

IMPERMEABILIZACION DEL MACIZO KARSTICO DE CANELLES

Dr. Ing. C. C. P. G. MILLET **VOCAL**

Dr. Ing. C. C. P. A. ALVAREZ **VOCAL**

1. INTRODUCCION

La presa de Canelles, bóveda de doble curvatura y 151 m de altura, fue construida por la Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana, S. A. (ENHER), como pieza fundamental del salto del mismo nombre.

Este salto es uno de los aprovechamientos hidroeléctricos que utilizan completamente el río Noguera Ribagorzana, en el nordeste de España, cuyas aguas drenan la vertiente sur del Pirineo y van a parar al río Ebro.

El embalse, con 678 Hm³ de capacidad, regula completamente el río, cuya aportación anual media es de unos 1.000 Hm³ (caudal medio 31 m³/seg.). Próxima al estribo izquierdo de la presa, en construcción subterránea, está la central hidroeléctrica, cuya potencia es de 107.000 kW.

La presa está ubicada en un cañón labrado por el río en un macizo constituido por calizas masivas con buzamiento hacia agua arriba. Conscientes de los problemas que pudieran derivarse de la naturaleza calcárea del macizo, pero, al mismo tiempo, teniendo en cuenta las grandes ventajas inherentes a crear en Canelles un embalse de regulación total, se decidió construir la presa. Esta se situó próxima a la salida del cañón, con idea de acercarse a un estrato de caliza margosa, llamado en obra "Capa Negra", que se confiaba sería impermeable. Con dicho paquete se enlazó una pantalla de inyecciones, alcanzando unos 70 m de profundidad bajo la presa.

Sin embargo, las condiciones de impermeabilidad de la "Capa Negra" no resultaron como se presumía, y ya en el primer llenado del embalse, al alcanzar el agua la cota 400 (25 m por encima del cauce del río), aparecieron filtraciones importantes en la ladera izquierda precisamente por debajo del citado estrato de caliza margosa, que era atravesado por el agua procedente del embalse.

Se realizaron minuciosos estudios e investigaciones para tratar de localizar los pasos del agua a través de los estratos que se habían supuesto impermeables. Con este objeto se perforaron galerías y sondeos de reconocimiento, pensando que los pasos de agua estarían muy localizados y en conexión con las diaclasas que dan lugar a amplias cavernas en otros estratos del macizo.

Simultáneamente, y con las debidas precauciones, se fue elevando el nivel del embalse hasta poner en servicio la central hidroeléctrica, pero manteniéndolo por debajo de la cota 465 (el máximo embalse normal previsto está a la cota 506). Entre dicho límite y el nivel mínimo de explotación del salto quedaba suficiente margen para un funcionamiento satisfactorio de la central. Consecuencia de la mayor carga (hasta 95 m de agua sobre el lecho del río), las filtraciones superaban los 6 m³/seg.

Se trató de regenerar e impermeabilizar sistemáticamente la "Capa Negra", y para ello se perforó una galería horizontal a lo largo del estrato margoso, y desde ella sondeos hacia arriba y hacia abajo, según la dirección de máxima pendiente del estrato. Aprovechando períodos en que se pudo vaciar el embalse, se inyectaron los taladros perforados, y se consiguieron algunas mejoras, pero se vio que, aparte de la dificultad que entrañaba la impermeabilización de la Capa Negra (su espesor es solamente 20 m), existían también filtraciones abundantes que llegaban por debajo de ella; éstas no se podían cortar sin poner en peligro la estabilidad del macizo rocoso, que quedaría sometido a la acción de la carga hidrostática.

Como consecuencia de lo expuesto, se decidió abandonar los trabajos y proceder a nuevos y exhaustivos estudios, para llegar al máximo conocimiento posible del problema, antes de acometer un nuevo programa de tratamiento.

Contando con el asesoramiento de los geólogos D. Clemente Sáenz y D. Federico Macau, se realizaron ensayos con trazadores radiactivos, tratando de determinar los caminos de circulación de agua, y se perforó una galería que se desarrolló próxima al embalse para conocer el interior del macizo, en su zona por donde se presumía existían las entradas del agua. Al mismo tiempo se ejecutaron prospecciones sísmicas y eléctricas y ensayos de inyección, con el fin de determinar probables consumos por metro cuadrado de pantalla.

Con estos trabajos, y teniendo en cuenta la experiencia de las últimas pantallas de inyecciones realizadas en diversas naciones, y en particular en Yugoslavia, donde la gran abundancia de terrenos cársticos ha obligado a extensos tratamientos de impermeabilización, se llegó a la conclusión de que podría resolverse el problema de

4

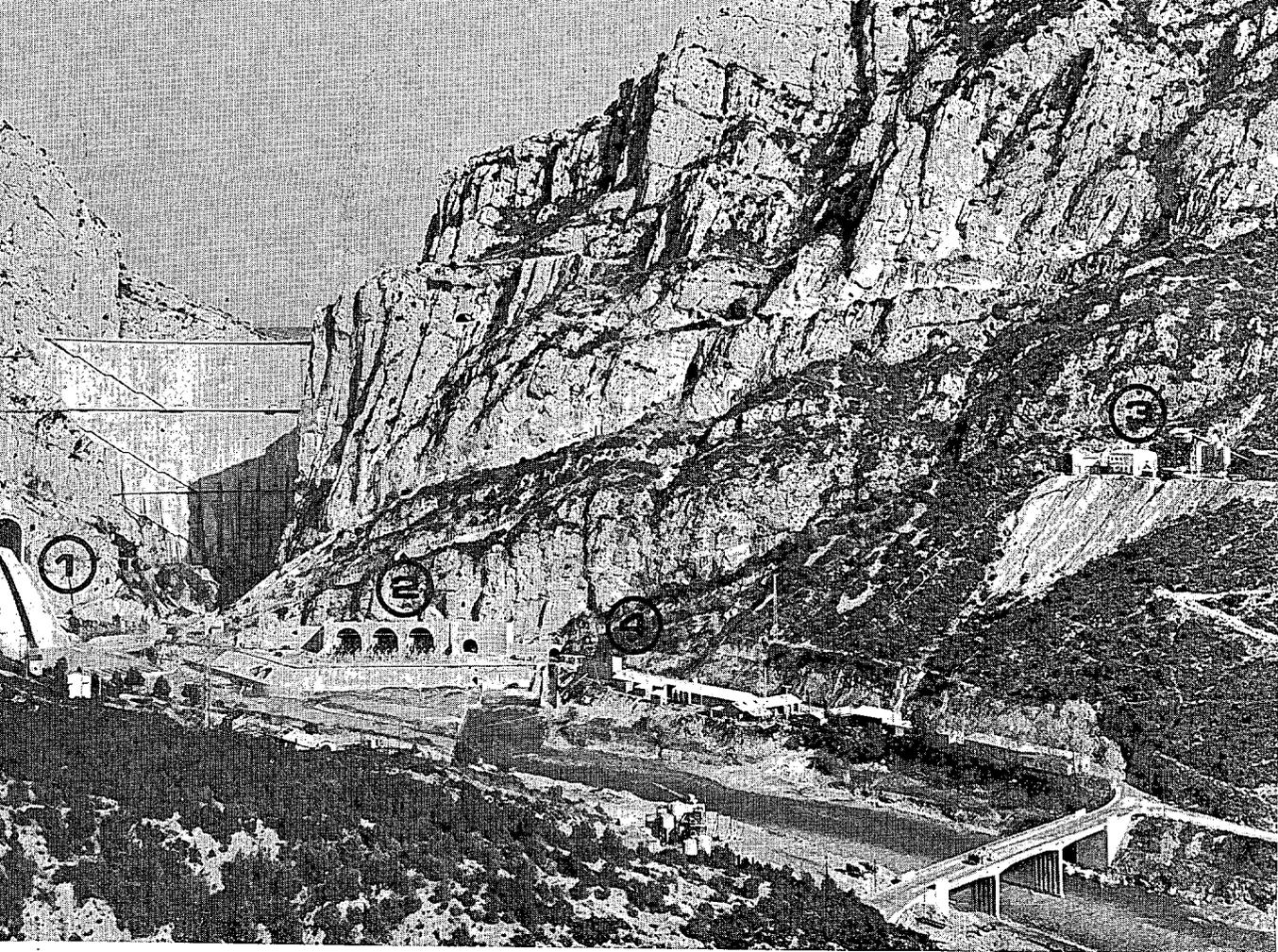


Fig. 1.—Vista general de presa y estribo izquierdo: 1, aliviadero; 2, parque; 3, entrada a la galería 450 y central de inyección; 4, entrada a la galería 380.

las filtraciones, creando un velo de inyecciones en el interior del macizo, agua arriba de los primeros tratamientos.

