CONGELACIÓN DEL TERRENO PARA EJECUCIÓN DE TÚNELES BAJO "CUT-AND-COVER" EXISTENTE EN EL METRO DE VARSOVIA

EDUARDO MANZANO ARROYO
ITOP. Máster en Mecánica del Suelo
Director de Desarrollo Técnico
Grupo Terratest

1- Introducción

La técnica de congelación del terreno, como su propio nombre indica, consiste en hacer bajar la temperatura del suelo de forma artificial hasta que el agua presente en sus poros se convierte en hielo y mantener esta situación durante las actividades para las que se precisa, generalmente contenciones o excavaciones subterráneas, hasta que un sostenimiento definitivo pasa a asumir la responsabilidad estructural y de impermeabilización temporalmente asumida por la masa de terreno congelado.

Se puede aplicar en prácticamente cualesquiera condiciones del suelo, independientemente de su permeabilidad y el tamaño de sus partículas, para aumentar su resistencia, rigidez e impermeabilidad. No obstante, son los suelos con un grado de saturación elevado, o directamente bajo el nivel freático, los más susceptibles de ser tratados con esta técnica; para los no saturados puede ser precisa una aportación de agua inicial, así como durante el proceso de congelación, pero en ausencia de presión freática la impermeabilización temporal no es necesaria y suelen resultar más competitivas otras técnicas de mejora.

Cuando se utiliza la congelación del terreno como refuerzo temporal de la estructura del suelo y como método de impermeabilización, se aprovechan las características físicas del medio y de su agua intersticial, sin apenas cambiarlas y sin aportación de agentes químicos ni otros componentes ajenos al propio suelo, para mejorar transitoriamente las propiedades del conjunto, convirtiendo esta técnica en una buena alternativa de mejora de suelos en obras geotécnicas complejas, incluso más competitiva que las inyecciones en suelos finos y muy finos.

Sólo la existencia de fuentes de calor importantes o que el agua esté en movimiento (principal fuente de calor) con corrientes de más de 1.5-2.0 metros/día suponen un impedimento o merma importante en el rendimiento de esta técnica. Por otro lado, si el volumen de terreno a tratar es importante en sus tres dimensiones, el incremento de volumen que sufre el agua al helarse (hinchamiento) y su decremento al descongelar (posibles asientos), así como la ligera pérdida de capacidad post-congelación (más acusada en suelos blandos), son aspectos a tener en consideración como condicionantes de la aplicabilidad de esta técnica, aunque en general no son limitativos ya que sólo son significativos para grandes volúmenes y lo habitual es generar estructuras tipo muro, de poco espesor.

En general, la congelación se consigue mediante un sistema de conducciones que en el terreno consta de tuberías dobles (una exterior de perforación y retorno, y otra interior de alimentación, para circulación directa), colocadas en las zonas a congelar mediante perforación (con técnicas de sondaje o micropilotaje), por las que se hace pasar un fluido refrigerante que intercambia calor con el terreno y el agua. Una vez se inicia la congelación alrededor de las conducciones, el espesor de la capa congelada va

aumentando hasta que toma contacto con el cilindro de hielo que del mismo modo se va formando en las conducciones adyacentes, y así se va conformando una pared de suelo congelado si las tuberías están dispuestas formando un plano (pantalla, sostenimiento provisional de un túnel), o un volumen tratado si el conjunto de tuberías sigue una disposición tridimensional (tapón de fondo). Sobre esta base, los diferentes métodos de congelación se diferencian en el tipo de refrigerante, en si se precisa unidad de refrigeración externa para mantener frío el refrigerante, y en la configuración del sistema de tuberías que se requiere en cada caso.

En este proyecto se emplearon los dos métodos de congelación que se suelen aplicar: el sistema abierto, con nitrógeno líquido, utilizado en la fase de congelación inicial (fase activa), y el sistema cerrado, con salmuera, para la fase de mantenimiento (fase pasiva), constituyendo el denominado sistema mixto. El sistema cerrado también se utilizó la fase inicial de las zonas en la que no era precisa una congelación rápida.

2. Sistema abierto. Nitrógeno líquido

El sistema abierto (figura 1) consiste en inyectar por las tuberías un refrigerante líquido (gases licuados como el nitrógeno, el más habitual, u otros como dióxido de carbono o propano) que al hervir y subir de temperatura enfría rápidamente su entorno al ir avanzando por las conducciones, y es liberado a la atmósfera por el otro extremo del sistema de conducción, de ahí su denominación de circuito abierto.

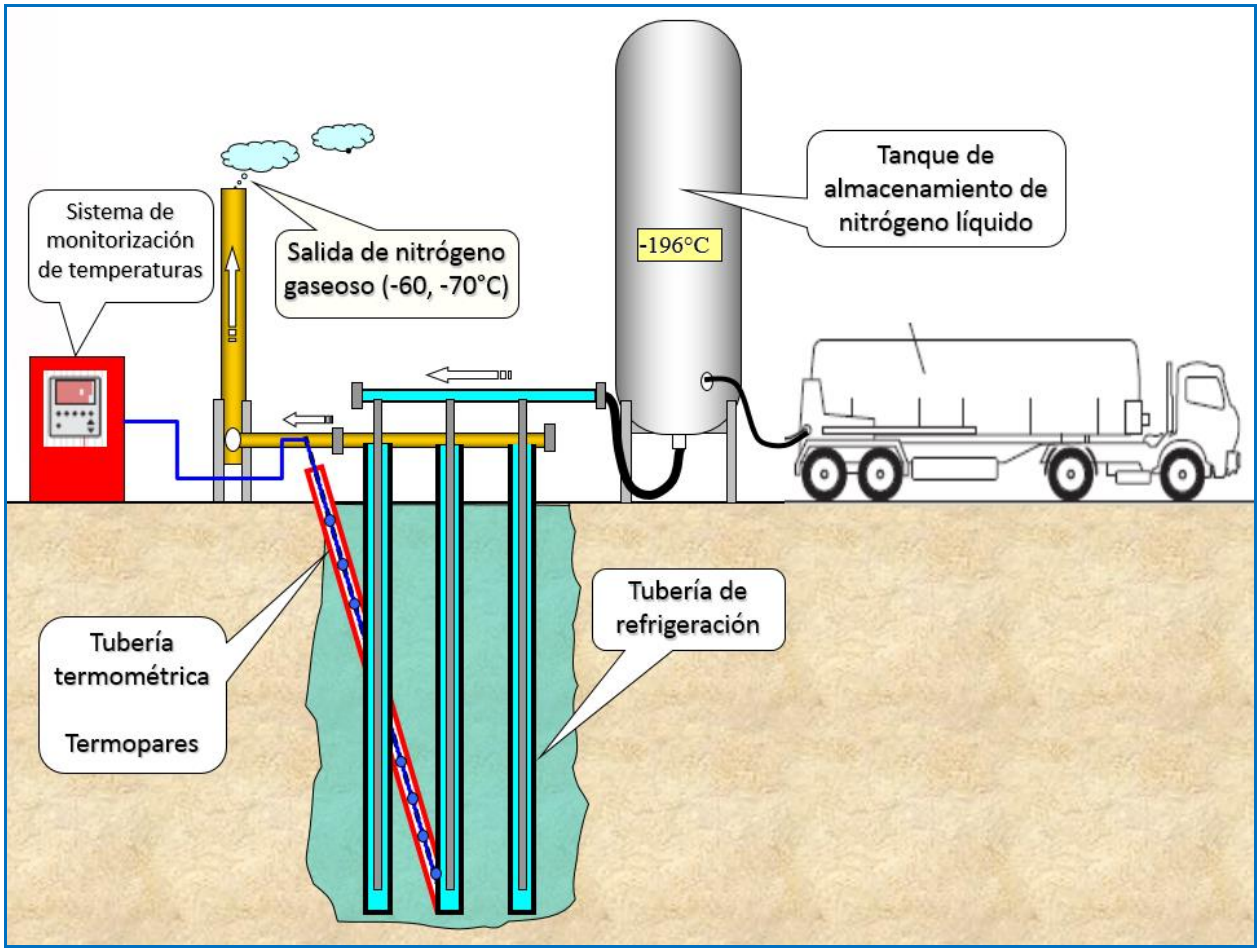

Figura 1. Sistema abierto. Nitrógeno líquido

El nitrógeno líquido se obtiene mediante destilación fraccionada del aire licuado (compuesto en su mayoría por nitrógeno) y se transporta en tanques especiales donde se mantiene a una temperatura de -196º C (punto de ebullición del nitrógeno a presión atmosférica) y a una presión de unos 2-3 bares. Ya en obra, el nitrógeno líquido se almacena en tanques de doble chapa con aislamiento por vacío en los que mantiene sus propiedades físicas hasta el momento de su utilización (figura 2).

