

n° 113 Febrero 75

A. Balossi Pestilli
(copra surica)

CONGELACION DE LOS TERRENOS

A. Balossi

Congelación de los terrenos

ACHILLE BALOSSI RESTELLI, Ingeniero Civil

1. INTRODUCCION

Ante todo debo dar las gracias a los señores organizadores del Cursillo M. C. por haberme invitado a esta reunión tan importante y de gran interés.

En mi intervención me esforzaré en examinar las posibilidades reales de la aplicación de la técnica de la congelación de los terrenos, como medio para sobrepasar dificultades particulares durante el curso de la ejecución de trabajos en las zonas urbanas; la presencia de edificios y de obras de arte existentes hacen que ese tratamiento sea más delicado que en el caso en que la intervención se haga en zonas libres.

Con el fin de hacerme comprender mejor, estimo necesario examinar en primer término el problema de la congelación de los terrenos, globalmente, desde luego, sin descender a la descripción de los detalles de esa tecnología que es bastante complicada.

2. PROCEDIMIENTO DE CONGELACION

La técnica de la congelación de los terrenos es conocida y aplicada desde hace muchos decenios; los mineros la empleaban ya a principios de siglo para la excavación de ante-túneles y de pozos en terrenos flojos y bajo el nivel freático. Se trataba seguramente de intervenciones localizadas ejecutadas con medios primitivos y desde luego poco potentes.

Desde hace algún tiempo (una veintena de años) la congelación ha encontrado aplicaciones cada vez más importantes en el campo de la ingeniería civil.

En Roma, por ejemplo, ese procedimiento ha sido ensayado con éxito en 1937, para la restauración y consolidación del Ara Pacis Augustae: la congelación ha permitido recuperar importantes partes de ese monumento que habían quedado englobadas con las cimentaciones del Palacio de Almagia en un terreno arcilloso a muchos metros de profundidad bajo la capa freática (fig. 1).

Por lo que se refiere a Europa, puede decirse que en el transcurso de estos últimos años, se han hecho grandes progresos en el empleo de ese procedimiento en una vasta escala.

CONGELACION DEL SUELO PARA LA RECUPERACION DEL ARA PACIS AUGUSTAE

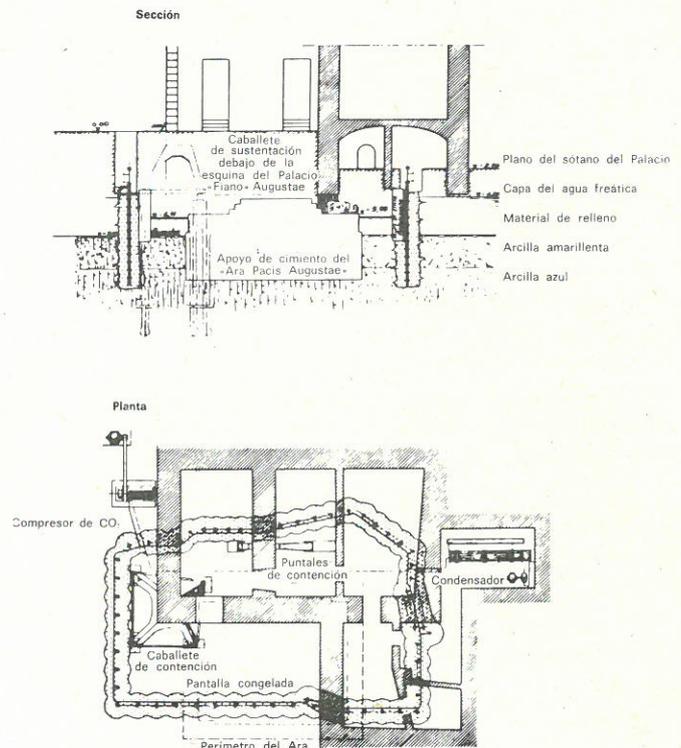


Fig. 1. — Ara Pacis Augustae.

Interesantes intervenciones se han realizado asimismo en el Japón, en los EE. UU. y, sobre todo en Rusia.

Más adelante mostraré algunos ejemplos de aplicación recientemente ejecutados.

Los procedimientos de producción del frío utilizados hasta ahora se diferencian entre sí según el medio que aporta las frigorías al terreno; en cambio tienen de común, salvo algunos detalles, el método por el que se produce el intercambio térmico con el terreno: es decir los grupos de tubos congeladores situados en el terreno, por los que circula el medio refrigerante en estado líquido o gaseoso (fig. 2).

Pasemos ahora revista brevemente a los diferentes procedimientos.

GRUPO DE DOS SONDAS CONGELADORAS

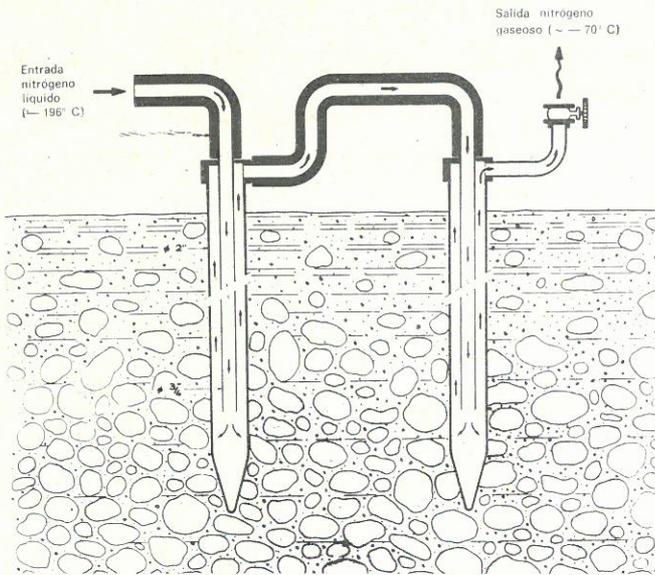


Fig. 2. — Tubos congeladores.

a) Procedimiento indirecto. Circuito cerrado (doble cambio)

Es el procedimiento más antiguo y que siempre es muy utilizado. Su esquema de funcionamiento está reproducido en la figura 3.

La fuente de frío está constituida por un circuito frigorífico: por medio de compresores y de condensadores el fluido frigorífico (que tiene un punto de ebullición muy bajo) es llevado al estado líquido. En el interior del evaporador (intercambiador de calor) el fluido frigorífico pasa al estado gaseoso tomando su calor de ebullición de la «salmuera». Se tiene aquí el *primer intercambio térmico*.

Hay diferentes tipos de fluidos frigoríficos, entre los cuales los más empleados son el amoníaco y el freón; más raramente el anhídrido carbónico.

El *segundo intercambio térmico* se produce entre la salmuera y el terreno a través de las paredes de los tubos congeladores.

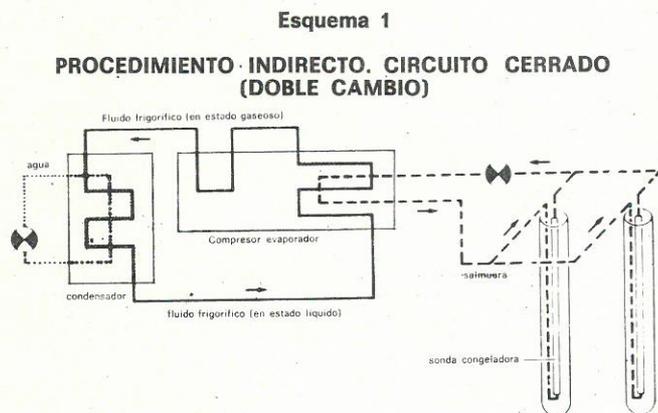


Fig. 3. — Esquema del procedimiento «salmuera».

La «salmuera» generalmente empleada está constituida por cloruro cálcico disuelto en agua: su concentración puede ser variada en función del punto de congelación necesario (la concentración máxima se obtiene cuando su densidad es de 28 grados Baumé). En tal caso el punto de congelación es de -55°C . De todos modos la «salmuera» puede formarse con un líquido cualquiera que tenga un punto de congelación muy bajo, como el alcohol, la solución de cloruro sódico o de cloruro magnésico, etc.

Ese procedimiento es frecuentemente empleado a causa de su economía. En cambio es necesario tener en cuenta, al hacer su elección, el tiempo necesario para conseguir la congelación del terreno (de 20 a 25 días), debido a la pequeña potencia criogénica en el tiempo: lo cual hace imposible una intervención rápida y que, a veces, es necesaria cuando se trata de trabajos especialmente delicados.

El transporte del grupo frigorífico no es ya ningún problema importante puesto que hoy día es posible disponer de grupos «monobloc» de dimensiones reducidas y de potencias considerables.

b) Procedimiento directo. Circuito abierto

Se trata del sistema de nitrógeno líquido que ha sido puesto a punto en Italia en el transcurso de estos últimos años y que ha sido ensayado con éxito en dos obras importantes.

