

EL CIMIENTO Y LA SEGURIDAD DE LA PRESA

Autor: D. Manuel Alonso Franco

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Asesor de FCC CONSTRUCCIÓN, S.A.

GENERALIDADES:

Al diseñar, construir y analizar el comportamiento de una presa hay que considerar que ésta y su cimiento forman una unidad estructural, hasta el extremo de que una presa no puede considerarse segura si no lo es en su cimentación.

La bibliografía sobre cimentaciones es rica y extensa. La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) ha tratado este tema con asiduidad en sus congresos internacionales y ha editado tres Boletines Técnicos. El Comité Nacional Español (C.N.E.G.P.) en su IV Jornadas Españolas de Presas (Murcia, 1993), eligió como tema técnico la "Cimentación de las Presas". El libro de Actas del mismo es un magnífico compendio para consulta.

Clasificar un terreno como bueno o malo es menos acertado que considerarlo más o menos apto para el tipo de presa que el proyectista haya concebido. Hoy día la técnica ingenieril tiene herramientas para hacer de un terreno dudoso uno aceptable.

Los terrenos, rocas y suelos para apoyar o cimentar una presa, en raras ocasiones presentan la calidad y características necesarias para satisfacer los requisitos exigidos, de resistencia, deformabilidad, estabilidad e impermeabilidad adecuados. Será pues necesario mejorar sus condiciones naturales con mayor o menor intensidad.

La primera medida a tomar para decidir sobre el tratamiento del terreno es la elección del tipo adecuado de presa.

ESTADÍSTICA DE ROTURAS DE PRESAS:

Los accidentes, o mal comportamiento, han sido siempre una fuente de progreso para el hombre en sus diversas actividades. El ingeniero de presas ha estado proyectando basándose en los éxitos conocidos y, lo que es más importante, en los fallos ocurridos.

ICOLD ha formado diversos Comités Técnicos relacionados con la rotura y accidentes relativos a las presas. En tres ocasiones ha preparado encuestas a escala mundial para reunir la más vasta información sobre el tema.

ICOLD define como rotura: "Rotura o movimiento de una parte de la presa o de su cimiento de tal manera que la obra no puede retener el agua. En general el resultado será una salida de un volumen de agua importante, entrañando riesgo para las personas o los bienes aguas abajo".

De estas estadísticas puede deducirse que el porcentaje de roturas ha decrecido durante los cincuenta últimos años. Cuando se contemplan las presas que fueron construidas antes de 1950, el porcentaje de roturas es de un 2%; después de esta fecha y hasta 1983, el porcentaje baja a 0,5%, y continúa disminuyendo para las construidas recientemente. La probabilidad de rotura desde esta última fecha hasta nuestros días es del 0,1%.

En valor absoluto, la mayoría de las presas rotas son las de menor tamaño, pero ellas constituyen también el mayor número de presas construidas. La relación

$$\frac{\text{n}^\circ \text{ de presas rotas de altura H}}{\text{n}^\circ \text{ de presas construidas de altura H}}$$

varía muy poco con la altura.

La mayor parte de las roturas ocurren en los primeros años de vida.

Si se exceptúan los casos de vertido por coronación debidos a la ocurrencia de avenidas de muy pequeña probabilidad, la causa principal del fallo ha estado relacionada con la cimentación.

En las presas de hormigón los problemas de la cimentación constituyen la causa de rotura más frecuente, un 42%, repartido a partes iguales entre la erosión interna y la resistencia insuficiente al esfuerzo cortante.

En las presas de materiales sueltos, la erosión interna del cimientado supone el 12% como la causa principal desencadenante de la rotura. El sobrevertido es, sin duda, el factor principal de rotura con un 31%.

Un buen estudio de una cimentación débil debería darnos más confianza que un estudio deficiente de una buena cimentación, pues ésta puede ocultar problemas importantes.

Hay técnicos que muestran su extrañeza por el contraste existente entre los esfuerzos dedicados a ensayos y estudios sofisticados para determinar las características y propiedades del hormigón y la menor atención que se presta a la investigación y estudio del terreno de cimentación. Afortunadamente hoy día no es así, debido principalmente al desarrollo de la Mecánica de suelos y de rocas.

Dado que algunas de las acciones que actúan sobre las presas y sus cimentaciones son menos críticas para unos tipos de presas que para otros, en lo que sigue se tratará por separado las de hormigón de las de materiales sueltos. Bien es cierto que muchas consideraciones son comunes para ambos.

PRESAS DE HORMIGÓN

Los objetivos que debe perseguir la investigación del medio rocoso son conocer sus propiedades para determinar su influencia en el comportamiento de las estructuras y por ende juzgar sobre su seguridad. Servirá también para definir los adecuados procedimientos para la excavación y los tratamientos de mejora del terreno. A veces han servido para aprovechar emplazamientos que en principio eran de dudosa validez.

En el proyecto de la presa debe partirse de una amplia y aceptable investigación de la roca del cimientado, con preferencia a los valores mecánicos de sus diaclasas y fracturas, a la resistencia al corte de sus discontinuidades y materiales de relleno y a la influencia que pueda tener el agua.

Los problemas que pueden plantear los macizos rocosos son, entre otros, los siguientes:

- deformaciones
- resistencia al cizallamiento
- percolación
- erosión interna (en los apoyos)

Cada una de ellas se trata someramente a continuación:

Deformabilidad.

La presa puede verse afectada por las deformaciones absolutas o relativas entre áreas contiguas del terreno de apoyo. Una parte de ellas, las más cercanas a la superficie, son irreversibles debido al cierre y apertura de grietas o a pequeñas roturas de cizallamiento en superficies locales. Esto se produce en la construcción y puesta en carga, cuando los módulos de deformación son inferiores a los posteriores en los ciclos de carga; esto lleva a situaciones más críticas.

