

PRESA DE ARBÓN

PROLONGACION DEL NUCLEO DE LA PRESA DE ESCOLLERA MEDIANTE INYECCION DE LOS ALUVIONES

Ing. C. C. P. J. OSENDE

Ing. EPUL. E. BOLOMEY

I. INTRODUCCION

En el curso inferior del río Navia, a unos 12 Km. de su desembocadura en el mar Cantábrico, se está construyendo el salto de agua de Arbón, propiedad de Electra de Viesgo, S. A., para completar el aprovechamiento de dicho río, en cuyo curso medio se encuentran ya en funcionamiento los saltos de Doiras, Silvón y Grandas de Salime.

El lecho del río está constituido por acarreo silíceo de gran espesor, apoyados en pizarras silíceas. El problema planteado consiste en hacer una pantalla impermeable en dichos acarreos, para evitar el paso del agua bajo la presa, con su secuencia de arrastre de materiales, que podría originar la ruina de la construcción, coadyuvar a la estabilidad del dique y a la rentabilidad de la obra, al disminuir las pérdidas por filtración.

En un principio se pensó en excavar los aluviones para cimentar una presa de hormigón sobre la roca, pero una primera campaña de sondeos hizo desechar tal solución, debido al espesor de los acarreos encontrados, abandonándose durante cierto tiempo la idea de construcción de la presa. Y es en 1958 cuando se comenzó a estudiar la posibilidad de cimentar la presa directamente sobre los aluviones. Diversas campañas de sondeos en dichos aluviones, completadas por ensayos de inyecciones, así como reconocimientos de eventuales canteras próximas a la obra, han conducido a las siguientes conclusiones, que han servido de base al proyecto:

— El lecho del río Navia, en el lugar de la obra está formado por aluviones que alcanzan 45 metros de espesor, constituidos por tres capas principales: una capa superior de gravas, gravilla y arena; una capa central de arenas y limos de alta compresibilidad, y una capa inferior semejante a la superior, pero con gravas más gruesas o bolos y mayor cantidad de arenas. En las márgenes, los aluviones están más sueltos, pues contienen mucho limo, maderas y otros productos orgánicos.

- Los piezómetros profundos han permitido demostrar que la débil permeabilidad en las márgenes y en la capa central de limo y arenas — tal vez juega la continuidad de esta última — no eran suficientes para evitar importantes comunicaciones de agua entre sendas capas, superior e inferior, de los aluviones gruesos.
- La importancia de las excavaciones en roca para la ejecución del aliviadero y túneles, permite obtener, en cantidad suficiente, materiales para la construcción de una presa de escollera. Por otra parte, en las proximidades de la presa se podía abrir una cantera para la ejecución de un núcleo impermeable.
- La alta compresibilidad de los limos de la capa central hacía prever asentamientos del orden de un metro, debido a la sobrecarga de la presa de escollera, por lo que era desaconsejable una solución de corte impermeable de los aluviones, mediante un diafragma de hormigón.
- El corte impermeable de los aluviones mediante inyecciones es factible si, por una parte, se toma la precaución de elegir, como productos base de las mezclas materiales que permitan grandes deformaciones sin romperse, una vez endurecidos, y, por otra, disminuyendo estas deformaciones al consolidar parcialmente, con las mismas inyecciones, la capa central de limos y arenas.

Por estos motivos, los ingenieros de Electra de Viesgo, S. A., D. Agustín Presmanes y D. Juan J. Elorza, directores del proyecto, con el asesoramiento de D. Carlos Schaerer, decidieron construir una presa de escollera con núcleo central impermeable, de 31,50 metros de altura, cimentada directamente sobre los aluviones, previamente tratados mediante inyecciones en la prolongación del núcleo.

II. PROYECTO DE LA PANTALLA DE INYECCION

En la actualidad se construyen muchas presas en lugares considerados anteriormente inadmisibles por las

características deficientes del terreno: alta permeabilidad, débil resistencia mecánica, gran deformabilidad.

Para remediar estos defectos, se empezó por el tratamiento de terrenos rocosos, mediante inyecciones de lechadas de cemento a alta presión. Gracias a la experiencia adquirida en estos trabajos, se pudo mejorar la técnica de las inyecciones, aumentando su eficacia y campo de aplicación. Se pasó del empleo exclusivo del cemento a la utilización de lechadas de arcilla-cemento, de productos bituminosos y de productos químicos.

Así, hacia el año 1945, fue posible iniciar, con éxito, la impermeabilización de aluviones y terrenos incoherentes, tanto en casos de obras provisionales como en las de carácter definitivo.

Los fines son distintos en cada uno de estos dos casos. En el primero, las inyecciones tienen como objeto el permitir la excavación de los aluviones para cimentar la obra definitiva sobre la roca o sobre los aluviones por debajo del nivel freático. En el segundo caso, la pantalla de inyección es una prolongación, en los aluviones no excavados, de los elementos de impermeabilización de la presa.

Para establecer el proyecto del corte impermeable en los aluviones por debajo de la futura presa de Arbón, se ha empezado por estudiar los varios criterios que han servido de base a los proyectos de las realizaciones existentes:

a) *Pantalla de inyección realizada en obras provisionales.*

Como corte impermeable provisional citamos cuatro casos interesantes:

Salto de Doiras (España), 1930.

La presa del salto de Doiras, sobre el río Navia, aguas arriba del salto de Arbón, está cimentada sobre la roca, cubierta en una zona por 20 metros de aluviones. Para permitir esta excavación, se decidió prolongar la ataguía aguas arriba, mediante una pantalla de inyección constituida por una sola fila de taladros. En la época de la realización de estos trabajos no se conocían aún mezclas estables de inyección, y se inyectaron los acarrees por fases ascendentes — con la misma técnica con que se inyectaba la roca — de la siguiente forma:

- Perforación y entubación de los taladros hasta la roca.
- Inyección, mediante cemento, del terreno hasta que la lechada sale en superficie o hasta que aumenta la presión.
- Empleo de explosivos para romper el tubo y el terreno inyectado.
- Nueva inyección de la zona rota por los explosivos.

— Nuevo empleo de explosivos e inyección del siguiente tramo del taladro, y así sucesivamente hasta llegar a la superficie.

Así, pues, unas primeras inyecciones — seguidas de explosiones — transformaban los aluviones en una especie de roca fracturada y permeable, fácil de tratar con los procedimientos conocidos en la época.

Este trabajo tuvo pleno éxito y las excavaciones se hicieron sin dificultad.

Presa de San Domenico (Italia).

Anteriormente, en 1928, se habían efectuado unas inyecciones por el mismo procedimiento que en Doiras, o sea, empleando explosivos para mejorar la eficacia de las inyecciones, que permitieron la excavación de 55 m. de aluviones para cimentar sobre roca la presa de San Domenico, sobre el río Saggitario, en Italia. Antes de ejecutar esta pantalla, se había conseguido llegar con la excavación a 15 metros solamente. Después del tratamiento se llegó a la roca con un caudal de achique de 10 litros/segundo.

Salto de Valle Grande (Argentina).

La presa del Valle Grande, sobre el río Atuel, está cimentada sobre la roca, cubierta por 46 metros de aluviones. Para permitir la excavación en seco de los aluviones se ejecutó una ataguía, prolongada por una pantalla de inyección. La diferencia de nivel entre el fondo de excavación y el agua embalsada por la ataguía alcanzó más de 55 metros.

Inicialmente se había previsto la posibilidad de realizar dos o tres filas de taladros. Los trabajos de excavación demostraron que la ejecución de una simple fila de taladros era suficiente para disminuir el caudal de filtraciones unas diecisiete veces (200 litros/segundo en vez de 3.500 litros/segundo sin pantalla).

Basilique Saint Pierre, Lourdes (Francia).

La solera de este edificio se encuentra a 6 metros por debajo del nivel freático, en los aluviones del río Gave.

