

**NUEVA ESTACIÓN SUBTERRÁNEA DE PUERTA DEL SOL
CONSTRUCCIÓN, TRATAMIENTOS DEL TERRENO Y
AUSCULTACIÓN REALIZADA**



José Manuel Gutiérrez Manjón

FCC Construcción, S.A.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA NUEVA ESTACIÓN
3. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO
 - 3.1 Parámetros Geotécnicos
4. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAVERNA DE ANDENES
 - 4.1 Modificación de la sección transversal de Proyecto
 - 4.2 Fases Constructivas
5. CÁLCULOS REALIZADOS
6. AUSCULTACIÓN DISPUESTA
7. EJECUCIÓN DE LA OBRA Y SEGUIMIENTO DE LA AUSCULTACIÓN
 - 7.1 Excavación y sostenimiento de galerías
 - 7.2 Tratamiento de impermeabilización en los niveles arenosos
 - 7.3 Tratamiento de compensación de asientos
 - 7.4 Excavación interior de la Caverna y ejecución de la Mezanina
 - 7.5 Seguimiento de la auscultación
 - 7.5.1. Piezometría
 - 7.5.2. Asientos en superficie y en Metro Línea 2
 - 7.5.3. Movimientos en el túnel de Línea y en la Caverna
8. RESUMEN DE CONCLUSIONES
9. AGRADECIMIENTOS

**NUEVA ESTACIÓN SUBTERRÁNEA DE PUERTA DEL SOL
CONSTRUCCIÓN, TRATAMIENTOS DEL TERRENO Y AUSCULTACIÓN REALIZADA**

1. INTRODUCCIÓN

La estación de Puerta del Sol forma parte de la nueva conexión ferroviaria para Cercanías de 8.500 metros de longitud que ha construido el Ministerio de Fomento entre las estaciones de Atocha y Chamartín en Madrid. En la **figura nº 1** se muestra un esquema de la citada conexión.

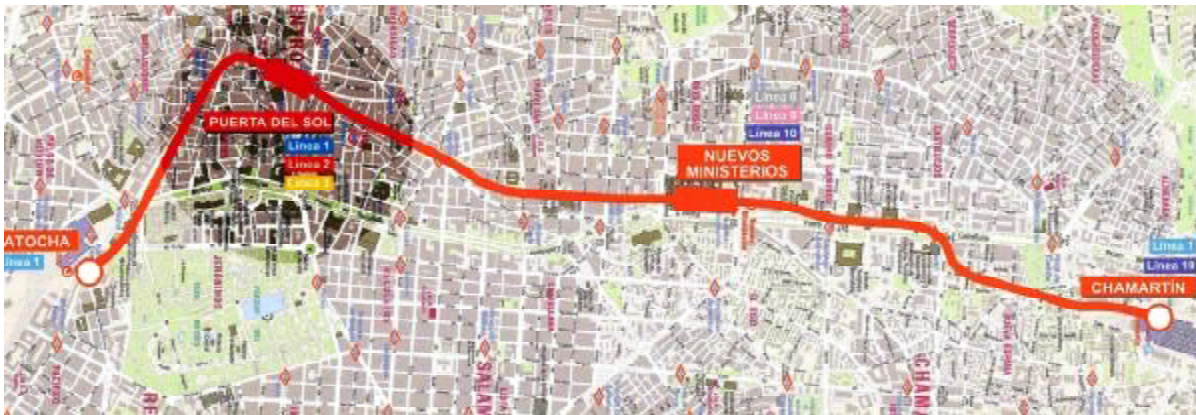


Figura nº 1. Conexión Atocha-Chamartín

Las obras para la estación se iniciaron en la primavera de 2004 y en el momento actual se encuentran prácticamente finalizadas a falta de los trabajos de arquitectura e instalaciones.

En el artículo se comentan el proceso constructivo, los tratamientos de inyecciones de impermeabilización y compensación llevados a cabo y el control de auscultación realizado.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA NUEVA ESTACIÓN

El trazado correspondiente a la Estación de Puerta del Sol discurre sensiblemente en paralelo a la calle de la Montera y a lo largo del mismo intercepta a la calle De La Aduana y termina próximo a la calle Jardines.

