

PANTALLAS CONTINUAS DE ARCILLA COMPACTADA EN LA IMPERMEABILIZACION DEL TERRENO

Por FEDERICO MACAU VILAR
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Como es sabido, la impermeabilización de un terreno consiste en anular la posibilidad de circulación de agua por su interior.

En la práctica, esta impermeabilización puede conseguirse ya sea por una interrupción total de las posibles corrientes de agua, o bien por un alejamiento de éstas fuera de la zona de la que se interesa su estanquidad, y para ello existen principalmente dos sistemas que, en principio, se basan: uno, en rellenar los espacios huecos del terreno con alguna substancia que no deje pasar el agua, y que no sea ni disuelta ni arrastrada por ella, y el otro, en incorporar al terreno un obstáculo continuo de algún material que interrumpa cualquier paso de agua.

Dentro del primer sistema entran todas las prácticas de inyección, congelación, electroósmosis, etc., etc., y en el segundo, la construcción de obstáculos continuos, hasta ahora casi exclusivamente de hormigón o metálicos (tablestacados), o últimamente de pantallas continuas de arcilla, como las que por primera vez hemos proyectado y construido en nuestro país y de las que vamos a ocuparnos en el presente trabajo, cuyo objetivo es solamente dar a conocer este sistema, cuya concepción y construcción para ciertos casos particulares nos ha dado, hasta el presente, muy buenos resultados, y aunque no se tenga verdaderamente gran experiencia de los mismos, puesto que es la primera vez que lo hemos empleado, precisamente por ello, creemos que puede tener cierto interés su divulgación.

Antes de entrar en la descripción de éste, para nosotros nuevo procedimiento de impermeabilización, vamos a hacer algunas consideraciones constructivas y geológicas sobre deter-

minados tipos de terreno en los que dicho sistema nos ha parecido adecuado y que son precisamente las que nos han inducido a llevarlo a la práctica.

El sistema de impermeabilización de un terreno por medio de inyecciones, consiste básicamente en conseguir el relleno de sus huecos o espacios vacíos, por medio de algún producto que, introducido y permaneciendo en ellos, obture el paso del agua y no sea, como hemos dicho, ni disuelto ni arrastrado por ella; este producto, llamado genéricamente "lechada o colada de inyección", puede ser cemento, arcilla, arena, ciertos productos químicos o determinados hidrocarburos, empleados solos, o algunos de ellos mezclados entre sí.

En principio, existen hoy día tal gama y variedad de estos materiales que, prácticamente, puede decirse que siempre se puede encontrar uno que resulte teóricamente aplicable a cualquier caso determinado.

Ahora bien, la eficacia de su aplicación no depende sólo de la naturaleza del producto que se emplea, sino también, además, y de un modo determinante, del estado del terreno y de la presión necesaria para introducir aquéllos en éste, factores ambos que al condicionar la cantidad de material a inyectar, la densidad de los puntos donde aplicar la inyección y la capacidad del terreno para admitir las presiones necesarias, son los que en definitiva limitan la posibilidad técnico-económica de la inyección.

El más condicionante de estos factores es evidentemente la naturaleza del terreno, sobre la que vamos a fijarnos de momento en el caso de que esté formado por un macizo de roca fisurada, entendiéndose por tal cualquiera que en su constitución interna presente alguna discon-

tinuidad, que puede manifestarse desde luego a cualquier escala.

En este orden de cosas cabe incluir en este sentido, como tal discontinuidad desde los pla-

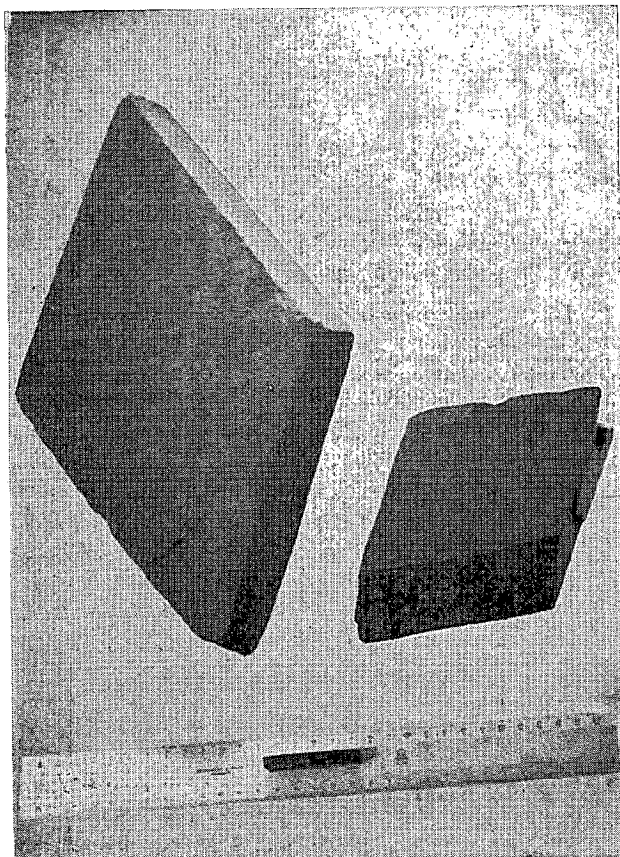


Foto 1. — Bloques de una arenisca cuarcitosa limitados por los planos de un sistema conjugado de diaclasas que les dan una morfología geométrica pseudocristalina de relativa constancia.

nos de exfoliación cristalina, a las grandes fallas, pasando por todos los estados intermedios de diaclasado, estratificación, esquistosidad, fracturación, carsticidad, etc., etc.

Por otra parte, es de mucho interés también tener en cuenta que la forma cristalina de los minerales solamente es estable bajo determinadas condiciones de presión y temperatura, de modo que si no fuera por la existencia de las fuerzas de viscosidad interna de los mismos, la mayoría de estas formas no subsistirían hoy día en la corteza terrestre, y, por tanto, el solo hecho de la variación ambiental origina en el in-

terior de una masa rocosa, por esta tendencia más o menos contenida o frenada, una serie de tensiones que afectan directamente a las uniones moleculares establecidas entre los elementos minerales que la componen, y, en consecuencia, producen en su íntima estructura otra forma especial de discontinuidades que pueden llegar a tener gran importancia.

Otros fenómenos como los de alteración, recristalización, metamorfismo, etc., etc., provocan con frecuencia la destrucción de la unión intercristalina de los componentes de las rocas, dando lugar a importantes microfracturas en su interior, o sea, a nuevas discontinuidades, que por su parte pueden ser sin duda el germen de una futura porosidad.

Las diaclasas, como recordará el lector, son sistemas de planos de rotura paralelos, propios de las rocas duras, provocados por las tensiones de compresión, tracción o torsión que sobre ellos se ejercen o se han ejercido durante los grandes movimientos orogénicos que las han afectado, o los de acoplamiento que de ellos se han derivado posteriormente.

Estas series de planos se agrupan en tres direcciones conjugadas, que dividen la roca en paralelepípedos oblicuos, de las que siempre una es más importante que las demás, y que es la que resulta por ende la más visible. Si las tres son de análoga importancia, pueden producir en las rocas formas de apariencia pseudo-cristalinas, incluso con una relativa constancia geométrica (foto 1).

La superposición de varios sistemas de diaclasas puede provocar un estado tal de fracturación en las rocas, que llegan incluso a tener en ciertas zonas una estructura cataclástica superpuesta a la primitiva; y siempre todas estas discontinuidades son caminos de penetración muy favorables a la acción de los fenómenos de alteración, meteorización, erosión, etcétera, etc., que resultan ser los puntos débiles por donde se inicia la destrucción de la roca (foto 2).

En estos casos de extrema fragmentación alcanzada por la presencia de varios sistemas de diaclasado superpuestos, se presentan, en los macizos rocosos interesados, dos características determinantes:

- La existencia de unos planos de diaclasado mucho más importantes que otros, que producen discontinuidades muy acentuadas que a veces pueden llegar a ser hasta del orden de centímetros.
- Una gran densidad de otros planos de diaclasado de mucha menos importancia en cuanto a separación de las caras de la diaclasa, pero de gran influencia por su número.

Este fenómeno trae consigo grandes dificultades y graves inconvenientes para tratar el terreno por el sistema corriente de inyección normal.

En efecto, si la inyección se verifica a la presión necesaria, resultante del cálculo correspondiente al objetivo primario del relleno de las diaclasas grandes, se quedan muchas de las otras más finas sin tratar, con lo que el resultado final de la inyección es en gran parte inoperante y el terreno se queda sin impermeabilizar totalmente; por el contrario, si la inyección se estudia y se prepara para que resulten selladas las diaclasas pequeñas, se requieren entonces dos cosas, o unas presiones mucho más fuertes de lo normal y, en general, superiores a las que puede resistir la estructura presente del terreno, o una densidad de puntos a inyectar mucho mayor que la corriente, o que la prácticamente económica.

En el primero de estos últimos casos, se corre el riesgo de desbaratar la estructura del terreno con efectos contraproducentes al fin previsto. En el segundo, el trabajo a realizar resulta mucho más costoso por la mayor cantidad de taladros que hay que perforar y por la mayor laboriosidad que requieren las consiguientes operaciones de inyección.

En ambos casos es evidente que el sistema resulta, en resumen, inapropiado o antieconómico.

A las mismas conclusiones se llega en otros casos con terrenos completamente distintos, si se trata, por ejemplo, de un terreno constituido heterogéneamente por elementos suficientemente grandes y de naturaleza distinta, como pueden ser arcillas y areniscas o conglomerados o calizas, resulta que estará formado por zonas permeables y otras impermeables, si esta variación obedece a una estructura sedimentaria

del terreno en la que estas alternancias pueden conocerse más o menos exactamente, el problema puede tratarse por los métodos normales de inyección, pero si la heterogeneidad re-

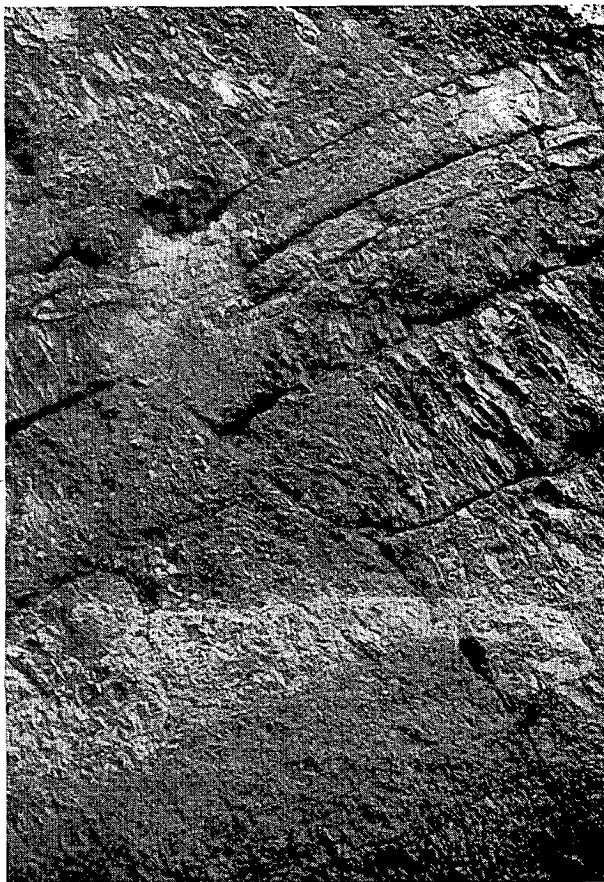


Foto 2. — Macizo calizo muy tectonizado y faliado con superposición de estructura cataclástica sobre la sedimentaria de origen.

sulta de un carácter detrítico o cataclástico del conjunto, las cosas se complican mucho más y la inyección resulta, como antes, inoperante o antieconómica, puesto que es prácticamente imposible determinar la densidad de los taladros de inyección que hay que realizar y además por la misma heterogeneidad de las zonas permeables y de su anárquica distribución en el conjunto de la masa a tratar, tampoco es previsible ni realizable una inyección a base de diversas dosificaciones con distintos tipos de lechadas, adecuados para cada clase de material, o estado y situación del mismo.

En este caso también parece mucho más

efectiva una impermeabilización a base de pantallas continuas de arcilla.

Por este sistema hemos proyectado en unos casos, o aconsejado en otros, pantallas de este tipo en varias presas, entre otras, por ejemplo, en la de Boadella, sobre el río Fluviá, en la provincia de Gerona; la de Manacor, sobre el arroyo S'Avall, y la de Campanet, en el de San Miguel, ambas en Mallorca; Algodonales sobre el río Guadalete, en la provincia de Cádiz; Tous, sobre el Júcar, en la provincia de Valencia, etcétera, etc.

A título de ejemplo, y sin otro objetivo que el de una divulgación del nuevo sistema que pueda servir de posible orientación para casos análogos, vamos a exponer a continuación los detalles de dos de ellos, el de Boadella, que ya se ha construido y probado, por lo menos experimentalmente, y el de Tous, que aunque proyectado con todo detalle, y hasta el presente aprobado, todavía no se ha iniciado su construcción.

II

Pantalla continua de arcilla construida en el "Collado dels Fangots", en la presa de Boadella.

La presa de Boadella sobre el río Muga (Gerona), constituye un embalse regulador de dicho río con una capacidad de unos 62 millones de m.³. Su objeto principal es el regadío de 12 000 Ha., además del abastecimiento de aguas de Figueras, segunda población en importancia de la provincia de Gerona.

La presa construida de hormigón en masa es de tipo gravedad, de unos 57 m. de altura, de planta recta y perfil triangular, con paramento de aguas arriba vertical y aguas abajo, con talud de 0,75, teniendo en coronación un ancho de 8 metros. El vertedero se dispone en su parte central, y consta de dos vanos de 15×3 metros, equipados con compuertas Taintor. Su capacidad total de evacuación ha sido calculada para un caudal del orden de los 475 m.³/segundo, en números redondos.

Además de esta obra principal, al objeto de aprovechar al máximo el vaso disponible, se completa el cierre del valle, con dos obras auxiliares de mucha menos importancia, una en el barranco de la Mola Truncada de unos 8 metros de altura, y otra de sólo 4 m. en el "Collado dels Fangots", muy cerca esta última del es-

tribo izquierdo de la presa principal y con alineación prácticamente en prolongación del eje de ésta.

