

# consolidación e impermeabilización de los terrenos por congelación

G. VIÉ, ingeniero de minas

## sinopsis

579-14

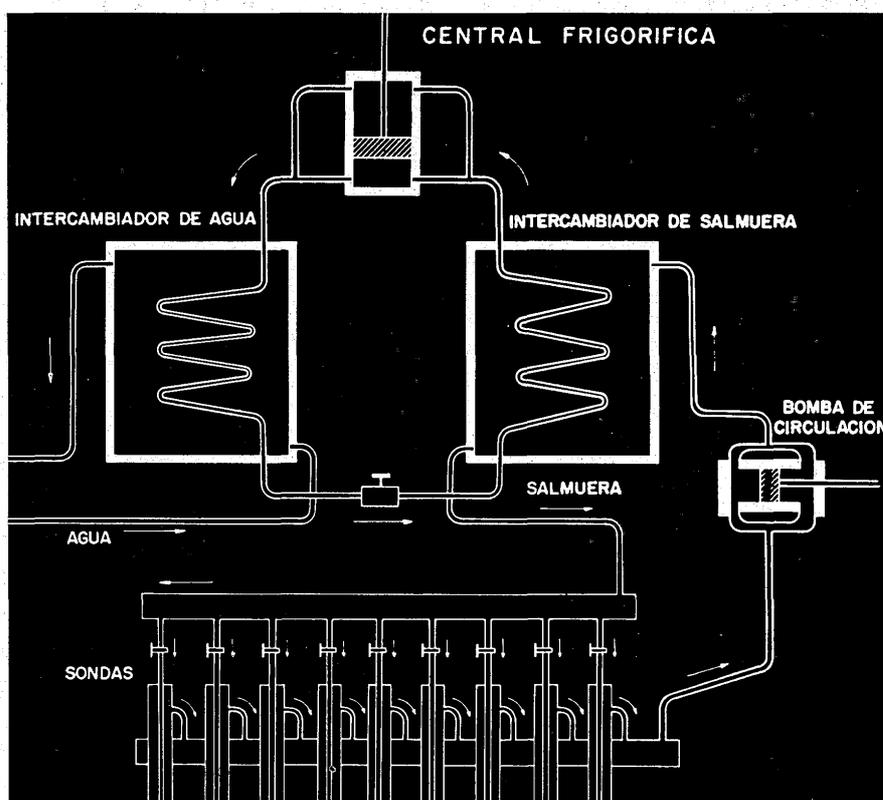
Con los procedimientos clásicos de consolidación e impermeabilización de terrenos mediante inyecciones de cemento o de resina no se consiguen buenos resultados en terrenos porosos. En estos casos se recurre a inyectar diversas soluciones de sales químicas (silicato sódico, sulfato de alúmina, etc.) o bien a congelar el terreno; este último método es el que se comenta en el artículo. Entre los procedimientos de congelación existentes se ha desarrollado últimamente el de utilización de nitrógeno líquido, cuyas ventajas respecto a los otros métodos de congelación, las características del nitrógeno líquido y de las sondas de inyección son las que describe el autor, así como una serie de diferentes obras realizadas en diversos países mediante la aplicación del nitrógeno líquido.

La consolidación de los suelos es un problema de actualidad.

Las Obras Públicas y la Industria Minera utilizan los métodos de inyección para estabilizar e impermeabilizar los malos terrenos.

La excavación de un pozo o de una galería puede convertirse en un problema difícil o imposible si no es segura una cierta estabilidad.

Los procedimientos clásicos por inyección de cemento o de resina consiguen una solución duradera e, incluso, definitiva; sin embargo, las arenas movedizas no son inyectables más que bajo ciertas condiciones. La lechada de cemento, por fina que sea, está compuesta de partículas sólidas en suspensión. Penetra fácilmente en las fisuras de una roca dura; pero en presencia de una roca porosa, de una arena movediza, por ejemplo, se realiza una filtración que se opone a una penetración regular y lo suficientemente lejos en la dirección deseada. Por ello se tiende a sustituirla con soluciones salinas, susceptibles de dar, al cabo de un tiempo determinado, un precipitado coloidal, o un «gel». Han sido obtenidos buenos resultados con el silicato de sodio, mezclado con fosfato en el momento de la inyección. Las dosificaciones deben ser cui-



Esquema de la instalación necesaria para la congelación de suelo con grupo frigorífico.

dadosamente puestas a punto, incluyéndose el agua a emplear, y teniendo en cuenta la temperatura, a fin de obtener una precipitación en 15 ó 30 minutos. Este procedimiento ha sido utilizado en particular en la ventana 12 de la galería Tignes-Malgovert, para atravesar en galería unas cuarcitas trituradas impregnadas de agua a presión. Inyectando sucesivamente la solución química y después cemento a presión elevada, con la ayuda de sondas oblicuas, el terreno defectuoso ha sido transformado en un bloque compacto e impermeable, en el cual la excavación a plena sección ha sido posible sin irrupción de agua y sin empuje del terreno.

A pesar de su coste elevado, la gama de lechadas a base de productos químicos se ha extendido en forma notable y la química de los geles coloidales irrever-

sibles ha hecho grandes progresos. Se ha llegado hasta utilizar el ácido fosfórico como «coagulante» o «rigidizador».

Hemos citado antes el papel de los polifosfatos de sodio; también se pueden mencionar los sulfatos de alúmina.

En determinadas circunstancias puede ser preferible congelar los malos terrenos para atravesarlos más cómodamente.

En el procedimiento de congelación por salmuera, la fuente de frío se obtiene mediante un ciclo frigorífico clásico. Las frigorías son transportadas por una salmuera —impulsada por bombas— cuya temperatura es del orden de  $-20^{\circ}\text{C}$  en la mayoría de los casos.