También se han ejecutado algunos tratamientos si bien de menor importancia en otros países europeos, en los EE. UU. y en el Japón.

El esquema de funcionamiento está representado en la figura 4.

El nitrógeno líquido, obtenido en la fábrica mediante la destilación fraccionada del aire, es transportado a la obra por medio de camiones-cisternas especiales en los que es mantenido a una temperatura de -196°C , a una presión de unas 10 atmósferas: hay que hacer notar que -196°C es su temperatura de cambio de estado a la presión normal.

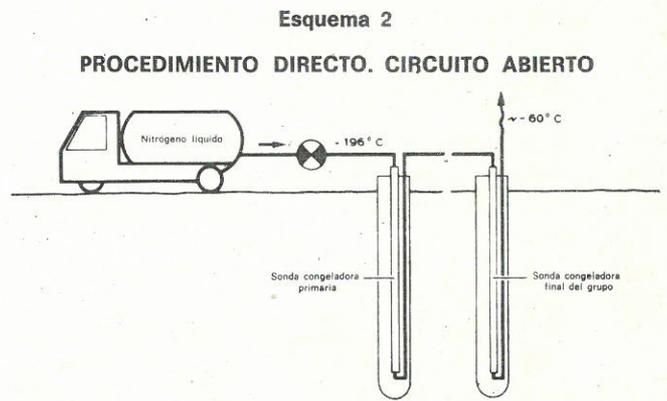


Fig. 4. — Esquema del procedimiento «nitrógeno».

En la obra, generalmente, el nitrógeno líquido se conserva en depósitos de almacenaje de dobles paredes, entre las que se ha hecho el vacío; en ellos conserva sus características físicas hasta el momento de su utilización.

La introducción en el circuito se hace directamente utilizando la presión formada en los depósitos (que puede ser regulada por medio de evaporadores) a través de un tubo de distribución que transporta el nitrógeno líquido a las sondas congeladoras.

Estas últimas están divididas en grupos y unidades en serie entre sí.

A la salida de la última sonda de cada grupo hay una válvula a través de la cual el nitrógeno, ya convertido en gas, escapa hacia la atmósfera.

Deseo subrayar aquí dos aspectos muy importantes para la elección del sistema:

1. *La gran potencia* de aportación de frigorías al terreno (en el sentido de caudal de frigorías) que permite constituir muy rápidamente una pantalla continua de terreno congelado (en 30 ó 40 horas) y afrontar situaciones difíciles (por ejemplo, la presencia de una corriente de agua en el terreno) a condición de que la velocidad de tal corriente no sea demasiado grande.

Para dar una idea de esa potencia, citaré el balance del rendimiento de un litro de nitrógeno líquido tal como se utiliza en los tratamientos normales:

— calor específico de vaporización 39 Kcal/l

— calor específico del gas =
0,285 Kcal/m³ normal × 1° C

de donde

$$0,285 \times 0,7 \times \Delta T \left\{ \begin{array}{l} - 196^\circ \text{C} \\ - 60^\circ \text{C} \end{array} \right.$$

$$0,285 \times 0,7 \times 136 = \underline{27 \text{ Kcal/l}}$$

$$\text{Total aproximado} \quad \underline{66 \text{ Kcal/l}}$$

Durante el cambio de estado (que se suele llamar «shock» térmico) se tiene pues una aportación de frigorías igual aproximadamente al 60 % de la cantidad total.

El punto de «shock» cambia de posición durante el curso de la congelación: se va desplazando desde la primera sonda de una serie hasta la última. A veces, cuando se ha formado ya la pantalla, no sigue produciéndose el cambio de estado y se ve salir nitrógeno líquido de la última sonda; en ese caso se procede a detener inmediatamente el grupo.

2. *La sencillez extrema de la instalación.* Es muy fácil equilibrar el circuito o bien equilibrar

las pérdidas de carga en las entradas de cada grupo de sondas.

No son necesarios dispositivos especiales; eventualmente puede introducirse nitrógeno en las sondas tomándolo directamente del camión-cisterna sin ayuda de bomba alguna. La operación es proporcionada por una pequeña cantidad de nitrógeno que se hace vaporizar en un serpentín de que está dotado el camión cisterna.

Por todas estas razones y puesto que el nitrógeno líquido es muy costoso, puede concluirse que esos tratamientos sólo resultan ventajosos cuando hay que afrontar trabajos particularmente difíciles que exijan intervenciones rápidas o altas resistencias mecánicas de la estructura del terreno congelado.

c) Procedimiento directo. Circuito cerrado (simple intercambio)

En este procedimiento que no es muy utilizado y que, en cierto modo, es la síntesis de los dos procedimientos ya descritos, el esquema de funcionamiento se halla representado en la figura 5.

El fluido frigorífico en estado líquido (que en general es NH₃) se halla puesto directamente en las sondas congeladoras y sale de una central frigorífica constituida simplemente por un compresor y un condensador. La vaporización se efectúa en las mismas sondas como en el caso del nitrógeno. El fluido en estado gaseoso es recuperado y devuelto a la central frigorífica.

El intercambio térmico frente al terreno es mucho más eficaz que en el caso de la «salmuera» porque a las frigorías transmitidas por el líquido que tiene una temperatura más baja que la salmuera se suman las frigorías originadas por el calor de vaporización.

Este procedimiento, sin embargo, requiere instalaciones muy complicadas y es muy difícil de regular. Se tiene noticia de recientes aplicaciones en Rusia.

Esquema 3

PROCEDIMIENTO DIRECTO. CIRCUITO CERRADO (INTERCAMBIO SIMPLE)

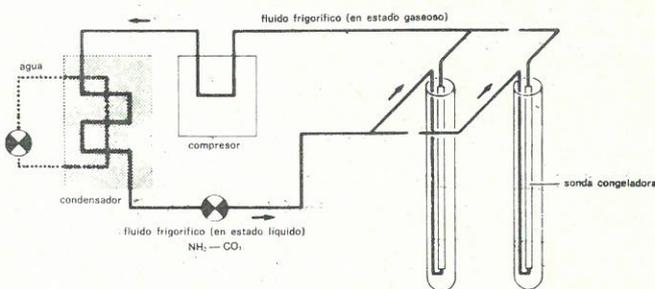


Fig. 5. — Esquema del procedimiento de intercambio simple

d) Procedimiento mixto

Se trata del procedimiento que ha sido recientemente experimentado con éxito en la obra de Abbadia Lariana (muy cerca de Como, en Italia). La pantalla helada, ejecutada con el nitrógeno líquido por razones bien precisas pudo a continuación ser mantenido con salmuera (doble intercambio térmico).

Este sistema permite asociar la gran potencia (y por consiguiente la elasticidad y la seguridad de la congelación por el nitrógeno) con la economía de la «salmuera» para tratamientos prolongados en el tiempo. Este sistema puede ser considerado como el mejor.

La estructura congelada que seguramente ha quedado homogeneizada por todas partes durante la fase de congelación es, a continuación, mantenida inalterada gracias a la circulación del líquido frigorífico, que, en un medio que ya está «frío», alcanza muy rápidamente su temperatura de régimen.

3. EL PROYECTO

Trataré aquí solamente de las principales funciones que deben ser introducidas para proyectar un tratamiento de congelación.

Es muy difícil establecer con precisión las etapas necesarias para la solución de problemas que impliquen un tratamiento por congelación porque las situaciones que se deben afrontar tienen características generalmente muy diferentes, lo cual hace imposible fijar los criterios de proyecto.

Basta pensar, por ejemplo, en la gran diferencia que hay en lo concerniente al método y al precio, entre una congelación para conseguir solamente una impermeabilización y una congelación que deba dar también al terreno cierta resistencia mecánica.

De todos modos siempre es necesario recurrir a un examen preciso de las magnitudes siguientes:

— resistencia a la compresión y a la tracción necesarias para garantizar la estabilidad deseada de la estructura del terreno congelado.

Las estructuras pueden revestir diferentes formas; por ejemplo, para los pozos son generalmente bóvedas coaxiales, exteriores a la superficie de excavación de sección circular o elíptica; para los túneles, son bóvedas con generatrices paralelas al eje del túnel en forma similar a la de la línea del trasdós de la excavación, o bien son arcos resistentes que protegen la clave y que normalmente pasan a lo largo de los pies-derechos.

Las estructuras están calculadas admitiendo la realización de una pantalla continua de terreno congelado de cierto espesor y con una temperatura interior por debajo de los 0° C, inferior a la tem-

peratura que se tiene en las extremidades exteriores («pantalla útil»).

