

La congelación del suelo, técnica, tecnología y obras recientes

PIERO ROBERTI (*)

RESUMEN En este artículo se tratan algunos aspectos tecnológicos y técnicos relativos al método que se viene utilizando para la **congelación** del suelo in situ. También se analizan algunas obras recientes y significativas, para las cuales ha sido adoptada con éxito esta **tecnología**.

La congelación es una tecnología muy particular (por lo tanto, puede considerarse un producto muy localizado), hasta ahora poco conocido y poco extendido en la construcción, que permite modificar las características **mecánicas e hidráulicas** de materiales saturados en agua. Este método constructivo, que utiliza el mismo suelo como materia prima, permite realizar, incluso en condiciones geológicamente difíciles y trabajando en espacios reducidos, estructuras bajo el agua con excelentes características de **impermeabilidad y capacidad portante**.

GROUND FREEZING, TECHNIQUE, TECHNOLOGY AND RECENT WORKS

ABSTRACT *This article covers some technological and technical aspects related to the methods that are used for the **freezing** of soils on site. It also illustrates some recent significant sites, for which this **technology** has been successfully adopted. Freezing is a very particular technology (it can therefore be considered a niche product) so far little known and not much widespread in the designers and construction world. This construction method, which uses the same ground as raw material, modifies in situ the **mechanical** and **hydraulic** features of a water-saturated soil. Using freezing technology, underwater structures with excellent **waterproofing** and **bearing** features can be achieved, even under difficult geological conditions and working inside limited spaces.*

Palabras clave: Congelación, Tecnología, Mecánicas, Hidráulicas, Impermeabilidad, Capacidad portante.

Keywords: Freezing, Technology, Mechanical, Hydraulic, Waterproofing, Bearing.

1. INTRODUCCIÓN

Las decisiones que pueden conducir a la elección de este método como un sistema constructivo, están a menudo dictadas por razones técnicas y no siempre económicas. El objetivo principal es reducir ciertos riesgos o superar las limitaciones de otras tecnologías.

La Tabla 1 muestra una comparación del nivel de riesgo y las limitaciones tecnológicas entre la congelación y otras tecnologías alternativas, para entender cuales pueden ser las razones que podrán influir en las decisiones del calculista.

La congelación es una tecnología que requiere un alto nivel de experiencia y atención al detalle, en este caso, mucho más que para otras tecnologías. Trabajando generalmente en situaciones de riesgo potencialmente alto, un detalle puede decidir el éxito o el fracaso total de una intervención. A menudo en el pasado ha habido situaciones de riesgo con resultado de graves daños, a veces causado por el bajo nivel de conocimientos de los especialistas a cargo de la aplicación de la congelación.

2. ASPECTOS TÉCNICOS Y TECNOLÓGICOS

2.1. ASPECTOS TÉCNICOS Y TECNOLÓGICOS

Existen básicamente dos métodos principales de congelación. El llamado método cerrado que implica el uso de salmuera (una solución de cloruro de calcio en agua) como refrigerante y el llamado método abierto que en cambio, utiliza nitrógeno líquido.

Ambos métodos se basan en el principio de la circulación de un fluido refrigerante por el interior de unos tubos de acero especiales (sondas congeladoras) introducidos en el suelo pero sin inyectar directamente el suelo. El fluido refrigerante circulando por los tubos de acero de la sonda transmite energía al suelo, refrigerando y congelando el agua del suelo.

2.2. CONGELACIÓN CON SALMUERA

Se trata de un sistema de circuito cerrado con doble líquido refrigerante, amoníaco que circula por el interior del circuito refrigerador y salmuera, que circula en las sondas de refrigeración y congelación, colocadas en el suelo, pero sin penetrar la salmuera en el mismo. La Figura 1 muestra un esquema de una planta de congelación de salmuera.

(*) General Manager Rodio Geotechnik AG (Grupo Terratest).
Ingeniero Civil. E.Mail: piero.roberti@rodio.ch.

TECNOLOGÍA	PILOTES	PANTALLAS	INYECCIONES DE BAJA PRESIÓN	INYECCIONES A ALTA PRESIÓN (JET GROUTING)	CONGELACIÓN
Limite de penetrabilidad de la mezcla (granulometría)					
Riesgo de sifonamiento (gradiente hidráulico > 1,0)					
perforación bajo laderas					
Alturas limitadas H < 3,0 m.					

TABLA 1.

riesgo elevado

riesgo probable

La salmuera es una solución de cloruro de calcio en agua al 33%, con esta concentración de sales la solución permanece en estado líquido incluso a temperaturas de alrededor de -45°C .

La unidad de refrigeración está instalada en un contenedor cerrado y está formada por un sistema de compresores, evaporadores e intercambiadores de calor (serpentines).

El amoníaco que está contenido en el sistema en cantidades limitadas, se comprime en varias etapas y luego se enfría con agua en un primer intercambiador de calor. Con posterioridad, al evaporarse, su temperatura desciende a 40 grados bajo cero. En un segundo intercambiador de calor este transfiere su energía criogénica a la salmuera, que se enfría y por medio de bombas especiales, se introduce en la red de distribución para llegar finalmente las sondas congeladoras, colocadas a veces a grandes distancias de la planta de refrigeración, refrigerando y congelando el agua contenida en el suelo. Las sondas están equipadas con un doble tubo a través del cual la salmuera des-

ciende por la cavidad entre el tubo exterior y el interior, proporcionando energía criogénica al suelo circundante.

Además de las sondas congeladoras, se instala en la tierra una serie de tubos en los cuales se insertan una cadena de sensores de temperatura colocados a intervalos regulares de 1-2 metros. La medición continua de la temperatura del suelo, permite evaluar las dimensiones y la homogeneidad de la estructura de suelo congelado.

2.3. CONGELACIÓN CON NITRÓGENO

Se trata de un sistema abierto con un único liquido refrigerante (nitrógeno líquido). El nitrógeno líquido se produce industrialmente por destilación fraccionada del aire, mediante varios ciclos de compresión y expansión. A presiones cercanas a la presión atmosférica (2-3 bar) el nitrógeno líquido que está a una temperatura de unos -196°C , puede ser transportado a la obra y mantenerse en forma líquida en tanques presurizados especiales

