

# Problemas geotécnicos en la Línea 1 del Metro de Sevilla

## Geotechnical problems on Line 1 of the Seville Metro

**Carlos Oteo Mazo.** Prof. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos  
Catedrático de Ingeniería del Terreno. Universidade da Coruña. carlosoteo@telefonica.net  
**Juan de Dios Moreno Jiménez.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Ferrocarriles de Junta de Andalucía. juan.moreno@ferrocarrilesandaluces.com  
**Pedro Arozamena Cagigal.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
SEVICOT-Geotecnia y Cimientos, S.A. parozamenac@geocisa.com  
**Jesús E. Díez Fernández.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Concesionaria Metro de Sevilla, S.A. j.diez@metrodesevilla.es

**Resumen:** Se expone, brevemente, la obra de la Línea 1 del Metro de Sevilla, haciendo hincapié en los principales problemas geotécnicos que se han tenido que resolver en la obra y en los tratamientos del terreno que ha habido que llevar a cabo, bien para proteger edificios, bien para ayudar a la estabilidad de las obras.

**Palabras Clave:** Excavaciones urbanas; Túneles urbanos; Propiedades geotécnicas; Tratamientos del terreno

**Abstract:** The article provides a brief description of the construction of Line 1 on the Seville Metro, placing special emphasis on the main geotechnical problems that had to be overcome during the work and the soil reinforcement required to protect buildings and provide excavation stability.

**Keywords:** Urban excavations; Urban tunnels; Geotechnical properties; Soil reinforcement

### 1. Introducción

El Metro de Sevilla inaugura en el primer trimestre de 2009 pronto su Línea 1, que atraviesa la ciudad a lo largo de 18 Km. desde el Oeste al Este, desde el Aljarafe hasta las urbanizaciones de Montequinto (Dos Hermanas), atravesando el cauce actual del Río Guadalquivir, el Barrio de los Remedios, el cauce histórico del Río Guadalquivir, la Calle de San Fernando, la Universidad Pablo de Olavide, etc., con sus cocheras junto a la carretera de Su Eminencia (Fig. 1).

Esta obra es 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) y se ha venido desarrollando a lo largo de los últimos cinco años, hasta construir una línea de 18 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 con-

tinuas de hormigón armado en la entrada y salida del casco antiguo de Sevilla y algunos cruces importantes 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"; otros 60 m (túneles de vía simple) se han ejecutado bajo importantes "paraguas" y bajo el ferrocarril de Santa Justa; y el resto (unos 5 Km) son túneles paralelos, separados 11,85 m entre ejes 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 túneles tienen un revestimiento prefabricado, a base de dovelas de hormigón armado de 0,25 m de espesor y 1,40 m de longitud. Las curvas, en planta, de estos túneles tienen un radio mínimo de 250 m, aunque la tuneladora podría describir curvas de radio 200 m. La pendiente longitudinal máxima es del 4% (MENDAÑA y otros, 2008). Estos últimos túneles atraviesan el centro de la ciudad, bajo la Avenida de República Argentina, Plaza de Cuba, Dársena del Guadalquivir, Puerta de Jerez y Ave-

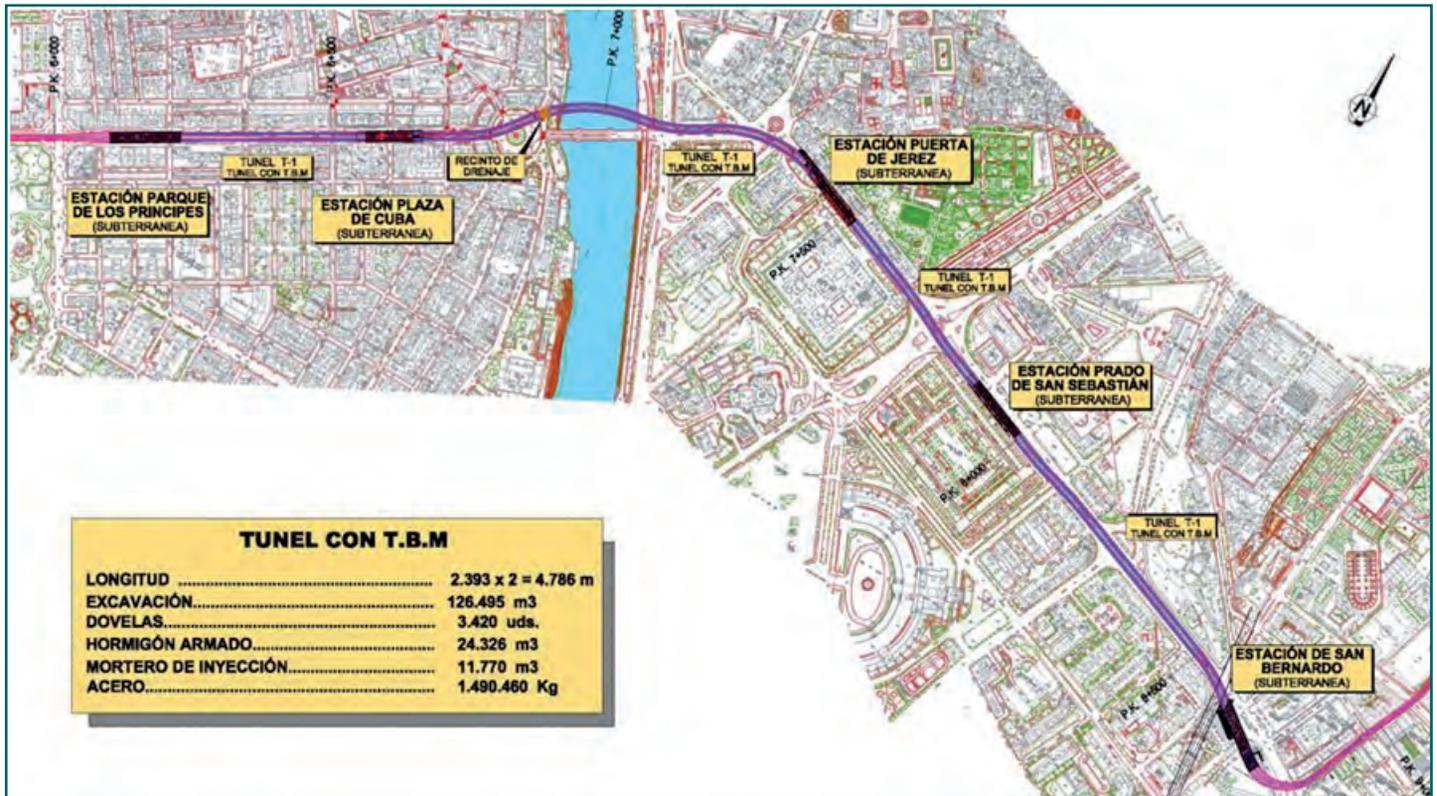


Fig. 1. Planta del tramo en túnel.

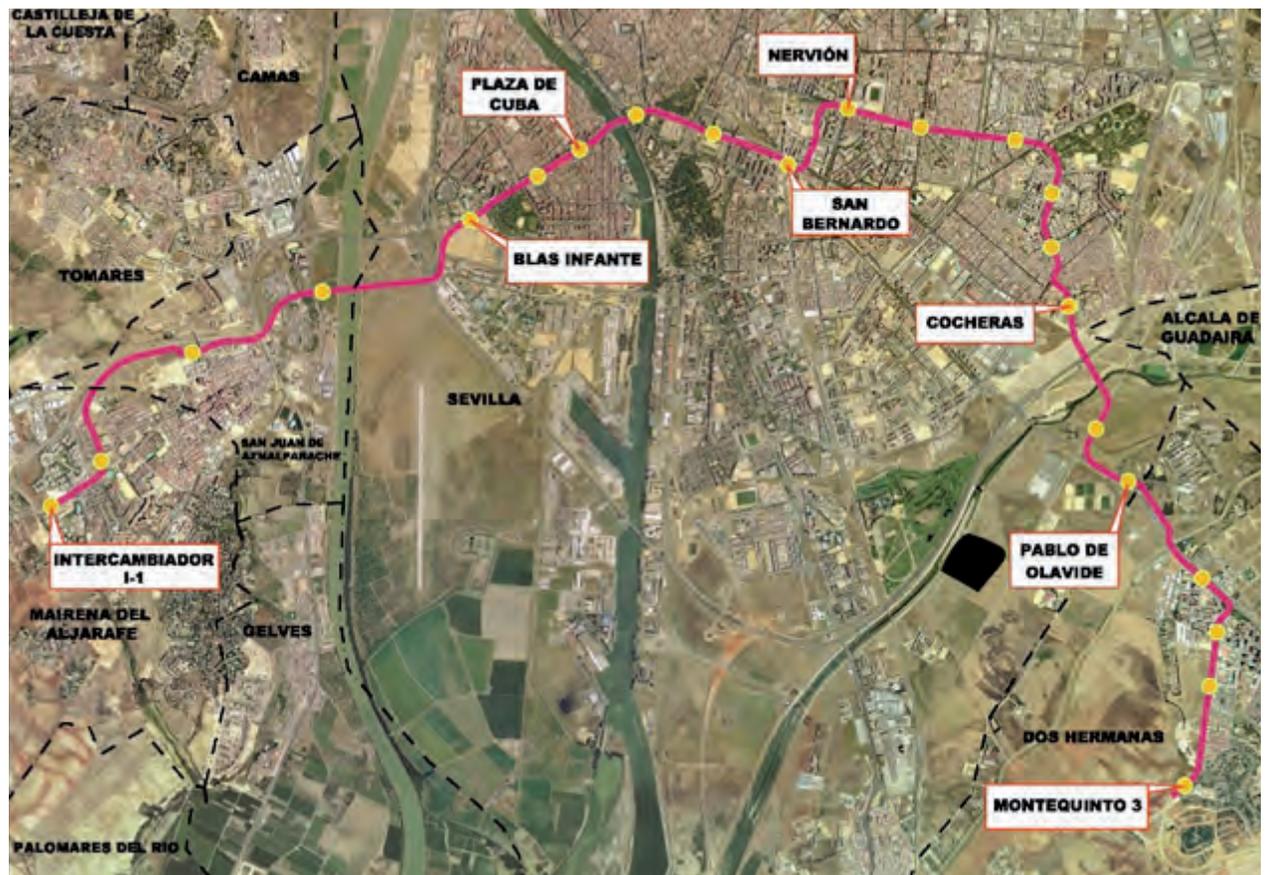


Fig. 2. Línea 1 del Metro de Sevilla.

nida de San Fernando, hasta llegar a la zona de San Bernardo (Fig. 2).