La nueva estación comprende dos partes principales. Una de ellas es la Caverna de andenes que tiene 207 metros de longitud, 26,75 metros de ancho y 17 metros de altura. En planta se extiende desde la Puerta del Sol hasta la calle Jardines. La sección transversal se divide en dos niveles: la zona inferior de andenes y la superior denominada "mezanina". La otra parte de la estación la constituye el vestíbulo de acceso que permite la correspondencia con Metro y que se sitúa en su totalidad bajo la Puerta del Sol. En la **figura nº 2** se presenta en una planta una Infografía de lo que suponen la Caverna de andenes y el vestíbulo.



Figura nº 2. Planta de situación de la obra

La Caverna se excavó relativamente próxima y paralela a la Línea 1 del Metro (situada bajo la Calle Montera) y por debajo de la Línea 2 con la que se cruza en la zona próxima al Vestíbulo de Sol.

Asimismo, numerosos servicios y galerías subterráneas se vieron afectados por las obra, como era de esperar en una zona urbana de estas características. En la zona de Puerta del Sol se encontraron los restos arqueológicos correspondientes a la cimentación de la antigua iglesia del Buen Suceso, lo que obligó a la paralización temporal de la obra y al traslado provisional de los restos. Éstos quedarán finalmente emplazados en el vestíbulo de la Estación donde permanecerán expuestos.

La Caverna de andenes, ejecutada en mina, tiene una sección de excavación total de unos 375 m². La clave de la bóveda se sitúa bajo el nivel de la calle a una profundidad variable entre 14 metros en la zona de la Puerta del Sol y 21 metros en su extremo opuesto. En la **figura nº 3** se muestra una sección transversal de la Caverna de andenes.

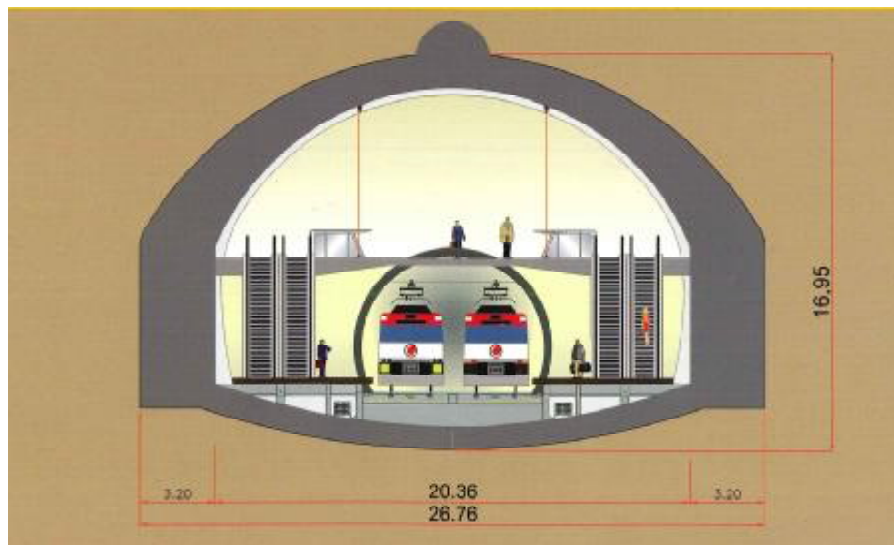


Figura nº 3. Sección transversal de la Caverna

El vestíbulo, que se encuentra en fase avanzada de construcción, se resuelve mediante un recinto de pantallas de hormigón de unos 40 metros de profundidad y una serie de pilas-pilote

que alcanzan una profundidad aproximada de 48 metros, habiendo sido ambos elementos ejecutados desde superficie. La excavación o vaciado posterior se realiza en varios niveles una vez completada la losa de cubrición situada en la superficie. En la **figura nº 4** se muestra una sección transversal del vestíbulo de Puerta del Sol con la indicación de los distintos niveles que se han proyectado.