En la zona del embalse, el terreno se encuentra formado fundamentalmente por dos tipos de roca. El primero y más extenso está constituido por un gran batolito de una roca ígnea de la familia de los granitos de características petrográficas bastante uniformes, y el segundo, por un conjunto de materiales sedimentarios diversos.

El collado antes citado se encuentra dentro de las del primer grupo, y lo forma una roca granuda, como hemos indicado, de la familia de los granitos, que presenta una gran abundancia de elementos ferromagnesianos, en algunas zonas alterados hasta bastante profundidad. El más abundante de estos elementos es la hornblenda, y se encuentra también con relativa abundancia la mica, que con frecuencia se han convertido en sericita y en clorita. El feldespato, que en su mayor parte es rosado, es el que presenta mayor alteración, y el cuarzo, como siempre, sin alterar, se presenta con granos grises, traslúcidos y de mayor tamaño que los del resto de sus componentes. A grandes rasgos puede considerarse este macizo formado, petrográficamente según las zonas, por un granito sienítico o una granodiorita.

Esta formación, en conjunto, se presenta externamente, como hemos dicho, en forma de un gran batolito, el cual se encuentra afectado por lo menos por dos sistemas completos de diaclasas con tres direcciones dominantes, dos de ellas de planos casi verticales y en esta zona inmediata a la cerrada, prácticamente paralelos a la dirección del río, aunque concurrentes entre sí.

Los otros planos secundarios resultan con direcciones casi normales a los primeros. Como consecuencia de ello, el conjunto se presenta muy cuarteado, ofreciendo los frentes de excavación el aspecto paralelepípedo que puede apreciarse en las fotografías 3 y 4.

Estas diaclasas, aunque cerradas en profundidad, han constituido en las zonas superficiales los caminos de penetración de los agentes productores de la alteración que presenta la roca, cuya meteorización se ha desarrollado por lo general a partir de estas superficies. Las diaclasas más abiertas se encuentran parcialmente rellenas de arcillas o caolín en estado plástico, causa muchas veces, en las perfora-



Foto 3. — Aspecto prismático de un frente de excavación del granito de Boadella producido por los sistemas de diaclasado que lo afectan.



Foto 4. — Detalle de la fotografía anterior.

ciones de galerías, de desprendimientos en su interior de bloques de diverso tamaño.

A la existencia de estas diaclasas abiertas y semirrellenas, se debe también la permeabilidad de que adolece el terreno, comprobada por la llegada del agua durante las épocas lluviosas, desde la superficie del terreno hasta las galerías abiertas longitudinal y transversalmente al collado durante la fase de estudio, y con las pruebas de agua y de inyección de lechadas, realizadas en el terreno con este objeto, frente a dichas galerías, antes y después de su excavación.

La abundancia de estas diaclasas y las grandes diferencias de tamaño y abertura que presentan entre sí, son precisamente el principal inconveniente que ofrece la impermeabilización del terreno por medio de inyecciones, como se intentó en las citadas pruebas realizadas cuidadosa e insistentemente durante la indicada fase de estudios inicial.

En profundidad, repetimos, el granito se encuentra en estado fresco y sano, pero con los sondeos de reconocimiento realizados, así como con las excavaciones de las galerías abiertas y las de la propia excavación en los estribos de la presa, se comprobó que la alteración superficial de la roca interesa en la zona del collado, una profundidad del orden de los 17 a 20 metros, después de la cual el granito, aunque a veces presenta todavía algún síntoma de alteración, es cuando es ya más duro y compacto y con aspecto análogo al del fondo del cauce del río donde se ha cimentado la presa principal.

La superficie de separación de estas zonas, o sea el límite inferior de la afectada por la alteración es bastante irregular, pero con los datos de los sondeos realizados, quedó perfecta y totalmente definida.

En el interior de la masa granítica, aparecen a veces en forma de grandes inclusiones lenticulares o de verdaderos diques, zonas formadas por la misma clase de material, aunque de grano bastante más fino, las cuales han soportado los ataques de la meteorización mucho mejor que el resto de la roca, por lo que en ellas conserva ésta su integridad y por ende sus condiciones normales, tanto de impermeabilidad como de una mayor resistencia.

Uno de los diques más importantes de esta naturaleza, es el que se desarrolla desde el fondo del cauce del río procedente de la margen

derecha y que asciende oblicuamente por la ladera izquierda en la situación que se señala en la figura 3.^a (planta general del Collado), desde más aguas abajo de la entrada del túnel de desviación hasta más allá de las edificaciones en las que se han instalado las dependencias y residencias de la Administración, cruzando el Collado dels Fangots, muy cerca por aguas arriba del estribo izquierdo del muro de cierre de este collado.

En el proyecto primitivo de la obra, se pensó para la impermeabilización de la zona del collado, en la construcción de un muro enterrado de hormigón, por presumirse de antemano la dificultad de poder lograrla por medio de otros procedimientos; sin embargo, la construcción de dicho muro ofrecía la desventaja de su gran carestía, no exenta de peligrosidad, toda vez que había que excavar a cielo abierto una zanja del orden de 20 metros de profundidad con una anchura mínima del orden de los 4 a los 6 metros de espesor para el hormigón, que aunque se pudieran rebajar a la mitad, y que se quedara el fondo de la zanja con 2 metros de ancho, su excavación presentaría, sin duda, serias dificultades, tanto más cuanto por el complejo sistema de diaclasas presentes en el granito, podrían producirse desprendimientos, que aun con todas las garantías de seguridad que deberían adoptarse para la obra, producirían por lo menos un exceso apreciable en el volumen de roca excavada, evitable sólo con adecuados, pero caros dispositivos de entibación.

En sustitución de dicho muro y aun cuando desde el principio ya sospechamos también las dificultades que íbamos a encontrar, antes de prescindir definitivamente del sistema de impermeabilización por medio de inyecciones, hicimos varios ensayos *in situ* empleando diversos procedimientos y probando dosificaciones y composiciones de lechadas de cemento y arcilla, solos y mezclados; pero como esperábamos, se pudo comprobar desde el interior de una de las galerías abiertas en su último tramo; después de las campañas experimentales de inyección, realizadas desde la superficie hasta cotas inferiores a los de la solera de aquélla, que en esta zona del collado la inyección se había extendido relativamente poco, a través solamente de las grandes diaclasas por las que penetró con relativa facilidad, pero quedando sin cerrar muchas de las más finas o estrechas en las

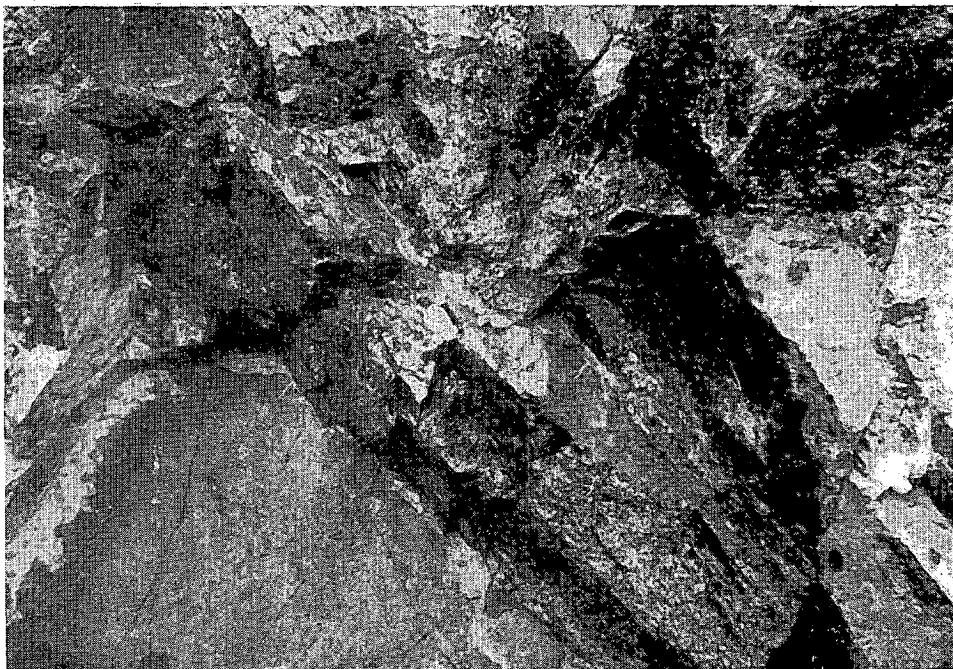


Foto 5. — Efecto parcial de las inyecciones de prueba, puesto al descubierto con la perforación del último tramo de una galería.

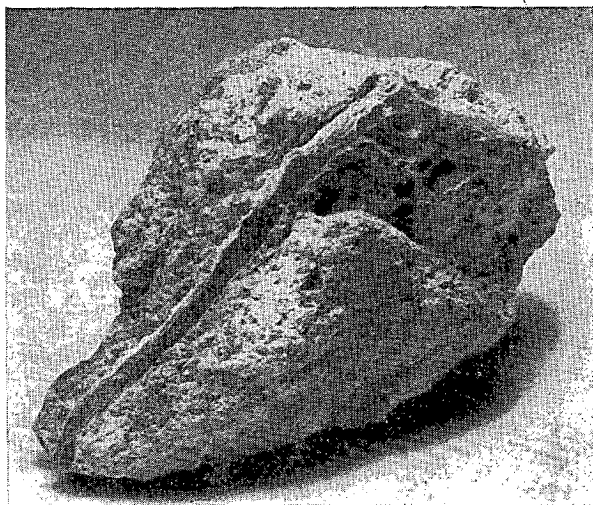


Foto 6. — Diaclasa cerrada por la inyección de lechada de cemento (5 mm. de espesor).

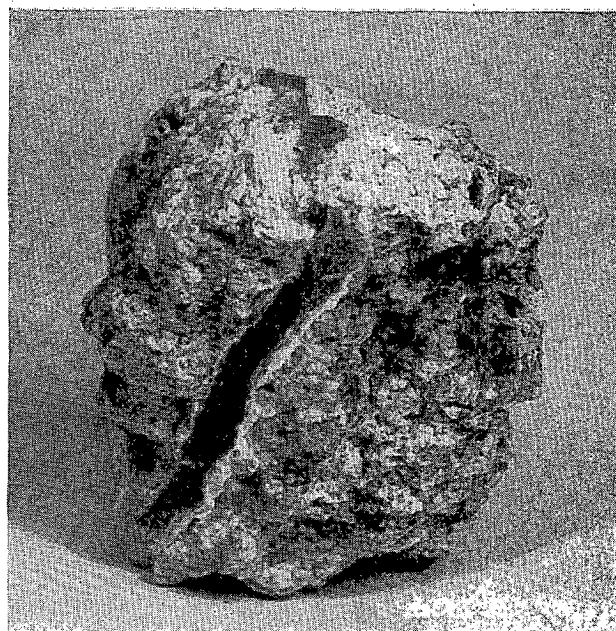


Foto 7. — Muestra de granito con una diaclasa (de 8 mm.) inyectada con lechada de cemento.

que la inyección no había ni siquiera llegado a entrar (fotos 5 a 8).

Para obtener entonces la requerida eficacia por este procedimiento, a parte del uso de lechadas muy fluidas, era necesario forzar bastante la presión de la inyección o multiplicar en gran proporción el número de taladros a inyectar. Lo primero resultaba totalmente inadecuado, ya que con ello se quebrantaba el terreno fácil y peligrosamente, y lo segundo, encarecía enormemente la obra por la gran densidad de perforaciones que era preciso realizar.

Para sustituir este sistema de impermeabilización por otro más eficaz y económico, fue cuando empezamos a estudiar la posibilidad y conveniencia de construir una pantalla continua de arcilla de 0,60 m. de espesor mínimo y con la profundidad necesaria para que quedara arraigada inferiormente en el granito sano, y una vez perfilados sus detalles teóricos y constructivos, ensayamos dicho procedimiento a escala natural, construyendo dos tramos experimentales de unos 10 m. de longitud y 20 m. de profundidad, inspirándonos para ello en las pantallas continuas de hormigón empleadas para la



Foto 8. — Bloque limitado por planos de diaclasado de los que sólo uno resultó inyectado.

impermeabilización de algunos recintos de obra, como por ejemplo, los que habíamos tenido ocasión de ver personalmente con detalle en varias de las obras en construcción para el aprovechamiento del Rhin (Marcolshein, por ejemplo), o en las de "Pierre Benite", en el Ródano, aguas abajo de Lyon.

En vista de los resultados obtenidos en este tramo experimental, proyectamos definitivamente la construcción de la totalidad de la obra, hoy prácticamente ya terminada y consistente en esencia en la materialización de un muro vertical de unos 60 cm. de espesor de arcilla compactada, embutido en la masa del granito descompuesto, previa la excavación de una zanja cuyas dimensiones estrictas fueron, simplemente, las que en definitiva había de tener el muro, que quedaba así incorporado al terreno formando una pantalla continua e impermeable de arcilla.

En el caso de Boadella, cuyo detalle se indica en las figuras 3.^a, 4.^a y 5.^a, la pantalla así construida se extiende longitudinalmente de derecha a izquierda desde su arraigo en el granito sano que forma el estribo izquierdo de la presa principal, hasta poco más allá del mencionado dique granítico de grano fino, resistente e impermeable, que como hemos indicado cruza oblicuamente toda la margen izquierda del embalse, desde el fondo del cauce del río, hasta por encima de la zona bañada por el agua.

En planta tiene esta pantalla una forma quebrada formada por dos alineaciones rectas de las que la principal queda por completo debajo del muro de hormigón de cerramiento y la otra más corta dirigida hacia aguas arriba, formando con la primera un ángulo de 156° y se prolonga hasta entestar en el citado dique de granito de grano fino inalterado.

Las longitudes resultantes de cada tramo son de 122,70 m. y 37,00 m., respectivamente, que dan un total de 159,70 metros.

En profundidad, ambos tramos se arraigan en las zonas inferiores de granito sano, definida, como dijimos, por medio de los sondeos previos de reconocimiento, realizados a tal objeto.

Por razones constructivas, el perímetro inferior de la pantalla se ha construido escalonado (fig. 4.^a), con lo que la superficie resultante de la pantalla ha sido de unos 1 725,00 m.² con una profundidad media de unos 10,80 m., con un máximo de 22 metros.