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

Esta obra tuvo dos importantes antecedentes:

- En 1974-75, con la construcción del Pozo y Túnel experimentales de la Alameda de Hércules (por parte del, entonces, Ministerio de Obras Públicas), en el que se construyó un pozo de Ø 25 m, con pantallas y continuas y 40 m de profundidad, así como un túnel experimental, de 25 m de longitud, con revestimiento de ladrillo y excavado en las "margas azules" del Guadalquivir. Existen varias publicaciones sobre los resultados obtenidos (URIEL y OTEO, 1976; URIEL y OTEO, 1979, etc.)
- En 1980-84, con la construcción de las cocheras de la carretera de Su Eminencia y el tramo (en pantallas continuas) que venía desde esa zona hasta la Huerta del Obispo, más un "pantalón" de conexión con un "pozo de ataque" en dicha huerta y tres estaciones subterráneas (excavadas desde pozos de Ø 25 m (al abrigo de pantallas) con una variación del llamado "Método alemán, por costillas"), que se construyeron junto a la Estación de R.E.N.F.E. de Cádiz, en Puerta de Jerez y en Plaza Nueva. También hay varias publicaciones sobre el tema (OTEO, REIN y SOLA, 1987, OTEO, 1994, etc.)

El nuevo trazado ha aprovechado parte del trazado antiguo (túnel entre pantallas y alguna estación) en la zona de Portacoell.

## 2. Propiedades del terreno de Sevilla

Las propiedades geotécnicas del terreno de Sevilla han sido objeto de diversos estudios:

- A principios de los 70 del Siglo XX, durante la redacción del Proyecto del Metro de Sevilla del Ministerio de Obras Públicas.
- Al realizarse (1974-75) el pozo y túnel experimental de la Alameda de Hércules (URIEL y OTEO, 1976; URIEL y OTEO, 1977; URIEL y OTEO, 1979) y en los años 80, al construirse varios kilómetros de túnel artificial y

las tres estaciones subterráneas del centro de Sevilla (OTEO y otros, 1986; OTEO, REIN y SOLA, 1987).

- Al redactarse (ya en el Siglo XXI), el nuevo Proyecto de licitación de la Concesión y durante la construcción de la Línea 1.

En las tres últimas fases no sólo se hicieron sondeos y los consiguientes ensayos de laboratorio (identificación, estado, deformabilidad, resistencia al corte de pico y residual, etc.) sino que se realizaron:

- Ensayos "in situ", tanto en el cuaternario como en el terciario, mediante placas de carga a diferentes profundidades y ensayos presiométricos.
- Diversas auscultaciones de las obras ejecutadas, para medir: a) Presiones totales sobre revestimientos de túneles y pantallas continuas. b) Movimientos de pantallas y túnel, etc.

Todo ello ha permitido elaborar una imagen geotécnica bastante verosímil de los terrenos de la ciudad de Sevilla. Un corte estratigráfico simple, correspondiente al centro de la ciudad, es el siguiente (Fig. 3):

- 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, (arenas flojas y arcillas blandas a medias, que, aquí, denominaremos como "arcillas arenosas").

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

Fig. 3 . Corte estratigráfico del centro de Sevilla.

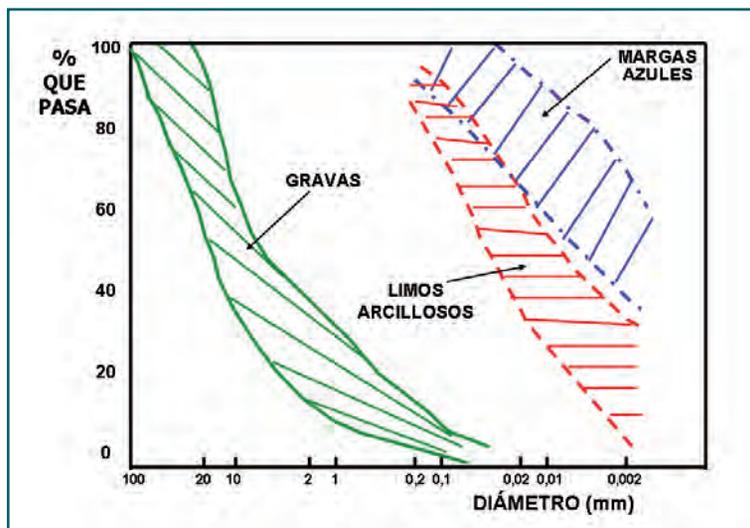
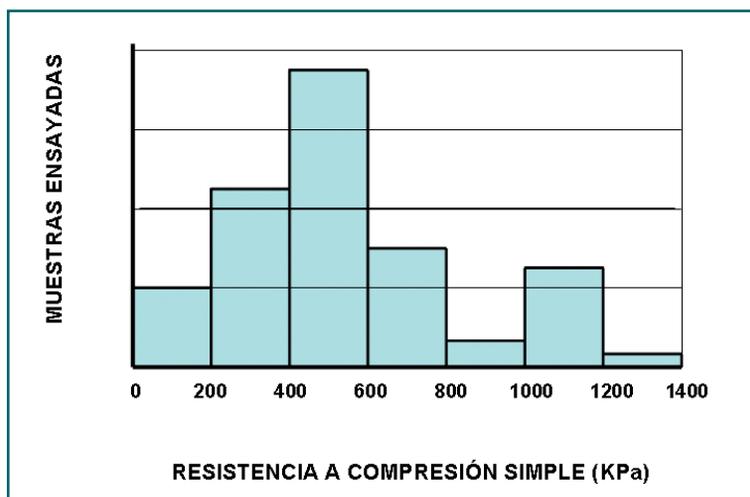


Fig. 4. Granulometría de suelos de Sevilla.

- Las gravas cuaternarias que se presentan en todo el ámbito de la Vega del Río Guadalquivir. Como la zona actual de la ciudad era inundable, 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. 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". Se trata de arcillas miocenas fisuradas, con un 12-15% de Ca O,

Fig. 5. Resistencia de las margas azules.



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 (URIEL y OTEO, 1976; OTEO y SOLA, 1993). Aquí las denominaremos "arcillas margosas" o "margas".

En la Fig. 4 se muestra la granulometría típica de estos terrenos y en la Fig. 5 la distribución de resistencias a compresión simple de las "margas" (URIEL y OTEO, 1976).

En la Tabla nº 1 aparecen una serie de propiedades geotécnicas generales de estos materiales (OTEO, 1994).

El nivel freático general se encuentra a unos 4-6 m de profundidad, por debajo de la zona rellenada.

### 3. Sistemas constructivos

Se han utilizado varios sistemas constructivos (Fig. 6):

- Plataforma ferroviaria sobre terraplén de pequeña altura o en trinchera, en zonas extremas de la línea.
- Plataforma ferroviaria bajo marcos prefabricados (con terraplén encima), en la zona de El Aljarafe.
- El llamado método de "cut and cover" ("abrir y cubrir") o "método Milán", con pantallas continuas de hormigón armado, con losa superior y puntales intermedios. La solera, en general, se apoyaba en las gravas (a fin, de no tener un Metro profundo), resistente a la subpresión. Pero para permitir la excavación (en las zonas en que la excavación era considerable) sin problemas de achique, las pantallas laterales se llevaban hasta "empotrarse" en las "margas azules", del orden de 1,5-2,0 m, a fin de cortar las filtraciones a corto plazo.
- Estructuras clásicas sobre el Río Guadalquivir, sobre la SE-30 y sobre el encauzamiento del Guadaira, alguna de ellas de tablero metálico empujado.
- Túnel de sección circular excavado con tuneladora E.P.B., canadiense, con un diámetro de 6,10 m. Se han ejecutado dos túneles paralelos, con una separación mínima - entre ejes - de unos dos diámetros. La perforación ha discurrido principalmente en las gravas rozando o penetrando parcialmente, a veces, en las arcillas margosas. Se trata de 2 túneles de 2,4 Km. cada uno (Fig. 7).



TABLA 1. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS GENERALES DE LOS SUELOS DE SEVILLA (OTEO, 1994)

Propiedad	Material			
	Arcillas		Arenosas	
	Fracción plástica	No plástica		
% < tamiz 10	100	90-100	15-44	100
% < tamiz 200	83-96	12-82	1-8	91-100
% < 0,002 mm	9-36	7	-	37-66
Límite líquido	30-60	N.P.	-	40-70
Límite plástico	15-35	N.P.	-	25-45
% CO <sub>2</sub>	- 10-15**			
Humedad (%)	15-40		20-30	
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,2-2,0 (1,6-1,8)*		2,1	1,4-1,8 (1,5-1,7)*
Índice de compresión, C <sub>C</sub>	0,070-0,300	-	0,055-0,150***	
Índice de entumecimiento, C <sub>S</sub>	0,010-0,080		- 0,036	0,120
Resistencia a compresión simple (kp/cm <sup>2</sup> )	0,50-3,0	0,17-0,90	-	4,6 y 10 - 12
Cohesión efectiva media C' (t/m <sup>2</sup> )	1,1	0	0	1,2-3,0
Rozamiento efectivo medio, Ø <sup>o</sup>	27,5	35,0	35-45	25-34
Módulo de deformación en placa de carga (kp/cm <sup>2</sup> )	-	260-540	Horiz. 1200-5700	Vert. 500-3100
Módulo de deformación en ensayos triaxiales (kp/cm <sup>2</sup> )	-	350	-	Sin drenaje 560 con drenaje
Módulo edométrico en dispositivo de entumecimiento (decompresión) (kp/cm <sup>2</sup> )	-		-	440-1900

(\*) (1,6-1,8) = Intervalo de mayor acumulación  
 (\*\*) En las muestras cementadas: 20-25%

(\*\*) Los resultados de laboratorio pueden estar muy afectados por la toma de muestras.