Figura 2. Tanques de nitrógeno líquido y salida de nitrógeno gas a la atmósfera

La elevada eficiencia criogénica del nitrógeno líquido permite la rápida formación de una estructura de terreno congelado en sólo 5-10 días, dependiendo de las condiciones del suelo y de la separación entre tuberías, así como de la posible corriente del agua freática. La capacidad criogénica del nitrógeno líquido es de 39 Kcal/l, por su calor latente de evaporación (a -196º C), y de 27 Kcal/l por su calor específico al subir desde esa temperatura hasta unos -60º C a los que el gas se libera a la atmósfera.

Aunque este sistema requiere poca aportación de energía para la circulación del refrigerante, ya que el fluido se ve impulsado por la presión con la que está almacenado, y no se necesita unidad de refrigeración exterior, el consumo del mismo es elevado y también lo es su precio, haciendo que este sistema sólo sea competitivo cuando se requiere gran velocidad en la congelación inicial o existe corriente de agua que exige una elevada capacidad criogénica, pudiendo ser sustituido por otro sistema en la fase de mantenimiento, o para pequeños proyectos de corta duración.

3. Sistema cerrado. Salmuera de $CaCl_2$

En el sistema cerrado el refrigerante no se libera, sino que circula por las tuberías enfriando el terreno y elevando su temperatura, y es recuperado y vuelto a enfriar en un equipo frigorífico exterior (figura 3). Esta unidad de refrigeración primaria suele ser una planta frigorífica de amoniaco, que se condensa y enfría mediante compresión y, para elevar su temperatura y evaporarse, en un intercambiador de calor absorbe la energía del circuito de refrigeración secundaria, el que se instala en el terreno (figura 4).

Figura 3. Unidad de refrigeración primaria

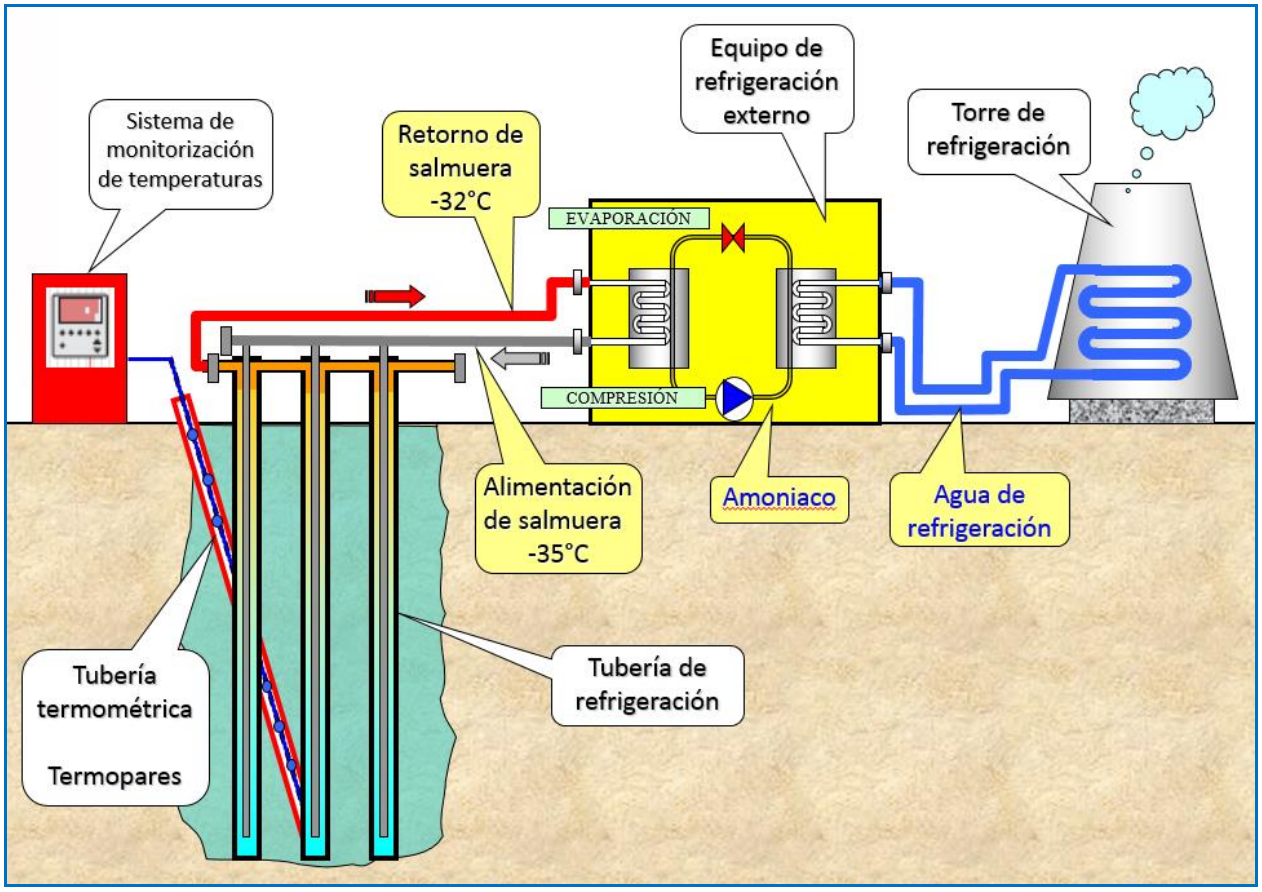

Figura 4. Sistema cerrado. Salmuera de $CaCl_2$ y refrigeración con amoniaco

El fluido refrigerante secundario que circula por este circuito suele ser una disolución concentrada de cloruro cálcico en agua (salmuera); controlando la concentración salina de la solución se regula su temperatura de fusión, que puede bajarse hasta unos -50º C con concentraciones del orden del 30%. Su calor específico es superior a 0.6 Kcal/l ºC y es un producto económico y mucho menos corrosivo que la sal común, lo que redunda en su amplio uso como refrigerante. Aunque este sistema requiere más energía eléctrica, tanto para el funcionamiento de la planta de refrigeración primaria como para el bombeo de la salmuera, el consumo de fungibles es mínimo y el coste del conjunto mucho menor al del sistema abierto.

A diferencia del nitrógeno, que se inyecta a muy baja temperatura (-196º C) y se libera a una temperatura todavía baja (-60 a -70º C) y en ese salto térmico absorbe mucha energía del terreno, de ahí su rapidez, la salmuera entra en el sistema a una temperatura de unos -35º C, siendo más lenta la formación de columnas de terreno congelado, y sale de él a una temperatura que se controla con el caudal y que va bajando durante la fase de inicial para situarse en torno a -32º C durante la fase de mantenimiento.

Un requisito de vital importancia para el éxito del sistema cerrado con salmuera es la absoluta estanqueidad del circuito, puesto que en caso de fugas al terreno aumentaría su salinidad y se reduciría la temperatura de fusión del agua intersticial, lo que daría como resultado una ralentización de la congelación y una merma de la resistencia, pudiendo verse comprometida la solución. Por ello, antes de comenzar con el proceso, siempre ha de realizarse una prueba de estanqueidad con agua a presión controlada que permita verificar la ausencia de pérdidas.

4. Diferencias en el resultado

Las diferencias en la configuración del sistema y principalmente las diferentes temperaturas a las que operan los fluidos refrigerantes encargados de la congelación del terreno (nitrógeno o salmuera) se traducen en una mayor o menor velocidad de formación de columnas de suelo tratado, así como en una mayor o menor afección de las corrientes de agua presentes en el medio. Así, en la figura 5, aparecen correlacionadas las separaciones entre ejes de las tuberías de refrigeración más habituales con el tiempo medio necesario para formar una estructura de suelo congelado geométricamente determinada por la disposición espacial de las mismas.

