

# Cimentación de presas en terrenos terciarios con disolución de evaporitas y erosión interna en la cuenca del Ebro

Por ANGEL ARAOZ SANCHEZ-ALBORNOZ  
Ingeniero de Caminos - Confederación Hidrográfica del Ebro.

## RESUMEN

Comienza el artículo exponiendo un somero resumen de las características geográficas; político-administrativas, hidrológicas; climatológicas y, sobre todo, geológicas de la cuenca del Ebro.

En cuanto a geología, después de un somero esquema de la geología de la cuenca del Ebro, que fue un mar interior hasta principios del período terciario, se centra en describir los terrenos terciarios de facies continental, que forman el centro de la cuenca en una parte significativa de su superficie.

Se expone la litología, formada por conglomerados, areniscas de grano grueso y fino, margas y materiales intermedios de los períodos Oligoceno y Mioceno, el primero en la zona externa y el segundo en la zona central de las formaciones terciarias de la cuenca. Los conglomerados aparecen en los bordes de la antigua fosa y las formaciones van siendo de granulometría más predominantemente fina hacia el centro, comenzando con conglomerados y arenisca y pasando a arenisca y marga y luego a predominio de la marga. También los contenidos de yeso de origen evaporático, en primera, segunda e incluso tercera deposición, que siempre existen, van siendo más abundantes hacia el centro de la cuenca. En cuanto a estratificación y fracturación, aunque la estratificación sea casi horizontal, con muy suave buzamiento hacia el centro de la cuenca, existen pequeños movimientos, de pocos grados, originados por tectónica o diapirismo, pudiendo existir pequeños pliegues subhorizontales de hasta 20 y 25° de carácter muy local. Esto origina que exista una fracturación compleja y confusa, con diaclasas de tipo convencional; otras originadas por erosión diferencial y vuelque de los bloques de arenisca; las de origen gravitacional en lo alto de las laderas abruptas y, las fracturas menos conocidas de origen tectónico, asociadas a los pequeños cambios de buzamiento de unos

pocos grados, incidiendo esta fracturación decisivamente en el comportamiento del terreno ante las filtraciones.

Del comportamiento de estas formaciones como cimiento de presa hay poquísimas experiencias, pues no dan cerradas adecuadas, aunque se tendrán que ir usando cuando se agoten las de las zonas media y alta de la cuenca que son más idóneas para presas:

De las experiencias de la única presa construida por la Confederación del Ebro, órgano gestor de la cuenca, se deduce que estas formaciones son peligrosas por su alta susceptibilidad a la erosión interna, incluso con caudales y gradientes muy bajos y tratamiento de inyecciones cuidado. La erosión se desencadena por disolución del yeso, que no puede ser retenido en los filtros, y puede agravarse por arrastre de los componentes más finos de las limolitas (marga incoherente de cemento limoso) que generalmente acompañan al yeso y estos arrastres sí que pueden ser evitados con filtros cuidadosamente diseñados.

El ejemplo es la presa de Caspe, en el río Guadalupe, cuyas incidencias de llenado se exponen con detalle.

De estas experiencias, se deduce que cualquier filtración por pequeña que sea, puede conducir a caudales con crecimiento exponencial, a veces rapidísimo, en el tiempo, de fórmula  $Q_t = Q_0 e^{kt}$  donde  $Q_0$  el caudal inicial,  $e$  la base de logaritmos neperianos,  $K$  coeficiente adimensional de valor  $K = a/h$  donde,  $a$  es función de las características del terreno y  $h$  la altura de agua y  $t$  es el tiempo. Con niveles de agua moderados, correspondientes al llenado parcial de una presa de 51 m. de altura,  $K$  puede suponer duplicar caudales cada 18 meses o cada menos de 10 días o menos, modificándose  $K$  de modo brusco e imprevisible.

De las experiencias de Caspe, se deduce que con

caudales poco significativos, quizá menos de 50 a 100 l/s., el fenómeno puede ser irreversible por apertura de nuevas vías; contorneo de la zona inyectada o destaponamiento y arrastre del material que se esté inyectando y conducir a un desembalse rápido o a un sifonamiento.

El tratamiento, es la inyección de cemento, mortero u otras mezclas, con técnicas adecuadas y, sobre todo, ganar la carrera al tiempo, evitando que el progreso de la erosión sea más rápido que el tratamiento de corrección, siendo imposible evitar la aparición de estos fenómenos, pues el mínimo caudal arrastra yeso disuelto, imposible de retener con filtros o cualquier dispositivo.

Como ejemplo, en la cerrada de la presa de Caspe, una filtración de apenas dos litros segundo, arrastraba casi 100 kgs./día de yeso y, después de dos años de evolución continua, apenas duplicar, desencadenó una erosión que duplicaba cada diez días y fue cortada en una acción de emergencia en la que se contó con la ventaja de un cuidado seguimiento de la situación y disponer de datos geoló-

gicos y de auscultación que permitieron localizar la filtración en pocos días y con el tercer taladro, comenzando a reducirla desde el cuarto o quinto taladro inyectado, pese a lo cual, se estuvo cerca de necesitar desembalsar totalmente.

## 1. LA CUENCA DEL EBRO

Para encuadrar el problema que vamos a estudiar creemos útil comenzar por un esbozo del marco geográfico y geológico de la cuenca del Ebro, especialmente útil para los que no conozcan siquiera las características de la península Ibérica.

La cuenca del Ebro se ubica en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica, al sur de los Pirineos Catalanes, aragoneses, navarros y del extremo oriental de la Cornisa Cantábrica, puesto que el nacimiento del río queda varios kilómetros al O.S.O. de Reinosa en Cantabria.

Como principales regiones o comunidades autónomas comprende casi toda Navarra, toda Rioja, toda Aragón, toda Cataluña, toda La Rioja, toda Castilla-La Mancha, toda Castilla y León, toda Cantabria y parte de País Vasco.

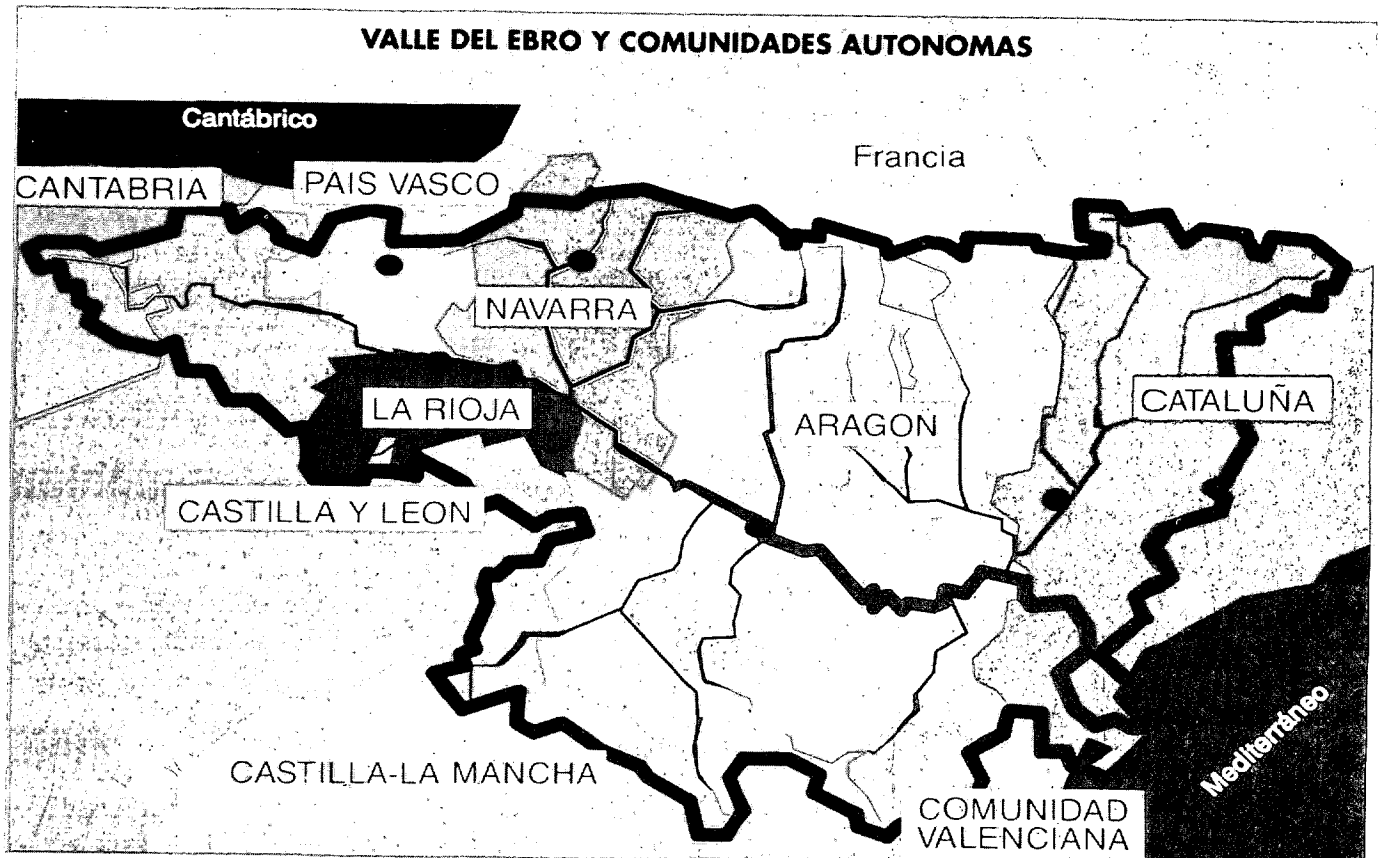


Figura 1

## CIMENTACION DE PRESAS EN TERRENOS TERCIARIOS EN LA CUENCA DEL EBRO

casi todo Aragón y parte significativa de las Comunidades de Castilla-León y Cataluña. En total afecta a nueve de las diecisiete Comunidades autónomas (dos insulares) más pequeñas porciones de Francia y buena parte del Principado de Andorra, pequeño condominio franco-español situado en el Pirineo oriental catalán.

Tiene una extensión de 85.476 km<sup>2</sup>, lo que supone el 17% de la península Ibérica.

Sus límites geográficos son: N. Pirineos y Cornisa Cantábrica; SO. Cordillera Ibérica (en la cuenca del Jalón por una gran subsidencia de esta cadena montañosa, la cuenca del Ebro se extiende al SO del eje de la cordillera); E. cordillera litoral Catalana y mar Mediterráneo en Tortosa.

