

El tramo de San Bernardo: Un túnel en gravas en el Metro de Sevilla

Carlos Oteo Mazo; Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Catedrático J. de Ing. del Terreno

Juan de Dios Moreno Jimenez; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, (Ferrocarriles de la Junta de Andalucía)

Jesús Díez Fernández; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, (Concesionaria Metro de Sevilla S.A.)

Pedro Arozamena Cagigal; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, (GEOCISA)

Javier Oteo Escobar; Ingeniero Geólogo, (EIS S.A.)

La Línea I del Metro de Sevilla se comenzó a construir en junio de 2003 y se terminó en noviembre de 2009 (aunque la mayor parte de la línea ya entró en servicio en abril de 2009). Seis años largos de obra para realizar una compleja infraestructura que atraviesa la ciudad desde el Oeste al Este, desde El Aljarafe hasta la Universidad Pablo de Olavide, atravesando el Río Guadalquivir, el Barrio de los Remedios, el canal de Alfonso XIII, la Avenida de San Fernando, San Bernardo, etc., con sus cocheras junto a la carretera de Su Eminencia.

Esta obra fue una concesión de la Junta de Andalucía (a través de su Ente Público Ferrocarriles de la Junta de Andalucía) a un conjunto de empresas (**SACYR, DRAGADOS y GEA-21**, principalmente, interviniendo en las instalaciones y explotación otras empresas especializadas) para construir una línea de 26 Km de longitud, aproximadamente. De este trazado, del orden del 35% se desarrolla superficialmente (en los extremos de la línea) y del orden de otro tercio se ha instalado en túnel artificial (entre pantallas continuas de hormigón armado en la entrada y salida del casco antiguo de Sevilla y algunos cruces importantes, bajo bóvedas prefabricadas y bajo marcos prefabricados en la zona de El Aljarafe). El resto discurre en túneles verdaderos, de los cuales unos 250 m (para vía doble) se han construido en El Aljarafe con el llamado “Método Tradicional de Madrid” o “Método

(del Belga”); otros 60 m (túneles de vía simple) se han ejecutado bajo importantes “paraguas” y bajo el ferrocarril de Santa Justa, tema principal de este artículo; y el resto (unos 8 Km) son túneles paralelos, para vía simple, de \varnothing 6,10 m y ejecutados con tuneladora tipo E.P.B. (de la casa LOVAT, con 40.000 KN de empuje máximo y 600 Kn x m de par torsor máximo). Estos últimos túneles atraviesan el centro de la ciudad, bajo la Avenida de República Argentina, Plaza de Cuba, Canal de Alfonso XIII, Puerta de Jerez y Avenida de San Fernando, hasta llegar a la zona de San Bernardo (MENDAÑA y otros, 2008).

Todas las estaciones (salvo alguna superficial en las afueras de la ciudad) han sido ejecutadas al abrigo de pantallas continuas, con estampidores a diversos niveles y contrabóveda para resistir la subpresión.

El nuevo trazado ha aprovechado parte del trazado antiguo ejecutado con anterioridad, entorno a finales de los años 70 y comienzos de los 80 (túnel entre pantallas y alguna estación), en la zona de Portacoeli.

El terreno de Sevilla.

Las propiedades geotécnicas del terreno de Sevilla han sido objeto de diversos estudios, como: Proyecto del Metro de Sevilla del Ministerio de Obras Públicas (en torno a 1970), pozo y túnel experimental de la Alameda de Hércules, construcción de varios kilómetros de túnel artificial y de tres estaciones subterráneas en el centro de Sevilla (OTEO, REIN y SOLA, 1987), nuevo Proyecto de licitación de la Concesión y durante la construcción de la Línea I (siglo XXI).

Estos y otros estudios que se realizaron han permitido una imagen geotécnica bastante verosímil de los terrenos tipo del entorno de la ciudad de Sevilla. El corte estratigráfico simple, correspondiente al centro de Sevilla es el siguiente:

- ✓ Un recubrimiento arcillo-arenoso superior. Este material es “duro” en El Aljarafe (zona oeste) y fuera del ámbito urbano (zona este). Generalmente, este material es terciario en estas zonas, salvo algunos espesores de vertidos antrópicos. Pero en el centro de Sevilla (vega del Río Guadalquivir) ese recubrimiento es “flojo” y está constituido por rellenos antrópicos (de unos 4-8 m de espesor), bajo los cuales se presentan depósitos cuaternarios, constituidos por capas de arenas flojas y arcillas blandas a medias.
- ✓ Las gravas cuaternarias que se presentan en todo el ámbito de la Vega del Río Guadalquivir, donde se asienta el casco actual de Sevilla y su ampliación por donde discurre el Río Guadalquivir y su Canal de Alfonso XIII, que era inundable (los romanos vivían en la zona alta de El Aljarafe). La ciudad fué rellenada poco a poco, durante la Edad Media, de forma que, ahora, la cota media de la superficie de Sevilla es, aproximadamente, la + 6,0. Las gravas suelen tener tamaños que varían entre 20 y 80 mm, con algunas capas arenosas intercaladas. En algunas zonas de la ciudad, se presentan niveles cementados

de gravas (el “derretío”), que dan extraordinaria cohesión a las gravas, en espesores de 40-100 cm. Hemos tomado alguna muestra de este material cementado y su resistencia a compresión simple puede ser de 25 MPa a 35 MPa. Generalmente los valores del S.P.T. en las gravas varían entre 25 g/30 cm y rechazo.

- ✓ El sustrato está constituido por las denominadas “margas azules del Guadalquivir”, que ni son margas ni son azules. Se trata de arcillas miocenas fisuradas, con un 12-15% de CaO, de plasticidad media a alta (límite líquido de 45 a 65), algo expansivas (sobre todo en superficie), con resistencia a compresión simple variable entre 0,3 y 1,4 MPa en el centro de la ciudad (OTEO y otros, 2009).

En la **Fig. 1** puede verse un corte estratigráfico medio, correspondiente al centro de Sevilla (zona de Puerta de Jerez), mientras que en la **Fig. 2** aparece un perfil más general que afecta a las zonas oeste y central de la ciudad con indicación de los sistemas constructivos empleados. El nivel freático general se encuentra a unos 4-6 m de profundidad, por debajo de la zona rellanada.

PROF (m)	PERFÍL	DESCRIPCIÓN
NF		RELLENOS ANTRÓPICOS
10		LIMOS Y ARCILLA
20		GRAVAS
30		“MARGAS AZULES”

Fig. 1. Corte estratigráfico del centro de Sevilla

Fig. 2. Cauce histórico del Guadalquivir

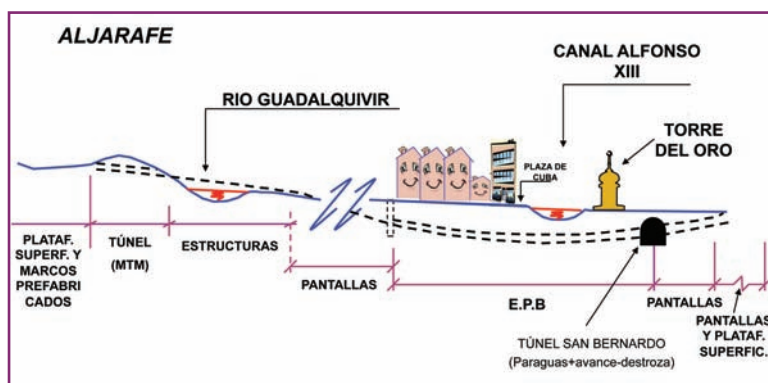




Fig. 3.
Fotografía aérea de la zona de San Bernardo

Descripción y características del Túnel en San Bernardo.

El paso de San Bernardo se sitúa aproximadamente en el centro de la línea, dentro de la trama urbana de Sevilla, y lo constituyen dos túneles de 30 metros (uno por sentido de circulación) cuya construcción se llevó a cabo en quince meses entre septiembre de 2007 y noviembre de 2008. Vale la pena comentar que dichos túneles unían el pozo de salida de la tuneladora y el tramo soterrado entre pantallas, y atravesando bajo el túnel de A.D.I.F. (Fig. 3).