La resistencia R a la rotura (compresión simple) es función del terreno (tipo de terreno, densidad, humedad, granulometría, etc.) y de la temperatura alcanzada.

$$R = f(\text{terreno}, ^\circ\text{C})$$

Citaré algunos valores a título de ejemplo:

Tipo de terreno	Rotura por compresión simple, en Kg/cm ²	
	Temperatura — 10° C	Temperatura — 3° C
Arena saturada	120	80
Arena arcillosa saturada	80	45
Limo arenoso saturado	50	25
Arcilla saturada	25	15

La resistencia a la tracción de un limo arenoso saturado es de 10 kg/cm² aproximadamente (a — 10° C).

Se llega pues a determinar la forma y espesor de la «pantalla útil» resistente, introduciendo cierto coeficiente de seguridad.

— *Tiempo de congelación* T necesario para obtener la «pantalla útil»

Ese tiempo es función del tipo de fluido frigorífico utilizado (nitrógeno, salmuera, etc.), de la distancia entre ejes i , de las sondas congeladoras y de su diámetro d .

$$T = f(i, d, \text{fluido})$$

El estudio preciso de esta función conduce a la determinación de la geometría del tratamiento y de la elección del tipo de procedimiento a adoptar.

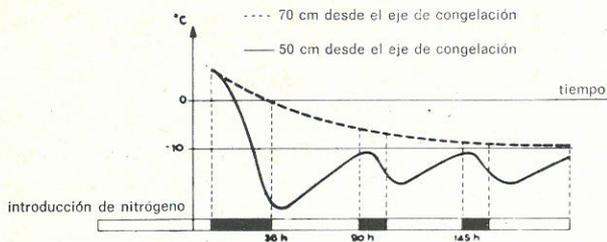
La elección final deberá, desde luego, tener en cuenta también los precios: será preciso, en conclusión, procurar una *solución óptima* para la realización de la «pantalla útil» precedentemente determinada.

A cada fluido frigorífico corresponde una cierta difusión de frigorías en el terreno: para establecer la distancia i entre ejes es importante conocer la evolución en el espacio alrededor de la sonda de la isoterma correspondiente a una temperatura igual a la que se quiere obtener en los puntos exteriores de la «pantalla útil».

A título de ejemplo cito en la figura 6 un caso práctico de variación de la temperatura a lo largo del tiempo en dos puntos distanciados 50 cm y 70 cm respectivamente de las sondas congeladoras en las que circulaba nitrógeno líquido.

NITROGENO LIQUIDO

Variaciones de la temperatura del terreno



SALMUERA

Velocidad de migración de la isoterma -2°C

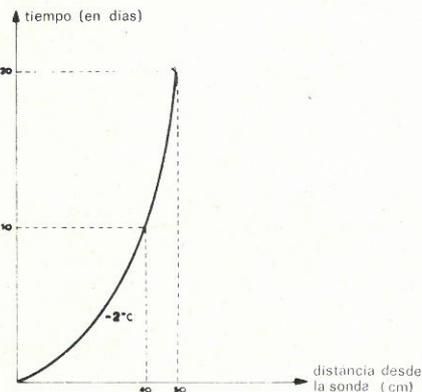


Fig. 6. — Diagrama de temperaturas.

En la parte inferior de la figura se recogen las evoluciones que en el transcurso del tiempo experimenta la isoterma -2°C en función de la distancia de la sonda congeladora (caso de la «salmuera»).

Con ese diagrama es posible establecer la distancia i que ha de haber entre los ejes de las sondas.

4. EJEMPLOS DE TRATAMIENTOS EJECUTADOS Y ESQUEMAS TÍPICOS DE CONGELACION

Voy a describir ahora algunos trabajos de congelación recientemente ejecutados: entre ellos hay también tratamientos especiales que, creo, pueden interesar sobre todo porque muestran el gran campo de aplicación de la congelación.

Metro de Amsterdam

El túnel está construido sumergiendo en el terreno, por medio de un sistema de chorro de agua, una serie de cajones prefabricados que van colocados uno tras otro, de manera que lleguen a formar el túnel de doble vía.

La fotografía muestra uno de esos grandes cajones cuya sección es de 16×8 m por una longitud de 40 m.

METROPOLITANO DE AMSTERDAM

Ejecución de las juntas entre cajones mediante congelación con nitrógeno líquido.

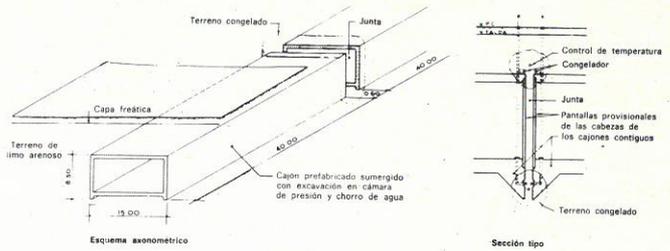


Fig. 7. — Metropolitano de Amsterdam.

El terreno en que la obra está construida está constituido por arenas limosas situadas bajo la capa freática.

El problema sumamente delicado del enlace entre dos de esos cajones está resuelto por una intervención de congelación con nitrógeno líquido.

En la práctica hay que crear una impermeabilización perfecta de una cierta porción de terreno a lo largo de los cuatro costados que delimitan la junta entre los dos cajones.

La anchura media de la junta es de 60 cm.

La impermeabilización obtenida haciendo circular nitrógeno líquido en tubos dispuestos alrededor de la junta, permite la demolición de los muros de cabecera provisionales de los cajones y la construcción de la obra definitiva de sellado entre ellas.

SONDEOS EN TERRENOS SIN COHESION CON CIRCULACION DE NITROGENO LIQUIDO

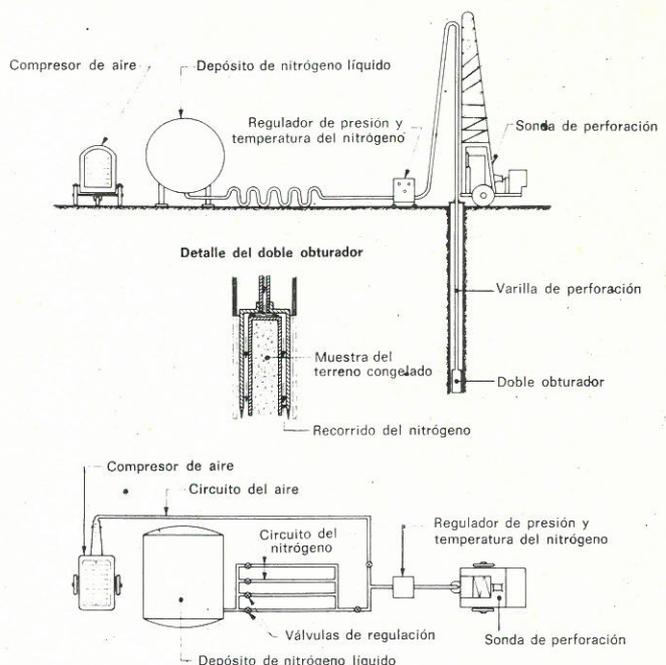


Fig. 8. — Sondos con circulación de nitrógeno.

Sondeos en terrenos sin cohesión

En una intervención muy particular, experimentada en los aluviones de Milán.

El nitrógeno líquido es empleado aquí como fluido de circulación en perforaciones ejecutadas con un sacamuestras doble para suministrar a la muestra de terreno extraída el grado de cohesión necesario para llevarla hasta la superficie con su integridad natural.

Los ensayos ejecutados han dado buenos resultados en terrenos situados por encima de la capa freática; no hace falta que exista un alto grado de humedad.

La temperatura y la presión del gas de nitrógeno deben poder ser reguladas fácilmente.

Otros ejemplos de tratamiento con nitrógeno líquido

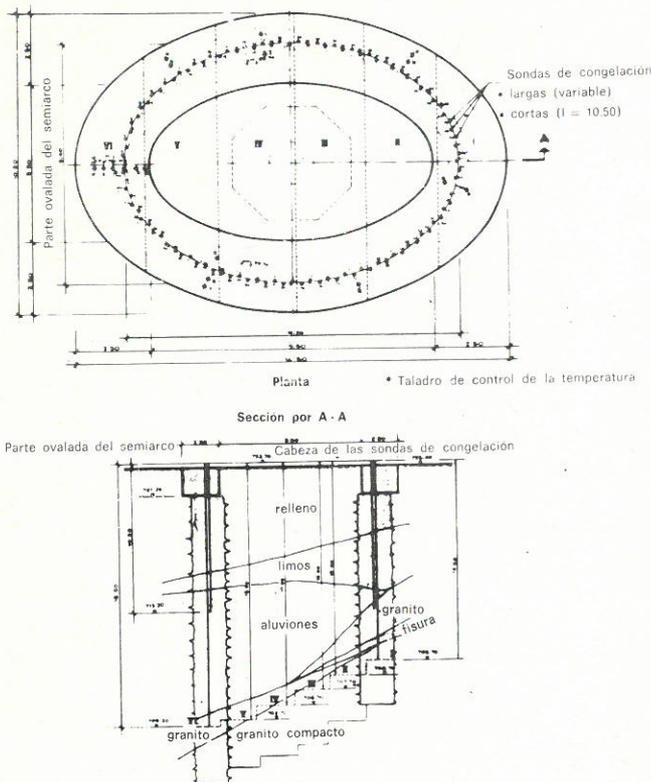
Excavación bajo el agua freática en terrenos limosos en Fortezza (Italia)

Plano y sección de uno de los siete tratamientos ejecutados con nitrógeno líquido para la excavación de los cimientos de las pilas del viaducto de Fortezza (autopista del Brennero).

