

INYECCIONES QUIMICAS EN PRESENCIA DE AGUAS SALADAS(*)

Por H. BOLOMEY FRAZER

Ing. E. P. F. (Lausanne).

El canal y la tubería para el agua de refrigeración de la Central Térmica II de FECSA, Badalona, tenía que atravesar 80 m. del solar ocupado por la Central Térmica I, a una profundidad de 2,70 m. bajo el nivel de la capa freática, a fin de salvar los obstáculos de las construcciones existentes.

Como en su mayor parte, el terreno sumergido está constituido por arenas gruesas a medias no inyectables por cemento, y teniendo en cuenta que no se podía suspender la explotación de la Central existente, la única solución factible para excavar estas arenas consistía en consolidar e impermeabilizarlas mediante inyecciones químicas.

Los geles más económicos se obtienen mediante el empleo de silicato sódico y de un reactivo. Pero el agua en el suelo provenía de agua del mar, y la sal provocaba una floculación inmediata del silicato que se depositaba en el terreno alrededor del tubo de inyección e impedía la consolidación e impermeabilización del conjunto. La inyección previa de agua dulce permitió eliminar este obstáculo.

El artículo describe los estudios y ensayos previos a las inyecciones definitivas, las normas establecidas para dichas inyecciones, los medios de controles para asegurarse de la eficacia de las inyecciones durante el curso de la obra y el éxito final del tratamiento.

La experiencia adquirida en esta obra demuestra que la presencia de agua salada en el terreno dificulta, pero no impide las inyecciones de silicato-reactivo. Enseña, igualmente, que los geles no permiten el tratamiento eficaz de terrenos de alta permeabilidad que debería ser inyectado previamente por suspensiones de cemento.

I. Generalidades.

Para el sistema de refrigeración de la nueva central térmica F.E.C.S.A., en Badalona, se necesitan unos 7 m.³/seg. de agua del mar, impulsada por bombas desde la toma hacia las turbinas, a través de una tubería de refrigeración de un diámetro exterior de 2,20 m., colocada en un canal (fig. 1).

Debido a la presencia de construcciones existentes, canales de cables de alta tensión y zapatas de cimentación de los postes del parque de transformación, necesarios para la explotación de la primera central, era preciso — sobre 80 m. — alcanzar, con el canto inferior de la solera del canal, la cota — 2,40, pudiendo provocar la parada de la central cualquier rotura o movimiento de dichos elementos durante las obras de excavación, con las graves consecuencias económicas que esto puede representar (figs. 2 y 3).

Como el terreno estaba constituido, bajo el nivel de la capa freática (cota + 0,30), por te-

rrenos incoherentes, era preciso estudiar el modo de ejecución de las excavaciones sin provocar el descalce de las cimentaciones existentes.

Después de eliminar, sucesivamente, las soluciones siguientes:

- ejecución de un muro-pantalla o tablestacado, por impedirlo los numerosos obstáculos que hacían preciso alcanzar la cota — 2,40 con las excavaciones;
- rebajamiento de la capa freática hasta la cota de excavación, por estimar esta solución costosa, de seguridad insuficiente y no eliminar la necesidad de un elemento de contención, colocado previamente a la excavación, para evitar la formación de taludes naturales en la arena que descalzarían los cimientos vecinos;
- congelación del suelo, por la presencia de agua salada y temor a un levantamiento del terreno de cimentación de las construcciones existentes,

se decidió proceder a la consolidación del suelo mediante inyecciones.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de noviembre de 1970.