La aportación media de la cuenca es de 16.333 millones de metros cúbicos/año, pero la hidrolo-

gía y pluviometría son muy irregulares, existiendo en el Pirineo y Prepirineo zonas de más de 1.500 mm. y en el centro de la cuenca zonas semidesérticas con menos de 300 mm. (ver plano de isoyetas).

En cuanto a lo que más interesa, la geología, ya la enunciación de los límites geográficos llama nuestra atención el carácter de cuenca interior, casi sin comunicación hidrológica con el Mar Mediterráneo, lo que se ha originado porque toda la cuenca del Ebro era un gran mar interior del Mesozoico, denominado Fosa del Ebro, que se vació a principios de la era terciaria, cuando los movimientos alpinos levantan toda la actual cordillera Pirenaica y la Ibérica, hundiendo parcialmente la Cordillera litoral catalana.

En cuanto a morfología de la cuenca, como el vaciado es progresivo en un largo proceso de ero-



Figura 2



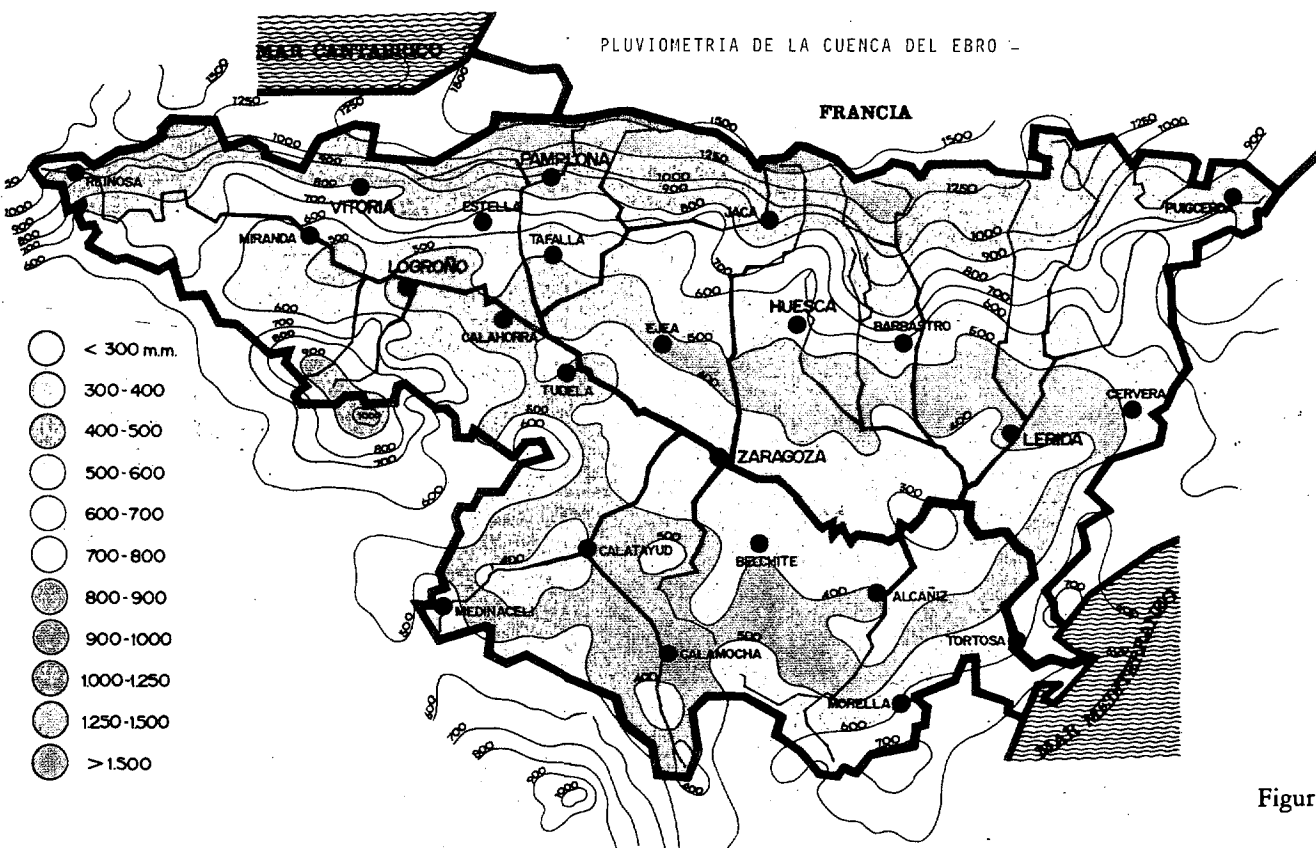


Figura 3

sión y sedimentación incluso con regresiones de la zona inundada, la cuenca tiene un acusado carácter endorréico.

Esta génesis, demasiado esquematizada, quizá nos dá las características más singulares de la cuenca, pues en sus límites afloran a mayor cota, materiales mesozóicos (Cretácico, Jurásico y Triásico) y la parte más antigua del terciario (Eoceno), así como terrenos primarios en menor proporción (Cámbrico, Devónico, Silúrico) y, excepcionalmente, rocas intrusivas. En el centro aparecen las formaciones terciarias (Oligoceno, Mioceno, Paleoceno), formándose el límite de la antigua Fosa del Ebro por un cordón de conglomerados del Oligoceno inferior, que pueden aparecer concordantes con el Eoceno o Cretácico, o en deposición sub-horizontal.

Las características de los terrenos que forman la cuenca son enteramente distintas según estemos fuera o dentro de la antigua Fosa del Ebro. Los terrenos exteriores son predominantemente mesozoicos, con formaciones calcáreo-arcillosos (calizas, margas y materiales intermedios) de facies marina, mientras que los escasos terrenos primarios son predominantemente silíceos o sílico-arcilloso, siendo

irrelevante la presencia de terrenos intrusivos. En estos terrenos, los mesozoicos se presentan problemas de karstificación en las formaciones calcáreas de facies marina (principalmente el Jurásico).

## 2. FORMACIONES CONTINENTALES TERCIARIAS CON EVAPORITAS

Los terrenos terciarios del centro de la fosa del Ebro, se forman en régimen de deposición continental y en unas condiciones de marcado endorreismo por erosión y deposición de los materiales mesozóicos (entre ellos los yesos del triásico) y por evaporación de las sales del antiguo mar interior o evaporación de las sales arrastradas por erosión. En estas formaciones existen muy pocos embalses construidos, y generalmente están en los conglomerados marginales del oligoceno inferior (El Grado y Vadiello), pues su situación geográfica (zona medio baja del río y cerradas abiertas) no son favorables, pero según se agoten los buenos emplazamientos en terrenos mesozóicos o primarios, se tendrán que ir utilizando. Desde los conglomerados marginales del Oligoceno se va pasando de formaciones gruesas, conglomerados, conglomerados

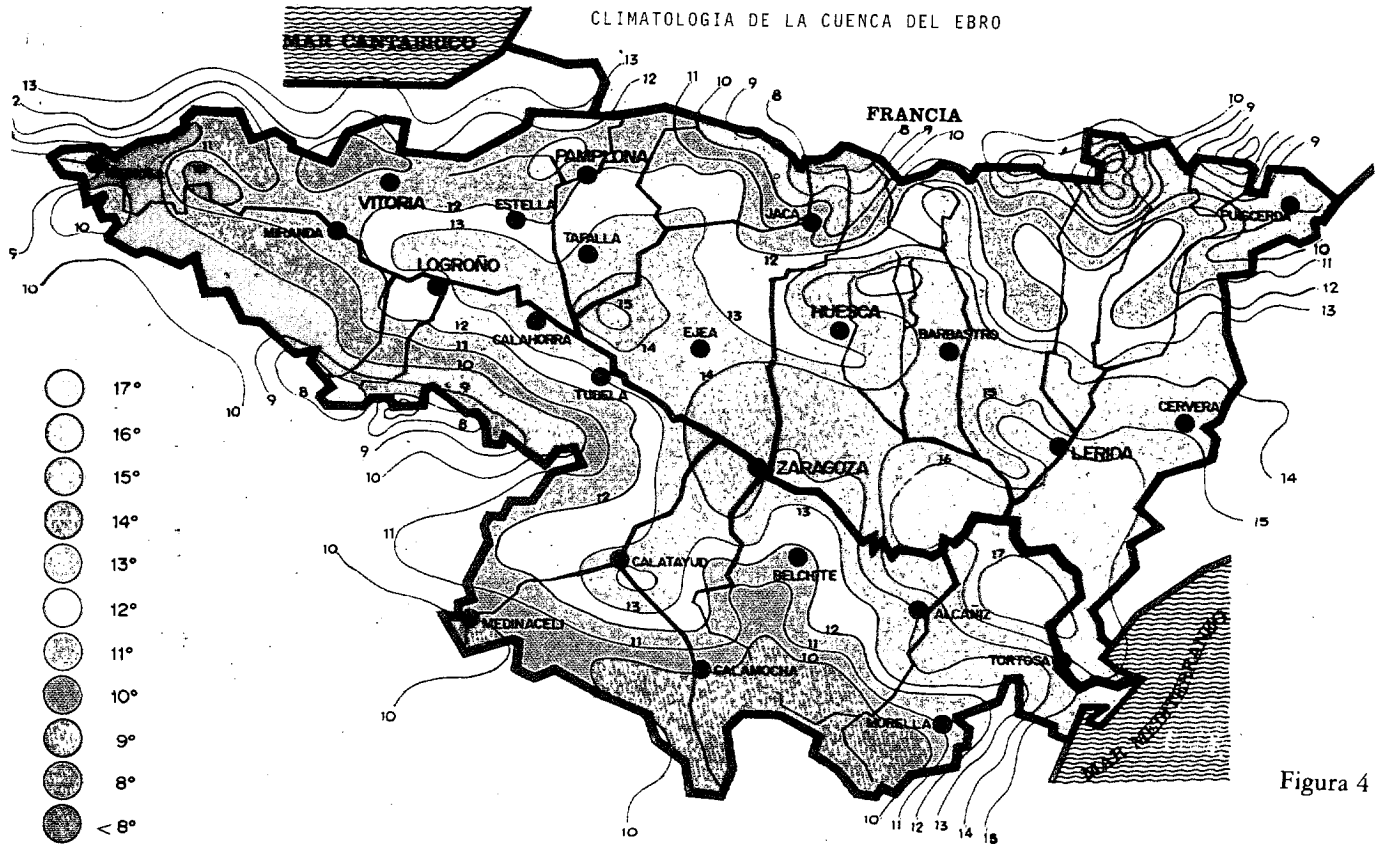


Figura 4

finos, areniscas a formaciones intermedias, areniscas gruesas con pasadas conglomeráticas y margas y luego a areniscas finas y margas y areniscas o incluso limolitas yesíferas en las inmediaciones de Zaragoza.