TABLA 2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS ADOPTADOS PARA EL CÁLCULO DE PANTALLAS CONTINUAS (OTEO, 2003)

LITOLOGÍA	CÁLCULOS ELÁSTICOS		PESO ESPECÍFICO AP. (T/m <sup>3</sup> )	RESIST. AL CORTE	
	MÓDULO DEFORM. (T/m <sup>2</sup> )	MÓDULO POISSON		COHESIÓN (T/m <sup>2</sup> )	ROZ. INTERNO (°)
RELLENOS	1.000	0,30	2,00	0,5	25
ARENAS	3.000	0,30	2,10	1,0	32
LIMOS-ARCILLAS	2.500	0,35	2,00	2,0	28
GRAVAS	6.000	0,30	2,10	0,0	37
"MARGAS"	8.500	0,35	2,05	4,0	28

- Túnel excavado a sección partida en San Juan de Aznalfarache, con el Método Tradicional de Madrid, para vía doble, con avances de 2,50 m, y con paraguas de jet-grouting en los emboquilles (unos 250 m de longitud).
- Túnel excavado en dos fases (avance y destroza) en gravas al abrigo de paraguas dobles (bóveda y hastiales), de coronas de jet-grouting e inyecciones armadas (con inyección complementaria, en algún caso, de silicatos). Este sistema se ha empleado para pasar bajo el túnel de A.D.I.F. en la zona de San Bernardo con dos túneles (de unos 30 m de longitud, cada uno).

En el caso de las pantallas continuas, los parámetros de cálculo utilizados son los de la Tabla nº 2, que han dado buenos resultados como ha mostrado la instrumentación realizada.

En la primera parte de la obra, el apuntalamiento en cabeza de las pantallas se hizo con vigas prefabricadas. Pero, en seguida, se cambió el procedimiento constructivo a losa "in situ" (o relleno de material expansivo entre pantallas y vigas), ya que ese sistema no es muy adecuado para cortar los movimientos en cabeza.

Los problemas principales en esta zona de la ciudad fueron:

- Estabilidad de las excavaciones, para lo que se estudiaron los contenidos adecuados de bentonita y se controlaron los excesos de hormigón en las pantallas (gravas), las mezclas adecuadas de espumas en el frente de la tuneladora (MENDIÑA y otros, 2008), los sistemas convenientes para perforar los paraguas en gravas en el túnel bajo San Bernardo (inyección con jet a baja presión), etc.
- Posibles afecciones al nivel freático general (definido por el Río Guadalquivir), para lo que se realizaron "portillos" en zonas de pantallas, para permitir el paso del flujo subterráneo y o crear efecto "embalse", con el consiguiente levantamiento a un lado y asiento al otro de esa barrera.
- Movimientos originados por las excavaciones (a cielo abierto y subterráneas) y su posible repercusión en edificios próximos o servicios (colectores). Dado el entorno urbano, este problema ha sido al que más atención se le ha prestado, para lo que se creó una unidad especial de segui-

miento y control técnico (SEVICOT), encargada, entre otros temas, de la instrumentación de toda la obra y su seguimiento informático. En la Fig. 8, se muestra un ejemplo de esta instrumentación, tanto con hitos y extensómetros de varilla instalados en el terreno como con regletas instaladas en fachadas de edificios. Para estudiar la posible repercusión de las excavaciones sobre los edificios próximos, aparte de estimar los movimientos que podrían originarse, se hizo una doble inspección del estado de los edificios (en Proyecto y durante la construcción), analizando su tipología estructural, sus posibles anomalías, su sensibilidad estructural, etc., a fin de definir el grado de riesgo estructural que podían introducir las excavaciones. Así se estableció un plano de nivel de riesgos (rojo, con alto riesgo, amarillo con riesgos ligeros y verde sin riesgo, Fig. 9).

- El paso del Río. Realmente el Río Guadalquivir se pasó por encima, con una estructura metálica empujada, con apoyos sobre pilotes (perforados al abrigo de islas artificiales). En este caso, tal como hacen los sevillanos del centro de su ciudad, nos referimos al paso de la dársena o cauce histórico.

Para resolver algunos de estos posibles problemas, se han realizado diversos tratamientos del terreno, de lo que se habla a continuación.

#### 4. Tratamientos del terreno

##### 4.1. Entrada y salida de estaciones y pozos de ataque

Hemos distinguido una serie de tratamientos o refuerzos del terreno entre los que se han llevado a cabo durante la construcción de la Línea 1 del Metro de Sevilla, por ser los más significativos.

Todos estos tratamientos han sido diseñados por el grupo asesor a la Concesionaria y U.T.E. constructora, con los consiguientes planos y pliegos de condiciones antes de ser encargados a las empresas especializadas que los han llevado a cabo, (TECNASOL y GEOCISA). Además se han atendido a las sugerencias de estas empresas y a las condiciones que imponían la realización de la obra, los condicionantes geométricos, etc. En todos los casos han teni-

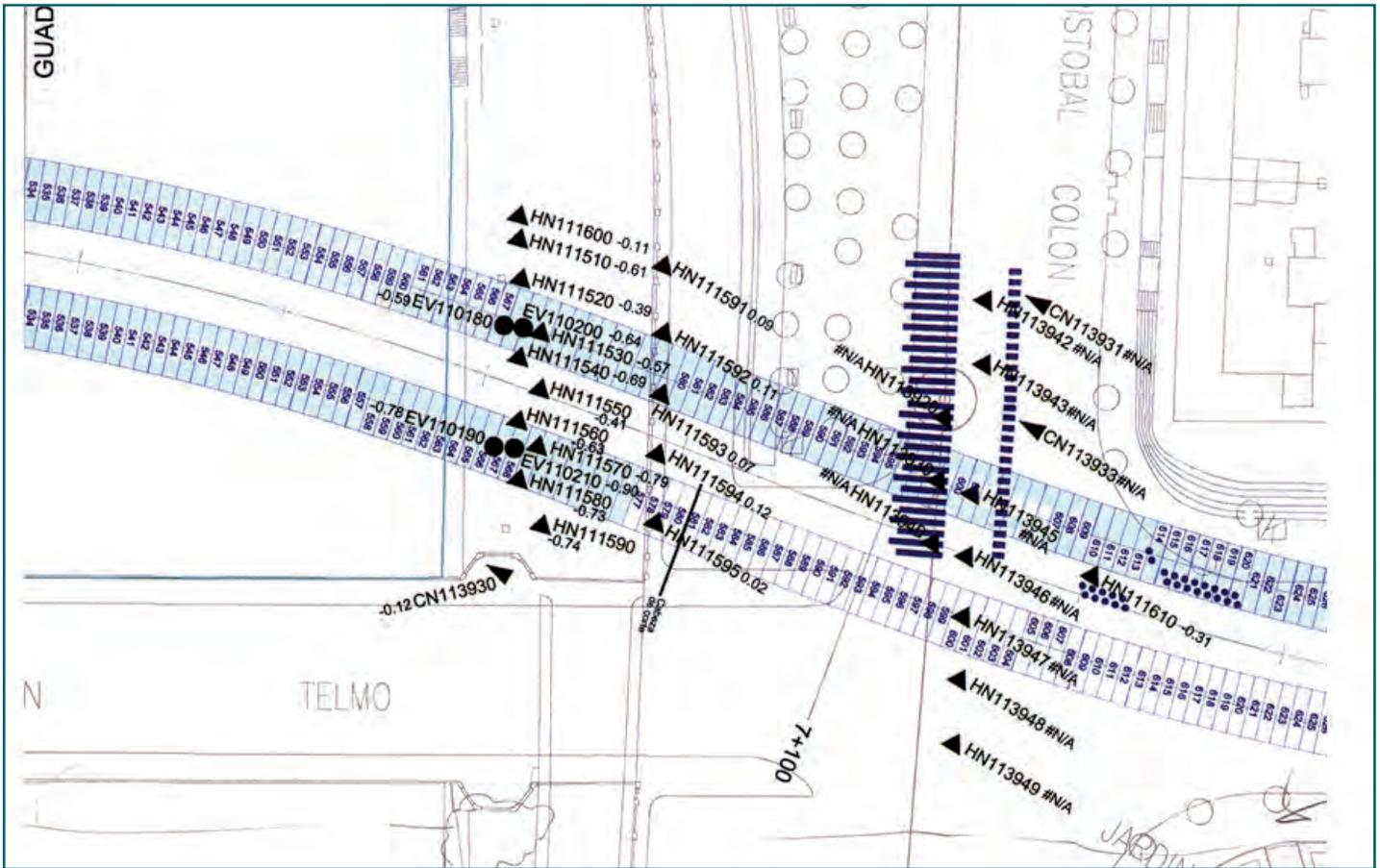


Fig. 8. Ejemplo de instrumentación del terreno superficial y edificios próximos a los túneles.



Fig. 9. Inspección de edificios.

do el visto bueno del Ente Ferrocarriles de la Junta de Andalucía, a través de sus representantes directos y de su asesor geotécnico, D. José M<sup>o</sup> Rodríguez Ortiz, el cuál añadía sus acertados comentarios y sugerencias (aunque en el caso del paso bajo el Río su intervención tuvo más peso que simples sugerencias).

En el caso de las salidas y entradas de las tuneladoras en las estaciones o pozos de ataque, se presentaba un doble problema:

- Dado que parte de la pantalla (a demoler) no llevaba armadura, no podía resistir los empujes del terreno y agua.
- El agua, además de presionar sobre la pantalla, podía entrar en la estación o pozo de ataque al romper la pantalla.