Para colaborar con los servicios de ingeniería civil de ENHER, en la decisión y proyecto de la pantalla de impermeabilización, en mayo de 1970 se convocó un concurso entre varios "consulting" con experiencia en la problemática de presas y tratamientos relacionados con ellas, decidiéndose fuese el equipo de estudios hidráulicos de AUXINI (hoy día integrado en EDES) quienes realizaran dicha colaboración, contándose también con el asesoramiento del ingeniero yugoslavo B. Pavlin.

El presente artículo describe la geología del macizo tratado con la pantalla, los factores que condicionaron su proyecto, así como las características principales del mismo y el resumen de los trabajos que se están realizando, así como de los resultados que ya han podido experimentarse.

Un avance del tema se dio en el Congreso de Montreal, en la discusión oral de la Q-38 (páginas 607 y 608 del tomo VI de dicho Congreso).

2. GEOLOGIA Y KARSTICIDAD DEL MACIZO

2.1. Tectónica y estratigrafía.

La presa de Canelles está ubicada en el flanco de un gran anticlinal cuyo eje, concordante con la orientación general de la cadena pirenaica, presenta la dirección NW.-SE.

El eje de dicho anticlinal queda a poca distancia río abajo y deja visible el Keuper, con yesos y ofitas, consecuencia de un movimiento diapírico, íntimamente ligado con el anticlinal.

Agua arriba de la presa comienza un sinclinal suave, quedando en el embalse la parte más baja del mismo.

Como consecuencia de estos plegamientos en el cañón donde está ubicada la presa, la estratificación tiene un buzamiento hacia agua arriba, variable entre 45° y 30° según puede verse en la figura 3.

Inmediatamente encima del Keuper hay al descubierto calizas jurásicas sobre las cuales reposa la serie

estratigráfica, representada en la figura 3. Los terrenos que afectan el mecanismo de las filtraciones y a los trabajos para su corrección corresponden al Cretácico.

En la región de Canelles, el Cretácico Inferior es de facies continental y está constituido por margas y areniscas margosas con potencia suficiente para presentar una barrera continua y total al paso del agua, e independizar completamente otras capas permeables existentes a niveles más bajos.

Las referidas margas son designadas normalmente en la obra con el nombre de "margas hondas". Corresponden sin duda al Wealdense, y sobre ellas existen areniscas, posiblemente del Albense, con una capa muy característica por su color alternante rojo y amarillo, que en la obra es conocida como "bandera española".

El paso de Cretácico Inferior al Superior coincide con el comienzo de una transgresión. Los niveles inferiores indican profundidades limitadas, pues están constituidos por calizas arenosas. Sobre ellos, tras una capa de caliza margosa, existen calizas francas con mayor potencia, y después la llamada "Capa Negra", formada por calizas margosas de unos 20 m de espesor, que ha sido calificada por algunos geólogos como del Turonense.

En el período Senonense se produce también aquí la transgresión máxima; existen calizas masivas con más de 200 m de potencia y con algunas capas de margas intercaladas. Estas margas, de poco espesor, quedan interrumpidas por las fracturas, por lo cual prácticamente no han supuesto ningún entorpecimiento al fenómeno de karstificación, desarrollado intensamente en los estratos senonenses. Por debajo de ellos, la "Capa Negra" tampoco ha constituido una barrera eficaz al avance de las disoluciones; rota en bastantes sitios, ha permitido que las calizas inmediatamente subyacentes están bastante afectadas por el proceso kárstico.

La regresión del final del Senonense dio lugar a estratos de areniscas y alternancias de calizas margosas con areniscas, que, indudablemente garumnenses, corresponden a una facies continental. Siendo de unos 70 m el espesor de la serie completa, en las zonas en que no han sufrido erosión constituyen un revestimiento suficientemente impermeable, pero el embalse moja extensa superficie en que los paquetes garumnense han desaparecido total o parcialmente y, por consiguiente, no queda impedido el paso del agua a las calizas karstificadas.

El estudio geológico completo y detallado de la zona de Canelles, el cual nos sirvió de base para proyectar la pantalla de inyecciones, fue realizado por el profesor D. Clemente Sáenz Ridruejo.

2.2. *Aptitud para la karstificación.*

Tratando de determinar si existen paquetes más susceptibles de experimentar disoluciones y en los que, por tanto, fuese más probable la existencia de conductos

kársticos, se encomendó al Centro de Estudios Hidrográficos el estudio de la aptitud a la karstificación en los distintos estratos de Canelles.

El trabajo consistió fundamentalmente en el examen micropetrográfico de distintas muestras de roca, pues se sabe que la solubilidad de una caliza depende del tamaño y disposición de los cristales de carbonatos, así como de la presencia de minerales insolubles.

Los resultados confirmaron lo que se podía apreciar en los reconocimientos directos, es decir, que las capas de caliza margosa, o con abundante proporción de sílice, son muy poco sensibles al proceso de disolución, mientras que todos los estratos de caliza masiva presentan una karsticidad elevada y apenas existen diferencias entre sus distintos niveles.

2.3. *Accidentes y litoclasas.*

En un sistema kárstico influyen decisivamente los esfuerzos tectónicos a que haya estado sometido el macizo rocoso. Las fracturas son caminos de paso del agua y van ensanchándose con el proceso de disolución, por lo cual suele acentuarse la karstificación allí donde las litoclasas son más frecuentes e importantes. En cambio, una falla puede servir de barrera al avance de las disoluciones si pone zonas impermeables en contacto con las permeables.

Teniendo en cuenta estos hechos, los estudios del terreno contaron, entre otros objetivos, la determinación sistemática de los accidentes y litoclasas existentes en el macizo.

Cuando se abordó el proyecto de la pantalla de inyecciones, se pensaba en la existencia de una banda de terreno mucho más fracturada y karstificada, por la cual pudieran pasar gran parte de las filtraciones. Tal hipótesis se apoyaba en dos hechos:

- Las dos cuevas conocidas, Cueva Negra y Cueva de la Tortuga, están casi en coincidencia una con otra, aunque a cotas muy distintas, y se desarrollan en sentido del sistema principal de litoclasas.
- Las pruebas con isótopos radiactivos, de las que hablamos en otro apartado, revelaron dos zonas con mayor velocidad de filtración, y una de ellas coincidía con la banda en que se encuentran las cuevas.

Por otra parte, algunos geólogos habían señalado la existencia de fallas importantes cortando el macizo de la ladera izquierda, y se esperaba que una de ellas marcaría un límite del cual no sería necesario pasar con la pantalla de impermeabilización.

Con la pretensión de confirmar o rechazar las hipótesis indicadas, se acometió el reconocimiento sistemático de las litoclasas y fracturas existentes, examinando si su frecuencia es mayor en la banda de las cuevas.