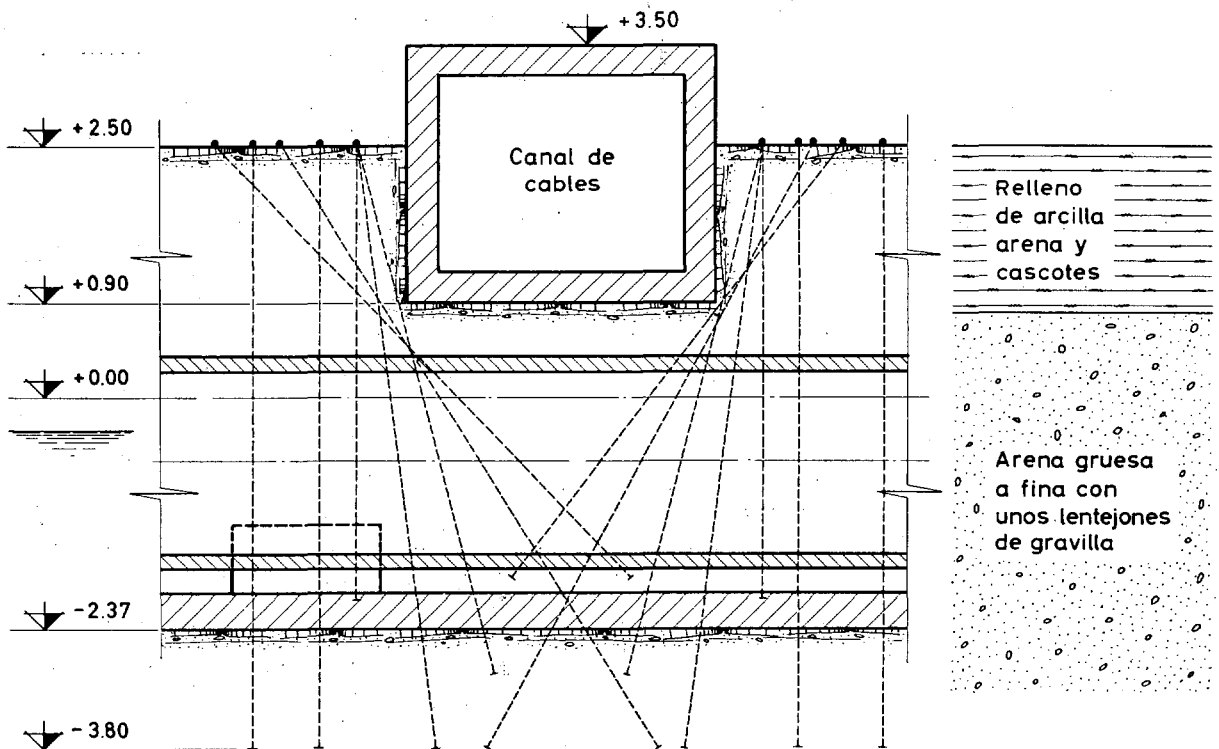
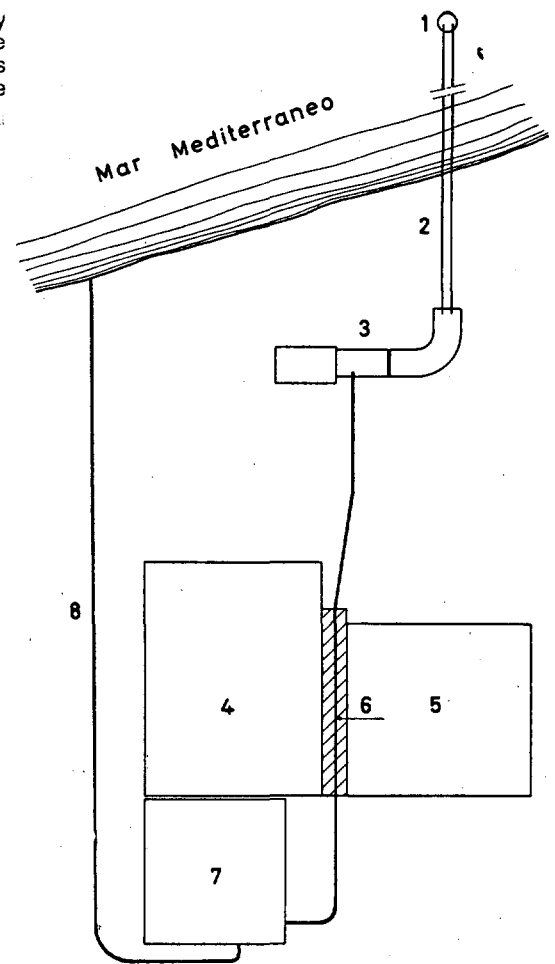
Fig. 1.—1. Toma de agua. 2. Sifón. 3. Cámara de agua y casa de bombas. 4. Central térmica existente. 5. Parque de transformación. 6. Tubería de refrigeración (inyecciones químicas). 7. Sala de turbinas. 8. Canal de agua caliente al mar.

II. Sondeos de reconocimiento.

En la zona de la obra, los sondeos de reconocimiento mostraron que el suelo está constituido, en su parte superior, por un relleno de arcilla, arena, grava y cascotes, en proporción variable y de un espesor comprendido entre 2,80 y 3,20 m. Este relleno se apoya sobre estratos de arenas, finas a gruesas, a veces algo limosas y, en general, mezcladas con gravillas y gravas. Estas capas de arena, cuya potencia no ha sido definida por los sondeos, tienen una compacidad de media a alta (figs. 4 y 5. Curvas granulométricas. Penetrómetro dinámico).

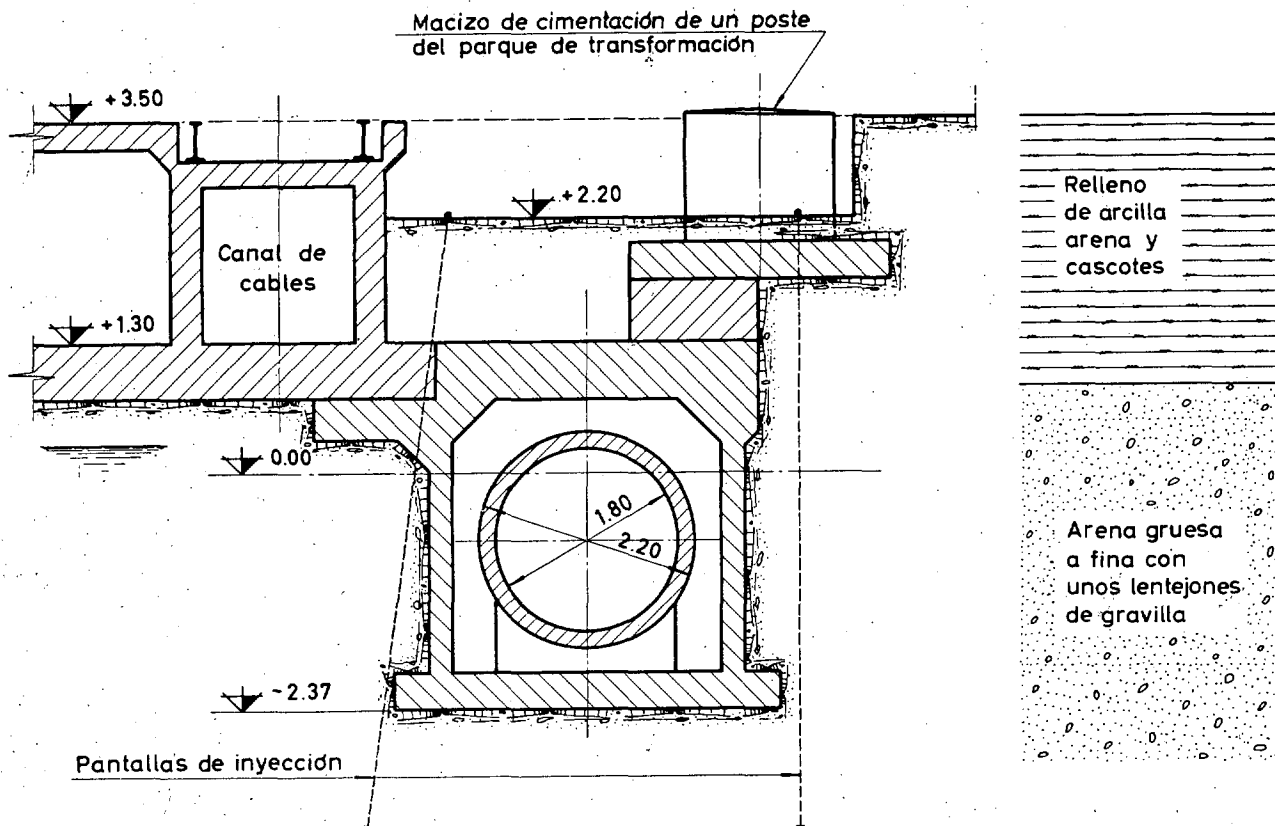
De las curvas granulométricas, así como de los ensayos de permeabilidad puntuales, se deduce que, por debajo de la capa freática, la permeabilidad del terreno oscila entre $K = 0,1 \cdot 10^{-4}$ y $8 \cdot 10^{-4}$ m./seg.