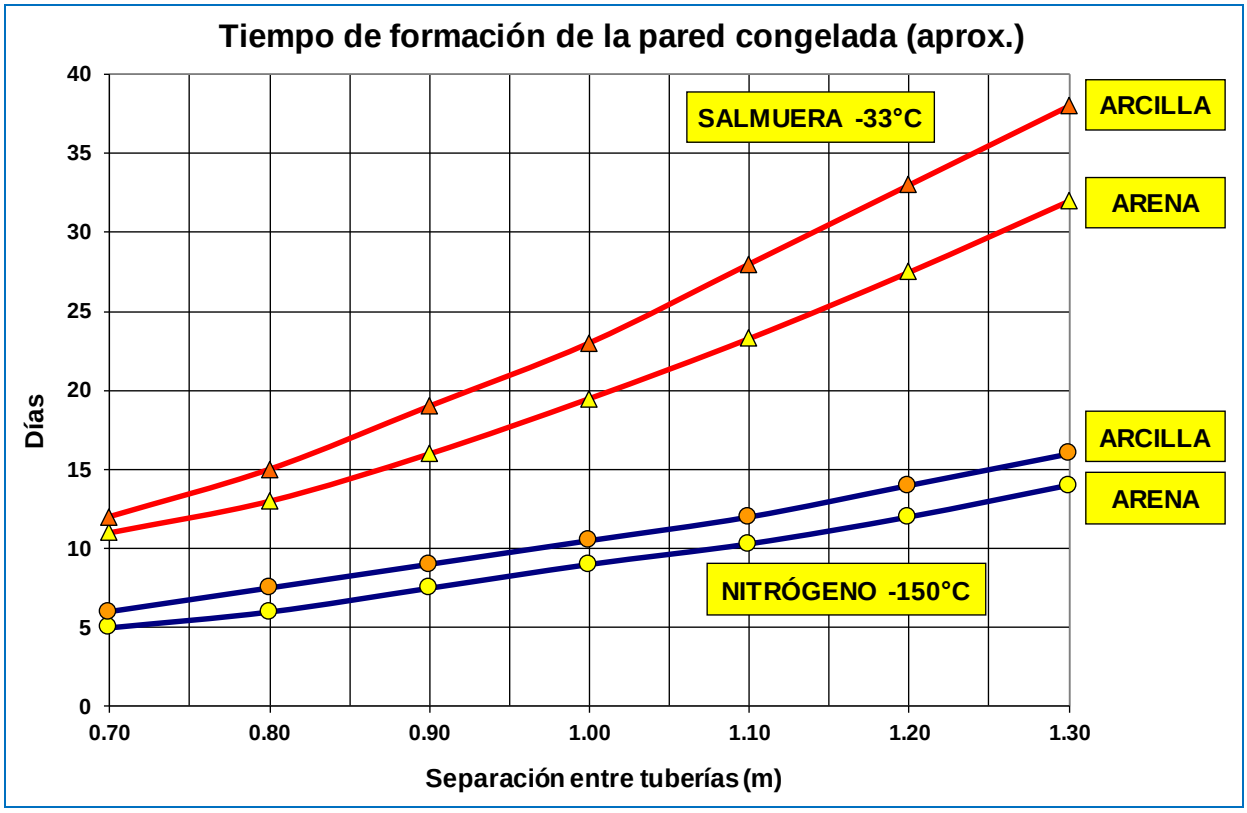

Figura 5. Separación entre tuberías vs tiempo de congelación

Puede apreciarse que el tiempo para conseguir un mismo resultado con sistema cerrado y salmuera al menos duplica el necesario con sistema abierto y nitrógeno líquido, y la tendencia se acentúa conforme se aumenta la separación entre tuberías. Esta figura también pone de manifiesto que los tiempos de congelación en suelos arcillosos son superiores a los requeridos en suelos granulares. Esto se debe, por un lado, a la menor conductividad térmica de las arcillas, y por otro a la vinculación molecular que se produce entre sus minerales y el agua, efecto similar al producido por las sales en disolución; en los suelos granulares, el agua presente en los poros se congela con rapidez una vez su temperatura baja de los cero grados; en arcillas ocurre lo mismo con el agua libre, pero el agua adsorbida requiere temperaturas menores y ha de bajarse de -20º C para obtener una congelación completa.

En cuanto al efecto de la corriente de agua, se observa en la figura 6 que el sistema cerrado con salmuera, por su mayor temperatura, precisa de unas condiciones bastante estáticas del agua intersticial, y para corrientes con una velocidad superior a 2 m/día la separación entre tuberías sería tan pequeña que haría la solución de congelación inviable o exageradamente costosa. Con nitrógeno líquido la velocidad crítica por encima de la que no sería posible la congelación es muy superior, y con separaciones pequeñas, aunque a un coste elevado, podría utilizarse la congelación como medida de urgencia para frenar filtraciones en excavaciones subterráneas que permita implementar medidas de impermeabilización definitiva.

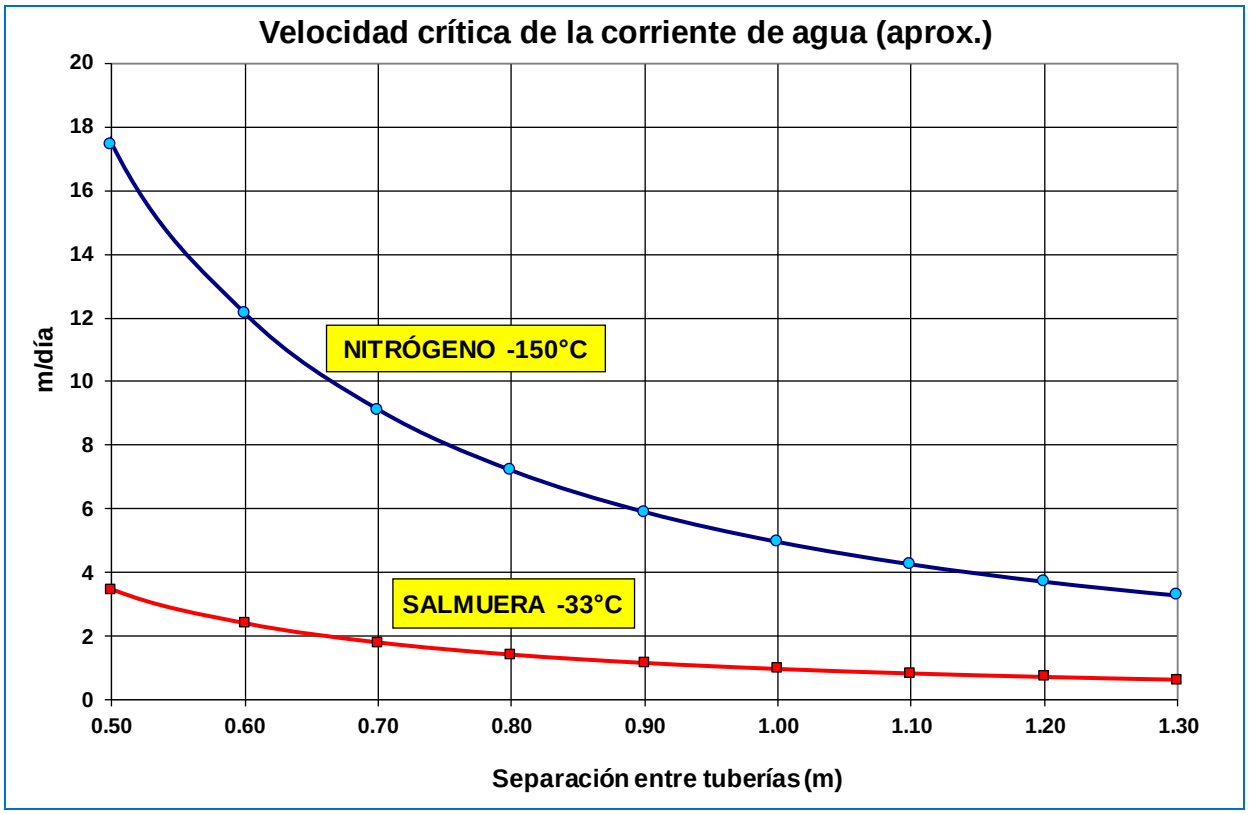

Figura 6. Separación entre tuberías vs velocidad crítica limitante para la congelación

Otra diferencia en el resultado es la resistencia a compresión simple del suelo tratado, que del mismo modo que en el hielo puro, crece conforme la temperatura baja, por lo que con el sistema abierto pueden conseguirse resistencias del terreno tratado superiores, aunque a un coste muy elevado, y hay que tener en cuenta que esa resistencia también es dependiente del tiempo, bajando en pocas horas hasta del orden de la tercera parte, y la deformabilidad es de tipo visco-plástico, con una acusada fluencia bajo carga (especialmente cerca de la temperatura de fusión y bajo tensiones elevadas), por lo que el uso del sistema abierto durante la fase de mantenimiento no es habitual salvo en pequeñas actuaciones y de corta duración.

5. Descripción general del proyecto

La línea 2 del Metro de Varsovia, con una longitud total prevista de unos 32 Km, es uno de los proyectos de infraestructura más significativos actualmente en ejecución en Polonia. Esta nueva línea, que está siendo construida por la Autoridad Municipal del Transporte de Varsovia (Zarząd Transportu Miejskiego, ZTM), atraviesa la ciudad desde las afueras de este a oeste, y corta la línea 1 en la céntrica estación de Świętokrzyska (figura 7).

La línea está dividida en varios tramos constructivos, y su ejecución se inició en a finales de 2009 comenzando por el tramo central, de unos 6.5 Km y totalmente subterráneo, que pasa por las estaciones Rondo Daszyńskiego, Rondo ONZ, Świętokrzyska, Nowy Świat-Uniwersytet, Centrum Nauki Kopernik, Stadion Narodowy, y Dworzec Wileński (siete en total, de oeste a este). El contrato para el diseño y la construcción de este tramo fue adjudicado al consorcio AGP Metro Polska, liderado por la constructora italiana Astaldi, y participado también por Gülermak (Turquía) y PBDiM (Polonia), por una suma aproximada de 960 millones de euros, cofinanciados en buena parte con fondos europeos (figura 7).