Esta técnica necesita un equipo importante: grupos frigoríficos, bombas, canalizaciones de circulación, sondas de congelación.

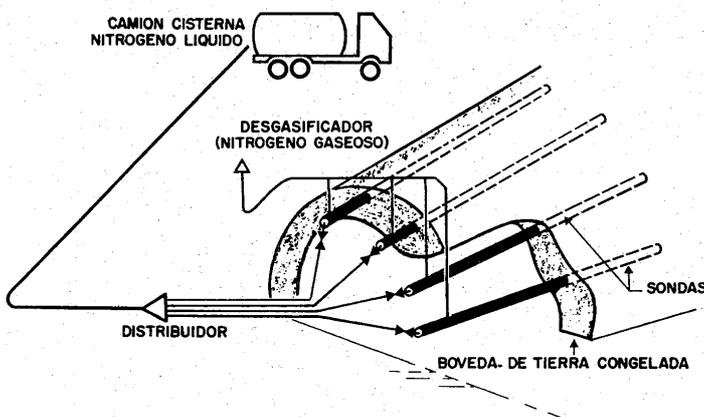
La diferencia de las potencias frigoríficas necesarias durante la fase de congelación y durante la del mantenimiento en frío, es uno de los problemas que presenta este procedimiento. En efecto, la potencia frigorífica necesaria para una puesta en frío rápida es muy superior a la que permite asegurar el mantenimiento de la temperatura. La dimensión de las instalaciones es, en general, función del segundo postulado que acabamos de enunciar. Por ello resultan tiempos de puesta en frío muy largos, lo que puede acarrear una inmovilización de la obra.

Los parámetros que intervienen en el balance económico, es decir, costo del material instalado, consumo de energía, mantenimiento de la infraestructura, duración de la colocación de las instalaciones, duración de la puesta en régimen de la obra, deben ser estudiados con cuidado.

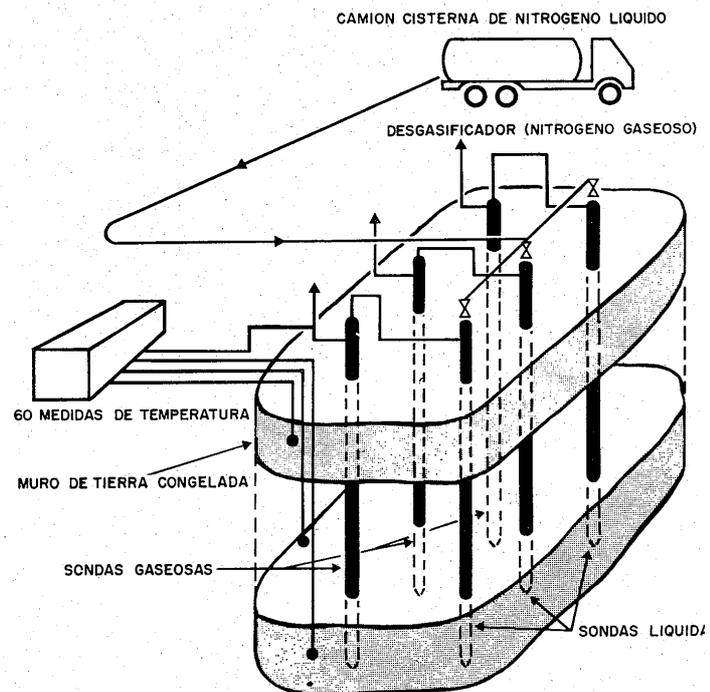
La experiencia ha mostrado que la congelación ha tenido pocos fracasos desde 1883, fecha en la cual los ingenieros Poetsch y d'Ascherleben la dieron a conocer en la perforación de un pozo de mina.

En 1889 formaciones acuíferas a  $-250\text{ m}$  de la superficie, fueron congeladas por primera vez. Varias congelaciones han sido sucesivamente conseguidas a profundidades que alcanzaban  $-620\text{ m}$ .

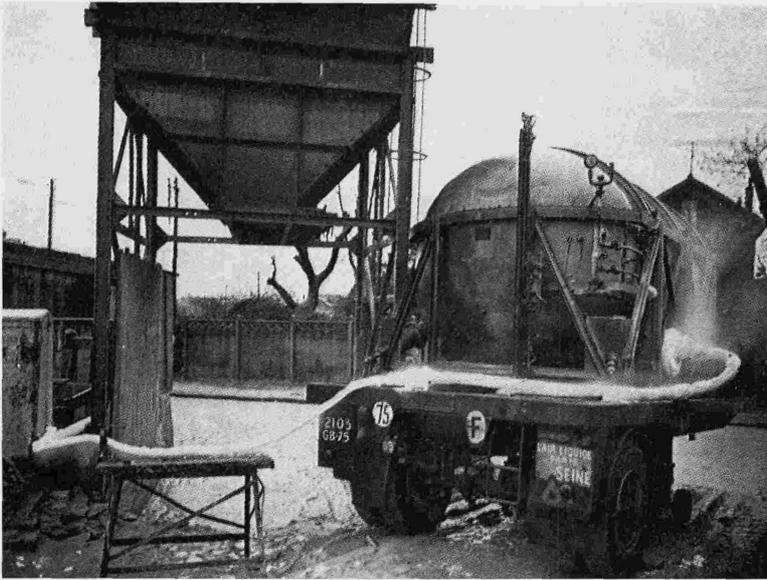
Los sondeos atraviesan en toda su altura los terrenos saturados de agua. Unos tubos, cerrados por su base, se introducen en los agujeros de sonda y encierran, a su vez, unos tubos más pequeños, con la extremidad inferior abierta, que conducen el líquido refrigerante. Este sube por el espacio anular que hay entre los dos tubos concéntricos, desprendiendo frío en la zona de terreno próxima. Las capas acuíferas se congelan poco a poco alrededor de cada sonda, y los cilindros de hielo formados, al aumentar de diámetro, se sueldan unos con otros para formar una verdadera muralla o masa endurecida, que se opone a las circulaciones de agua, lo que permite reanudar el avance.