Para realizar esta excavación se había previsto la hincas de tablestacas y doble fila de taladros de inyección. Durante la excavación se renunció a la ejecución de la segunda fila, debido a la escasa cantidad de agua de filtración (55 litros/segundo).

En los cuatro casos citados, el tratamiento de los aluviones mediante una sola fila de taladros, ha sido suficiente para disminuir, de modo muy importante, el caudal de filtración. Pero en estos ejemplos concurre la característica de haber sido ejecutados en aluviones gruesos de alta permeabilidad y, por tanto, relativamente fáciles de inyectar. Además, las excavaciones comienzan

antes de considerar el tratamiento terminado, y representan un excelente medio de control de la calidad de la pantalla, control que falta en obras definitivas y que no puede ser sustituido por las pruebas de permeabilidad, no significativas, cuando solamente existe una fila de taladros. Una vez puesto en carga el embalse, es demasiado tarde para completar el tratamiento, aun cuando se observe que ha sido insuficiente.

En los ejemplos que acabamos de mencionar, hubiera sido fácil la ejecución de una o dos filas complementarias de taladros, en el caso de que el caudal de filtraciones hubiera sido alto.

b) *Pantalla de inyección realizada con carácter definitivo.*

En este tipo de obras se opta por soluciones de filas múltiples, por las razones antes señaladas. El número de filas, la densidad de los taladros, las mezclas de inyección, etc., dependerán de la altura de la presa, del grado de impermeabilización que se desee obtener y de la permeabilidad inicial del terreno. El ancho de la pantalla dependerá, generalmente, del espesor del núcleo impermeable, ya que normalmente sirve de prolongación a dicho núcleo.

En el cuadro siguiente damos unas características de la pantalla en algunas presas. Los ejemplos del citado cuadro están clasificados por orden descendente respecto a la carga del embalse y al año de ejecución. Se observa:

- 1.º El espesor de la pantalla aumenta con la carga del embalse. Sin embargo, este aumento no evita que se incremente también el gradiente hidráulico. Pero como al aumentar el espesor de la pantalla, o sea, el número de filas de taladros, cualquier defecto de impermeabilización en una fila tiene menos importancia, el mayor gradiente a través de la pantalla no disminuye la seguridad de la obra.
- 2.º La distancia entre filas de taladros y entre taladros de una misma fila, es variable; oscila entre un mínimo de 2 metros en Serre-Ponçon y Sylvenstein, y un máximo de 4,50 metros en Mission Dam, siendo la distancia más frecuente la de 3 metros. No depende de la carga del embalse, pero la tendencia actual es a disminuirla cuando la permeabilidad inicial de los aluviones es pequeña.
- 3.º El volumen de mezcla inyectado por metro cúbico de terreno tratado teórico tiene tendencia a disminuir en las obras más recientes, en relación con las obras antiguas, debido a la mejora de la técnica de inyección.

Serre-Ponçon y Mattmark, con carga de embalse de 110 metros, tienen un volumen inyectado por me-

tro cúbico de terreno tratado, de 0,51 y 0,46 m.³, respectivamente.

Mission Dam y Durlassboden, con 60 metros de carga aproximadamente: 0,49 y 0,46 metros cúbicos. Por fin, Sylvestein y Nôtre Dame de Commiers, con 40 metros de carga, respectivamente, 0,66 y 0,36 m.³.

La experiencia adquirida, así como numerosos ensayos de laboratorio, han permitido esta mejora en la técnica de la inyección, que consiste principalmente en una limitación del caudal de inyección y en una mejor elección de las mezclas inyectadas, cuyas características se modifican a medida que progresa la impermeabilización de los aluviones. Por ejemplo, en Serre-Ponçon y Mission Dam se inyectaron uno o dos tipos de mezclas distintas; en Durlassboden, cuatro, y en Nôtre Dame de Commiers, cinco. Esta variación de las mezclas de inyección en una misma obra es eficaz si, al aumentar el número de filas, se evita que las mezclas más fluidas, inyectadas desde las filas interiores, penetren en zonas no tratadas por mezclas densas.

- 4.º En la mayoría de los casos, las permeabilidades de los aluviones inyectados varían poco y oscilan entre 1 y 4 · 10⁻⁴ cm./seg.

c) *Presa de Arbón.*

Como acabamos de indicar, para disminuir el consumo de productos inyectados, es necesario disponer de diversos tipos de mezclas de inyección, lo que obliga a ejecutar varias filas de taladros, por lo que se estimó necesario tener, en contacto con el núcleo, una pantalla de cinco filas de taladros de inyección, a pesar de que la presa de Arbón tiene una carga de embalse de 29 metros solamente, inferior a la de los ejemplos mencionados.

Para reducir el volumen teórico de aluviones tratados, se han colocado las filas a una distancia entre sí de 2,6 metros solamente, de modo que la anchura de la pantalla en cabeza sea de 13 metros.

De esta manera, el gradiente hidráulico a través de la pantalla es de 2,2, igual al de la presa de Sylvestein, y un poco inferior al de la de Nôtre Dame de Commiers.

Todas las filas de taladros se han prolongado hasta la capa de limos, con el fin de evitar que en el contacto entre acarrees superiores y arenas o limos, exista un paso preferente del agua, que podría favorecer el arrastre de los limos. En efecto, algunas muestras han tenido un límite líquido del orden de 100 por 100, con un índice de plasticidad de 25. A estos valores, poco corrientes, corresponde un terreno fino poco plástico, de débil cohesión, inestable y de alta compresibilidad.

Por debajo de las arenas y limos hay otra nueva capa de aluviones gruesos. Se podía haber pensado en tratar esta capa inferior mediante una o dos filas de taladros solamente. Se optó por la ejecución de tres filas, siempre bajo el temor de un arrastre de los limos, así como para facilitar el tratamiento de esta zona mediante va-

ALGUNAS CARACTERISTICAS DE PANTALLAS EN ALUVIONES
(DATA ON SOME ALLUVIUM GROUTED CUT OFFS)

Presa de:	Serre-Ponçon	Mattmark	Mission-Dam	Durlassboden	Sylvenstein	Nôtre Dame de Comniers	Arbón
País:	Francia	Suiza	Canadá	Austria	Alemania	Francia	España
Fecha de realización	1955-1957	1962-1965	1958-1959	1963-1965	1957-1958	1960-1961	1965
Carga de embalse	110 m.	110	60	36	40	40	29
Superficie pantalla	4.200 m. ²	21.000	6.300	8.500	5.200	7.200	2.630
Profundidad pantalla	110 m.	98	150	70	92	50	45
Volumen tratado	97.000 m. ³	520.000	95.000	100.000	60.000	90.000	29.700
Anchura en cabeza	35 m.	35	Tablestacas	23	18	15	13
Gradiente en cabeza (1)	3,4 m.	3,4	—	3,0	2,2	2,7	2,2
Anchura final	15 m.	15	15,5	7,5	5,0	6,0	7,8
Anchura media	24 m.	24	15,5	12,0	11,5	12,5	11,30
Gradiente medio (1)	4,6 m.	4,6	3,8	5,6	3,5	3,2	2,6
Distancia entre filas	3,0 m.	3,5	3,0	2,5 y 3,0	2,5 y 3,0	3,0	2,6
Distancia entre taladros	2,0 y 3,0 m.	3,0	3,0 y 4,5	3,0	2,0, 2,5 y 3,0	3,0	2,0 y 3,0
Volumen inyectado	49.700 m. ³	240.000	47.000	46.000	40.200	32.400	14.000
Volumen/m. ³ terreno tratado	0,51	0,46	0,49	0,46	0,66	0,36	0,47
Volumen/m. ² pantalla (2)	12,4	10,5	7,6	5,4	7,8	4,5	5,3
Permeabilidad media:							
Antes: en cm./seg 10 ⁻² (3)	5	2	20	0,5	7	30	10
Después: en cm./seg. 10 ⁻⁴	1	0,2	4	0,5	4	2	2,4

(1) Carga de embalse dividida por el espesor de la pantalla inyectada, sea en cabeza o sea en media profundidad.