No encontrando características verdaderamente diferenciales, se decidió la pantalla considerando que el macizo calizo pudiera ser permeable en toda su extensión, y se adoptó el trazado que se describe más adelante. Ahora, habiendo completado el estudio de accidentes y litoclasas mediante observaciones en las galerías y los sondeos, se ha podido determinar que:

- a) En la zona que queda desde el estribo izquierdo de la presa hasta unos 600 m hacia el interior del macizo, no existe ninguna falla de magnitud apreciable.
- b) Existen zonas de mayor fracturación, una situada a unos 50-100 m de la presa y otra próxima a las cuevas, pero ninguna de ellas constituye una banda sistemática y continua que se extienda a las distintas cotas en que están las galerías.

Respecto a la conclusión b), es interesante señalar que si la galería superior, de las utilizadas para los trabajos de inyección, hubiese estado unos metros más alta, no se hubiese visto en ella ningún indicio revelador del cruce con la Cueva Negra, pues ésta se cierra en su techo y no hay diaclasas importantes en prolongación de ella.

No se puede decir que ciertas partes del macizo sean permeables por karstificación y el resto resulte impermeable a efectos prácticos; toda la masa del macizo explorado y tratado presenta, con mayor o menor intensidad, los efectos de la karstificación, y las zonas más fracturadas tienen una distribución un tanto aleatoria.

Las cuevas se han formado a favor de las intersecciones de dos sistemas de litoclasas, que, por ejemplo, para la Cueva Negra son el sistema principal y el sistema E-W.

Como resultado de todos los reconocimientos directos en el terreno, se determinaron las direcciones más probables y las frecuencias de los distintos sistemas de discontinuidades, que son las siguientes:

Estratificación:

Tiene una dirección que varía entre N. 47° W. y N. 55° W., aumentando en general el ángulo con el Norte a medida que se avanza hacia el W.

El buzamiento crece hacia agua abajo, pudiendo tomarse como valor medio el de 43° NE., en la zona en que apoya la presa.

Sistema de diaclasas verticales:

Por su frecuencia, apertura e importancia, son los principales accidentes que tiene el macizo. Tiene una orientación variable entre N. 45° E. y N. 50° E. y buzamiento desde 80° NW. hasta la vertical.

Correspondientes a las direcciones indicadas, existen diaclasas importantes que presentan disoluciones, y unas veces están huecas, y otras están rellenas de "terra rosa", o contienen estalactitas. En la figura 1, fotografía de conjunto del macizo tratado, se aprecian claramente estas diaclasas.

Sistema Norte-Sur:

Son diaclasas cuya apertura no pasa, en general, del centímetro, aunque en el estribo izquierdo, y con disposición muy poco favorable para la estabilidad de las zonas altas, existe una diaclasa de este sistema con ancho notable y relleno de arcilla.

La orientación varía entre N. 2° W. y N. 6° W. (de ahí el nombre de N.-S.) y el buzamiento entre 56° W. y 68° W. La frecuencia está comprendida entre 25 y 30 m.

Sistema Este-Oeste:

Se parece al Norte-Sur en cuanto a ser de apertura pequeña y frecuencia variable también entre 25 y 30 m. Tiene una orientación bastante constante N. 85° E. y un ángulo de buzamiento que varía de 45° S. en el estribo izquierdo, a 65° S. en el derecho.

Sistema de dovelamiento:

Con orientación N. 47° a 53° W. y buzamiento 47° SW., presenta una frecuencia comprendida entre 10 a 15 m. Es más acusado al exterior del macizo, donde ha dado origen a algunas simas importantes.

2.4. Estudio del mecanismo de filtración mediante trazadores radiactivos.

Tratando de investigar el mecanismo de las filtraciones, se encomendó a técnicos de la Junta de Energía Nuclear la realización de una serie de ensayos con isótopos radiactivos, empleados como trazadores, para así obtener datos relativos al movimiento del agua en el interior del macizo calcáreo.

Una primera investigación tuvo como objetivo determinar si las surgencias que existían pudieran tener otra procedencia que la del embalse, basándose para ello en mediciones del porcentaje de tritio contenido en el agua. Si la concentración de tritio en un agua subterránea es diferente de la que tienen las aguas superficiales, se deduce que aquélla ha permanecido suficiente tiempo aislada de la atmósfera y, en teoría, puede determinarse su "edad aparente", es decir, el número de años que lleva bajo tierra.

De acuerdo con las ideas anteriores, se midió la "edad aparente" del agua del embalse y de las diferentes surgencias. La conclusión fue que tenían la misma

edad del embalse todas las surgencias excepto la designada con el número 16, cuya edad se evaluó en ocho años (fig. 2).

Se trató también de determinar el esquema de las principales circulaciones de filtración. Para ello se depositaba cierta cantidad de isótopo radiactivo a cota más baja que el nivel del embalse en cada uno de los diferentes sondeos que se perforaron siguiendo la proximidad de la orilla, y se medía como variaba a lo largo del tiempo la concentración de isótopo en las distintas surgencias (fig. 2).

Como trazador radiactivo se utilizó bromo-82, en forma de bromuro amónico. Su presencia y concentración en muestras de agua, tomadas cada hora en las distintas surgencias, se determinaba mediante un contador de centelleo de yoduro sódico activado con talio. Se pueden medir concentraciones muy bajas, hasta de 0,02 (MC)/m³, es decir, se detectaría la concentración resultante de diluir 1 curio en 50 Hm³ de agua.

La tabla adjunta recoge las horas que transcurrieron desde que se vertió el isótopo en los distintos sondeos, hasta que empezó a manifestarse en cada una de las surgencias:

Surgencia	Isótopo vertido en el sondeo						
	6A	8A	9A	14A	16A	18A	20A
1		no	no	no	0,9		
2		no	no	no			
3	32	0,6	11,2	10,6	8,4		
4	29	0,8	18,6	19,6	14,0	no	no
5	28	0,9	30,0	28,0	22,0		
6		2,1	4,1	6,4	1,6		
8	8	1,8	4,0	5,6	1,5	no	no
11	19	1,4	3,7	4,1	1,5	no	no
12			no				
13			no				no
14		2,9	4,4	7,4	2,0	no	
15	23	2,5	4,6	7,8	2,0	no	no
16	no	no	no	no			no

Se observa que vertiendo isótopo en los sondeos 18A y 20A no se registraron vestigios del mismo en ninguna de las surgencias en que se tomaron muestras (indicadas con No en la tabla), aunque la observación se continuó durante más de siete días. Por tanto, o no existe ninguna comunicación entre dichos sondeos y las distintas surgencias reconocibles, o si existe es a través de caminos que imponen al agua un recorrido de más de siete días de duración.

En cambio, el sondeo 16A queda directamente comunicado con casi todos los puntos de surgencia del agua y, en especial, con el número 1 lo hace de modo que resulta una velocidad media de circulación igual a 10 m/min., valor elevado para lo que suele ser normal.

La surgencia número 16 no se ve afectada por los trazadores depositados en los distintos sondeos, lo que concuerda con la determinación de edad aparente del agua, que para la surgencia número 16 resultó de ocho años, es decir, parece que este agua procede de la montaña y no del embalse.

Actualmente, después de los sondeos e inyecciones que se llevan realizados, puede afirmarse que el sistema de conductos kársticos no está localizado en unas zonas, sino que afecta a casi todo el macizo y también a los estratos situados por debajo de la Capa Negra. Además, agua abajo de esta Capa Negra existe karstificación en sentido transversal al sistema principal de diaclasas, comunicando entre sí las distintas surgencias.