Durante el período de ejecución de los sondeos, se realizaron excavaciones por debajo del nivel de agua, en zonas próximas a la obra del canal de refrigeración, después de proceder a un rebajamiento de la capa freática. Estos achiques han permitido calcular la permeabilidad



CORTE LONGITUDINAL

Figura 2.



CORTE TRANSVERSAL

Figura 3.

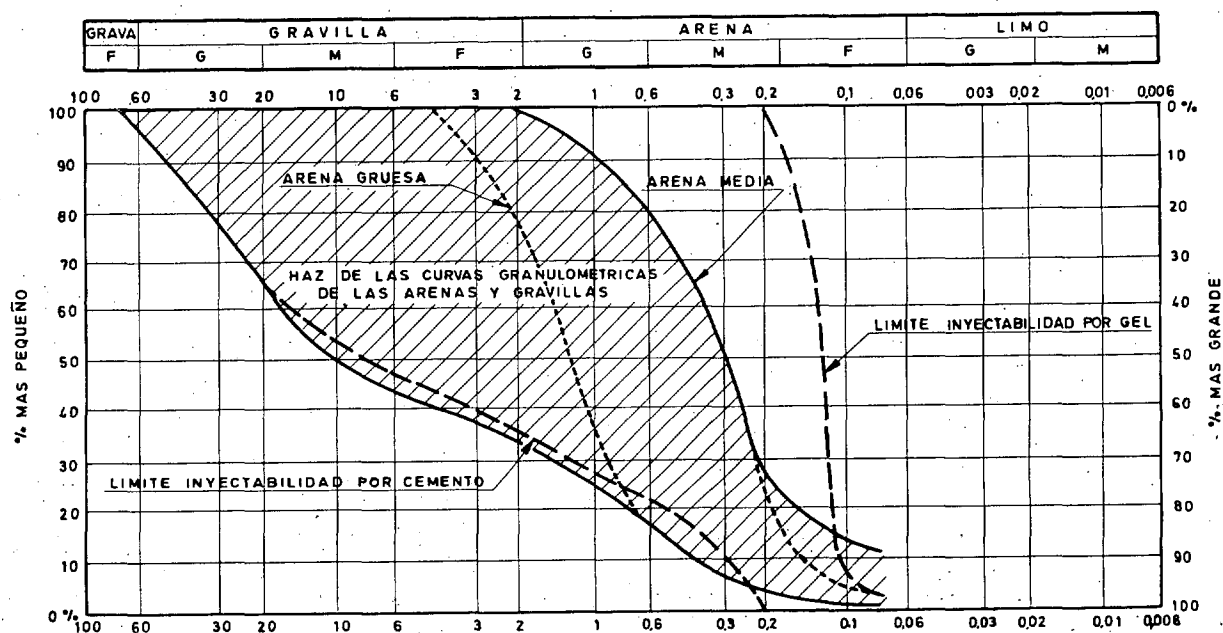


Figura 4.

media del terreno, del orden de $K = 2 \cdot 10^{-4}$ metros por segundo (fig. 6. Prueba de achique).

Del estudio de estas granulometrías y permeabilidades se llegó a la conclusión de que, salvo unos lentejones de gravas arenosas, el terreno natural no era inyectable con cemento, pero sí mediante productos químicos.

III. Pruebas y ensayos de inyecciones.

Se han ejecutado en cuatro etapas.

Después de los primeros ensayos se eligió la mezcla de inyección.