(2) Sección transversal al cauce.

(3) La permeabilidad real puede ser muy distinta de la permeabilidad media: En Mattmark oscila entre 10 y 0,1 . 10⁻² cm./seg.; en Nôtre Dame de Comniers, entre 500 y 3 . 10⁻² cm./seg., según las capas encontradas. Además, la permeabilidad horizontal es sabido que es superior a la vertical.

rias mezclas de inyección. Pero una sola fila de taladros, la central, se prolongó unos 15 metros en la roca.

En cuanto a la distancia entre taladros de una misma fila, se han adoptado los 3 metros para las filas interiores, como en la mayoría de los ejemplos citados, disminuyéndose la distancia a 2 metros para las filas exteriores, con el fin de reducir las pérdidas de inyecciones en acarreo que no se desea sean tratados. Efectivamente, al ser menor la distancia entre taladros, se puede reducir igualmente la cantidad a inyectar por cada taladro, o sea, por metro cuadrado de pantalla. Esta disminución entre taladros de las filas exteriores, había sido también puesta en práctica en Sylvensten y Serre-Ponçon por los mismos motivos. Con esta longitud y disposición de los taladros, se ha admitido en el proyecto que el volumen inyectado por metro cúbico teórico de acarreo tratados sería del orden de 0,46 m.³, equivalente al del proyecto de Durlassboden.

En consecuencia, las experiencias adquiridas en las inyecciones de pantallas en obras anteriores, nos han permitido elegir la distancia entre filas de taladros y entre taladros de una misma fila, así como los volúmenes a inyectar en cada taladro. A continuación veremos que las previsiones dadas en el proyecto corresponden, prácticamente, a la obra realizada.

Las capas de limos y arenas tenían una permeabilidad suficientemente pequeña para no hacer necesaria su inyección. Pero en esta zona se ha seguido el tratamiento normal en los aluviones gruesos, con el fin de provocar una consolidación de dichos limos y disminuir así los asentamientos del núcleo, al mismo tiempo que, al aumentar la cohesión de los limos, se reduce el peligro de deslave por las aguas de percolación.

Para la inyección de los taladros existen dos sistemas diferentes:

En el primero se inyecta por fases descendentes, es decir, se perfora a rotación un cierto espesor de terreno, del orden de 2 metros, que se inyecta a través del varillaje y corona de perforación, a la vez que se retiran éstos de abajo arriba. A continuación se reperfora la zona inyectada, se hace un avance de un par de metros en terreno no inyectado, y se vuelve a inyectar esta nueva capa de abajo arriba, repitiéndose la operación hasta el final de los taladros.

En el segundo se inyecta a través de tubos manguitos colocados previamente. Como se observa en la figura 3.^a, estos tubos manguitos son tubos perforados cada 33 cm., cuyos agujeros se cubren mediante un manguito de goma que permite el paso de agua o lechadas del interior hacia el exterior del tubo, pero no en el sentido contrario. Después de perforar a percusión la totalidad del taladro, se introduce el tubo manguito, que se sella con el terreno circundante mediante una lechada que llamaremos vaina o "gaine". Así, pues, se puede inyectar en el orden que se desee, pudiendo repetirse la inyección en los puntos en que el primer tratamiento se revela insuficiente.

En acarreo gruesos, la elección entre uno y otro sistema de inyección corresponde a un problema de tipo económico. Cuando aumenta la longitud de los taladros, los metros lineales de reperfusión se incrementa muy rápidamente, de tal manera que, para taladros de más de 25 a 30 metros, este procedimiento es antieconómico. Si, además, hay que proceder a un nuevo tratamiento de los taladros, la inyección por fases descendentes resulta a un coste prohibitivo. Con los tubos manguitos, el coste de la perforación se incrementa poco en relación con el aumento de la longitud de los taladros.

Estas consideraciones económicas han motivado la decisión de inyectar las filas exteriores por fases descendentes, y las interiores por tubos manguitos, pues las filas exteriores tenían una longitud máxima de 25 metros, no estando prevista una reinyección de dichas filas; por el contrario, en las tres filas centrales la longitud de los taladros debía sobrepasar los 40 metros y, además había que repetir las inyecciones mediante mezclas de diversas características, para conseguir una permeabilidad de los aluviones inyectados inferior a 3×10^{-4} cm./seg., valor acorde con la permeabilidad obtenida en la mayoría de los casos y que evita pérdidas de agua de consideración, al mismo tiempo que asegura la estabilidad de la capa de limos.

Para las inyecciones se han previsto cuatro tipos de mezcla:

- La primera está constituida por una suspensión de arcilla y cemento, que, una vez fraguada, debía poder seguir las deformaciones del terreno sin romperse, a pesar de la elevada compresibilidad de los limos. Por consiguiente, era necesario tener una dosificación pequeña de cemento en estas mezclas, habiéndose hecho la elección de tal manera que, una vez endurecida, la mezcla ofrece una resistencia a la compresión del orden de 2 Kg./cm.² a los siete días. Esta primera mezcla sirve para el tratamiento del terreno a través de todos los taladros, salvo los de la fila central. Anteriormente se había comprobado en las pruebas de inyección que los aluviones gruesos eran fácilmente inyectados por esta mezcla de arcilla-cemento.
- La segunda mezcla de inyección debía estar formada por suspensión de arcilla dispersada. En realidad, debido a las características de las arcillas disponibles conteniendo un alto porcentaje de granos relativamente gruesos, se decidió, durante el curso de la obra, sustituir la arcilla por bentonita previamente tratada, para formar un gel. Esta segunda mezcla sirve para completar el tratamiento en las filas intermedias y empezar el de la fila central.
- La tercera mezcla está constituida por gel de silicato, que penetra en los terrenos de grano fino, no inyectables con las dos primeras mezclas. Este gel debe completar el tratamiento por la fila central únicamente, siendo las cantidades a inyectar variables

según el resultado obtenido en las inyecciones de las dos primeras fases.

- Finalmente se emplea una cuarta mezcla de inyección, formada otra vez por mezcla de arcilla-cemento que se inyecta a gran caudal, a través de los tubos de la fila central, con objeto de romper el terreno y formar en el interior de los aluviones tratados una red de fisuras llenas de lechada. Esta cuarta y última fase estaba únicamente prevista a través de los taladros de la fila central.

Se estimó que las absorciones totales de estas distintas mezclas serían de unos 13 200 metros cúbicos.

En el proyecto se había previsto limitar la velocidad de inyección, ya que la experiencia ha demostrado que, al aumentar el caudal, la mezcla deja de penetrar por los aluviones y, provocando la rotura del terreno, se escapa de la zona a inyectar.

En la presa de Arbón se fijó el caudal máximo en 1,5 m.³ de mezcla por hora de inyección para la suspensión de arcilla-cemento, y en 1 m.³/hora para la inyección de bentonita y de gel de silicato. No se ha limitado el caudal en la cuarta mezcla de inyección.

III. EJECUCION DE LAS INYECCIONES

El plazo previsto para la ejecución de la pantalla en los aluviones era de seis meses. En este tiempo había que inyectar los 13 200 m.³ previstos de lechada de distintos tipos.

Además de los cuatro tipos de mezclas para el tratamiento en sí de los aluviones, había que prever una mezcla especial de sellado de los tubos manguitos y una suspensión de cemento para la inyección de la roca en prolongación de la fila central de taladros.

Para cumplir los plazos fijados en estas condiciones y cuidar, a la vez, de no aumentar en forma exagerada el personal de ejecución y de control, fue preciso proceder a la construcción de una central automática de inyección. En dicha central, la preparación de las mezclas se hizo en dos fases:

- En la primera fase se prepararon las mezclas llamadas primarias, consistentes en:

- suspensión de arcilla;
- suspensión de cemento;
- suspensión en bentonita;
- silicato diluido en agua;
- otros productos químicos en solución.