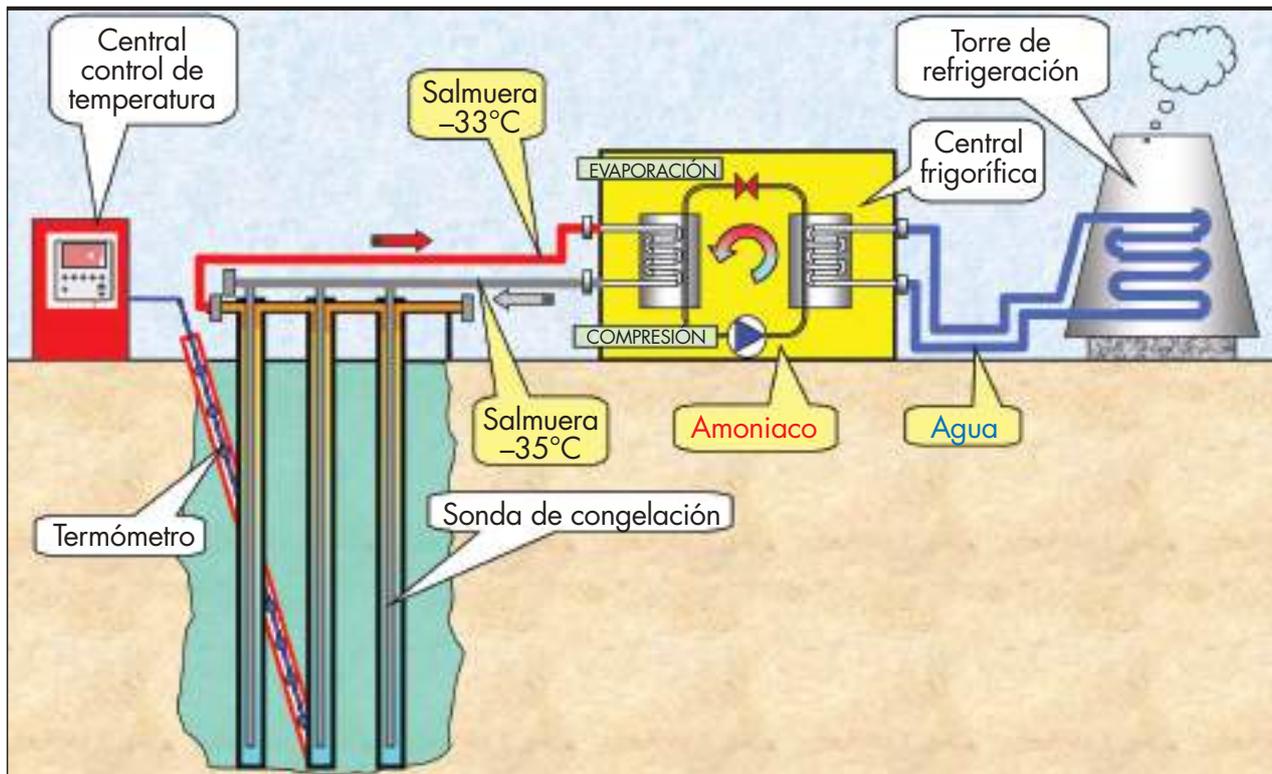


FIGURA 1. Esquema de un equipo de congelación con salmuera.

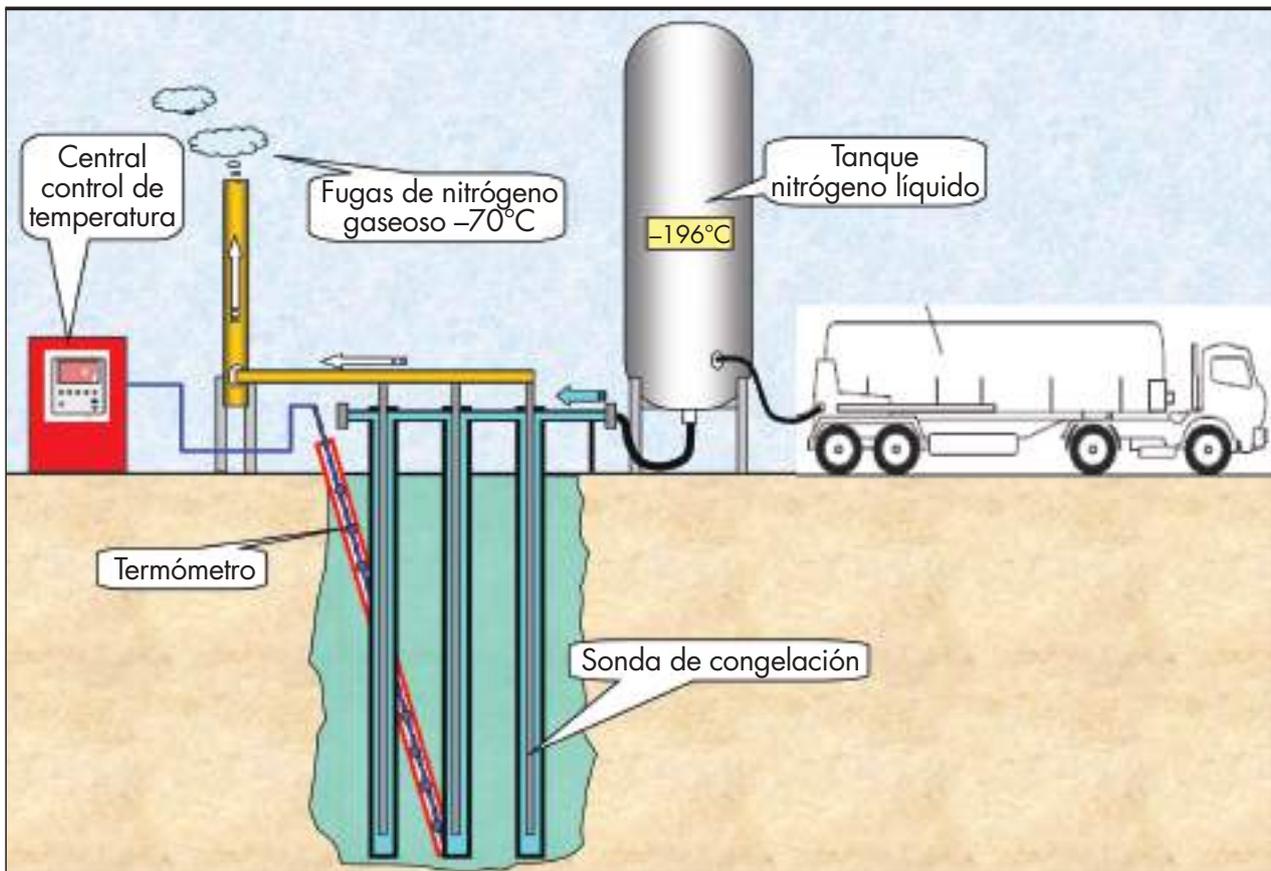


FIGURA 2. Esquema de la unidad de congelación con nitrógeno.

con doble pared, perfectamente aislados. La Figura 2 representa esquemáticamente una unidad de congelación con nitrógeno.

Desde el tanque de almacenamiento, el nitrógeno líquido se introduce en un sistema de distribución, que pasa por el interior de las sondas congeladoras. Las sondas congeladoras están equipadas con un doble tubo, por el espacio interior del tubo de cobre el nitrógeno líquido llega a la parte inferior de la sonda donde se evapora de forma turbulenta en el espacio entre el tubo interior y el exterior (este último es generalmente también de cobre). Durante el cambio de estado, el nitrógeno libera la mayoría de su energía criogénica a través de la pared del tubo exterior, trasladándola al suelo circundante. Una vez vaporizado, el nitrógeno pierde mucho su capacidad

criogénica y se reintroduce en el aire a través de un sistema de tuberías de descarga.

También en este caso, se complementa con un sistema para medir la temperatura del suelo (sensor de temperatura), el mismo que el utilizado para la congelación con salmuera.

2.4. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE LOS DOS SISTEMAS

La Tabla 2 enumera las principales diferencias entre los dos sistemas de congelación, mostrando en rojo los aspectos que se consideran desfavorables para una tecnología, mientras que los beneficios se indican en verde. Una vez más estos aspectos pueden influir en las decisiones del proyectista.

SISTEMA	SALMUERA	NITRÓGENO
TIEMPO DE CONGELACIÓN	ALTO 20-30 DIAS	BAJO 5-7 DIAS
COSTE FIJO INSTALACIONES	ALTO 100-300 €/m ³	BAJO 80-150 €/m ³
COSTE ENERGÍA	BAJO 10-15 €/m ³	ALTO 70-100 €/m ³
COSTE MANTENIMIENTO	BAJO 4-15 €/m ³ /jornada	ALTO 10-20 €/m ³ /jornada
UTILIZACIÓN EN ESPACIO CONFINADOS	RIESGO LIMITADO	RIESGO ALTO (EN PRESENCIA DE PÉRDIDA DE NITRÓGENO)
RIESGO CON AGUA EN MOVIMIENTO	RIESGO SI V > 1-2 m/jornada	RIESGO SI V > 5-7 m/jornada
RIESGO LEVANTAMIENTO	RIESGO ALTO EN ARCILLAS	RIESGO LIMITADO

TABLA 2. Principales diferencias entre los dos sistemas de congelación.