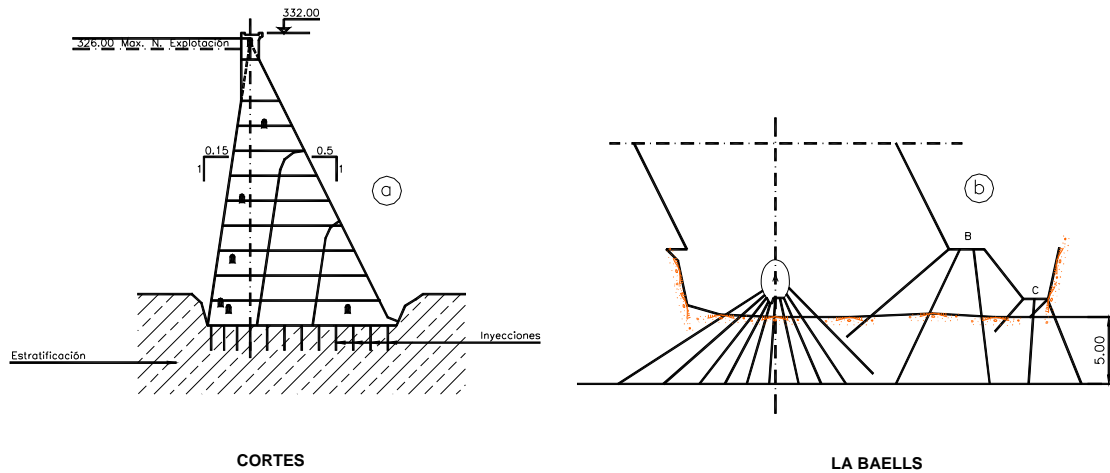


FIG. 1 - INYECCIONES DE CONSOLIDACION

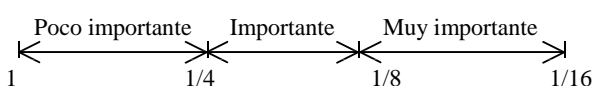
Para reducir los efectos de las deformaciones y aumentar la rigidez del terreno se recurre a las inyecciones de lechada de cemento mediante perforaciones cortas extendidas a toda la superficie del cimiento en un marco a determinar en cada caso y a realizar cuando los bloques de hormigón han alcanzado una cierta altura (Fig. 1-a).

Como una alternativa se muestra en la Fig. 1-b un caso real que el autor de este artículo no recomienda por sus desventajas: una mayor longitud de los taladros, gran concentración de las bocas de las perforaciones y mayor dificultad en la ejecución. Además, si el tratamiento de consolidación se pospone a que la presa esté terminada o en su puesta en carga, los esfuerzos que gravitan sobre la cimentación encontrarán un terreno poco consolidado en superficie. (Fig. 1-b)

En las presas en arco la influencia de las deformaciones del cimiento sobre el estado tensional de la estructura no suele ser importante. Depende, entre otros parámetros, del valor de la relación de módulos de elasticidad de la roca y del hormigón (E_r/E_h) y de su variación entre distintas zonas.

Esta influencia queda reflejada en el esquema siguiente ("Estudio de Presas Arco", de Manuel Rocha).

Valores de E_r/E_h



A la vista del esquema deberá valorarse con cierta precisión el módulo de deformación de la roca (E_r) en el caso de encontrarnos en el último intervalo.

Resistencia. Impermeabilidad.

En terrenos rocosos muy fragmentados en los que no hay sistemas de diaclasas destacadas, el efecto de la inyección será casi nulo. Si se quiere aumentar su resistencia y la impermeabilidad, previamente habrá que lavar el terreno con aire y agua a presión, incluso con ayuda de dispersantes. Lo mismo deberá hacerse si en la perforación se encuentran fallos o zonas de cizalladura rellenas de arcilla que será necesario retirar.

La literatura especializada menciona la presa española de Alcántara, de contrafuertes de 130 m de altura, en esquistos subverticales en la que se hizo un enérgico tratamiento de lavado en perforaciones, con salida del material fino de relleno por las perforaciones próximas. Se pretendía que el agua saliese clara, con un contenido de finos inferior a 0,5 gramos por litro.

En las presas bóvedas, la situación de las pantallas de impermeabilización y de drenaje es un tema aún no resuelto satisfactoriamente. En las ménsulas centrales, si la pantalla de inyección se coloca en la parte de aguas arriba, normalmente zona de tracciones, la pantalla y la roca del entorno se fisurarán y las fugas y la subpresión aumentarán.

