

POSIBILIDADES DE LOS PROCEDIMIENTOS GEOFÍSICOS EN EL ESTUDIO DE LOS REVESTIMIENTOS DE LAS GALERIAS EN CARGA

Informe presentado por el Sr. D. WALTER WEYERMANN, Ingeniero Jefe de *Sondagens Rodio Lda.* de Lisboa, en la «Primera reunión para el estudio de las posibilidades de aplicación de los procedimientos de prospección geofísica en los problemas de ingeniería», celebrada en el *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil* de Lisboa, del 24 al 29 de octubre de 1960.

Para poder calcular las dimensiones del revestimiento de hormigón de una galería en carga, es preciso conocer el módulo de elasticidad de la roca.

Los distintos procedimientos empleados hasta el momento no permiten la determinación del módulo de elasticidad más que de cuando en cuando, porque cada determinación es laboriosa y costosa. Y así, entre los puntos de medida, las características mecánicas de la roca han de estimarse por comparación con los valores medidos.

Hace algún tiempo, en una galería en construcción, encontramos un largo tramo en que la roca presentaba un aspecto muy regular y que parecía tener por todas partes una excelente compacidad. Sin embargo, auscultando la roca con un martillo, se descubrió que en algunos sitios, y en gran superficie, había losas desprendidas del macizo.

Hasta ahora, se tendía a compensar la incertidumbre, en cuanto a la calidad de la roca, por un gran volumen de trabajos de consolidación por inyección, haciendo numerosos taladros distribuidos en forma sistemática y sensiblemente igual a lo largo de toda la galería.

Por el contrario, actualmente se han desarrollado diversos procedimientos para determinar localmente el módulo de elasticidad de la roca, midiendo la velocidad de propagación de una onda artificial en aquélla.

El Ingeniero D. Mariano Fernández Bollo, formado en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, ha logrado — conjugando su formación de Ingeniero Civil y su facultad para poner a punto los aparatos necesarios — desarrollar un método de medida rápida de la propagación de ondas geosísmicas en recorridos muy cortos, del orden de algunos metros.

Este método ha sido aplicado por el Sr. Fernández Bollo en ocasión de la construcción de la galería de conducción del aprovechamiento hidroeléctrico del río Eume, durante los años 1957 a 1959. Esta obra está situada en Galicia y pertenece a Fuerzas Eléctricas del Noroeste, S. A. (FENOSA), con sede en La

Coruña. La presa y la galería han sido ejecutadas por la Empresa Dragados y Construcciones, S. A., de Madrid; las operaciones geofísicas han estado a cargo de la Sociedad de Reconocimientos Geofísicos, S. A., de Madrid, y las inyecciones han sido realizadas por Cimentaciones Especiales, S. A., “Procedimientos Rodio”, de Madrid.

El principio general de esta aplicación ha consistido:

- 1) en determinar los módulos de elasticidad de la roca en la galería excavada, aún no revestida;
- 2) en dimensionar los revestimientos y las inyecciones, de acuerdo con estos módulos de elasticidad;
- 3) en comprobar los módulos de elasticidad de la roca, después de la ejecución del revestimiento y de las inyecciones.

La figura 1.^a muestra, en esquema, la disposición general del aprovechamiento, tanto en planta como en perfil longitudinal. La galería de conducción había sido prevista con un diámetro interior de 3,30 metros y un revestimiento de hormigón de 0,40 m. de espesor.

En las zonas donde la roca excavada no se presentase franca, el revestimiento debería armarse de forma que soportara, él solo la presión interior, con un valor máximo de 7,5 Kg./cm.².