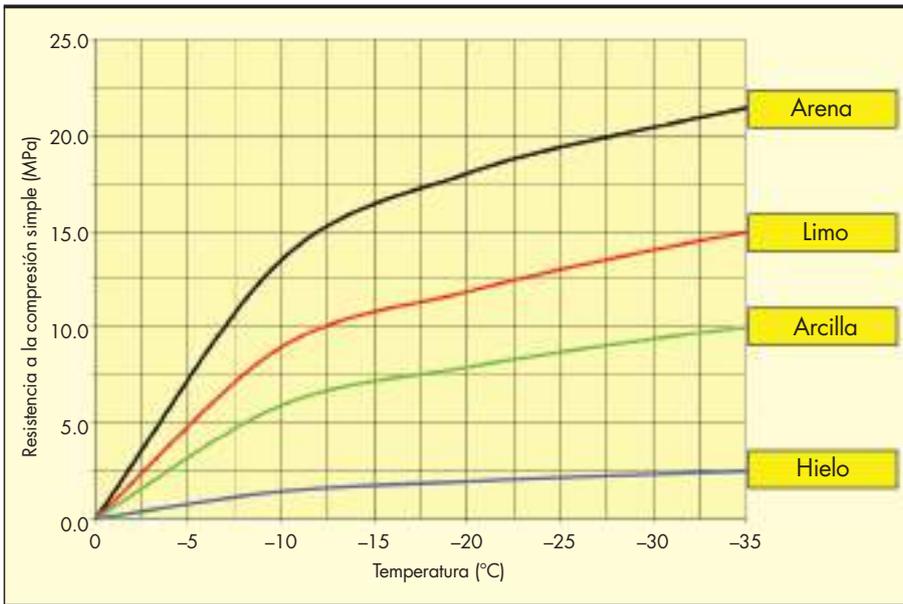


FIGURA 3. Resistencia a la compresión del suelo.

2.5. ASPECTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UNA OBRA DE CONGELACIÓN

En esta sección se muestran algunas correlaciones, basadas en la experiencia, con el objetivo de centrarse en ciertos aspectos técnicos que pueden influir en el diseño.

En la Figura 3 se muestra una correlación entre la resistencia a la compresión simple de las muestras de suelo congelado, en función de la temperatura y el tipo de suelo. Como se puede ver, en suelos cohesivos tales como arcillas y limos, se han alcanzado, a la misma temperatura, resistencias más bajas que los que pueden lograrse en los suelos granulares como la arena. Hay que recordar que uno de los aspectos que los proyectistas deben tener en cuenta en el tamaño de una es-

tructura formada por suelo congelado, es el de la fluencia. La resistencia a la compresión del suelo congelado bajo una carga constante durante un largo periodo de tiempo, puede ser parcialmente reducida. Este fenómeno es más evidente en arcilla o suelos orgánicos.

La Figura 4 contiene una correlación entre el tiempo de formación de una pared congelada, expresado en días y la interacción con la sonda congeladora. Los gráficos se basan en experiencias diversas y permiten estimaciones suficientemente precisas para un diseño de máximos. Se analizaron dos tipos de suelo, arena y arcilla. En arcillas, con la misma distancia entre las sondas, el tiempo de congelación es más lento, esto se debe principalmente al hecho de que las arcillas tienen un contenido de humedad por encima de la arena (y el

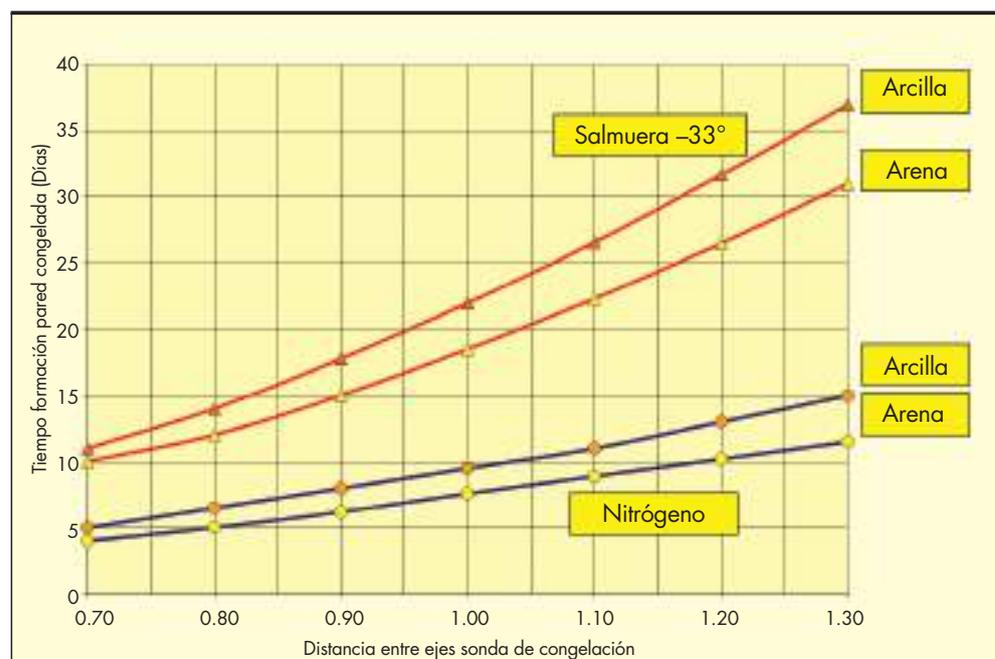


FIGURA 4. El tiempo de congelación.

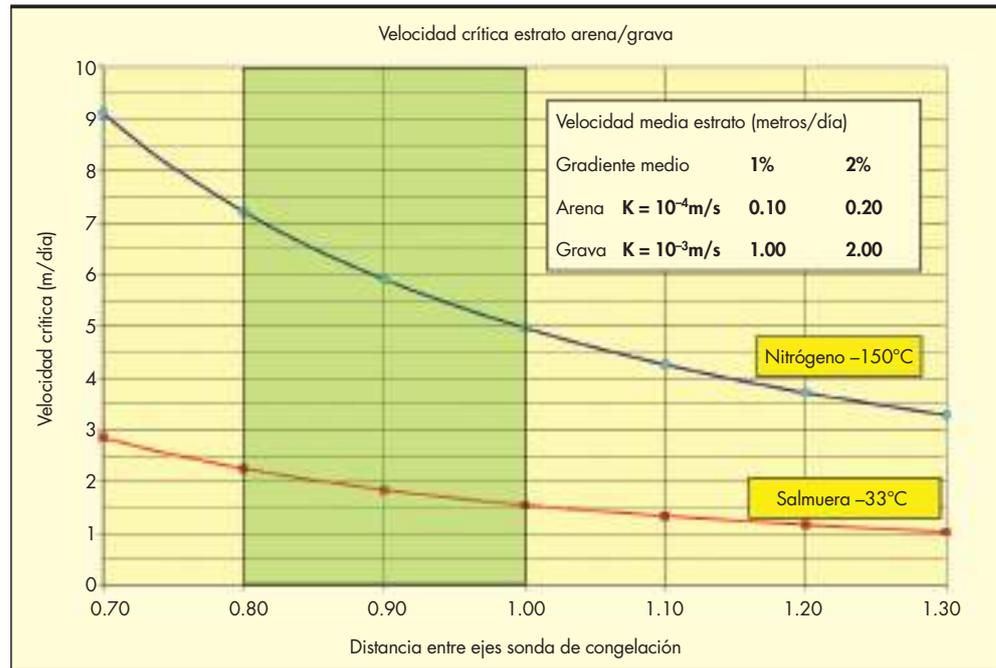


FIGURA 5. Influencia de las aguas subterráneas en movimiento.

agua es el elemento que asume gran parte de la energía criotérmica en el fase de cambio de estado) y que la fase sólida tiene un cierto poder aislante. Este gráfico nos dice cómo podemos variar la distancia entre las sondas de prueba, sabiendo de que un aumento de la distancia entre ejes, provoca un ahorro en la perforación, provoca un aumento del tiempo y por lo tanto de la energía necesaria para conseguir la estructura congelada.