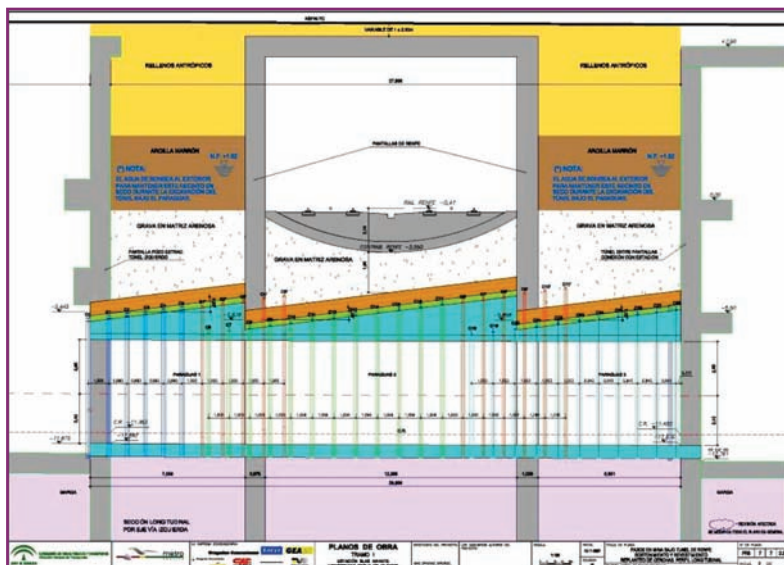


Fig. 4 . Sección longitudinal de uno de los túneles del metro bajo el túnel del ferrocarril

La particularidad de estos túneles es que había que construirlos pasando bajo la línea del ferrocarril que une Sevilla con Cádiz y Málaga, la cual, a su vez, también va soterrada mediante el típico túnel entre pantallas. Los trenes circulan a 9 metros bajo la superficie de la calle, con la contrabóveda del túnel situada 2 metros más abajo, las pantallas del ferrocarril sin embargo son bastante más profundas dado que se empotran en marga a 20 metros de profundidad.

Por esto se determinó pasar bajo la contrabóveda del ferrocarril pero no bajo el pie de sus pantallas. Así todo el metro circularía a 20 metros bajo la superficie de la calle en la zona de San Bernardo. Esto implicaba que había que perforar las dos pantallas de hormigón armado del ferrocarril en su zona de empotramiento para ejecutar los túneles del metro. En la sección longitudinal de la Fig. 4 se aprecia cómo la clave de uno de estos túneles pasa a escasos 2 metros bajo la contrabóveda del ferrocarril, atravesando las pantallas.

Las tuneladoras pueden perforar suelos, rocas, incluso hormigón en masa, pero lo que resulta complicado excavar es el hormigón armado. Para que la máquina pudiera atravesar las pantallas, existía la posibilidad de, previamente a su paso, demoler el hormigón armado con medios manuales desde unos pozos de acceso.

En la Fig. 5 se reproduce un plano de planta en el que los dos nuevos túneles a ejecutar aparecen sombreados y la división de las zonas de ejecución. A la izquierda de los mismos se localizan los pozos de extracción donde la tuneladora terminó cada uno de sus recorridos. A la derecha de los túneles en mina aparecen dos cortos tramos de túnel entre pantallas y a continuación la estación de San Bernardo. El túnel existente del ferrocarril discurre en el plano de arriba abajo, con el apeadero y los andenes situados en la parte inferior. El cruce entre túneles no es perpendicular sino que está esviado un ángulo de 35 grados.

Cada uno de los túneles de 30 metros de longitud y 6 metros de diámetro está constituido en realidad por tres tramos, los cuales están delimitados por las pantallas de hormigón que se atraviesan. El primer tramo va desde el pozo de extracción hasta la primera pantalla del ferrocarril. El segundo es el que

verdaderamente discurre bajo el túnel del ferrocarril (el más crítico por tanto). Y el tercero (similar al primero) que transita entre la segunda pantalla del ferrocarril y otro tramo de túnel entre pantallas adyacente a la estación de San Bernardo.

Dado que los túneles tenían que excavar en gravas, la alta permeabilidad de éstas y que el servicio de tren a Santa Justa no se interrumpió (aunque las vías se apearon y redujo algo la velocidad), se proyectó la realización de un “paraguas” o prebóveda que envolviera la excavación hasta las margas “impermeables”. Este tratamiento llevaba una doble corona (Fig.6): Una de columnas de jet-grouting (limitando la presión a 200 bares y 250 Kg/de cemento/m.l.) y otra de inyecciones armadas con tubo metálico y manguitos. En algunos casos el tratamiento se completaba con algunos taladros para inyectar silicatos y con unas columnas de jet-grouting en el frente a excavar (Fig. 7).

