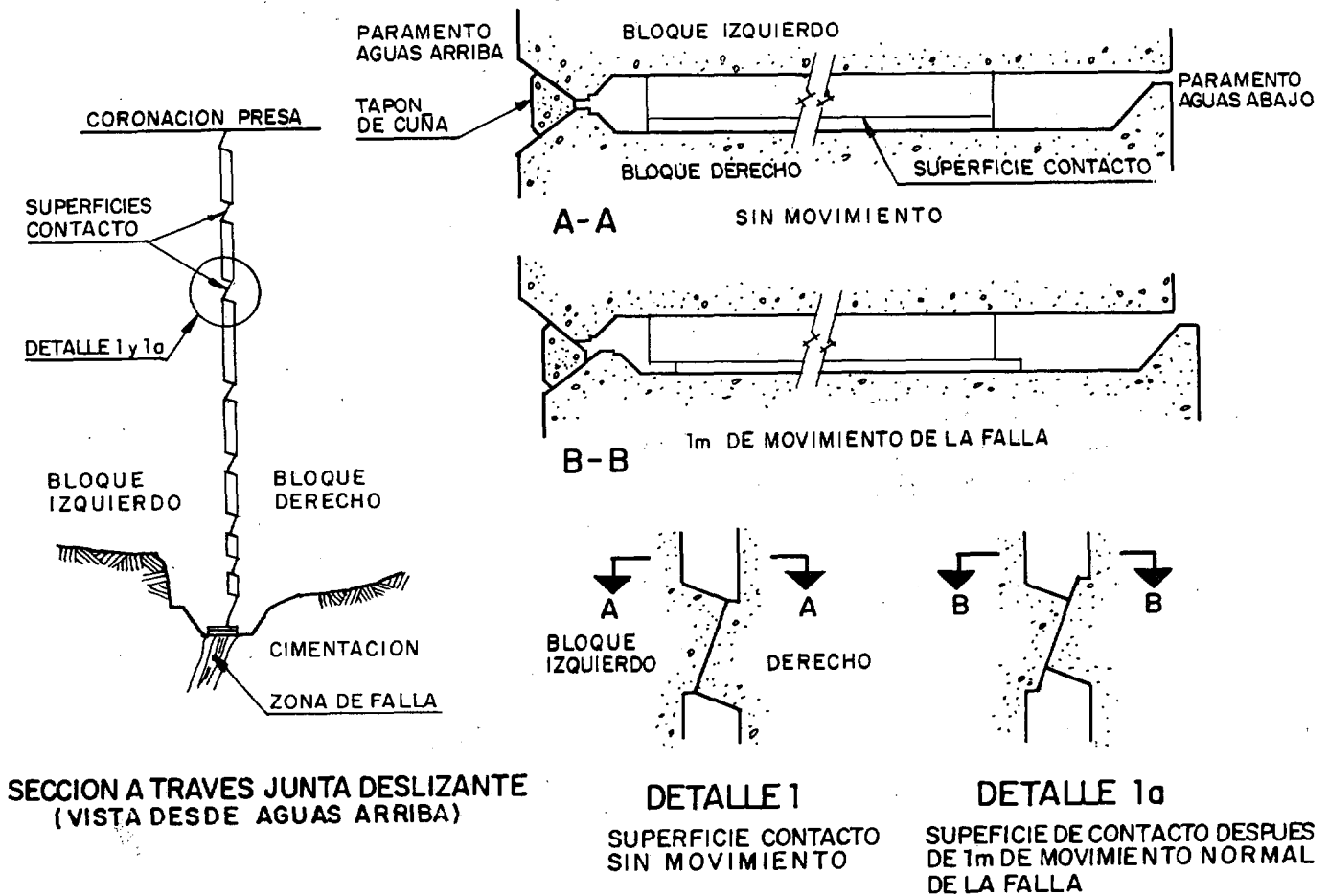


Figura 4. Junta deslizante presa de Clyde.

de excavación por 1,4 millones de m³ de hormigón, lo que no es frecuente en este tipo de presas). En el estribo izquierdo había una falla que obligó a desplazar la cimentación de la presa para que toda ella estuviera aguas arriba de la falla. Luego se dispuso una estructura de hormigón en masa en pie de presa en todo el estribo izquierdo con dos objetivos: cubrir la zona de falla para evitar erosión y transmitir parte de las fuerzas horizontales de la presa a la masa rocosa aguas abajo de la falla.