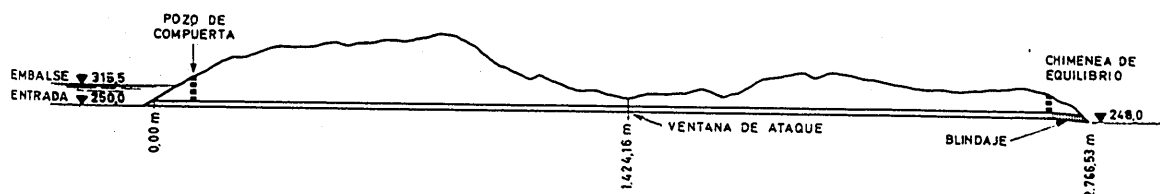
Las rocas atravesadas pertenecen al Paleozoico y, en su mayoría, son de naturaleza esquistosa. La inclinación de la esquistosidad es siempre más o menos vertical, y su orientación forma, en general, un ángulo agudo con el eje de la galería. Mientras que los esquistos contienen muchos fósiles de algas en la zona aguas arriba, en casi toda la longitud del túnel son gneísicos. Esta metamorfosis se debe a la proximidad de un batolito de granito, en el que se apoya el estribo derecho de la presa. La galería ha atravesado asimismo una intrusión de diabasa.

En este caso, la técnica de aplicación del método sísmico encontró una especial dificultad, debido a que

los módulos de elasticidad de una roca esquistosa son muy diferentes en sentido paralelo y en sentido normal a la esquistosidad. Dado que la galería sigue casi paralelamente la esquistosidad, parece lógico esperar que las determinaciones sísmicas, obtenidas haciendo correr las ondas longitudinalmente a lo largo de los

tantes que, allí donde no ha sufrido alteración ulterior, el material que rellena las fracturas está fuertemente comprimido, si bien su resistencia a la tracción es, por el contrario, débil. Estas fracturas, de origen tectónico, son, en general, de gran extensión. Cortan el túnel muy oblicuamente, tanto, que al poner en

PERFIL LONGITUDINAL



PLANTA

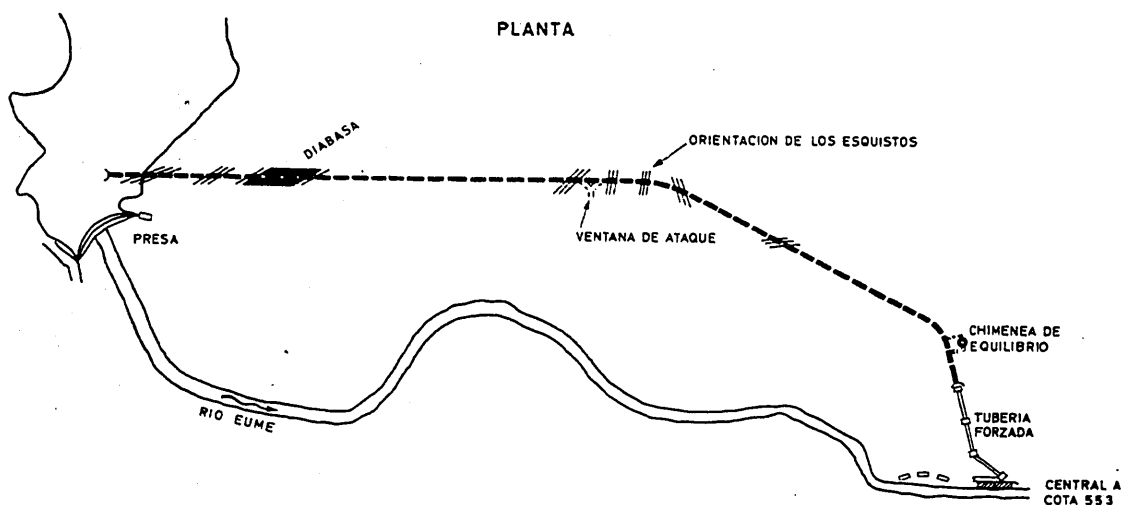


Fig. 1.ª — Galería en carga del aprovechamiento del río Eume.

hastiales, den un módulo más elevado que el que hay que considerar cuando el revestimiento de la galería solicita la roca en una dirección perpendicular a la esquistosidad. Teniendo en cuenta esto, se ejecutaron taladros horizontales bastante profundos, que permitieron medir la velocidad de las ondas desde el fondo del taladro hasta el paramento de la galería, en una dirección perpendicular a su eje.