Este doble problema se resolvió con una doble actuación:

- La realización de un "corralito", hecho con pantallas continuas de mortero y hormigón de baja resistencia (sin armar). Agotando el agua, con pozos, en su interior, se puede romper la pantalla sin producir inundación del agua que se filtra a través de las gravas. Para eso ha de tener una longitud (según el eje del túnel) algo mayor que todo el escudo de la tuneladora (Fig. 10). Una vez introducido éste en el "corralito", se podía sellar bien (anillo de hormigón armado o gunita armada de considerable espesor) el hueco que se hace en la pantalla de la estación o pozo de ataque. Al mismo tiempo, con el achique antes de excavar la zona de la estación se consigue que la pantalla de ésta no tenga empujes del agua.
- Reforzando el terreno dentro del "corralito", con pilotes de mortero, lo que da una "cohesión aparente" al terreno del trasdós de la pantalla de la estación o pozo de ataque. Si se supone la línea que define la cuña de empuje activo (Fig. 11), dicha línea cortarí a los pilotes, y habría que tener en cuenta su resistencia al corte para determinar los empujes sobre la pantalla.

#### 4.2. Efecto de posibles asientos en la zona de la Avda. de República Argentina

La tuneladora E.P.B., al salir del Pozo de Ataque situado en la Estación de Parque de los Príncipes, tenía

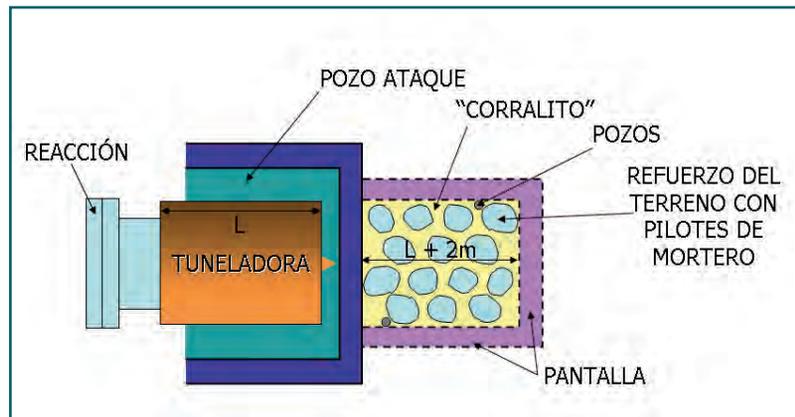


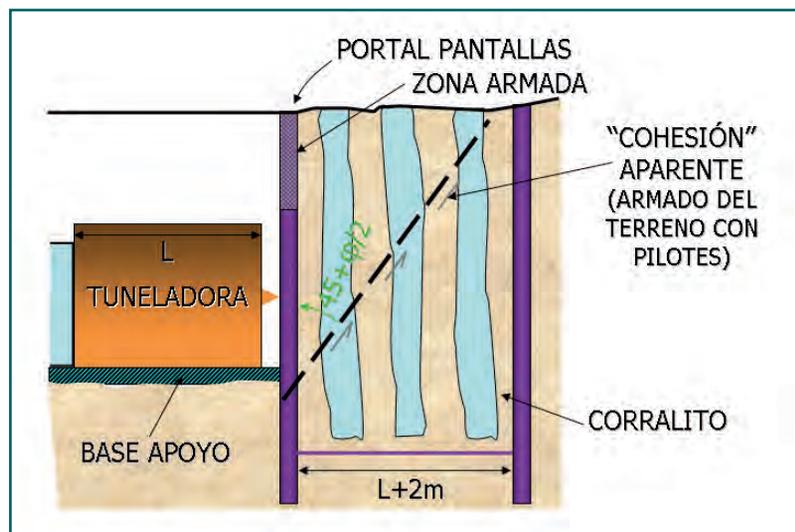
Fig. 10. "Corralitos" de entrada y salida de las estaciones y pozos de ataque.

que perforar el primer túnel bajo la Avenida de República Argentina, sin ninguna experiencia sobre el tema. Posteriormente, una vez llegada a San Bernardo, volvió a perforar un segundo túnel (el sur), paralelo al anterior.

Los asientos superficiales que induce la excavación son funciones de varios condicionantes: El diámetro de la perforación (de su cuadrado), del terreno perforado, de la "presencia" o no de cohesión en la zona inmediatamente por encima de la clave del túnel, de las presiones que aplica la cámara E.P.B. al terreno, del mortero que se inyecta para rellenar el "gap" entre excavación y revestimiento, así como de su reología (deformabilidad y tiempo de fraguado), etc.

En la Fig. 12 se ha presentado un esquema de una tuneladora del tipo E.P.B. y con los asientos que se pueden producir, los cuales van a depender del tiempo que se tarde en rellenar los dos "gap" o huecos que se van dejando (el 1º, entre la cabeza de corte y

Fig. 11. "Corralito" de entrada y salida en estaciones. Alzado.





el escudo; el 2º entre el escudo y el revestimiento). Si la inyección del mortero de relleno es rápida y fragua suficientemente rápido, se rellena el gap-2 y los asientos serán menores que en el caso de una inyección lenta y fraguado retardado. Pero hay que tener en cuenta que sobre las dovelas queda, en general, la formación de gravas sin cohesión, por lo que tienden a decomprimirse y a rellenar el gap; por este motivo la inyección puede llegar (si es lenta) a rellenar sólo parte de ese gap-2.

Ello puede tener como consecuencia que, si las operaciones no se hacen con mucho cuidado, con un mortero adecuado y alta velocidad de inyección, los asientos pueden variar extraordinariamente. En la Fig. 13 se ha dibujado un esquema de cuánto puede variar el asiento en estos casos, en función del tiempo del relleno y del tiempo para el fraguado del mortero. En ese esquema se indica que si este fenómeno se produce al cabo de pocas horas el asiento puede ser inferior al 15% del asiento que se puede inducir si no se tiene cuidado, si el mortero no es fluido y tarda algún día en fraguar.

Prueba de este fenómeno lo dan los valores registrados sobre el eje del primer túnel excavado, a lo largo de la Avenida de República Argentina (Fig. 14). Los asientos inicialmente medidos fueron de hasta unos 140 mm (sobre el eje del túnel), que fueron bajando poco a poco, a medida que la máquina trabajaba mejor (tuvo problemas a poco de empezar a perforar) y se mejoraba la inyección del mortero, bajando a 2-4 cm (siempre sobre el eje). Cerca de Plaza de Cuba (Fig. 14), en que también la máquina tuvo problemas (de hecho, gracias a la existencia de un pozo de revisión, se comprobó el mal estado de su cabeza y hubo que sacarla para arreglarla en taller durante unos seis-siete meses), también se indujeron asientos importantes (30 a 70 mm, sobre la clave del túnel).

Sin embargo, una vez reparada la cabeza y cruzada la Dársena, los asientos sobre la clave del túnel fueron siempre inferiores a 15 mm. Con el segundo túnel (que se excavó con una cabeza nueva y con diseño corregido sobre el anterior) los asientos fueron siempre de milímetros (5-10). Más detalle sobre estos problemas y las operaciones de perforación pueden verse en MENDAÑA y otros (2008).

En definitiva, cuanto más prioridad se dé al relleno del hueco (inyección rápida y fraguado no lento) menos se decomprimirá el terreno alrededor del túnel y menores serán los asientos.

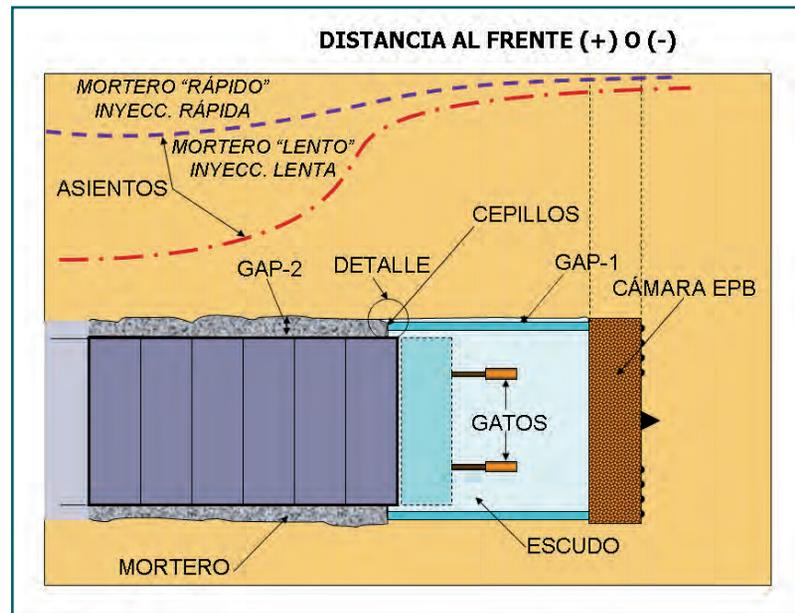


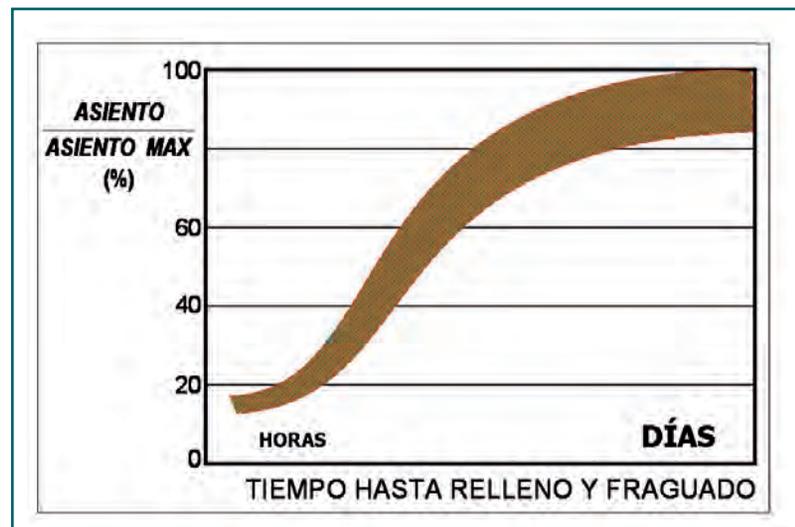
Fig. 12. Efecto de la inyección de mortero en los asientos.