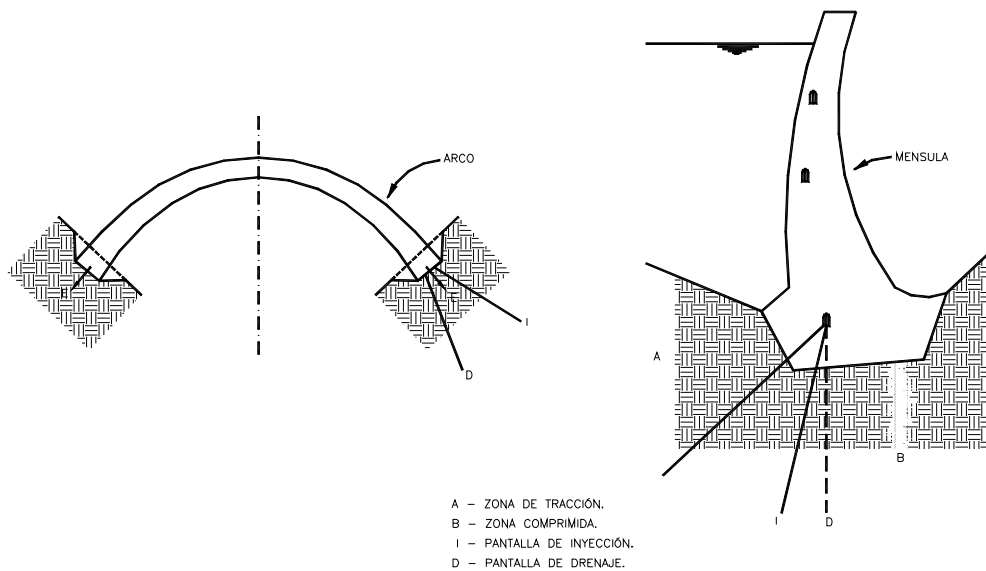


FIG. 2 - PANTALLA DE IMPERMEABILIZACION Y DRENAJE

Se han propuesto diversas disposiciones:

- Colocar la pantalla en la zona comprimida de aguas abajo y aceptar el aumento de la subpresión en la zona de aguas arriba del cimiento.
- Trasladar la pantalla aguas arriba de la zona influenciada por las tensiones de tracción y colocar un tapiz estanco entre ella y el cuerpo de la presa; la junta del contacto ha de ser capaz de soportar las deformaciones de la bóveda.
- La solución más generalizada es la de aceptar un aumento de la subpresión en una parte de la cimentación y adaptar las pantallas de inyección y drenaje para controlar la subpresión y la filtración en el resto del cimiento. (Fig. 2).

Las deformaciones pueden afectar también a la permeabilidad del macizo rocoso, pues las condiciones del flujo a través del cimiento varían con la apertura y cierre de las fisuras y juntas (Fig. 2).

Las presas bóvedas son menos sensibles a la influencia de la subpresión en el contacto con el cimiento. Si el caso lo requiere puede drenarse el talón de aguas abajo. El drenaje juega un papel importante en los estribos, donde empotran los arcos, para mejorar su estabilidad (Fig. 2)

La rotura de las cuatro presas bóvedas más significativas no se ha debido al comportamiento de la estructura. La causa principal ha sido la ci-

mentación. La rotura de Malpasset (Francia), presa bóveda de 66 m de altura, construida en 1954 y rota en 1959 en su primer llenado, se debió a la baja resistencia al esfuerzo cortante de los accidentes geológicos de su estribo izquierdo. Este lamentable suceso condujo a la revisión y consideración de todas las bóvedas que, a la sazón, se encontraban en proyecto y construcción. La incipiente Mecánica de rocas experimentó, con ello, un gran impulso y desarrollo (se considera que la "Mecánica de Rocas de J. Talobre, de 1957, fue la primera obra de síntesis).

Entre las mayores y más complejas labores de tratamiento de cimentación en una presa española se encuentran las bóvedas de doble curvatura de Atazar, Las Portas y Beznar, las tres de altura superior a los 135 m. Esta última necesitó correcciones y refuerzos con un significativo coste (~ 40% del presupuesto total de la obra). Parte de los accidentes se pusieron de manifiesto durante la fase de construcción (R.O.P. nº 3309).

PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Las causas más frecuentes de rotura en este tipo de presa, después del sobrevvertido por coronación, son las que se derivan de las condiciones del terreno de su cimiento.

- erosión en el cimiento
- erosión en el contacto presa-cimiento

En terrenos potencialmente erosionables es esencial el control de las filtraciones que proceden del embalse, control orientado a reducir su caudal y su gradiente y a proteger su salida aguas abajo mediante dispositivos adecuados.

Es particularmente necesario reducir a valores mínimos los gradientes en cimientos con sales solubles en los que el agua favorece el proceso de disolución.

Los contactos del elemento impermeable de la presa con el terreno de la cimentación es una zona débil que afecta directamente a la seguridad de la estructura.

En todas estas situaciones está presente la acción del agua infiltrada del embalse. Los tratamientos de la cimentación estarán orientados pues a su reducción y al control de las fugas remanentes.

Los tratamientos más comunes tienen dos objetivos:

- reducir las pérdidas de agua: tendrá un carácter económico y en cada caso debe plantearse su necesidad.
- evitar la erosionabilidad: es una necesidad ineludible.

Los procedimientos más utilizados para conseguirlos son:

- a) Las pantallas o cortinas profundas de inyección.
- b) Las pantallas continuas estancas verticales.
- c) Las impermeabilizaciones mixtas.
- d) Los tapices de material impermeable compactado.
- e) Las inyecciones cortas superficiales.
- f) Los dispositivos de control.

- a) Las inyecciones clásicas de lechada de cemento han sido y siguen siendo las más utilizadas para impermeabilizar un terreno. Su mayor flexibilidad, el no requerir grandes equipos mecánicos y su adaptabilidad a terrenos muy variados, son algunas de sus ventajas.

Los métodos para realizar estas inyecciones y, dependiendo de la naturaleza del terreno, son:

- por tramos descendentes.
- por tramos ascendentes.
- por doble circulación.
- por tubos manguitos (terrenos aluviales).

Según la intensidad que se pretenda dar al tratamiento la pantalla tendrá una o varias filas. Siempre será interesante el método de convergencia, cerrando la distancia entre taladros.

En terrenos muy permeables la inyección de lechadas es costosa.