La superficie del lago se encontraba a unos 40 cm por debajo del plano de trabajo.

Las excavaciones han interesado terrenos sa-

VIADUCTO DE FORTEZZA, PILA N.º 3 Congelación con nitrógeno líquido.



turados de diversa naturaleza entre los cuales, el peor desde el punto de vista estático era un limo lacustre en estado semi-líquido que había sido la causa determinante para la elección del sistema con nitrógeno.

Es interesante notar que la elipse correspondiente al eje de la pantalla de hielo es menos alargada que la correspondiente a la excavación: se escogió esta solución para reducir los esfuerzos de tracción a que la estructura del terreno congelado habría estado sometida después de la excavación.

Las tracciones máximas en fondo de la excavación pudieron así ser mantenidas entre los 4 kg/cm² (factor de seguridad igual a 2,5 para una temperatura de -10° C).

Haremos notar también que en el banco limoso las sondas congeladoras han debido ser completadas con otra serie (distancia entre ejes reducida) porque la difusión de las frigorías en ese terreno

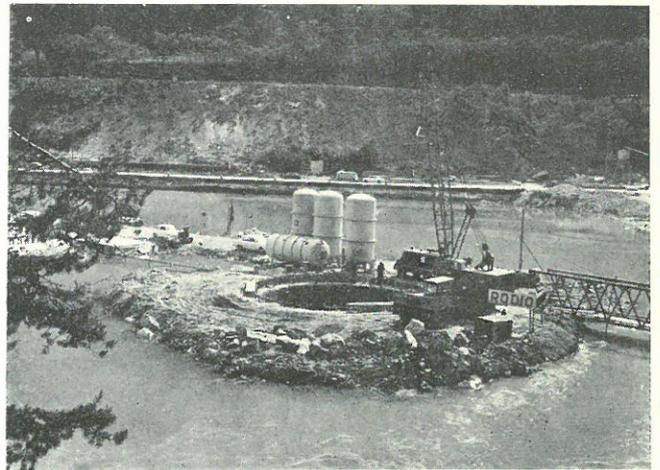


Fig. 10. — Excavación de la pila n.º 4 en Fortezza.

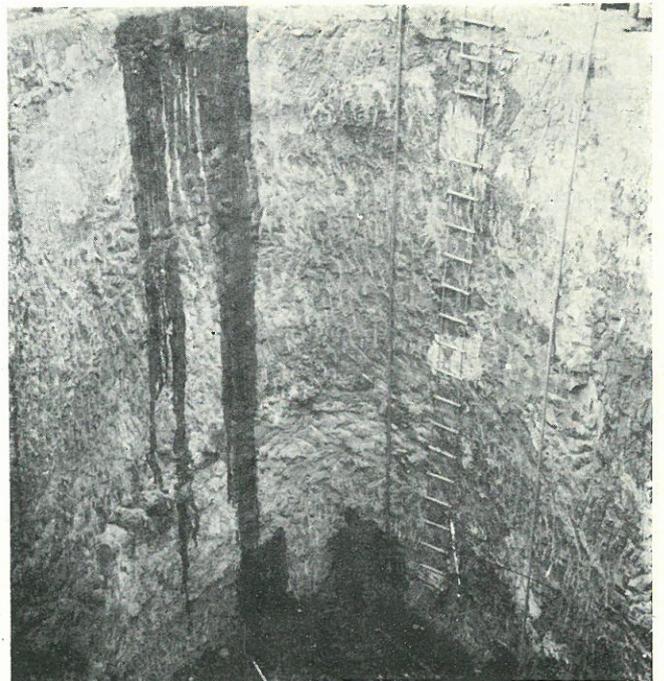


Fig. 11. — Detalle del terreno congelado en Fortezza.

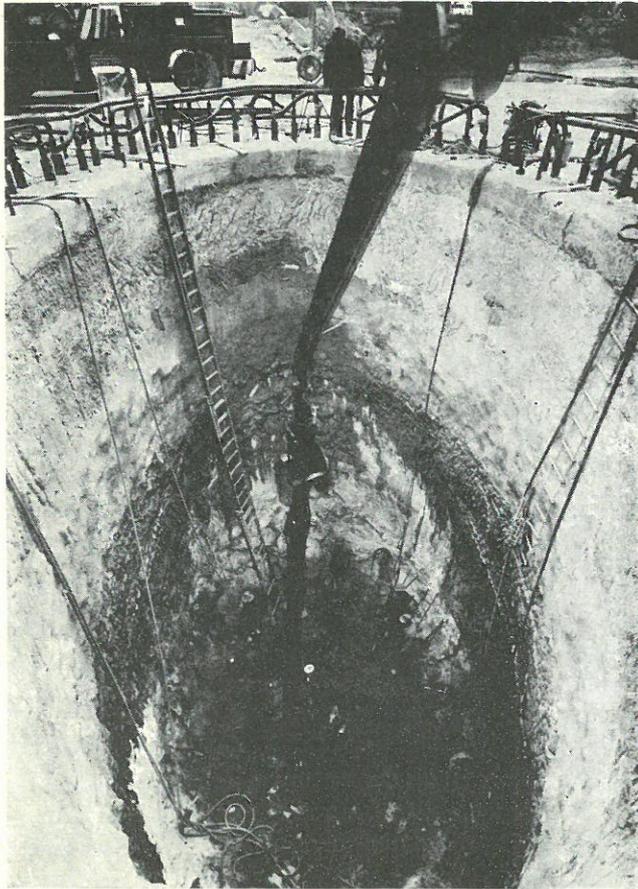


Fig. 12. — Excavación de la pila n.º 6 en Fortezza (con brazo Poclair).

es más lenta que en los aluviones arenosos y en las arenas; además para una temperatura dada por debajo de cero, como ya lo hemos visto, los limos y las arcillas tienen resistencias inferiores a la compresión.

Con una geometría tal la pantalla podía tener un espesor uniforme en toda su extensión.

Excavación en Fortezza en terreno congelado.

Siempre en el campo del nitrógeno deseo señalar un trabajo ejecutado en Londres para la modernización del túnel de Blackwall Road, bajo el Támesis.

Estimamos que se trata de un trabajo muy interesante en lo que concierne a la aplicación de la congelación: el arco de terreno congelado al exterior del trasdós del viejo revestimiento ha permitido sustituir voluminosas y pesadas estructuras metálicas de contención realizadas por bataches por un revestimiento delgado constituido por elementos prefabricados pretensados entre sí.

La empresa que, al principio utilizaba un sistema tradicional a base de salmuera, ha encontrado rentable por razones de tiempo y de resistencia mecánica pasar al sistema del nitrógeno líquido.

DEPOSITO DE METANO LIQUIDO EN ARZEW

Congelación desde la superficie
Fondo constituido por terrenos impermeables

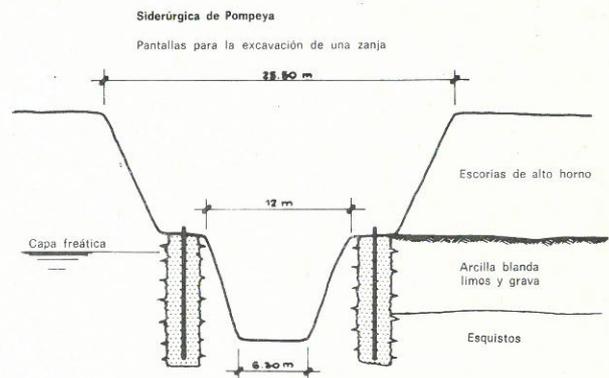
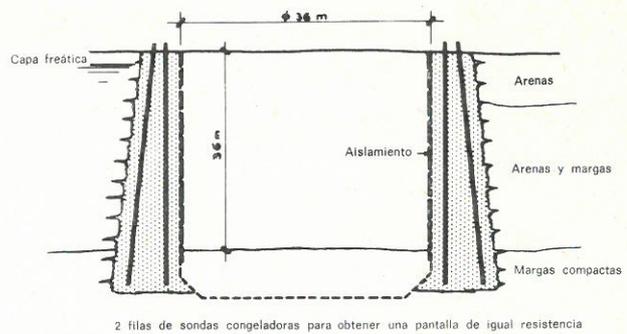


Fig. 13. — Arzew y Pompeya.