En la segunda y tercera etapas se estudió, sucesivamente, el modo de inyectar muestras de

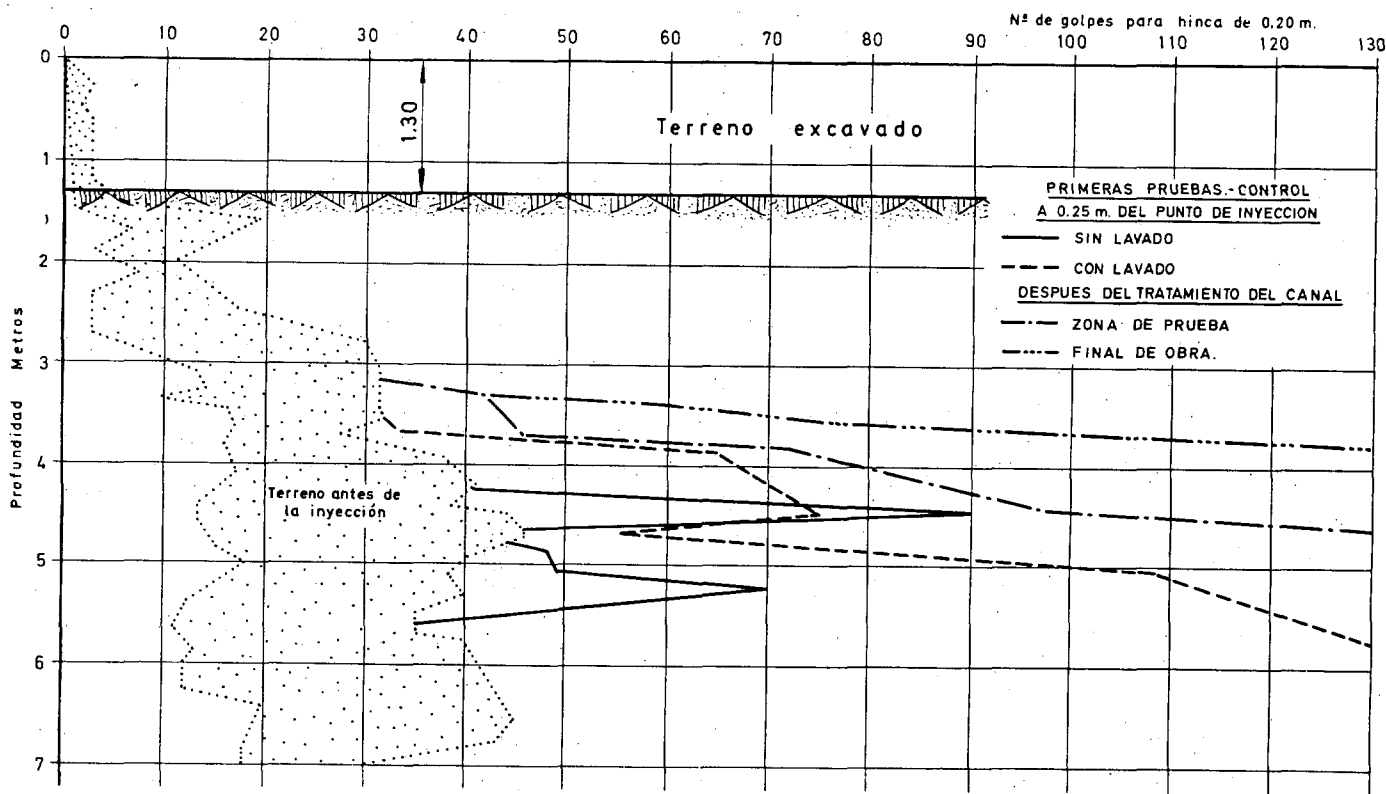


Figura 5.

En cuanto al relleno arcilloso e impermeable, podría constituir un buen techo a estas inyecciones, salvo unas zonas de cascotes con huecos que era imprescindible rellenar mediante inyecciones de cemento.

Entre los varios pozos de achique se bombeaban unos 100 m.³ de agua por hora, estableciendo así, en la zona de la futura obra, un flujo hidráulico a expensas casi totalmente del agua del Mediterráneo.

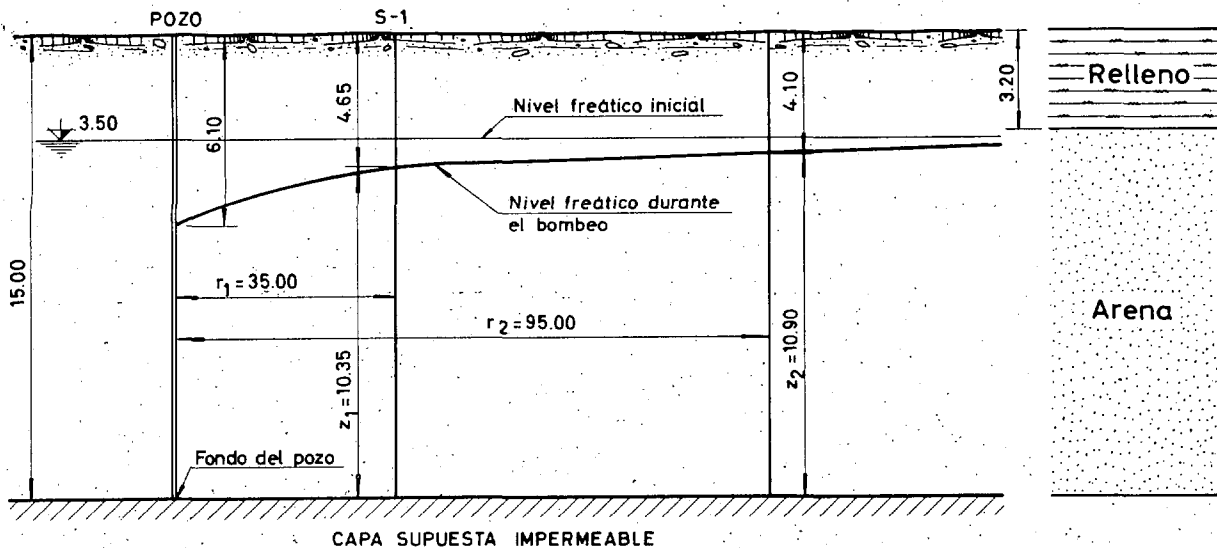
Las inyecciones químicas tenían que efectuarse, por tanto, en un medio salino donde había que prevenir un fracaso, bien sea por reacciones químicas entre los productos de inyección y el agua, o bien por deslave del material inyectado.

terrenos saturadas de agua salada, o el terreno *in situ*. En una cuarta etapa se procedió a las inyecciones de un tramo del canal y se comprobó su eficacia.

a) Mezcla de inyección.