Por todos estos motivos, por los análisis teóricos efectuados y el hecho de que algunos edificios sevillanos no estaban en su "mejor momento", se decidió realizar protecciones masivas de los mismos.

En la Fig. 15 puede verse la protección que se realizó en la Avenida de República Argentina: Barreras inclinadas de jet-grouting, constituidas por dos filas de taladros (separadas 0,70 m) y ejecutadas con presiones del orden de 250-300 bares y admisiones de unos 300 Kg de cemento por m.l.

Gracias a ello, los asientos sobre el eje del primer túnel pudieron ser grandes, con algún ligero daño en el pavimento. Pero en los edificios los asientos fueron

Fig. 13. Influencia en los asientos del tiempo hasta el relleno y fraguado del mortero.



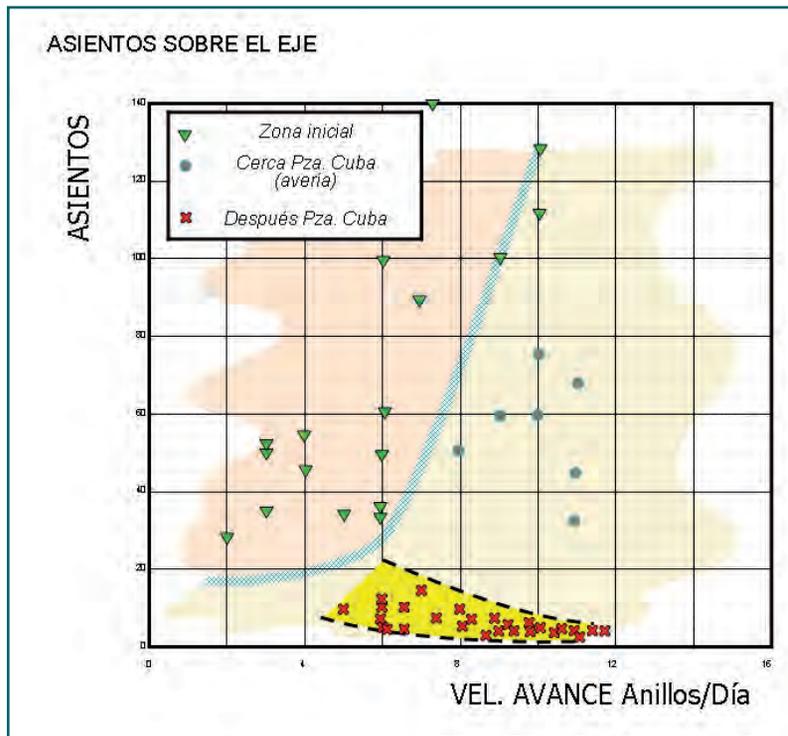


Fig. 14. Asientos en Av. República Argentina.

de algunos milímetros, tal como se muestra en las Figs. 16 y 17. El tratamiento de las barreras de jet-grouting "corta" las leyes de asentamientos (con su máximo, en principio, a igualdad de condiciones de excavaciones en los túneles) que pueden calcularse sin tratamiento y disminuye fuertemente los asentamientos al otro lado de las barreras de jet-grouting (Fig. 16).

En la zona de Plaza de Cuba se estudió la afectación a:

- Un aparcamiento (el de Plaza de Cuba), bajo parte del cuál han pasado los túneles.
- Edificios próximos (sobre todo Plaza de Cuba nº 5).
- Un restaurante - Río Grande - instalado sobre el talud de la margen derecha de la Dársena, que ya se encontraba algo fisurado (según informe que aportaron antes de acercarse el túnel).

En el caso del edificio próximo (de más de ocho alturas) se hizo una protección con barrera de jet-grouting, similar a la de República Argentina, aunque - en este caso - fué doble: Una larga y casi-vertical y otra más corta e inclinada, salvando el colector próximo, a fin de proteger claramente a este edificio singular.

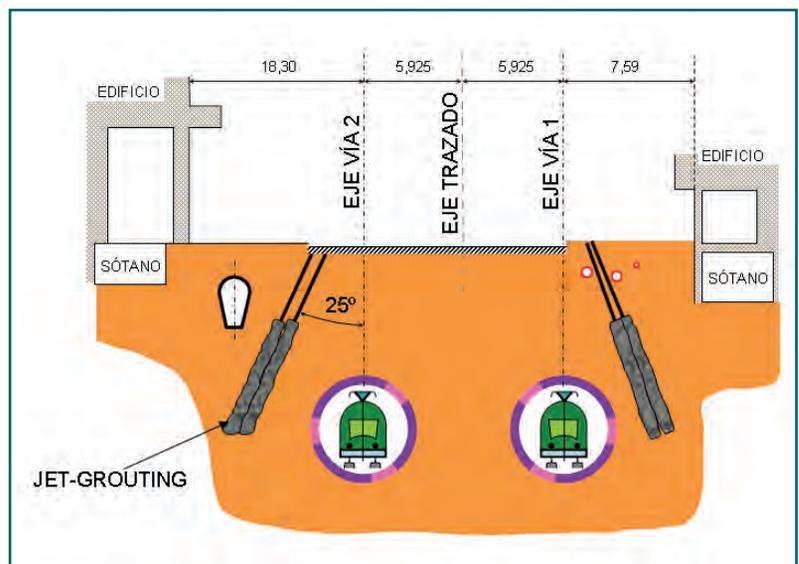
Previamente, se hicieron varias previsiones de asentamientos. Por ejemplo, en la Fig. 18 aparecen las previ-

siones que se llevaron a cabo, tanto con un sistema sencillo (el Modelo semiempírico, M.S.E., de Sagasetta y Oteo, 1974; OTEO y SAGASETA, 1982), como con un sistema sofisticado (FLAC 3D de diferencias finitas). El Modelo semiempírico permite estimar los asentamientos debidos al paso de un primer y un segundo túnel (y el efecto amplificador de éste sobre su clave, al excavar un terreno ya decomprimido), así como estimar los asentamientos si hay tratamiento (aplicando un coeficiente corrector del orden de 0,2-0,3, según la rigidez del terreno). Como se aprecia, el FLAC-3D da asentamientos algo mayores, aunque no excesivos. Para las fachadas de Plaza de Cuba nº 5 y de "Río Grande", los asentamientos con tratamiento (barrera de jet-grouting) llevan a asentamientos inferiores a 5 mm.

Los movimientos medidos en la zona de Río Grande - pero sobre el primer túnel - son inferiores a 5 mm tal como muestra la Fig. 19, lo cuál implica que en la fachada del edificio del Restaurante (que estaba a unos 8 m del eje del primer túnel) fueron inferiores a 3-4 mm. Previamente, entre el túnel y el restaurante se intercaló una pantalla de jet-grouting.

En cuanto al aparcamiento, se hizo un tratamiento doble de "tienda de campaña" (V invertida), desde el interior del propio aparcamiento, desde su 2ª planta (Fig. 20). Esta se sitúa inmediatamente sobre el nivel freático y se apoya en una losa de hormigón armado. Para estimar los movimientos del terreno, se le hizo un modelo con el FLAC-3D. Estas modelaciones fueron llevadas a cabo por Adolfo Pérez de Albéniz y su equipo de Intecsa-Inarsa.

Fig. 15. Protección de edificios (Av. República Argentina).



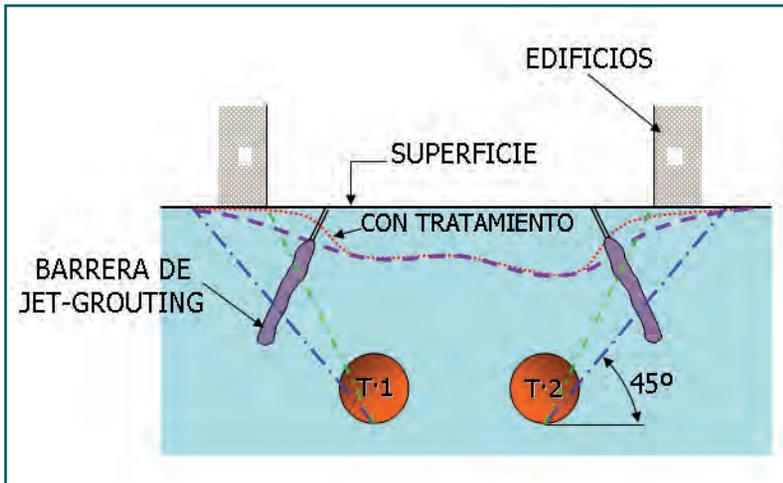


Fig. 16. Leyes de asentamientos con y sin tratamiento (Av. República Argentina).

La realidad fué: Los primeros taladros dieron levantamientos importantes, probablemente por el hecho de que gran parte de la energía aportada por el jet-grouting se transmitía al agua, lo cual hacía que se levantara la losa en puntos próximos al taladro (algunos centímetros). El problema se solucionó con taladros "de alivio". De esa forma, los asentamientos finales de pilares y losa de segunda planta fueron afectados por este proceso, por lo que quedaron algo elevados respecto a su posición inicial. Por ello, los asentamientos medidos fueron pequeños: Del orden de 3 mm. Teniendo en cuenta que fueron levantados, el descenso total si fué similar al previsto de unos 7-8 mm (para el primer túnel). Para el segundo túnel se añadió un asentamiento pequeño (2-3 mm).

#### 4.3. Paso del Cauce Histórico

En el Canal se detectó un pequeño recubrimiento de arenas y limos (menos de 3 m) y una apreciable potencia de gravas (unos 10 m) sobre las "margas". Los túneles iban a excavarse con su sección prácticamente en su totalidad en las gravas (Fig. 21). Se tenía miedo de que las gravas estuvieran muy flojas y que se produjera un socavón por el que penetrara el Guadalquivir en el túnel.

Finalmente se apostó por una solución simple: Un recubrimiento superficial a base de: a) Una "manta" geotextil rellena de microhormigón. b) Por encima unos 40 cm de hormigón (Fig. 21).