Aunque en todas las formaciones aparecen yesos éstos van siendo progresivamente más abundantes hacia el centro de la cuenca. Los yesos (y las evaporitas en general) pueden ser de primera deposición, formados directamente por evaporación de las aguas salinas en zonas localizadas muy profundas que pueden, incluso, ser explotadas comercialmente (minas de Remolinos en la provincia de Zaragoza) pero estas formaciones no aparecen en superficie y no nos afectan de modo directo. Las formaciones más abundantes son las de segunda cristalización, sedimentadas por arrastre y evaporación en el proceso erosivo, y suelen presentarse en estratos de poco espesor, desde unos pocos milímetros hasta casi un metro, generalmente en estado cristalino o parcialmente cristalino. Aunque hablemos de yeso hay sulfato magnésico y cloruros.

En cuanto a materiales cuaternarios existen, no sólo en los valles de los ríos, sino en terrazas colga-

das que han quedado altas al progresar el fenómeno de la erosión.

En cuanto a tectónica y estratigrafía, querríamos destacar que la estratificación no es horizontal por varias razones:

1.<sup>a</sup>) Existe un suave buzamiento hacia el centro de la fosa: 2.<sup>a</sup>) Hay fenómenos de asiento diferencial y, lo que es menos conocido: 3.<sup>a</sup>) Fenómenos micro tectónicos originados por pequeños movimientos post-alpínicos por fenómenos de expansión de grandes formaciones salinas (diapiro) que originan una estratificación errática de tipo subhorizontal pero con buzamientos de 2 a 5°, incluso hay pequeños y localizados pliegues monoclinales de hasta 20/25°.

Esto origina una fracturación difusa en la que coexisten diaclasas típicas, fisuras de asiento por erosión diferencial o decompresión gravitacional en las cabezas de los grandes escarpes y fisura de mayor entidad originadas por los cambios de buzamiento a los que hemos aludido, pudiendo éstas últimas ser de cierta entidad y quedar disimulados por las fisuras sistemáticas de menor entidad. Además su escasa importancia las hace de difícil iden-

tificación, incluso en una esmerada foto-interpretación, pues quedan enmascaradas por la vegetación y la fracturación asistemática que hemos indicado.

### 3. PROBLEMAS DE LAS FORMACIONES TERCIARIAS

Después del quizá demasiado largo exordio, entraremos en el tema específico de nuestro artículo.

Diremos, de entrada, que los problemas que pueden presentar estas formaciones como cimentación de presas son poco o nada conocidos, dado el escaso número de presas construidas sobre las mismas.

Además de los problemas clásicos de estas formaciones, como son: la agresión química a los horrigones; la evolución y descomposición por venteo; el consiguiente fenómeno de erosión diferencial con descalce de paquetes de arenisca y vuelque de medianos o grandes bloques de marga; el carácter generalmente expansivo de las formaciones margosas, estos terrenos presentan el problema añadido de su manifiesta inestabilidad frente a las filtraciones que puedan desencadenar fenómenos de erosión interna de crecimiento exponencial como luego podremos ver.

El problema es que los terrenos están como hemos visto, fracturados existiendo intercalaciones de yeso de segunda o tercera deposición en interestratificaciones y diaclasas y que los estratos suelen estar rodeados de unos pocos centímetros de limolitas o margas de matriz limosa, de mucha peor calidad. Como la inyección, aún cuidada, no sustituye los materiales que hemos indicado y los contactos marga-arenisca con intercalación de paquetes centimétricos de yeso y limolita presentan pequeños despegues, originados bien sea por deformación de asiento o retracción de la marga, cualquier mínimo caudal inicia la disolución de yeso, incluso con gradientes mínimos, generando una erosión regresiva y un aumento de caudal exponencial con el tiempo, que puede alcanzar ritmos muy rápidos, pudiendo llegar al sifonamiento en la cimentación. Es obvio que ningún filtro pueda detener los materiales en disolución y la experiencia nos demuestra que pueden disolverse fácilmente 500 a 750 mg/l de ion  $\text{SO}_4$  que equivaldría a 100

kg./día de material para una filtración mínima de 2,5 l/s.

Para mejor conocimiento de estos fenómenos expondremos las diferentes incidencias de la presa de Caspe.

### 4. LA PRESA DE CASPE

Expondremos aquí los diferentes incidentes tenidos en los dos últimos años durante las primeras pruebas de llenado de la presa de Caspe, primera que la Confederación construye en estas formaciones de alto contenido de yeso y fisuración difusa.

#### a) Características generales de la presa

La presa de Caspe, destinada a riegos de 4.000 has. de huerta vieja y 4.000 de nuevo regadío, se ubica en la parte baja del río Guadalope, en término municipal de Caspe (Zaragoza) unos 18 kms. al sur del pueblo, en la denominada partida del "Cojo Sancho".

Es una gran presa de materiales sueltos con núcleo de arcilla, de capacidad 81,6 hm<sup>3</sup>, con cota de coronación 234 y de agua la 230, con 51 m. de altura y 400 m. de coronación. Al hablar de la sección tipo daremos más detalles de la presa propiamente dicha.

#### b) Geología de la cimentación

La presa y vaso se ubican en las formaciones terciarias que hemos descrito y cuyos problemas son objeto central de este artículo.

En el emplazamiento se presentan todos los problemas que hemos indicado anteriormente y la geología de la sección y cerrada se pueden ver las figuras de las páginas siguientes.

La cerrada se forma por varios niveles areniscos de cierta potencia (uno a tres metros en general) de gran continuidad estratigráfica, que sirven de niveles guía para identificación de las formaciones, existiendo niveles margosos, a veces con yeso abundante, en diaclasas y en la propia masa de la marga. Entre los paquetes de cierta continuidad margosos o areniscos, aparecen, sistemáticamente, capas de yeso de poca potencia, generalmente inferiores al centímetro, envueltas en las limolitas flojas que hemos descrito anteriormente. Además de