La roca presenta numerosas fracturas paralelas a la esquistosidad que, generalmente, están rellenas de un material arcilloso originado por la trituration de la roca por movimientos tectónicos. Estos movimientos han sido acompañados por presiones tan impor-

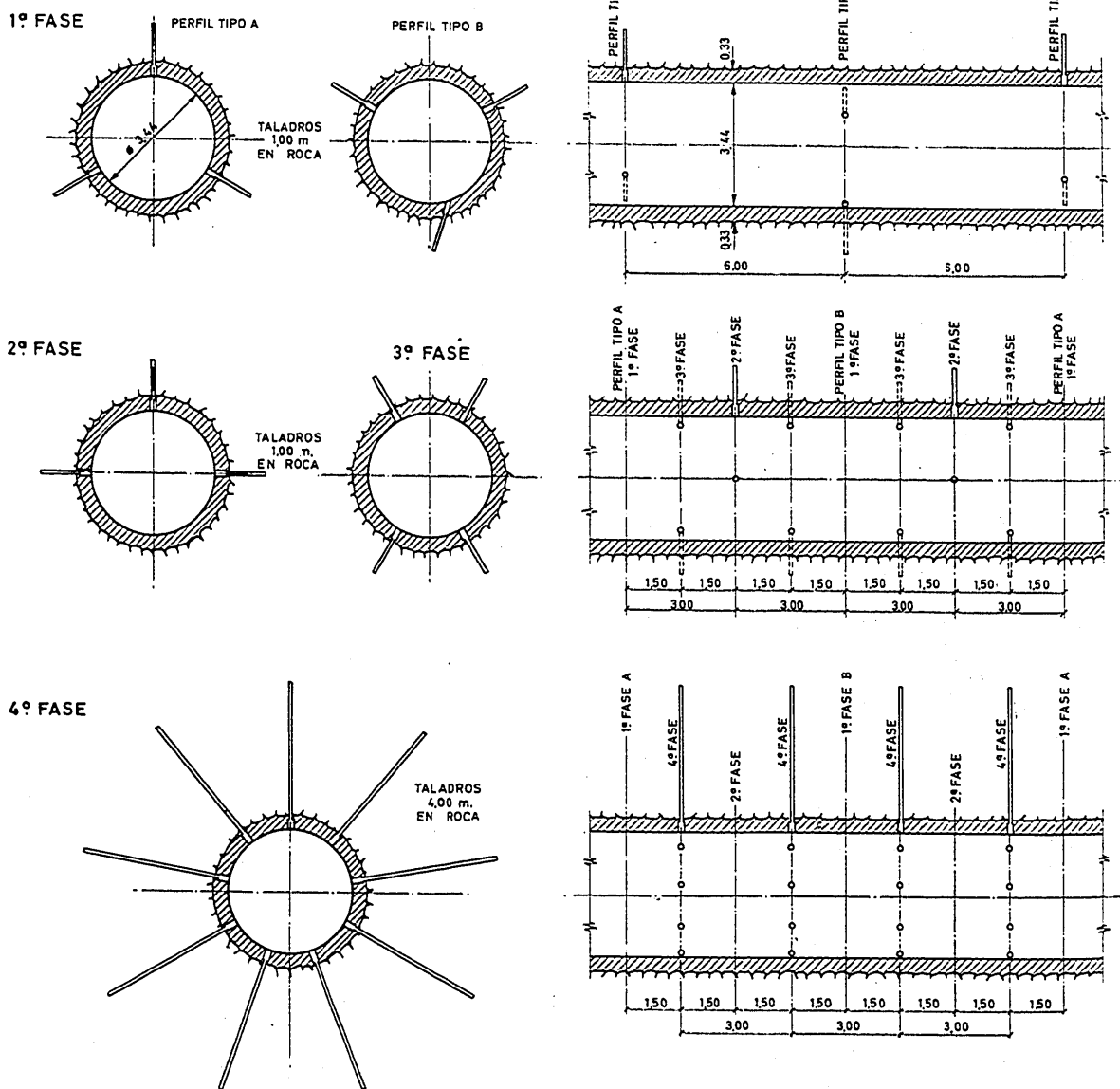
carga la galería, cabe temer una tendencia a la formación de fisuras longitudinales en el hormigón de la bóveda y de la solera. En este caso, otra característica del terreno puede jugar un papel importante: es su permeabilidad, que varía localmente, como se verá más adelante.