Un laboratorio de obra controlaba permanentemente la buena ejecución de las mezclas primarias.

Era difícil obtener una suspensión de arcilla que tuviese siempre las mismas características, ya que la arcilla llegaba a la obra con un contenido natural de agua.

Con objeto de homogeneizar la suspensión, se construyeron cuatro depósitos con una capacidad total de 70 m.³, de los que el primero servía, al mismo tiempo, de depósito de decantación de los elementos arenosos de la arcilla. Las otras mezclas primarias eran de más fácil preparación, por lo que los depósitos de las demás suspensiones o soluciones fueron de pequeño tamaño.

- En la segunda fase de preparación, unas mezcladoras especiales fabricaban automáticamente las mezclas a inyectar, llamadas mezclas secundarias, a partir de los depósitos de mezclas primarias. Aunque estas mezclas secundarias tenían propiedades constantes debido al automatismo de la instalación, eran también controladas en el laboratorio de la obra.

Siempre automáticamente, las mezcladoras secundarias alimentaban los inyectores por medio de contadores de volumen, uno por inyector, que transmitían al puesto de mando de la central, en cada instante, la cantidad de mezcla inyectada. De esta manera era fácil, con un solo hombre, saber en cualquier momento la cantidad inyectada por cada inyector, conocer el caudal de inyección y dar a la obra las órdenes necesarias para cambiar de zona a tratar, una vez terminada la inyección de un tramo con las absorciones previstas.

El automatismo de la central ha hecho fáciles los cambios de mezclas, y ha permitido un consumo diario de hasta 200 m.³ de mezclas, a pesar de la limitación en el caudal de inyección y el volumen — relativamente pequeño — a inyectar en cada tramo de sondeo.

La inyección se ha iniciado a través de los taladros de las filas exteriores a baja presión (8 a 12 atmósferas), aumentando ésta muy poco (10 a 15 atmósferas) al tratar las filas interiores. Hasta los tratamientos finales no se dejó subir la presión a más de 15 atmósferas, a excepción de las inyecciones finales de rotura de terreno.

IV. CONTROL Y OBSERVACIONES DURANTE LAS INYECCIONES

a) *Caudal de filtración a través de los drenes.* — Para permitir los trabajos en el río, se ha procedido a la construcción de una ataguía y un túnel de desvío (ver fig. 1.^a). La ataguía estaba constituida por materiales impermeables; pero se apoyaba sobre los aluviones sin tratar, por lo que era de prever un importante caudal subterráneo en ellos.

Para los trabajos de inyección debía ejecutarse una plataforma de trabajo que cruzara el río, formada asimismo por limos prácticamente impermeables. Al principio, el caudal subterráneo pasaba también por debajo de la plataforma, pero, a medida que se impermeabilizaban los aluviones, debía preverse un aumento del nivel del agua en el espacio comprendido entre ataguía y plataforma. Para evitar este fenómeno, se colocaron unos drenes que atravesaban la plataforma (ver fig. 2.^a). Así, pues,

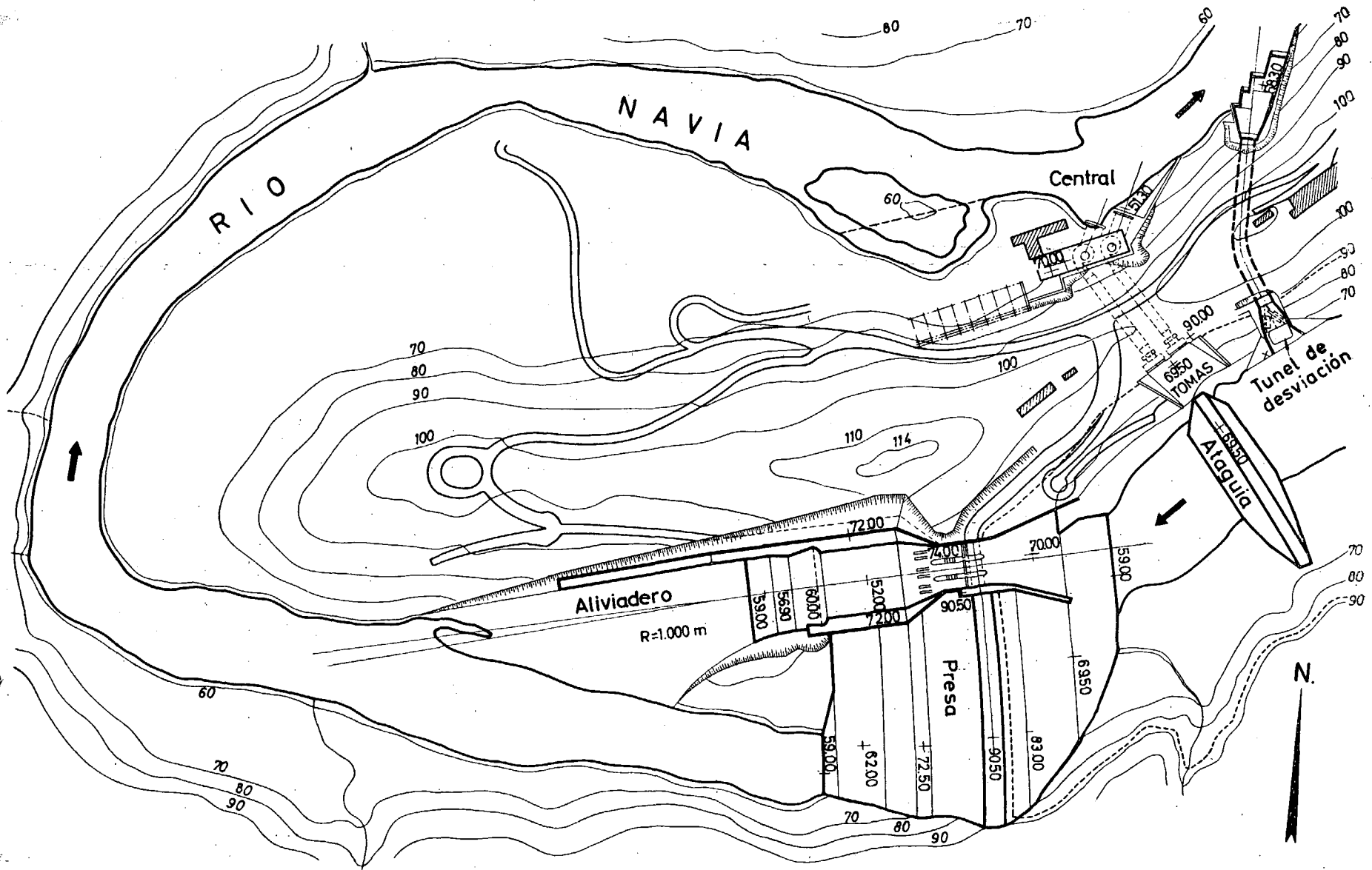
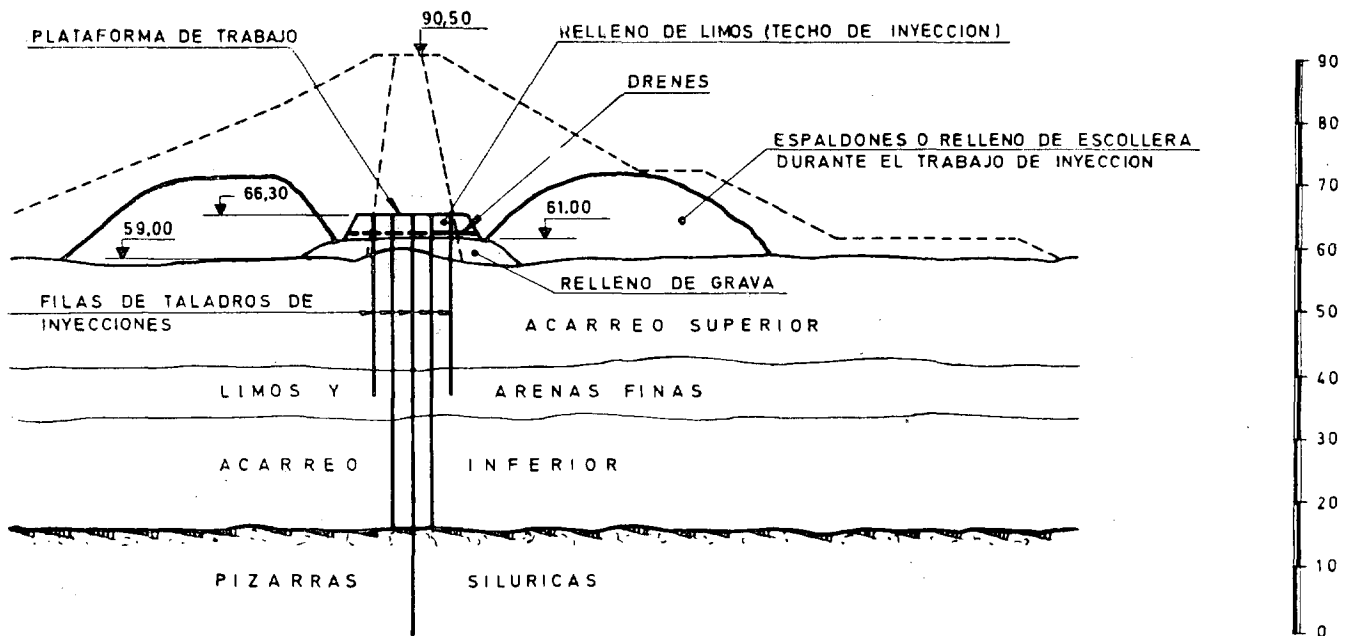