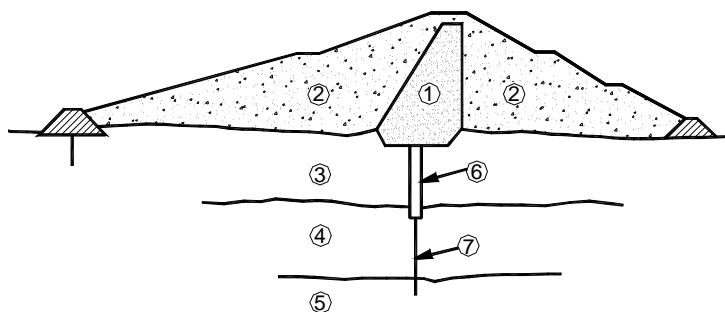
- b) Las pantallas continuas van ganando cuota de mercado por los avances logrados en los últimos años, tanto en los útiles empleados como en las mezclas usadas. Por otro lado, el producto terminado es más controlable que la inyección mediante taladros; puede conseguirse una pared diafragma estanca (cutoff).

El material de relleno suele ser: el hormigón, hormigón plástico, bentonita-cemento, lodo autoendurecible. Si sólo se pretende la impermeabilización del terreno, los dos últimos son adecuados y suficientes.

Según el útil empleado, los procedimientos son:

- pantalla con cuchara bivalva
- pantalla con hidrofresa
- pantalla con pilotes secantes
- pantalla con columnas de jet-grouting
- pantalla en pared delgada
- impermeabilización en zanja ("slurry trench").

No se entra en detalles que serán expuestos por las empresas especializadas.



- 1 - NÚCLEO
- 2 - RELLENO
- 3 - SUELOS RESIDUALES
- 4 - ROCA ALGO ALTERADA
- 5 - ROCA SANA
- 6 - PANTALLA CONTINUA DE COLUMNA SECANTES DE JET-GROUTING
- 7 - CORTINA DE INYECCIONES CLÁSICA

FIG. 3 - PRESA DE THIKA. PANTALLA PROFUNDA DE IMPERMEABILIZACIÓN MIXTA.

c) Para profundidades mayores o cuando el terreno está constituido por formaciones de distintas características (p. ej.: suelos compresibles, rocas fisuradas) puede ser interesante hacer una impermeabilización mixta, prolongando la pantalla plástica mediante inyecciones clásicas (Fig. 3).

En cerradas con estribos escarpados o junto a obras de fábrica, el encastre de una pantalla moldeada es de difícil realización, y deja la zona de contacto como un camino preferente a la filtración que, dado su relativo poco espesor, da lugar a un gradiente hidráulico significativo que compromete a la seguridad de la presa. En estos casos el

problema se resuelve con inyecciones clásicas para sellar los contactos. La presa de Arbón pasó por momentos críticos por filtraciones con arrastres en la unión de la pantalla con el muro cajero del aliviadero.

La figura nº 3 representa la sección de la presa Thika, en Kenia, de tierras de 65 m de altura y 500 m de longitud. En este caso, la presencia de rocas duras intercaladas en los suelos residuales y unas laderas muy escarpadas aconsejaron la construcción de una pantalla continua de columnas secantes de jet-grouting que requieren útiles más ligeros que en otros tipos de pantallas. Esta pantalla se prolonga con una cortina de inyecciones que atraviesa los estratos de roca alterada.

d) Los tapices de suelos impermeables - muy utilizados en épocas anteriores - no deben hacerse con material muy plástico, pues se verán dañados por los esfuerzos a que están sometidos. El experto J.L. Sherard recomienda utilizar lo que él llama "arena sucia". En las presas de Guadalteba-Guadalhorce se colocaron tapices semi-permeables de arenisca compactada.

e) Bajo el núcleo impermeable de una presa es muy conveniente que la pantalla profunda vaya acompañada de un "tapiz de inyecciones", inyecciones cortas de consolidación, extendidas en cuadrícula a toda la superficie de contacto. El tratamiento de esta zona colabora más en la seguridad de la presa que la pantalla profunda. (Fig. 4).

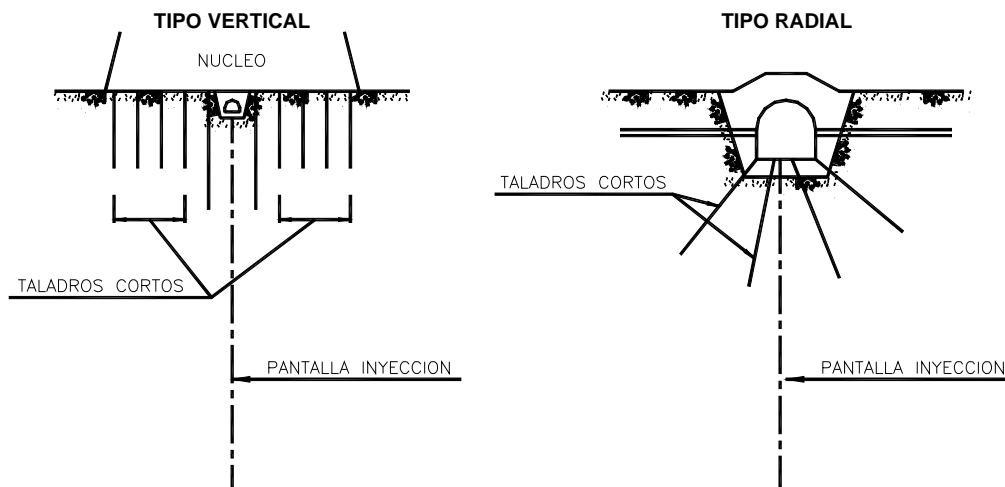


FIG.4 - INYECCIONES CORTAS (TAPIZ DE INYECCIONES)