Ante todo se fijaron las características que debería tener el gel:

- Un tiempo de fraguado mayor de quince minutos y menor de cuarenta y cinco.
- Una viscosidad inicial de la mezcla relativamente alta.
- Una resistencia a la compresión de las



$$K = Q \cdot \log n \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{1}{\pi (z_2^2 - z_1^2)} = 1.9 \cdot 10^{-2} \text{ cm/seg.}$$

$$\text{con } Q \cong 7 \text{ l./seg. } \log n \cdot \frac{r_2}{r_1} = 1.0 \quad z_2^2 - z_1^2 = 120.000 \text{ cm}^2$$

Figura 6.

probetas de arenas inyectadas, comprendida entre 10 y 30 Kg./cm.².

Las dos primeras condiciones tenían por objeto evitar, en lo posible, el deslave o la floculación del gel inyectado en las arenas sometidas a una corriente de agua salada, y la tercera tener siempre una resistencia del terreno inyectado suficiente para permitir, seguidamente, la excavación sin entibación, aunque parte del gel no haya fraguado por haber sido contaminado por las aguas saladas.

El gel encontrado que cumplía estas características, estaba constituido por silicato sódico superneutro, utilizando como reactivo un acetato de etilo, que se mezclaba con el silicato en proporciones variables, según la temperatura. A este gel se le adicionaba agua hasta obtener la viscosidad deseada.

Los geles de reactivo mineral (ácidos diluidos, aluminato sódico, bicarbonato sódico, fosfato sódico, etc.) no daban ni la viscosidad ni la resistencia deseadas. De los geles de reactivo orgánico (ésteres, formanide, glyoxal, etc.), los acetatos de etilo y de isopropilo eran los más

baratos, siendo el tiempo de gelificación demasiado grande en el segundo caso.

b) Inyecciones de probetas de arena.

Las primeras pruebas han consistido en rellenar bidones de 200 litros, mediante arenas extraídas del terreno y compactadas hasta llegar a la compacidad natural del mismo. A continuación, se saturaban las arenas, bien fuera mediante agua dulce o mediante agua del terreno. Por último, se inyectaban estas arenas con el gel del silicato y acetato, con o sin una inyección previa de agua dulce. Estas pruebas han demostrado:

- Las arenas saturadas de agua dulce son perfectamente inyectables, tanto las gruesas como las finas. Al romper los bidones, se obtiene un cilindro de arena petrificada de resistencia a la compresión variable, pero siempre superior a los 10 Kg./cm.².

Antes de eliminar de manera definitiva los geles de reactivo mineral, mucho más baratos

por tener que ser necesariamente diluidos en agua, se ejecutaron con ellos, igualmente, pruebas de inyección, comprobando que, además de no obtener una resistencia suficiente, las arenas gruesas eran mal tratadas, especialmente cuando se empleaba el bicarbonato sódico.

— Las arenas saturadas de agua salada no son inyectables. El silicato, al entrar en contacto con el agua salada, floccula, impermeabilizando el terreno de tal manera, que no permite la penetración del gel dentro de las arenas. Quedaba inyec-