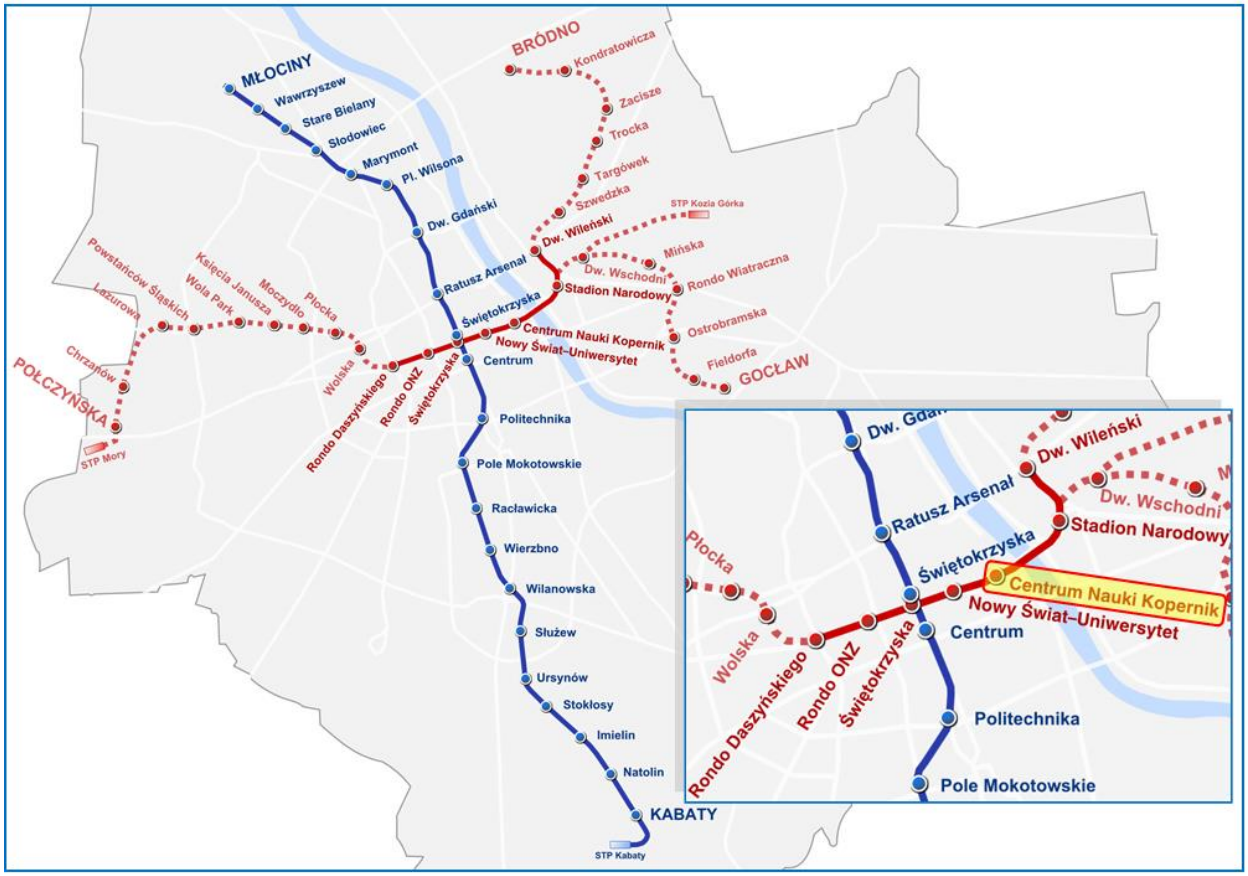

Figura 7. Plano del metro de Varsovia. Tramo central de línea 2. Estación del proyecto

Con sus dos túneles gemelos de 5.4 metros de diámetro interior, el tramo pasa por debajo de varias estructuras sensibles, pero el hito más significativo se produce en la estación Centrum Nauki Kopernik (denominada Powiśle C13 durante su construcción), junto a la orilla oeste del río Vístula. Dan forma a esta estación el pozo de extracción este, al que llegaban las dos tuneladoras que perforaban bajo el río desde su margen oriental, el pozo de extracción oeste, al que llegaban las tuneladoras procedentes del centro de Varsovia, y tres túneles en mina de 18 metros de longitud que conectan los pozos siguiendo la alineación de la traza, dos laterales de 9.5 metros de diámetro para el tránsito de los trenes y parte del andén, y uno central para el resto del andén único entre los dos sentidos de circulación.

La singularidad de esta estación, que condicionaba su diseño y el procedimiento constructivo para su ejecución, era la posición del túnel Wisłostrada, construido mediante el sistema “cut-and-cover” en los años setenta como parte de la carretera que cruza Varsovia de norte a sur siguiendo la orilla occidental del

río. Este falso túnel queda ubicado entre los dos pozos y bajo él debían pasar los túneles mineros de la estación con una cobertera de apenas 8 metros entre la clave y la rasante de la calzada, interceptando con su trayectoria la pantalla central del falso túnel y pasando poco por debajo de sus pantallas hastiales, menos profundas (figura 8).

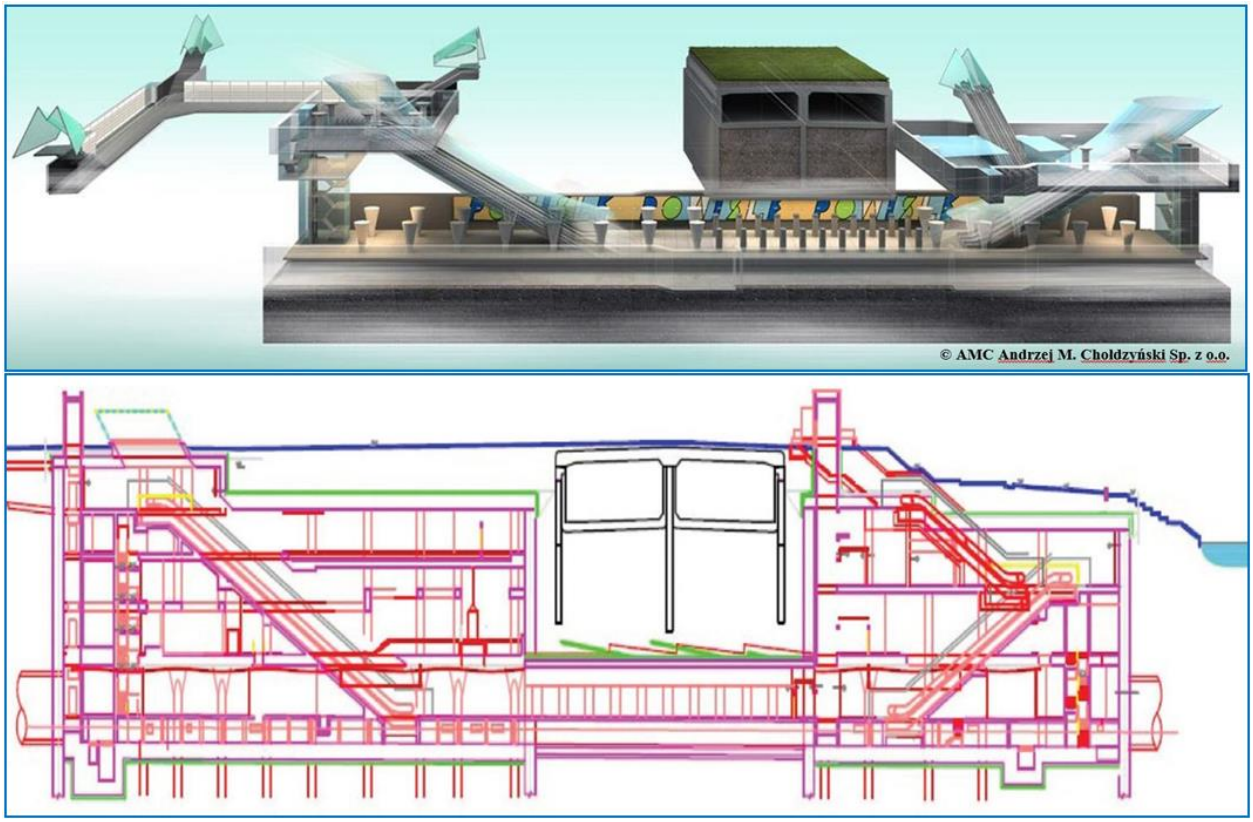

Figura 8. Renderizado del diseño de la estación y sección longitudinal de proyecto

Estos tres túneles a ejecutar en mina (por su corta longitud y por ser adyacentes no podían ejecutarse de otra forma) se convirtieron en la actuación más crítica de todo el tramo por el fracaso de repetidos intentos de tratamiento (inyecciones, jet-grouting y paraguas de micropilotes) para conferir al terreno suficiente capacidad e impermeabilidad, siendo el siniestro más significativo el ocurrido a mediados de agosto de 2012 cuando, pocos metros después del comienzo de la excavación del túnel norte, miles de metros cúbicos de agua y arena se abrieron paso hacia el interior del pozo oeste, finalmente inundado, obligando al corte del túnel Wisłostrada durante varios meses para el relleno de una gran cavidad que se formó bajo su solera (figura 9). El elevado nivel freático, la presencia de rellenos artificiales muy variables, y de otros elementos antrópicos como plásticos, hormigón, tuberías de acero y restos de lechadas de inyección añadían complejidad a esta actuación.