Su construcción se ha realizado de acuerdo

con la experiencia obtenida en la del tramo experimental mediante la perforación sucesiva de sendos taladros a percusión, verticales y consecutivos, de 0,60 m. de diámetro, secantes en planta entre sí, con sus respectivos ejes distanciados a 0,50 metros.

A continuación, se taladró el siguiente (e, del esquema), terminado el cual, se retiraba la tubería del anterior (taladro d), entubándose con la misma el último perforado (o sea el e).

Se procedía luego al relleno de arcilla del que quedaba recién desentubado, la cual se po-

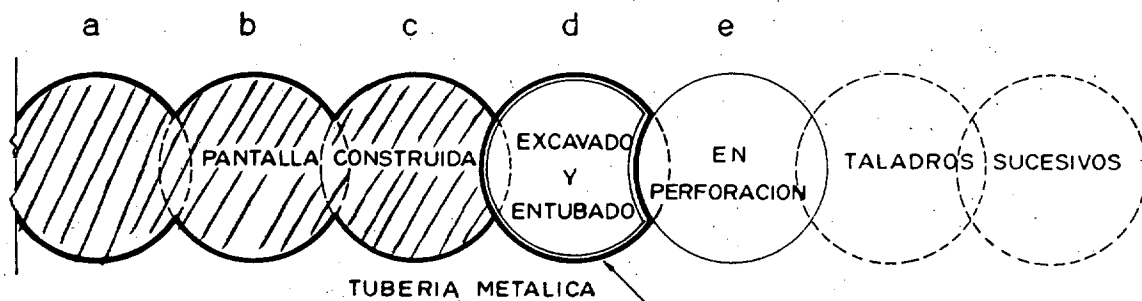


Figura 1.a.

El proceso constructivo ha sido el siguiente: Perforado un taladro (a, b, c, ó d, en el adjunto esquema de la figura 1.a), se entubó con una tubería metálica especialmente dispuesta de 0,60 metros de diámetro, preparada de forma que por la parte que iba a quedar común con el taladro siguiente presenta longitudinalmente un entrante equivalente a aquella (fotografías 9 a 14).

nía en obra debidamente compactada como indicamos más adelante, y en seguida se continuaba con la perforación del taladro siguiente y una vez terminada ésta, se desentubaba el anterior y se entubaba el nuevo en igual forma, rellenando a continuación con arcilla el que quedaba libre y así sucesivamente.

En cuanto a la arcilla a emplear para el re-

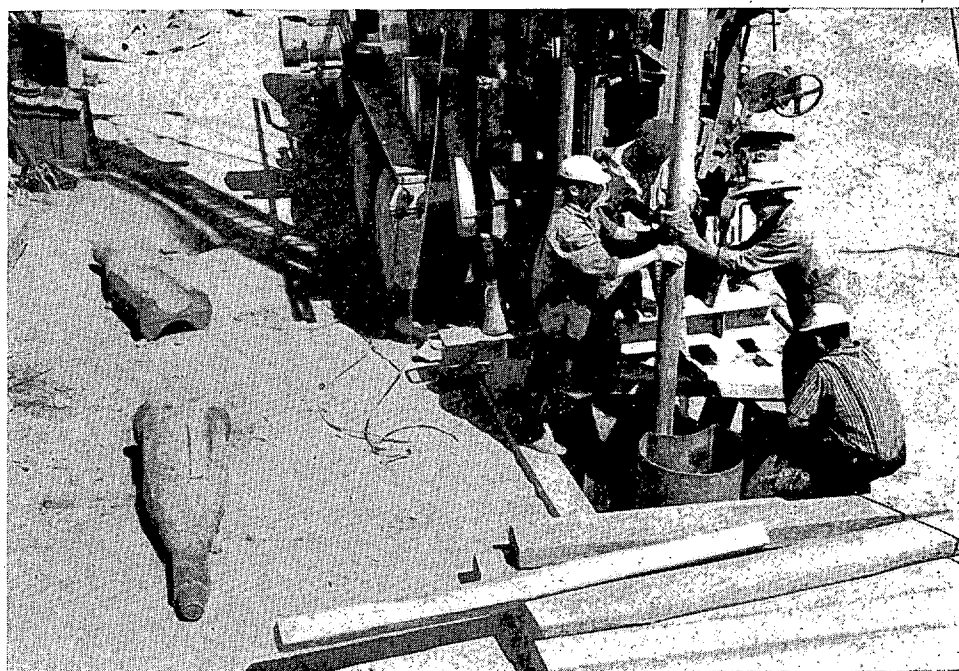


Foto 9.— Perforación de un taladro y tubería colocada en el anterior.

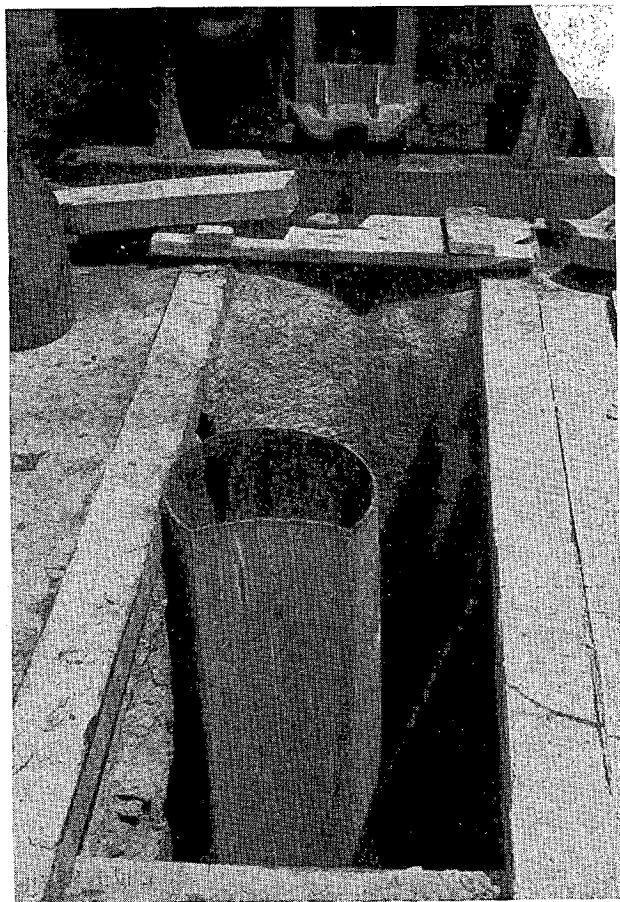
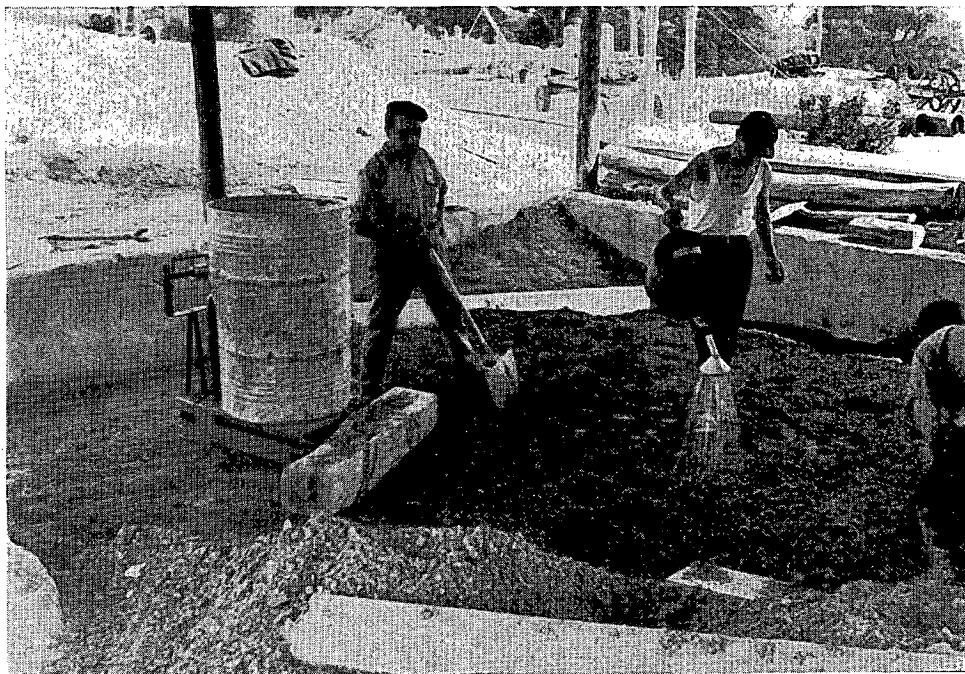


Foto 10. — Frente vertical de la pantalla durante su construcción. Tubería colocada en el último taladro realizado, dejando libre el penúltimo preparado para su relleno.

Foto 11. — Preparación de la arcilla para el relleno de un taladro terminado.



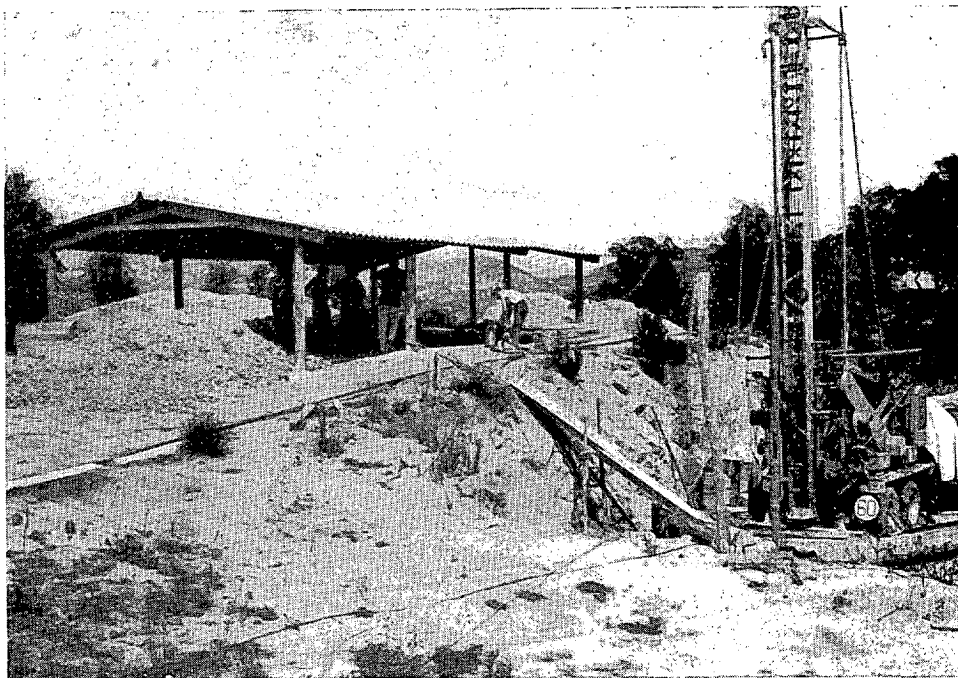


Foto 12. — Conjunto de la instalación de preparación y puesta en obra de la arcilla.

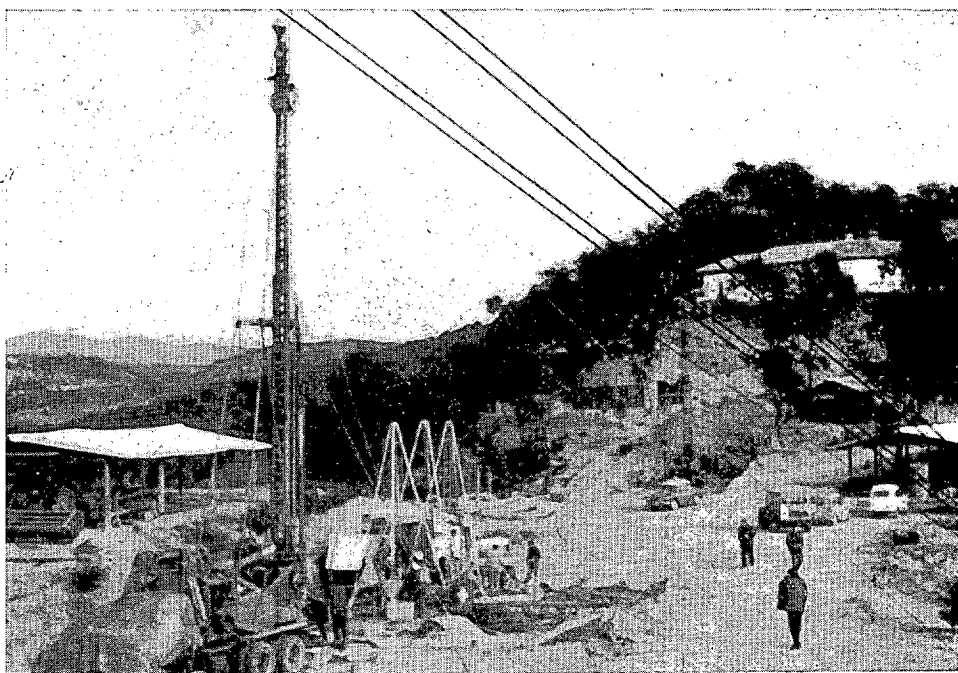


Foto 13. — Conjunto de la instalación empleada para la construcción de la pantalla.

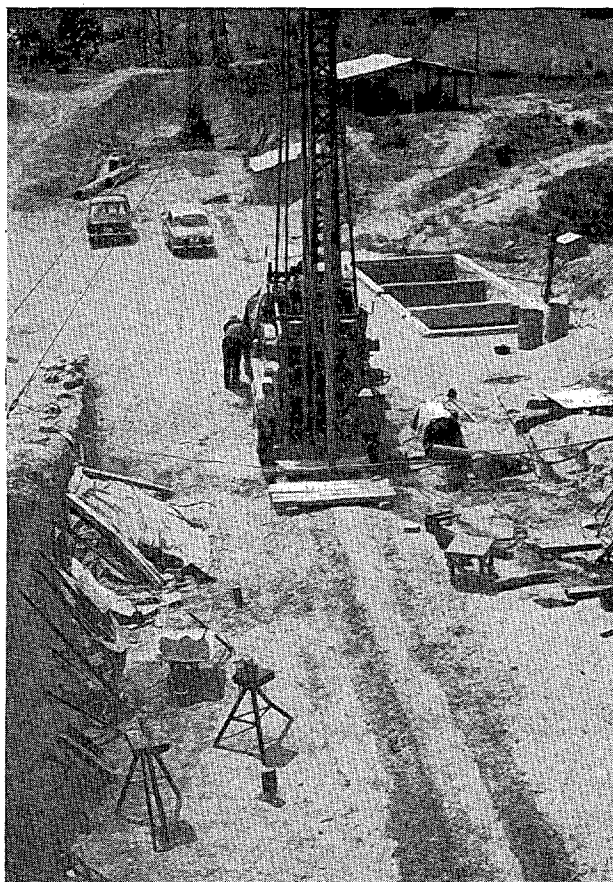


Foto 14. — Pantalla continua de arcilla en construcción, vista de conjunto.

lleno de los taladros perforados, en principio se puede utilizar cualquiera que tenga condiciones análogas a la puesta en obra en el tramo experimental, teniendo en cuenta que sus principales características a estos fines han de ser que presente su máxima compactación con un contenido de humedad comprendido entre unos porcentajes lo más amplios posibles, aproximadamente alrededor del 10 al 20 por 100.