Se pretendía, así, que las posibles filtraciones hacia el túnel tuvieran que recorrer un largo camino, con lo que los caudales podrían ser asumibles (si había un accidente) y que las sobrepresiones no

serían grandes. Realmente, el trazado anterior había discurrido en gravas y no se produjo ninguna chimenea (aunque si había un espesor mayor de arenas-limos-arcillas sobre las gravas), aunque la permeabilidad de las gravas fuera igual que en la zona del Río.

El hormigonado de la losa se hizo con la ayuda de una pontona y camiones-bomba sobre el Puente de San Telmo próximo (Fig. 22). Se instaló una instrumentación, a base de unas placas sobre la losa de hormigón y unas pértigas móviles que podían apoyarse en ellas (con ayuda de hombres-rana), de forma que pudiera darse cota a las mismas desde las orillas. No se observó ningún asentamiento apreciable (aunque el error de medida era de  $\pm 5$  mm), ni ninguna rotura. El primer túnel pasó sin problemas en Septiembre de 2006, en menos de catorce días (200 m de excavación) y el segundo en once días (Noviembre, 2007). Más detalles pueden verse en MENDAÑA y otros (2008).

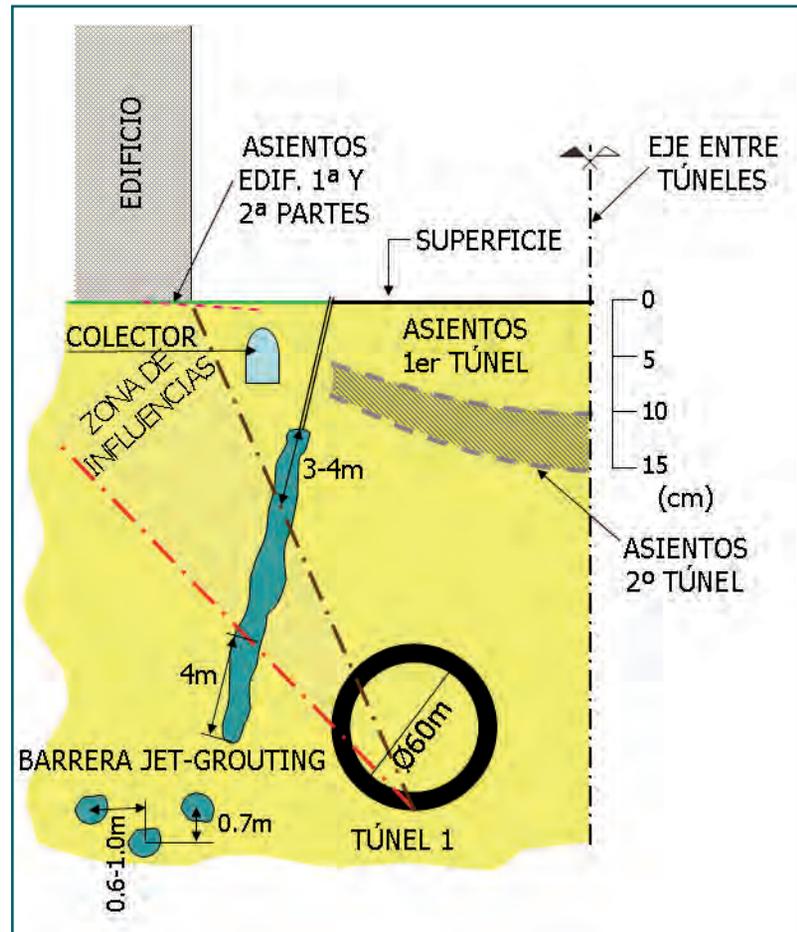


Fig. 17. Asentamientos en edificios de Av. República Argentina.



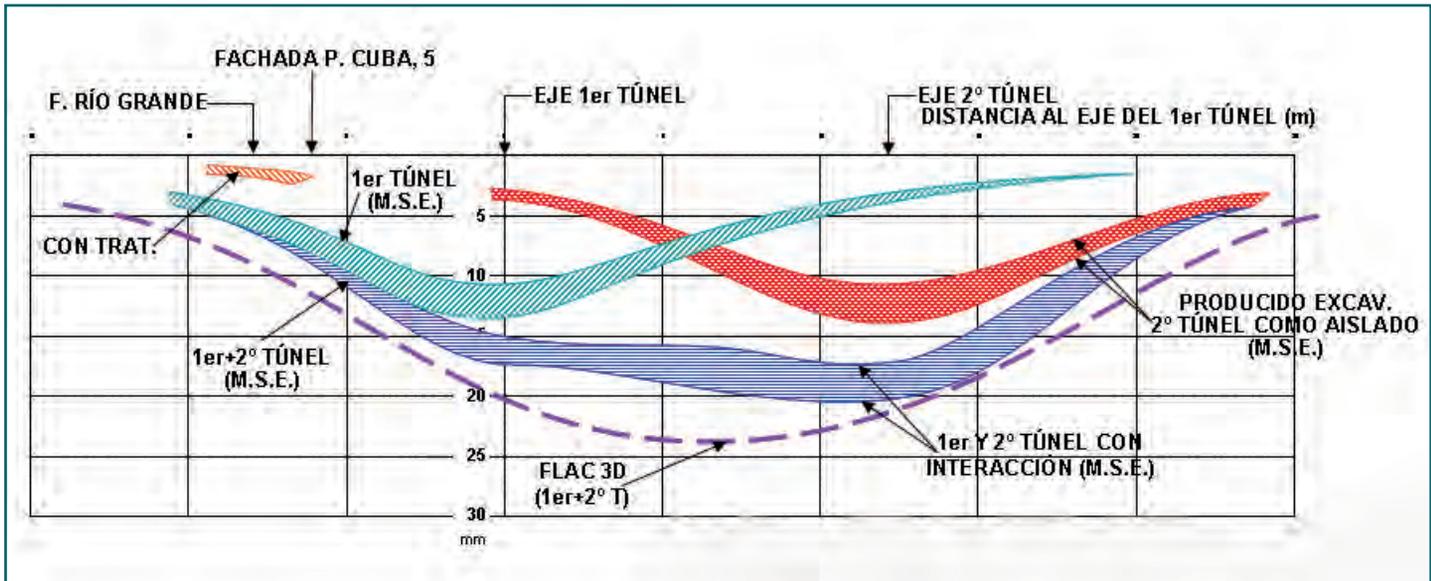


Fig. 18. Asientos en superficie previstos para el paso de uno y dos túneles en la zona de la Plaza de Cuba.

#### 4.4. Otros tratamientos

En la Calle de San Fernando, los túneles, iban paralelos, por un lado, a varios edificios y, por otro, al Hotel Alfonso XIII y a la antigua Fábrica de Tabacos (Hoy rectorado de la Universidad de Sevilla). En esa zona, relativamente cerca de la superficie, existen ruinas árabes y el cauce del Arroyo Tagarete. Velazquez pintó varias parejas de enamorados, en barca, navegando en este Arroyo, que hoy día, está "canalizado" con una estructura abovedada enterrada, sin solera, a la que van a parar diversos vertidos,

aparte del drenaje fluvial natural. Por eso, junto a los edificios está el cauce del Tagarete, con un importante espesor de fangos (Fig. 23), recubiertos por rellenos antrópicos. La presencia de las ruinas y de los fangos fué la responsable del cambio de ubicación de la Estación de Puerta de Jerez, que se situaba, inicialmente, en esta calle.

Para proteger los edificios se diseñó una barrera doble, formada por dos filas de taladros. La más próxima a los edificios se hizo de jet-grouting y la más alejada (separada de la otra 0,70 m) se hizo con micropilotes, armados con tubo metálico, del ti-

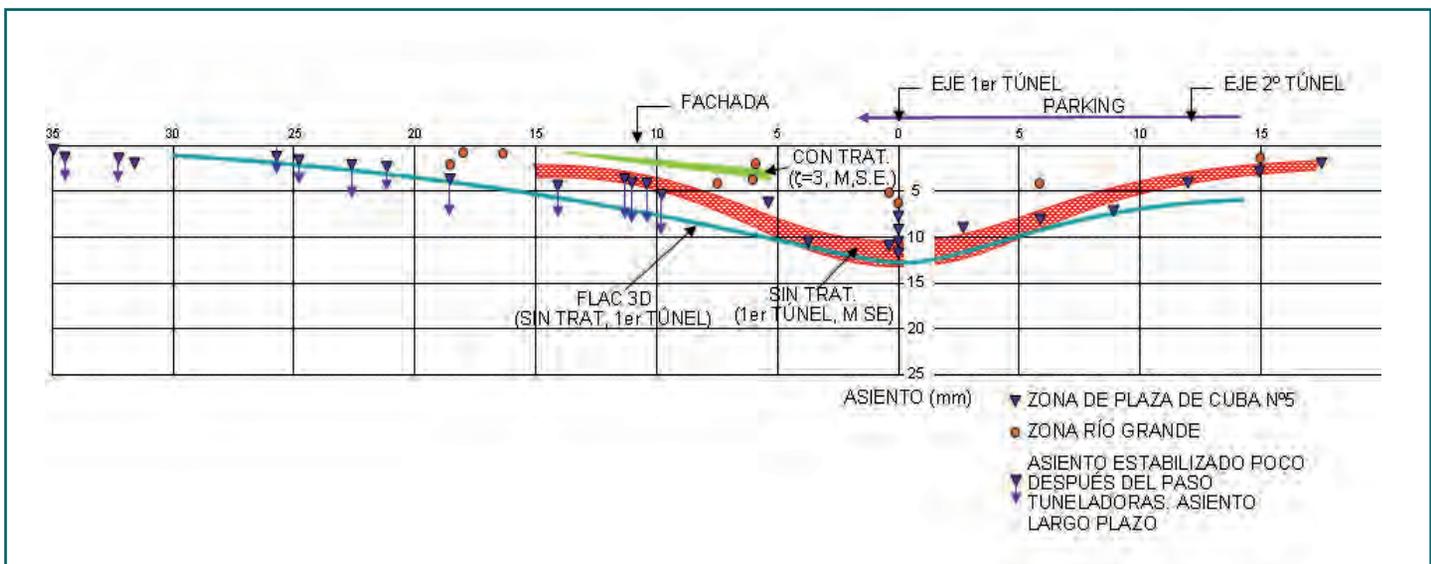


Fig. 19. Asientos medidos en los alrededores de la Plaza de Cuba.