Esquema de una instalación para congelación en galería.

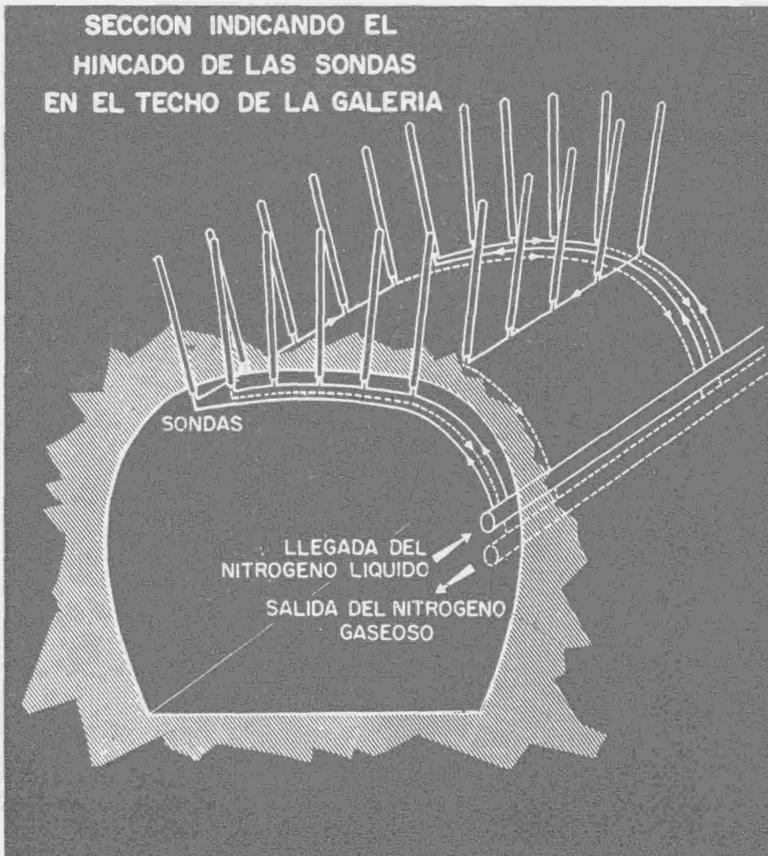


Creación de un muro-cortina por congelación.



Tanque de nitrógeno líquido alimentando las sondas de congelación en una obra.

Petrificación con nitrógeno líquido de arenas acuíferas inestables.



Si se utiliza la solución del grupo frigorífico, la estación de compresión debe ser, por lo menos, de 250 CV, combinada con un intercambiador.

Los recientes trabajos de Tsytoritch y Khakimov con una instalación frigorífica y salmuera muestran que es posible congelar un terreno en un radio de 1,40 m, en tres semanas, con una sonda de diámetro 150/200.

El caudal frigorífico debe ser máximo durante el período de congelación: es, por lo tanto, el caudal frigorífico de la instalación considerada; durante el mantenimiento en frío, ese gasto no representa, utilizando salmuera, más que el 65 % de la capacidad frigorífica, y desciende al 35 % con un fluido más frío.

Se ha obtenido una mejora con el sistema Rodio-Hottegay. Necesita también, en la superficie, un grupo de compresión que hace superfluo el intercambiador. El rendimiento se mejora con relación al de la técnica precedente utilizando anhídrido carbónico líquido, al que se hace hervir a  $-58^{\circ}\text{C}$ , a 6 atmósferas, aproximadamente.

Sin embargo, la principal mejora ha sido la conseguida con la utilización del nitrógeno líquido.

Con relación a los procedimientos que acabamos de enumerar, la congelación con nitrógeno líquido presenta las siguientes ventajas:

- supresión de la instalación frigorífica;
- supresión del fluido intermedio y de su intercambiador y, por tanto, de las pérdidas que implican;
- supresión de las bombas de circulación;
- puesta en obra muy simplificada, con inversión reducida;
- gran rapidez de congelación (6 m<sup>3</sup> congelados en 8 horas, con 4.000 litros y una treintena de sondeos);
- balance frigorífico favorable.

El nitrógeno líquido se utiliza en numerosas aplicaciones industriales debido a su carácter neutro, a su flexibilidad de empleo, y a sus características físicas:

- peso específico: 0,8 kg/dm<sup>3</sup>;
- temperatura de ebullición a presión atmosférica:  $-196^{\circ}\text{C}$  (ó  $77^{\circ}\text{K}$ );



Sondas y liras de congelación en servicio en una galería.

- calor latente de evaporización: 38 kcal/litro;
- frigorías disponibles por recalentamiento, al ambiente, del gas evaporado por un filtro de líquido: 40 kcal/litro;
- 1 litro de líquido corresponde a 680 litros de gas a presión atmosférica y a 15° C.

El nitrógeno es enviado por unas sondas cilíndricas que permiten ceder al terreno el máximo de frigorías.

Estas sondas están concebidas para que el rendimiento térmico sea, al menos, del 80 %. Puede obtenerse:

- con una sola sonda (funcionamiento mixto líquido + gas);
- con varias sondas en serie (la primera funciona esencialmente «con líquido»; la otra o las otras funcionan «con gas»).