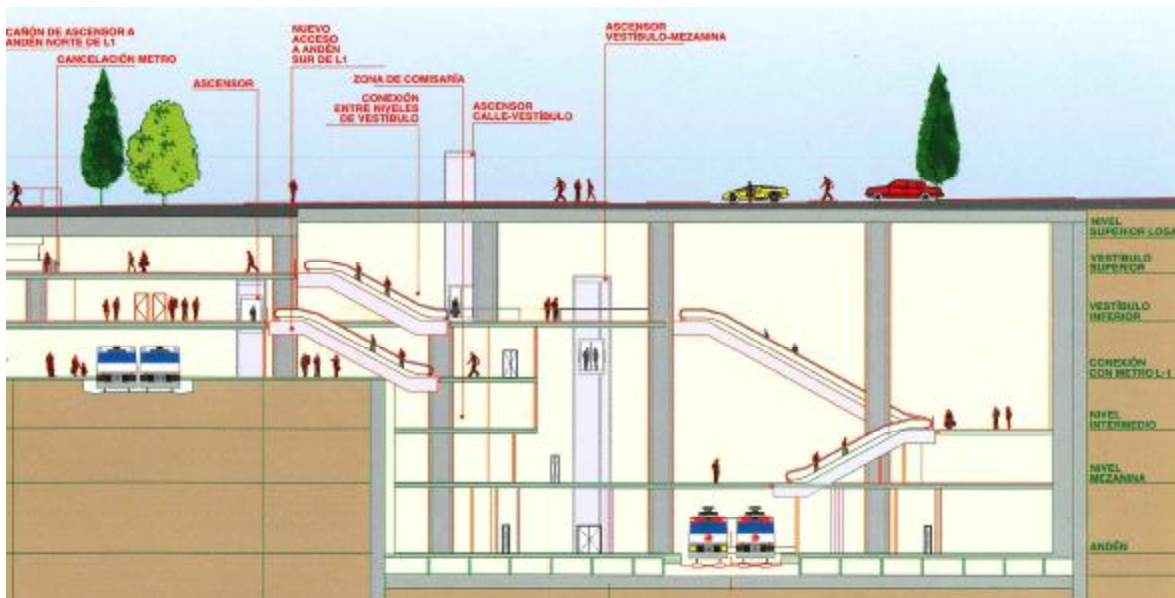


Figura nº 4. Sección transversal del vestíbulo en Puerta del Sol

3. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

Siguiendo la dirección de la Estación, la superficie del terreno asciende con una pendiente del orden del 3% - 4% desde la zona de la Puerta del Sol hacia Gran Vía. Las cimentaciones de las edificaciones existentes están situadas a una altura variable entre 7 y 18 metros por encima de la bóveda de la Caverna.

El terreno está constituido por las típicas formaciones cuaternarias y pliocenas del Subsuelo de Madrid. En la **figura nº 5** se presenta el perfil geológico por el eje de la Caverna obtenido en la fase de Proyecto a partir de una investigación geotécnica exhaustiva que ha permitido definir de forma precisa las diferentes unidades geotécnicas y condiciones hidrogeológicas del terreno.