Interviene W. Demmer (Austria), uno de los expertos de la cuestión 66, indicado que conviene separar para el debate las presas de hormigón de las de materiales sueltos. Las primeras suelen cimentarse en roca compacta. Dos aspectos son importantes en relación con la roca compacta: el sellado del cimientado y la estimación de los parámetros mecánicos de la roca. La capacidad portante de un cimientado para una presa de hormigón no es todavía fácil de evaluar por la anisotropía de la masa rocosa y porque se parte de ensayos en muestras muy pequeñas.

La mejora de la capacidad portante de la roca no es fácil por métodos ingenieriles por lo que se recomienda que el proyecto de la presa se ajuste a las condiciones del cimientado y no al revés.

Otro experto, R. Aris (Francia) inicia el debate sobre los problemas de las presas de tierra sobre cimientados difíciles. Señala que el principal riesgo en este caso es la filtración del agua en el cimientado que puede erosionarlo o disolverlo, especialmente a lo largo del contacto entre dique y cimientado. Por ello, debe reducirse la permeabilidad del cimientado para lo que pueden utilizarse pantallas de inyección o continuas. Ambas técnicas tienen sus propias ventajas y mejoran constantemente debido al desarrollo en los equipos de excavación y perforación y a la eficacia de los productos utilizados.

J. Takimoto (Japón) consideró las ventajas de las pantallas continuas en depósitos aluviales como en la presa de Tadani, de escollera con núcleo central. El hormigón plástico utilizado tiene casi la misma deformabilidad que el depósito aluvial lo que evita problemas estructurales. La ventaja principal de estas pantallas deriva del progreso reciente en los equipos de excavación pero deben investigarse bien estos depósitos por adelantado para asegurar la factibilidad de la excavación.

A. Sahuquillo (España) manifiesta en su intervención que los ensayos Lugeon son inadecuados para determinar la permeabilidad de formaciones rocosas, proponiendo como ensayos más convenientes los de bombeo, para formaciones altamente transmisivas o los ensayos de pulso para rocas poco permeables. Las técnicas hidrogeológicas cuantitativas, debidamente actualizadas, pueden mejorar las predicciones sobre fugas de embalses, desarrollo de subpresiones, efectos de la inyección y drenaje y su incertidumbre.

J. Levallois (Francia) se planteó la cuestión de si la tecnología actual permite la exploración detallada de los defectos del núcleo de una presa de tierra. Para responder a la cuestión ilustra la reparación de la presa Mud Mountain Dam (USA). El trabajo de reparación consistía en la construcción de una pantalla a través del núcleo, que alcanzaba hasta 120 m. en la parte central del cañón. Al iniciarse la ejecución de la pantalla se produjo una decompresión del núcleo que originó una fractura hidráulica longitudinal del mismo. Se consideró necesario recomprimir el núcleo con inyecciones de bentonita cemento antes de seguir la ejecución de la pantalla. Los taladros de perforación registraban una serie de datos de los que se deducía las pérdidas de material de núcleo en cada taladro y el estado general del mismo (Ver Fig. 5). Después del trabajo de recompresión se excavaron los paneles de la pantalla con hidrofresa sin ningún problema.

J. Tellería (España) se refirió a la reparación de la presa de Arbón en España. Esta presa había sido previamente reparada en 1976 construyendo una pantalla de bentonita-cemento a través del núcleo de la presa que estaba muy deteriorado. Esta pantalla no quedó bien soldada a los estribos del núcleo porque la cuchara Kelly utilizada dejaba sin sacar unos triángulos de núcleo removido en el contacto con los estribos. Se inyectó el contacto lo que tuvo éxito durante cierto tiempo pero el elevado gradiente deterioró progresivamente el contacto. Por ello, fue necesario reparar de nuevo estas zonas en 1987 inyectando una zona de mayor anchura del contacto para tratar de reducir el gradiente. Hasta ahora las pequeñas filtraciones residuales no han aumentado.