Fig. 1.^a — Emplazamiento general.
(General layout).

Corte transversal de la pantalla

(Cut off transversal cross section)



Corte longitudinal de la pantalla

(Cut off longitudinal cross section)

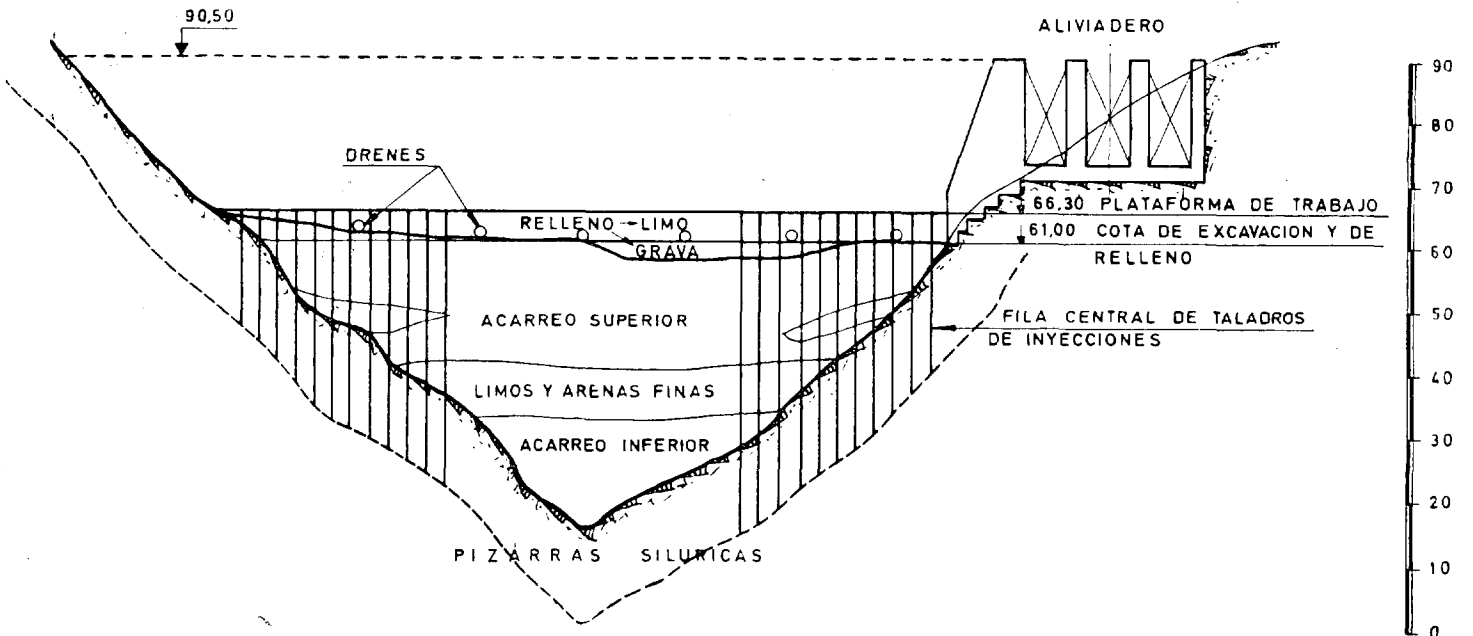


Figura 2.^a

Fecha (1965)	10-4	30-6	13-8	30-11
Nivel del agua, aguas arriba de la ataguía m.	63,5	63,21	65,5	64,0
Idem, id. aguas abajo	—	62,22	62,4	61,5
Nivel del agua, aguas abajo de la plataforma	—	60,3	60,3	—
Caudales en los drenes en lit./seg.	0	83	140	350
Anchura ataguía	—	40	40	40
Gradiente a través de la ataguía $\times 10^2$	—	2,2	2,8	6,3
Caudal/gradiente, en $\text{cm}^3/\text{seg. } 10^{-5}$	—	38	50	56
Sección de los aluviones	—	—	2.600	2.600
Coefficiente de permeabilidad K en $\text{cm.}/\text{seg. } \times 10^2$	—	—	19	22

el caudal a través de los drenes daba, en cada momento, una idea sobre la eficacia de la pantalla en un determinado instante y el progreso de la impermeabilización.

En el presente cuadro se indican los caudales que pasan a través de los drenes y el coeficiente de permeabilidad de los aluviones obtenido, admitiendo que estos caudales son iguales a los que pasan por debajo de la ataguía. Para ello nos hemos basado en la hipótesis de que la pantalla es totalmente impermeable.

A través de los drenes se han obtenido los valores y caudales que se indican a continuación:

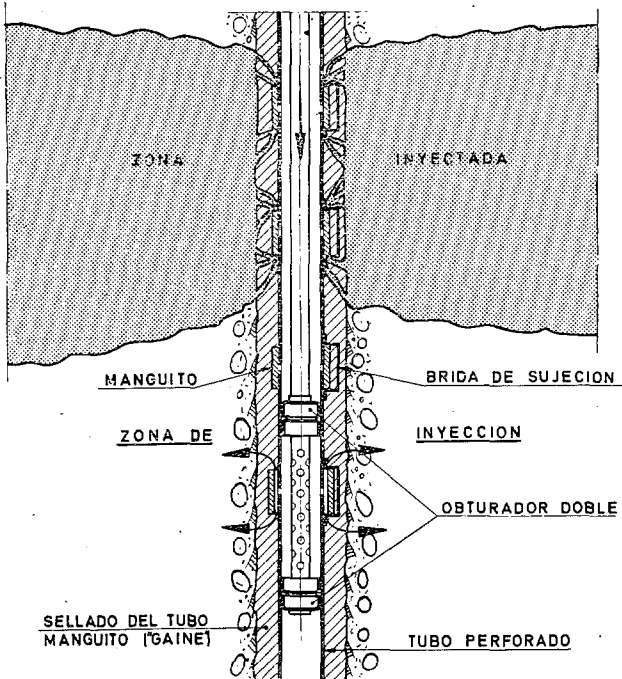


Fig. 3.^a — Tubo manguito.
(Sleeve tube).

De este cuadro se deduce:

- La permeabilidad relativa de la pantalla, en relación con la permeabilidad natural de los aluviones, es prácticamente nula.
- La permeabilidad inicial media de los aluviones es del orden de $20,10^{-2}$ cm./segundo, si se admite un contacto perfecto entre ataguía y aluviones, lo que parece ser el caso.