# CIMENTACION DE PRESAS EN TERRENOS TERCIARIOS EN LA CUENCA DEL EBRO

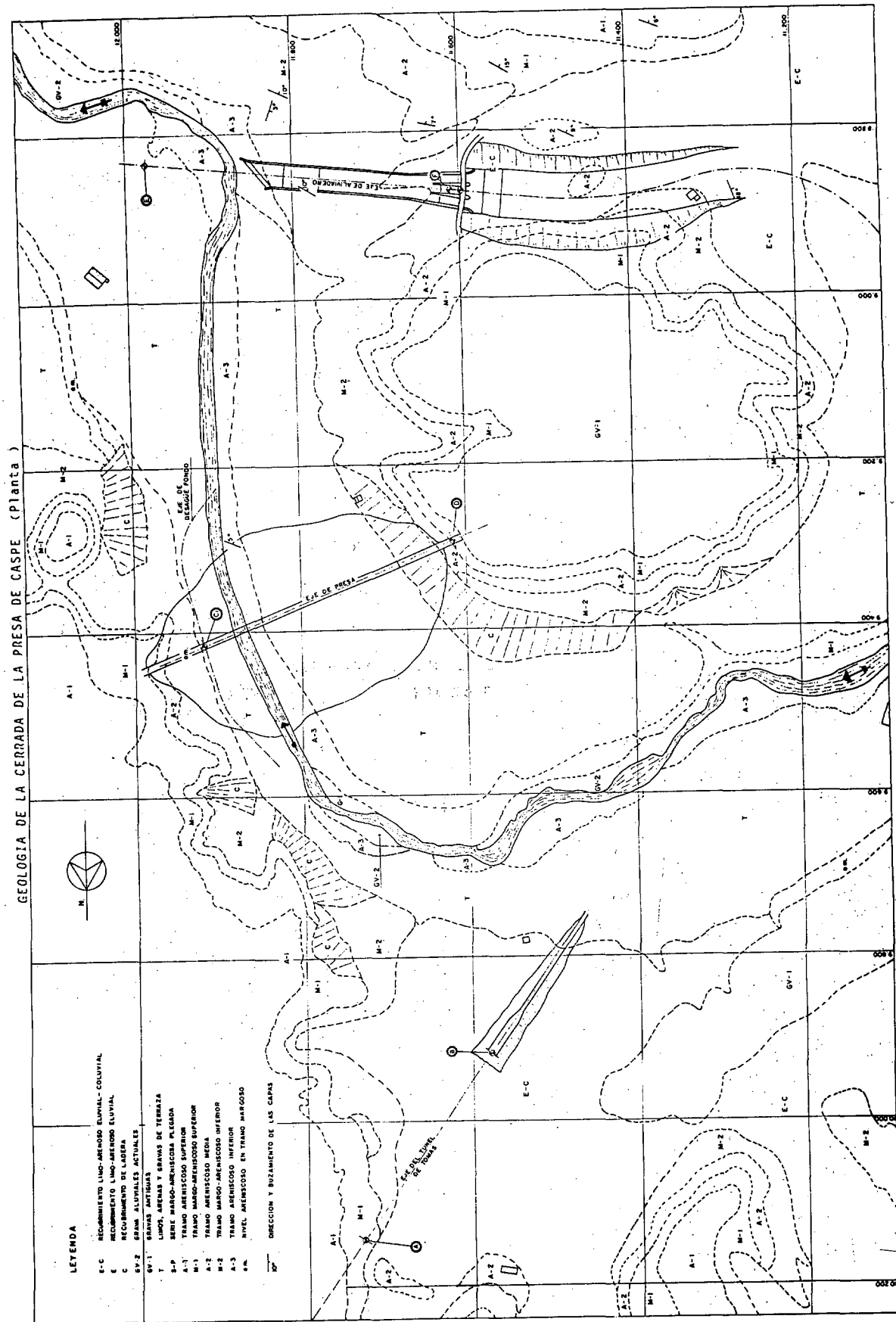


Figura 6

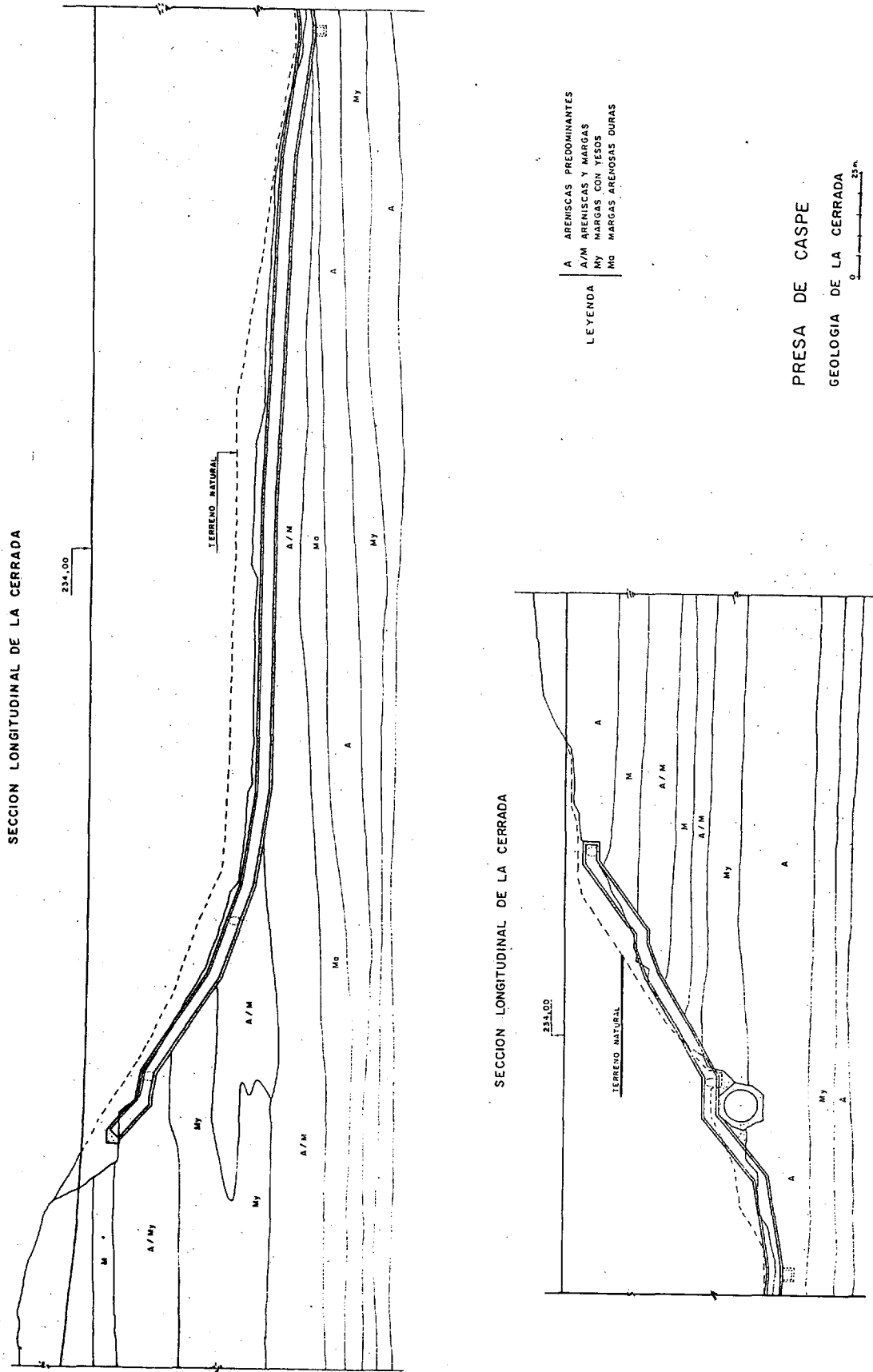


Figura 7

estos paquetes definidos de arenisca o marga, con y sin yeso abundante, hay estratos de menor potencia muy discontinuos con abundantes cambios laterales de "facies" y acuñaientos, de modo que es difícil establecer la estratigrafía entre sondeos con testigos y los resultados de la exploración sísmica son confusas y poco resolutivas.

En la primera explotación se ejecutaron hasta nueve sondeos mecánicos en la cerrada y collado del aliviadero (más adelante hablaremos de esto) obteniéndose, en general, admisiones de agua bajas y RQD alto con buen porcentaje de recuperación de testigo, salvo en la zona media y alta del estribo derecho, donde las pérdidas eran fuertes incluso pérdida total y aparecía mayor fracturación e indicio de bloques caídos.

Aunque en el primer informe no se detallaba demasiado, las obras de excavación de la presa, aliviadero y túnel de desvío han revelado buzamientos muy suaves pero asistemáticos (ver plano general).

En los primeros reconocimientos lo suave de estos buzamientos (6 a 9°), la escasa rigidez de las formaciones, que se acomodan de modo suave a los cambios de buzamiento, así como la abundante fracturación de diaclasado; la decompresión gravitacional en las zonas altas con fracturas; la erosión diferencial en las laderas; junto con la débil cobertura de suelo y escasa vegetación; hicieron que estos fenómenos pasasen desapercibidos excepto en las grandes fracturas de deformación gravitacional de

la margen derecha y por la orientación sub-vertical de las discontinuidades no fueron detectadas en los sondeos las grandes fracturas.

Hoy con los resultados de los reconocimientos de obra y de los realizados durante los tratamientos, estamos convencidos de que la zona está microtectonizada con fracturas profundas de apertura centimétrica o subcentimétrica, aparentes sólo en las formaciones más duras, las areniscas.

En los diagramas de isopiezas de igual admisión en kg/m.l. del primer y segundo tratamiento, que expondremos más adelante, puede confirmarse al menos una fractura o dos en la margen izquierda y varias, algunas muy profundas, en la margen derecha, pero no nos adelantemos a la exposición sistemática.

### c) Sección tipo

La sección tipo de Caspe es la de una presa de materiales sueltos, con núcleo de arcilla y espaldones de zahorra semipermeable, capaces de retener, al menos parcialmente, las presiones intersticiales, lo cual se ha tenido en cuenta en el cálculo, por lo que los taludes son suaves (1,7 × 1 abajo y 2,7 × 1 arriba). El ancho de coronación situado a cota 234, es de 8,00 y del núcleo 6,00 m., siendo su talud de agua arriba vertical y el de agua abajo de talud 0,4 × 1. Se disponen sendos filtros finos de arena clasificada y lavada que cumple la condición Sherard de que D<sub>85</sub> menor que 0,3 mm. pues la fi-

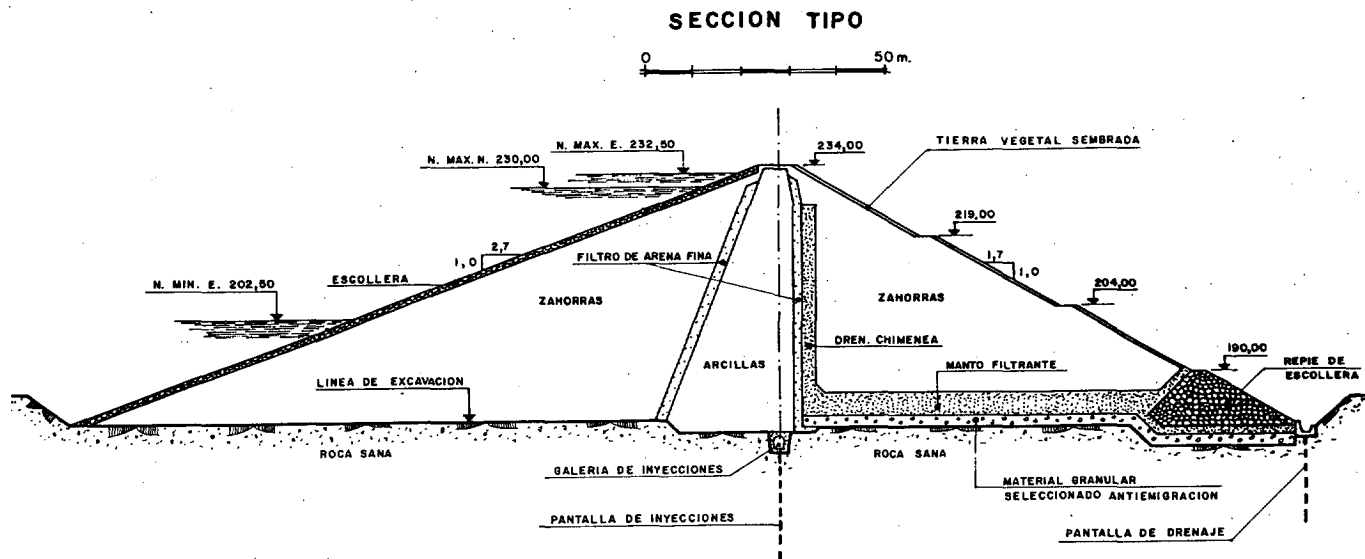


Figura 8

nura de la arcilla hace imposible cumplir que  $D_{85}$  menor que  $5 D_{15}$ ) Agua abajo, existe un dren chimenea y manto filtrante, extendiéndose éste, no sólo al cauce con 10 m. de espesor, sino a todo el fondo del amplio valle con 1,5 m., de modo que actúe, además, como dren horizontal para drenar posibles afloramientos en el talud de agua abajo, de zorra semipermeable.

Como luego veremos, esta zona de dren horizontal no se dispuso en contacto con el terreno, interponiendo unos cinco metros de zorra no procesada, con mucho fino, que debe actuar (de hecho ya ha actuado) como filtro o dispositivo de retención de la emigración de finos del cimientado. En el mismo sentido de asegurar los dispositivos antiemigración, el filtro fino se prolonga en horizontal en forma de L para proteger la zona de agua abajo del núcleo (la pantalla de impermeabilización queda relativamente cerca).

En cuanto al tratamiento de cimientado, la pantalla fue de 25 m. de profundidad con taladros cada 3,00 ubicado en el tercio de agua abajo y la pantalla de drenaje se situó, de modo atípico, en el pie de agua abajo en un canalillo que, asentado en roca sana, recoge filtraciones de cimientado, núcleo y ladera.

Como vemos, todo el diseño, no demasiado convencional, se subordinó a alargar los recorridos de las filtraciones y cortar posibles emigraciones de finos, puesto que, se temían fenómenos de erosión interna. Tendríamos que añadir que, como luego veremos, estos dispositivos han funcionado correctamente, evitando mayores daños, pero no nos anticipemos al parágrafo dedicado a "Comportamiento".

#### d) *Organo de desagüe*

Los describimos someramente, pues el aliviadero ha tenido incidencias y el desvío del río queda próximo a la zona que luego falló originando una peligrosa filtración.

El desvío de río, usado luego como desagüe de fondo, es una galería circular de diámetro 8,00 excavada a cielo abierto en la margen izquierda, que luego se cerró con los conductos de  $1,50 \times 1,00$  dotados de doble compuerta "Bureau". La excavación se hizo cuidada y con precorte, de modo que estamos seguros que no ha influido en la primer

incidencia de filtración que luego describiremos.