T. Strobl (Alemania) comparó la impermeabilización de rocas con pantallas de inyecciones, jet-grouting e hidromill. Hace algunos años sólo se po-

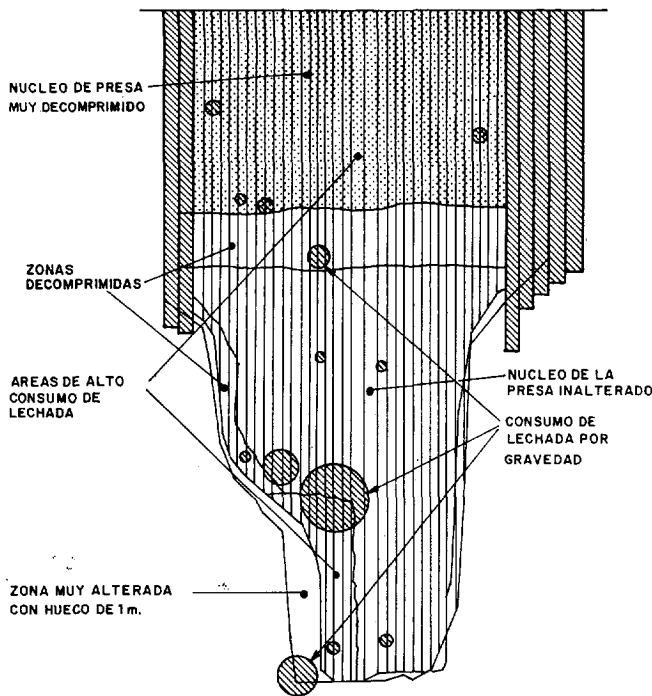


Figura 5. Presa de Mud Mountain.

Registro del núcleo de la presa realizado mediante perforaciones.

día impermeabilizar la roca con inyecciones pero si ésta era de poca resistencia, como por ejemplo una arenisca blanda, era necesario utilizar baja presión, varias filas y en ocasiones, por el método descendente lo que incrementaba el coste y el plazo. En estas condiciones geológicas resultan, hoy día, más favorable económica y técnicamente el jet grouting o la pantalla continua con hydromill que el método de inyección convencional.

Toorani (Irán) presentó el problema de la presa de Lar, de materiales sueltos de 105 m. de altura, para el abastecimiento de Teherán, completada en 1980 que no se pudo llenar debido a fugas que alcanzaron $13\text{m}^3/\text{sg}$. La cimentación es muy complicada con un estribo de lava y otro de caliza fracturada y carstificada lo que daba lugar a serios problemas de estanqueidad que se atacaron con una investigación geotécnica y una pantalla inadecuados. Se siguió investigando e inyectando, profundizando la pantalla original de 100 m. hasta 350 m. con una absorción de 70.000 Tn. de inyección. Además se produjeron varias dolinas de gran tamaño en el embalse, cerca de la presa, lo que resultó preocupante.

A pesar de todos los trabajos llevados a cabo, las fugas no se han reducido por lo que se ha decidido suspender la inyección hasta que se tenga un mejor conocimiento de la geología y con él anticipar si es técnica y económicamente factible conseguir la estanqueidad.

M. Turfan (Turkía) expone la cimentación de la presa de Tahtali que es una presa de escollera con núcleo central de arcilla de 57 m. de altura cimentado en un aluvial de 48 m. de espesor. La conexión del núcleo con la roca consiste en dos pantallas paralelas separadas 10 m. y con bentonita inyectada en el aluvial entre ellas. Las pantallas son compatibles con el núcleo y tienen el mismo comportamiento que el aluvial, excepto la permeabilidad. El efecto de punzamiento del núcleo se ha eliminado controlando la rigidez de la pantalla.