3. ANALISIS DE SOLUCIONES

3.1. Ideas generales.

Las características y circunstancias del macizo, a través del cual se producen las filtraciones (han sido expuestas en el capítulo anterior), condicionan las soluciones que pueden adoptarse para cortar dichas filtraciones.

Cualquiera que sea la solución a seguir, ésta habrá de crear un dispositivo de cierre en las zonas karstificadas o permeables, enlazándolo con las partes impermeables de modo que no queden sitios por donde pueda escapar el agua del embalse.

No se trata de conseguir una impermeabilidad completa y total, esto es, que sea cero el caudal filtrado; bastará realizar el tratamiento de impermeabilización hasta un cierto grado en que el beneficio que se obtenga del agua que se evita filtre, y que, por tanto, queda en el embalse, sea menor que el coste necesario para evitar esa filtración.

Pero ha de satisfacerse una condición de importancia decisiva: nos referimos a la necesidad de que las condiciones de percolación se mantengan estables, es decir, que no puedan producirse disoluciones con degeneración progresiva de modo que, consiguiendo el tratamiento de corrección reducir a un nivel aceptable las filtraciones, éstas vayan después aumentando a lo largo del tiempo.

Según lo expuesto anteriormente, el dispositivo de estanqueidad habría de apoyarse, bien en las "margas hondas" pertenecientes al Wealdense, o bien en las capas superficiales del Garumense. Como podrían resultar permeables todos los estratos de Senonense Marino, y esto para profundidades y distancias de la presa importantes; se vio que la solución basada en el enlace con las capas del Wealdense (es la que se construye) requeriría trabajo y coste nada despreciables. Por ello se decidió estudiar las posibles soluciones enlazadas

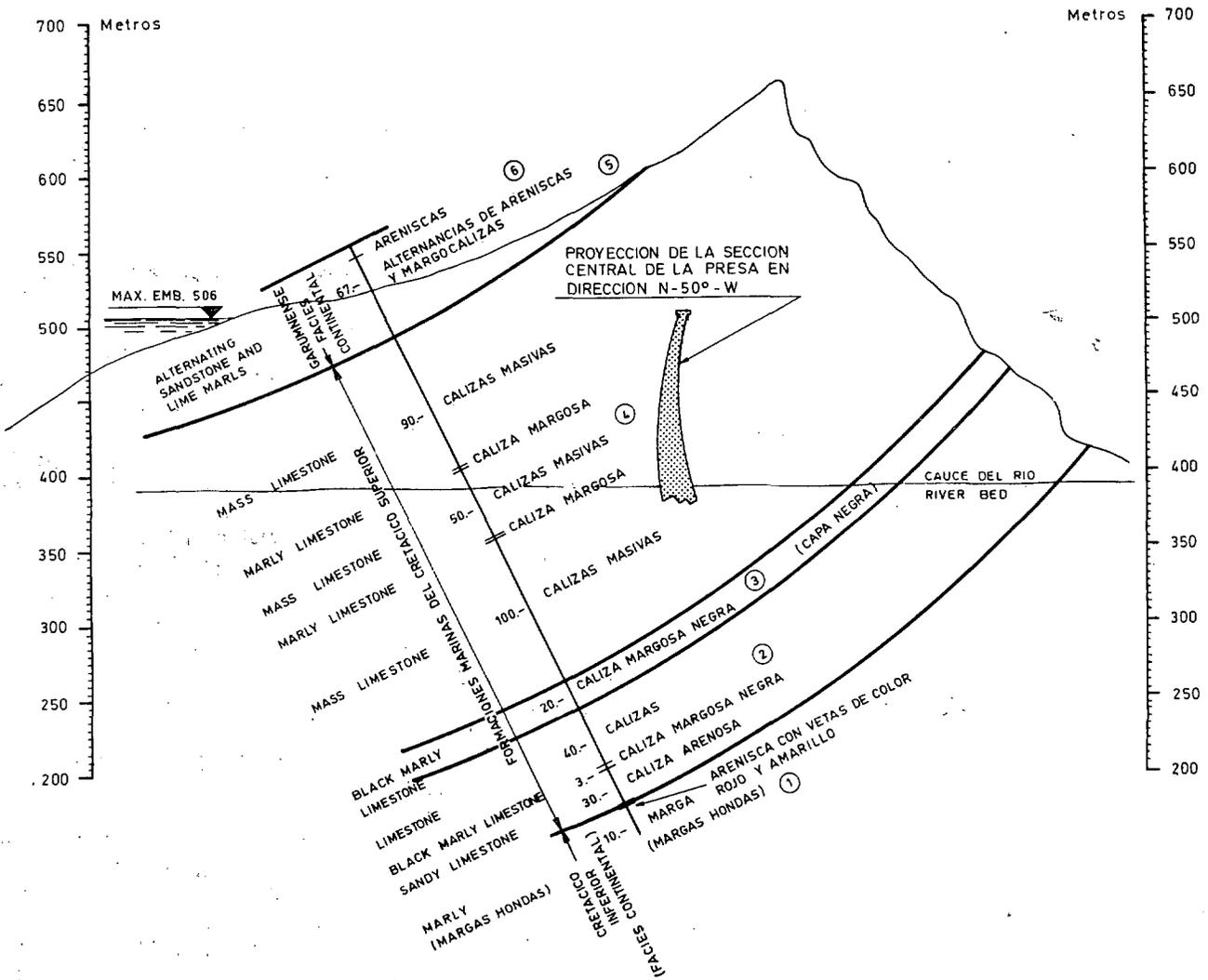


Fig. 3. — Sección por X-X de la figura 2.

con el Garumnense, por si alguna de ellas pudiera ofrecer ventajas económicas y seguridad de resultados.

3.2. Soluciones de estanqueidad superficial.

Pretenden evitar que el agua del embalse se ponga en contacto con las calizas permeables y prolongar esta impermeabilización hasta enlazar con las capas garumnenses que se encuentran tapizando el embalse. Es decir, se trata de dar continuidad regenerando la parte que ha sido erosionada al formarse el cañón.

Se estudió incluso la posibilidad de construir a la entrada del cañón una presa nueva realizada de escollera y con núcleo inclinado hacia agua arriba para enlazar más fácilmente con el Grumnense de las laderas. De antemano se consideró que sólo debería seguirse esta so-

lución en caso de ofrecer ventajas económicas muy claras, pues hubiese requerido establecer nuevas tomas para la central e interrumpir el funcionamiento del salto durante un período largo, con importante repercusión económica por energía no producida.

Hay además otro hecho importante, que invalida las soluciones de impermeabilización superficial: las capas garumnenses no tapizan la totalidad del embalse, sino que, en su fondo y en laderas alejadas de la presa, se mojan extensas zonas de calizas al descubierto. Posteriormente, se ha comprobado la existencia de fugas, que se infiltran en las citadas zonas y pasan a través de capas profundas.

Cuando se hizo el estudio de soluciones se sospechaban, pero no estaban confirmadas, estas filtraciones profundas. Ahora bien, se desechó la idea de una presa

nueva, pues su presupuesto excedía de 1.000 millones de pesetas (al cual habría de añadirse el importe de la energía no producida) y se tenía conciencia clara de que el problema podía resolverse con coste sensiblemente menor.

Se pensó también en impermeabilizar las laderas y el fondo del cañón calizo, por donde se presumía pasaba la mayor cantidad de agua, hasta enlazar con las zonas que tienen margas areniscosas garumnenses. Tampoco

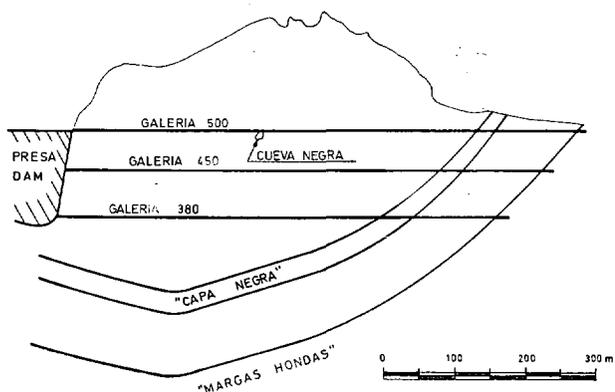


Figura 4.

se hubiese logrado la deseada estanqueidad por la razón que se ha expuesto.