Figura 9. Antes, después y tras pocas semanas del incidente de 2012 (tvnwarszawa.tvn24.pl)

6. Características geotécnicas de la obra

La investigación geotécnica para caracterizar los terrenos comprendía fundamentalmente ensayos SPT, CPT y el registro de parámetros de perforación, complementados con ensayos de laboratorio y el conocimiento previo de los terrenos con el que se suele contar en las grandes ciudades. Las prospecciones confirmaron una compleja estratigrafía de distintas deposiciones sedimentarias asociadas al río empeorada por los materiales de relleno del colapso antes descrito, así como los de la realización de los tratamientos del terreno previos y posteriores al mismo.

En la parte superior del perfil estratigráfico, bajo los rellenos superficiales, aparecía una capa de arenas medias a gruesas con un espesor medio de unos 5 metros, que se volvían más finas y limosas hasta unos 10 metros de profundidad bajo la rasante del túnel Wisłostrada, encontrándose una capa limosa con contenido variable de arena hasta los 13 metros de media. Por debajo, en transición al sustrato de arcillas firmes que aparecía a unos 18 metros en el que quedaban apoyados los túneles, una capa de arcillas limosas plásticas de consistencia media. El nivel freático, asociado al Vístula, quedaba aproximadamente 2 metros bajo la rasante, dejando los túneles a construir bajo una columna de agua de entre 10 y 20 metros (figura 10).

El diseño de los nuevos túneles ubicaba la bóveda y la parte superior de los hastiales en las capas arenosas y arenolimosas, mientras que su tercio inferior y la contrabóveda quedaban en la arcilla.

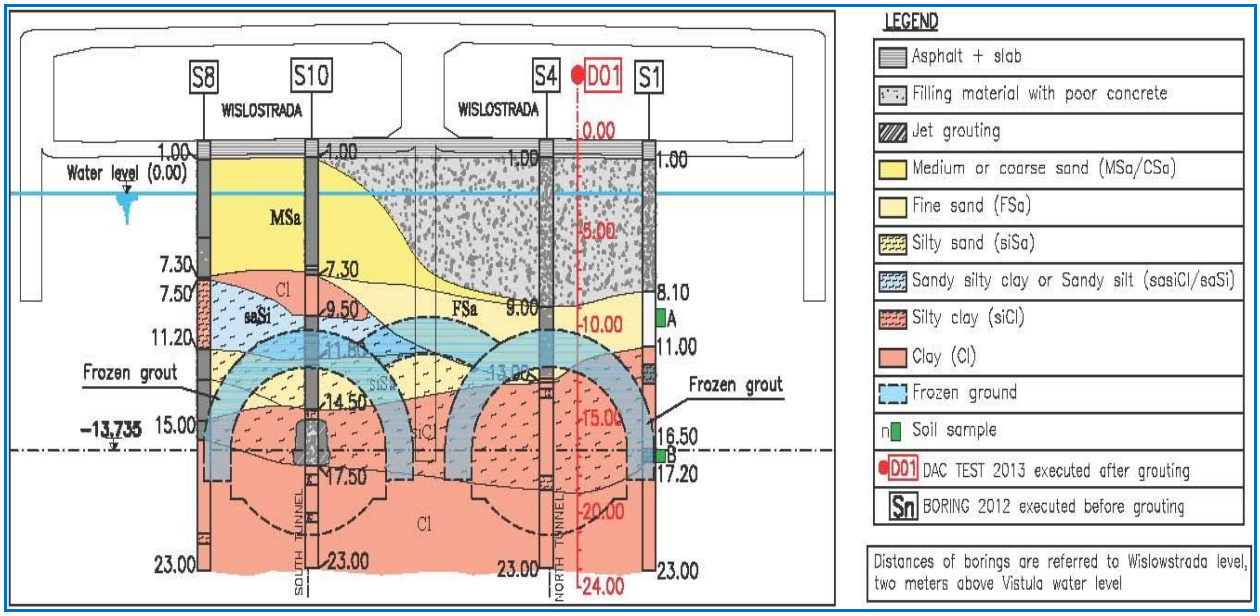

Figura 10. Sección geotécnica (sección del falso túnel Wisłostrada girada con fines ilustrativos)

7. Descripción general de la solución

Para asegurar la excavación de los túneles, por la falta de confianza en las técnicas de inyección y paraguas habituales en su construcción, en especial después de los graves problemas derivados del colapso ocurrido en 2012, la ingeniería del proyecto decidió finalmente recurrir a la congelación del terreno para crear una coraza impermeable y suficientemente resistente en las capas de arenas finas limosas y limos que apoyaban en el sustrato arcilloso, penetrando al menos 2 metros en las arcillas, ya que su reducida permeabilidad y competencia permitían resistir las tensiones originadas por la excavación sin necesidad de tratamiento (figuras 10, 11 y 12).

El diseño incluía, además de la coraza para la excavación de los túneles, sendos muros de terreno congelado a cada lado de la pantalla central del túnel Wisłostrada para colaborar en su recalce temporal durante la ejecución de los trabajos, en especial tras la demolición parcial de esta pantalla para permitir el paso de los nuevos túneles a su través.