El 30 de junio estaban acabadas las inyecciones de las filas exteriores. Faltaba por tratar una sexta parte de las filas intermedias mediante arcilla-cemento. El 13 de agosto se habían acabado, prácticamente, las inyecciones con bentonita, y el 30 de noviembre se consideró el tratamiento de la pantalla concluido.

b) *Nivelación.* — Al principio de una inyección de acarreo, la lechada penetra en los espacios comprendidos entre los granos, y puede, en caso de acarreo sueltos, actuar como lubricante, provocando algún asiendo al aumentar la compacidad del terreno. Pero a medida que éste se satura, la lechada encuentra mayor dificultad de penetrar en él y lo rompe, formando lentejones que, al aumentar de espesor, provocan un levantamiento del suelo. La colocación de puntos de nivelación permite normalmente observar estos fenómenos y suspender las inyecciones después de obtener la saturación del terreno.

En Arbón se colocaron siete testigos de movimientos del terreno; pero la presencia de la capa de limo de alta compresibilidad no ha permitido conocer con exactitud los levantamientos, ya que el terreno ha comenzado a asentarse, en parte por el peso propio de la plataforma de trabajo y, en parte, por los espaldones que se han colocado durante el trabajo de inyección (ver fig. 2.^a). Por este motivo, los levantamientos observados, de algunos centímetros solamente, han sido inferiores a los previstos.

El espaldón aguas arriba de la plataforma se colocó en primer lugar, lo que provocó un asiento diferencial

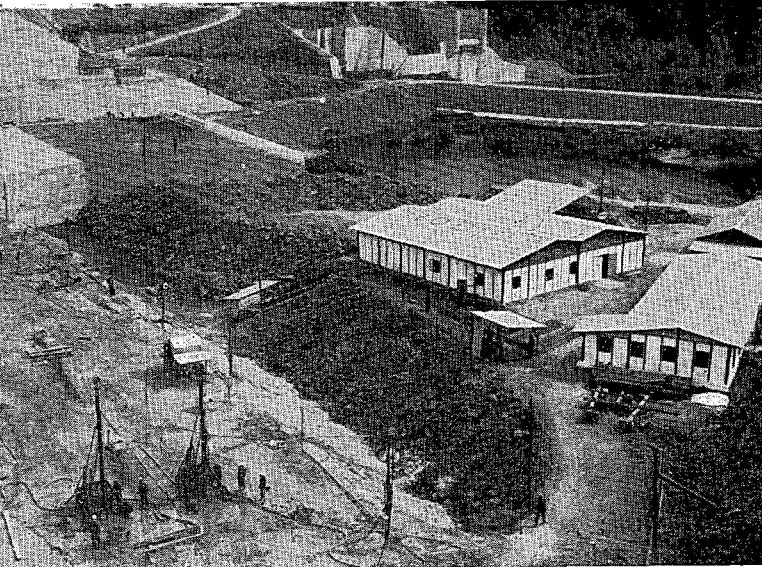


Fig. 4.^a— Vista general de la obra.
(General view of the site works).

de 3 cm. en la sección transversal central de la plataforma, que ha desaparecido durante la colocación del espaldón agua abajo.

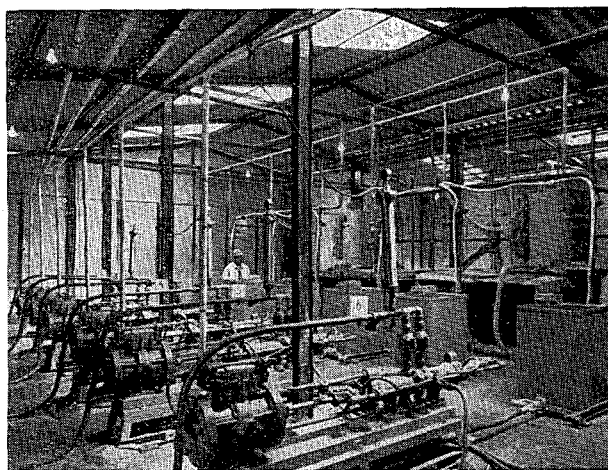


Fig. 5.^a— Central de inyección. Sala de máquinas.
(Grouting plant: pumps room).

Estos primeros puntos de nivelación desaparecieron durante el desmontaje de la plataforma de trabajo; pero antes, y durante la colocación del núcleo y de los espaldones de la presa, se emplazaron nuevos puntos de nivelación para medir los asentamientos de los cimientos de la misma (ver fig. 8.^a).

c) *Pruebas de permeabilidad.*— Los controles de filtraciones y de asentamientos dan un valor cualitativo de la eficacia de la pantalla. Pero es necesario tener valores

cuantitativos de su permeabilidad, lo que se obtiene haciendo sistemáticamente pruebas de permeabilidad del terreno después de cada tratamiento: arcilla-cemento; bentonita; productos químicos.

Las pruebas de permeabilidad para controlar la eficacia del tratamiento mediante arcilla-cemento, se ejecutaron a través de taladros colocados sobre las filas 2 y 4; la distancia entre taladros de una misma fila fue de 24 metros y, entre taladros más próximos, de 13,50 metros. En cada taladro de control se hizo una prueba cada 3 metros; de esta manera se pudieron dibujar mapas de permeabilidades, que sirvieron para fijar el volumen de inyección de la segunda fase, o sea, inyección de bentonita.

En el proyecto estaba previsto continuar las inyecciones de arcilla-cemento, si en algún punto de control la permeabilidad hallada era superior a $50 \cdot 10^{-4}$ cm./segundo. Como la máxima medida fue tan sólo de $33 \cdot 10^{-4}$ cm./seg., no se consideró necesario seguir con el primer tratamiento. En cuanto a la permeabilidad media, fue de $4,8 \cdot 10^{-4}$ cm./segundo.

Las pruebas de control después de la segunda fase de inyección (bentonita), ejecutadas a partir de taladros en la fila central (un taladro cada 12 metros, una prueba cada 3 metros de sondeo), no dieron en algunas zonas los resultados apetecidos, por lo que fue preciso continuar allí con nuevas inyecciones de bentonita en las tres filas centrales de taladros, antes de acometer las inyecciones de productos químicos.

El control después de las inyecciones finales (productos químicos) se efectuó en la zona de la fila central, siendo la distancia entre taladros de control de unos 18 metros. En el mapa de permeabilidad obtenido con estos controles (fig. 7.^a), se observa una insuficiencia de la impermeabilización en la margen derecha, que ha sido

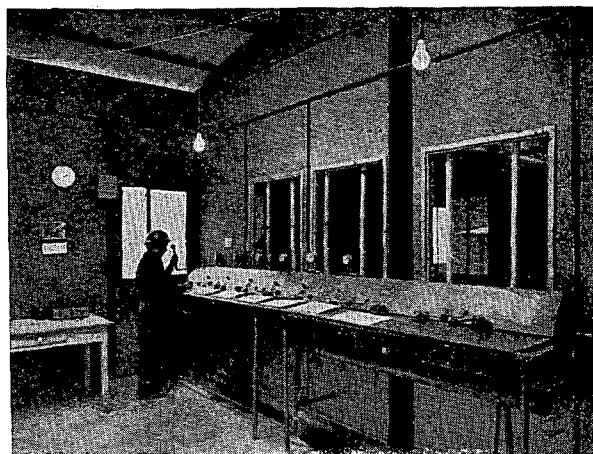


Fig. 6.^a— Central de inyección. Sala de mando.
(Grouting plant: commanding room).