Ejemplos de tratamientos ejecutados con «salmuera» (fig. 13)

Se trata de los esquemas de dos trabajos de congelación con salmuera que han consistido en la formación de paredes laterales, empotradas en terrenos impermeables para permitir la excavación en seguridad y en ausencia de agua.

Puede notarse que en el caso de Arzew, el espesor del muro de hielo se ensanchaba, al descender en profundidad para oponerse al empuje hidrostático creciente.

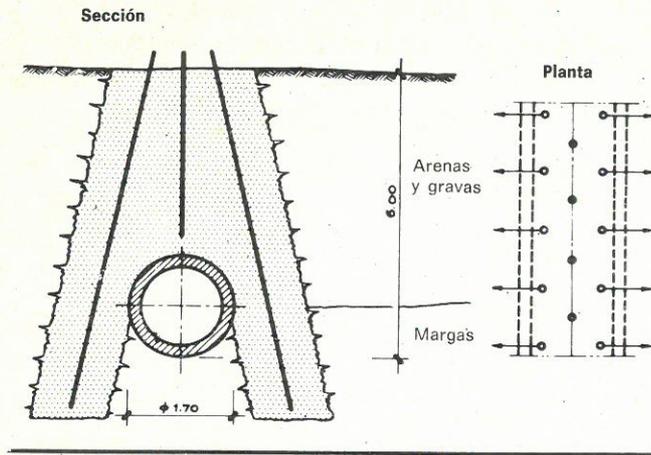
Estos ejemplos son a mi modo de ver dos notables ejemplos que muestran la gran eficacia de la congelación: considerables son, en efecto, las alturas de las excavaciones ejecutadas y sus dimensiones.

Depósito de metano líquido en Arzew (fig. 14)

Arriba

La congelación del terreno es obtenida hincando grupos de 3 sondas y haciendo circular por ellas la «salmuera». De este modo se ha perforado con plena seguridad un pequeño túnel que en su parte superior estaba interesado por terrenos sueltos saturados de agua.

EXCAVACION DE UNA ALCANTARILLA EN NANCY



Depósito de metano líquido en Canwey Island (G. B.)

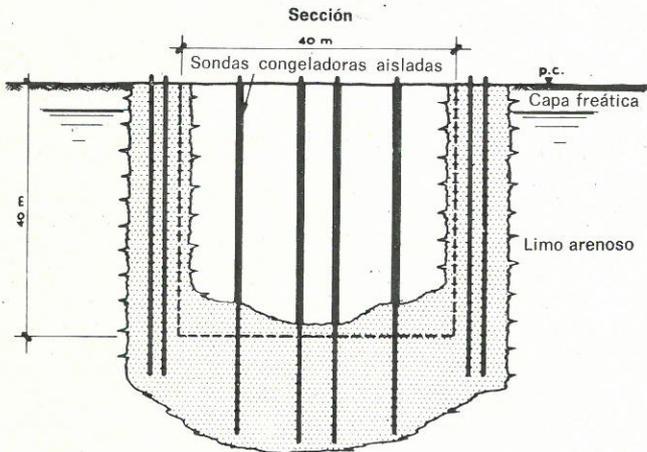


Fig. 14. — Alcantarilla en Nancy y depósto de metano en

Abajo

Se trata de una excavación bajo la capa freática en un terreno limoso: en este caso el fondo del depósito no se hallaba protegido por terrenos impermeables como en los ejemplos precedentes; así es que la congelación ha tenido que interesar también a la masa de terreno situado debajo de la losa de base.

Para evitar dispersiones inútiles de frigorías, las sondas fueron aisladas a lo largo de las partes que se hallaban en la zona de la futura excavación.

Resulta interesante hacer notar que trabajando con longitudes diferentes de sondas y de aislamiento se ha podido dar al terreno congelado de base una forma de arco, indispensable para la estabilidad de la estructura solicitada por subpresiones debidas a la carga hidráulica.

Como puede apreciarse el espesor de la congelación en la parte central es notable y muy superior al que habría sido necesario para obtener un simple estancamiento.

Reproduzco aquí un ejemplo típico de intervención a partir del exterior para proteger la perforación de un túnel bajo la capa freática (fig. 15).

WATTELOS NORTE CONSTRUCCION DE UNA ALCANTARILLA

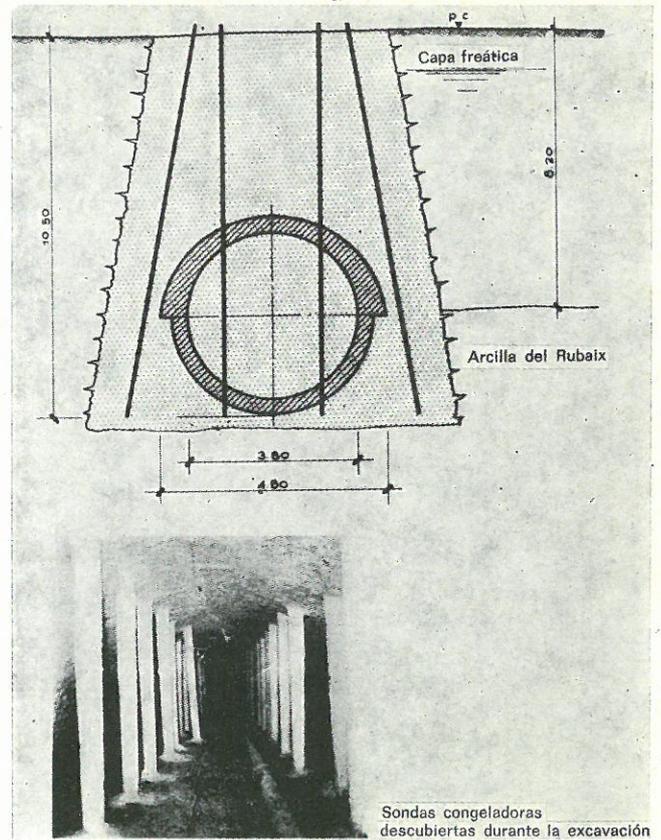


Fig. 15. — Alcantarilla en Watteles Norte.

METROPOLITANO DE PARIS. PUENTE DE NEULLY Congelación horizontal y vertical en la capa freática

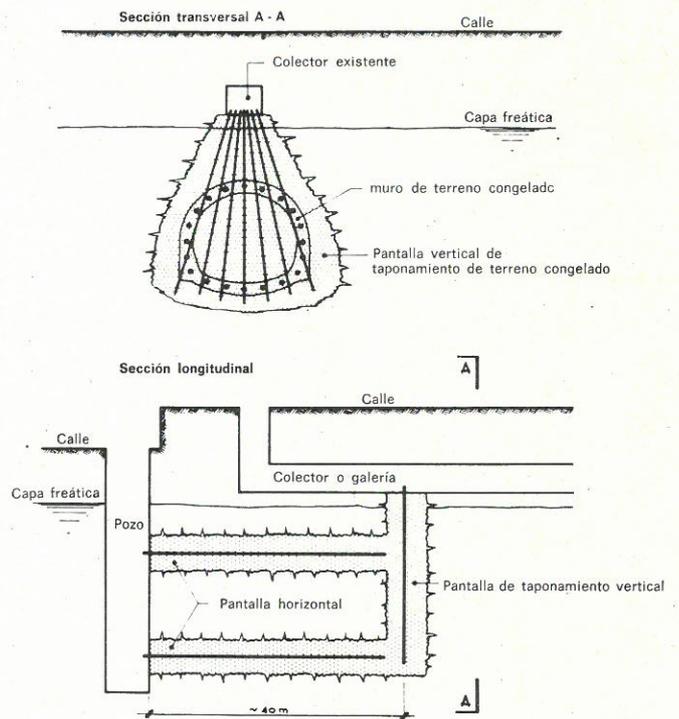


Fig. 16. — Metropolitano de París, puente de Neully.

La fotografía muestra la manera como fueron llevadas a cabo las operaciones de demolición de la bóveda a fin de conservar intactas las dos filas de sondas centrales; puede observarse también la buena uniformidad de consolidación dada al terreno desprovisto de cohesión, por efecto de la congelación.

Se observa aquí un trabajo ejecutado en un punto muy delicado del Metro de París (cerca del puente de Neuilly) (fig. 16).

Una sección del túnel de doble vía con una longitud de unos 40 m pudo ser realizada bajo una calle de gran tráfico, gracias a la protección de una estructura de terreno congelado en la parte exterior del trasdós de la excavación; al final de esa sección, la excavación fue protegida por medio de una pantalla de hielo, vertical, en forma de abanico (véase sección A-A) ejecutada a partir de una galería dispuesta por encima del nivel freático.