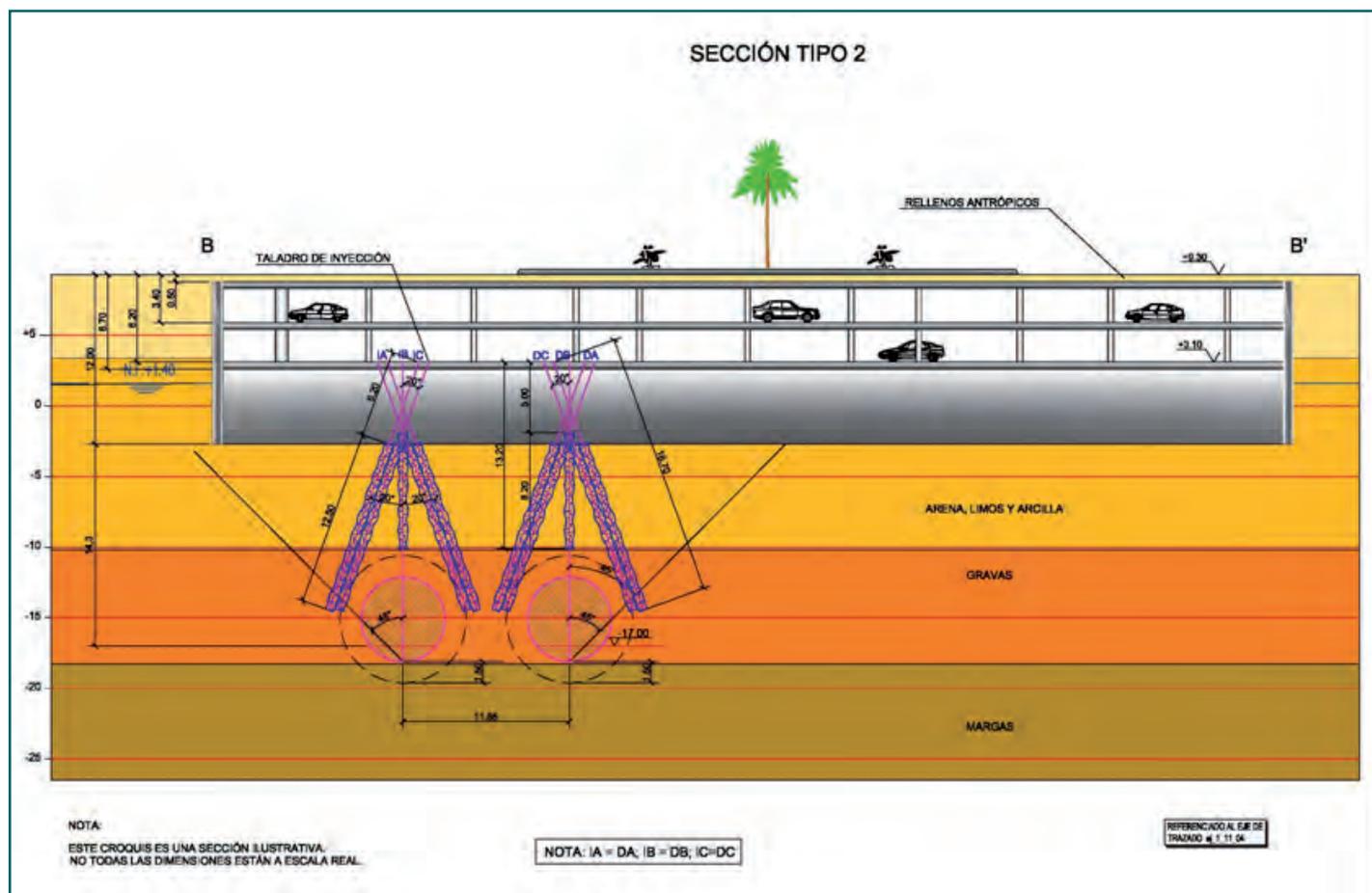


Fig. 20.  
Aparcamiento  
en la Plaza de  
Cuba.

po IU. Se pretendió “reforzar” y “armar”, así al terreno entre túnel y edificios. En este caso hubo que tener mucho cuidado con la perforación y la inyección, al atravesar fangos, ya que un excesivo uso de fluido refrigerante, de inyección o de presión originaban asientos. Aunque hubo algún informe en la prensa sobre daños en los edificios, todos los que había se detectaron previamente y estaban registrados ante Notario (durante las dos campañas de estudio de edificios que se hicieron en proyecto y en obra) y no se pusieron de manifiesto nuevos daños (algunas fisuras estaban instrumentadas y pudo comprobarse este punto).

Como ya hemos indicado anteriormente, los “portillos” intentan evitar el “efecto embalse” al construir las pantallas continuas hasta las “margas” y en dirección oeste-este (el flujo del agua, principalmente, es Norte Sur).

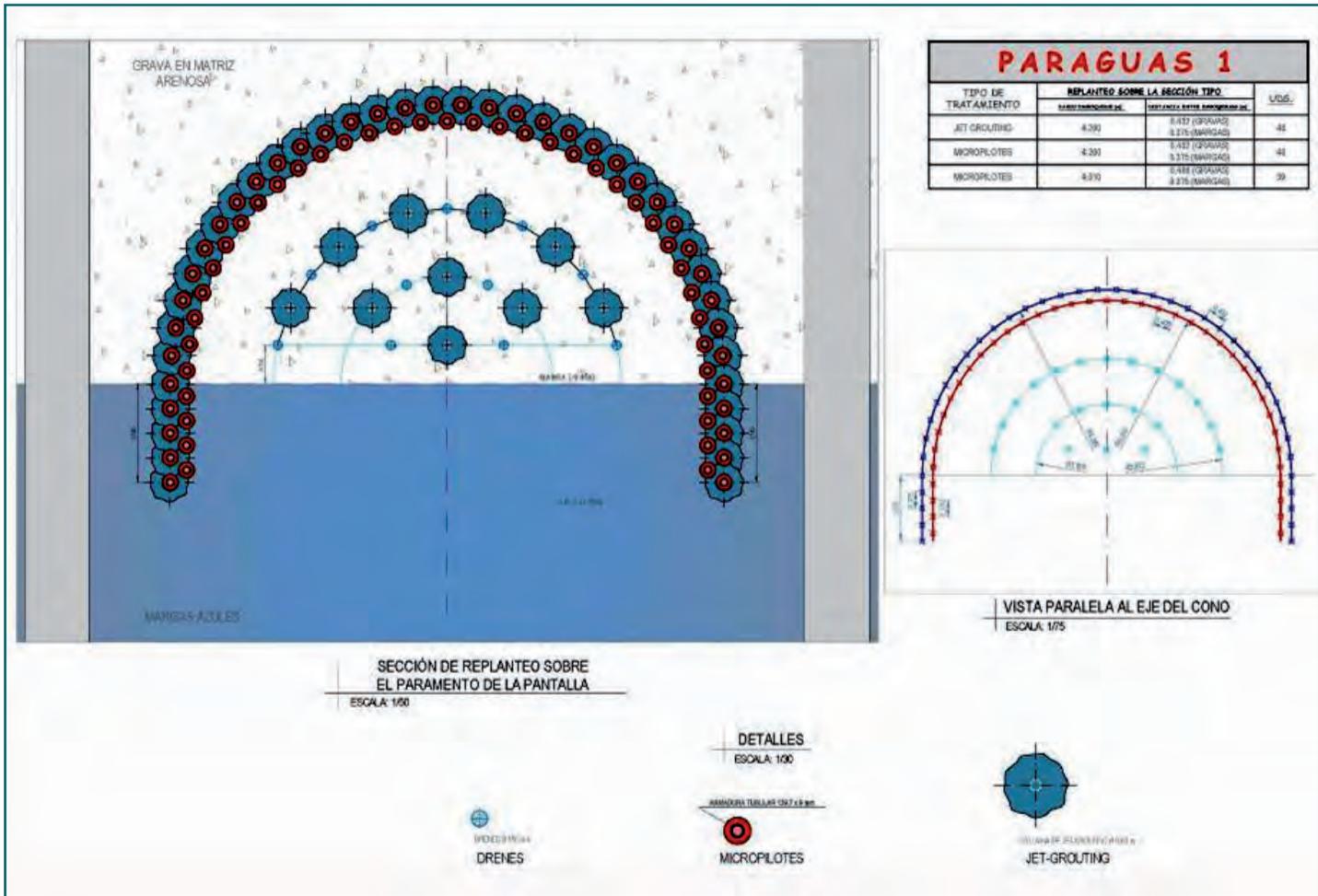
La solera de la obra se dejó en gravas, con unas pantallas laterales cortas en una cierta longitud (unos 30 m), con un tratamiento previo, tipo tapón,

de jet-grouting-3 masivo (antes de excavar). Fuera del portillo, las pantallas son largas y alcanzan hasta las “margas”, con dos cierres laterales de jet (transversales al eje del túnel).

En la Fig. 24 se ha esquematizado una solución tipo “portillo”, que ya aplicamos en Sevilla en el Ferrocarril Santa Justa a la Salud, en la zona de Portacoe-li, hacia el año 90. También se ha aplicado esta solución en el Metro de Valencia.

Para situar bien los “portillos” (tres en total) se hicieron, previamente, estudios hidrológicos con modelos de interacción flujo-terreno.

El primer “portillo”, cerca de República Argentina, falló y penetró agua y terreno por la zona del fondo de la excavación, provocando un pequeño socavón de 2x1x0,5 m. Consideramos que este fallo se debió más a problemas en el control de la ejecución que a fallo de diseño (columnas de jet-3 con los ejes a 0,95 m, aproximadamente). No se tuvo en cuenta que en alguna zona se perdía el rechazo y que hubiera tenido que ser más reforzada. Pero este



cieron los túneles con la .E.P.B. y por el lado este, como había una estación (sobre la que se construyó un edificio para la Universidad de Sevilla), se siguió con pantallas continuas, reservando la zona bajo las instalaciones de A.D.I.F. para un sistema de excavación subterránea diferente.