Además, hubiese sido necesario recubrir o calafatear una superficie muy extensa, en su mayor parte casi vertical, y este problema no tenía solución fácil. Se podría recurrir a un gunitado, pero a la condición de impermeabilidad había que agregar que después de un desembalse rápido el revestimiento impermeable resistiera la presión intersticial del agua que hubiese podido llegar al interior del macizo, por lluvias, etc. Para conseguir la necesaria resistencia se requería un cosido con bulones o una impermeabilización hasta profundidad suficiente. Consecuencia de ello y de la inaccesibilidad de las superficies a revestir, el coste resultaba francamente elevado y se desechó la solución.

3.3. Pantalla de inyecciones.

Desechadas las soluciones que pudieran llamarse de impermeabilización superficial, quedaba realizar una pantalla de inyecciones en el interior del macizo. Como ya se explicó anteriormente, durante el proyecto y construcción de la presa se contaba con la llamada Capa Negra para lograr la estanqueidad y se había realizado una cortina de inyecciones hasta llegar a ella. Las fugas consiguientes al llenado del embalse demostraron que la Capa Negra no era estanca, sino que debía tener diversas fracturas. Por ello, se pensó en regenerarla me-

dante inyecciones, pero, aunque éstas redujeron las filtraciones, no se consiguió el resultado deseado.

Actualmente, después de los numerosos taladros que se han realizado para inyectar la pantalla en ejecución, se tiene la certeza de que había circulación importante por debajo de la Capa Negra, circulaciones hoy día casi completamente cortadas.

Convencidos de que no era solución regenerar la Capa Negra, se pensó en acometer una pantalla vertical extendida a los límites que fuesen necesarios. Una solución de pantalla como la que finalmente se ha adoptado (ABCD, fig. 2) requiere ser realizada desde galerías, pues a lo largo de su trazado el terreno tiene cotas altas; en cambio, una pantalla que se aproxime al contorno del embalse, tal como AMNP (fig. 2), puede ser ejecutada, si no en su totalidad, por lo menos en gran parte desde la superficie del terreno. Con estas consideraciones, se perforó una galería de reconocimiento indicada con AMNP en figura 2, y desde ella se realizaron taladros para medir permeabilidades y algunas inyecciones de ensayo.

Una vez ejecutada esta galería, dada la importancia y extensión de la pantalla a realizar y la necesidad de resolver con éxito el problema de la estanqueidad, se estimó necesario reconsiderar el trazado en planta de la pantalla. Se había de tener en cuenta:

a) Las llamadas "margas hondas" constituyen un terreno del cual se podía asegurar la impermeabilidad, mientras que por encima de ellas las calizas podrían estar más o menos karstificadas incluso hasta niveles muy profundos, si el proceso de disolución se había producido en época terciaria. A pesar de los detallados estudios realizados en las cavidades y conductos kársticos del macizo, no se pudo establecer con claridad si anterior a la karstificación cuaternaria existía o no otra terciaria.

b) Teniendo en cuenta lo anterior, interesaba situar la pantalla lo más agua abajo posible, pues de este modo resultaba más corta la distancia a las margas hondas y, caso de precisar llegar a ellas, sería menor la superficie de pantalla a realizar.

c) La pantalla de inyecciones, tratando de conseguir una estanquidad lo más perfecta posible, determina una brusca discontinuidad en la ley de presiones intersticiales, que se traduce en un empuje hidrostático importante. El macizo rocoso que queda agua abajo de la pantalla ha de poder resistir, actuando sobre la pantalla, el empuje hidrostático correspondiente al máximo nivel de embalse.

Atendiendo a las condiciones expuestas, se buscó un trazado de pantalla situado lo más hacia agua abajo posible, pero de modo que el macizo rocoso que queda del lado del valle, resistiera con suficiente margen de seguridad el empuje del agua, que al otro lado de la pantalla puede alcanzar un nivel igual al del embalse máximo.

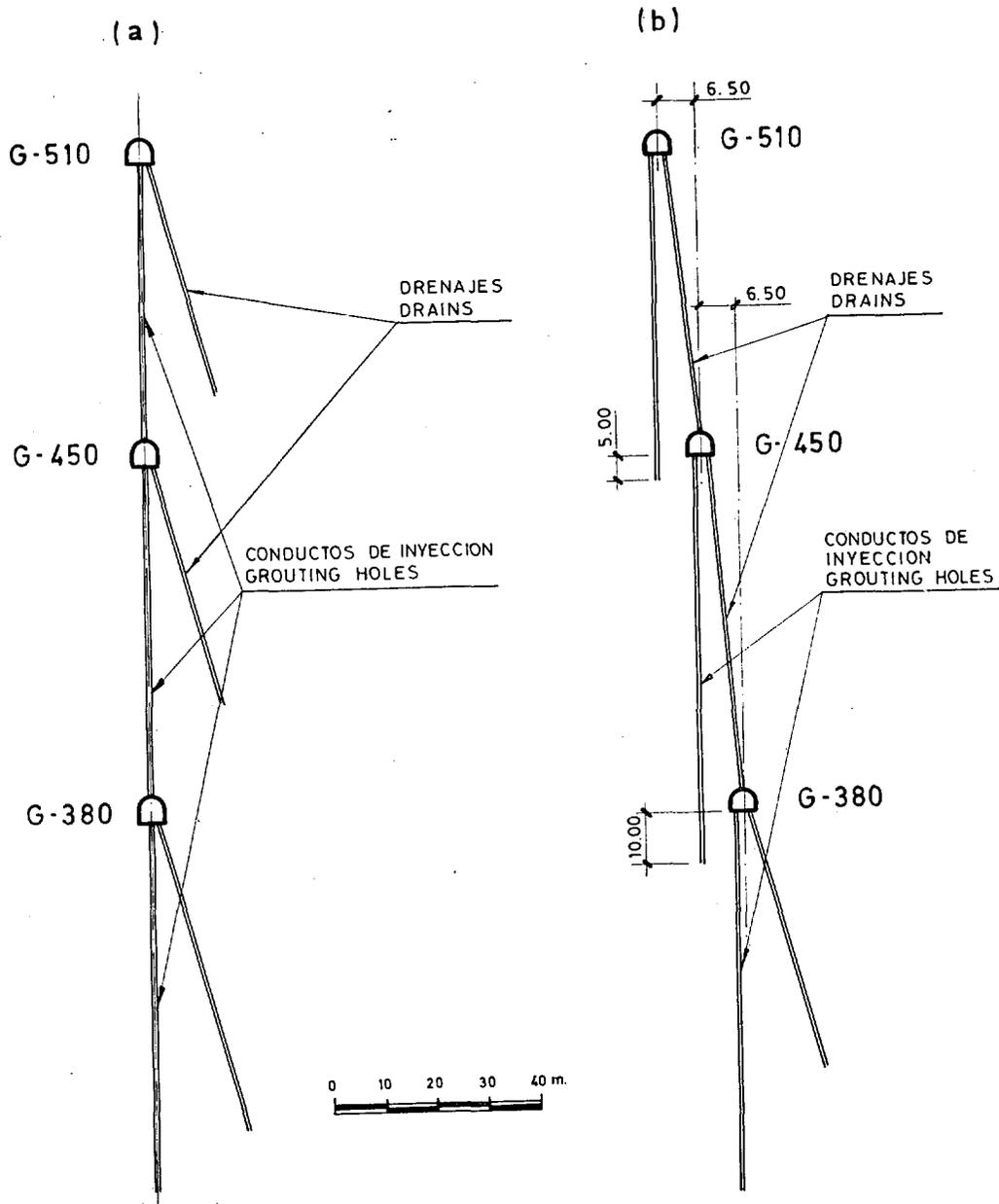


Figura 5.