He aquí otro trabajo interesante ejecutado en Bruselas: se trata de un paso para peatones, de 5,8 m de anchura y 2,65 m de altura y 26 m de largo que ha sido realizado a ciegas a una considerable profundidad bajo la capa freática (fig. 17).

La obra pasaba bajo dos túneles del «metro» y dos grandes colectores de alcantarillado; la excavación, como puede apreciarse, estaba protegida solamente por una pantalla de terreno congelado alrededor de su perímetro.

CONGELACION HORIZONTAL BAJO LA CAPA FREATICA

Excavación de un paso de peatones por debajo del boulevard Anspach, en Bruselas

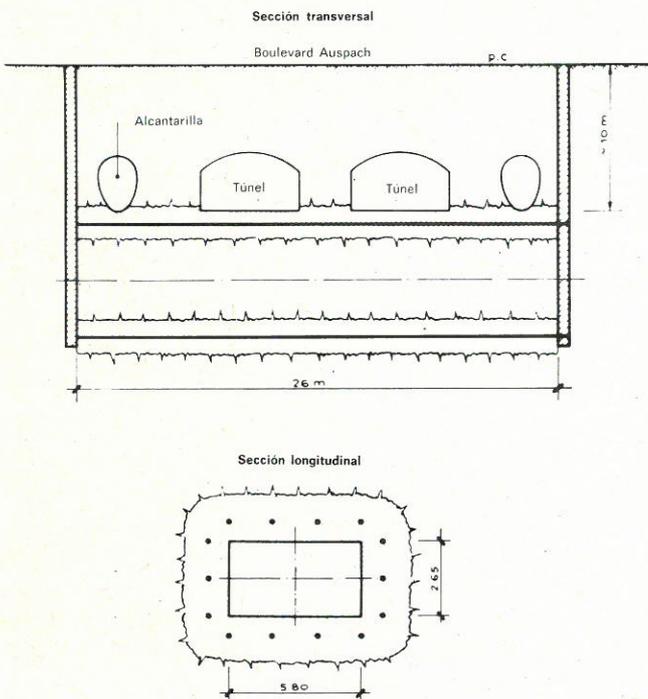


Fig. 17. — Metropolitano de Bruselas, bajo el Boulevard Anspach.

LHONGRIN LEMAN (Suiza)

Cruce atravesando 51 m de terrenos sueltos con una presión de 11 atmósferas

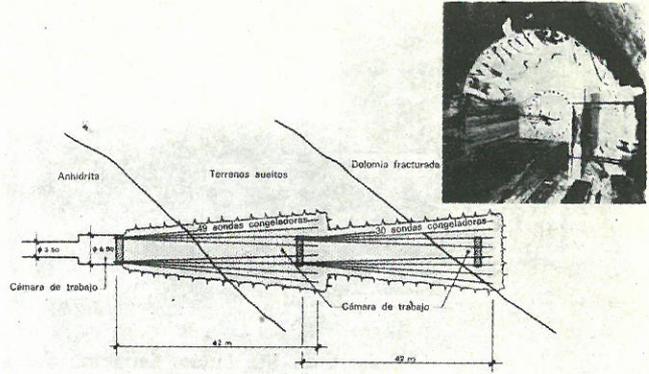


Fig. 18. — Falla de la instalación Lhongrin Lemán.

La congelación fue ejecutada para permitir el paso con toda seguridad de un túnel hidráulico (instalación de Lohngrin Lemán en Suiza) a través de una falla de 51 m de anchura, rellena de materiales muy finos: la presión del agua en esos materiales alcanzaba valores de alrededor de los 11 kg/cm² (fig. 18).

CONGELACION DEL TERRENO INMEDIATAMENTE ADYACENTE A EDIFICIOS EXISTENTES, PARA ASEGURAR LA EXCAVACION EN SECO

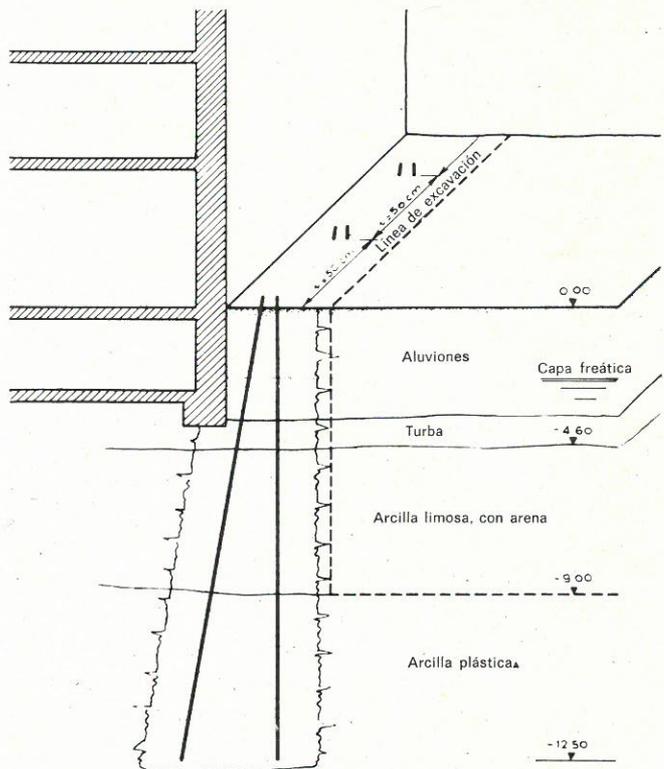


Fig. 19. — Tratamiento urbano al lado de un edificio.

**SALERNO. GALERIA DE STA. LUCÍA
ESQUEMAS DE TRATAMIENTO**

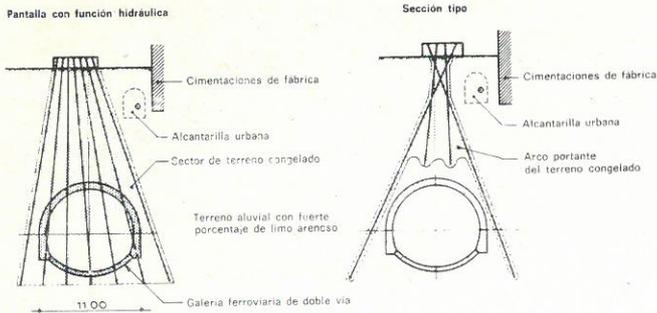


Fig. 20. — Salerno. Galería de Sta. Lucía. Esquema del tratamiento.

La geometría cónica se impuso por las dos razones siguientes:

- necesidad de crear un taponamiento estanco y resistente más allá del final de cada tramo excavado (conicidad hacia el interior);
- realización de una protección para la cámara de trabajo siguiente (ensanchamiento del túnel) en correspondencia con la parte final de cada tramo (conicidad hacia el exterior).

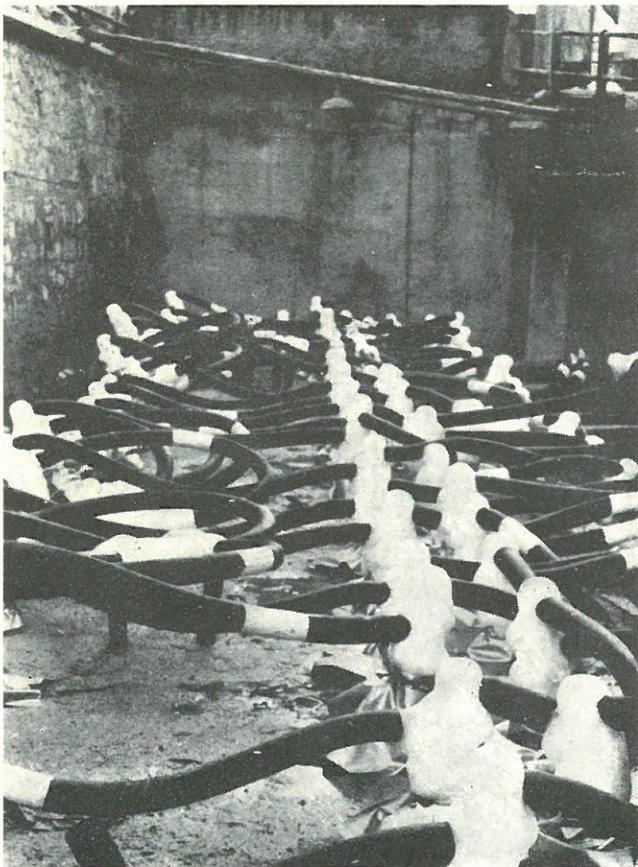


Fig. 21. — Salerno. Galería de Sta. Lucía. Sondas en la fase de congelación.