Las inyecciones de cemento tenían, como de costumbre, dos objetos:

- rellenar los vacíos que quedaran entre la roca y el hormigón del revestimiento, sobre todo en la bóveda, donde es imposible realizar, en todos los puntos, el contacto íntimo entre el hormigón y la superficie rugosa de la roca;

Estos dos objetivos requieren técnicas de inyección diferentes, y así, teniendo en cuenta las particu-

La segunda fase constituía un control y, en caso necesario, un complemento de la primera; su finalidad era tratar los accidentes que no hubieran quedado



laridades del terreno y las variaciones del módulo de elasticidad, determinadas por el método geosísmico expuesto anteriormente, se previeron cuatro fases distintas de inyección (ver fig. 2.^a).

tratados en la primera fase. Sendas fases se aplicaron a lo largo de toda la galería. La presión máxima de estas inyecciones fué de 5 Kg./cm.².

Las fases tercera y cuarta tenían como objeto el tratamiento de la roca en sí, y fueron aplicadas a tenor de las condiciones reveladas, tanto por la inspección visual, como por la interpretación de los

módulos de elasticidad determinados por los procedimientos geofísicos.

Allí donde la arcilla que llenase las fracturas de la roca poseyera aún su compacidad natural, no sería posible hacer penetrar la lechada de inyección. Por el contrario, en los lugares donde dicho material milonítico hubiese sufrido una alteración — lugares señalados, en general, por infiltraciones de agua —, el tratamiento por inyección sería posible y la lechada

elevado, excepción hecha de un espesor de 0,5 a 1,0 metro alrededor del revestimiento.

Finalmente, la cuarta fase, llevada a cabo mediante taladros relativamente largos, tenía por objeto aumentar el módulo de elasticidad de la roca, a ser posible, hasta 140.000 Kg./cm.², en todos aquellos sitios donde el módulo no alcanzase este valor. La inyección se realizó, después de un lavado extremadamente enérgico de las fisuras, mediante lechadas