La toma de riegos es un túnel en carga de diámetro 2,60 m. con revestimiento armado, inyectado en relleno y cosido, que no ha presentado, hasta el momento, problemas. Se ubica en la margen izquierda en un collado alejado de la presa y es independiente por completo de ella.

El aliviadero está formado por tres vanos de 10 m. de ancho, con umbral a cota 222,50, agua a 230 y coronación a 234 m.s.n.m. El aliviadero se ubica en un amplio collado de la margen derecha, con cota inferior al máximo embalse, por lo que forma de hecho, una pequeña presa auxiliar de gravedad con 145 m. de longitud de coronación, 24 m. de altura sobre cimientado y 16 m. sobre el terreno en el canal de entrada, es decir, es una "gran presa" según nuestra instrucción.

Esta presa auxiliar se asienta en terrenos análogos a los de la presa principal, pero dada su mayor cota de cimientado, los terrenos están algo más fracturados que los de la presa propiamente dicha. En esta zona los buzamientos son algo mayores y en dirección opuesta a los de la presa, formándose entre ambos un suave anticlinal. El cimientado se inyectó con una pantalla de quince metros de profundidad con taladros a 3,00 m. Como luego veremos, también aquí han surgido problemas de caudales de crecimiento exponencial.

#### e) *Tratamientos del terreno*

Los tratamientos especialmente en la cerrada, fueron esmerados y exhaustivos, comenzando por un tratamiento del entorno de la galería perimetral, con inyección de relleno y consolidación, para impermeabilizar un cierto entorno de la galería, corrigiendo la fisuración originada por descompresión o por efecto de la excavación (que se hizo con precorte), además, por supuesto, se inyectó la pantalla prevista que hemos definido. Como tratamientos especiales, el cimientado de núcleo se saneó, rellenando fisuras y diaclasas con lechada o mortero y se regularizó su geometría con hormigón. En la margen derecha, la pantalla se prolongó a un abanico desde galería. (Ver figura 9).

Tenemos que decir que en el primer llenado las filtraciones fueron muy pequeñas, menos de dos litros segundo en total, (incluso las del núcleo y ladera) pese a lo cual, se llevó un minucioso con-



# CIMENTACION DE PRESAS EN TERRENOS TERCIARIOS EN LA CUENCA DEL EBRO

trol de filtraciones que nos permitió detectar el primer incidente rápidamente.

## f) Construcción

Durante la construcción, se profundizó algo la cimentación, añadiendo el tratamiento de relleno de fisuras que hemos indicado y fué cuando se modificó la posición del manto filtrante, vista la calidad del terreno.

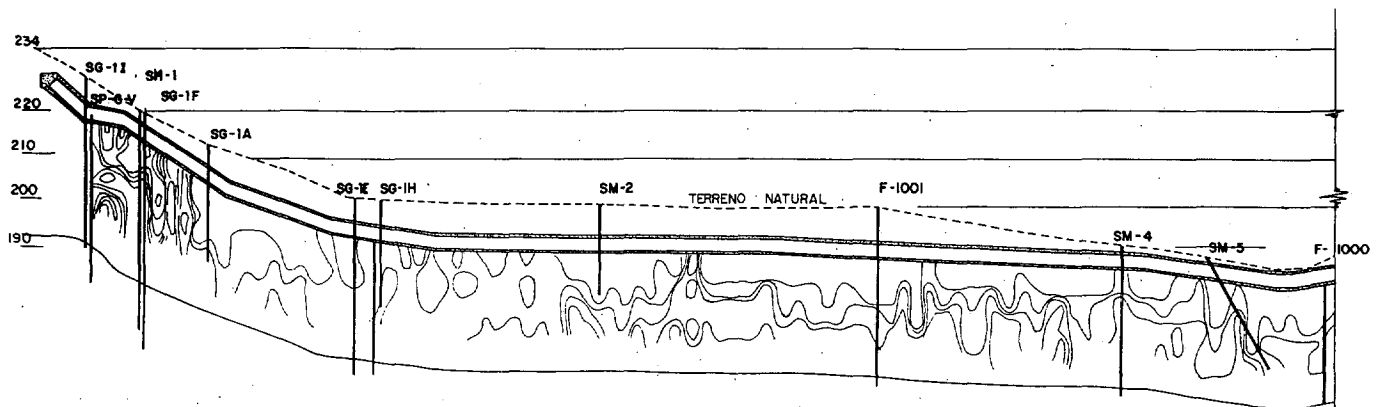
En la construcción se fueron anotando o cartografiando las distintas formaciones y las incidencias observadas. La más importante fue la aparición de dos amplias fracturas, en la zona superior de la margen derecha, que se supusieron originadas por un inicio de erosión diferencial con vuelcos de bloques. Hoy, con los resultados de los tratamientos inicial y el que está en este momento en ejecución,

sospechamos que en esta ladera pueden existir varios fenómenos superpuestos (fracturas de origen microtectónico, fisuras originadas por vuelco de bloques y decompresión gravitacional y el diacladado ordinario). Por supuesto, que en esta zona el tratamiento fue más esmerado con admisiones sensiblemente más altas (ver figura página siguiente). Además el primer fallo importante nos apareció en la margen opuesta.

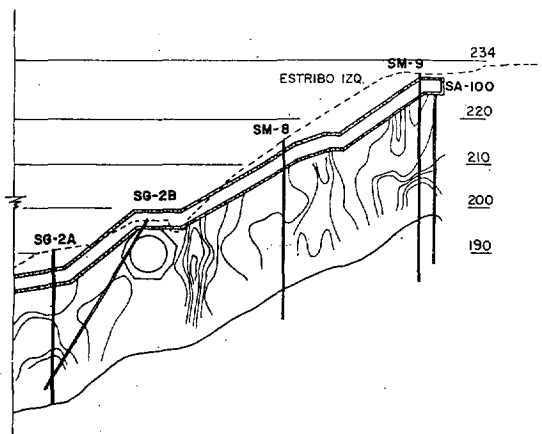
## g) Comportamiento durante el llenado

Pese a lo cuidado del diseño y esmerado tratamiento y pese al mínimo caudal inicial de filtración; los previstos problemas de disolución de yesos se han presentado mucho antes y con más gravedad de la que se preveía por los informes geológicos.

SECCION LONGITUDINAL DE LA CERRADA



SECCION LONGITUDINAL DE LA CERRADA



**LEYENDA**

	>10
	10-40
	40-80
	<80

**PRESA DE CASPE**

ISO - ADMISIONES DE LA CERRADA (CAMPAÑA 1.987)

0 25m

Figura 10

Aunque luego expondremos los incidentes acaecidos por orden cronológico, y describiendo lo sucedido, creemos útil comenzar exponiendo la etiología, evolución y tratamiento de estos fenómenos, en función de la experiencia y conclusiones teóricas sacadas de lo sucedido en estos incidentes.

Lo primero que tenemos que consignar es que cualquier caudal, por pequeño que sea, y con cualquier gradiente, pueden conducir a fenómenos de erosión interna con caudales de crecimiento exponencial. Ello está teóricamente justificado, pues si el caudal es la causa de la erosión, la velocidad de ésta será proporcional al caudal, es decir,  $d(Q)/d(t) = Q$ , lo que es lo mismo,  $Q_t = Q_0 e^{kt}$  donde  $Q_t$  y  $Q_0$  caudales inicial y en tiempo,  $t$  tiempo y  $k$  constante a nivel constante y  $e$  la base de logaritmos neperianos. Estas evoluciones se han cumplido con carácter general y, a veces, con un ajuste matemático casi perfecto. Cuando hemos tenido desembalses controlados se ha comprobado que  $K$ , constante a nivel fijo, es proporcional a la altura  $h$ , lo que está igualmente justificado pues, si  $K =$

a  $h$ ,  $Q_t = Q_0 e^{ah}$ , con lo que la velocidad de erosión a caudal fijo (pura hipótesis) sería proporcional a  $Qh$ , es decir, a la potencia del caudal de infiltración que, de este modo, emplearía su energía, no sólo en el rozamiento hidráulico, sino en el arrastre y erosión.

Digamos por último, que, con estos supuestos, se han conseguido, en desembalse en que  $d(h)/d(t)$  era constante, discriminar los incrementos del caudal en la diferencia finita atribuible al fenómeno de erosión. Ello ha permitido con distintas hipótesis  $Q/h$ , encontrar la cota aproximada de las filtraciones y facilitar su localización y tratamiento.

Hay que indicar que lo más peligroso de estos fenómenos es que la que llamamos constante  $k$ , por supuesto función de la calidad del terreno, puede cambiar de modo brusco e impredecible, desde ritmos muy bajos (doblar cada 18 meses) a ritmos de duplicar cada diez días o menos.

Después de esta exposición teórica, pasamos a examinar las incidencias surgidas en los casi tres años