A. Penman (Gran Bretaña) se refiere al problema de la presa de Matahina, de escollera con núcleo ligeramente inclinado, de 85 m. de altura y construida en un valle de laderas escarpadas. Se compactó el núcleo del lado seco y se dejaron algunas bermas sin regularizar al excavar los estribos, dada la dificultad de dejar la roca ignea, muy diaclasada, con superficie lisa. En el primer llenado se produjeron fugas en el estribo derecho por fractura hidráulica que dieron lugar a una cárcava rellena posteriormente. Un sismo en 1987 produjo fugas en el estribo izquierdo apareciendo una nueva cárcava, y decidiéndose reconstruir ambos estribos (Figuras 6 y 7) suavizando el contacto del núcleo con el estribo y haciendo el núcleo más flexible utilizando una mezcla del material de núcleo existente con otro más húmedo y plástico. Las presiones totales registradas en la nueva zona eran suficientes para evitar el riesgo de fractura hidráulica.

El experto Zhang Wenzheng (China) interviene señalando que tanto las pantallas de inyección como las pantallas continuas se usan con éxito en diversos países. En años recientes se ha avanzado con estas últimas por el desarrollo de nuevos equipos y materiales pero también ha habido casos no satisfactorios. Comparando un método y otro desde los puntos de vista técnico y económico no parecen existir beneficios claros de uno sobre otro.

Otro tema de discusión que plantea son los cimentamientos de suelos licuefactables en zonas de elevada sismicidad. Aunque no se han presentado de-