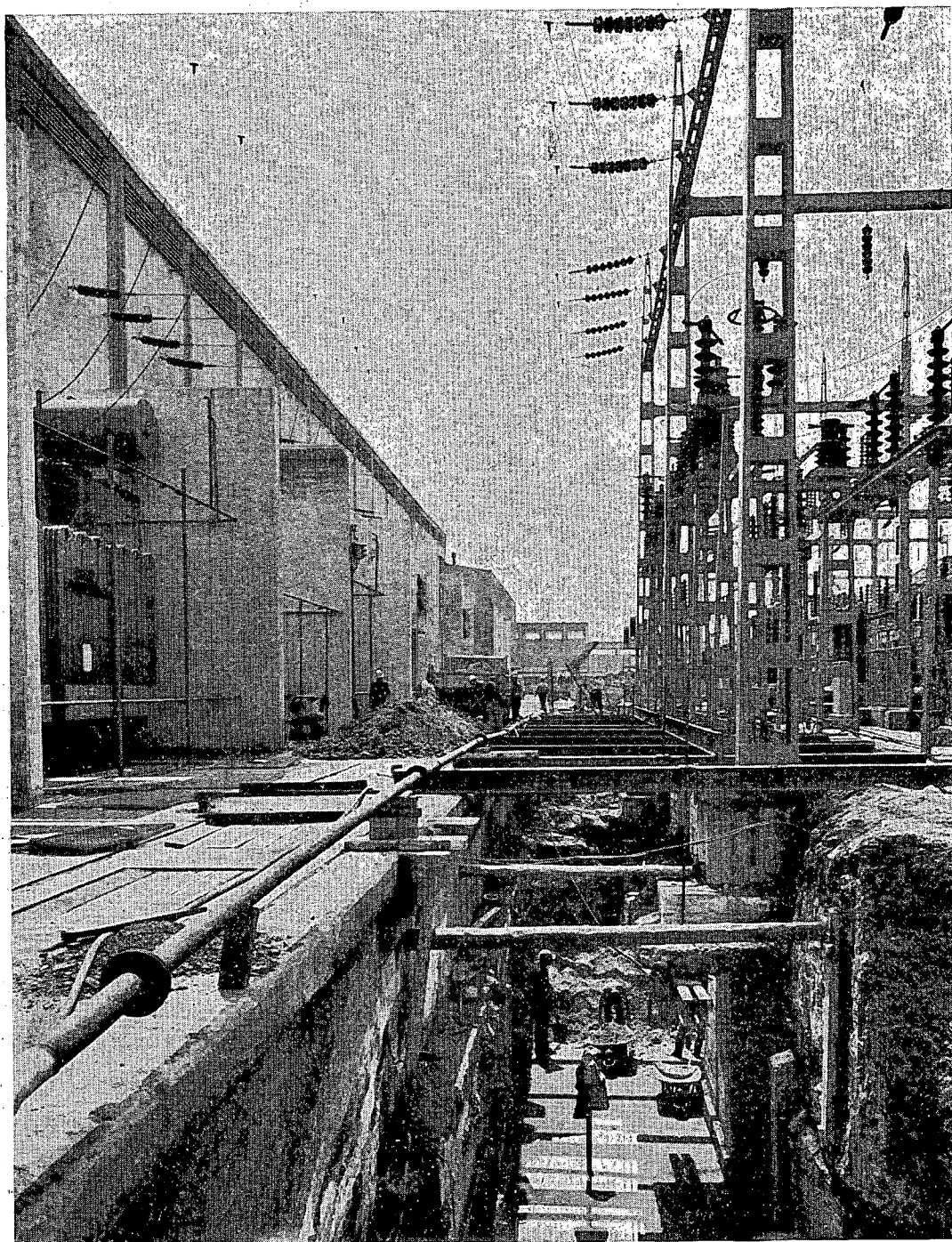


Figura 7.

tado solamente un pequeño cilindro central y las zonas de contacto entre arena y chapa de los bidones. Estas pequeñas zonas de arenas inyectadas ofrecían poca resistencia.

- En arenas saturadas de agua del terreno, inyectadas primeramente con agua dulce y seguidamente con gel de silicato, se observa que el éxito del tratamiento depende de la cantidad de agua dulce introducida. Un resultado satisfactorio se consiguió cuando se inyectaba, en cantidades equivalentes, primero agua dulce y a continuación silicato. La arenisca obtenida de esta manera, si no tenía la resistencia de las primeras probetas, sí tenía una resistencia suficiente para el objeto perseguido de excavar el terreno sin entibación.

c) *Inyecciones del terreno in situ mediante taladros aislados.*

Tenían por objeto principal estudiar si el prelavado del terreno *in situ*, mediante agua dulce, tenía el mismo éxito que durante los ensayos sobre las muestras en bidones.

En total, se inyectaron seis taladros aislados, durante los cuales se observó sucesivamente:

- La necesidad de tratar primeramente el relleno mediante inyecciones de cemento estabilizado, para formar un techo a las inyecciones químicas. Debido a la heterogeneidad del relleno, estas inyecciones no podían servir para consolidarlo, pero sí obtener una impermeabilización suficiente para el fin deseado.
- La necesidad de inyectar el terreno por etapas descendentes, para evitar la subida del gel y que las capas inferiores recibiesen un tratamiento insuficiente.
- La necesidad de sustituir las aguas saladas en toda la zona a tratar, inyectando agua dulce durante todo el proceso de la perforación y al final de la misma.

Tomando todas estas precauciones, la petrificación de las arenas era excelente sobre un diámetro de 0,5 m., y suficiente sobre un diámetro de 1 metro.

d) *Tramo de ensayo.*

El tramo de ensayo ha consistido en inyectar una longitud de 6 m. del futuro canal de refrigeración y, seguidamente, excavar, en el interior del recinto tratado, un pozo de 3×3 m. de sección, hasta la cota — 2,50 m.

Antes de empezar el tratamiento, se excavó el terreno en 1,30 m. de profundidad, hasta la cota + 2,20, con el fin de suprimir los riesgos de accidentes, debidos a posible contacto de los equipos con cables aéreos de alta tensión. Seguidamente, se inyectó el terreno en tres fases, tal como previsto después de los primeros ensayos, de 0 a 3 m., de 3 a 4,50 m. y de 4,50 a 6 m. En la 1.^a fase se inyectaron, a través de 15 taladros, 2 300 litros de cemento-bentonita. En la 2.^a fase, 12 350 litros de silicato-acetato por medio de 30 taladros; por último, en la fase final, 10 870 litros a través de 40 taladros.

Al ejecutar esta tercera fase de inyección, se pudo comprobar que el tratamiento de 3 a 4,50 metros era probablemente bueno. La resistencia a la perforación de los taladros profundos había aumentado sensiblemente y las absorciones de gel en la zona de la segunda etapa eran débiles. Además, se hicieron pruebas de hinca, observando que las puntazas cónicas no podían penetrar en las arenas inyectadas.

La excavación del pozo sin entibación se hizo sin dificultad, siendo el caudal de filtración, una vez finalizado el pozo, de 0,5 lit./seg. Las paredes verticales ofrecían un excelente aspecto y tenían que ser excavadas mediante pico. Por el contrario, y como previsto, las inyecciones del techo mediante cemento-bentonita, no han permitido consolidar el relleno.