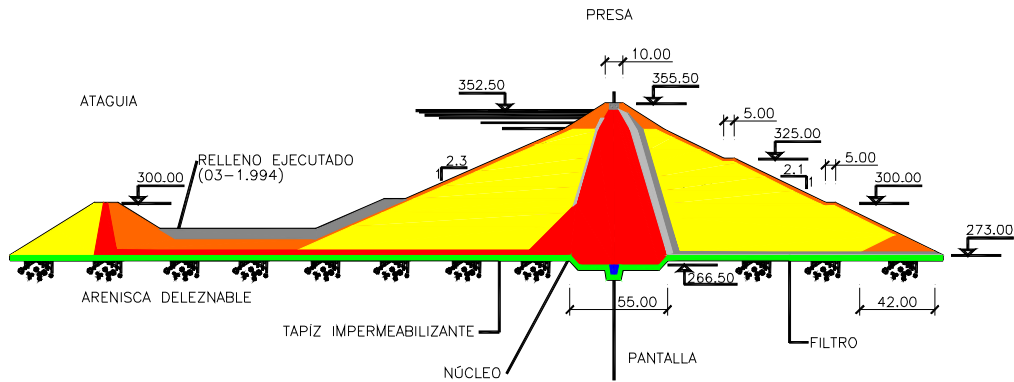


FIG.5 - PRESA DE GIRIBAILE. CIMIENTO EROSIONABLE.

La presa americana de materiales sueltos de 93 m de altura, Teton, construida en 1976 se rompió ese mismo año coincidiendo con su primer llenado. El motivo de este accidente fue un proceso de erosión en el contacto del núcleo con la roca fisurada y deficientemente tratada.

El grupo de expertos del jurado opinó que de esta rotura no se obtuvo ninguna enseñanza para los técnicos, pues el motivo del accidente resultaba evidente, una vez analizado el suceso. Sin embargo su recuerdo perdura y ha servido para que desde entonces este tratamiento superficial se realice sistemáticamente.

Terrenos difíciles. En este apartado se consideran los terrenos para cimentar una presa de materiales sueltos que, por su gran deformabilidad, su fácil erosionabilidad y contenido significativo de sales solubles, necesitan unos tratamientos más extensos, recurriendo a varios de los procedimientos citados anteriormente.

A continuación se exponen dos ejemplos de presas españolas que han requerido varias líneas de defensa:

- Presa de Giribaile (Fig. 5) de 86 m de altura sobre una formación, en la zona baja, de areniscas triásicas de grano fino poco cementadas y muy deleznable por los flujos de agua. Las medidas tomadas han sido: un extenso tapiz de arcillas y ensanchamiento del núcleo en su base para reducir el gradiente hidráulico; una pantalla profunda de inyección de un cemento especial realizada desde la galería perimetral para cortar las filtraciones; filtro invertido bajo el espaldón de aguas abajo para evitar los arrastres sólidos de las filtraciones remanentes.
- Presa de La Loteta (Fig. 6) de 32 m de altura y una longitud de coronación de 1.753 m sobre un terreno del Mioceno en una sucesión de estratos arcillosos y margosos, éstos últimos con elevado contenido de yesos a veces micro-carstificados. El objetivo perseguido era reducir al máximo la circulación

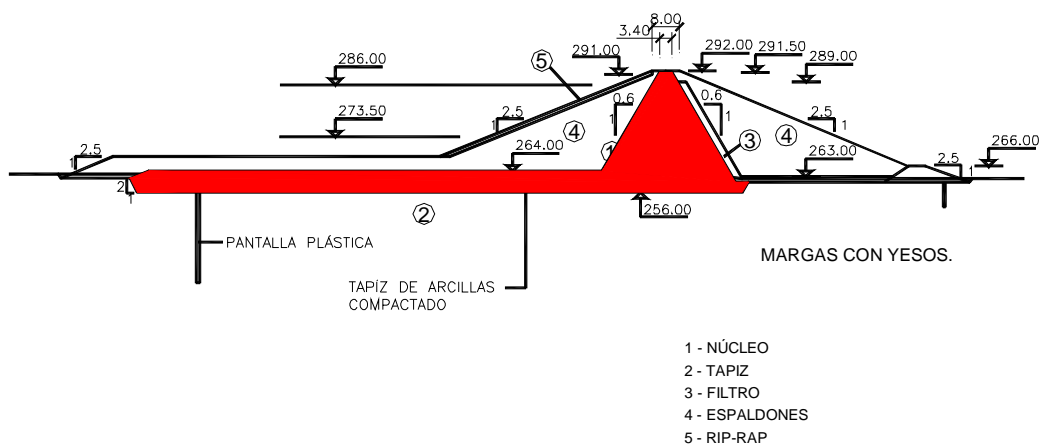


FIG.6 - PRESA DE LA LOTETA. TERRENO SOLUBLE

del agua a través del cimiento para minimizar el fenómeno de la disolución de las sales que contiene. Con los dispositivos diseñados se pretende que el flujo del agua tenga un gradiente hidráulico reducido ($\sim 0,2$). Estos dispositivos han sido: pantalla impermeable de bentonita-cemento de 30 m de profundidad máxima; un tapiz de suelos impermeables de 100 m de longitud y un núcleo de gran base (1,2 veces la altura de la presa).

Galerías perimetrales. La colocación de galerías perimetrales bajo el núcleo de las presas de materiales sueltos no ha sido una práctica común, pero se observa una tendencia a su mayor empleo. En España y en algunos países de Europa ha sido práctica generalizada.

Hay que tener presentes ciertos criterios:

- Estas galerías tienen un objetivo principal: ejecutar o reajustar los tratamientos del **terreno** y su observación. Otros usos son secundarios.
- Deben encajarse, parcial o totalmente, en el terreno.
- La zanja o caja de excavación debe, si ello es posible, abrirse con medios mecánicos, sin uso de explosivos.