La Figura 5 muestra la influencia que pueden tener las aguas subterráneas en movimiento en la formación de una estructura congelada. En función de la interacción entre las sondas y la técnica de congelación adoptada, la velocidad del

movimiento de las aguas subterráneas puede considerarse crítica, y por tanto, a partir de la cual el riesgo de que en algún lugar de la zona de suelo situada entre dos sondas, esta no llegue a congelarse por completo, dejando "ventanas" con pasadas de agua.

En suelos con alta permeabilidad, tales como grava, en presencia de gradientes relativamente bajos, son posibles velocidades críticas. Una posible solución a este problema puede ser la reducción de separación entre las sondas congeladoras o una pre-inyección del suelo, para reducir su permeabilidad.

Uno de los aspectos técnicos que se pueden observar son los que se muestran en la gráfica de la Figura 6 en la que se indica

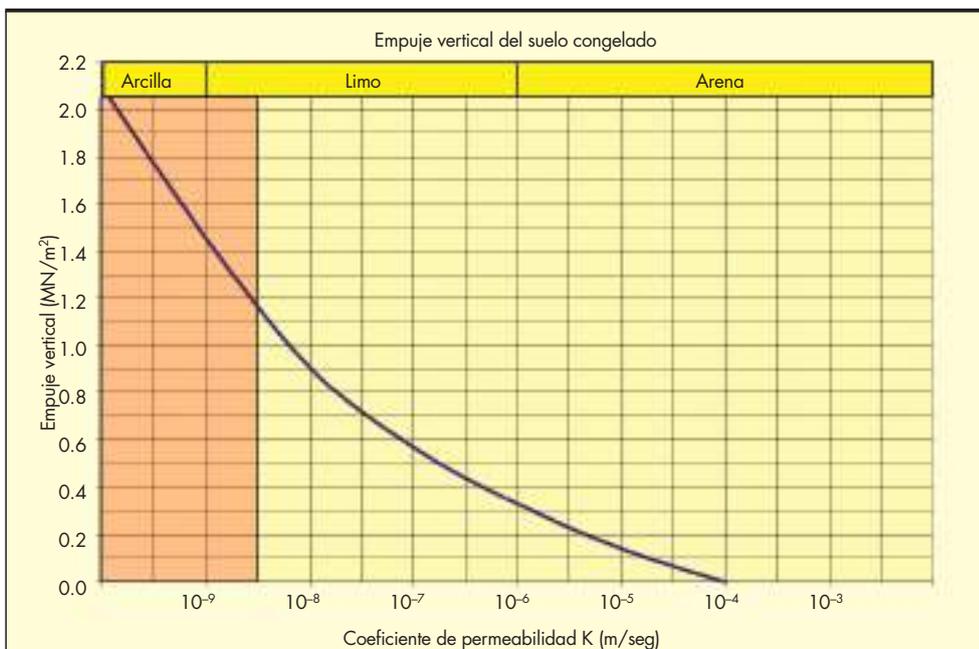


FIGURA 6. Empuje de suelo congelado.

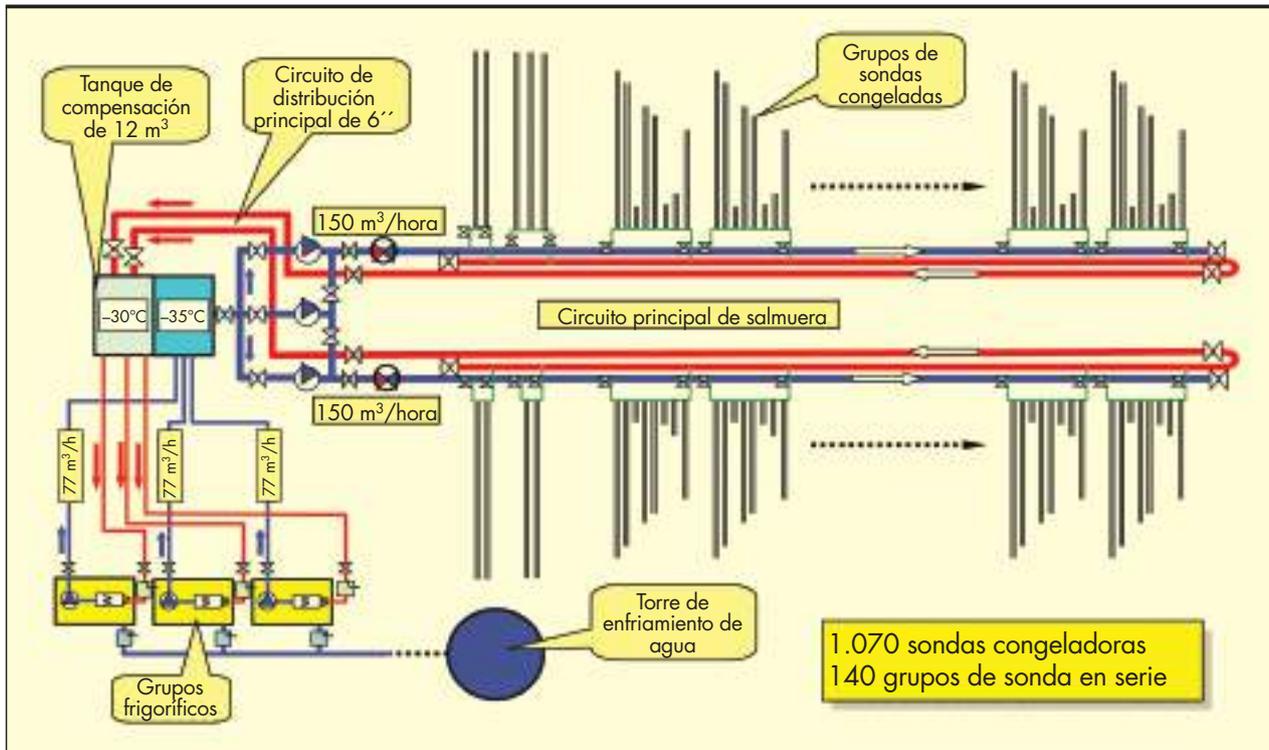


FIGURA 7. Circuito de distribución de la salmuera, en el obra del Túnel de Leipzig (Alemania).

el posible empuje que se puede generar en suelos con permeabilidad baja o muy baja, especialmente las arcillas, por el agua intersticial durante la congelación. En estos tipos de suelo, el agua queda atrapada en la matriz sólida, ya que no hay posibilidad de drenar fuera de la estructura de la formación. En el paso de un estado líquido a hielo hay un aumento de volumen, este aumento en el volumen crea un empuje y un posible levantamiento que puede alcanzar un valor final de un 3-4% del espesor de la capa de arcilla. El peligro es particularmente alto cuando se encuentra una capa de arcilla muy espesa que está localizada en la proximidad inmediata de una construcción con cargas sobre el suelo particularmente elevadas. El riesgo se reduce considerablemente o se pone a cero si la misma capa de arcilla se coloca en profundidad.

2.6. ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES DE LA TECNOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, la congelación requiere un alto nivel de tecnología, aplicando el desarrollo y uso de sistemas complejos para su correcta aplicación.