El principal factor que interviene en el balance económico es el consumo del nitrógeno líquido, que es, por ejemplo, del orden de 1.000 litros para congelar 1 m<sup>3</sup> de terreno arcilloso con un 30 % de agua.

Cada sonda está constituida por dos tubos concéntricos; la alimentación de nitrógeno líquido es individual o por grupos de varias sondas (generalmente dos en serie).

El nitrógeno líquido llega al tubo central de la primera sonda y se evapora en el tubo exterior de ésta; luego, el gas pasa al tubo central y después al tubo exterior de la segunda sonda, para escapar finalmente a la atmósfera a una temperatura de unos — 40° C, aproximadamente.

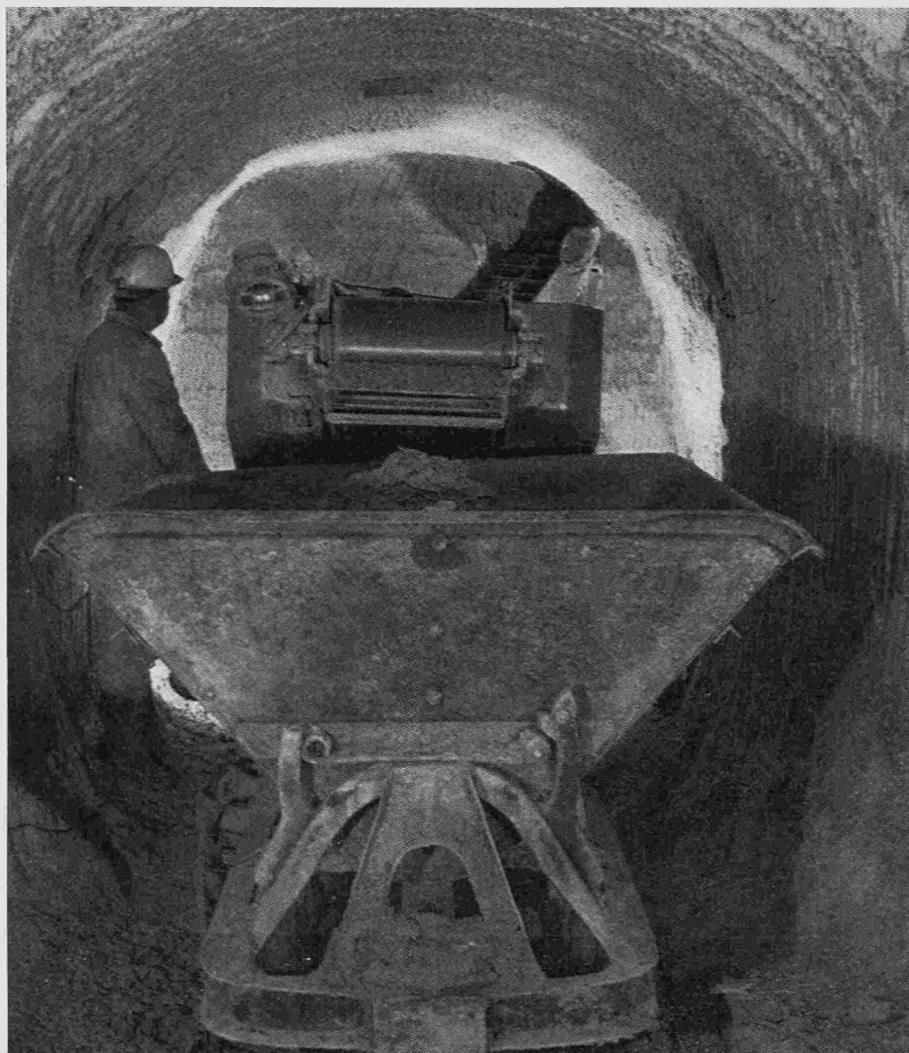
La primera sonda, en la cual el nitrógeno se encuentra, en su mayor parte, en estado líquido, se denomina «sonda líquida»; la segunda sonda, o todas las demás que están dispuestas en serie, en las cuales el nitrógeno está en forma de gas, se llaman «sondas-gas».

Los grupos de sondas en serie están alimentados en paralelo, a partir de un depósito acumulador y de un puesto de distribución.

El número de sondas en serie, dentro de un grupo, está determinado por su longitud; naturalmente su número es tanto mayor cuanto más reducida es la longitud unitaria de las sondas.

Avance de túnel debajo de la estación de ferrocarril de Dortmund-Mengede:

Arranque del suelo tratado según el procedimiento por congelación por medio de la Westfalialufchs.



Se puede decir que la única limitación de empleo del oxígeno líquido es la imposibilidad, para los camiones cisterna, de llegar a las proximidades de la obra de congelación.

Estas cisternas tienen un fuerte aislamiento térmico, siendo su capacidad de 15 a 25 m<sup>3</sup> de gas licuado. Hay tendencia a adoptar camiones de gran capacidad, a fin de disminuir el precio de coste del m<sup>3</sup> transportado.

Una aplicación interesante fue realizada en 1961, y otra en 1962, con ocasión de los trabajos del gran colector de alcantarillas que sirven el suburbio Norte de París.

Se trataba, en ambos casos, de congelar una capa acuífera, cuya existencia se oponía a la excavación, con un mínimo de 3 m de diámetro, del emplazamiento del colector que une Achères con Saint-Denis.

A una treintena de metros bajo tierra, en Argenteuil, la galería se excavaba en las arenas de Beauchamps, encontrándose un banco de gres impermeable, coronado por una auténtica capa de agua.

Al atacar la formación de gres se manifestaron importantes filtraciones, que invadieron la galería y bloquearon el avance.

Un dispositivo de congelación fue estudiado y colocado para poder solidificar la arena movediza, cuyo contenido en agua alcanzaba los 300 litros/m<sup>3</sup>.