Para mayor información adjuntamos en el gráfico de la figura 2.^a, las características de la que hemos usado en Boadella, en el que se ve cómo la máxima compactación se obtiene con una humedad comprendida entre el 14,5 y el 17,5 por 100.

La colocación en obra de la arcilla se realiza dándole previamente el porcentaje de humedad más apropiado para la obtención de la máxima densidad posible. Dicho porcentaje, para cada tipo de arcilla, se determina en el laboratorio y en obra se logra preparando en un aljibe de fondo impermeable la cantidad de arcilla necesaria para la operación que va a realizarse seguidamente, por ejemplo, para el relleno de un taladro completo, pesando aproximadamente por exceso la cantidad que se precisa para ello. A continuación se toman varias muestras de dicha arcilla, en las que por el sencillo método del alcohol (norma NLT 103/58) se determina

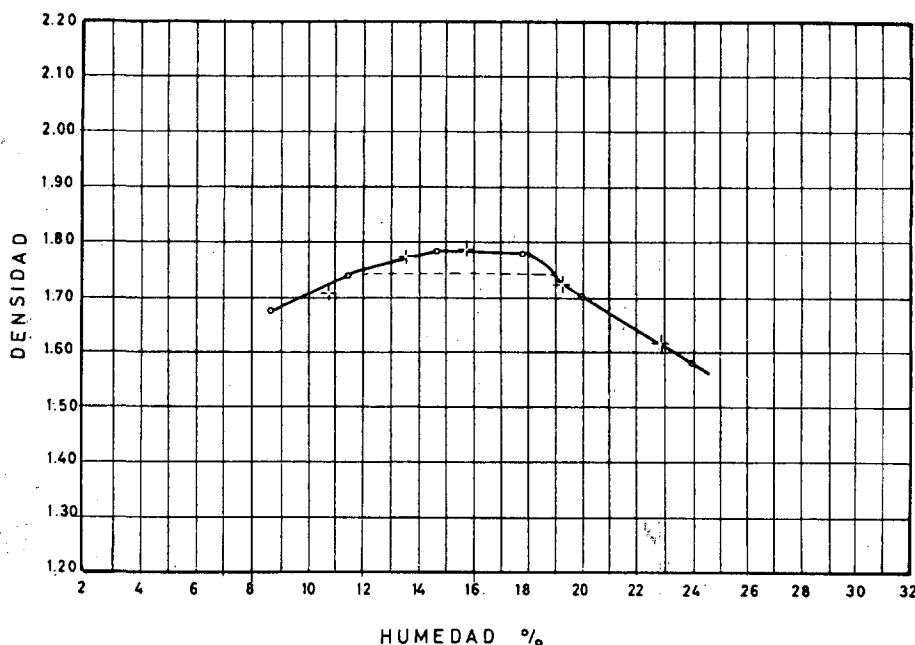


Fig. 2.^a — Densidad máxima, 1,78; humedad óptima, 14,5 a 17,5.

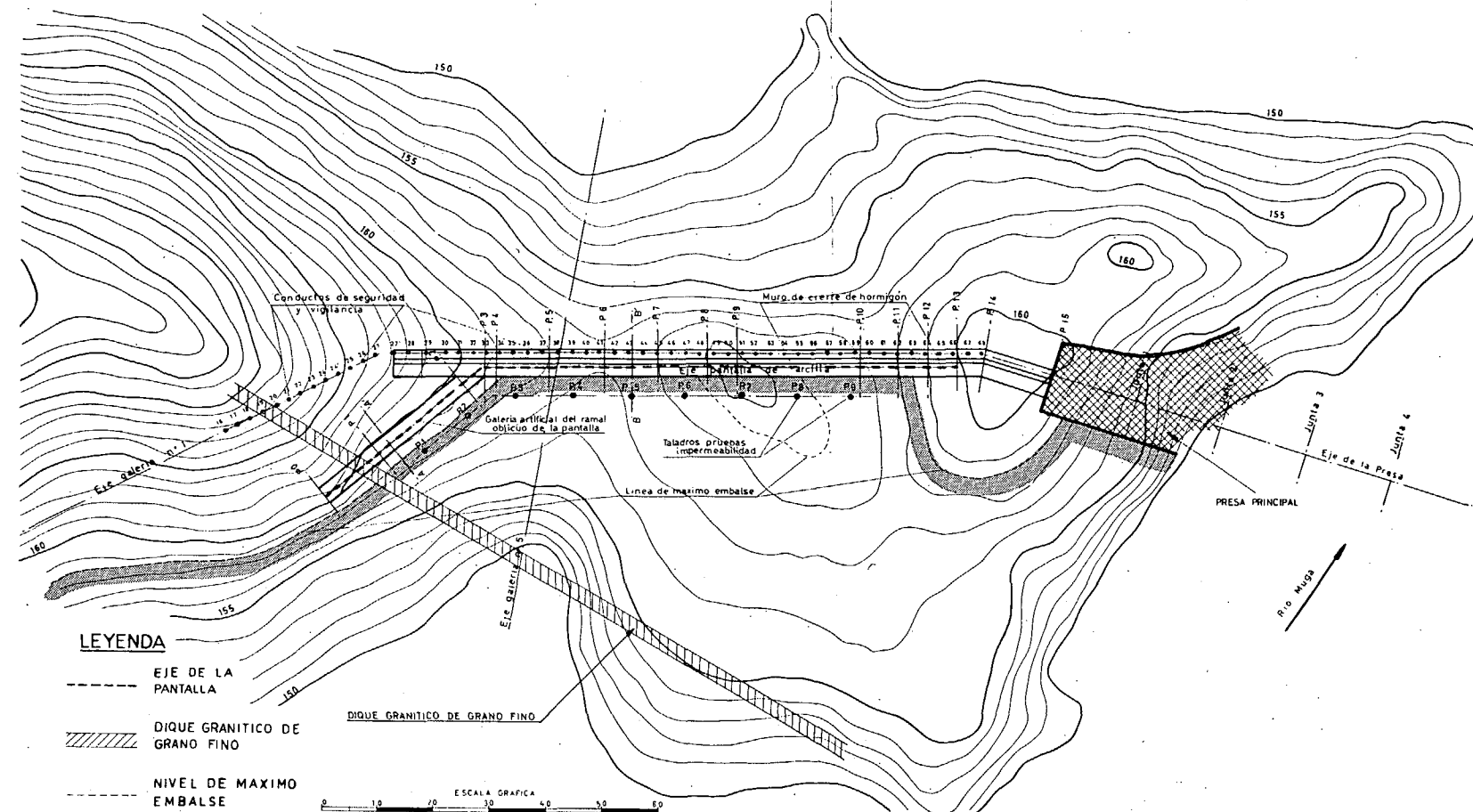


Fig. 3.a — Sistema de impermeabilización del collado "Dels Fangots", en el pantano de Boadella, planta general.

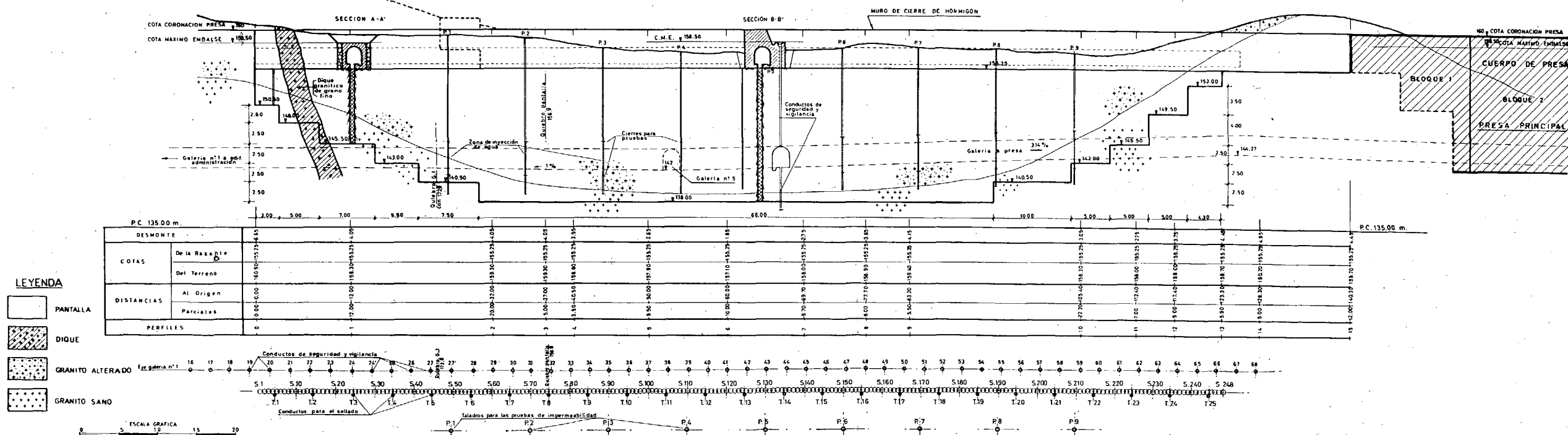


Fig. 4.a — Sistema de impermeabilización del collado "Dels Fangots", en el pantano de Boadella.

fácilmente, sobre la marcha, su grado de humedad en aquel momento, del cual se deduce la cantidad de agua que hay que añadir para que resulte con el tanto por ciento deseado, o por lo menos con un porcentaje comprendido entre los valores límites de la humedad considerada óptima.

Para facilitar esta operación confeccionamos una tabla y un diagrama de doble entrada que, en función de la humedad que acabamos de determinar, nos daba directamente, en litros, la cantidad de agua que había que añadir para un peso determinado de arcilla, por ejemplo para cada 100 Kg.

La adición de esta agua se hizo por aspersión sobre la arcilla preparada en el citado aljibe, mientras se daban varios paleos a la cantidad pesada de antemano (fotos 11 y 12), prevista, como acabamos de indicar, más o menos para el relleno de un taladro completo, lo cual se verificaba seguidamente por tongadas de altura comprendida entre 0,5 y 1 m., que se iban compactando una por una.

Dicha compactación es realizable con cualquier elemento pesado de percusión que permita dar el número de golpes necesarios, con un peso conocido y desde una altura determinada, de manera que se conserve constante la energía de compactación correspondiente al apisonado Proctor normal.

Aunque todo ello es fácil de calcular previamente con las fórmulas corrientes de la mecánica de tierras, para mayor facilidad de su puesta en obra y para los diversos volúmenes resultantes para cada tongada, tabulamos los resultados de dichas fórmulas al objeto de obtener automáticamente en obra y al alcance de cualquier operario, el número de golpes necesarios para alcanzar la compactación prevista, en función de la altura alcanzada por la arcilla de cada tongada vertida en el interior del taladro, antes de empezar su compactación.

Finalmente, por medio de muestras inalteradas tomadas del interior de las zonas de pantalla ya construidas, se comprobó fácilmente en el laboratorio si la compactación alcanzada estaba de acuerdo con los valores teóricos previstos.

Sin embargo, en la práctica observamos que la compactación realmente alcanzada no resultaba siempre, al cabo de cierto tiempo, uniforme en todas las secciones horizontales de la pantalla, quedando a veces la arcilla insuficientemente compactada en alguna de ellas, espe-

cialmente en las zonas marginales, debido a las rugosidades de las superficies interiores de los taladros, a causa, en nuestro caso, del sistema de perforación empleado (percusión) y del diaclasado presente en la roca.

Para solventar este inconveniente, dejamos unos tubos de 6 cm. de diámetro aproximadamente distanciados unos 5 m. entre sí, junto a la cara de aguas arriba de la pantalla, en el contacto de ésta con el terreno, a lo largo de una generatriz de las comunes a dos taladros consecutivos y por medio de estos conductos, a medida que avanzaba la construcción de la pantalla y pasado cierto tiempo, procedimos al sellado de la misma inyectando por aquéllos lechadas de arcilla de abajo arriba.

Finalmente, contando con la existencia de la galería que se encuentra aguas abajo de la pantalla, a una profundidad de 14,00 m. con relación a la cota de su cabeza, comprobamos su comportamiento mediante las siguientes operaciones.

Separados del eje de la pantalla 5 m. hacia aguas arriba y distanciados entre sí unos 10 metros (figs. 4.^a y 5.^a), perforamos nuevos taladros en el terreno hasta un metro por debajo de la cota de la rasante de la solera de la citada galería y haciendo cierre en la correspondiente a un metro por encima de la de la clave de aquélla, se inyectó por ellos agua a presión, manteniendo ésta durante varias horas con diversos valores desde 1 hasta 4 atmósferas y pudimos comprobar desde la galería que se había logrado la estanquidad deseada.

Estas pruebas, que hemos ido efectuando luego a lo largo del frente de toda la pantalla construida, han seguido dando siempre el mismo resultado satisfactorio, con lo que puede asegurarse que se ha conseguido la impermeabilización prevista.

En caso de que ello no hubiera sido así, desde la superficie o desde el interior de la galería, con nueva adición y compactación de arcilla o mediante inyecciones adicionales de lechadas del mismo material, se hubiera podido de todas maneras remediar las deficiencias observadas.