Una galería, bajo el núcleo impermeable, actúa siempre como una llamada al agua infiltrada, se pretenda o no, es un drenaje. En los terrenos que hemos llamado "difíciles" la galería no coadyuva al interés de mantener un gradiente hidráulico reducido. Este inconveniente debe sopesarse a la hora de tomar decisiones. En el proyecto de la presa de La Loteta figuraba una galería bajo el núcleo, que se quitó en el Proyecto de Construcción (Fig. 6) después de analizar y contrastar con otras opiniones.

Algunos accidentes ocurridos en estas galerías figuran en la conferencia "Casos Patológicos de las Presas Españolas" por Manuel Alonso Franco: Simposio sobre Geotécnica de presas de M.S. Zaragoza 1993.

IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE

La pantalla de inyección, a base de lechada de cemento, sigue siendo el procedimiento más utilizado para reducir las filtraciones.

Para las presas de fábrica cimentadas sobre roca fisurada se pueden establecer unos criterios de inyectabilidad

- si la permeabilidad es pequeña, inferior a 5 U.L., el drenaje es fundamental, no así la inyección que suele ser inútil.
- si la permeabilidad es alta, superior a 50 U.L., la inyección es absolutamente necesaria para limitar el caudal de las fugas, no así el drenaje, innecesario en un terreno que se presume permeable.
- en situaciones intermedias, el drenaje es siempre útil y de bajo coste. La pantalla de impermeabilización puede posponerse hasta valorar el comportamiento en su puesta en carga, si la presa dispone de una galería.

Hay que considerar dos situaciones: la cimentación en roca, y en terrenos no consolidados, como los aluviales. En terrenos muy permeables, la inyección de una lechada es costosa.

Hoy día no se duda en inyectar lechadas espesas o densas, así llamadas cuando $c/w > 1$ (cemento/agua en peso). Tienen una viscosidad y una cohesión predecible y medible. La viscosidad determina la velocidad a la que circula la lechada por una fisura de un espesor dado bajo una presión establecida. La cohesión se relaciona con la penetración o alcance.

Las ventajas de estas lechadas, al tener más cemento y menos agua, son su mayor estabilidad, menor sedimentación, menor retracción, menor porosidad o mayor durabilidad, mayor resistencia mecánica y menor riesgo de hidrofracturación o levantamiento del terreno, ya que por su cohesión pierde presión a medida que avanza por la fisura o grieta.

El grado de penetración de una lechada depende del tamaño de los granos del cemento. La apertura más pequeña de una fisura que permite el paso de una lechada normal es de $\simeq 0,2$ mm. Es erróneo el inyectar lechadas muy fluidas, que son inestables, para lograr mayor penetración o alcance. Se debe emplear un cemento de grano fino utilizando un fluidificante y con mayores presiones en la inyección. La superficie específica (Blaine) de un cemento Portland normal es de unos 3.000 cm² por gramo. Los microcementos y los ultrafinos superan los 8.000 cm²/gramo.

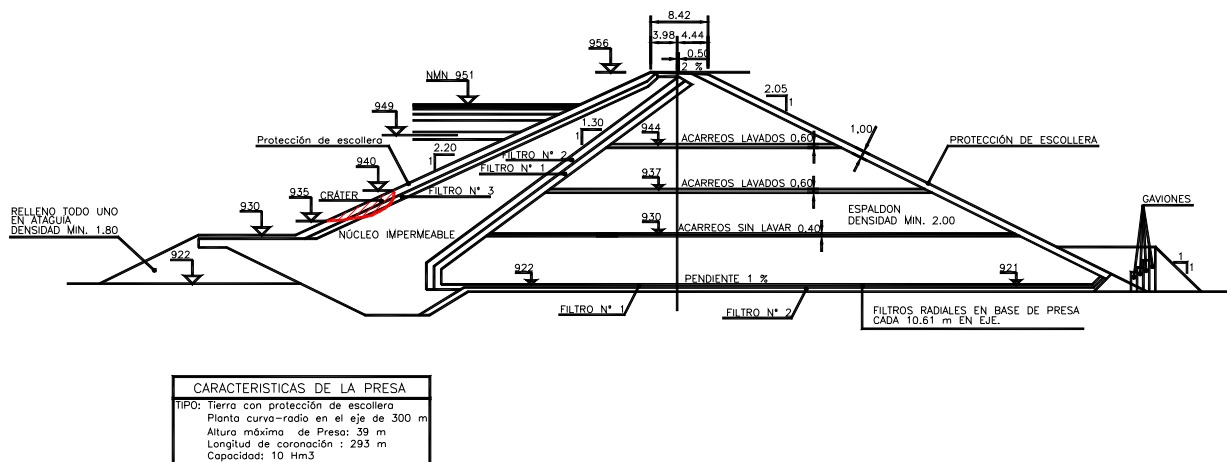


FIG.7 - PRESA DEL TAIBILLA. SECCIÓN TIPO

En resumen: inyectando una lechada de cemento, que son las más utilizadas, se deberá usar:

- el cemento más fino disponible
- la lechada más densa
- la presión más alta compatible con el medio y el objetivo que se persigue

ACCIDENTE POR EROSIÓN INTERNA DE UNA PRESA. CASO REAL (Ver fotos)

La presa que nos ocupa es de materiales sueltos, y se terminó de construir en el año 1973, en el término municipal de Nerpio (Albacete). Sus principales características, que quedan reflejadas en la sección tipo son:

- Tipo - tierras zonadas de planta curva
- Altura sobre cimientos..... 40 m
- Longitud de coronación... 293 m
- Talud aguas arriba 2,20:1
- Talud aguas abajo 2,05:1
- Aliviadero "Morning Glory"
- Cota de coronación 956
- N.M.N..... 951

La protección de los paramentos se hizo con una capa de escollera caliza apoyada sobre otra de material granular, ambos de 1 m de espesor medido perpendicularmente al paramento. Aguas abajo del núcleo existen dos filtros fino (F) y grueso (G) que le separan del espaldón de aguas abajo. Este último queda drenado por cuatro mantos horizontales de acarreos del río. (Fig. 7)

Su puesta en carga comenzó en 1974 aforándose unas filtraciones modestas por aguas abajo de unos 7 l/s.