Veinticinco sondas de acero ordinario, de 1,6 a 2 m de longitud, fueron introducidas en la corona de la galería y dispuestas de tal manera que la solidificación pudiera realizarse, de manera uniforme, a los lados y por el centro.

El diámetro escogido para las sondas fue de 50 × 60 milímetros, con un tubo interior de 15 × 21 mm. A estas sondas correspondían unas liras flexibles, de cobre rojo recocido, de 15 × 21 mm, unidas a su vez a una nodriza de 50 × 60 mm.

La llegada del líquido se realizó mediante un tubo de acero calorífugo, de  $\varnothing 26 \times 34$  mm, que recorría la galería y subía por el pozo hasta el depósito de almacenamiento, cuyo contenido normal era de 6.000 litros de nitrógeno líquido.

El nitrógeno gaseoso era extraído por una canalización de  $\varnothing 80 \times 80$  mm saliendo al aire libre, en el exterior de la obra.

Se había calculado que el volumen de arena acuífera a solidificar debía ser de una veintena de m<sup>3</sup>, y que 26 m<sup>3</sup> de nitrógeno líquido serían suficientes para alcanzar la congelación y mantener esta última durante el plazo necesario para la ejecución de las obras.

El oxígeno líquido — 196° C fue enviado con un caudal de 500 litros/h durante la primera hora de intervención.

El comienzo de la congelación se observó al cabo de 30 minutos, consiguiéndose la congelación efectiva

de la masa al cabo de 33 horas, con un gasto de 15.000 litros de nitrógeno líquido.

Una vez conseguida la congelación, y formada la chisnea, las sondas centrales fueron desmontadas, a fin de que se pudiera proceder a la excavación del pozo que permitiera pasar por encima de la capa acuífera.

Protegido por un revestimiento de tablas y de paja, el pasadizo así preparado permitió reanudar el avance.

La arena, mantenida a — 30° C, presentaba un excelente comportamiento mecánico, constituyendo un verdadero muro de hielo que persistía bajo esta forma gracias al frío desprendido por las sondas periféricas.

Estas últimas eran alimentadas con un caudal de 300 litros/h de nitrógeno líquido.

Con 11.000 litros de nitrógeno, el mantenimiento en frío estuvo asegurado durante las 36 horas que fueron necesarias para realizar el paso difícil.

La operación, comenzada un lunes a las 17 horas, había terminado el jueves a las 14 horas, permaneciendo helado el terreno hasta el sábado siguiente.

Otra operación fue decidida en otro lugar del trazado: allí donde el paso del Sena debía realizarse mediante un sifón excavado a través de margas y de gravas, formación a la que se hizo coherente e impermeable mediante aureolas sucesivas de inyección de arcilla-cemento o de gel de silicato de sodio.

En las dos extremidades del sifón, es decir, en las dos orillas, el perfil longitudinal del emisario presentaba una sección inclinada a 45°, de una longitud de 25 m, atravesando de arriba a abajo aluviones de arena y gravas, arenas llamadas de Beauchamps y finalmente margas y guijarros.

Las arenas de Beauchamps eran difícilmente inyectables, habiéndose pensado en recurrir a las inyecciones de resinas.

Finalmente se prefirió aplicar el procedimiento de congelación con nitrógeno líquido que anteriormente había resultado satisfactorio.

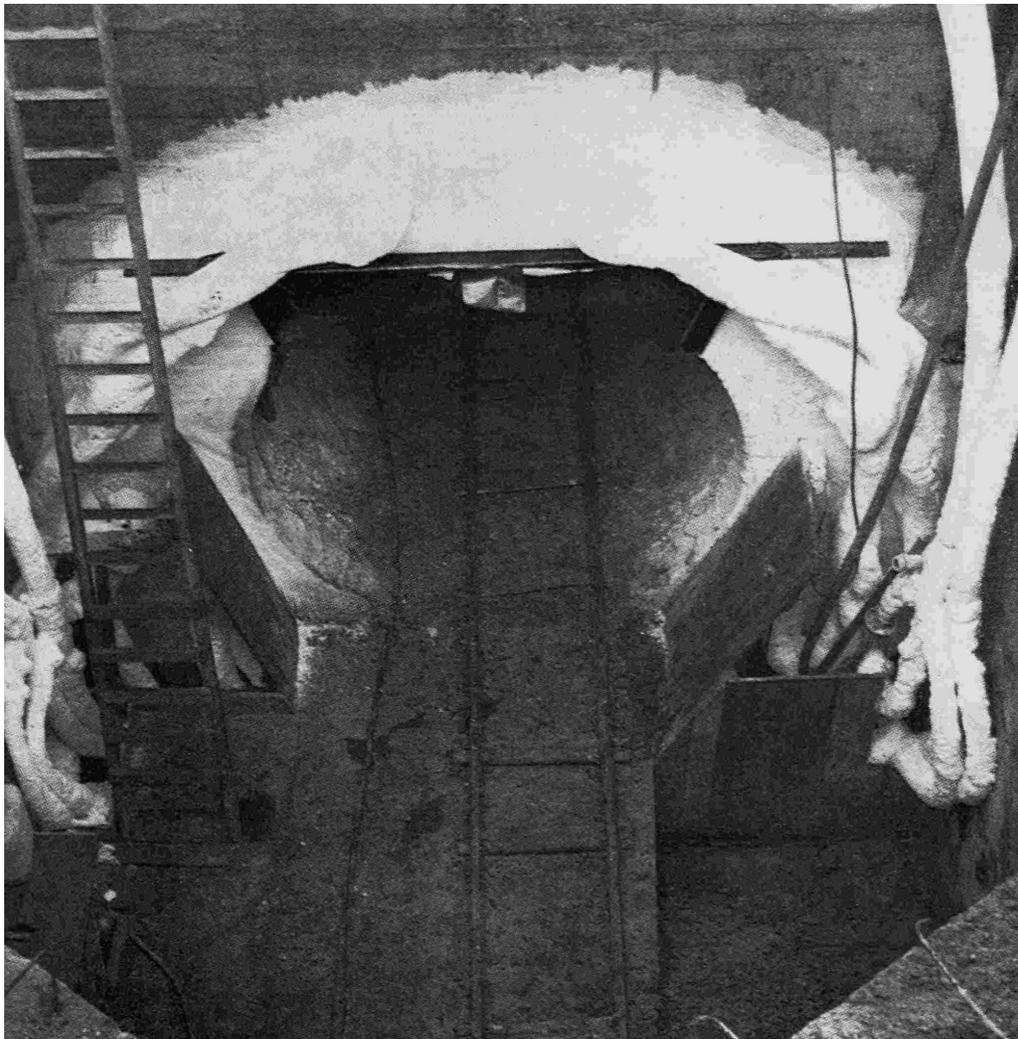
Las sondas fueron agrupadas de dos en dos, en serie, con alimentación en paralelo de cada pareja.