El enlace superior de la pantalla con el muro de cerramiento del collado, se hace prolongándola superiormente hasta la solera de una galería longitudinal prevista en el interior del muro, en la que queda a la vista y al descu-

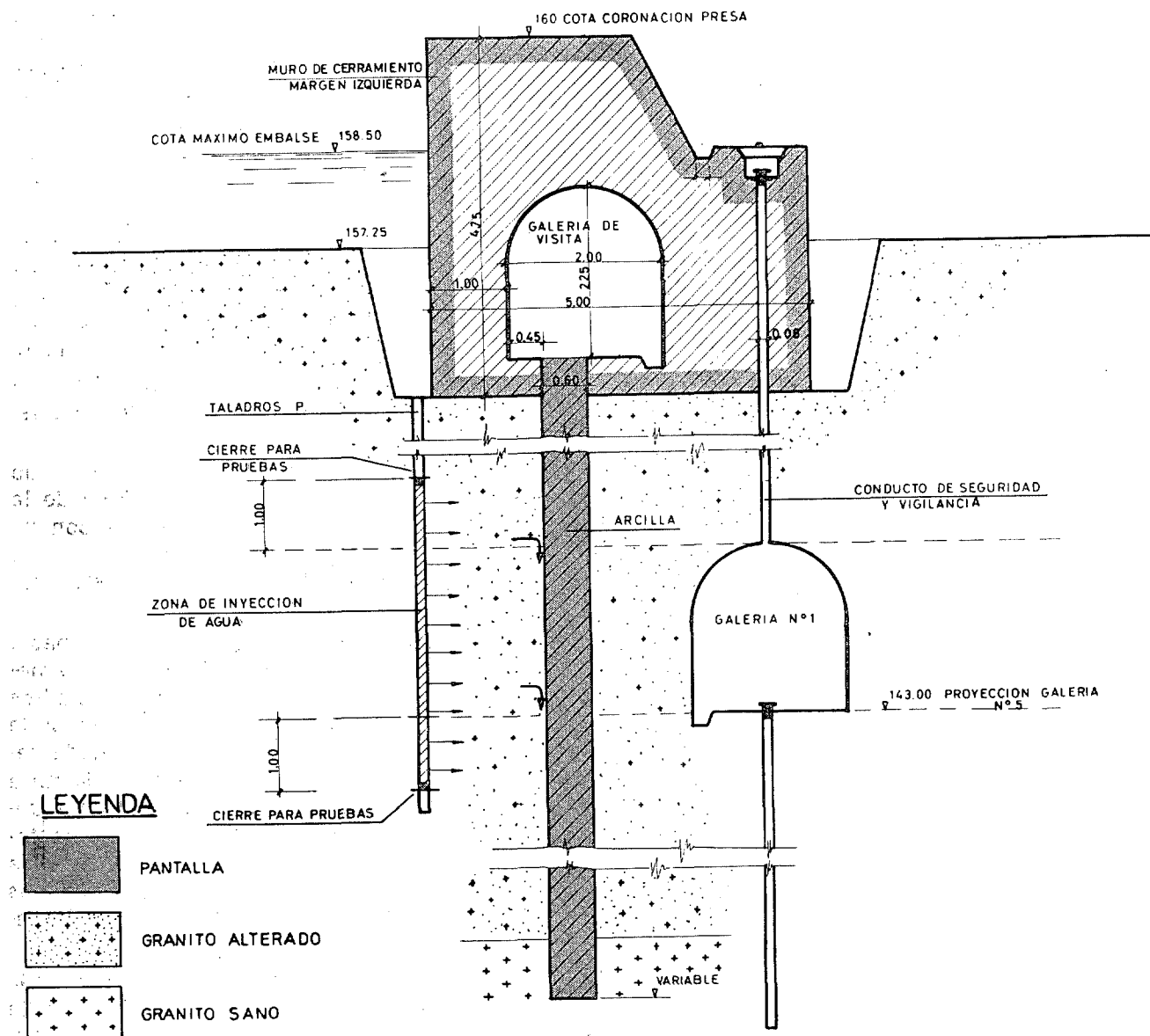


Fig. 5.^a— Sistema de impermeabilización del collado "Dels Fangots", en el pantano de Boadella.

bierto el borde superior de la pantalla (fig. 5.^a).

Como complemento y para observar y vigilar el futuro comportamiento del sistema, desde el pie de aguas abajo del muro de cerramiento del collado se han perforado unos taladros de vigilancia que atraviesan la galería y se prolongan inferiormente hasta una profundidad suficiente, para que queden por debajo del extremo inferior de la pantalla.

Las cabezas de estos conductos equipados con un cierre metálico, quedan en una cuneta abierta con placas móviles de hormigón.

Su objeto es detectar las posibles, aunque teóricamente improbables filtraciones, que pudieran pasar a través de la pantalla o por debajo de ella, y localizar de este modo las zonas a las que se debería en todo caso acudir para restablecer la impermeabilidad pretendida.

El conjunto de pantalla, dispositivos de sellado y de prueba quedan detallados en las figuras 3.^a, 4.^a y 5.^a, y en las fotos 13 y 14, que creemos constituyen suficiente complemento ilustrativo de la descripción que acabamos de hacer.

III

Pantallas continuas de arcilla proyectadas para el sistema de impermeabilización de la presa de Tous.

La presa proyectada para la creación del embalse de Tous, sobre el río Júcar, en la pro-

vincia de Valencia, tendrá una altura de 83 metros sobre el nivel actual del cauce, llegando a la cota 133 el máximo nivel del agua embalsada, que alcanzará un volumen de unos 410 millones de metros cúbicos.

La presa primitivamente proyectada era de hormigón en masa, tipo gravedad, planta recta,

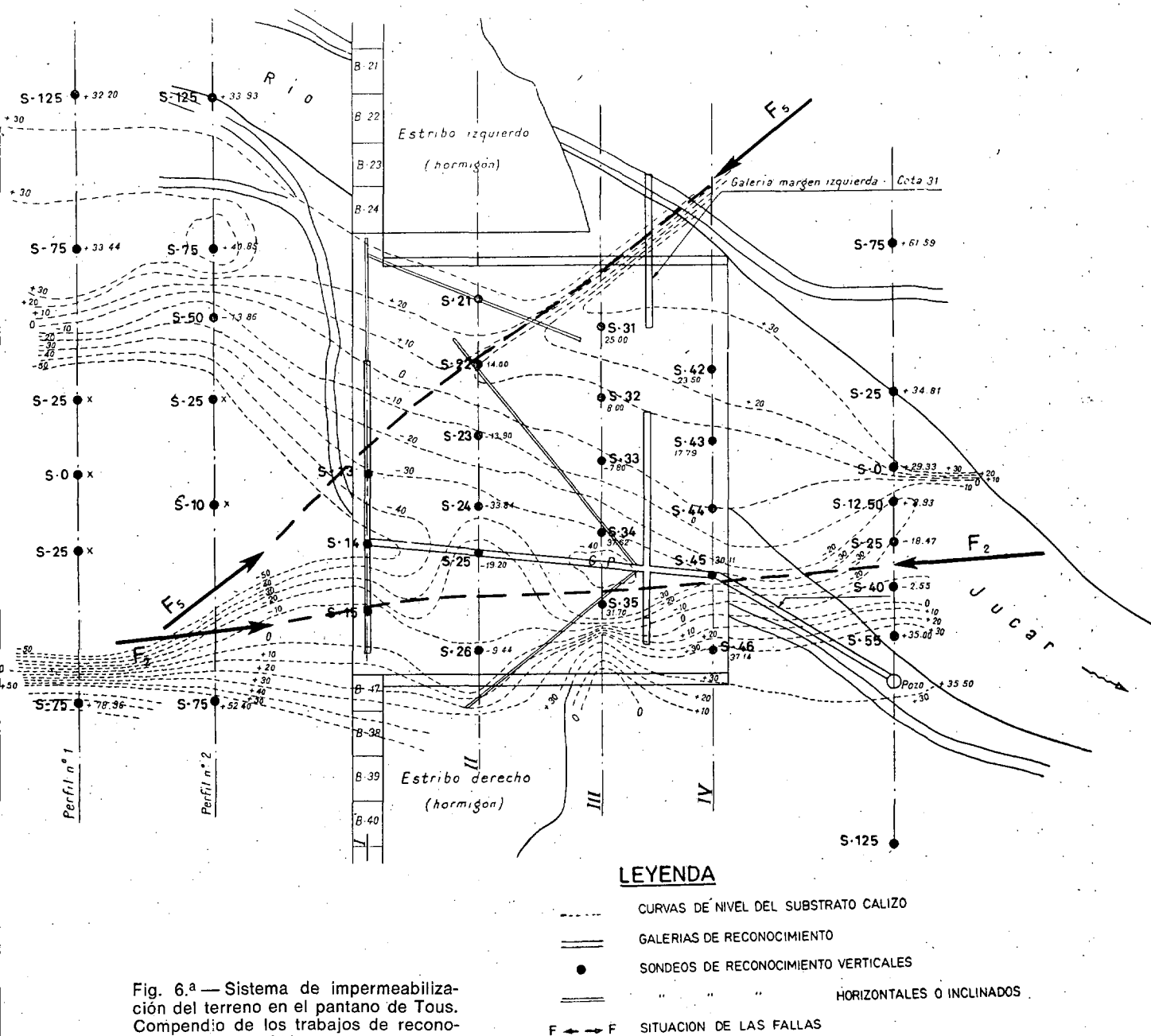


Fig. 6.^a — Sistema de impermeabilización del terreno en el pantano de Tous. Compendio de los trabajos de reconocimiento.

con aliviadero central para 5 600 m.³/seg., y está al presente construida ya en su mayor parte en los dos estribos: en la margen izquierda hasta el bloque núm. 24 y en la derecha, desde el 37 hasta el final, faltando en su totalidad los bloques 25 al 36, que comprendía el tramo central, en el que se ubicaba el vertedero, aproximadamente por el eje actual del río.

La cerrada está formada por calizas del cretácico superior, que afectadas por un triple sistema de fallas, han quedado divididas en grandes bloques, de los que algunos han resultado hundidos y basculados.

La presencia de estas fallas y su importancia, obligó a reconsiderar el proyecto primitivo procediéndose entonces a realizar un estudio muy detenido del terreno, para lo que se hicieron numerosos sondeos distribuidos en varios perfiles transversales al cauce, que luego hemos materializado en las maquetas realizadas para su consiguiente estudio; se abrieron también varias galerías de reconocimiento, desde las cuales se perforaron nuevos sondeos, algunos en abanico y otros horizontales, y en su interior se efectuaron diversas pruebas, ensayos y mediciones por medio de gatos aplicados *in situ* y con el empleo de técnicas geofísicas por métodos sísmicos, con todo lo cual se llegó a un conocimiento del terreno muy detallado, determinándose de un modo especial la situación del substrato calizo, el cual se encuentra afectado como acabamos de decir, por varios sistemas de fallas, de las que las principales, junto con las curvas de nivel, que definen la situación de los bloques resultantes, son las que se señalan en la figura 6.^a

En la constitución geológica del terreno en este caso, juegan un papel muy importante las circunstancias tectónicas que lo afectan traducidas especialmente por el citado conjunto de fallas que en él se desarrollan.

Para su localización en superficie nos ha sido de gran utilidad el estudio estereoscópico de las fotografías aéreas (foto 15), de las cuales y con los datos obtenidos de los sondeos y de las galerías, hemos podido situarlas luego sobre planos con toda exactitud.

Dada la gran complejidad del conjunto, hicimos un esquema geométrico convencional de la tectonización del terreno en la zona de la cerrada, que es el que reproducimos en la figura 7.^a

De estas fallas la señalada con el número 2 (F_2) fue completamente localizada por las galerías de estudio, en varios puntos y discurre en dirección longitudinal prácticamente coincidente con el cauce del río. La falla F_3 se localizó exactamente con varios sondeos inclinados y la galería de reconocimiento superior en la margen izquierda, resultando que forma con la primera un ángulo de unos 35°, con vértice situado en las inmediaciones del paramento de aguas arriba de la presa.

Otras dos fallas, F_7 y F_8 , cruzan perpendicularmente a la falla F_2 , algo más aguas abajo de la zona de presa, y otras, como la F_4 y la F_6 , longitudinalmente más reducidas, lo hacen oblicuamente. A la primera de estas últimas, cortada por una de las galerías de reconocimiento, corresponden las fotografías 16 y 17, en las que se aprecia la zona del milonito que rellena la falla, encajado entre las masas calizas laterales.

De los bloques determinados por estas fallas, el situado hacia la izquierda de la falla número 5 y entre las fallas transversales números 7 y 8, bloque número 3 (en la foto 15 y en el esquema de la figura 7.^a), está fuertemente basculado. El situado entre las fallas F_2 y F_5 y las transversales F_7 y F_8 , bloque número 2, está hundido. Y la cuña resultante de las fallas 2 y 5, bloque número 1, está hundido y basculado.

La falla número 5 se ha producido sobre terrenos afectados anteriormente por otros movimientos, como se comprueba al observar el espejo de falla producido en un milonito, foto 18, que encontramos durante la excavación de una de las galerías de reconocimiento. Es decir, todas estas fallas han sido producidas por una serie de movimientos tectónicos sucesivos, que han tenido lugar en el tiempo en diferentes etapas.

La cuña formada en la intersección de la falla 2 y 5, como acabamos de indicar, hundida y basculada, se encuentra, además, muy fragmentada como consecuencia de la superposición de todos los movimientos orogénicos que han afectado el terreno en toda esta zona y sobre la parte superior del correspondiente blo-

Foto 15. — Vista aérea de la zona del emplazamiento de la presa de Tous, sobre la que se han señalado la situación de las fallas que se desarrollan en dicha zona.



Presa de Tous
Rio Jucar

falla

presa construida

que hundido se ha depositado un relleno formado por bloques detríticos de calizas fragmentadas, otros de caliza caídos de las laderas y de los labios de falla y por rellenos de conglomerado que quizá sean referibles al oligoceno

Todos los datos obtenidos se recogieron y compendiaron en una maqueta que, por el sistema de perfiles sucesivos, realizamos expreso (foto 21), al objeto de poder sintetizar toda la información disponible del subsuelo.