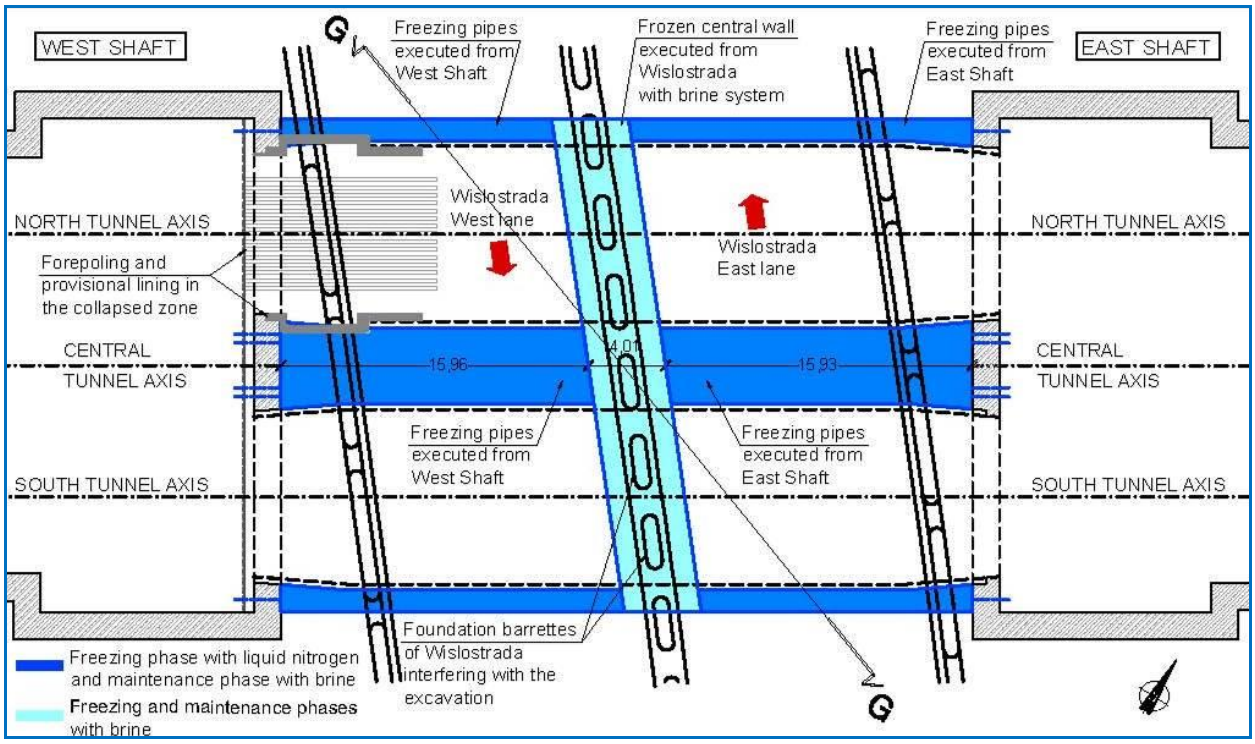

Figura 11. Planta

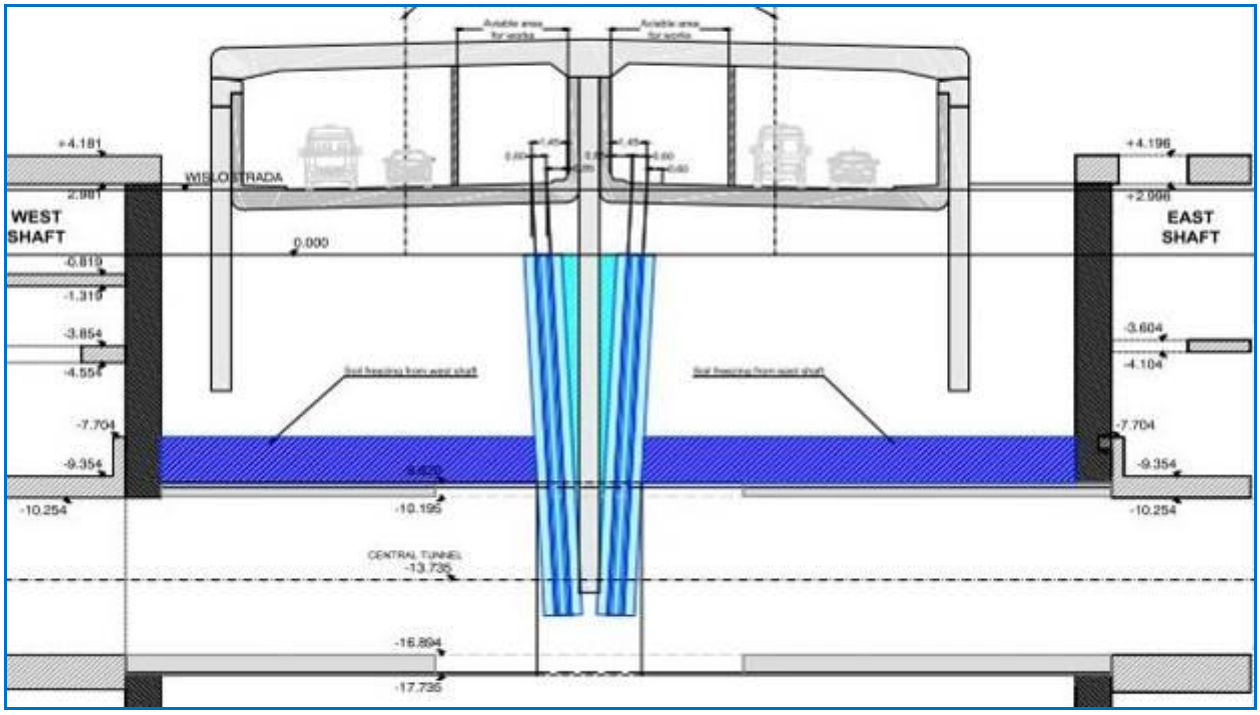

Figura 12. Perfil longitudinal

El contrato para la instalación y mantenimiento del sistema de congelación del terreno, por unos 6.9 millones de euros, fue adjudicado a la empresa RODIO GmbH, del Grupo Terratest, y la ejecución de los trabajos tuvo lugar entre los meses de octubre de 2013 y junio de 2014.

8. Ejecución de los trabajos

Ya desde la ingeniería de diseño se planteó la utilización del sistema abierto con nitrógeno líquido para congelar el suelo alrededor de los túneles (figura 13), que iban a ser excavados simultáneamente desde los cuatro frentes de los túneles laterales partiendo desde los pozos para llegar a la pantalla central del falso

túnel donde, tras su demolición, se producía el calado. Gracias a la rapidez con la que actúa este sistema, especialmente en los suelos granulares como los presentes sobre los túneles, el espesor requerido para la coraza, necesaria para poder comenzar con la excavación, se consiguió en un plazo excepcionalmente corto de aproximadamente 10 días.

Figura 13. Circuito de nitrógeno líquido en el interior de la estación

Una vez formada la costra de suelo congelado, se pasaba al sistema cerrado con salmuera de cloruro cálcico, mucho más económico, para mantenerla durante la excavación (sistema mixto). Para los muros congelados que se ejecutaban desde el interior del túnel Wisłostrada (figura 14), a cada lado del muro de separación de las dos calzadas, como se disponía de más tiempo hasta que el avance de las excavaciones llegase a su final, se optó por el sistema cerrado exclusivamente (ver figura 11).

Figura 14. Circuito de salmuera en el interior del túnel Wisłostrada

Por tanto, los trabajos se llevaron a cabo desde tres zonas separadas: una dentro del túnel Wisłostrada, desde donde se realizaron las perforaciones subverticales para la formación de los muros congelados de recalce (figura 15), y otras dos en los sendos pozos, desde los que las perforaciones, ejecutadas entre 9 y 18 metros bajo nivel freático y sometidas a la presión del agua, luego mediante el empleo de "blow out preventers", eran horizontales o subhorizontales (figura 16).

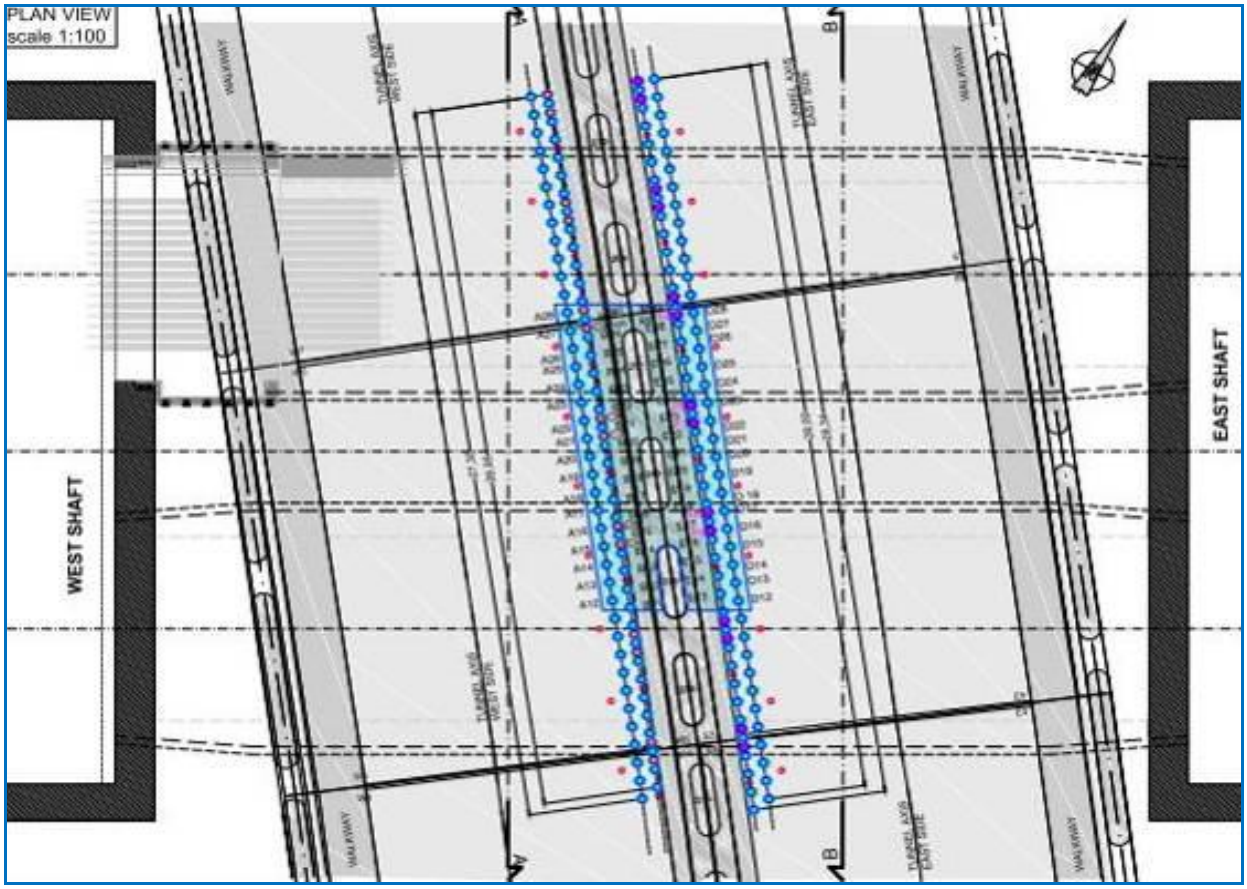

Figura 15. Detalle de disposición de tuberías desde el túnel Wisłostrada

Desde la primera zona se instalaron 189 tuberías dobles constituyentes del circuito de refrigeración y otras 34 tuberías termométricas, para un total de 3880 metros de perforación y tubería instalados. Desde los pozos, fueron 457 las perforaciones, 19 de ellas para tuberías termométricas, con una longitud de entre 5 y 19 metros, e inclinaciones desde la horizontal (la mayoría) hasta un ángulo de 34º, para una perforación total de 7370 metros.

La disposición tridimensional de las perforaciones desde los pozos debió adaptarse a los severos condicionantes de espacio debidos a la presencia de la losa intermedia de la estación (mezzanina) a una cota próxima a la clave de los túneles, lo que obligó a disponer las perforaciones a ambos lados de la losa y jugar con las inclinaciones para garantizar la continuidad de la coraza de terreno congelado (figura 16). En pos de esta continuidad, la tolerancia en la desviación de las perforaciones era muy estricta y su control un requisito, por lo que se realizaron mediciones inclinométricas en el 100% de las perforaciones con el sistema Maxibor (figura 17).