Se estudiaron las diferentes superficies de posible deslizamiento y se tomaron en ellas como parámetros resistentes, los menores valores que habían sido hallados, en los ensayos de corte. A la posición de pantalla adoptada corresponde una superficie de deslizamiento pésimo con un coeficiente de seguridad igual a 1,5. El trazado parte del estribo izquierdo de la presa, y en un primer tramo adopta una dirección que penetra rápidamente en el macizo rocoso; después forma una curva

circular y sigue aproximadamente paralelo al talud externo del macizo; finalmente, tiene otra curva y busca el enlace con las margas hondas. Importa destacar que este trazado, además de satisfacer la condición de estabilidad del macizo asegura el cierre de todos los posibles conductos de filtración, pues se pueden alcanzar las margas hondas. La figura 4 representa la pantalla como desarrollo de la superficie que pasa por el eje de su trazado y tiene generatrices verticales.

4. EL PROYECTO DE LA PANTALLA

4.1. Situación de las galerías de inyección.

Con el trazado de pantalla adoptado no hubiese sido viable en la práctica realizar las perforaciones desde el exterior, ya que la mayor parte de él tiene cotas 100 m más altas que el nivel de máximo embalse, llegando esta diferencia incluso a 220 m. Resultaba por tanto obligado construir una galería a cota próximamente igual a la de coronación de la presa. Quedaba la duda de realizar la pantalla únicamente desde la citada galería o bien construir otras a niveles inferiores, para así reducir la longitud de cada taladro y facilitar la operación de inyección. Se hizo un estudio teniendo en cuenta el coste de perforación y revestimiento de las galerías, y el incremento del coste de taladro en función de su longitud, y se dedujo la conveniencia de disponer galerías separadas entre sí una distancia de unos 50 m aproximadamente. Pero por debajo del nivel del río hubiese tenido dificultades importantes la construcción de cualquier galería, y por ello se decidió ubicar la inferior a la cota de la central hidroeléctrica, donde ya existían algunas galerías anteriores que servirían como acceso. Finalmente, una tercera galería se dispuso coincidiendo con el máximo nivel a que se venía explotando el embalse (cota 450) de modo que se podría perforar sin interferencias en la explotación del salto.

Surgió una duda respecto a la posición relativa de las galerías entre sí. Interesa drenar y recoger el agua que haya podido pasar a través de la pantalla, a fin de reducir lo más posible la presión intersticial que pudiera originar y mejorar la estabilidad del macizo que queda del lado del agua abajo. Por tanto, además de los conductos de inyección había que pensar en disponer desde las galerías drenes que canalicen las posibles filtraciones.

La duda estaba en que las galerías podían perforarse coincidentes en una vertical, según se indica en la figura 5 a, o desplazadas cierta distancia una de otra, como en la figura 5 b.

Según la solución (a) los conductos de inyección serían verticales, y se perforarían desde cada galería para terminar en la inmediata inferior, salvo los de la galería 380, que lo harían en capas profundas de roca. En cambio, los conductos de drenaje habrían de quedar desplazados hacia agua abajo, pero sin poder enlazar galerías; para conseguir mejor drenaje convendría perforar desde cada galería taladros en sentido ascendente.

Según la solución (b), que es la finalmente adaptada, cada galería está desplazada 6,50 metros hacia agua abajo, respecto de la inmediata superior. Los sondeos de inyección son también verticales y por tanto no enlazan galerías; se profundizan algo más que la cota de la galería inmediata inferior y desde ésta se realizan taladros cortos horizontales, para con ellos completar el cierre. Los conductos de drenaje van desde una galería a otra;

se tiene así la gran ventaja de poder comprobar con sencillez que los drenes se conservan libres de obstrucciones, pues siendo el macizo calcáreo, existe el peligro de que el agua filtrada forme concreciones que terminen colmatándolos; además resulta también fácil pasar periódicamente algún dispositivo para limpiar los taladros y eliminar obstrucciones incipientes.

En el esquema adoptado han de cuidarse las zonas próximas a las galerías, pues los drenes quedan cerca de la pantalla y, por tanto, es fuerte el gradiente de presiones, existiendo algún peligro de que llegaran a producirse deterioros; para evitarlo, en torno de las galerías se inyectan otros taladros cortos, que agrandan la zona impermeabilizada y alejan del sistema de drenaje las fisuras comunicadas con el embalse.

4.2. Taladros de inyección.

La pantalla de inyecciones ha de satisfacer dos condiciones fundamentales:

- Que se rellenen todos los huecos y fisuras por las cuales pueda pasar el agua.
- Que el relleno tenga espesor y resistencia suficiente para que no pueda ser desplazado con la presión del agua, produciéndose destaponamientos que significarían pérdida de la estanqueidad.

La disposición de los taladros en una sola fila, en dos o en tres, así como la separación entre taladros dentro de la fila debe determinarse en función de la red de litoclasas y conductos kársticos existentes en el macizo a impermeabilizar. Es evidente que si las litoclasas son numerosas pero con abertura reducida y no comunicadas entre sí, bastará una sola fila de taladros, aunque suficientemente próximos para asegurar el relleno de todas las litoclasas. En cambio con litoclasas muy abiertas, y muy karstificadas, se hace necesario recurrir a doble o triple fila de sondeos para que el relleno de la inyección tenga mayor longitud en el sentido de la percolación y garantizar su resistencia a la presión del agua.

Por otra parte, el mayor espesor de pantalla puede conseguirse aumentando la presión de inyección, con lo cual la lechada llegará a puntos más alejados, en lugar de hacer doble o triple fila de taladros. Si existen diaclasas transversales, que pongan en comunicación las del sistema principal, se puede aumentar la separación de taladros, pues será fácil que la lechada alcance todas las fisuras.

En Canelles se ha seguido el criterio de no establecer en la fase de proyecto una distribución fija de taladros, sino adaptarla en cada tramo a los requerimientos deducidos de las perforaciones que se iban realizando y de las pruebas de permeabilidad bajo presión de agua.

4.3. Sección transversal de galerías de inyección.

Las galerías se proyectaron con sección suficiente (4 m de ancho) para poder ejecutar en todo tramo tres filas de taladros si las condiciones de la roca lo exigen.

Además se les dio una altura inferior (3,50 m en el centro) que permita perforar con máquinas pesadas para así disminuir las desviaciones de dirección en los taladros, cuya tolerancia máxima se fijó en el 3 por 100.

Las galerías 380 y 450, por ser su cota inferior al máximo nivel normal del embalse, llevan un revestimiento de hormigón. En cambio, en la galería alta se hace un simple gunitado, siempre que la roca lo permita.

5. EJECUCION DE LOS TRABAJOS

5.1. Resumen cronológico.

Una vez establecida la posición de la pantalla y sus características principales (galerías, sondeos, condiciones de las lechadas y mezclas de inyección, etc.), se efectuó un concurso entre empresas especializadas en inyecciones, y dada la importancia de la pantalla, se prefirió repartir los trabajos entre dos contratistas distintos. Por ello, una zona de la pantalla fue adjudicada al consorcio constituido por las empresas Cimentaciones Especiales (Rodio) y Adaro, y otra a Agromán con Geotehnika.