Planteamiento general de la ejecución de los nuevos túneles

El gran reto que se planteaba tras la decisión de extraer la tuneladora justo antes del paso de San Bernardo era ejecutar con métodos tradicionales dos túneles bajo el nivel freático en la terraza inferior del Guadalquivir formada por una grava silíceo de canto rodado en una matriz arenosa. Y todo ello con el ferrocarril en funcionamiento. Aún a riesgo de parecer repetitivos, detengámonos en este triple riesgo que hemos mencionado: ejecutar dos túneles con 8.50 metros de columna de agua sobre la clave y 14.50 metros sobre la base del túnel, en grava arenosa, terreno muy permeable, sin cohesión y difícil de perforar, y con los trenes que unen Sevilla con Cádiz y Málaga circulando sin interrupción en un túnel justo por encima de los nuevos a construir. En resumen: agua, grava y trenes.

Para solventar el desafío planteado se diseñaron unos paraguas mixtos de protección con inyecciones de jet grouting y micropilotes, a ejecutar de forma previa al comienzo de la excavación de los túneles. La función de las inyecciones de jet grouting era impermeabilizar y evitar, que durante la excavación de los túneles se produjeran entradas de agua y arrastres de terreno. El cometido de los micropilotes era reforzar e impedir que la excavación de los

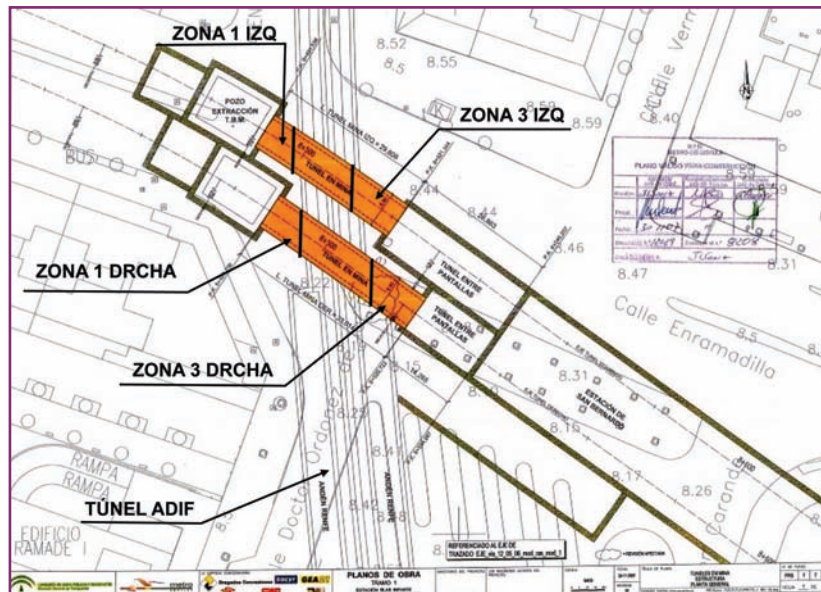


Fig. 5. Planta general de la zona de San Bernardo en la que destacan los túneles del metro.

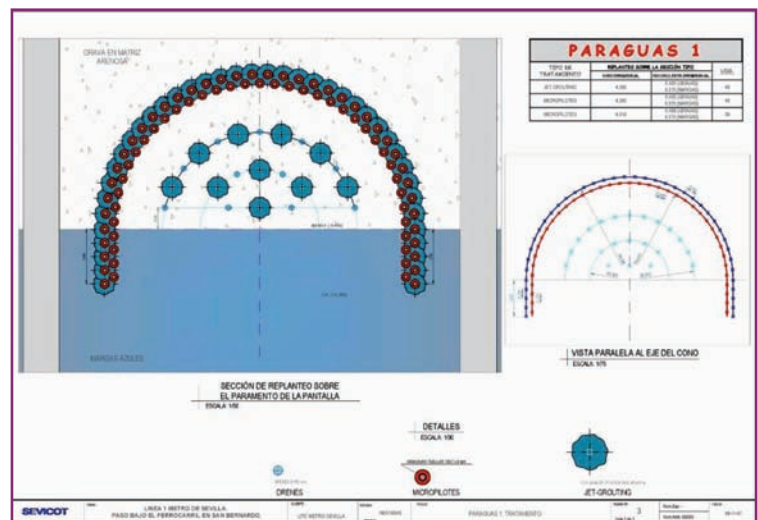


Fig. 6. Paraguas de Jet-grouting y de micropilotes. Sección transversal.