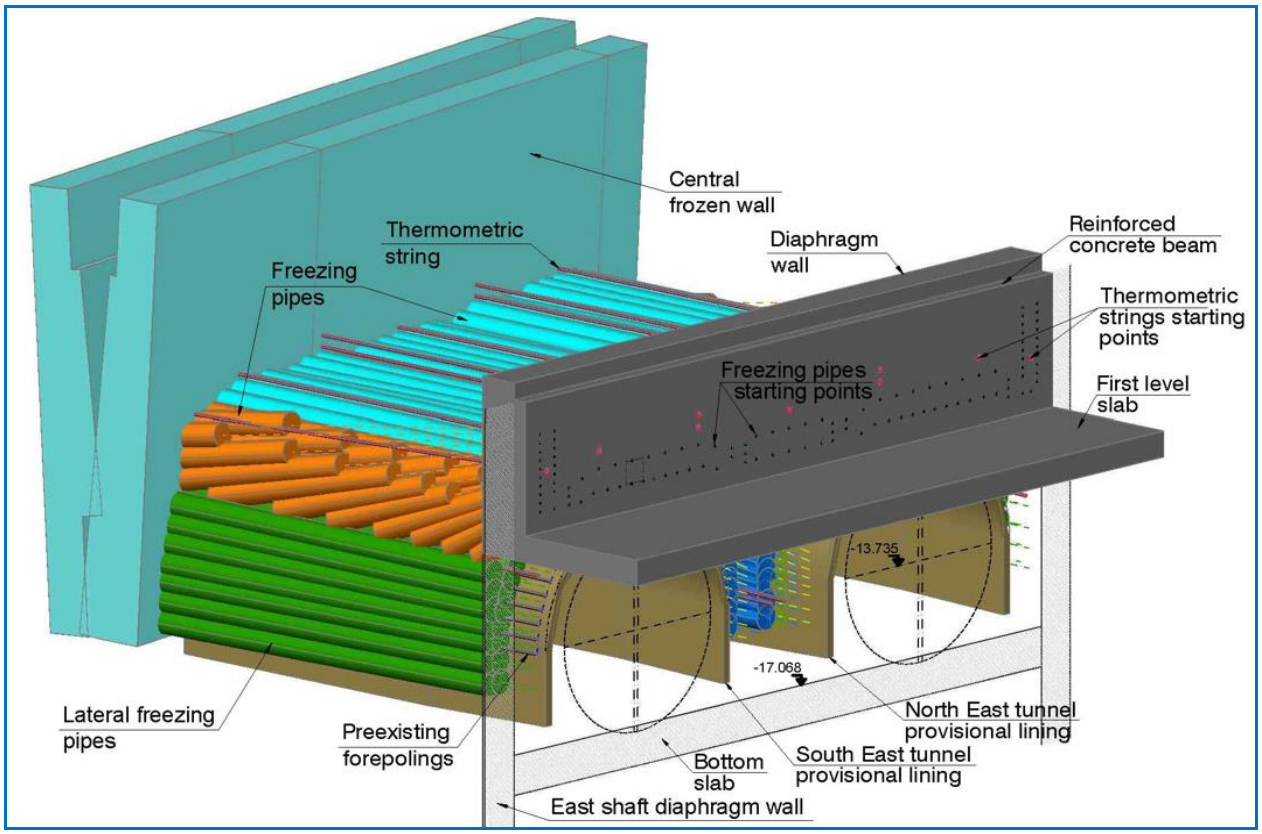

Figura 16. Disposición tridimensional de las perforaciones

Además, la heterogeneidad del terreno y la presencia de obstáculos como acero, bolos, madera, etc., obligaron a la instalación de algunas tuberías adicionales para evitar la posibilidad de que quedaran ventanas de terreno sin congelar. En total, estas tuberías adicionales supusieron menos de un 10% del total de la medición prevista en el diseño.

Después de la instalación de todas las tuberías de refrigeración y termométricas, de la verificación de la geometría de las perforaciones mediante Maxibor (figura 17), y de la comprobación con agua a presión de la estanqueidad de todas las conducciones y tuberías, la fase de congelación dio comienzo en diciembre de 2013.

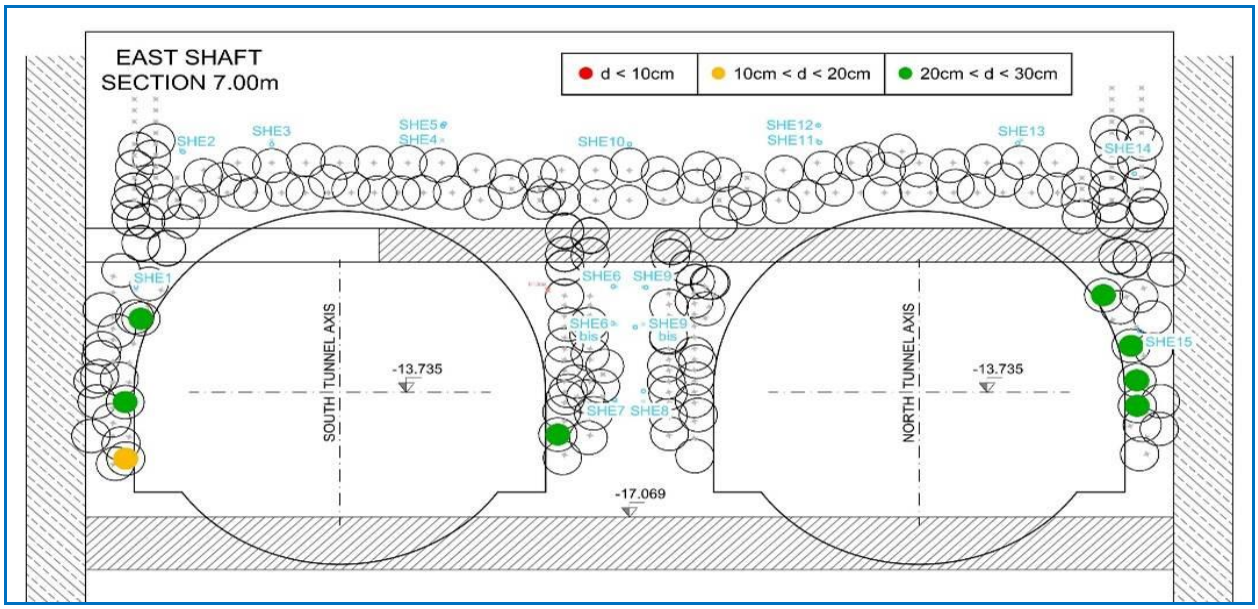

Figura 17. Desviaciones de las tuberías alrededor de los túneles

Como ya se ha indicado, para agilizar el comienzo de los trabajos de excavación de los túneles, esta fase se ejecutó usando nitrógeno líquido, para ser sustituido en la fase de mantenimiento por un circuito de salmuera que empleaba las mismas tuberías. La temperatura del suelo se llegó a bajar en la fase inicial hasta un rango de entre -40º C y -60º C, registrados en termómetros situados a 60 y 30 centímetros de la tubería de refrigeración más próxima. A partir de los datos de temperatura medidos en todos los sensores y de su correlación con la distancia a las tuberías se pudo estimar un espesor de la pared congelada de unos 1.80-2.00 metros.

El control de temperaturas en el suelo se llevaba a cabo mediante series de termopares introducidas en las tuberías termométricas, que estaban ubicadas en diferentes secciones y a distintas separaciones del eje de las tuberías de congelación para poder verificar con la máxima precisión posible el gradiente térmico en la masa de suelo. La temperatura del terreno, así como la de la salmuera a la entrada y a la salida de la unidad de refrigeración externa, y la del nitrógeno gaseoso a su salida se registraban de forma automática cada hora, y toda esa información se transmitía a una unidad central donde quedaba almacenada en una base de datos que podría visualizarse de forma gráfica y numérica en tiempo real a través de un sitio web con acceso al personal autorizado (figuras 18 y 19).