Los trabajos propios de la pantalla, perforación e inyección de sondeos, comenzaron en diciembre de 1971, y se espera queden completamente terminados en el próximo mes de julio.

Previamente se habían construido los accesos, y la galería a cota 450, estando en ejecución la galería 510. En cuanto a la galería 380, se prefirió esperar y realizarla en el período invernal, cuando siendo menores las aportaciones del río, el embalse está con menos agua.

En enero de 1972 se pudo vaciar completamente el embalse, transvasando el agua al de Santa Ana, situado inmediatamente abajo. Aquel año, excepcionalmente frío y con grandes reservas de nieve en los Pirineos, permitió mantener vacío el embalse hasta mayo. Durante este tiempo, sin los problemas derivados de la existencia de filtraciones en el macizo, se pudo excavar y revestir la galería 380 y rellenar las cuevas y oquedades existentes en el tramo de pantalla a ejecutar desde la galería 450. También se pudo realizar casi todo el revestimiento y una primera fila de taladros correspondientes a dicha galería. Una vez realizada la galería inferior (cota 380), a finales de mayo de 1972, se decidió llenar el embalse, considerando por una parte los perjuicios derivados de tener la central eléctrica sin funcionar, y por otra, que las crecidas producidas por el deshielo producirían por lo menos un llenado parcial del embalse, y además que, si bien con mayores dificultades, podría proseguir la ejecución de la pantalla con carga de agua. En caso de

que fuese necesario, se podría vaciar nuevamente en el invierno de 1973.

En junio de 1972, y ya con el embalse en carga, se iniciaron los tratamientos desde la galería 380, empezando por taladros de impermeabilización alrededor de la misma, mientras se continuaban las inyecciones desde la galería 450.

Cuando se terminó la pantalla correspondiente a la galería 450, comenzaron los trabajos en la 510, simultaneándolos con los tratamientos en la galería 380.

Hoy día falta por realizar sólo un pequeño tramo de la galería 380 y parte de la 510. Se espera quede totalmente terminada la pantalla en el próximo mes de julio.

5.2. Perforación e inyección de taladros.

Como norma general se ha realizado una sola fila de taladros, pero se ha duplicado en las zonas más diaclasadas o donde se producían pérdidas importantes al realizar las pruebas de permeabilidad. En gran parte de la pantalla se han ejecutado tres filas de taladros, inyectando primeramente las dos laterales con mezcla de fraguado rápido, para crear una barrera que corta el paso a la lechada de la fila central; en ésta se puede dar presión alta, consiguiendo rellenar todos los huecos existentes en el espacio comprendido entre las filas laterales, con una absorción limitada.

Dentro de cada fila se tomó el módulo 2 m para la distancia de taladros, pero operando del siguiente modo:

1. Perforación e inyección de taladros primarios distanciados entre sí 16 m.

2. Perforación de taladros secundarios, intercalados entre los anteriores y, por tanto, separados 8 m entre cada dos, después de haber inyectado los primarios. La mayoría de estos taladros secundarios ha tenido menor absorción que los primarios; prueba de que la lechada ha recorrido más de 8 metros.

3. Ejecución de taladros secundarios, intercalados entre los otros, es decir, a distancia de 4 m. En casi todos ellos la inyección ha sido muy reducida, y desde luego mucho menor que en los primarios y secundarios.

4. Para tener seguridad de que todas las fisuras y diaclasas han quedado rellenas, se perforan taladros cada 2 m, que más bien son de control de la pantalla realizada. Se han registrado en ellos absorciones casi despreciables.

Se tuvieron dudas sobre si hacer los taladros verticales o bien darles una inclinación para atravesar mayor número de litoclasas, dado que éstas son prácticamente verticales. La mayor garantía de mantener la dirección cuando los taladros son verticales, y su menor coste, decidieron esta disposición.

Después de ejecutada la pantalla, y especialmente en las zonas más rotas, y con absorciones más altas, se ejecutan nuevos taladros de control, además de los indicados anteriormente; éstos con separación variable, pero inclinados de modo que corten mayor número de diaclasas.

5.3. Presión y sistema de inyección.

Las inyecciones para una pantalla de impermeabilización tienen un carácter diferente de las realizadas para aumentar la resistencia de un macizo rocoso. En el caso de la impermeabilización no importa que se produzcan algunas roturas internas, con tal de que lleguen a rellenarse todos los huecos y fisuras por donde pudiese filtrar el agua. En consecuencia, siempre que se esté a cierta distancia de la superficie, es preferible inyectar con presiones elevadas. En Canelles se ha seguido la norma de aplicar presiones hasta de 40 Kg/cm², para así tener seguridad de rellenar también las fisuras pequeñas.

Como norma general se han ejecutado las inyecciones desde abajo hacia arriba por tramos sucesivos, aislados con el correspondiente obturador; así se logra una economía al evitarse las reperforaciones. Pero si al perforar un tramo de sondeo se detectan huecos grandes, o se producen pérdidas totales, se inyecta el tramo antes de seguir perforando, y después de reperforarlo se ejecuta el resto según la norma general, si ello resulta posible.

5.4. Lechadas y mezclas para inyección empleadas.

Interesa rellenar todo hueco o fisura por donde pueda pasar el agua, pero de modo que el material fraguado alcance resistencia suficiente para que no pueda ser desplazado por el agua a lo largo del tiempo, y todo ello lo más económicamente posible.

Siempre que existan diaclasas y fisuras de abertura reducida, hace falta una lechada fluida y que tarde en fraguar para que penetre en ellas. Cuando por el contrario, los huecos sean grandes y más aún si existe circulación de agua, conviene añadir granos, tanto más gruesos cuanto mayor sea el tamaño de los huecos. Además es necesario que el fraguado sea rápido, para limitar las cantidades que se inyectan.

Respecto a resistencia, ésta ha de ser mayor cuando los huecos son grandes, pudiendo tener valores pequeños, si la apertura de las diaclasas es como máximo de algunos milímetros.

En cualquiera de los casos interesa que la retracción sea reducida, punto que debe comprobarse mediante los oportunos ensayos. Finalmente, hace falta que el material, cumpliendo las condiciones reseñadas, resulte a un coste lo más económico posible.

De lo anterior se desprende fácilmente que se precisen varios tipos de productos de inyección para emplear en cada caso, según sean las condiciones de la roca.

En Canelles, la mayor parte de los taladros se han inyectado con una mezcla de arcilla y cemento; para diaclasas delgadas esta mezcla satisface bien los requerimientos de fluidez y resistencia sin necesidad de añadirle aditivos.

Para rellenar huecos, en lugar de la mezcla anterior se ha utilizado un mortero de arena-cemento y en diversos casos ha sido preciso realizar un sondeo de gran diámetro para introducir en él grava además del mortero.

En una parte importante de la pantalla, que ha sido inyectada estando con agua el embalse y de la cual hablamos en el siguiente apartado, se han agregado acelerantes diversos, para que la mezcla de inyección fraguase rápidamente y conseguir así una obturación de los productos kársticos.

Se reseñan a continuación los distintos tipos de mezclas empleadas para las inyecciones, y las resistencias a compresión obtenidas en probetas realizadas en laboratorio, sin haberlas sometido a ningún proceso de compresión. Se ha comprobado reiteradamente que la resistencia aumenta de modo considerable cuando la probeta se fabrica en un dispositivo que trata de reproducir las condiciones naturales de la inyección en el terreno, y lleva una parte porosa, por la cual puede filtrar el exceso de agua, al actuar sobre la probeta una compresión:

Tipo de mezcla	Cemento %	Arcilla %	Arena %	Resistencia a compresión a 28 días
Lechada de cemento	100	—	—	160 Kg/cm ²
Mortero	50	—	50	180 Kg/cm ²
Mezcla (1)	40	60	—	21 Kg/cm ²
Mezcla (2)	46	54	—	45 Kg/cm ²
Mezcla (3)	73	27	—	100 Kg/cm ²

En general suelen contener un volumen de agua equivalente al de la materia seca, aunque en algunos casos ha sido preciso aumentarlo para facilitar la inyección; por el contrario, se ha disminuido en las zonas con circulación de agua.