En la Figura 7 podemos ver un ejemplo del sistema de distribución de la salmuera bastante complejo, diseñado y construido en Leipzig, que describimos en detalle más adelante. En este circuito de distribución fueron conectadas 1.070 sondas y 3 grandes plantas de congelación/refrigerador de 380 Kw, cada uno. El sistema se completa con 114 sondas termométricas con 840 termopares.

El flujo de la salmuera fría a -35°C, es de 300m³/hora (83 litros por segundo). El sistema de distribución permite la circulación de salmuera fría dentro de cada sonda individual y su retorno a la refrigeración del congelador. Un aspecto muy importante que debe ser mencionado y que da una idea de la necesidad de una atención al detalle, es que a lo largo de los 8.120 m de sondas se colocaron cerca de 10.000 uniones rosca-

das al congelador. Estas uniones roscadas deben tener un cierre absolutamente perfecto con la circulación de salmuera a -35°C, durante casi dos años de mantenimiento de la congelación. También una pequeña pérdida de agua salada en el suelo podría tener consecuencias catastróficas, si imaginamos que la salmuera, se sustituyó en parte por el agua del suelo a temperatura ambiente se mantendría en estado líquido. Parte de la estructura que se debería congelar a temperaturas bajo cero, estaría en estado sólido, pero solo se encontraría en un estado semi sólido, con los riesgos y consecuencias que se puedan imaginar en la excavación bajo el nivel freático.

Muy a menudo, las aplicaciones de congelación, comportan el uso de sondas de suelo y los termómetros congeladores ins-



FIGURA 8. Sistema preventivo instalado con válvulas de escape, de inyección, guillotina y sellados.

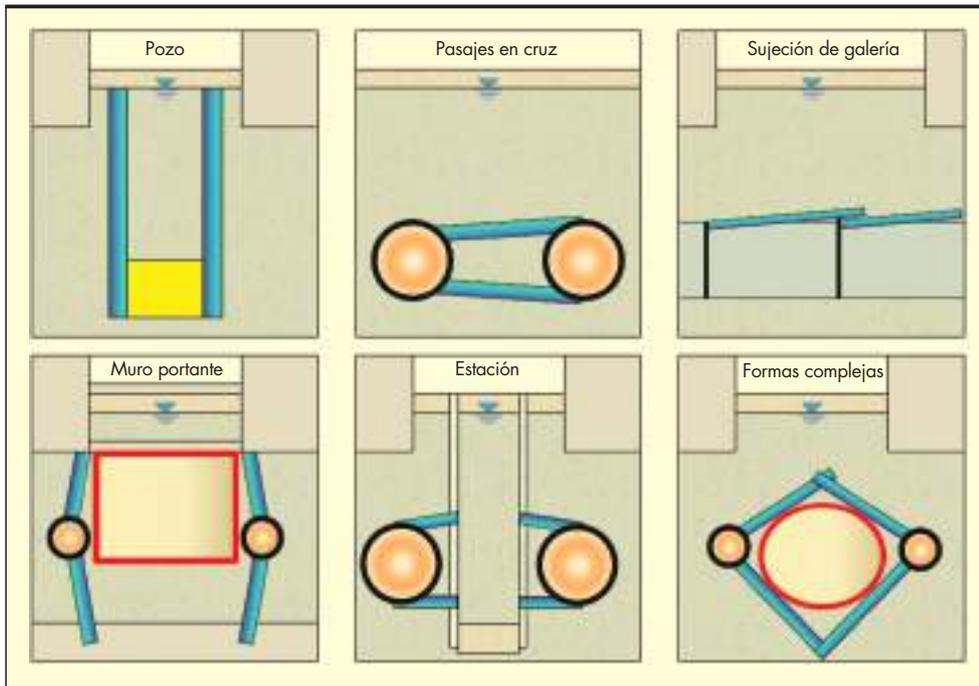


FIGURA 9. Posibles campos de aplicación de la congelación.

talados a través de perforaciones realizadas por debajo del nivel freático. Tener que hacer frente al agua bajo presión, obliga a utilizar los sistemas que impiden la liberación incontrolada de tierra y agua a presión desde la perforación, llamados “preventer”. El equipo “preventer” está compuesto por un sistema de inyección y válvulas de escape, con una válvula de mariposa que le permite cerrar mecánicamente la perforación con una junta de goma. El preventer se monta sobre un tubo de acero. El tubo está sellado o atornillado a un taladro perforado con testigo. En la Figura 8 se puede ver un preventer instalado en un túnel con sus válvulas de escape, de inyección, la guillotina y los sellados de fijación.

2.7. POSIBLES CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA CONGELACIÓN

La Figura 9 representa esquemáticamente algunas posibles aplicaciones de la tecnología de congelación para la construcción de estructuras bajo el agua. En particular:

- Pozos.
- Galerías de unión entre túneles (las galerías transversales).
- Estructuras de sostenimiento provisional en proyectos de túneles de gran diámetro.
- Creación de estaciones de metro con pozos cercanos.
- Creación de muros de carga resistentes al agua por debajo de los edificios existentes.
- Formación de estructuras de geometría compleja para la excavación de cavidades bajo nivel freático.

3. CASOS DE OBRAS EJECUTADAS

Aquí se presentan tres ejemplos de obras de reciente construcción:

1. Leipzig (paredes subterráneas, Alemania).
2. Túnel de Hubertus (galerías transversales en los Países Bajos).

3. Túnel Liefkenshoek (galería transversal en Bélgica), que fue ejecutado adoptando la solución de congelación con salmuera.

3.1. TÚNEL DE LEIPZIG

La congelación es parte de un proyecto de construcción del túnel de Leipzig, una obra ferroviaria que atraviesa la ciudad y pasa bajo la Estación Central, con un túnel de doble vía.

La Estación central de Leipzig, construida en los años veinte, destruida durante la Segunda Guerra Mundial y reconstruida más tarde, tiene la mayor plataforma de vías cubierta de Europa (22 vías). La estación fue renovada y ampliada, bajo tierra, a finales de los noventa; entre otras técnicas, se realizaron cimentaciones profundas mediante jet grouting. Por debajo del edificio principal se encuentran los grandes almacenes y tiendas de lujo ubicadas en los diferentes pisos. La galería del túnel que pasa por debajo del cuerpo principal de la estación y es de doble vía, tiene más de 10 metros de alto por 22 de ancho, y tuvo que ser excavada y construida bajo tierra y en contacto directo con la losa de fondo del nuevo centro comercial.

El edificio principal de la estación, cuenta con grandes ventanas y amplios arcos, que descargan miles de toneladas de peso, directamente sobre los cimientos del centro comercial e interfieren en la excavación del túnel propiamente dicho. El plan era construir dos pozos, un pozo de salida ubicado fuera de la estación base principal y un segundo pozo de llegada, situado en el interior de la plataforma de doble vía cubierta. A partir de los pozos, se excavaron dos túneles piloto, de 145 m de longitud cada uno, con un diámetro interior de 2,40 m utilizando una TBM, tuneladora de pequeño diámetro. Las perforaciones para la instalación de las tuberías y los termómetros congeladores se hicieron a partir de los dos túneles, con una pequeña sonda con un mástil portátil de un poco más de un metro (Figura 10).



FIGURA 10. Sonda perforando taladros en el interior de la galería.