túneles originase asientos en la contrabóveda del ferrocarril (o un hundimiento en el peor de los casos). En la Fig. 7 se observa la sección transversal tipo de un paraguas. Los círculos de mayor diámetro representan las inyecciones de jet grouting, y los más pequeños (concéntricos a los anteriores) indican los micropilotes. Ambos tratamientos se disponen formando una doble corona al tresbolillo. Los colores utilizados obedecen a diferentes circunstancias de ejecución. La sección del paraguas es semielíptica en lugar de semicircular debido a que se dibuja la localización de los puntos de emboquille sobre la pantalla del ferrocarril, la

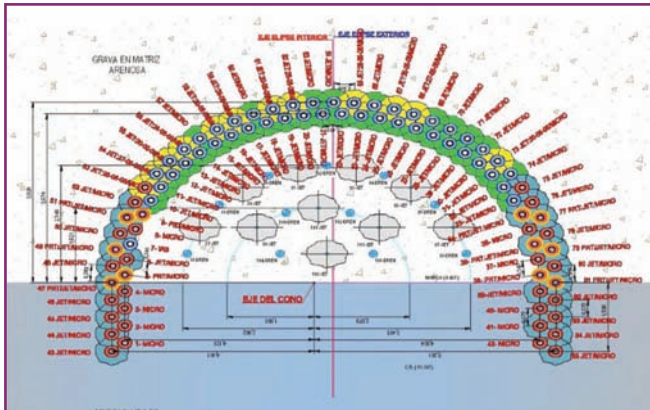


Fig. 7. Sección del paraguas de protección e impermeabilización. Plano de seguimiento

cual está esviada con respecto al eje longitudinal del túnel del metro y del paraguas.

Los paraguas de protección se diseñaron telescópicos de tal forma que cada tramo individual se iba abriendo para hacer sitio y permitir emboquillar el siguiente (Figs. 4 y 8). No era posible construir un único paraguas por dos motivos principales: con la distancia de perforación disminuían las garantías de mantener la tangencia entre inyecciones, y la perforación de varias pantallas a lo largo de un mismo taladro planteaba problemas de desvíos y roturas del varillaje.

En la Fig. 9 se detalla la planta de los paraguas telescópicos del túnel izquierdo. De los tres paraguas, el segundo era el que realmente estaba situado bajo el túnel del ferrocarril. También aparecen en el plano unos cierres adicionales con columnas de jet grouting verticales ejecutadas desde la calle. Formaban otra barrera adicional con objeto de compartimentar lo más posible en nuestra lucha contra el agua.

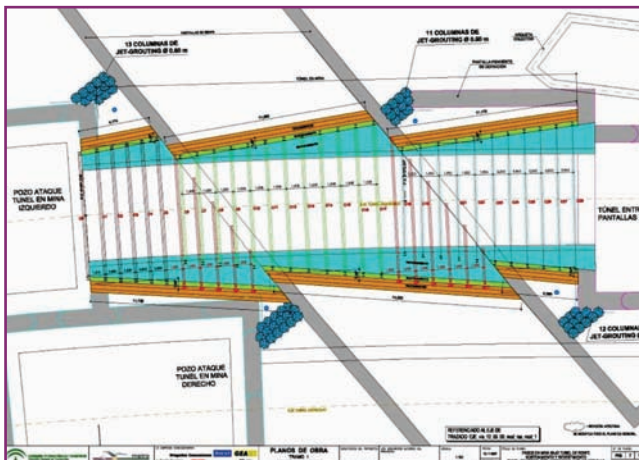


Fig. 9. Planta de detalle del túnel izquierdo del metro



Fig. 8. Gunitado del frente en la excavación de la segunda zona.

El planteamiento general de la ejecución de los nuevos túneles del metro fue inyectar en los paraguas todo lo posible antes de meterse a excavar (Fig. 10), aun a costa de levantar la vía del ferrocarril (siempre de forma controlada). La inyección previa abundante era lo único que daba garantías para poder excavar después. Si se abrían vías de agua con arrastres de terreno durante la excavación del túnel íbamos a andar de percance en percance, tapando fugas y poniendo parches (y los trenes circulando).