La evolución de la filtración en función de la cota alcanzada en el embalse aparece en el cuadro siguiente:

EVOLUCIÓN DE LA FILTRACIÓN

FECHA	COTA EMBALSE	FILTRACIÓN (Q=l/s)
1973	922	0
1974	945	7
IV-1975	947	20
VI-1975	949	90
VIII-1975	945	22
X-1975	938	7

Hay que destacar que en junio de 1975, con un embalse a la cota 949, es decir, 2 m por debajo del nivel máximo normal (NMN=951), se produjo un brusco aumento de la filtración estimada en 90 l/s. Fue detectada sorpresivamente por el vigilante de la presa que asevera que observó una filtración más o menos concentrada limpia de arrastres sólidos, por aguas abajo de la presa.

Ante esta situación se empezó a bajar lentamente el embalse. Un equipo de submarinistas apreció, entre cotas 940-935, la existencia de una depresión en forma de cráter en el paramento de aguas arriba próximo al estribo izquierdo. Con un mayor descenso de nivel se observaba un remolino en la superficie que indicaba, de manera clara, la existencia de una filtración concentrada.

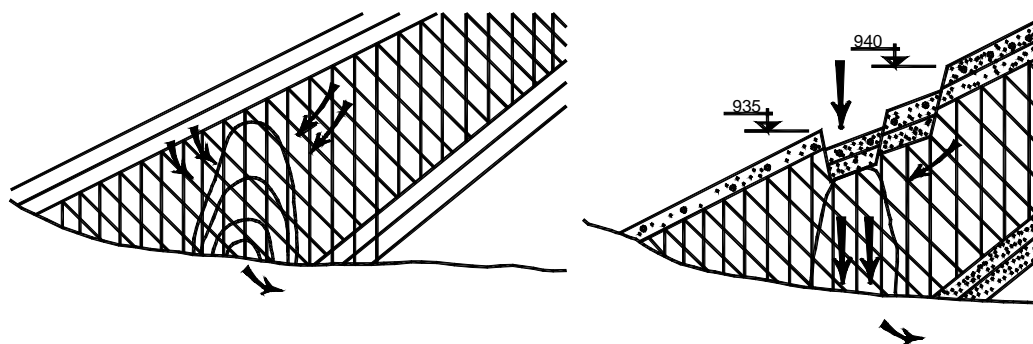


FIG.8 - PRESA DEL TAIBILLA. PROCESO DE TUBIFICACIÓN

Durante los meses de octubre y noviembre se realizaron las obras de saneo siguiendo la orientación que marcaba el material removido, en una profundidad de 10 m (cota 932). Aunque el conducto continuaba no se siguió por temor al deslizamiento del paramento, protegido por una sencilla empalizada. El material extraído era un revuelto de arcilla del núcleo, grava y arena del apoyo de la escollera, y algún trozo de roca. Una vez saneado se rellenó con arcilla limpia bien compactada.

Se admitió que la avería había quedado satisfactoriamente resuelta, pero interesaba conocer su mecanismo. Se solicitó la colaboración del consultor americano J. L. Sherard que visitó la presa, ya reparada, examinó la documentación, Proyecto y Archivo Técnico de Construcción, y concluyó con las siguientes observaciones:

- *Los filtros de la presa aguas abajo del núcleo estaban bien diseñados y aceptablemente contruidos; por tanto, a través de ellos no pudieron emigrar las partículas finas del material del núcleo.*
- *El material que faltaba en el cráter forzosamente tendría que haber rellenado algún hueco o conducto existente en la cimentación.*

En los partes de obra referentes a las excavaciones aparecen referencias a zonas de yesos en algunos casos muy descompuestos.

Una hipótesis que justificase la formación del "piping" es:

El material del núcleo es una arcilla con nódulos, procedente de coluvión y pie de monte. Fue compactada tomando como patrón el ensayo P.M. Presumiblemente el núcleo bastante seco ($\gamma_{seco} \geq 2$ t/m³ y $w \leq 8\%$) se encontraba agrietado al llegar el embalse, cuyas aguas encontraron vías de entrada que arrastraron los finos hacia los huecos existentes en la cimentación, produciéndose así desprendimientos del material del núcleo, del filtro superior y de la escollera del manto externo de protección. (Fig. 8)

Dado el interés por este llamativo suceso, se emprendió al cabo de un año una investigación perforando unos sondeos en la zona señalada como de yesos descompuestos. Las perforaciones atravesaron 15 m de presa y 23 m de terreno, margas con predominio de yesos, entrando en una formación de areniscas blandas. Se comprobó que bajo la zona saneada seguía apareciendo material removido incluido alguna roca de la escollera. Se deduce pues que existió migración de arcilla del núcleo a huecos de la cimentación existente debido a la disolución del yeso. (Fig. 9)

Puede **concluirse** que había suficientes datos en los estudios previos como para "sospechar" del terreno de cimentación, pero no tuvieron ningún reflejo en el proyecto, hecho más frecuente de lo que se piensa.