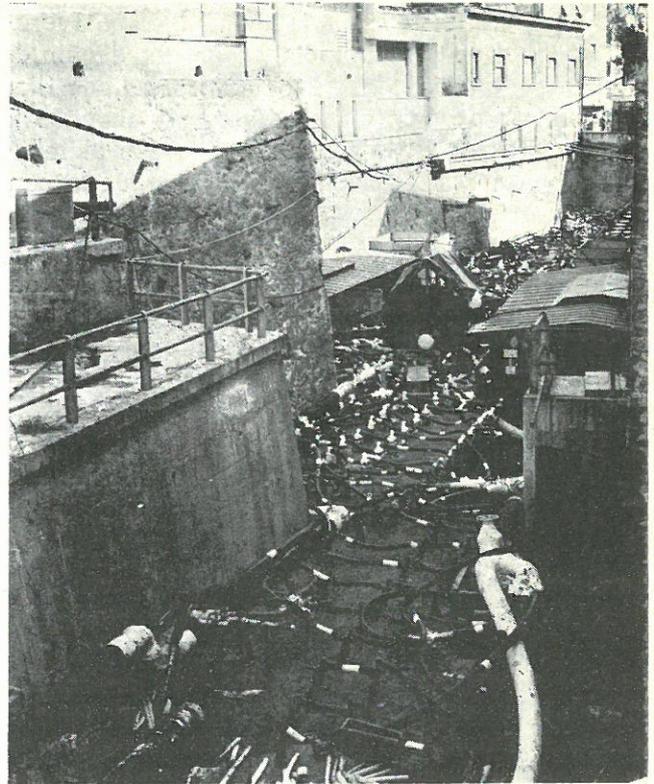


Fig. 22. — Salerno. Galería de Sta. Lucía. Sondas en la fase de congelación.

Es una intervención típica para un centro urbano. Este género de trabajos, en efecto, son cada vez más frecuentes en las grandes ciudades, donde la vida moderna necesita más espacio sobre todo para los transportes rápidos, para los depósitos y aparcamiento; esos espacios solamente pueden obtenerse en el subsuelo.

El croquis (fig. 19) muestra en perspectiva axonométrica la realización por congelación del terreno de una pantalla extendida a lo largo de una serie de grandes edificios de una ciudad alemana, que ha permitido la ejecución de una gran excavación de 9 m de profundidad.

La capa freática fue encontrada a unos 2 m bajo el piso de la calle.

Este trabajo ha sido ejecutado recientemente en la ciudad de Salerno en Italia.

El tratamiento de congelación con salmuera de que pueden ver (figs. 20, 21, 22) sea el esquema tipo, sea un detalle de la disposición de los congeladores, ha permitido excavar con completa seguridad algunos trayectos de túnel del F. C. de Sta. Lucía, donde éste pasaba por debajo de calles y de edificios en la ciudad.

Se trata de un procedimiento semejante al precedente, ejecutado en las proximidades de Cosenza (en Italia meridional) (figs. 23, 24, 25, 26).

Congelando el terreno, el túnel del F. C. ha podido atravesar terrenos constituidos por limos en estado semilíquido.

Es necesario hacer notar la profundidad considerable del tratamiento (más de 40 m de la superficie).

PAOLA-COSENZA. GALERIA FERROVIARIA

Sección transversal tipo

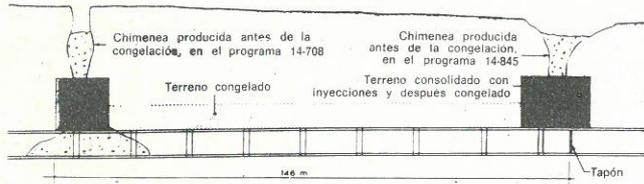
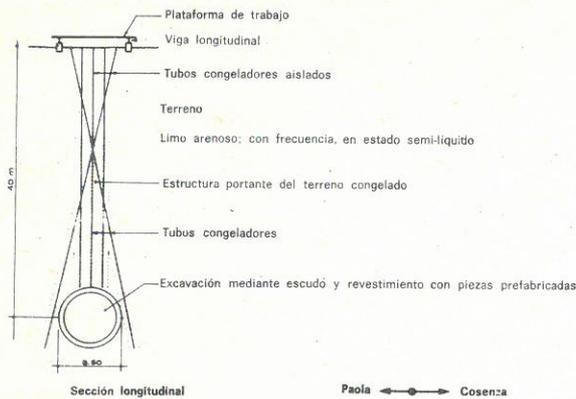


Fig. 23. — Galería de Sto. Marco. Esquema de congelación.

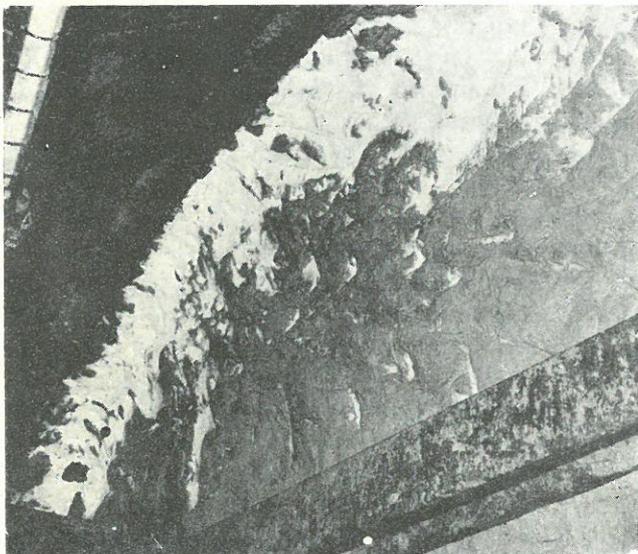


Fig. 24. — Galería de Sto. Marco. Terreno congelado en el frente de excavación.

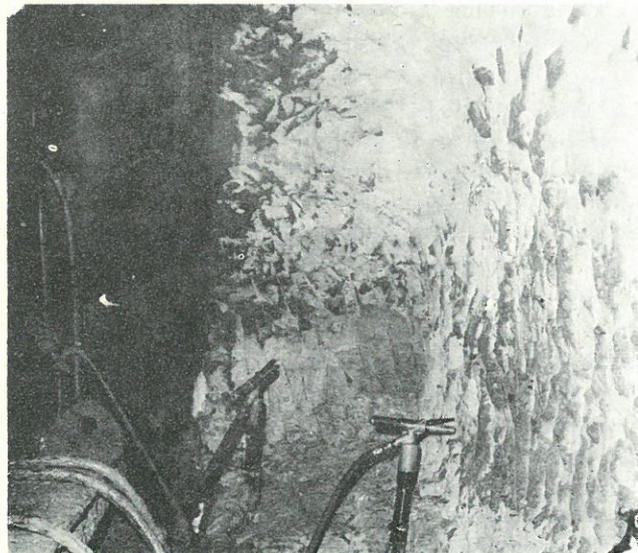


Fig. 25. — Galería de Sto. Marco. Terreno congelado durante el avance de la excavación, en el cuerpo del camino.

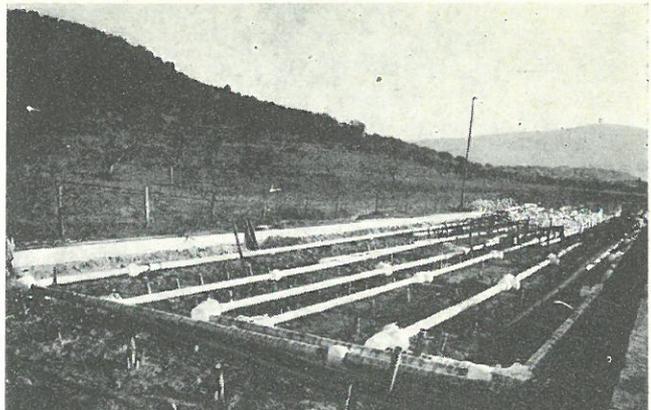


Fig. 26. — Galería de Sto. Marco. Los colectores principales en fase de congelación.

ABADIA LARIANA

Congelación con nitrógeno líquido y salmuera respectivamente, de detritus de laderas y calizas muy fragmentadas para permitir la excavación no armada con seguridad y en seco.

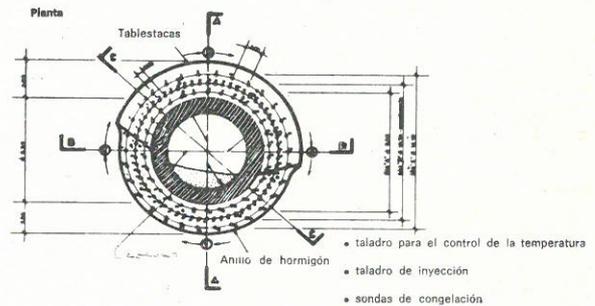
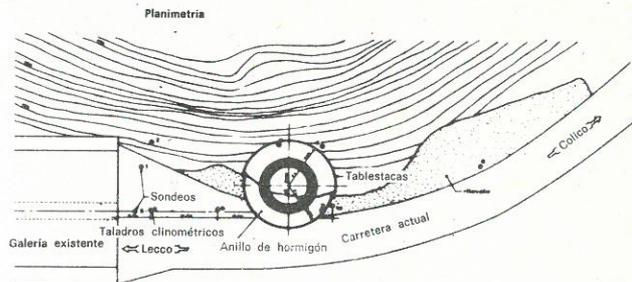


Fig. 27. — Abbadia Lariana, planta.