Las 22 perforaciones de  $\varnothing 127$  mm y de 25 m de longitud fueron ejecutadas a partir del plano inclinado a 45° y dispuestas según un círculo de 5,80 m de diámetro, con una separación entre ellas de 0,84 m.

Cada una de estas perforaciones recibió un tubo de 76 cm de diámetro interior.

La alimentación de nitrógeno líquido se efectuó mediante una cisterna de 40 m<sup>3</sup> de capacidad, montada sobre semi-remolque.

El funcionamiento de las sondas y la temperatura de salida del nitrógeno fueron constantemente vigiladas por termopares.



Avance de túnel debajo de la estación de ferrocarril de Dortmund-Mengede:

Formación de hielo en la boca de túnel y sobre los tubos de congelación.

Podría sorprender la elección de 0,84 m como separación entre sondas sucesivas, pero con ello se quiso disponer de un espacio que permitiera ejecutar la excavación sin entorpecimientos. Se buscó, por otra parte, reducir lo más posible el tiempo de puesta en frío para realizar un espesor congelado de un metro, por lo menos.

El plazo de formación del muro de hielo había sido fijado teóricamente en 72 horas; pero la operación duró 6 días, ya que se procedió a la puesta en frío congelando sucesivamente la mitad derecha, y después la mitad izquierda del volumen cilíndrico considerado.

La fase de puesta en frío necesitó el consumo de 410 m<sup>3</sup> de nitrógeno líquido, es decir, aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de terreno congelado.

En realidad, el endurecimiento de los terrenos afectó a un volumen superior al teóricamente previsto.

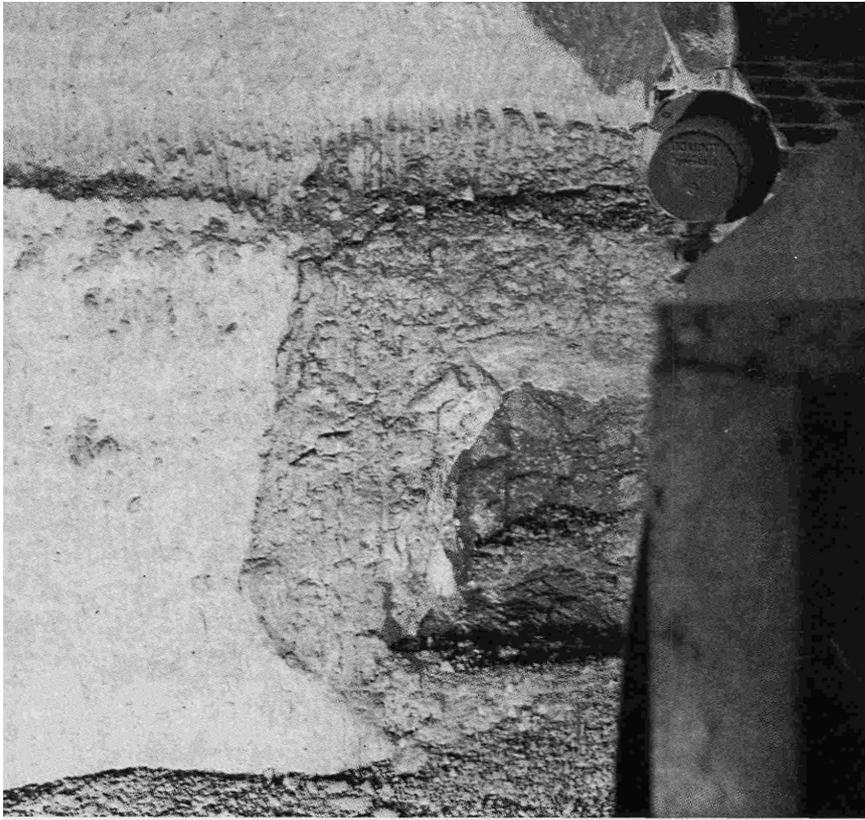
La excavación fue ejecutada con un diámetro en 4,5 m, colocándose un encofrado basto de madera, con aislamiento de poliestireno expandido, y por fin un encofrado interior recuperable con el diámetro final interior de la obra ( $\varnothing$  3,25 m), hormigonando, con bomba, un hormigón de cemento CPMF.2, provisto de un producto anticongelante.

Otro ejemplo se dio cerca de Grenoble, con ocasión de la colocación del oleoducto Mediterráneo-Ródano.