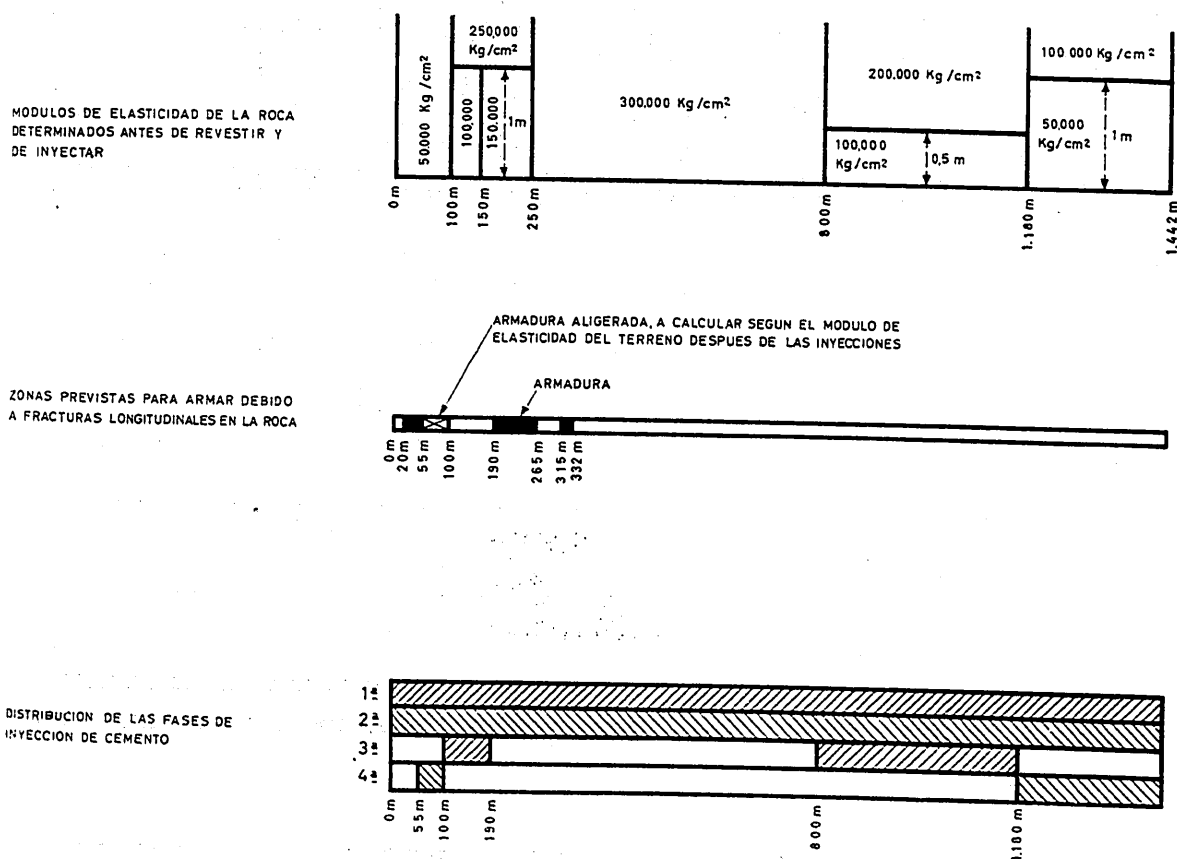


Fig. 3.ª — Galería en carga del aprovechamiento del río Eume. Anteproyecto de inyecciones (zona aguas arriba).

penetraría en todos los sitios donde el material arcilloso de las fracturas hubiese sido deslavado o reblanecido al contacto con el agua. En este último caso, la aplicación de una técnica de inyección apropiada puede lograr, en gran escala, la expulsión de la arcilla de débil compacidad, reemplazándola por cemento.

La inyección de la tercera fase, con lechadas de cemento muy líquidas, inyectadas a presiones de hasta 15 Kg./cm.², estaba destinada a rellenar las diaclasas de escasa abertura, y que las inyecciones de las fases primera y segunda no hubiesen podido tratar, como consecuencia de la densidad demasiado elevada de las lechadas utilizadas. Esta tercera fase, ejecutada mediante taladros cortos, fué aplicada a los tramos de galería donde la roca tenía un módulo de elasticidad

muy líquidas y con una presión final de 15 Kg./cm.². La longitud de los taladros se limitó a 4 m., puesto que el cálculo demostraba que más allá de dicha profundidad las sollicitaciones de la roca, debidas a la puesta en carga de la galería, eran sumamente débiles.

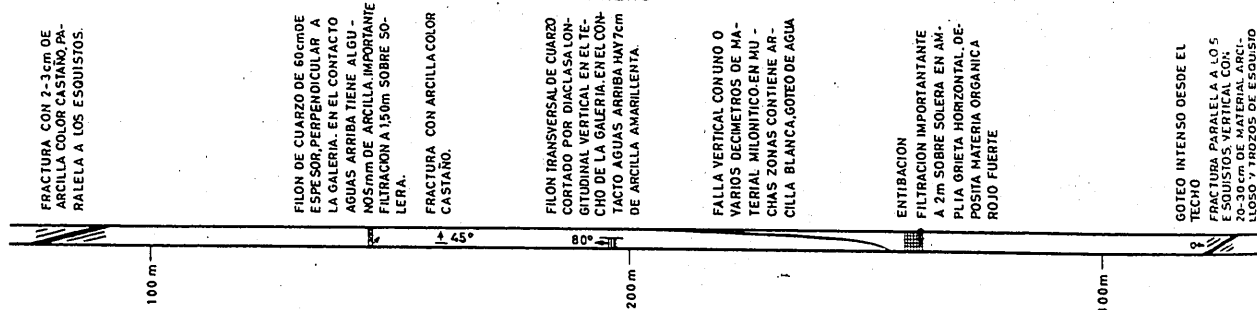
El valor de 140.000 Kg./cm.² para el módulo de elasticidad de la roca correspondía, para la galería en cuestión, a un esfuerzo máximo de tracción de 9,75 kilogramos/cm.² en la superficie interna del revestimiento, siendo de 10 Kg./cm.² la tensión admisible para el revestimiento de hormigón no armado, de 40 centímetros de espesor.