Ejecución de la obra:

La peculiaridad de la construcción de los túneles en suelos al amparo de paraguas armados es bien conocida en el mundo de la obra civil, pero si le sumamos la problemática del agua y de un terreno con unas dificultades de perforación horizontal muy elevadas (rotura de bolos a 350 Kg/cm² de resistencia), junto con la existencia de un túnel de ADIF en servicio permanente sobre los nuevos túneles, se concluye en una situación



Fig. 10. Excavación del túnel con el sistema de chapa Bernold y gunita

particular y con poca experiencia en la ingeniería española.

Dado estos grandes condicionantes, al comienzo de la ejecución, se planteó una filosofía muy clara de actuación, la cuál tenía como principales enfoques los que se comentan a continuación:

- La seguridad, tanto de la estructura del ADIF, como la de la excavación de los túneles, así como la de los edificios cercanos.
- La impermeabilización máxima de todas las zonas de excavación, ya que dos de las seis zonas a excavar no tenían la posibilidad de hacer cerramientos impermeables.

Tras lo cual, se planteó las diferentes fases para la ejecución de los túneles en gravas bajo San Bernardo. Merece la pena comentar, que durante la ejecución diaria de todas las fases se encontraba en obra un técnico competente y especialista en túneles y auscultación perteneciente al SEVICOT (*Seguimiento, Vigilancia y Control Técnico del Metro de Sevilla*), el cuál y bajo supervisión del Asesor Geotécnico del Metro de Sevilla, solventaba los innumerables problemas acontecidos en el día a día de la obra. A continuación se exponen las fases constructivas más generales:

1. Ejecución de los cierres laterales con jet-grouting de los primeros recintos, tanto el izquierdo como el derecho, para la impermeabilización de sus respectivas zonas de excavación.
2. Ejecución de los paraguas de dichas zonas, es decir, el paraguas 1 Izquierdo y 1 Derecho. Para ello se ejecutaba en primer lugar la doble corona de jet-grouting (primero la exterior y luego la interior) y a continuación la doble corona de micropilotes. Por último se ejecutaban una serie de taladros de jet en el frente de excavación para poder asegurar los posibles problemas en el frente de excavación.
3. Excavación en avance y destroza de la zona 1 Izquierda.
4. Ejecución del paraguas 2 Izquierdo. El cual variaba ligeramente de diseño, ya que la existencia de las pantallas de hormigón armado de ADIF funcionaban como cauce artificial de los antiguos cauces naturales del acuífero de Sevilla, dado este

inconveniente y a la imposibilidad de crear cierres exteriores, se procedió a una primera fase de acondicionamiento del Jet-grouting con inyecciones repetitivas de silicatos a través de tubos manguitos o precolumnas a mínima presión de jet-grouting, para la posterior ejecución del paraguas como en la zona 1.

A su vez, y por recomendación del Asesor de la Junta de Andalucía, se realizaron varios pozos de bombeo y algún piezómetro en la contrabóveda del túnel de ADIF, en horario nocturno de corte de vía (de 0 h a 4,30 h), ejecutándose desde plataformas móviles y maquinaria de gálibo reducido.

5. Desmontaje de la tuneladora para la ejecución de la excavación de la zona 1 derecha.
6. Comienzo ejecución del paraguas 2 derecho, aunque se tuvo que ralentizar durante la excavación del túnel izquierdo bajo el túnel de ADIF.
7. Ejecución de los cierres laterales con jet-grouting de los recintos denominados 3.
8. Ejecución del paraguas 3 Izquierdo atacándolo desde la zona de la Estación de San Bernardo.
9. Ejecución de la zona 3 derecha, ya que debido a diversos problemas acontecidos se rediseño para poder ejecutarlo por el método de excavación entre pantallas, junto con protecciones armadas dada la existencia cercana de un pozo de bombeo de ADIF.
10. Excavación de la zona 2 y 3 Izquierda simultáneamente, aprovechando los dos frentes de trabajo.
11. Excavación de la zona 2 derecha.
12. Finalización de revestimientos definitivos e instalaciones - vía.

Estas fases expuestas son a modo de resumen, aunque no coincidan exactamente con las fases originales de proyecto, esto fue debido a que durante la ejecución de la obra surgieron varios contratiempos que hicieron modificar el diseño, dichos acontecimientos más importantes fueron:

- Comprobación de que las pantallas armadas de ADIF eran de longitud inferior a las de proyecto, siendo aproximadamente 2 metros más cortas, por lo que en algún caso obligo a rediseñar los paraguas para asegu-

rar tanto su empotramiento en el sustrato competente como para evitar grandes problemas en la excavación de los hastiales.