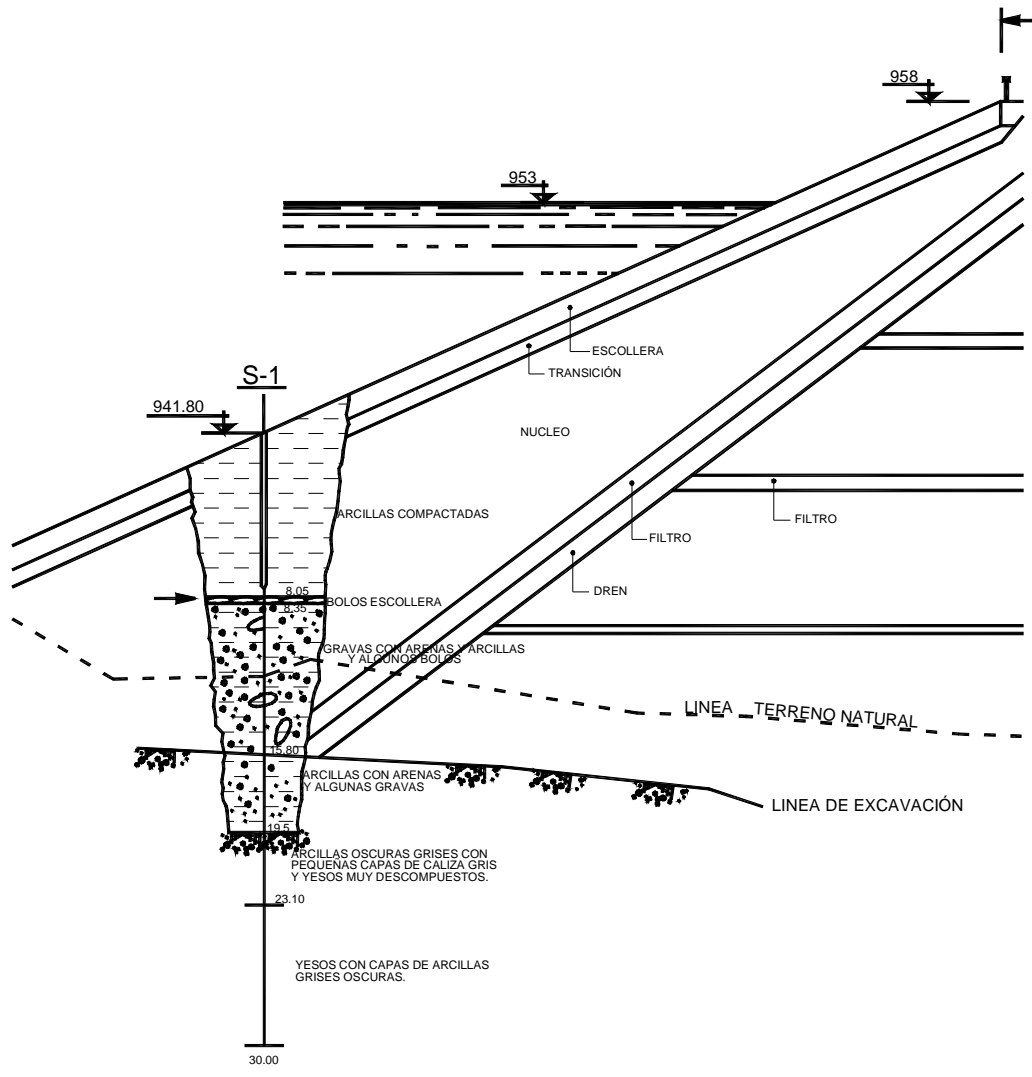


FIG.9 - SONDEO DE COMPROBACIÓN DE LA REPARACIÓN



VISTA DESDE AGUAS ABAJO



VISTA DESDE AGUAS ARRIBA

EMBALSE DEL TAIBILLA



DETALLES



ALVIADERO EN MORNING GLORY



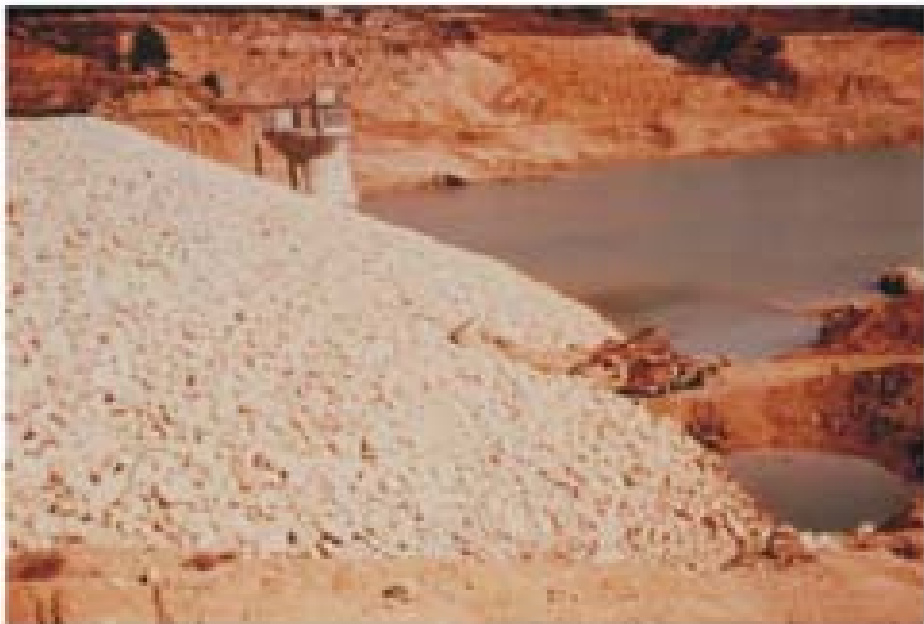
VISTA DEL CRÁTER



EXTRACCIÓN DEL MATERIAL REMOVIDO



CRÁTER EN PARAMENTO AGUAS ARRIBA



REPARACIÓN DEL CRÁTER