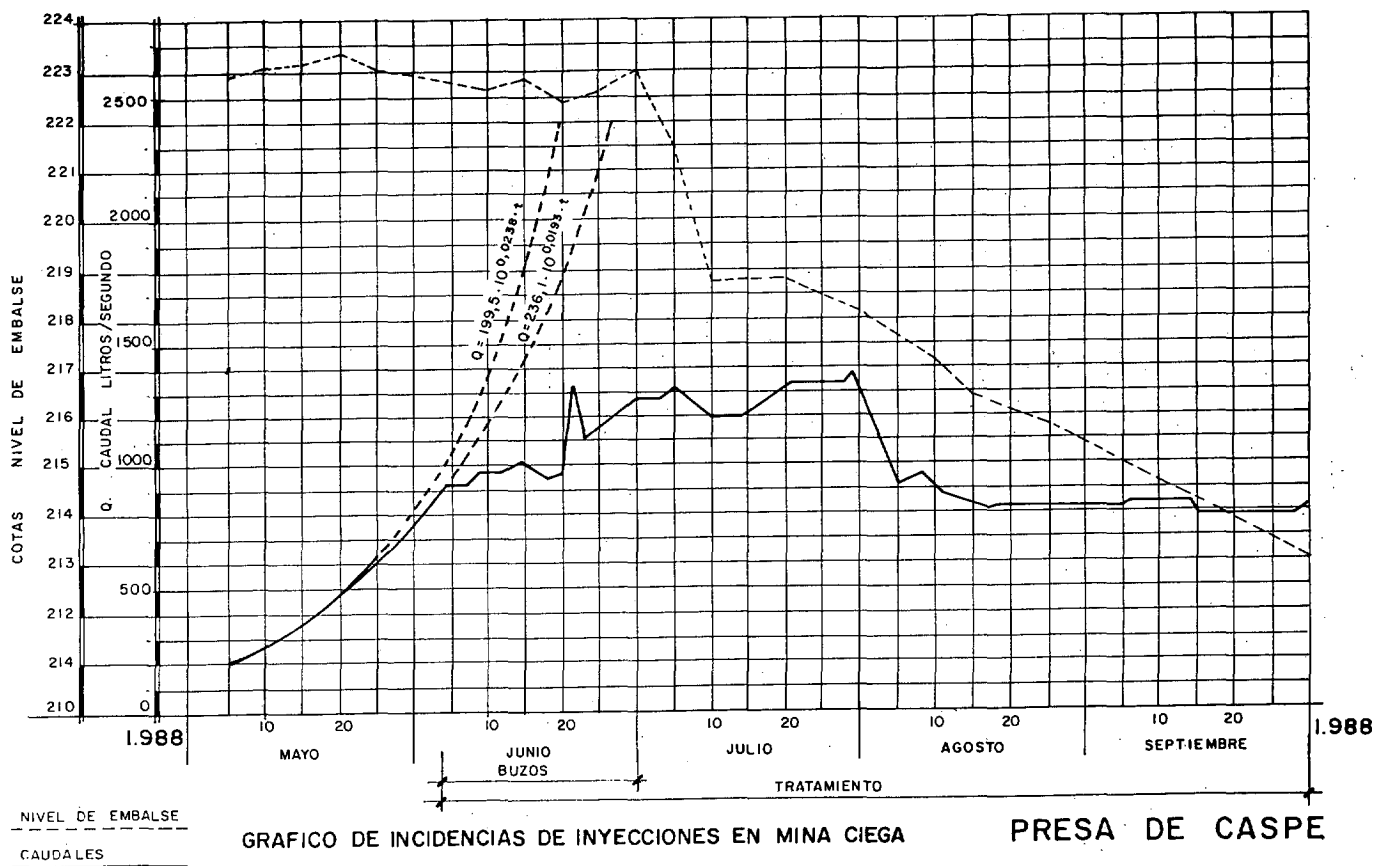


Figura 11

de pruebas de llenado.

El embalse se comienza a llenar en febrero de 1988 después de cerrar un antiguo túnel de la acequia de Civán denominado Mina Ciega y es en Mayo del mismo año, cuando se presentó la más importante incidencia precisamente en dicho túnel, cuyas características se exponen a continuación.

### Mina Ciega

En la margen izquierda y fuera del ámbito de la presa, a casi un kilómetro, existía un túnel antiguo destinado a riego de la acequia de Civán.

Este túnel se cerró con un tapón de hormigón de quince metros de longitud, después de sanear a fondo la zona descompuesta y decomprimida, inyectándose el entorno con taladros de relleno y consolidación de acuerdo con las normas usuales en estos trabajos, análogos a los usados en la toma de riegos.

Al comenzar el llenado, aparecen pequeñas filtraciones, a las que no se dio mayor importancia,

pues se suponía que aumentaban, no sólo por la subida de embalse, sino por el propio establecimiento del flujo a través del terreno, suposición que luego se reveló como errónea, pues estabilizado el nivel a cota 222 (primer nivel de parada previsto) y después de un plazo prudencial, que permitiera el establecimiento del flujo, la filtración, seguía creciendo. Fue entonces cuando se comprobó por, primera vez, que teníamos una evolución exponencial estimada en  $Q_t = 199,5 \times e^{0,0238 t}$  es decir, que a primeros de mayo ya teníamos casi 200 l/s de caudal. Ello suponía (Ver figura 11) que los dos metros cúbicos segundo (que suponíamos límite para el colapso del entorno del cierre) podrían alcanzarse en 16 de junio.

Como en aquel momento no era posible un desembalse sin perjudicar a los regadíos, se comenzó una acción de emergencia muy compleja.

El tratamiento comenzó introduciendo, por medio de buceadores y desde la boca de entrada del túnel sumergido, diferentes materias (estopa, sacos con polímeros, trapos, etc.) que arrastrados por la

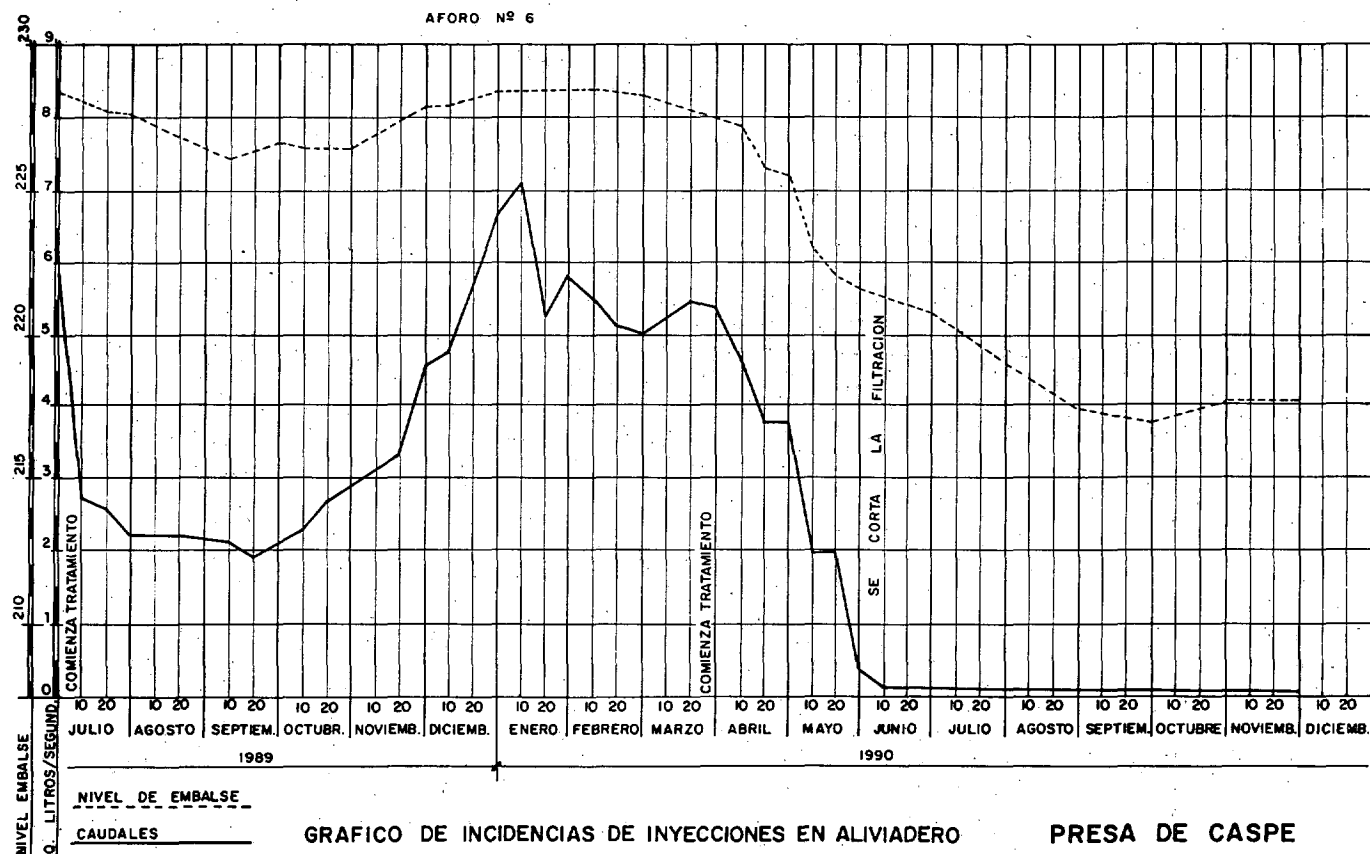


Figura 12



corriente, pudiesen cerrar las entradas de los conductos de filtración más significativos, comprobándose un primer descenso en el ritmo de subida del caudal de filtración. Al quedar el tapón de hormigón bajo el embalse y lejos de la orilla del mismo, fue necesario construir un espigón de escollera que permitió acceder a la vertical del tapón e iniciar los trabajos de consolidación del entorno, así como investigaciones de tipo geotécnico, investigaciones éstas que demostraron la existencia de una amplia zona de terreno muy fracturado hasta apenas cinco metros por encima de la zona en que se había construido el tapón de hormigón y fuera, por tanto, del alcance de las inyecciones de consolidación. Los trabajos de consolidación por inyecciones se llevaron de acuerdo con las técnicas usuales en terrenos karstificados sometidos a flujos de agua, es decir, inyectando mezclas más consistentes según las admisiones, alcanzándose toda la gama de mezclas de: Lechada fluída, lechada espesa, mortero fluído, mortero espeso, hormigón y, finalmente hormigón acompañado de sustancias obstruyentes capaces de crear cierres al mezclarse con el hormigón empleándose al mismo tiempo de materiales usados por los buceadores pero enviados por medios neumáticos en la misma tubería de bombeo del hormigón.

Cuando se comenzó la inyección (Ver figura 11) el caudal pierde su aumento exponencial y, después de un tramo de "diente de sierra" indicio de obstrucciones y destaponamiento, se reduce moderadamente el caudal y llega un momento en que casi queda estable pero con un caudal de 800 l/sg, evidentemente inadmisibles.

Después de un cierto tiempo de caudal estable, es a mediados de agosto cuando a vista de los datos de material inyectado y otros indicios, se llega a la conclusión de que el tratamiento por inyección no permite seguir reduciendo la filtración, a diferencia de lo sucedido con incidentes más graves (por ejemplo Canelles logró anular en carga de más de 50 m. filtraciones de más de cinco metros cúbicos-segundo y nosotros teníamos 0,8 m<sup>3</sup>/sg. y 20 m. de carga).

La explicación teórica, que luego se confirmaría, es que habíamos llegado a una zona de roca, tan fracturada y afectada por la filtración, que es incapaz de retener los cierres conseguidos; pues cuando se consigue cerrar un conducto la erosión abre

otros próximos a la presión del agua arrastrada el material fraguado y se fuga hacia agua abajo el material inyectado.

Visto que estábamos próximos al fin de la campaña de riegos a mediados de agosto de 1988, se suspenden los trabajos dejando que el embalse casi se vacíe por el uso de riego y, terminada la campaña de riego.