- Limitación y definición diaria de las presiones de inyección en la ejecución de los paraguas debido a los movimientos de la vía de ADIF, dado que el sistema de control de la instrumentación era, en todo momento, en tiempo real.
- Comprobación de la existencia de un descenso pronunciado del sustrato impermeable, las Margas Azules, en la zona 2 y 3 derecha. Por dicho motivo, se cambió la solución de la zona 3 derecha, y obligó a realizar varios abanicos de jet-grouting en la zona 2 para poder ejecutar la excavación.

Por último, y no menos importante, debemos hablar de la auscultación de los túneles, ya que sin ella la obra no hubiera tenido éxito. La auscultación fue de dos tipos principalmente:

1. Nivelación con control clásico e instrumentación convencional en horario nocturno, tanto de la vía de ADIF como de todas las estructuras cercanas y las propias de la obra en ejecución.
2. Nivelación automática, en tiempo real, de la vía del ferrocarril con 5 líneas de electroneveles.

Una reflexión importante para continuar este apartado: el terreno, y las construcciones enterradas o apoyadas en él, siempre se mueven al ejecutar obras próximas de cierta entidad, por lo que para la correcta ejecución de los túneles de San Bernardo se eligieron los umbrales constructivos de alerta. Dichos umbrales fueron acordados con ADIF y fueron expresados en torno al peralte y alabeo, que son los parámetros principales para el control de las vías de ferrocarril. Dichos umbrales son los que se expresan a continuación, debiendo mencionar que se calcularon para una limitación de velocidad establecida, durante la construc-

ción de los túneles, de 30 Km/h y siempre teniendo en cuenta la norma de RENFE de peraltes y alabeos.

Umbral rojo del peralte: ± 20 mm Umbral ámbar del peralte: ± 15 mm
Umbral rojo del alabeo: ± 12 mm Umbral ámbar del alabeo: ± 9 mm

También fijamos los umbrales para la estructura del túnel entre pantallas, para las convergencias de los túneles del metro y para los movimientos en la superficie del terreno y edificios próximos, pero al ser casos bastante más habituales no los reproducimos aquí.

Los resultados obtenidos fueron un éxito, tanto durante la ejecución de los diferentes paraguas como los de las excavaciones, los cuales se pueden observar en las tablas resumen adjuntas (**Tabla 1 y Tabla 2**):

En la **Fig. 11** puede verse la excavación del túnel, apreciando los paraguas, el terreno inferior (“margas azules”) y las dos fases de excavación, comprobando que las filtraciones son muy pequeñas.



Fig. 11. Fotografía de uno de los túneles durante la fase de excavación

Bibliografía

MENDAÑA, F.; GÓMEZ, P y SANZ, J. I. (2008) “Escudos E.P.B. en terrenos no cohesivos bajo carga de agua: Últimas experiencias en la Línea 1 del Metro de Sevilla”. Revista de Obras Públicas. Octubre. pp 13-28.

OTEO, C.; REIN, J. A. y SOLA, P. (1997) “Tassements occasionnés par l’excavation des gares souterraines du Metro Sevilla”. Colloque International Sols-Structures. Paris.

OTEO, C.; DE DIOS, J.; AROZAMENA, P y DÍEZ, J (2009) “Problemas geotécnicos en la Línea 1 del Metro de Sevilla”. Revista de Obras Públicas, Abril, pp 43-64.

Tabla 1

	Lectura antes del comienzo de la obra (31/07/07)			Lectura tras el apeo de la vía (14/03/08)			Lectura al final de la obra (09/12/08)		
	Vía 2	Vía 1	Tolerancia (-120 Km/h)	Vía 2	Vía 1	Umbral Rojo (30 Km/h)	Vía 2	Vía 1	Umbral rojo
Peralte máximo (mm)	4	-3	± 10	7	-7	± 20	11	10	± 20
Alabeo máximo (mm)	4	3	± 6	5	6	± 12	-3	-5	± 12

Tabla 2

	Levantamiento durante la ejecución de los paraguas (m)				Asientos durante la excavación de los túneles (mm)			
	Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vía 1	
	Carril A	Carril B	Carril C	Carril D	A	B	C	D
Sobre la clave del túnel izquierdo	23	35	46	54	3	9	7	5
Sobre la clave del túnel derecho	8	20	28	31	4	4	4	3