5.5. Zonas particulares de la pantalla.

Los problemas inherentes a una pantalla en un macizo kárstico, son muy distintos según se trate de rellenar simples fisuras, de que los accidentes sean cuevas y grandes oquedades, o que en el interior del macizo exista agua en circulación.

En Canelles, gran parte de la pantalla se ha realizado sin tener que vencer grandes dificultades, pero en ciertas zonas los trabajos de impermeabilización han presentado problemas importantes.

Como ya se dijo anteriormente, el tramo inyectado desde la galería superior (a cota 510) y casi todo el correspondiente a la galería intermedia (450), se ejecutaron libres de percolación de agua. En cambio, en la zona inferior se está inyectando con fuertes corrientes de agua, ya que el nivel del embalse está 80 m más alto que la galería desde la cual se trabaja. En estas condiciones, si no se adoptan precauciones especiales, la materia inyectada es arrastrada por el agua. En Canelles se han conseguido buenos resultados inyectando fuertes caudales de mortero bastante seco o también mediante sondeos de gran diámetro, grava y mortero; éste con un acelerante de fraguado y siempre cantidades altas en el menor tiempo posible. En algunos casos se han utilizado adiciones que provocan un fraguado instantáneo, las cuales se han agregado en el propio taladro. Han sido importantes las ventajas conseguidas al ejecutar la pantalla con el embalse en carga, sin tener que dejar el salto unos cuantos meses fuera de funcionamiento.

Las cuevas y grandes oquedades también han presentado problemas, aunque de solución más fácil que los derivados del agua circulando. No se trata en este caso de luchar contra el tiempo, pero interesa rellenar los huecos del modo más económico posible y asegurando que el relleno resistirá en buenas condiciones la presión del agua. Cuando la cueva era accesible, como ha sucedido con la Cueva Negra, se ha ejecutado un tapón de hormigón, encofrando sus paramentos y después se ha inyectado para impermeabilizar el contacto. En otros casos se ha realizado el relleno con grava y mortero, asegurándose de que, en consonancia con las dimensiones del hueco, previamente medidas, el relleno tendrá espesor suficiente para resistir la carga hidrostática.

5.6. Resultados relativos a superficies, metros perforados y admisiones en la pantalla.

Faltando actualmente sólo una pequeña parte de pantalla por realizar, se pueden ya anticipar datos en cuanto a total de metros perforados, admisiones por metro lineal de taladro y por metro cuadrado de pantalla, etc., conscientes de que estos datos de pantalla realizada, ofrecen interés para quien necesite proyectar una nueva.

Las superficies de pantalla y la longitud total de taladros en los tramos ejecutados desde cada una de las galerías son las siguientes:

Piso o tramo de pantalla	Longitud de taladros m	Superficie de pantalla m ²
Superior, desde galería 510	20.000	39.000
Intermedio, desde galería 450	62.000	42.000
Inferior, desde galería 380	63.000	77.000
Total pantalla	145.000	158.000

Estos valores son aproximadamente un 4 por 100 más altos que los previstos al elaborar el proyecto de la pantalla.

Por cada metro cuadrado de pantalla resultan las siguientes longitudes de taladro y admisiones de materia inyectada:

Piso o tramo de pantalla	Por cada m ² de pantalla	
	Longitud de taladro mm ²	Kg de materia seca Kg/m ²
Superior, desde galería 510	0,51	276
Intermedio, desde galería 450	1,48	298
Inferior, desde galería, 380	0,82	300
Total pantalla	0,92	320

Se observa que por metro cuadrado el piso intermedio ha precisado mayor longitud de perforación y ha admitido mayor cantidad de materia seca; ello es debido a que la mayoría de las cuevas y grandes huecos han correspondido precisamente a este tramo, estando comprendidos en el cuadro anterior los sondeos y el material que ha requerido su relleno.

Tienen interés los datos relativos a absorciones en taladros primarios, secundarios, etc., pues de ellos se deducen conclusiones sobre las distancias a que llega la lechada inyectada en un sondeo y en particular se observa que se reducen sensiblemente las absorciones en una segunda fila de taladros cuando la primera ha sido correctamente inyectada.

En las galerías 450 y 380 se ejecutó primero la fila (C), de agua abajo y después la (A). En la galería 450, hubo que realizar también completa la fila (B), pues fueron numerosas y frecuentes las cavernas y oquedades encontradas, mientras que en la galería 380 se ha podido prescindir en algunas zonas de los taladros de la fila (B). Finalmente, en la galería 510 la fila (A), de agua arriba se inyectó antes que la (C), decidiéndose no realizar la (B) en vista de los resultados obtenidos en los otros tramos y teniendo en cuenta que esta parte alta de la pantalla estará sometida a carga hidrostática más reducida.

5.7. Pruebas de control y resultados obtenidos con la pantalla.

El control más eficaz de la impermeabilidad lograda con la pantalla se tiene a través de los taladros intermedios, especialmente cuando éstos corresponden a una fila central situada entre otras dos ya inyectadas. Los

resultados de admisiones en la fila (B) de las pantallas realizadas desde las cotas 450 y 380 son bastantes ilustrativos a este respecto. No obstante, y para mayor garantía, se van a realizar otros sondeos de control inclinados (para que corten mayor número de litoclasas) según se indicó en la parte referente al proyecto de la pantalla. De igual modo, desde la galería 510, cuando estén terminadas las filas (A), (C) se ejecutarán sondeos de control inclinados en la fila (B).

Además de los citados sondeos de control, desde la galería a cota 380 se han colocado una serie de piezómetros agua arriba de la pantalla y a suficiente distancia para que no estén afectados por ella; cada piezómetro está conectado con un manómetro indicador situado en la propia galería. Actualmente los manómetros señalan una presión igual a la altura de agua en el embalse excepto en la zona en que falta por inyectar la pantalla y en la que todavía se producen filtraciones importantes. En dicha zona los manómetros indican una disminución de carga que se corresponde con la velocidad del agua en su movimiento de percolación. Al colocar los piezómetros se dedujeron también observaciones directas relativas al espesor alcanzado por las inyecciones.

Finalmente, la mejor prueba del buen resultado de una pantalla es que las filtraciones desaparezcan o se re-

duzcan a valores suficientemente pequeños. Ya dijimos en la introducción que antes de comenzar la pantalla en Canelles existían filtraciones superiores a los $6 \text{ m}^3/\text{seg.}$ Actualmente queda una parte de pantalla sin tratar de extensión suficiente para que, existiendo en las proximidades una carga de agua igual a la del embalse, las filtraciones sean todavía importantes. Además, con las galerías y los drenes desde ellas establecidos, tiene mayor facilidad de salida que antes el agua que haya pasado el trazado de la pantalla, donde ésta aún no se ha inyectado. Así, es lógico que en el momento de redactar estas líneas, todavía existan filtraciones con un caudal total de $1,9 \text{ m}^3/\text{seg.}$, aunque la zona de pantalla tratada (que es su mayor parte) haya conseguido buenas condiciones de impermeabilidad.

6. COMENTARIO FINAL

Creemos que la pantalla de Canelles, por su extensión, y porque en una parte importante ha sido inyectada estando el embalse en carga, ofrece un ejemplo interesante y añade otra prueba más a las que ya existían en apoyo de la posibilidad técnica y económica de hacer estancos vasos en terrenos kársticos.