Es a primeros de noviembre cuando se terminó el vaciado del embalse y se procedió al reconocimiento de la zona de aguas arriba, donde se comprobó que las filtraciones comenzaban a más de 30 m. por arriba del cierre de hormigón, y, en parte al menos, contorneaban la zona que podíamos inyectar desde el dique de escollera, es decir, la filtración se había alejado y se abrían nuevos caminos fuera de la zona tratada contorneándola.

Después en enero de 1989, al construir un segundo cierre aguas abajo, se comprobó que una parte significativa del material inyectado había pasado hacia aguas abajo.

Queríamos destacar que todos estos inconvenientes hacen que el factor esencial para tener éxito sea iniciar los trabajos antes de que las vías de filtración hayan adquirido dimensiones subcentrimétricas o menos y conseguir que la velocidad del tratamiento sea lo suficientemente rápida como para impedir que la erosión llegue a deteriorar el terreno o contornee la zona afectada. Es decir, tenemos un problema muchísimo más grave que los conocidos fenómenos de tratamiento de formaciones kársticas.

### Aliviadero

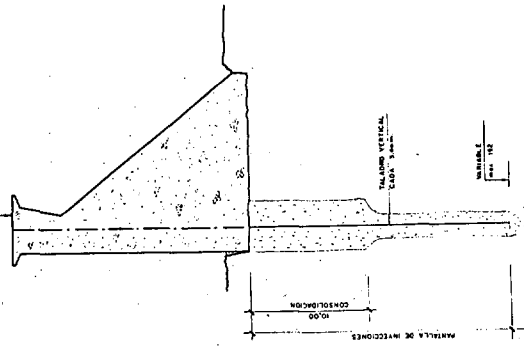
En la primera fase de llenado, hasta principios de 1989, el comportamiento de esta estructura fue correcto y satisfactorio.

Sin embargo, nada más conseguirse la siguiente etapa de llenado (cota 228) en julio de 1989, aparecen unas pequeñas filtraciones en el estribo derecho de la presa auxiliar, que son corregidas rápida y fácilmente mediante inyecciones. No obstante, a comienzos de octubre del mismo año, con el embalse en ligero descenso, la ley Q/h sufre entre los días 20 y 22 una brusca inflexión comenzando un nuevo fenómeno de erosión exponencial originado porque, otra vez, las filtraciones se han abierto paso por detrás de la zona inyectada.

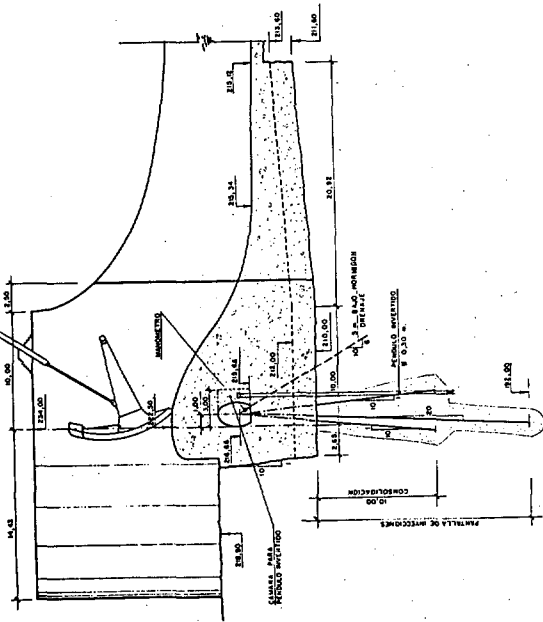


# CIMENTACION DE PRESAS EN TERRENOS TERCIARIOS EN LA CUENCA DEL EBRO

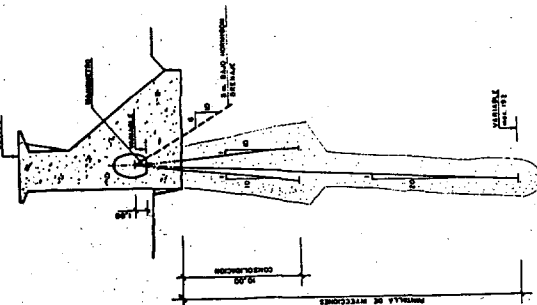
SECCION TIPO - MARGEN DERECHA  
ESCALA 1:200



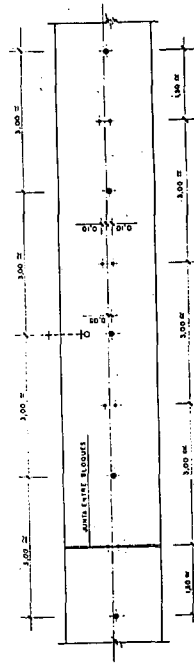
SECCION TIPO - ZONA DE AZUDES  
ESCALA 1:200



SECCION TIPO - MARGEN IZQUIERDA  
ESCALA 1:200



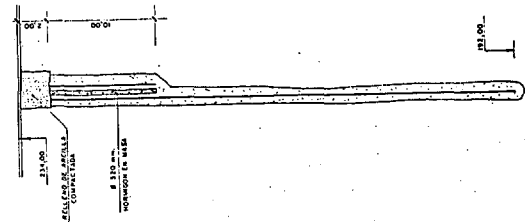
DISTRIBUCION DE TALADROS - PLANTA  
ESCALA 1:50



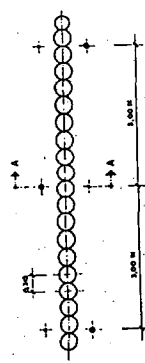
- MANTILLA A COTA +1/20 INYECCION A PRESION NORMAL
- CONSOLIDACION 10 m. BAJO CEMENTO 1/1/10 INYECCION PRESION MODERADA
- +---+---+ DRENAJE UN TALADRO POR BLOQUE - 8/10 3m. BAJO HORRISON CON MANOMETRO
- TALADRO DE INYECCION
- TALADRO DE DRENAJE - 6/10 CON MANOMETRO
- TALADRO EN HORRISON
- LOS TALADROS DOBLES DE CONSOLIDACION COMIENZAN CON LAS JUNTAS ENTRE BLOQUES. LA DISTANCIA ENTRE TALADROS 3 m. APROXIMADAMENTE

- NOTAS**
- VER DISPOSICION DE TALADROS EN PLANTA PLANO #1
  - LA PROFUNDIDAD Y AMPLITUD DE LOS TRATAMIENTOS SE RECONSIDERARA A VISTA DE LOS RESULTADOS

PANTALLA DE PILOTES - SECCION A-A  
ESCALA 1:200



PANTALLA DE PILOTES - PLANTA  
ESCALA 1:50



- Ø 330 mm. HORRISON EN MASA
- TALADROS A COTA VARIABLE EN PANTALLA DE INYECCIONES
- TALADROS DE Ø = PROFUNDIDAD COEFICIENTE MANTILLA DE PILOTES

Figura 14

Aunque estas filtraciones (de menos de 10 l/sg.) se cortan de nuevo con inyección, se decide a finales de 1989, proponer la reinyección de la zona del aliviadero.

En el momento en que teníamos tramitado el proyecto, se presenta (marzo de 1990), una grave incidencia en la presa y se decide unificar ambos tratamientos en una sola acción, comenzándose, como es lógico, las actuaciones de emergencia en la cerrada con los mismos elementos y maquinaria previstos para el proyecto del aliviadero, que se pospone (figs. 13 y 14).

En este momento con cotas de embalse bajas, la acción de corrección de aliviadero es menor urgencia y no se ha emprendido, aunque describiremos los tratamientos previstos en el proyecto general de corrección y puede verse en la figura 7.

## Cimentación de la presa

Como hemos indicado el tratamiento de la cimentación de la presa fue muy cuidado, quedando apenas dos litros segundo de caudal que para las características de la presa es excepcionalmente bajo.

Comenzando el llenado en febrero de 1988, el comportamiento de la cimentación fue correcto, si bien fueron apareciendo aumentos de caudal de evolución muy lenta, pequeñas humedades en la ladera derecha y una atenuación del efecto pantalla revelada por la auscultación de cimientos.

Por todo ello, a finales de 1989, se comenzó a estudiar la posible reinyección de la cerrada ordenando toda la documentación y antecedentes.

De toda la información recopilada y analizada se dedujo que existían dos posibles zonas de mayor riesgo que eran: 1.º) La margen derecha en la zona de estribo no inyectada aún y en la misma zona tratada. 2.º) Una zona situada en la margen izquierda, a unos 12 a 15 m. del túnel de desvío.

Pues bien, cuando aún no se había entrado a fondo en los trabajos de redacción del nuevo proyecto, con cota aproximada 226 entre 19 y 21 de marzo de 1990, el ritmo de evolución de caudales, sufre un brutal cambio en la velocidad de crecimiento, de modo que, a finales del mes de marzo, tenemos establecido una ecuación exponencial

$$Q = 4,467 e^{0,0599 t}$$

con origen en 21-3-90.

Queríamos destacar que el ritmo de progresión es más del doble de la "Mina Ciega" y que supone doblar caudal cada 10 días y que la evolución real (Ver figura 15) fue por encima de lo previsto, duplicando caudal cada semana. Como ventaja teníamos que el fenómeno se había detectado de modo inmediato y con caudales muy pequeños, además conocíamos el antecedente de la Mina Ciega, por lo que la acción de emergencia, debidamente autorizada, se emprendió de modo inmediato, si bien nos vimos obligados a un desembalse controlado hasta cota 223, con lo que la evolución se redujo a:

$$Q = 18,932 e^{0,0182 t} \text{ con origen en 16-4-90.}$$

Fue durante este desembalse controlado a razón de 0,50 m./día con  $h$  — constante, cuando se realizaron los análisis matemáticos que nos condujeron a establecer que  $k = a \times h$  y, por consiguiente  $Q = Q_{0e} aht$ .

Por un detenido análisis de la información se supuso la filtración a unos 15 m. del túnel del D.F y unos cinco metros bajo galería de inyecciones. Como detalle de lo acertado de la localización, diremos que al tercer taladro se había localizado la más importante vía de filtración y en pocos días después de iniciado el tratamiento la curva de caudales (Ver figura 15) se acusa una inflexión en la línea  $Q/t$  que va bajando con fuertes "dientes de Sierra" hasta que entre 31-5 y 4-6 se consigue cortar definitivamente la filtración, que se reduce a 0,300 l/sg., que suponemos proceden del resto de la cimentación.

Creemos que es muy interesante comparar el gráfico de evolución de este incidente con el de la Mina Ciega, pues, si bien en ambos desde que se inicia el tratamiento disminuye el caudal, en la Mina Ciega, llegamos a una horizontal de 800 l/s., de la que no podemos bajar la filtración, mientras que, en menor tiempo, en la margen izquierda la reducimos de casi 30 a 0,3 l/s.