Ahora bien, aunque el tratamiento haya sido eficaz y se haya podido observar que la distancia elegida entre taladros de 0,75 m., como máximo, era correcta, la petrificación de las arenas no había permitido obtener las resistencias alcanzadas en las inyecciones de las arenas en bidones, ya que una parte importante del silicato inyectado había floculado. Estos flóculos, por estar el terreno lavado, no habían impedido la penetración del silicato en el terreno; no obstante, se producía un deslave con aumento de la permeabilidad, especialmente en la zona del fondo del pozo, muy rápida en los primeros días y casi nula después de un par de meses.

Teniendo en cuenta el resultado de esta

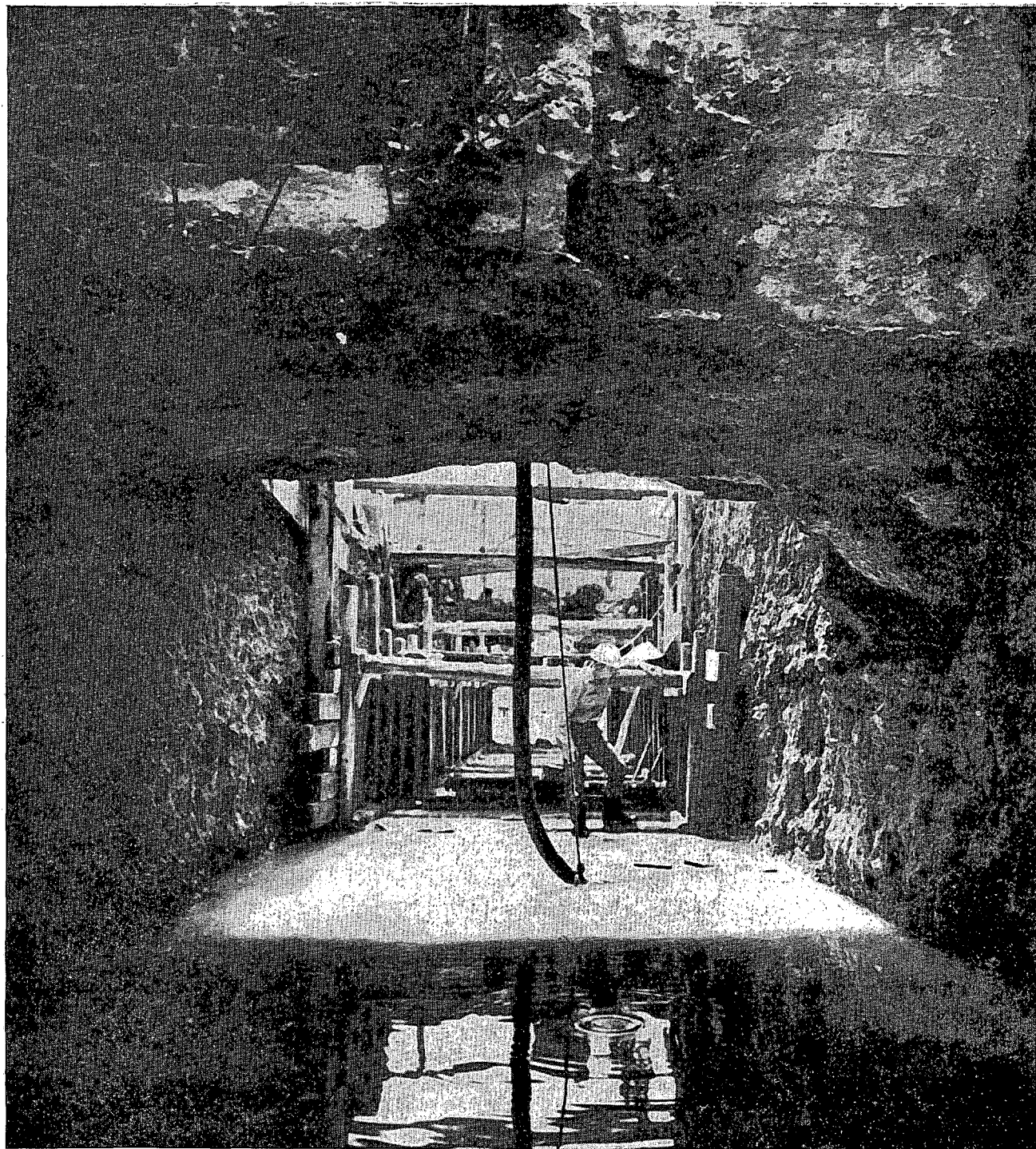


Figura 8.

prueba se decidió proceder a la inyección definitiva de manera idéntica a la del tramo de ensayo, pero aumentando aún el lavado de las are-

nas y la profundidad del tratamiento con la ejecución de una cuarta fase de inyección hasta la cota — 4,30 m.

IV. Tratamiento definitivo.

A partir de las observaciones hechas en el pozo de control, se ha establecido el siguiente programa de trabajo para consolidar e impermeabilizar las arenas:

- Excavación del terreno hasta 1,30 m.
- Taladros de 3 m. de longitud, distantes entre sí 3 m., inyectados mediante cemento-bentonita.
- Taladros de 4,50 m., distantes entre sí 0,75 metros, inyectados mediante silicato desde 4,50 a 3 m.
- Taladros de 6 m. de longitud, distantes entre sí 0,75 m., también inyectados mediante productos químicos.
- Por último, taladros de 6,50 m., distantes entre sí 1,00 m. para inyección de solera del futuro canal y control de las inyecciones anteriores.
- A continuación, excavación por tramos hasta la cota — 2,40 m. y hormigonado del canal de refrigeración.
- Durante estas excavaciones, apuntalamiento de los postes del parque de transformación que se apoyan sobre las capas superiores del terreno no consolidado.