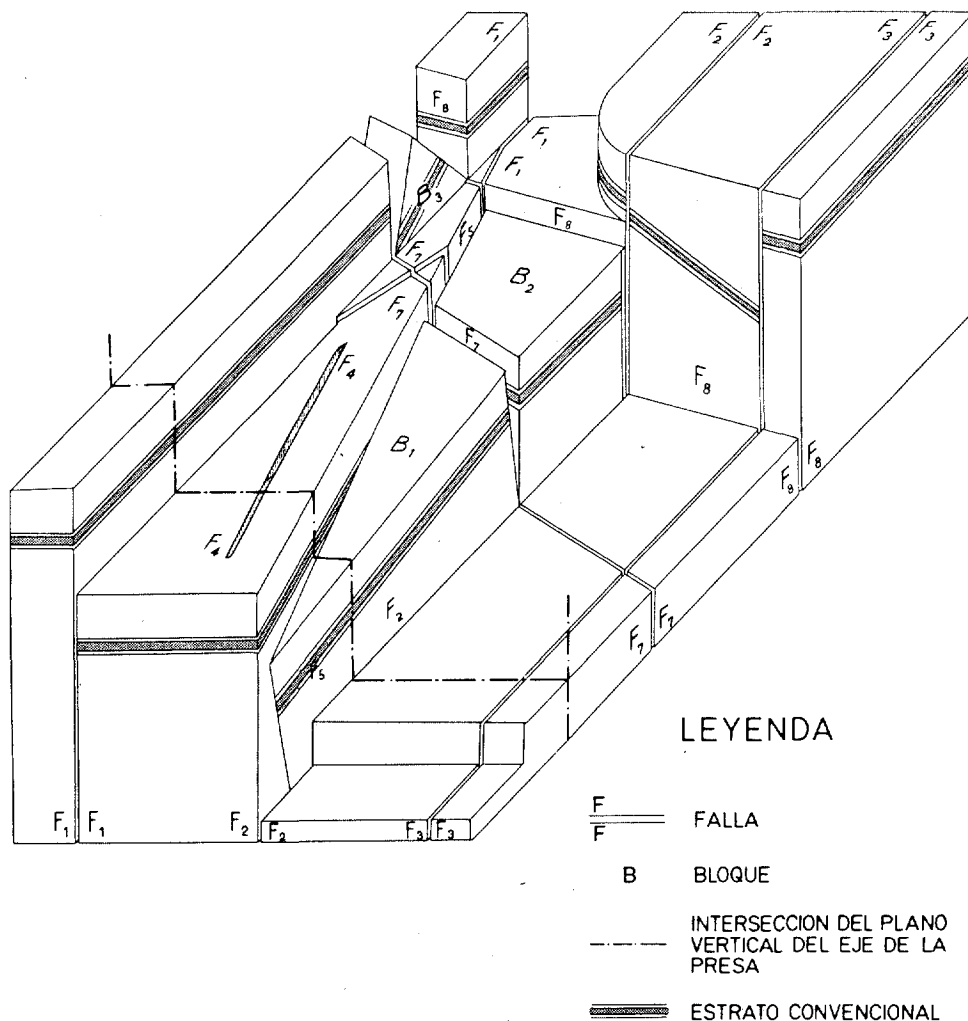


Fig. 7.a — Presa de Tous, río Júcar. Esquema geométrico convencional de la tectónica de la cerrada.

(foto 19), todos ellos envueltos en una matriz areno-arcillosa en algunas zonas, o simplemente arcillosa en otras.

En la construcción de las galerías y en algunos de los sondeos horizontales perforados desde ellas, hemos encontrado también en el relleno de las fallas, cantos rodados silíceos, procedentes de los arrastres fluviales (foto 20), a más de 30 metros por debajo del nivel actual del cauce del río.

Desde el interior de las galerías de estudio abiertas dentro de este relleno de material detrítico y heterogéneo se han realizado las indicadas mediciones geotécnicas, y como valor medio del coeficiente de deformación obtenido para el conjunto que ha de soportar los cimientos de la parte central de la futura presa, se obtuvo una magnitud del orden de las 50 Tm./cm.², aunque bastante variable de un punto a otro.

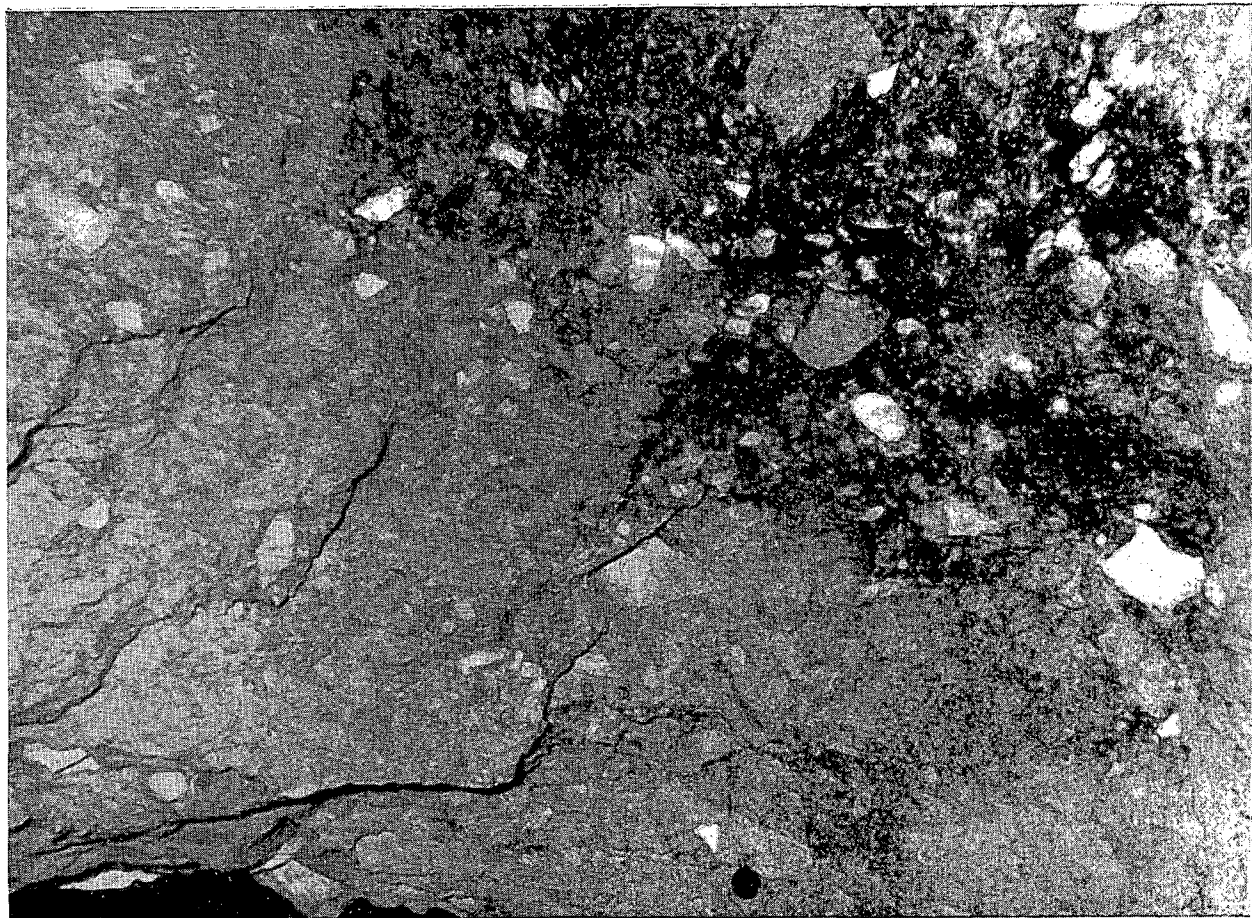


Foto 16. — Milonito de una de las fallas de la margen izquierda atravesado por la galería de la cota 80.

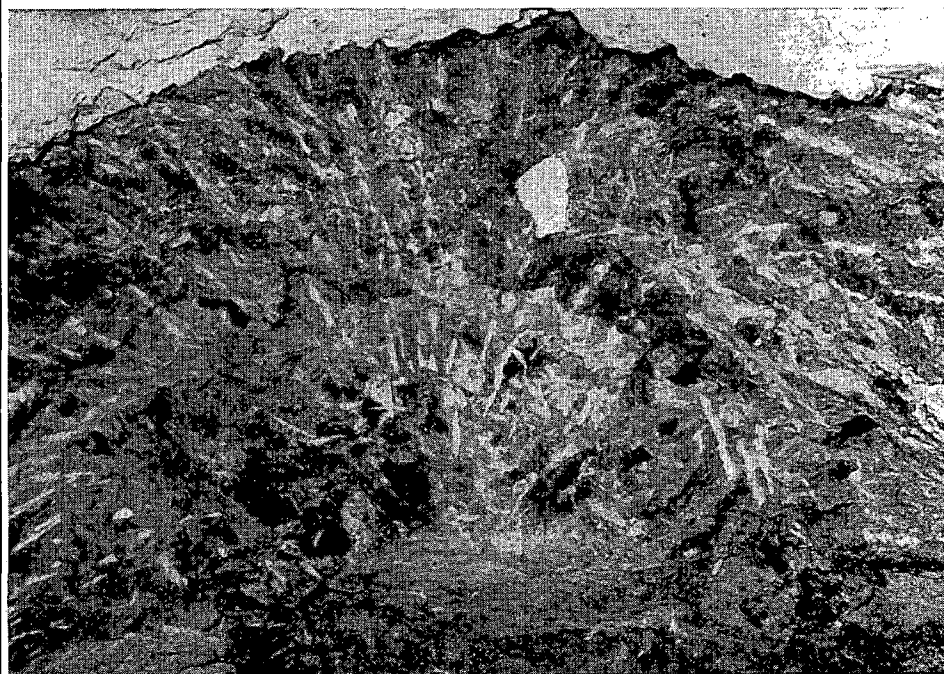


Foto 17. — Aspecto del contacto del milonito con uno de los labios calizos de la falla atravesada por una de las galerías de exploración.

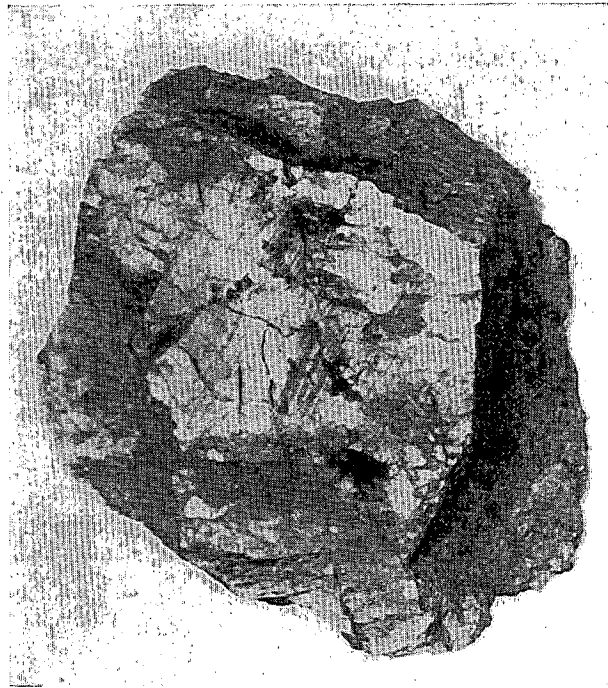


Foto 18. — Espejo de la falla producida sobre un milonito consolidado producido por otra falla anterior (encontrado al cruzar con una galería de reconocimiento la zona de la falla F-5).

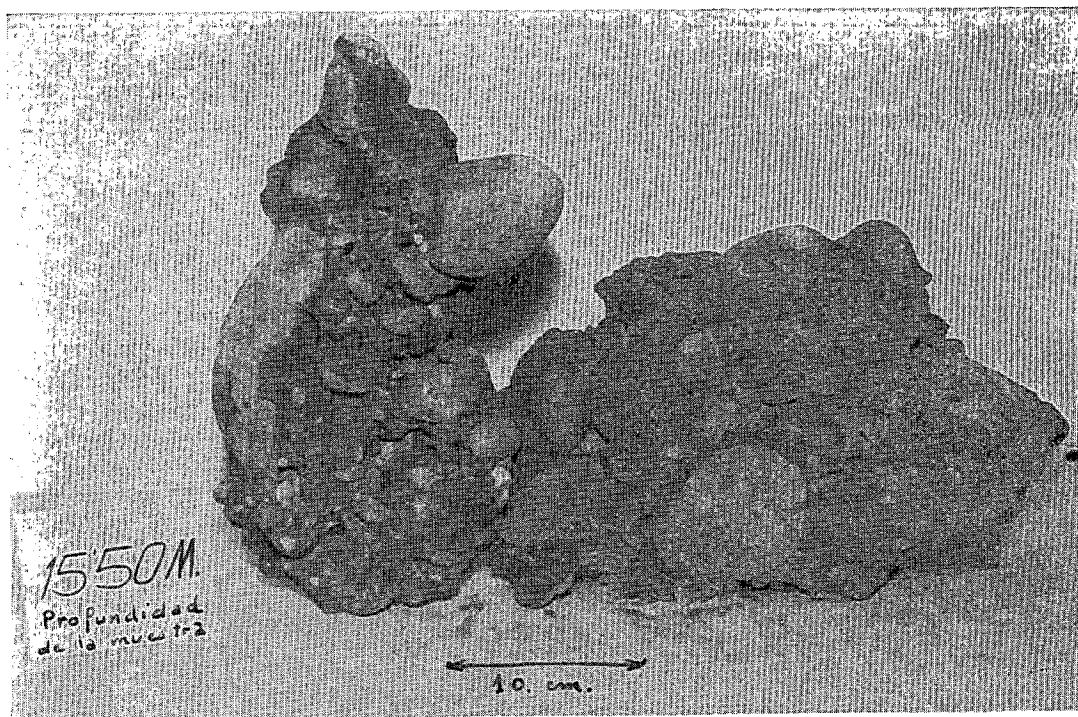


Foto 19. — Aspecto de una muestra de conglomerado que forma parte del relleno detrítico existente sobre el bloque núm. 1.