Una perforación horizontal de 457 mm había sido efectuada bajo el cruce de una avenida y el ferrocarril. Esta perforación desembocaba bajo la capa freática, y, a pesar de la colocación de una cortina de tablestacas y de una solera provisional, no había sido posible aislar el tubo para soldarlo. En efecto, un bombeo enérgico no solamente no había conseguido bajar el nivel de la capa lo suficiente para alcanzar el tubo, sino que, además, al arrastrar partículas finas del terreno aumentaba la permeabilidad de éste y, por último, presentaba cierto peligro.

Se trataba, pues, gracias al procedimiento de congelación de terrenos con nitrógeno líquido, de actuar rápidamente a fin de taponar los desagües alrededor del tubo, con el fin de permitir un bombeo eficaz y un agotamiento de la excavación durante las horas necesarias para los trabajos de soldadura.

Una operación preliminar consistió en disponer por encima del tubo un suelo arenoso, en el que se construyeron siete sondas verticales formando una cortina, perpendicular al tubo, que descendía hasta 1 m por encima de éste.



**Avance de túnel debajo de la estación de ferrocarril de Dortmund-Mengede:**  
**Formación de hielo en el frente del túnel. La resistencia a la compresión del suelo heladizo era de unos 125 kp/cm<sup>2</sup>. Se usó un tambor de corte equipado con metal duro Widia.**

Las sondas tubulares de acero, de diámetro 50/63, estaban separadas 0,30 m. Sus cabezas sobresalían 0,30 m sobre la capa freática.

La alimentación de nitrógeno líquido se efectuaba directamente a partir de un camión cisterna.

Después de 20 horas de puesta en frío comenzó el bombeo, permitiendo el agotamiento de la excavación en menos de 1 hora.

La alimentación de nitrógeno líquido fue interrumpida durante 3 horas, volviendo a funcionar más tarde, durante 5 horas, con el fin de permitir la finalización de los trabajos de soldadura.

La eficacia de la congelación era todavía sensible 12 horas más tarde.

Esta operación ha puesto sobre todo de relieve la rapidez del procedimiento en cuanto a la puesta en obra y a la congelación, así como los servicios que puede prestar por su flexibilidad.

El consumo de nitrógeno líquido ha sido de 12.000 litros para el total de la operación. Ningún otro procedimiento actual hubiera permitido alcanzar un resultado análogo, en mejores condiciones de costo y menos todavía de rapidez.

Un cuarto ejemplo, con fecha de marzo de 1969, subraya las ventajas del procedimiento: una obra de cimentación de un gran inmueble en Lausana (Suiza).

Se trataba de que, a medida que se realizaba una excavación, se fijara una de las paredes verticales de ésta mediante la construcción de un muro de 9 m de altura y unos 30 m de longitud.

La construcción, a partir de la superficie, se realizaba mediante hileras horizontales de paneles anclados, de 2 m de anchura y 1,30 m de altura, alternando con paneles idénticos, no anclados, sujetos por los primeros.

Los trabajos tuvieron que ser parados a la altura de la quinta fila horizontal de paneles, es decir, a una profundidad de 6 m, por una capa de hierro acuifera, de un espesor de 0,60 a 1,50 m.

La obturación de esta vena en una longitud de 8 m, una altura de 2 m y un espesor de 40 cm, pudo ser realizada por congelación del terreno con nitrógeno líquido, muy rápidamente, sin necesidad de inversión importante.

Cuatro días después de la primera visita de un ingeniero de la Sociedad «L'Air Liquide» para examinar la obra, la empresa encargada de las obras había realizado y colocado el material necesario, es decir, 16 sondas de congelación y su tubería de alimentación de nitrógeno líquido.

Las sondas, fabricadas a partir de tubos comerciales de 2", de acero ordinario, estaban colocadas cada 50 cm formando una cortina, inclinada 30° con relación al muro vertical que las dominaba.

La línea de alimentación que las unía a la cisterna tenía una longitud de 20 m.

L'Air Liquide había mientras tanto llevado de Francia a Lausana 15.000 litros de nitrógeno líquido. Esta cantidad ha sido suficiente para realizar la operación de congelación y para mantener el suelo en frío durante la duración de los trabajos.

Después de 17 horas de inyección de nitrógeno líquido bajo presión según un procedimiento simple, la explanación del talud a lo largo del muro congelado pudo comenzar sin ninguna venida de agua y en condiciones de una completa seguridad.

Hay que resaltar la rapidez de ejecución de la operación, incluida la fabricación del material. Este último es, por otra parte, barato y casi enteramente recuperable. Únicamente se perdieron las envolturas exteriores de las sondas, constituidas por tubos de 50 mm.

La eficacia de una determinada técnica no se evidencia al ingeniero más que por la multiplicación de casos concretos.

La red de canalización de oxígeno más importante de Europa alimenta la siderurgia, de Dunkerque a Mons y a Amberes, con un paso bajo el Escalda.

Este túnel realizado bajo el Escalda para el paso del «oxyducto» comprende dos pozos verticales de 3 m de diámetro, unidos por una galería horizontal, bajo el lecho del río, a 40 m por debajo del nivel del suelo.

Dadas las filtraciones de agua, la empresa belga encargada de la obra utilizó el procedimiento de congelación de suelos con salmuera. Debido a la presencia de agua salada, que se solidifica a una temperatura

más baja que el agua ordinaria, este procedimiento producía un enfriamiento insuficientemente rápido, y se decidió inyectar nitrógeno líquido en las sondas colocadas para la salmuera. La decisión fue tomada un viernes, comenzándose el lunes la inyección de nitrógeno líquido, lo que permitió muy rápidamente el proseguir la obra.

Esta operación fue realizada con 140.000 litros de nitrógeno líquido; un remolque de 10.000 litros servía como almacén fijo en la obra.