En el túnel, no era fácil encontrar un espacio para el uso del preventer. Las sondas congeladoras, a veces de hasta 20 metros de largo, tuvieron que ser instaladas con longitudes máximas de tubo de tan sólo 70 cm. Las mismas varillas de perforación, se llevaron hasta el final de la misma y se utilizaron como sondas congeladoras para el paso de la salmuera fría. Las varillas de perforación se fabricaron con acero especial que permitiera una alta flexibilidad incluso a bajas temperaturas. Los tubos y las juntas (casi 10.000, como se mencionó anteriormente) tenían que garantizar una perfecta

estanqueidad al agua de la salmuera fría por más de dos años de trabajo. Mediante taladros radiales, realizados desde los dos túneles, se lograron dos paredes diafragma de suelo congelado de 80 metros de largo cada uno, 28 metros de alto y un espesor medio de 4 metros, con un volumen de suelo congelado de alrededor de 16.300 m³, un récord mundial. En la Figura 11 podemos ver la sección longitudinal del proyecto con la estratigrafía, los pozos de salida y entrada del túnel piloto, el propio túnel piloto y una de las dos paredes congeladas bajo el sótano del edificio principal de la estación.

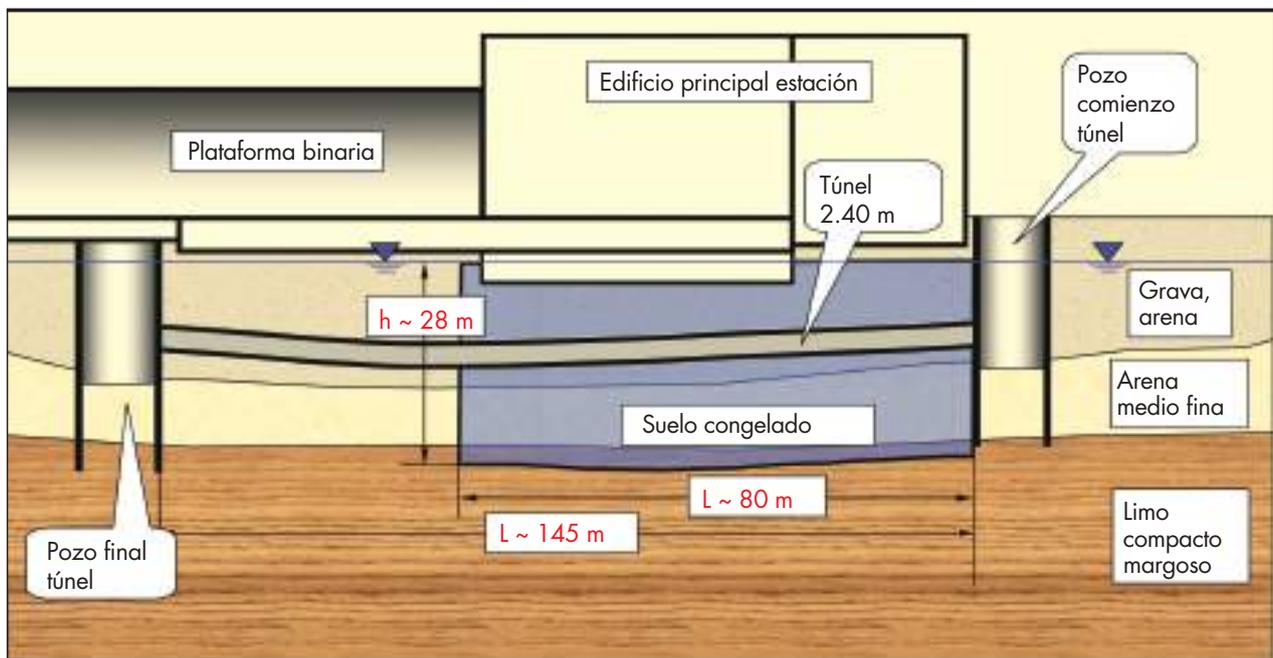


FIGURA 11. Sección longitudinal que muestra el perfil estratigráfico.



FIGURA 12. Instalación barras de perforación.



FIGURA 13. Pared anclada y congelada después de la excavación.

La fase de congelación duró alrededor de 1 mes y medio, durante esta fase, por un sistema de registro automatizado, son registradas y almacenadas (de 8 a 10 veces al día), las temperaturas de cada uno de los 840 sensores de temperatura, así como todos los principales parámetros del circuito de salmuera (temperatura a la entrada y salida de diferentes unidades de refrigeración, la capacidad de la salmuera en cada serie de sondas, funcionamiento de la planta, el volumen de salmuera de la planta, etc.).

Una vez completada la congelación, se han conseguido 2 metros de sustrato impermeable, que forma parte de la estructura de contención, portante e impermeable, para la excavación de la galería. Las paredes de suelo congelado se anclaron con cuatro filas de anclajes de barra, perforados directamente a través de la pared de hielo. Las Figuras 12 y 13 muestran la perforación de la sonda durante la instalación de los anclajes la pared excavada y anclada. Las paredes de color blanco entre los pilotes son el suelo congelado.

Para este proyecto optamos por la congelación con salmuera por las siguientes razones:

- Trabajar en espacios reducidos y cerrados (túnel piloto), con riesgo de pérdida de gas.
- Gran tamaño de la estructura congelada (más de 16.000 m³).
- Mantenimiento a largo plazo (más de 2 años).

Datos principales de la obra:

- 9.350 m de perforación de tubos, 1182 taladros en total.
- 1.068 Varillas congeladoras de Ø 89 mm, longitud total: 8.120 m.
- 114 termómetros, con longitud total 935 m con 840 puntos de medición.
- Alrededor de 16.400 m³ de suelo congelado.
- 3 plantas de salmuera de 380 KW cada una.
- La capacidad máxima instalada de refrigeración: 1,14 MW.
- Valor final del contrato 9.000.000€.



FIGURA 14. Sonda de perforación en túnel.

3.2. TÚNEL HUBERTUS EN HOLANDA

El túnel de Hubertus, cerca de La Haya, en Holanda, es parte de una nueva circunvalación a lo largo de la carretera N489, entre el centro y la autopista a Ámsterdam.

Para este proyecto hemos optado por la congelación con salmuera sobre todo porque los conductos de distribución de la salmuera se sitúan en el interior del túnel en espacios reducidos, lo que resultaba un peligro debido a posibles escapes de gas, en el caso de haber optado por una congelación con nitrógeno líquido.

Los dos túneles tienen una longitud total de poco más de 2 km cada uno. El proyecto consistió en la construcción de cinco galerías de conexión entre túneles principales, que fue-

ron excavados utilizando una tuneladora con un diámetro de 10 metros (los dos túneles tienen un diámetro interior de 9,40 m). Los suelos están formados por estratos de arena fina y limpia, el eje del túnel se encuentra a profundidades entre 7 y 20 metros debajo del nivel freático (hasta 2 bares de presión de agua).

Las perforaciones para la instalación de las tuberías y los termómetros congeladores se hicieron después de terminar la excavación de los túneles principales, empezando por el sur del túnel y avanzando en sentido opuesto al mismo. Con el túnel completo disponible se utilizó una sonda perforadora montada sobre una plataforma de elevación de 2,50 metros de ancho y 5,0 metros de largo.