El cálculo demuestra que, para un espesor de hormigón de 33 cm., el esfuerzo máximo es igual a la

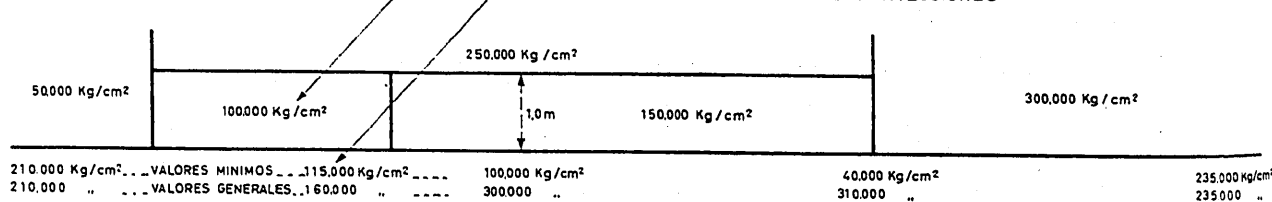
tensión admisible de 10 Kg./cm^2 , razón por la que se propuso dotar a la galería de un revestimiento de 33 cm. de espesor solamente, aumentando así su diámetro interior de 3,30 a 3,44 m. De esta manera se reservaba la posibilidad de reforzar ulteriormente el perfil por una gunita armada de 7 cm. de espesor,

Las absorciones de cemento fueron las siguientes:
 1.^a fase: 460 Kg./m. sobre la longitud total de la galería.
 2.^a fase: 135 Kg./m. sobre la longitud total de la galería.
 3.^a fase: 162 Kg./m. sobre 1.185 m. de galería tratada.
 4.^a fase: 770 Kg./m. sobre 843 m. de galería tratada.
 Sobre 500 m. de galería se hicieron simplemente

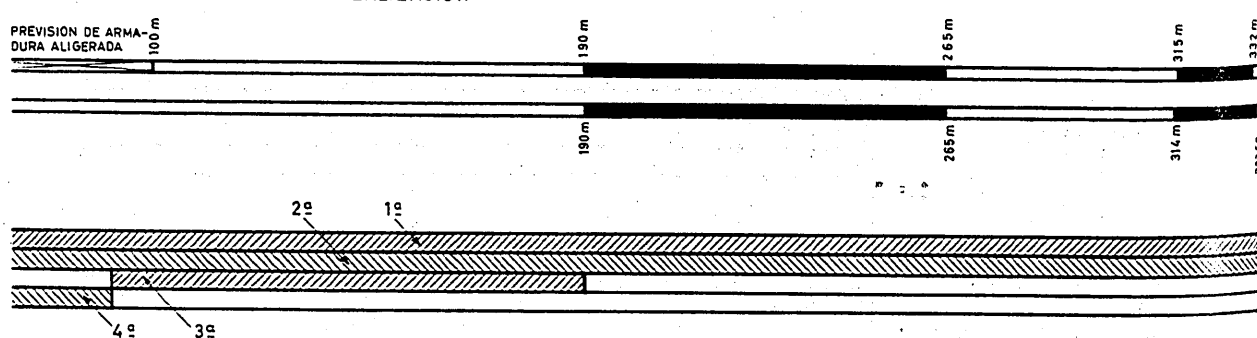
PLANTA DE LA GALERIA CON PARTICULARIDADES DEL TERRENO



MODULOS DE ELASTICIDAD DE LA ROCA ANTES Y DESPUES DEL REVESTIMIENTO Y DE LAS INYECCIONES



GUNITA ARMADA: PROGRAMA Y REALIZACION



DISTRIBUCION DE LAS 4 FASES DE INYECCIONES DE CEMENTO

Fig. 4.^a — Galería en carga del aprovechamiento del río Eume. Detalle del tratamiento.

conservando siempre el diámetro interior original de 3,30 m. Así se estaba en libertad de dimensionar y colocar armaduras, en última instancia, sólo en los lugares donde las determinaciones del módulo de elasticidad, ejecutadas después de las inyecciones, aconsejaron tal medida como indispensable.