ABBADIA LARIANA

Congelación con nitrógeno líquido y salmuera

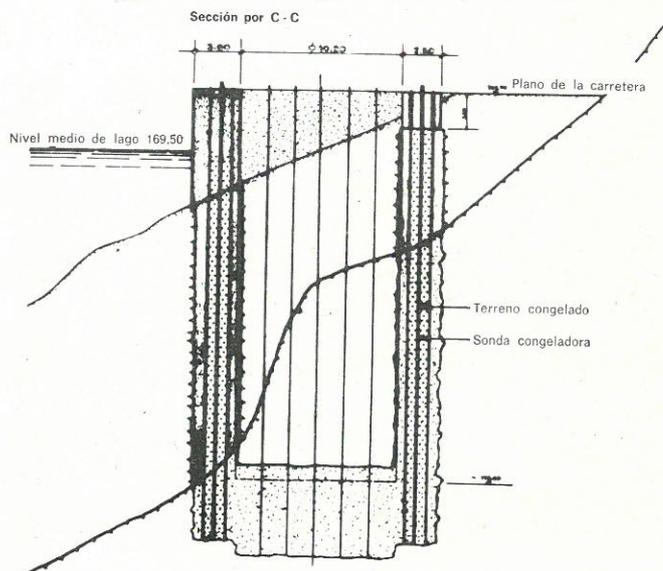


Fig. 28. — Abbadia Lariana, planta.

Tratamiento mixto de nitrógeno y salmuera

Abbadia Lariana (Como) Italia (figs. 27, 28)

Aquí pueden verse el plano y sección de la intervención de la congelación ejecutada en Abbadia Lariana, para la excavación, bajo el nivel del lago de un pozo de 27 m de profundidad.

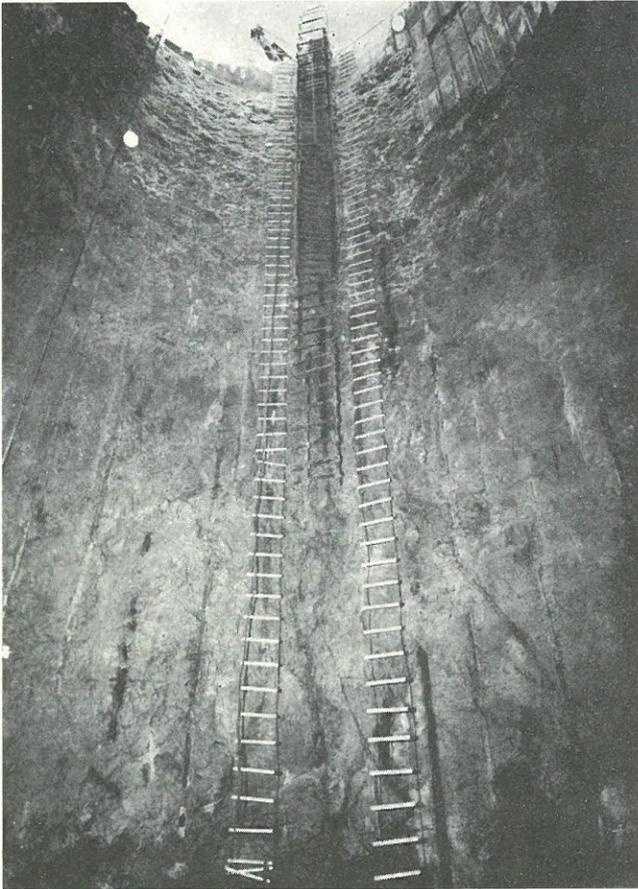


Fig. 29. — Vista desde arriba de la pila de Abbadia Lariana.

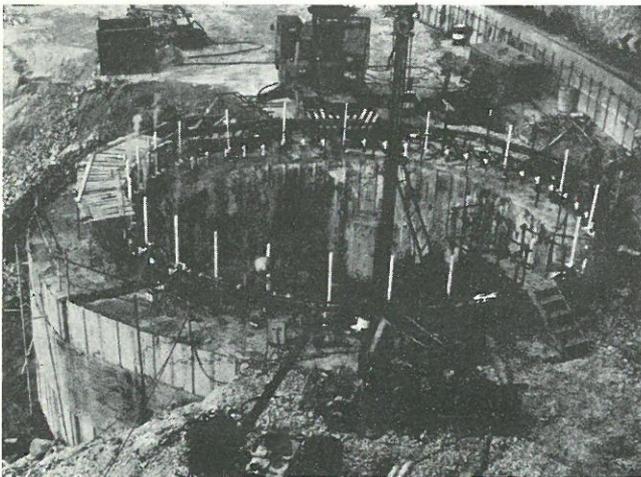


Fig. 30. — Vista del interior de la excavación de Abbadia Lariana.

La importancia de esa obra es atribuible a las razones siguientes:

- Condiciones de estabilidad naturales del relleno, con pendientes muy fuertes y por consiguiente, por los tratamientos de congelación sometidos a ensayos importantes.
- Acción combinada de los procedimientos del nitrógeno y de la salmuera.

Todavía la obra de Abbadia Lariana en fase de excavación.

De los tubos de congelación se ven salir los gases del nitrógeno durante una fase de mantenimiento de la pantalla de hielo (figs. 29, 30).

* * *

Esta exposición de los trabajos de congelación del terreno ciertamente está incompleta: otros tratamientos de diferentes tipos han sido ejecutados en los EE. UU., en los países del Este europeo, en Rusia y recientemente en el Japón.

Sin embargo, pienso que los ejemplos referidos pueden dar una idea bastante precisa de las diversas posibilidades de empleo de este sistema.

Hoy día, con la experiencia actual, sabemos que la congelación podrá, en muchos casos, ayudar al ingeniero o a la empresa para resolver problemas particulares; orientando las intervenciones a los túneles hemos llegado a entrever la posibilidad de un empleo económico de este sistema en relación con los sistemas más tradicionales; por ejemplo, las inyecciones químicas.

A propósito de lo cual puedo hacer las observaciones siguientes:

- La congelación trata terrenos muy finos; sin contar que las arcillas y los limos no pueden ser tratados por inyecciones, las arenas finas limosas, por ejemplo, pueden ser estabilizadas sea con resinas muy fluidas (tipo de resinas fenólicas) sea por la congelación.

Generalmente la congelación es preferible porque el tratamiento resulta ciertamente uniforme y porque su precio es inferior.

Es preciso tener en cuenta que a igualdad de seguridad el espesor de un arco resistente en el trasdós de un túnel puede ser reducido a la mitad aproximadamente con la congelación. Donde eran necesarios de 3 a 3,50 m con las resinas fenólicas (carga de rotura de 15 kg/cm²) con el terreno congelado puede reducirse a 1,50 m.

- Las frigorías se difunden muy bien asimismo en terrenos sometidos a las cargas hidrostáticas; la presión no se opone a la formación de la pantalla de hielo.

- Finalmente, el terreno congelado adquiere un cierto grado de plasticidad: puede soportar choques bastante fuertes como, por ejemplo, los provocados por las ondas originadas por la explosión de barrenos.

Esta circunstancia resulta importante cuando hay que afrontar perforaciones en terrenos con grandes bloques o directamente en terrenos rocosos fracturados.

5. CONCLUSIONES

Teniendo la posibilidad de seguir de cerca muchos de los tratamientos de congelación, estoy seguro de que ulteriores progresos pueden ser obtenidos hacia una definición del factor de seguridad que una estructura resistente congelada puede tener durante la fase de trabajo.

Está bien claro que un profundo conocimiento de los fenómenos nos da una reducción de los precios globales y un ensanchamiento del campo de aplicación de este arte.

Por ejemplo, recientemente hemos estudiado y experimentado con ensayos «in situ», en ocasión del concurso para la estabilización de la Torre de Pisa, los aspectos siguientes de la técnica de la congelación:

- Velocidad de difusión de las isoterms en diferentes tipos de terreno; durante este estudio se hizo variar también el contenido de humedad del terreno.
- Variaciones del volumen de la masa congelada en función sea del contenido de humedad, sea de la velocidad de congelación (nitrógeno o salmuera).
- Variaciones diferenciales en sentido vertical y en sentido horizontal de una masa congelada cuando soporta sobrecargas superficiales (por ejemplo, edificios).
- Variaciones de las tensiones en el interior de la masa durante toda la fase de la congelación y del deshielo.