En este segundo incidente el mayor ritmo fue compensado con una actuación mucho más rápida.

En cuanto al tratamiento de emergencia, muy avanzado en el momento de redactar este artículo, su esquema puede verse en la figura 16, formándose por dos series de abanicos de dos taladros, a 15 y 30º hacia agua arriba, siendo una fase normal sen-







que han estado sometidas a fuerte gradiente.

Si examinamos la línea Q/t vemos que la reacción del caudal o la inyección inmediata (8-5-90) existiendo un período de oscilaciones muy bruscas en "diente de sierra" que demuestran fenómenos de cierre y destaponamiento de fracturas por más que entre 5 y 11 de junio se inició un descenso sostenido que lleva a reducir el caudal a los ya citados 0,30 l/s., que suponemos provienen de otras zonas no tratadas.

Antes de exponer el resto del tratamiento, diseñado y en ejecución actualmente, queríamos hacer constar que el tratamiento ha respondido de modo eficaz, debido, fundamentalmente a la rapidez de reacción y a tener ya estudiado el comportamiento de la cerrada.

Como podemos ver en la figura 16, nos proponemos profundizar la pantalla especialmente en los estribos, con abanicos de dos y tres taladros en plano vertical y 15 y 30° hacia agua arriba en las zonas de dos taladros y vertical 15 y 30° en los de tres, no descartándose la posibilidad de ejecutar taladros intercalados entre las filas primera y segunda caso necesario.

## Situación actual

Es muy importante comparar las líneas de iso admisión del primer tratamiento (figura 9 y páginas siguientes) con los de la primera pasada de taladros de la fase actual, pues en la margen derecha pasamos de admisiones máximas a 150 ó 200 kgs./m.l. a más de mil y ello sin segundas y terceras filas. Tenemos que destacar que en estas zonas de admisiones grandes se han usado presiones muy parecidas (6 a 7 kgs/cm<sup>2</sup>) que en las segundas filas del estribo izquierdo e incluso menores que el primer tratamiento (7 kg/cm<sup>2</sup>).

Ello supone que, en los dos años de funcionamiento el terreno se ha degradado en sus condiciones geotécnicas de modo exagerado, pese a que nunca existieran filtraciones significativas.

En cuanto a la forma de las líneas de iso-admisión, especialmente las del último tratamiento, parecen indicar que existen zonas muy limitadas en franjas verticales profundas de admisiones muy altas y a profundidades ocasionalmente por debajo de la cota del río. Ello nos hace sospechar (ya se ha comen-

tado antes) que pueden existir fracturas de origen micro tectónico y que los cambios de buzamiento registrados tienen el mismo origen.

Como vemos en el plano de admisiones de la figura 18 (correspondiente a una inyección parcial en la ladera derecha y definitiva en el fondo del valle) las grandes admisiones se localizan de modo preferente, en los estribos incluso fuera del asiento de la presa, lo que demuestra que también la compresión y los fenómenos de tensión gravitacional influyen en la susceptibilidad a la erosión, pero mientras que el estribo izquierdo da muchas fisuras pequeñas y profundas, en el derecho hay una muy importante en la zona en que se localizaron las diaclasas y una zona muy amplia en la propia ladera. Interpretamos que en la ladera izquierda predominan los fenómenos de decompresión de ladera y en la derecha la de una fisura de origen tectónico y los de asientos de bloques por erosión diferencial.

Queríamos terminar destacando que los datos figurados en este artículo corresponden a una fase de tratamiento parcial (el plan de emergencia), por lo que faltan segundas y terceras filas de taladro en la margen derecha y, quizá, taladros intermedios, por lo que las conclusiones son provisionales.

## PRECEPTIVAS PARA EL FUTURO Y CONCLUSIONES

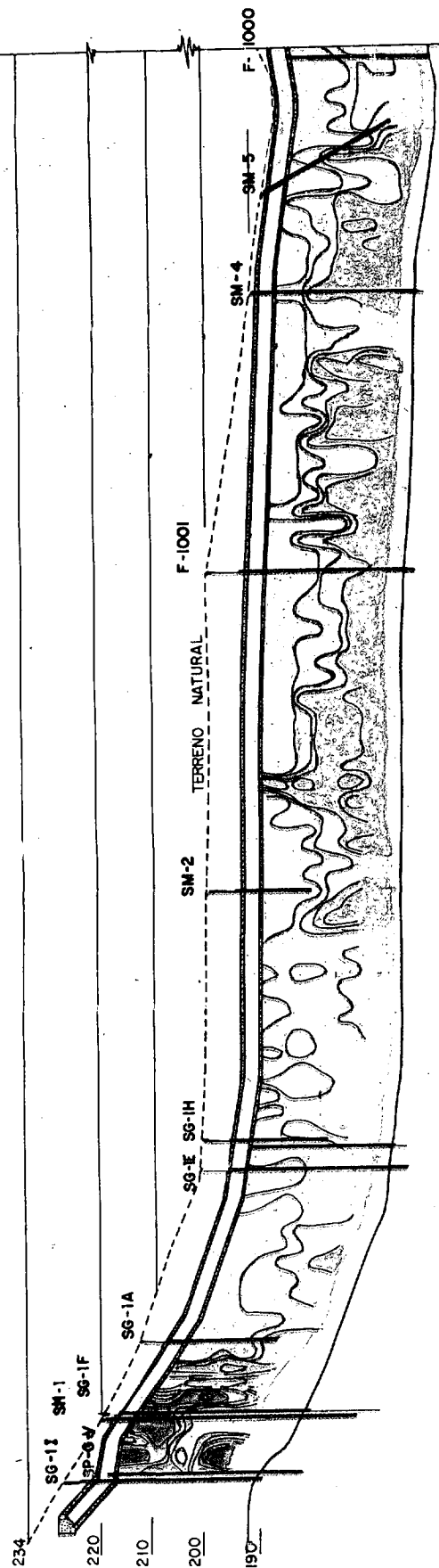
Para el futuro inmediato, una vez ejecutados los trabajos de inyección en curso, ampliándolos y reforzándolos si fuera preciso, se aspira a nular o dejar en menos de 0,5 l/s. la filtración total a embalse lleno.

Como es obvio que en cada fase de tratamiento no podemos inyectar las zonas no disueltas, damos por supuesto que se irán necesitando tratamientos periódicos de reinyección, que esperamos vayan siendo cada vez más espaciados en el tiempo y con menores admisiones, llegándose a una situación en que se consiga estabilizar el fenómeno.

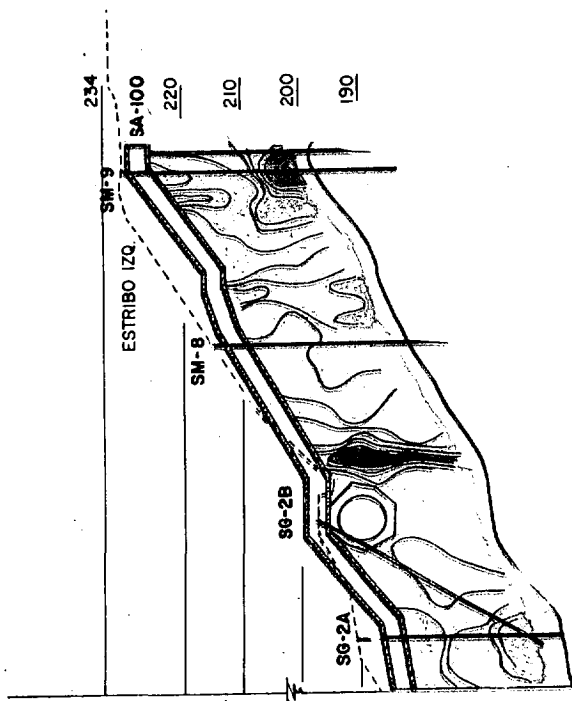
Como será necesario detectar los fenómenos con rapidez, se refuerza la auscultación con un dispositivo muy sencillo, dos piezómetros abiertos cada 20 m.; el de agua arriba con 15° de 25 m. de profundidad y con tubo-manguito y el de agua abajo con 15° en sentido inverso de 10 m. de profundidad con tubo ranurado ordinario. Ambos piezó-



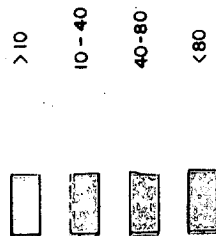
SECCION LONGITUDINAL DE LA CERRADA  
ESCALA 1 : 500



SECCION LONGITUDINAL DE LA CERRADA  
ESCALA 1 : 500



LEYENDA



PRESA DE CASPE

ISO - ADMISIONES DE LA CERRADA (CAMPAÑA 1.987)

ESCALA 1:500



Figura 18

metros llevarán llave de cierre y manómetro, manteniéndose cerrados y midiendo las presiones periódicamente. Caso de aumentar ésta de modo anormal, se comprobará si hay filtración abriendo la llave y en cuanto el caudal sea significativo (pongamos 0,2 l/sg.) se procederá a reinyectar, usando el tubo manguito con recuperación, extendiendo la inyección al entorno del tubo con métodos convencionales. Es decir, la reinyección se hará de modo inmediato y localizado, salvo que se precise otra cosa, extendiendo el plantamiento al aliviadero.

Por supuesto que se llevará un control cuidado de las filtraciones totales por si los fenómenos de filtración apareciesen entre dos piezómetros o fuera de la zona auscultada y se reforzarán los piezómetros de cuerda vibrante de la cimentación.

Además se implantarán piezómetros de cuerda vibrante en cemento y piezómetros abiertos en ambos estribos, especialmente el izquierdo, cuyos niveles permitan detectar circulaciones en estribos

fuera del asiento de la presa los últimos, mientras que los primeros (PVC) comprobarían la posible atenuación del efecto pantalla.

Como conclusión general, sacaríamos la de que en estos terrenos (Mioceno de facies continental con areniscas y margas con yeso) son especialmente conflictivos y que cualquier actuación futura deberá tener en cuenta los fenómenos de disolución y arrastre de yesos, la casi segura existencia de fenómenos de aumento exponencial, a veces rápido, de los caudales y la complejidad de los fenómenos de fracturación de estos terrenos, por lo que los tratamientos iniciales serán exhaustivos con las máximas presiones admisibles, empleando varias filas de taladros..., etc. Podría, incluso, pensarse en la ejecución de pantallas continuas si se sospecha que los métodos convencionales no dieran resultado.

En definitiva debemos sacar lecciones de los incidentes afortunadamente superados que hemos expuesto.