Margen izquierda

Margen derecha

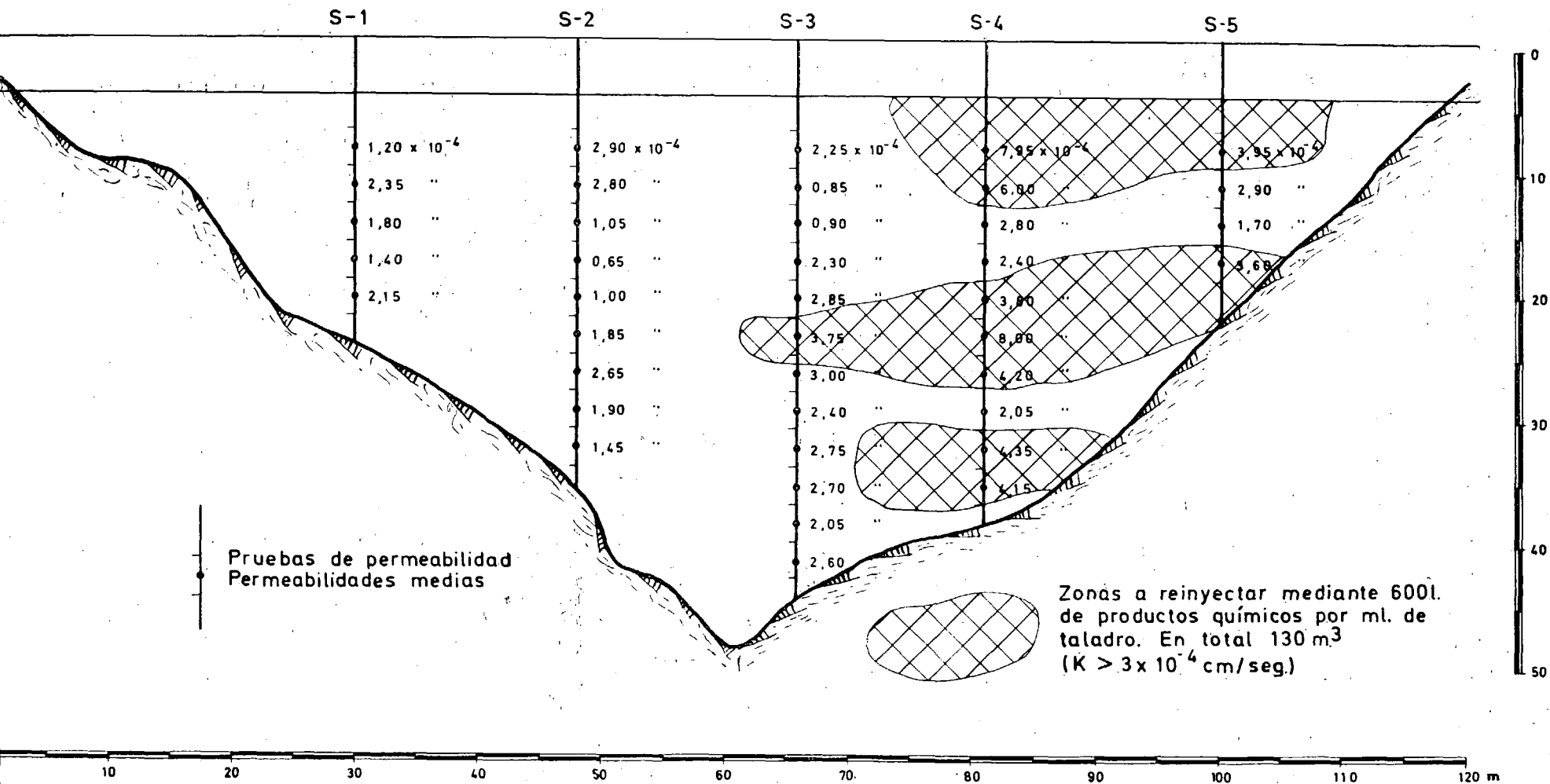
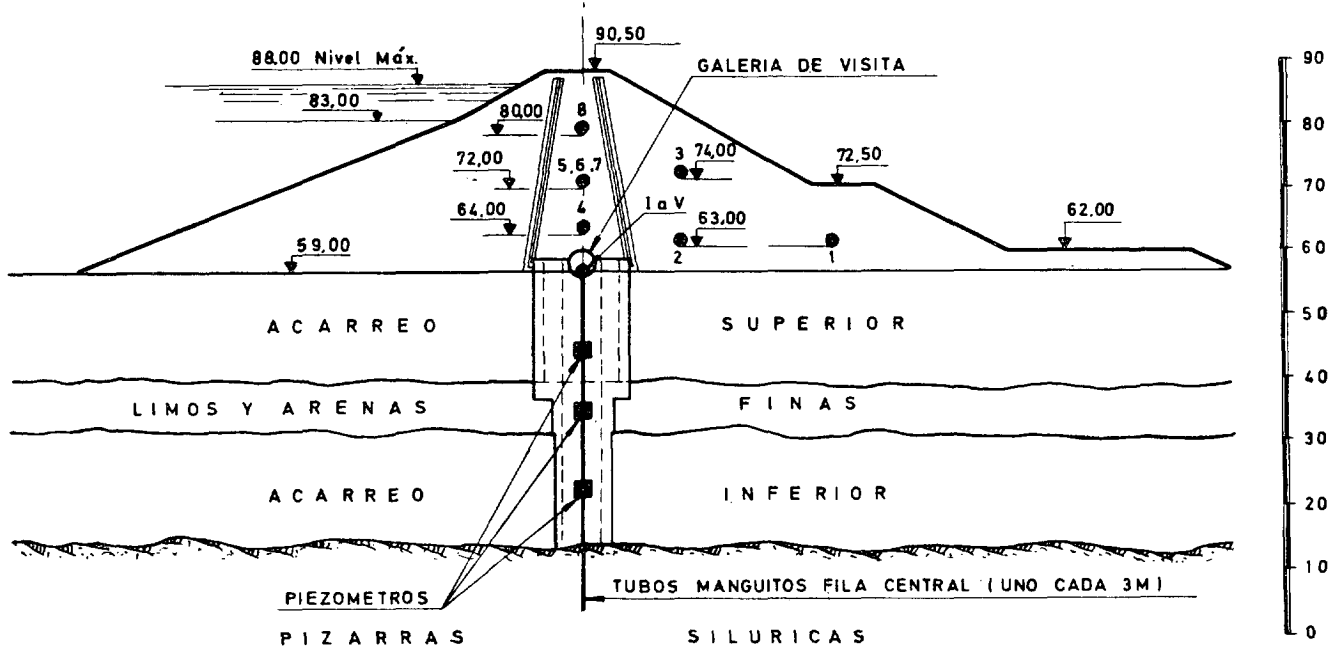


Fig. 7.^a— Mapa de permeabilidad después de las primeras inyecciones de productos químicos. Valor de la permeabilidad en cm./seg. (Permeability chart after primary chemical grouting. Permeability in cm./sec.).

Corte transversal de la pantalla (Cut off transversal cross section)



Corte longitudinal de la pantalla (Cut off longitudinal cross section)