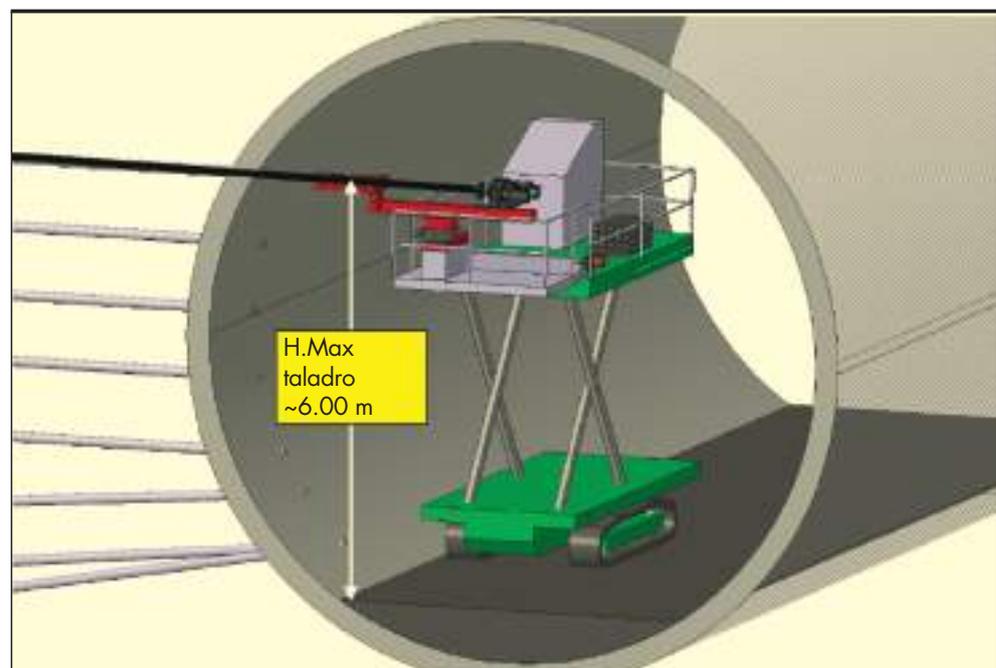


FIGURA 15. Esquema sonda de perforación en túnel.



FIGURA 16. Equipo de congelación en la galería.

La plataforma elevadora, que es visible en las Figuras 14 y 15, permite hacer perforaciones hasta una altura de 6,0 metros sobre el suelo y se adaptan a todas las posibles geometrías que requiere el proyecto. La plataforma, montada sobre orugas, se puede mover de forma independiente a lo largo de todo el túnel y tras la finalización de una perforación, pasar a la siguiente. Todas las perforaciones, se hicieron tras instalar el mecanismo preventer adecuado ya que los puntos de los orificios de cabecera se encuentran por debajo del nivel freático. Para instalar el mecanismo preventer se realizó la primera perforación parcial del revestimiento del túnel con brocas de diamante. En el interior de la perforación se instaló entonces un tubo de acero de espera, que luego se sella herméticamente. El mecanismo preventer, permitió la instalación de una tubería de perforación de seguridad perdida sin correr el riesgo de fuga incontrolada de arena en el túnel. Una vez instalado el tubo (sonda congeladora o termométrica) se procedió a su sellado interno y luego se realizó una prueba de fugas con agua a presión a 10 bar, para garantizar una perfecta estanqueidad.

Después de la instalación de los tubos exteriores, se montan dentro de ellos, los tubos de la salmuera, los testigos de conexión, el circuito de distribución entre las sondas de la congelación de salmuera y la unidad de refrigeración; y final-

mente, el sistema de medición de la temperatura del suelo, que consiste en una serie de cadenas de sensores conectados a las unidades de control para la recogida y almacenamiento temporal de datos.

La congelación de una galería transversal requiere una media de 4 semanas. La comprobación de la congelación se basa en las mediciones de temperatura, que resulta de la verificación de la ausencia de agua en la zona de suelo helado. Para ello, en cada paso se coloca, en el volumen congelado, un drenaje de acero provisto de una válvula y un manómetro de precisión. Un fenómeno que indica el cierre de la estructura congelada es el hecho de un aumento repentino de la presión de los poros del suelo que no se congelan en el interior del mismo. Esto se debe a la presión de expansión del hielo que es más probable que se de hacia el exterior.

Este aumento de la presión nos da una señal indirecta de cierre completo de la estructura del suelo congelado de toda la sección transversal.

Para este proyecto, se disponen tres sistemas de refrigeración eléctrica (Figura 16), colocados en contenedores individuales y compuesto de dos elementos (uno para el enfriamiento de la condensación de amoníaco y uno para la refrigeración de la salmuera a -38°C). Las plantas tienen una capacidad de refrigeración de 200 Kw, cada una, con un tamaño y peso limitado, pudiendo ser fácilmente trasladado de un punto a otro del túnel.

Una vez terminada la fase de congelación, se abre una ventana en el revestimiento del túnel, para instalar una estructura de refuerzo.

En la Figura 17 también se puede ver el congelador y las sondas de la estructura de refuerzo del túnel principal.

Datos principales de la obra:

- 5 Galerías transversales.
- 800 m de perforación del túnel y 110 taladros en total.
- 100 sondas congeladoras \varnothing 89 mm de 720 metros de longitud total.
- 10 termómetros de 80 metros de longitud total con 80 puntos de medición.
- 1200m^3 de suelo congelado.
- 3 plantas de salmuera de 200 KW cada una.
- Valor final del contrato 1,8 millones de euros.



FIGURA 17. Pasaje transversal excavado.

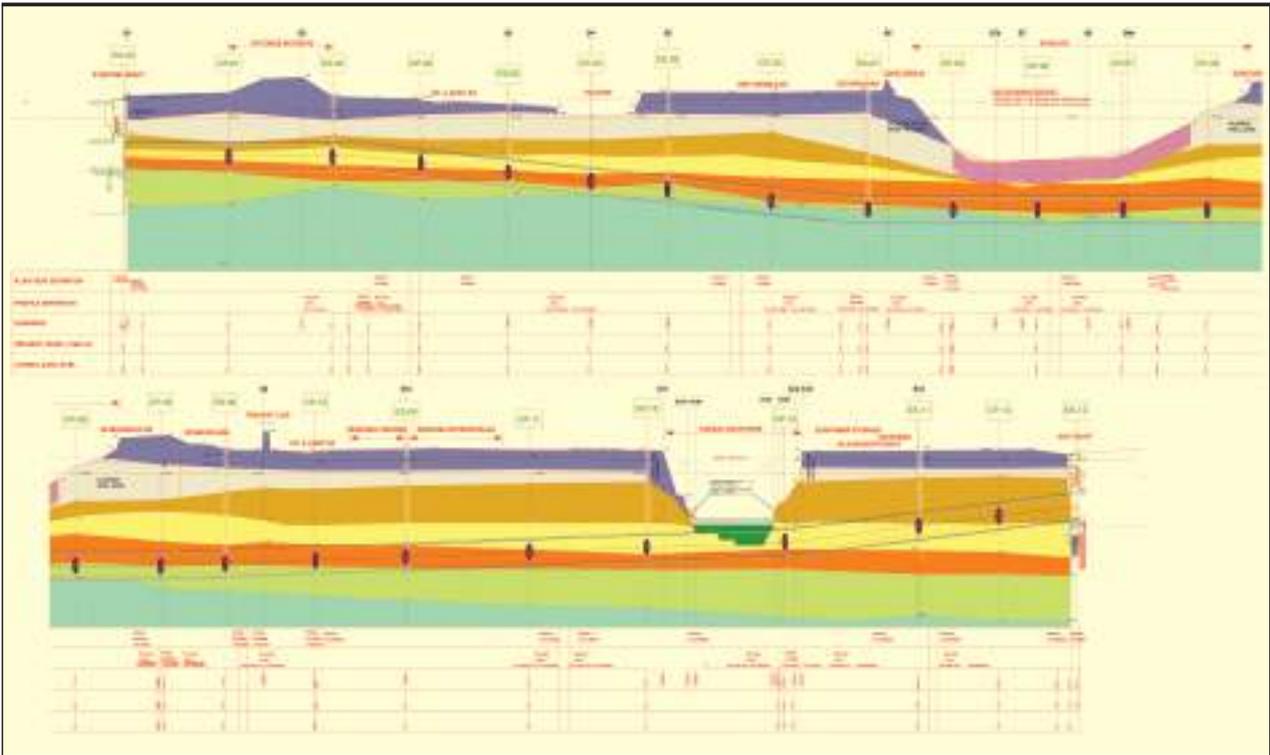


FIGURA 18. Perfil longitudinal del Túnel Liefkenshoek con la ubicación de las secciones y la estratigrafía principal.