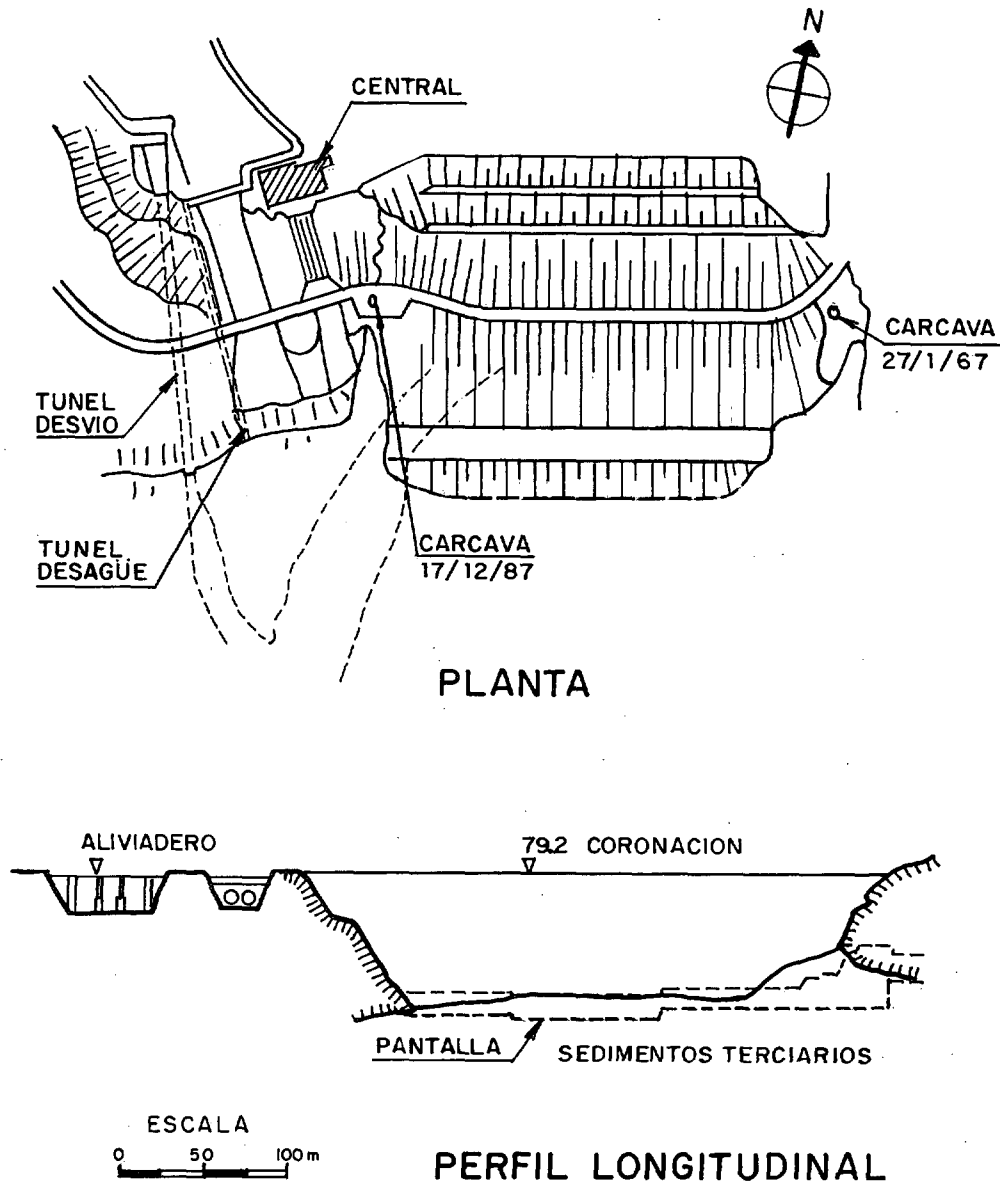


Figura 6. Presa de Matahina. Disposición general.

masiadas aportaciones sobre este tema es interesante mencionar dos aspectos:

1. ¿Qué tipo de suelos de cimentación son licuefactables? Algunos ingenieros consideran que son los suelos sin cohesión, arenosos finos o limos pero se va descubriendo que la arena y grava y también los suelos limosos y arcillosos, bajo ciertas condiciones, pueden licuefactar. En consecuencia para suelos de cimentación aluviales situados en zonas de alta sismicidad debe prestarse una atención especial a la correcta evaluación del potencial de licuefacción del suelo de cimentación.

2. ¿Cuáles son las medidas efectivas para tratar suelos licuefactables? Puesto que la densidad es el factor más importante es preciso densificar el cimiento hasta un estado de no licuefacción. Esto puede hacerse mediante diversos métodos tales como vibroflotación, compactación dinámica, voladura o columnas poco espaciadas pero en algunos casos no puede alcanzarse la densidad requerida por las limitaciones de estos métodos. El confinamiento es importante para impedir las grandes deformaciones causadas por la licuefacción. Si no hay escape para el suelo licuefactado, la deformación no será