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. 26): 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. 26).

Fig. 26. Paraguas de Jet-Grouting y de micropilotes. Sección Transversal.

Este tratamiento hubo que hacerlo en tres fases, dada la presencia de las pantallas continuas del tren de A.D.I.F. (Figs. 27), de forma que se hicieron tres conos de tratamiento (Fig. 28).

Después de cada tratamiento (completado por cuatro pozos de seguridad perforados en la solera del túnel superior), se realizaban algunos taladros de drenaje en el frente a excavar, para eliminar el agua del interior del recinto que se acababa de crear. A continuación se excava el túnel en dos fases: Avance y destroza, con retroexcavadora, colocando un sostenimiento de chapa Bernold y gunita.

Durante todo el proceso, se mantuvo instrumentado el túnel de San Bernardo, con electroniveles (para tener lectura continua de movimientos) y referencias topográficas clásicas (que se leían algunas noches, como comprobación). Se podía, así, controlar los movimientos de la vía y comparar con los establecidos como admisibles previamente (Fig. 29). Realmente, con estos movimientos verticales de las





Fig. 28. Perforación de un segundo paraguas.

vías se deducían los cambios de peralte y alabeo, que son las magnitudes que importan para el tráfico ferroviario, que no hubo que cortar en ningún momento. Como se vé en la Fig. 29 los movimientos de la vía fueron ascendentes, provocados por la realización del "paraguas". Los asentamientos al excavar fueron prácticamente despreciables.

### 6. Reconsideraciones

Se ha pretendido, en estas líneas, pasar una revisión rápida a los principales problemas geotécnicos del terreno realizados durante la construcción de la Línea 1 del Metro de Sevilla.

Evidentemente hubo que resolver algunos problemas concretos más (salida de la tuneladora del

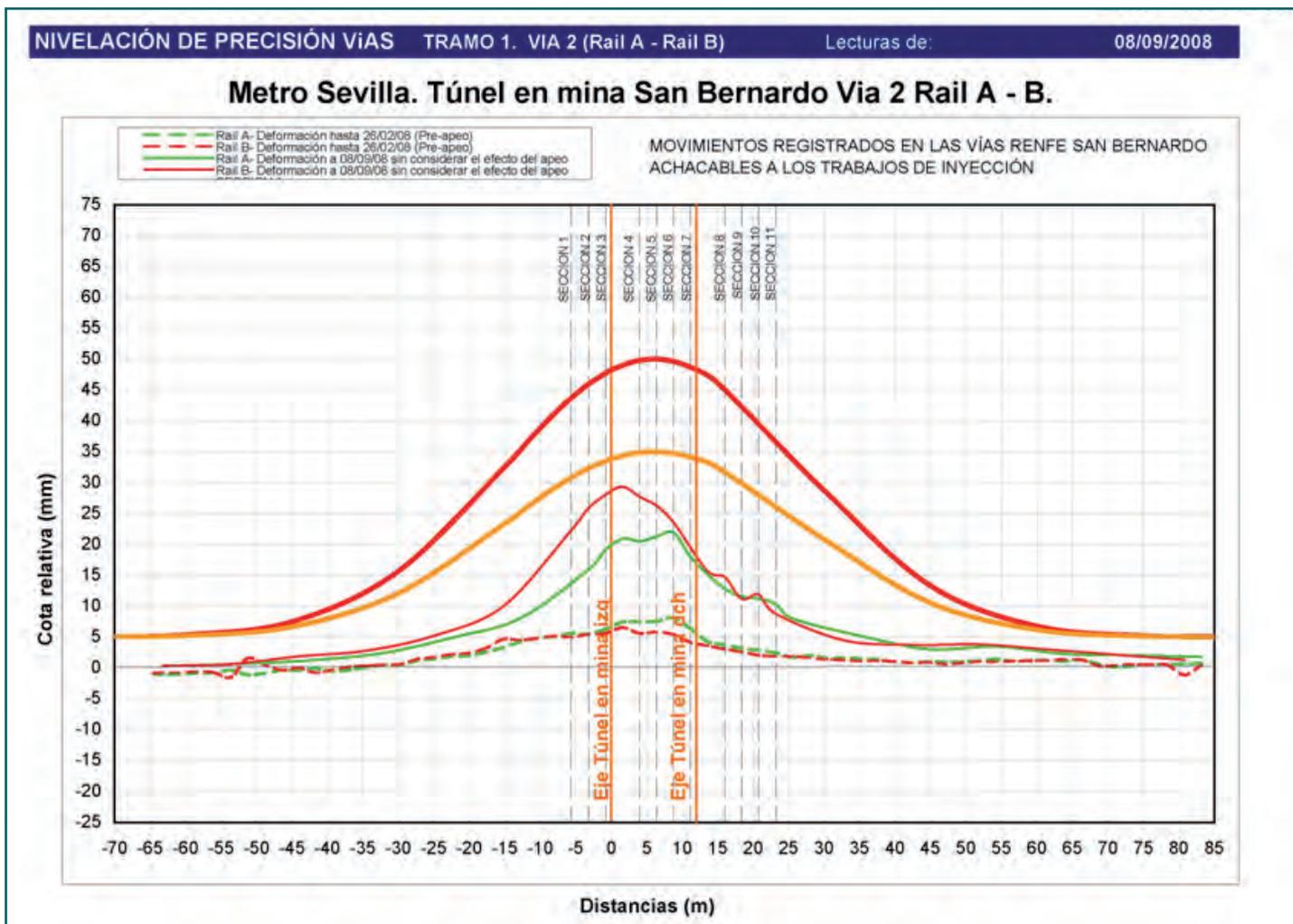


Fig. 29. Perfil de la vía del ferrocarril (Septiembre 2008).

pozo de revisión de Plaza de Cuba, zona de salida del Pozo de Ataque de Parque de los Príncipes para la segunda tuneladora, problemas con un prisma telefónico en República Argentina, estación de Puerta de Jerez, etc.), pero el ir relatando todos esos problemas llevaría a una extensión excesiva para estas páginas.

Todo esto constituye una parte de la actividad geotécnica que ha habido que desarrollar en el entorno de Sevilla para conseguir la puesta en servicio de la Línea 1 y que va desde las primeras experiencias de 1974-75 hasta los problemas resueltos a finales de 2008: Determinación de características y parámetros representativos del terreno, definición de procesos constructivos, proyecto de instrumentación, análisis de cimentaciones de estructuras (entre ellas, los puentes construidos y la posible afección de obras de tierra a puentes existentes próximos), etc.

Se quiere resaltar la necesidad de un seguimiento constante, de una interpretación continua y de una definición clara de los tratamientos del terreno (con proyecto definido por parte de los técnicos al servicio de la Propiedad, que tenía a su cargo las obras), etc. El SEVICOT encargado de esta tarea, ha dado, en nuestra opinión, un resultado excelente.

## 7. Agradecimientos

Los autores de estas líneas quieren expresar su agradecimiento a Ferrocarriles de la Junta de Andalucía (Teofilo Serrano, José Luis Nores, Rafael García Candau, Martín Fernández y José M<sup>o</sup> Rodríguez Ortiz), a la Concesionaria Metro de Sevilla (Ricardo Álvarez), a la U.T.E. Metro de Sevilla (Juan Antonio Marín, Carlos Martínez, Pedro Gómez, Eduardo Cabeza y José Ignacio Sanz) y, especialmente a SEVICOT (Francisca Ruiz, Javier Oteo, Alicia Elorza y Manuel Hermosin), por toda la colaboración y comprensión prestada, así como a todos los técnicos de la U.T.E. y de las empresas especializadas (Geocisa y Tecnasol) que han puesto todo su empuje en esta gran labor para que, al fin, haya sido una realidad. Un agradecimiento especial va para Adolfo Pérez de Albeniz, proyectista de diversas estaciones. Por último, no querríamos olvidar a los que, en épocas pasadas, hicieron posible las primeras obras del Metro de Sevilla: Plácido Álvarez Fidalgo, José M<sup>o</sup> García González, Vicente Olalla, José Aponte, Manuel Santacruz, Juan Vicente Cabezas, José Antonio Rein, Santiago Uriel, Jorge Royo, Jose A. del Río, Pedro Sola... A todos, muchas gracias por vuestro apoyo y enseñanza. ♦

### Referencias:

-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 y SAGASETA, C. (1982) "Predictions of settlements due to underground openings". Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Durgar, Pyer & Studer eds. Zurich, pp. 653-59.  
-OTEO, C.; REIN, J. A. y SOLA, P. (1997) "Tassements occasionnés par l'excavation des ga-

res souterraines du Metro Sevilla". Colloque International Sols-Structures. Paris.  
-OTEO, C. y SOLA, P (1993) "Stability problems in slopes constructed on Spanish Blue marls". Proc. Int. Symp. on Indurated soils and soft rocks. Atenas.  
-OTEO, C. (1994) "Posibles métodos constructivos para la Infraestructura". Pasado y Futuro del Metro de Sevilla. Univ. de Sevilla. Secretariado de Publicaciones. Serie: Arquitectura n<sup>o</sup> 16, pp. 123-51.  
-OTEO, C.; SANTACRUZ, M. y MOYA, J. F. (1986) "Behaviour of the cast-in-situ walls in the Sevilla Metro" Int. Symp. on Large Underground Openings. I.T.A. Florence.

-SAGASETA, C. y OTEO, C. (1974) "Análisis teórico de la subsidencia originada por la excavación de túneles" 1<sup>er</sup> Simp. Nacional sobre Túneles. Madrid. Vol. 1. Comunicación II.10.  
-URIEL, S. y OTEO, C. (1976) "Propiedades geotécnicas de las Margas Azules de Sevilla". Simposio Nacional sobre Rocas Blandas. Madrid. Vol. 1, pp. 227-36.  
-URIEL, S. y OTEO, C. (1979) "Measurements in an experimental tunnel bored in the Sevilla Blue Marls and recommendations for the Subway design". Proc. 4<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics. Montreux.