La figura 3.^a muestra la forma en que fueron distribuidas las cuatro fases de inyección sobre la mitad aguas arriba de la galería.

las inyecciones de relleno de los huecos inevitables entre el hormigón y la roca, es decir, de 1.^a y 2.^a fases. Ya este valor, que representa la quinta parte de la longitud de la galería, da una idea de la economía posible, gracias al nuevo método, que permite evitar tratamientos generales sistematizados.

La figura 4.^a resume el tratamiento de un tramo de la galería. Además de las cuatro fases mencionadas fué preciso, como suele ocurrir frecuentemente

en tales trabajos, hacer algunas inyecciones complementarias locales. Estas no están indicadas en la figura 4.^a; pero las absorciones de cemento correspondientes están comprendidas en los valores dados más arriba.

Después de concluido el hormigonado y todas las inyecciones, se hizo una nueva determinación de módulos de elasticidad. La rapidez del método geofísico permitió hacerla sin retrasar el programa de los trabajos. De las 78 medidas ejecutadas, solamente 7 dieron valores inferiores a 140.000 Kg./cm.²; siendo las 3 más bajas de 40.000, 73.000 y 84.500 Kg./cm.², mientras que las otras 4 eran ya superiores a 100.000 kilogramos/cm.².

Los valores hallados mediante esta comprobación están indicados en la figura 4.^a. Se constató una cierta dispersión de los resultados y sucedió, incluso, que ciertas medidas posteriores al tratamiento dieron valores inferiores a los determinados para la misma zona por el reconocimiento previo. Estas diferencias pueden ser atribuidas a variaciones, muy localizadas, de las propiedades mecánicas del terreno, puesto que las medidas anteriores y posteriores al tratamiento no pudieron ser ejecutadas exactamente en los mismos puntos. Es evidente que hay que tener en cuenta esta dispersión en caso de futuras aplicaciones de este método.

A base de los resultados de la comprobación, y tomando en consideración los datos generales del problema, se decidieron las zonas de la galería que debían ser reforzadas mediante la ejecución de una gunita armada. En cuanto al tramo principal del

ejemplo de la figura 4.^a, no existía ninguna duda, y ya se había previsto, desde el comienzo de la campaña, que las inyecciones de cemento no serían remedio para la existencia de una falla longitudinal tan importante. Y efectivamente, fué en esta zona donde la medida de control dió un módulo de elasticidad de 40.000 Kg./cm.² solamente.

Por el contrario, los resultados de la verificación permitieron reducir — o incluso suprimir — en varias zonas las armaduras previstas inicialmente en una longitud total de galería de 360 m. (armadura para toda la presión sobre 246 m. y armadura más ligera sobre 114 m.). En realidad ha sido suficiente armar la galería en una longitud total de 128,50 m.

La comprobación final y concluyente fué llevada a cabo poco después por la Sociedad propietaria, cuando el embalse alcanzó su cota máxima. La galería se puso en carga cerrando la válvula situada en cabeza de la conducción forzada. Cerrando seguidamente también la válvula de la toma de agua, se pudo constatar un descenso del nivel del agua en la chimenea de equilibrio y en el pozo de la toma de agua, correspondientes a fugas de 8 litros por segundo, en una longitud de galería de 2.574 m.

De los trabajos descritos puede concluirse que los procedimientos geofísicos constituyen un nuevo y precioso medio auxiliar para dimensionar el revestimiento y determinar adecuadamente la importancia, forma y distribución de los trabajos de inyección de una galería, teniendo en cuenta las propiedades locales de las rocas atravesadas, difíciles de reconocer y de estudiar rápidamente mediante otros métodos.