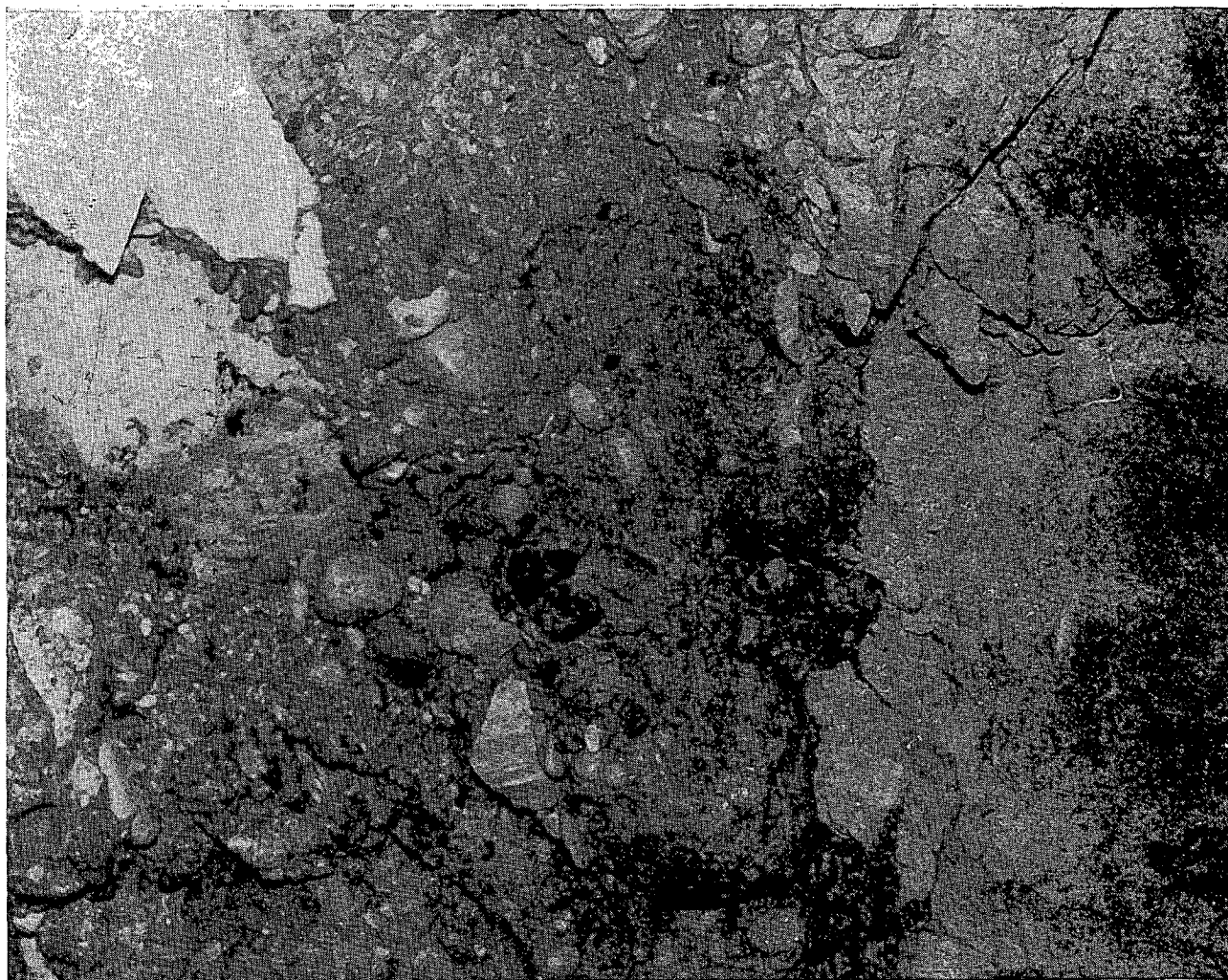


Foto 20. — Cantos rodados poligénicos relleno de una de las fallas atravesada por la galería abierta a la cota 15.

(A título de información suplementaria apuntamos aquí que en este caso se encontró como consecuencia de los valores obtenidos con los ensayos sísmicos, que los registrados con gatos, resultaban más bien algo pesimistas, debido posiblemente a la presencia de una zona decomprimida producida por la construcción de la galería.)

Ahora bien, para el proyecto de la parte central de la presa que se está estudiando, había que tener en cuenta que la interpretación de estos resultados sólo puede ser válida en el supuesto de mantenerse el terreno en un estado, especialmente de humedad, igual o inferior al existente mientras se realizaron las indicadas mediciones.

Como consecuencia se comprende fácilmente

que, una de las partes más importantes que ha tenido que estudiarse con más cuidado y detalle, en este proyecto, ha sido la del sistema de impermeabilización y drenaje de que había de dotarlo, al objeto de conseguir una estanquidad en la zona de cimentación, tal, que habida cuenta del embalse que se va a establecer, el actual estado de humedad del terreno no se alterare en el futuro.

Al empezar entonces el estudio de dicho sistema de impermeabilización y drenaje de esta zona tan heterogénea del terreno, comprendida y afectada por las indicadas fallas y limitada lateralmente por la estratificación caliza cretácica, sobre la que se han cimentado ambos extremos de la presa, se nos presentó como principal problema el de mantener estanco un limi-

tado recinto al que podía llegar agua por los cuatro costados, por encima si quedaba en contacto con el embalse e incluso inferiormente si a pesar de la impermeabilización en vertical que se estableciera no se lograra suficiente pérdida de carga, de modo que fuera posible el acceso del agua a su interior por debajo.

to de sendas redes de drenaje, formadas por unos taladros que parten de unas galerías excavadas en la masa caliza, paralelamente al curso del río, y exteriormente al perímetro a impermeabilizar (figs. 8.^a, 9.^a, 10 y 11), cuyo principal objeto es el de eliminar las aportaciones hídricas laterales que pudieran llegar al recinto

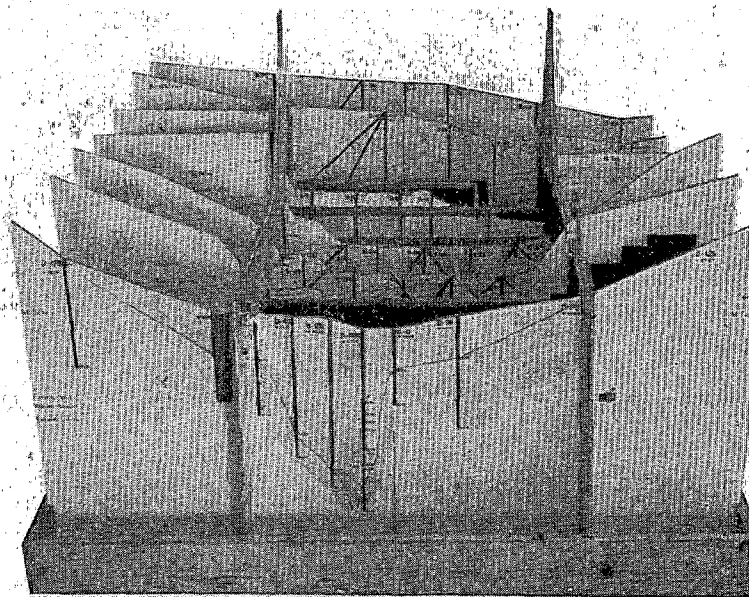


Foto 21. — Aspecto de la maqueta de trabajo en la que se iban recogiendo y correlacionando todos los datos procedentes del estudio de los sondeos y características del terreno observadas desde las galerías y pozos.

Como resultado de todas estas consideraciones y del conocimiento del terreno obtenido, llegamos a la conclusión de la necesidad de establecer en el perímetro interesado, sendas cortinas de impermeabilización o zonas impermeables que garantizaran en lo posible la permanencia de las condiciones en que se encontraba el terreno durante el período en el que se habían llevado a cabo las indicadas mediciones de sus características físico-mecánicas.

Teniendo presente dichas circunstancias y las características del terreno y de la obra, proyectamos entonces un sistema de impermeabilización y drenaje con participación de pantallas continuas de arcilla compactada, que en esencia consiste en lo siguiente:

El cierre estanco lateral del indicado recinto se proyecta conseguir a base del establecimien-

interesado a través de las masas calizas que lo limitan lateralmente. Paralela e interiormente a cada una de estas redes de drenaje se proyectan otras de impermeabilización embebidas también como las primeras en la masa caliza, a base de los procedimientos clásicos de inyección de lechadas de mortero o de cemento con arcilla.

Conseguida con ello la impermeabilización lateralmente, era necesario establecer su continuidad por las caras o frentes de aguas arriba y de aguas abajo, siendo ahí donde nos encontramos con la mayor dificultad que presentaba el problema, debida principalmente al hecho de la constitución geológica del terreno, formado, como ya hemos indicado, por grandes bloques heterogéneos de masas calizas, de areniscas y de conglomerados, embebidos caótica y anár-

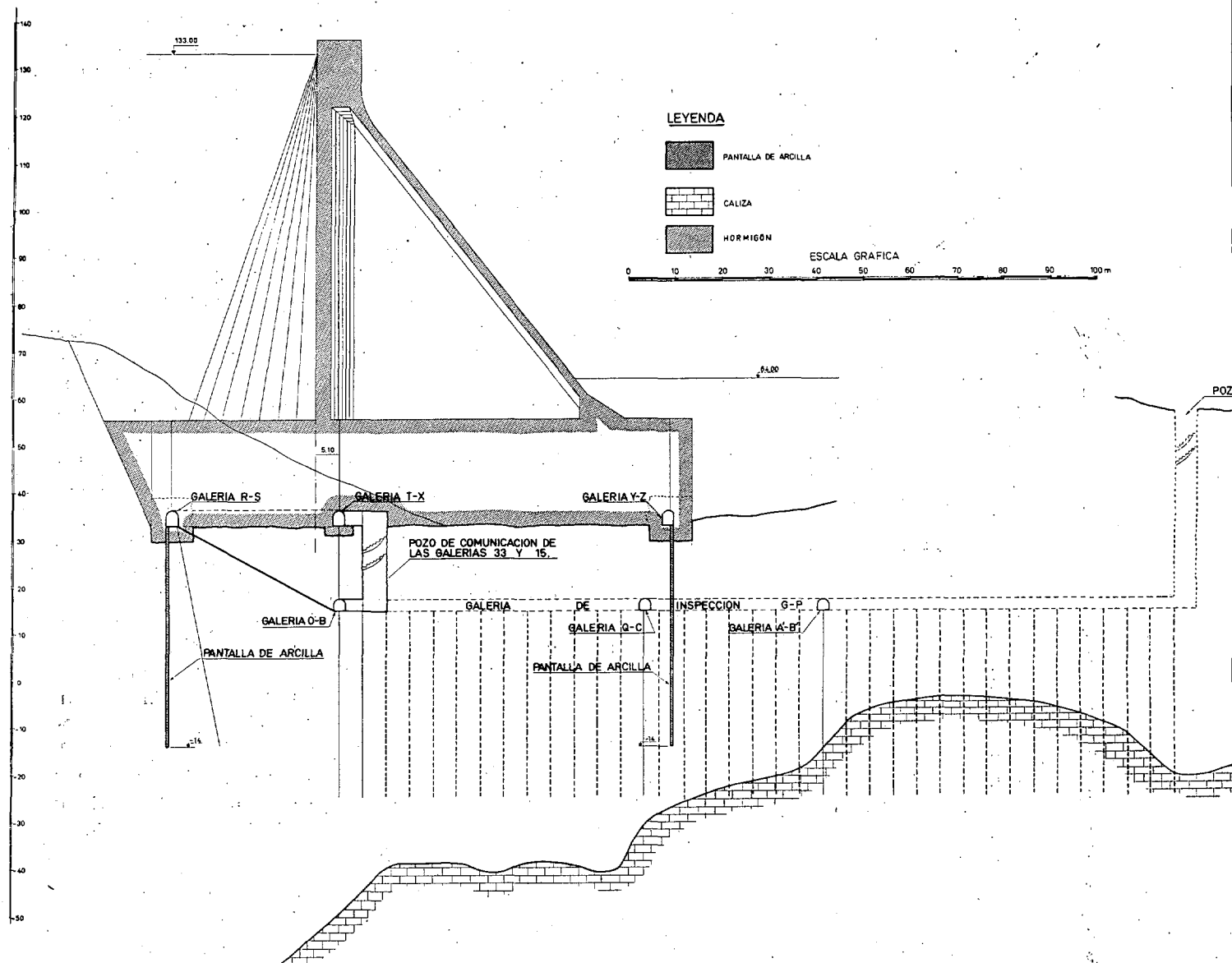


Fig. 9.^a — Sistema de impermeabilización del terreno en el pantano de Tous, sección, alzado por el eje del perfil aligerado.

quicamemente en una masa areno-arcillosa o arcillosa, dando lugar a una gran variedad de zonas de permeabilidades muy diversas, de modo que cualquier sección vertical del conjunto resulta siempre distinta, formando un complejo mosaico de terrenos de características muy diversas y por tanto, con la imposibilidad práctica de poder aplicarle cualquiera de las técnicas normales de inyección, dado que ésta debería verificarse con una equivalente variedad, tanto de tipos de lechada como de presiones y de densidad de taladros, imposible en realidad de de-

terminar o fijar *a priori* y de llevar luego a la práctica.

En vista de estas serias dificultades y con la experiencia, o mejor dicho, con los resultados y conocimientos de orden constructivo adquiridos en el caso de Boadella que acabamos de exponer en la segunda parte de este trabajo, nos decidimos a incorporar al sistema de impermeabilización que nos ocupa, la construcción de sendas pantallas continuas de arcilla compactada de análogas características a la de allí, construida y aprobada, dispuestas como queda indi-

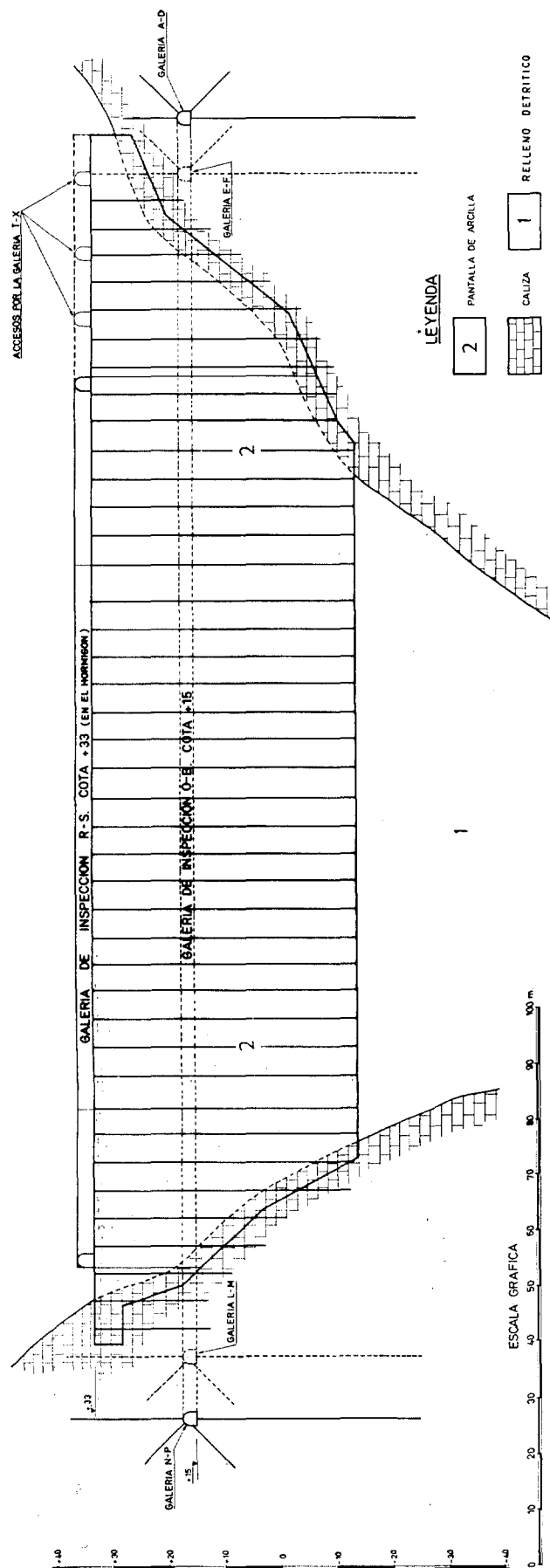


Fig. 10. — Sistema de impermeabilización del terreno en el pantano de Tous. Desarrollo de la pantalla de arcilla de aguas arriba. Sección-alzado por la galería de inspección R-S. Cota +33.

cado en los planos que reproducimos en las figuras 8.^a y 9.^a.