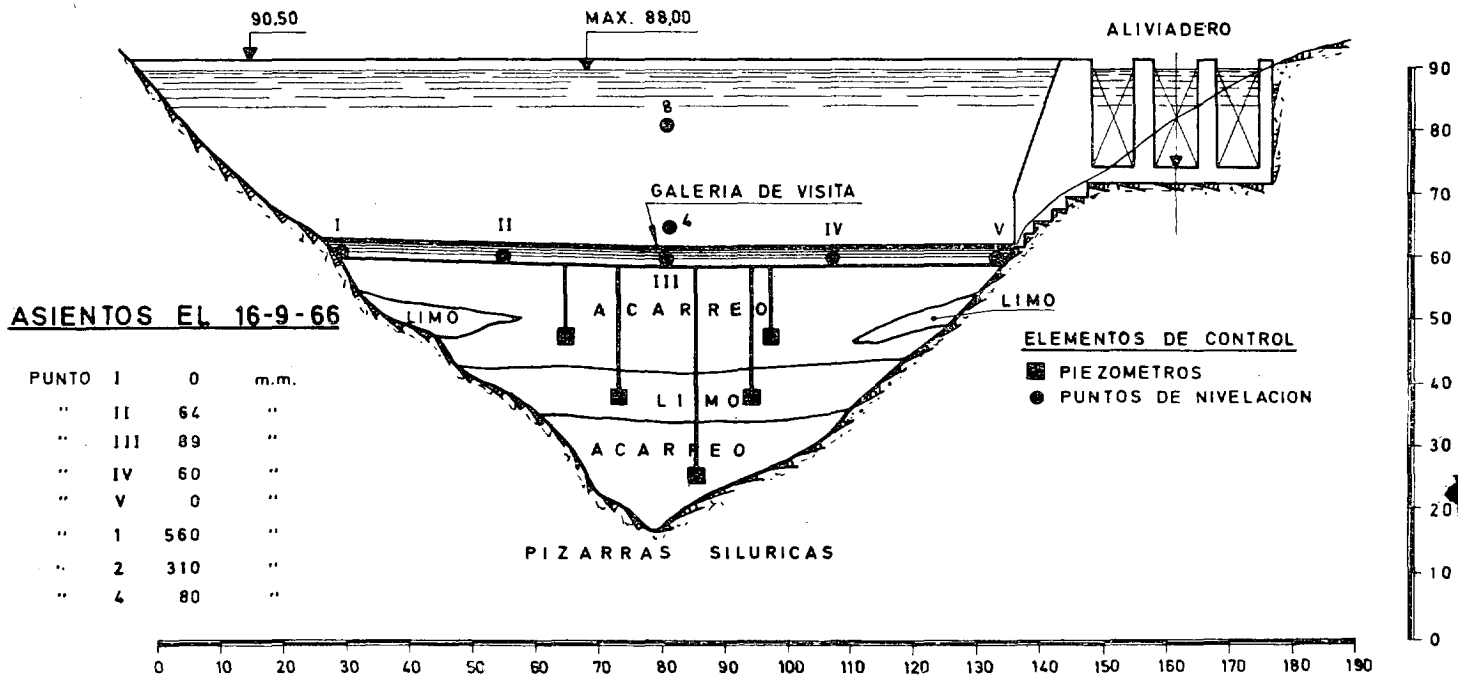


Fig. 8.^a— Situación de los niveles y piezómetros.
(Location of reference plates and piezometers).

inyectada nuevamente. En esta margen derecha se habían observado ya permeabilidades más elevadas después del primer control.

Durante la perforación de los taladros de control, se observó de manera cualitativa el progreso de las inyecciones. El agua de perforación no penetraba en el terreno visiblemente; y salía por la boca del taladro. Además las perforaciones fueron muy costosas en los últimos taladros de control, con un rendimiento del 20 por 100 del logrado en terreno no inyectado, a pesar de la débil resistencia intrínseca de los productos de inyección.

V. CONTROLES Y OBSERVACIONES DURANTE LA CONSTRUCCION DE LA PRESA

En la presa de Arbón, a diferencia con las demás presas de tierra, se ha previsto una galería de visita al pie del núcleo impermeable, empotrada en los aluviones inyectados. En esta galería desembocan los piezómetros y tubos manguitos de la fila central, que permiten una eventual reinyección y sirven, al mismo tiempo, de drenes. En efecto, cuando se termina una inyección a través de un manguito, queda siempre una cierta cantidad de mezcla entre éste y la tubería que impide su cierre perfecto. El manguito queda suficientemente cerrado para evitar normalmente la entrada de material, pero no la del agua, por lo que se sellan los tubos con cemento, cuando se estima que han terminado las inyecciones. Con la galería de visita, queda siempre la posibilidad de volver a utilizarlos, por lo que no se han rellenado estos tubos manguitos de la fila central.

Durante la excavación para la ejecución de la galería, que ha llegado a una profundidad de 1,50 metros por debajo del nivel de la capa freática, se pudieron observar los aluviones inyectados transformados en conglomerados impermeables, así como capas de fango o limos consolidados. De particular interés era observar el camino de las inyecciones de rotura, sobre planos inclinados y verticales en zonas de relleno, y sobre planos horizontales en los aluviones naturales. El grado de homogeneización del acarreo que procuran las inyecciones, no permitió se produjeran en ellos roturas verticales.

Actualmente, la solera de la galería se encuentra entre 1,50 y 3,50 metros por debajo del nivel de la capa freática, por lo que es fácil medir caudales a través de los drenes y tubos manguitos. Son, en general, muy pequeños, a veces apenas medibles, y demuestran que la

permeabilidad real de la pantalla es, probablemente, inferior a la que se determinó por los taladros de control. Únicamente en la margen derecha, a débil profundidad, se ha detectado una zona de un par de metros de espesor y de unos 40 metros de largo, que tiene una permeabilidad del orden de $15 \cdot 10^{-4}$ cm./seg., o sea, cinco veces más permeables de lo previsto. La presencia de los tubos manguitos y la localización clara de este defecto, hizo que careciera de importancia práctica, habiéndose realizado, con éxito, nuevas inyecciones en corto plazo, al mismo tiempo que las inyecciones de cosido entre núcleo y roca en ambas márgenes.

Se estima que el origen del plano permeable se debe a la presencia de acarreo gruesos (señalados en la figura 2.^a) en esta zona del relleno, muy permeable. Sobre ese acarreo grueso se apoyaba la plataforma de limos que sirvió de techo de inyección.

La solera de la galería de visita, excavada en los aluviones inyectados, ha sufrido un asiento máximo de 8,9 cm. hasta el 16 de septiembre, y de 16,6 cm. hasta el 8 de octubre de 1966, con una altura media de presa de 16 y 22 metros, respectivamente.

Los dos puntos de nivelación en la escollera, a unos 4 metros de altura sobre los aluviones — el primero al pie aguas abajo del núcleo y el segundo a unos 30 metros del primero — han asentado 31 y 56 cm., respectivamente, hasta el 16 de septiembre.

Estos valores indican que las inyecciones en los limos han conseguido uno de sus objetivos, que era el de disminuir los asientos de los aluviones superiores inyectados y preservar así la pantalla y el núcleo de la presa de deformaciones excesivas. Esta disminución de los asientos afecta igualmente al punto de la escollera más próximo a la pantalla de inyecciones.

VI. CONCLUSIONES.

En la presa de Arbón se ha realizado una pantalla de impermeabilización de los aluviones bajo el núcleo de la presa. Para esta ejecución se han tenido en cuenta las experiencias habidas en obras similares y el resultado de pruebas de inyección en el lugar de la obra, efectuadas en años anteriores.

En total se inyectaron unos 14 000 m.³ de mezclas de inyección, o sea, una cantidad muy poco superior a los 13 200 m.³ previstos en el proyecto. Técnicamente, estas

inyecciones se justifican plenamente, ya que evitan el peligro de arrastre de los aluviones por las filtraciones, con posible destrucción de la presa. Esta pantalla tiene, igualmente, una justificación económica. En efecto, hemos observado que con un desnivel de 1,10 metros entre aguas arriba y aguas abajo de la ataguía no inyectada, existía un caudal de filtración a través de la misma, de 140 l./seg., caudal que aumentaba proporcionalmente con la diferencia de nivel, por lo que puede admitirse que, a embalse lleno, la pantalla evitará el paso de unos 3 m.³ de agua por segundo, o sea, 100 millones de metros cúbicos por año, teniendo en cuenta que la altura

de salto útil es del orden de 25 metros, este agua representa una energía del orden de 6 millones de kWh./año.

El éxito de esta obra de pantalla de impermeabilización en aluviones abre perspectivas interesantes para futuras obras de este tipo en España.

Queremos evidenciar que este trabajo ha sido posible gracias a la estrecha colaboración existente entre la Sociedad Electra de Viesgo, Sociedad Anónima, y la Empresa especialista encargada de la obra, Cimentaciones Especiales, S. A. — Procedimientos Rodio.