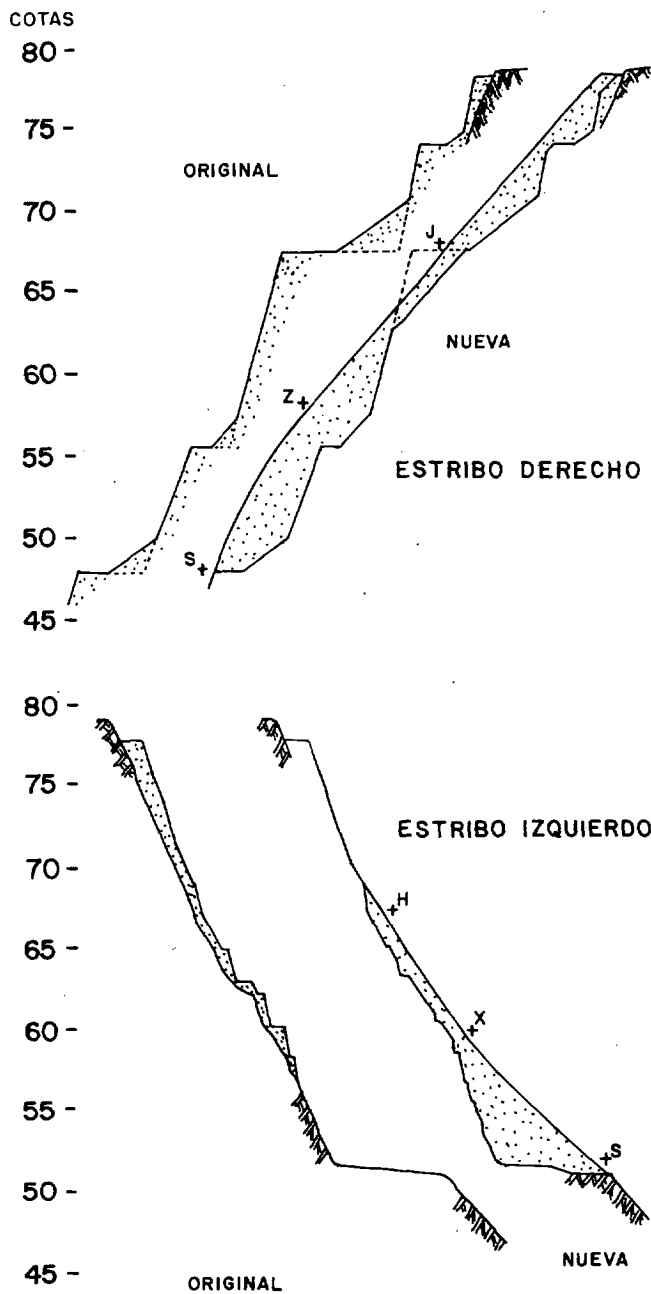


Figura 7. Configuración de los estribos antes y después de los trabajos de reparación y posición de los piezómetros.

lo suficientemente grande para producir la rotura. Una pantalla continua aguas arriba y columnas permeables próximas aguas abajo pueden servir el objetivo de confinar la masa de suelo potencialmente licuefactable. Estas medidas requieren estudio para ser confiables.

4. CONCLUSIONES DEL RELATOR GENERAL

Son las siguientes:

a) De tipo general

- La investigación de las condiciones del cimiento es, a menudo, insuficiente.
- El personal encargado de la investigación no tiene, frecuentemente, la suficiente experiencia y conocimientos para afrontar casos difíciles.
- Debido a las condiciones mencionadas anteriormente la solución elegida no suele ser la mejor.
- Las membranas sintéticas se usan ocasionalmente para ayudar a resolver casos difíciles.
- Cada vez se cuida más por los proyectistas tomar en cuenta la sismicidad en el estudio de las cimentaciones.
- La estabilización de la roca mediante la instalación de cables de anclaje y contrafuertes de hormigón es cada vez más frecuente.
- La instalación de llaves de hormigón en la superficie de la excavación o dentro de los túneles es cada vez más frecuente.
- Se ha considerado la posibilidad de aumentar el módulo de deformación de la roca pero no se han tenido en cuenta todas las posibilidades que existen hoy día.
- Las investigaciones sobre las condiciones de la roca y su módulo para evaluar mejor sus condiciones naturales y tener un mejor control de las condiciones modificadas, mejoran lentamente pero la progresión es lenta y puede medirse sólo en intervalos de 5 a 10 años.
- Los modelos matemáticos de comportamiento, utilizando particularmente el método de elementos finitos, progresan rápidamente. Tienen la ventaja de poder tomar en consideración algunas de las características del cimiento. Se puede, ahora, ajustar el diseño más rápidamente a condiciones modificadas: varias alternativas pueden evaluarse rápidamente. Sin embargo, debe tenerse cuidado para controlar los resultados obtenidos y usarlos correctamente.
- Algunos modelos permiten visualizar las

deformaciones de la presa sometida a cargas sísmicas. Son buenas herramientas que deben usarse adecuadamente.

- Los modelos de filtración también están mejorando y debe aprenderse algo más con ellos sobre el comportamiento de suelos en el cimientado de una presa.
- Los ingenieros jóvenes que consideren encontrarse ante un caso difícil y que no tienen demasiada experiencia con condiciones difíciles, es recomendable que investiguen la tabla 5 del informe del Relator General (Tabla 3 en el presente resumen).

b) Inyecciones

- Hay una mejora constante de la impermeabilidad obtenida usando lechadas que penetran más fácilmente y son más impermeables por sí mismas así como más resistentes a la erosión.

- El resultado final es mejor también porque las técnicas de inyección están cada vez más automatizadas eliminando así gran número de errores humanos.
- Continúan las diferencias de opinión sobre las ventajas y desventajas de usar una lechada más espesa y altas presiones o una lechada más fluida y presiones más bajas.

c) Pantallas continuas

- Se ha producido una mejora continua en los equipos de excavación. La construcción de una pantalla continua es cada vez más fácil en todo tipo de condiciones.
- Los nuevos métodos de excavación o la instalación de pilotes (6 Columnas) conducen a nuevos tipos de pantallas.
- Hay casos más frecuentes en que la estabilidad de suelos granulares (finos, sueltos y saturados) se ha incrementado para mejorar su comportamiento en caso de sismo.