En resumen, el conjunto proyectado para Tous se ha concebido, pues, a base de dos pantallas de arcilla que cierran el recinto frontalmente por aguas arriba y por aguas abajo y por las dos mencionadas cortinas de drenaje y de inyección, embebidas en la masa caliza que lo cierran lateralmente.

Formando un complemento imprescindible de este conjunto, interiormente al recinto así delimitado, se desarrolla una red de galerías y taladros de control que permiten realizar en todo momento una completa vigilancia del comportamiento de aquéllas, así como acudir con operaciones suplementarias allí donde se observare un funcionamiento distinto del previsto.

Como en el ejemplo anterior, para mayor información de nuestros lectores, acompañamos a estas descripciones la reproducción sintetizada de un plano en planta del conjunto, en el que figura la posición relativa de todos los elementos proyectados (fig. 8.^a), un corte-proyección vertical de la presa y del terreno por el eje del futuro cuerpo central aligerado de la presa en proyecto (fig. 9.^a), y finalmente dos alzados (figuras 10 y 11), que presentan la vista vertical de las pantallas (la de aguas arriba desarrollada), con los cuales y con las fotografías 22, 23 y 24 de la segunda maqueta realizada para este estudio, en plástico transparente e ilustrado, se puede formar el lector una visión completa del conjunto proyectado.

IV

Finalmente y a título informativo, podemos añadir a todo lo anterior que la pantalla de Boadella construida directamente por administración y con los medios propios del Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas, ha resultado a un precio de coste del orden de las 5 000 a 6 000 pesetas el metro cuadrado. Sin embargo, debemos hacer notar que dicho precio no puede considerarse como afinado ni definitivo, tanto por ser la primera obra de este tipo llevada a la práctica, como por incluirse en este precio los gastos de la etapa de construcción experimental que se llevó a cabo en los años 1964-1965, como por el tipo de los medios auxiliares, especialmente de perforación, empleados, que si bien fueron los más adecua-

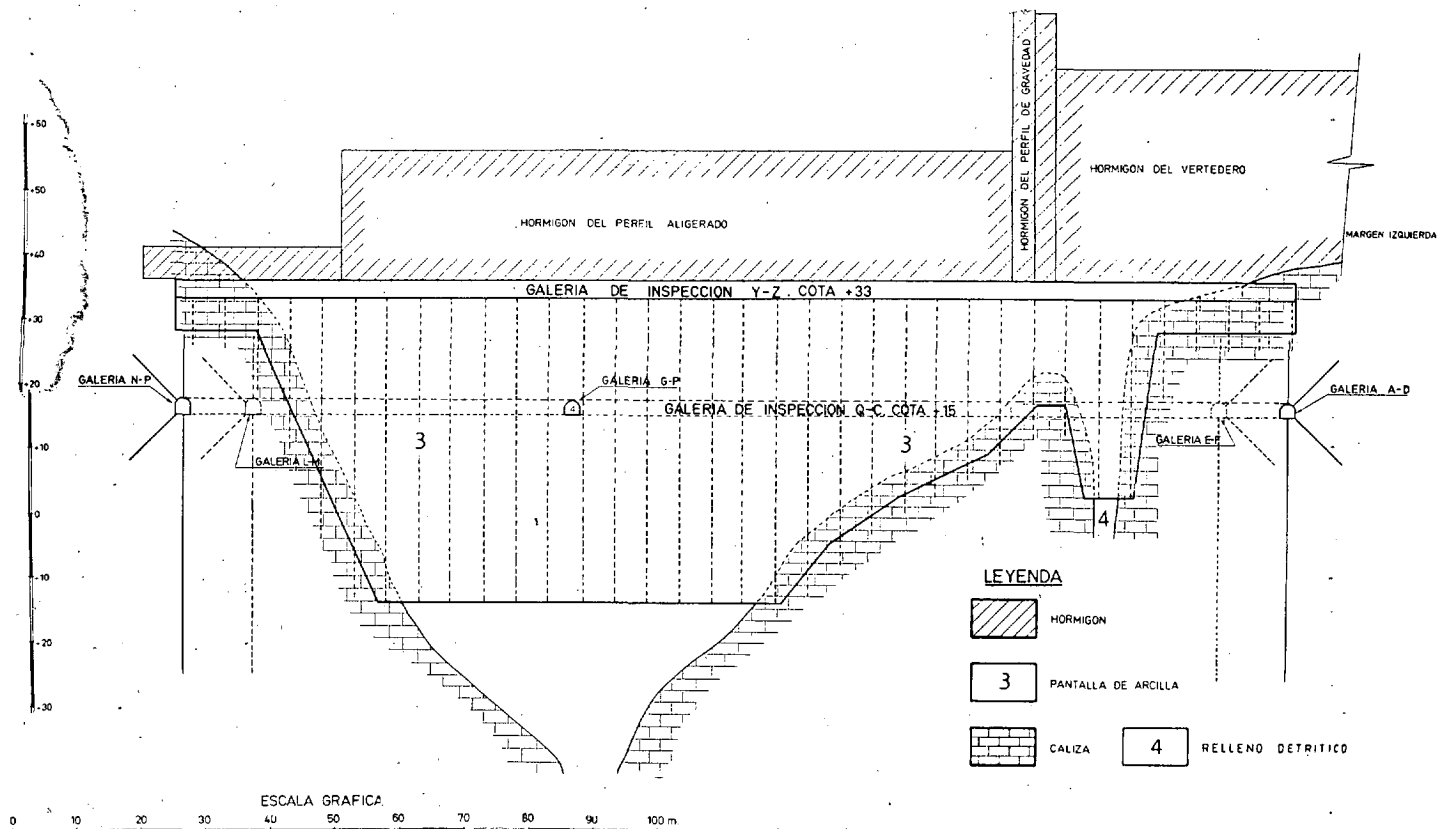


Fig. 11. — Sistema de impermeabilización del terreno en el pantano de Tous, sección-alzado, por la galería de inspección Y-Z, cota+33.

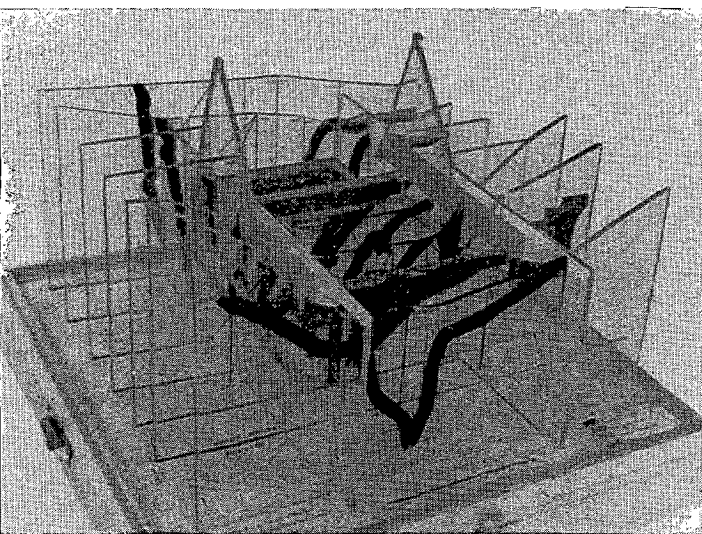


Foto 22. — Aspecto de la maqueta definitiva (vista hacia aguas arriba).

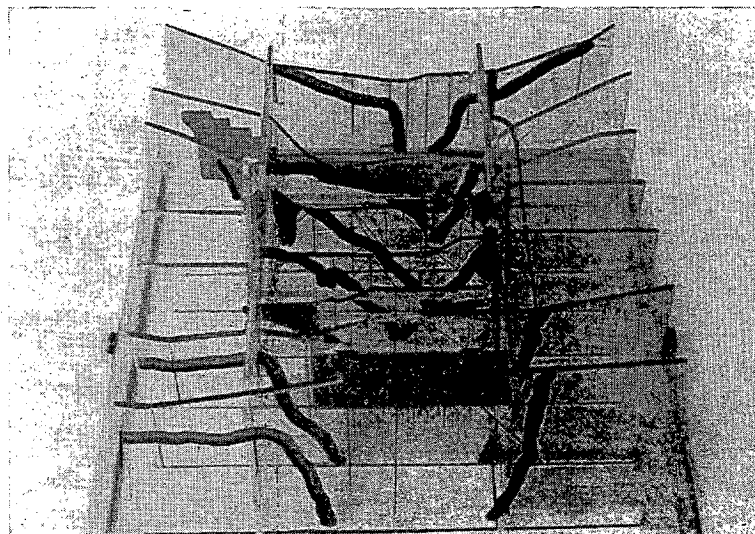


Foto 23. — Aspecto de la maqueta definitiva (vista hacia aguas abajo).

dos de los que el citado Servicio disponía en aquellos momentos, cada día aparecen en el mercado nuevas máquinas que sin duda han de resultar más apropiadas para este tipo de obras. Es evidente, por tanto, que su construcción no se ha podido realizar en condiciones que pudiéramos llamar normales de cualquier obra.

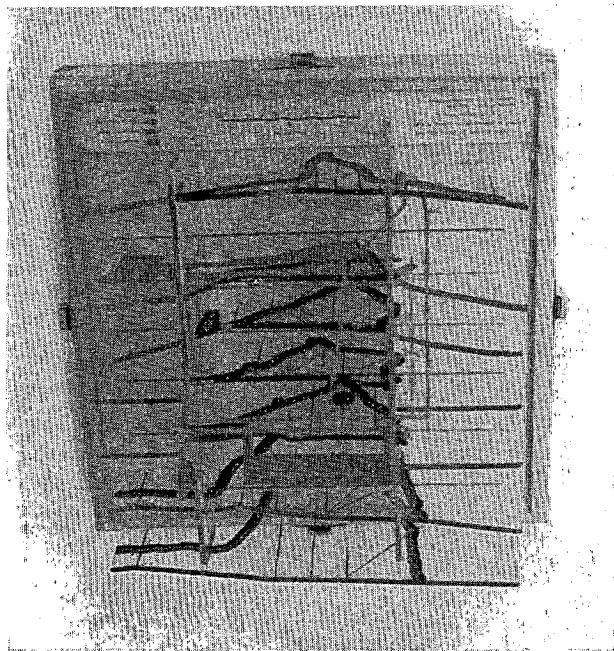


Foto 24. — Aspecto general de la maqueta definitiva que presenta el conjunto del proyecto del sistema de impermeabilización de la zona del cuenco de la presa de Tous.

Es de interés también hacer observar que durante la etapa experimental de esta construcción, en una longitud de 10 m., en lugar de la pantalla de arcilla, se ensayó otro tipo de impermeabilización interrumpiendo la continuidad de aquella en esta zona, que se trató por medio de inyecciones de un producto químico, que tiene la doble particularidad de poseer una viscosidad análoga a la del agua, y por tanto, de grandes posibilidades de penetración en terrenos por cuyas fisuras y diaclasas no pueden entrar lechadas ni de cemento ni de bentonita; por

ejemplo, siendo inyectable además con presiones relativamente inferiores a las necesarias para estas últimas, y de presentar una velocidad de fraguado regulable a voluntad, cualidades ambas que le confieren, sin duda, un valor altamente apreciable.

Su resultado en Boadella fue igual que el de la pantalla de arcilla, o por lo menos ambos se comportaron igualmente impermeables, y si bien la inyección de este tipo de material es de más fácil ejecución, el coste del producto y su manipulación elevaba el del total del metro cuadrado impermeabilizado, apreciablemente por encima del correspondiente al metro cuadrado de la pantalla de arcilla.

Es evidente, sin embargo, que de dicho sistema se pueden esperar en muchos casos apreciables ventajas, especialmente en cuanto un posible ajuste de precios permita extender su campo de aplicación.

En cuanto a la aplicación de las pantallas de arcilla como las que acabamos de describir, en cualquier caso lo aconsejable será, antes de proceder a su proyecto y construcción, hacer un estudio detenido del terreno y de las máquinas de que se pueda disponer, al objeto de poder de esta forma optimizar la solución deseada.

Terminamos el presente trabajo insistiendo en su carácter de divulgación, toda vez que la falta real de más datos acerca de su funcionamiento y sobre todo de más experiencia, tanto en su construcción como en su eficacia o comportamiento, no nos permite ser ni más categóricos ni más expresivos. Nuestro objetivo, por tanto, ha sido simplemente a petición de muchos de los compañeros que han tenido ocasión de conocerlo, ya sea directamente por haberlo visto personalmente, o indirectamente por haberlo comentado con el autor, darlo a conocer a través de nuestra Revista, siendo por tanto lo más interesante para todos, la posibilidad de establecer sobre el tema la máxima comunicación posible entre todos los interesados en este tipo de problemas y soluciones, comunicación o diálogo, que agradeceremos vivamente en todo momento.