En 1967, la construcción en Londres de la nueva línea del Metro, llamada «Victoria Line», planteaba un problema en Tottenham Station.

Se trataba de construir una caja para escalera mecánica, inclinada a 45°, para unir la estación subterránea a la estación de superficie, a través de terrenos saturados de agua, en las proximidades del Lee River.

Para esta primera obra, la empresa encargada de los trabajos quiso ensayar el empleo de nitrógeno líquido. Únicamente la parte superior de la obra fue congelada con nitrógeno líquido; la parte inferior fue realizada mediante los procedimientos clásicos de congelación (grupos frigoríficos de amoníaco).

El contenido de agua era, por término medio, de 400 litros por cada m<sup>3</sup> de terreno, es decir, del orden del 30 al 35 %. Las variaciones del nivel del río tuvieron una influencia indudable sobre los consumos de nitrógeno líquido, que fueron por ello superiores a las previsiones, lo mismo que la duración de la obra.

Los datos concernientes a esta operación son los siguientes:

- volumen congelado, aproximadamente ... .. 200 a 250 m<sup>3</sup>
- consumo total de nitrógeno líquido ... .. 350.000 litros
- número de congeladores de nitrógeno líquido ... .. 12
- agrupamiento ... .. en serie de 3
- diámetro exterior de los congeladores ... .. 4"
- tiempo total de trabajo ... .. 2 semanas

Los congeladores eran de longitud variable según su posición respecto a la inclinación de la escalera: los más cortos, del lado de la estación, medían 1,5 m de longitud, y los más largos, aproximadamente 10 m.

Igualmente en 1967, dado que la perforación de un pozo cerca de la catedral de San Pablo, en Londres, tenía que entorpecer considerablemente la circulación de superficie, convenía acelerar los plazos, a fin de no obstruir demasiado tiempo la calzada con las instalaciones de la obra.

El diámetro del pozo era de 5 m y la zona a congelar se situaba entre los cotas — 10 y — 13 m.

El volumen a congelar totalizaba, aproximadamente, unos 60 m<sup>3</sup> y el espesor de la pared congelada, irregular por otra parte, no excedía de 1 m.

La congelación requirió un gasto de 30 m<sup>3</sup> de nitrógeno líquido y el mantenimiento en frío, durante 6 días, 60 m<sup>3</sup>. Así, pues, el conjunto de la operación consumió 90 m<sup>3</sup> de nitrógeno líquido.

Seis congeladores realizaron la congelación en 60 horas. Su diámetro exterior era de 100 mm construidos con acero de tipo normal.

Los congeladores estaban colocados en un mismo círculo y siempre agrupados en serie de tres.

Varias obras fueron realizadas más tarde, sobre todo dos en 1968:

- Una de las obras tenía por finalidad la renovación del antiguo túnel de Blackwall Road, bajo el Támesis, concebido en su época para el paso de coches de caballos, en vía transitable para los vehículos de motor. Se trataba especialmente de aumentar el radio de curvatura de las curvas a la entrada y salida de este túnel. Esta obra ha consumido 80.000 litros aproximadamente.
- La otra consistía en la excavación de una galería horizontal bajo un río en Lowestoff, cerca de Norwich, al este de Londres. Esta operación ha necesitado 400.000 litros de nitrógeno líquido.
- En Alemania el procedimiento ha sido igualmente empleado con éxito.

## résumé

### Consolidation et étanchement des terrains par congélation

G. Vié, ingénieur des mines

Les procédés classiques de consolidation et d'étanchement des terrains par injection de ciment ou de résine ne donnent pas de bons résultats pour les terrains poreux. Dans ces cas, on fait appel à l'injection de diverses solutions de sels chimiques (silicate de soude, sulfate d'alumine, etc.) ou bien à la congélation du terrain. Ce dernier procédé est celui qui est commenté dans cet article. Parmi les procédés de congélation existants, a été récemment développé celui qui utilise de l'azote liquide. L'auteur décrit les avantages que ledit procédé présente par rapport aux autres procédés de congélation, les caractéristiques de l'azote liquide et des sondes d'injection, ainsi qu'une série de divers ouvrages exécutés en plusieurs pays par l'application de l'azote liquide.

## summary

### Consolidation and waterproofing of soils, by freezing

G. Vié, mining engineer

In porous soils the traditional methods of consolidation and waterproofing, through the injection of cement or resins, do not give good results. In these cases various chemical salts are injected (sodium silicate, alumina sulphate, etc.), or else the soil is frozen. The latter method is the one described in this paper. Among the systems adopted, recently the use of liquid nitrogen has been tried. The author describes its advantages in relation to other freezing methods, the characteristics of liquid nitrogen, the methods of injection, and also a number of particular projects, in various countries, where liquid nitrogen has been used.

## zusammenfassung

### Konsolidierung und Undurchlässigmachen von Böden durch Vereisung

G. Vié, Bergbauingenieur

Mit den gebräuchlichen Methoden der Konsolidierung und Undurchlässigmachung von Böden durch Zement, oder Marzeinzspritzungen erzielt man bei porösen Böden keine guten Ergebnisse. In solchen Fällen spritzt man gewöhnlich verschiedene chemische Salzlösungen (Sodasilikat, Aluminiumsulfat, usw.) ein oder aber man vereist den Boden. Letztere Methode wird in diesem Artikel behandelt. Von den bestehenden Vereisungsmethoden hat man in letzter Zeit das Verfahren unter Anwendung von flüssigem Stickstoff entwickelt. Der Autor beschreibt seine Vorteile gegenüber den anderen Vereisungsverfahren, die Eigenschaften des flüssigen Stickstoffs und die Einspritzungs-sonden, sowie seine Anwendung in verschiedenen Ländern.