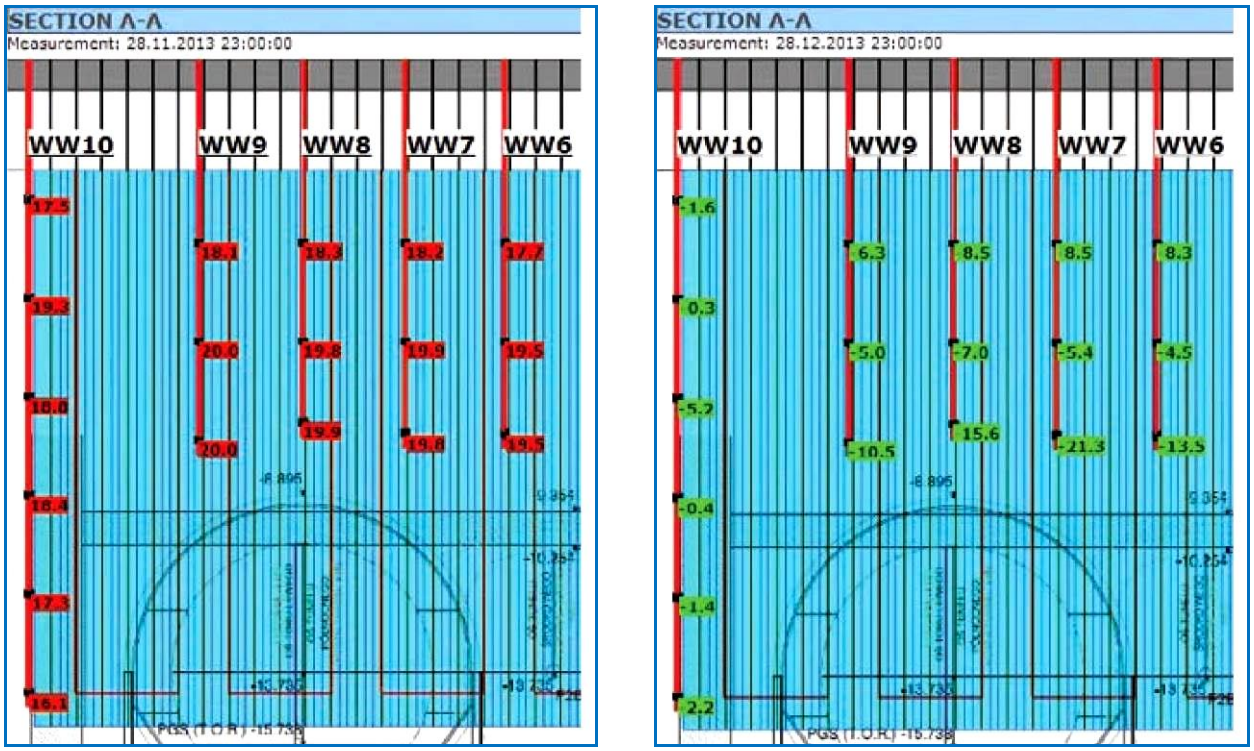

Figura 18. Ejemplos de visualización de temperaturas en muro central (bajo cero, en verde)

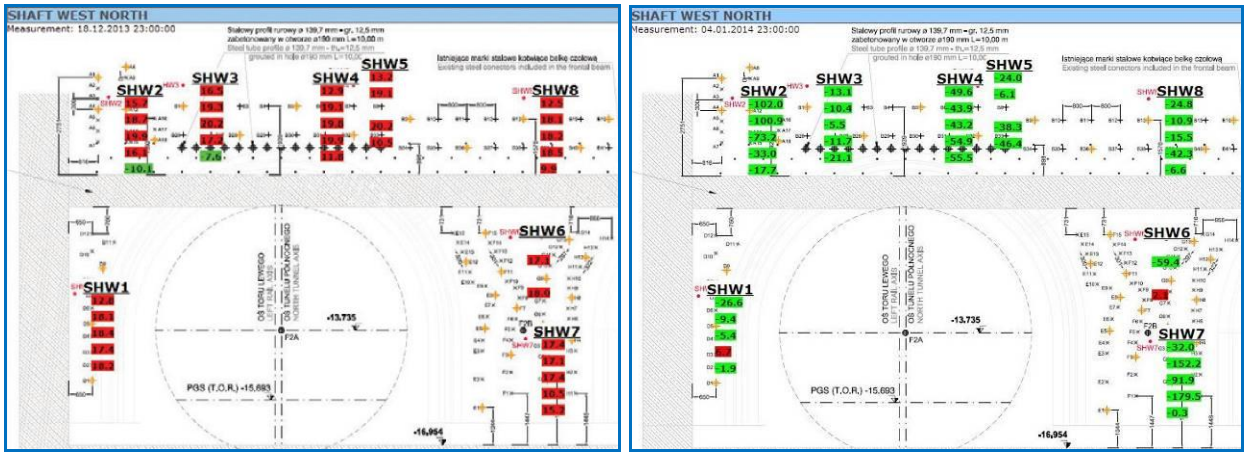

Figura 19. Ejemplos de visualización de temperaturas alrededor del túnel (bajo cero, en verde)

En febrero de 2014, después de la demolición de las pantallas de los pozos para permitir el comienzo de la excavación de los túneles, se procedió a la operación de cambio del sistema abierto por el cerrado y al llenado del circuito con salmuera. La excavación de los túneles se realizó mediante métodos convencionales (martillo hidráulico y rozadoras), calándose el túnel norte en marzo de ese año y el túnel sur pocos días después, ya en el mes de abril (figura 20). Durante toda la excavación las temperaturas registradas en el terreno se revisaban diariamente y se constataba que las zonas congeladas se mantenían estables sin variaciones significativas de las temperaturas medias del suelo.

Figura 20. Muro pantalla central del túnel Wisłostrada antes y durante el calado

9. Resumen y conclusiones

Después de varios intentos infructuosos de tratamiento del terreno con técnicas más habituales en la construcción de túneles, la ejecución de esta estación utilizando congelación del suelo en un espesor suficiente para que trabaje como sostenimiento provisional de la excavación resultó ser el único método efectivo.

La utilización combinada del sistema de congelación abierto con nitrógeno líquido y del sistema cerrado con salmuera de cloruro cálcico permite la rápida generación de una estructura de suelo congelado y su posterior mantenimiento a un menor coste.

El volumen total de suelo congelado fue de 2500 m^3 desde el interior del túnel Wisłostrada y de 2800 m^3 desde los pozos, 5300 m^3 en total.

Desde el punto de vista económico, la congelación puede ser competitiva frente técnicas de refuerzo estructural e impermeabilización mediante inyecciones en suelos finos y muy finos. En casos de geometría y/o geotécnica muy compleja o de interferencias con otras estructuras puede llegar a ser la única solución con garantías de éxito.

Desde el punto de vista medioambiental, la congelación del terreno es una técnica viable ya que no emplea agentes contaminantes ni aporta a los suelos materiales ajenos, sino que aprovecha su propia estructura y el agua que contienen.

Los tres túneles (el central no tuvo complicaciones adicionales ya que venía delimitado por los otros dos y una pequeña bóveda también construida al amparo de la coraza congelada) pudieron ser excavados en el plazo previsto al comienzo de los trabajos sin apenas afección al tráfico en el interior del túnel Wisłostrada, ya que sólo quedó ocupado uno de los tres carriles disponibles en cada sentido.

Por sus dimensiones, grado de dificultad (geometría y presencia de un falso túnel en servicio sobre los túneles a excavar), y combinación de sistemas, esta actuación es un buen ejemplo del campo de aplicación de esta técnica en general, y como caso de intervención en patologías y obras geotécnicas complejas, en particular, y fue el primer proyecto de congelación a gran escala ejecutado en Polonia.

10. Agradecimientos

El autor agradece a Filippo Mira-Catto, Director Técnico de RODIO Geotechnik AG (Suiza) y RODIO GmbH (Alemania) su gran colaboración y el suministro de la mayoría del material y los datos con el que ha elaborado esta ponencia. Por extensión, no puede dejar de mencionar a Piero Roberti, Director General de RODIO Suiza y Alemania cuando se llevaron a cabo los trabajos, a Achille Balossi y Andrea Pettinaroli (Studio Balossi, Milán), ingenieros del proyecto y activos colaboradores para el éxito de esta intervención de congelación del terreno, así como a todo el personal del consorcio AGP Metro Polska.

Bibliografía

(1) Jiménez Salas, J.A. (1980). Geotecnia y Cimientos III. Madrid: Editorial Rueda.

(2) Bell, F.G. (1993). Engineering Treatment of Soils. Londres: E & FN Spon.

(3) Harris, J.S. (1995). Ground Freezing in Practice. Londres: Thomas Telford.

(4) Purushothama Raj, P. (1999). Ground Improvement Techniques. Nueva Delhi: Laxmi Publications.

(5) Mullins, T. (2003). Permafrost and Frozen Ground Bibliography 1978-2003. Boulder, CO: NSIDC.

(6) Andersland, O.B., Ladanyi, B. (2004) Frozen Ground Engineering (2ª Ed). Hoboken, NY: Wiley.

(7) Metro Warszawskie. (2016). Raport Roczny/Annual Report 2015. Varsovia: Metro Warszawskie Sp. Z.o.o.

(8) Muzás Labad, F. (1980). Proyecto de muros cilíndricos circulares de suelo congelado. Disponible en: http://fernandomuzaslabad.com/4_archivos/Doc004.pdf [Recuperado el 8/02/2017]

(9) Muzás Labad, F., Morne-Barberá, F., Uriel, A. (1985). Cimentación para la rehabilitación de un edificio antiguo. Disponible en: http://fernandomuzaslabad.com/4_archivos/Doc003.pdf [Recuperado el 8/02/2017]

(10) Muzás Labad, F., Martín González, F. (1989). Trabajos llevados a cabo en la Estación Giorgeta del Suburbano de Valencia. Disponible en: http://www.fernandomuzaslabad.com/4_archivos/Doc008.pdf [Recuperado el 8/02/2017]

(11) Mira-Catto, F., Roberti, P. (2014). The mixed freeze of Warsaw. Tunnelling Journal Oct/Nov 2014, pp. 43-47.