El lavado de las arenas se hizo mediante un volumen de agua igual, aproximadamente, a una vez y media del volumen de los productos inyectados a continuación. Se controlaba la eficacia de este lavado durante las inyecciones. Cada vez que el lavado era ineficaz, bien sea por un lavado defectuoso o por una nueva sustitución del agua dulce por agua salada, debido a las circulaciones de agua resultantes de los achiques o del tratamiento de taladros próximos, subía la presión de inyección y se procedía entonces a un nuevo lavado mediante agua dulce.

Las absorciones del gel han sido, en general, iguales a las previstas, salvo en algunas zonas, donde el terreno ofrecía mayor permeabilidad. En dichas zonas, a pesar de la mayor absorción, los controles mediante pruebas de hincas han demostrado que el terreno ofrecía una resistencia algo menor que en las zonas de débil absorción (figura 5).

Antes de empezar las excavaciones definitivas se hicieron, además de las pruebas de hincas, unos taladros de control, que demostraron

que las paredes del taladro se mantenían perfectamente y que la permeabilidad de las arenas era pequeña, también en las zonas flojas de alta permeabilidad inicial.

Durante todas las inyecciones no se apreció ningún levantamiento del terreno, lo que se hubiera producido inevitablemente si los productos químicos, al entrar en el terreno, hubieran formado lentejones, provocando rotura del mismo. Así, pues, la nivelación del terreno ha sido un control más del éxito de las inyecciones antes de proceder a la excavación.

En total se inyectaron, a través de 3 000 m. l. de taladros, 900 m.³ de relleno mediante 40 m.³ de lechada de cemento estabilizado y 1 400 m.³ de arena mediante 650 m.³ de gel. A estos valores corresponde, aproximadamente, un consumo, por metro lineal de galería, de 5 m.³ de silicato y 350 litros de acetato de etilo.

V. Observaciones durante las excavaciones.

Al excavar el terreno se comprobó que, en general, el tratamiento definitivo había sido más eficaz de lo que se podía esperar después de ejecutar el pozo de control. En las zonas de arenas más finas se había conseguido una resistencia tal, que no podía ser excavado el terreno mediante pico y fue necesario el empleo de martillo neumático. En las arenas gruesas, la excavación era fácil, pero la permeabilidad seguía siendo muy pequeña.

Numerosas muestras de arenas han sido extraídas durante la excavación para determinar sus resistencias a la compresión simple y sus permeabilidades.

En arenas medias, estas resistencias oscilaron alrededor de los 20 Kg./cm.² y, en arenas gruesas, de 7 Kg./cm.². En algunas zonas de gravillas sin arenas, no se pudieron extraer muestras intactas por falta de resistencia.

En cuanto a las permeabilidades estuvieron comprendidas entre $0,4 \cdot 10^{-6}$ y $10 \cdot 10^{-6}$ m./seg. correspondiendo las permeabilidades más elevadas a las arenas más gruesas.

En dos lentejones de terreno de débil espesor, constituidos por gravas y gravillas con porcentaje débil de arena gruesa y ausencia de arena fina, donde no se pudieron extraer muestras, las permeabilidades permanecieron altas, pero las filtraciones, a través de estas zonas, no eran

lo suficientemente importantes como para dificultar las excavaciones.

Al ver el excelente aspecto de las excavaciones, se excavaron tramos de 30 m. de longitud, en vez de los 10 previstos antes de entibar las paredes, para proceder al hormigonado del canal de refrigeración.

VI. Conclusiones.

Las inyecciones químicas efectuadas para permitir la excavación en arenas de una zanja de unos 80 m. de longitud, hasta una profundidad de 2,50 m., por debajo del nivel freático, han ofrecido dificultades, debido a la presencia de agua salada en el terreno y a la gran variación de la permeabilidad del terreno de una zona a otra.

Se ha conseguido vencer la primera dificultad mediante una sustitución del agua salada en el terreno por agua dulce, sin estimarse preciso adoptar medidas para tratar previamente los lentejones, de terreno muy permeables, mediante cemento.

Durante la excavación del terreno se observó que el suelo mejor tratado ha sido el de menor permeabilidad inicial, y que la eficacia del trata-

miento disminuye cuando aumenta esta permeabilidad, o sea, cuando es mayor el tamaño de los granos que lo constituyen.

Por este motivo, si la excavación hubiera tenido que alcanzar mayor profundidad, o si las zonas de alta permeabilidad inicial hubieran sido mucho más importantes, la falta de tratamiento mediante cemento-bentonita habría podido comprometer el éxito final. La débil dimensión de los lentejones de material grueso justifica la supresión de este tratamiento previo, pero esta observación demuestra que las inyecciones químicas por sí solas en terrenos de permeabilidad superior a $K = 5 \cdot 10^{-4}$ m./seg., son de eficacia muy reducida, además de ser normalmente antieconómicas.

VII. Agradecimiento.

Queremos agradecer la confianza en estos métodos y el espíritu de colaboración de los ingenieros responsables de parte de FECSA y COPI-SA que han permitido la realización de esta obra, así como a la empresa realizadora de estos trabajos, Cimentaciones Especiales, S. A.-Procedimientos Rodio, por habernos facilitado cuantos datos y documentos de sus archivos hemos necesitado para la redacción de este trabajo.