3.3. TÚNEL DE LIEFKENSHOEK EN BÉLGICA

El túnel ferroviario Liefkenshoek fue diseñado para crear una nueva conexión para el transporte rápido de mercancías y contenedores entre el este y el oeste del puerto de Amberes en el norte de Bélgica.

Para este proyecto, por las mismas razones que el anterior, hemos optado por la salmuera de congelación.

En la Figura 18 podemos ver la sección longitudinal de una de las dos galerías, con indicación de las capas principales y la posición de las secciones congeladas.

Los dos túneles de ferrocarril, construidos utilizando una TBM con lodos bentoníticos con un diámetro de 8,10 m de excavación, tienen una longitud total de 6.000 m. Los dos túneles pasan bajo dos canales navegables y el río Escalda. El pro-

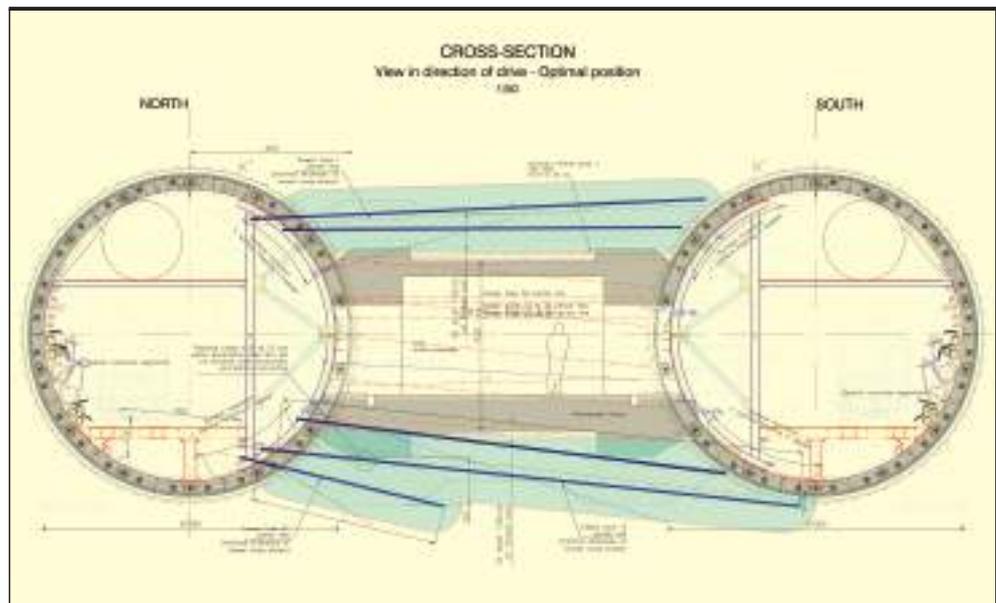


FIGURA 19. Sección longitudinal de una galería transversal entre túneles.



FIGURA 20. Sondas de perforación en el túnel.

yecto contempla la construcción de 13 galerías transversales y 10 pozos de emergencia. Las 13 galerías y dos de los pozos de emergencia, se realizaron mediante la técnica de congelación de la salmuera.

Los suelos son de arena fina, ligeramete limosa. Las secciones más profundas de los pasos cruzados interceptan un estrato de arcilla (perfil de color azul). La carga hidráulica en los pasos cruzados es entre 20 y 40 metros.

En Figura 19 se muestra una sección longitudinal de una galería con algunas perforaciones y la geometría de la estructura congelada. Para este trabajo, a diferencia del caso anterior, estaban obligados a estudiar la construcción de una particular estructura de apoyo y movimiento de la sonda de perforación, que permitiera ocupar sólo la mitad del túnel y perforar sin molestar al tráfico rodado en el lado opuesto del mismo.

En la Figura 20 se puede ver la sonda montada en un mástil vertical que permite perforar en las dos vías dejando paso libre en la segunda mitad del túnel. El equipo de la sonda tiene 4,5 metros de largo para poder moverse tanto horizontalmente como a lo largo del túnel, y verticalmente a lo largo de toda la altura de la perforación, con el mástil vertical. La sonda también puede rotar y moverse transversalmente con el fin de llegar a todas las posiciones de las perforaciones a lo largo del perfil curvo del túnel.

Después de la instalación de los taladros de una sección transversal, la estructura de soporte y movimiento de la sonda de perforación fue desmontada y vuelta a montar en el cruce para realizar el paso siguiente.

Una vez más, todos los puntos de perforación situados bajo nivel freático, se realizaron con la protección del preventer. Cabe destacar que tanto en este proyecto, así como en el pasado, nunca se verificó la pérdida por los circuitos de salmuera fría.

Para este proyecto hemos utilizado hasta cuatro contenedores de refrigeración eléctricos, fijos en los dos túneles principales y dos plantas móviles. Las plantas tenían una capacidad de refrigeración de entre 200 y 300 Kw, cada una. Los sistemas móviles pueden ser fácilmente trasladados de un punto a otro del cruce.

En la Figura 21 se puede ver el circuito de distribución montado en una galería transversal, junto con la estructura de refuerzo del túnel principal.



FIGURA 21. Vista del circuito de distribución montado en una galería transversal, junto con la estructura de refuerzo del túnel principal.

Datos principales de la obra:

- 13 galerías transversales y dos enlaces con pozos de seguridad.
- 5.500 m de perforación de la galería, 740 taladros en total.
- 640 sondas congeladoras \varnothing 89 mm de longitud total: 4.800 m.
- 60 termómetros. Longitud total 370 m con 380 puntos de medición.
- Volumen total de suelo congelado: 3.650 m³.
- 4 plantas de salmuera 200 a 300 Kw, cada una.
- Valor final del contrato 5,6 millones euros.

4. CONCLUSIONES

La tecnología de la congelación puede ser considerada como una de las técnicas de tratamiento del suelo menos utilizada y poco difundida.

En condiciones hidrogeológicas difíciles y en presencia de estructuras sensibles esta tecnología se puede considerar dentro de las menos arriesgadas para el entorno.

En condiciones extremas se convierte en una opción muy apropiada.

Sin duda es menos invasiva que otras técnicas ya que no requiere la introducción en el suelo de grandes volúmenes de elementos o sustancias más o menos agresivas.

Por lo tanto, parece considerarse una técnica limpia.

El cuidado de la calidad de los materiales y una buena dosis de experiencia y know-how son los ingredientes esenciales para intervenciones con éxito.

5. BIBLIOGRAFÍA

F.J. SANGER F.H. SAYLES 1979 "Thermal and rheological computations for artificially frozen ground construction" *Engineering Geology* 13:311-337.

HANS L. JESSBERGER 1991 "Soil Freezing" *Proceedings of Soil and Rock improvement in underground works* Milano Società Italiana Gallerie.

F. GALLAVRESI 1981 "Il congelamento del suolo nell'ingegneria civile" *Politecnico di Torino Istituto di scienza delle costruzioni X Ciclo di conferenze*.



Puertos al
servicio de todos

PALMA · ALCÚDIA · MAÓ · EIVISSA · LA SAVINA

Los puertos gestionados por la Autoridad Portuaria de Baleares ofrecen las mejores conexiones regulares con el continente y son la principal puerta de entrada para el abastecimiento de las islas.



Ports de Balears



www.portsdebalears.com

Autoritat Portuària de Balears