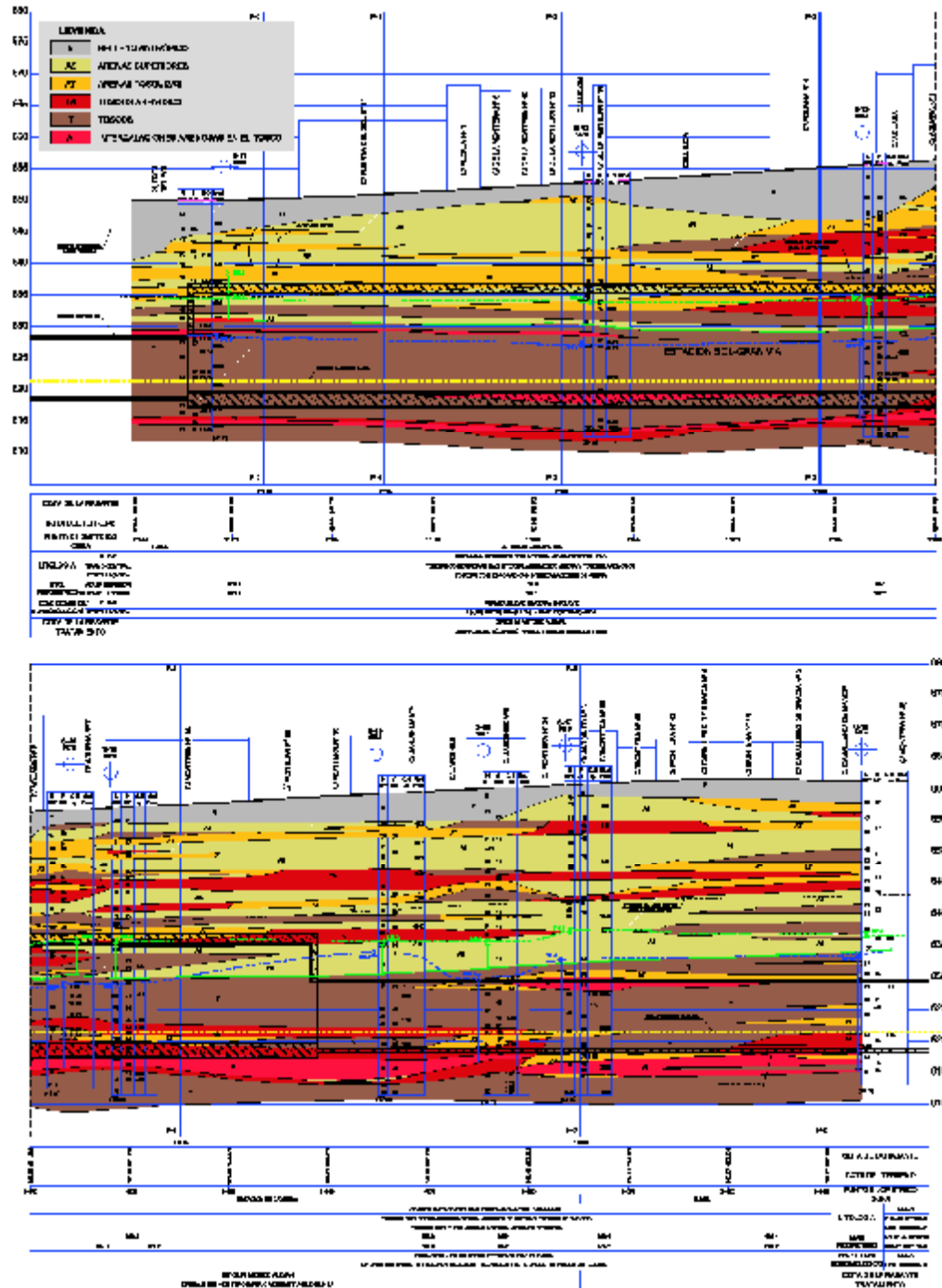


Figura nº 5. Perfil Geológico Longitudinal de la Caverna

En profundidad, cabe distinguir 3 niveles geotécnicos principales. El nivel superior lo constituyen rellenos antrópicos con espesores variables de 2 a 8 metros y está formado básicamente por materiales arcillo-arenosos de compacidad media a baja ($N_{SPT} = 6 - 14$).

Debajo existe un segundo nivel constituido ya por terrenos pliocenos, que tiene un espesor variable entre 15 y 25 metros y que presenta un predominio de las arenas de miga y subniveles de arenas tosquizas con algunas pequeñas intercalaciones de toscos. Se trata de suelos compactos con valores de $N_{SPT} = 30 - 60$ y con rechazo en bastantes tramos.

La base de este nivel detrítico se sitúa ligeramente por encima del arranque de la bóveda de la Caverna donde se encuentra también un nivel de agua (Cota 638 en Zona Gran Vía y cota 634 en Puerta del Sol).

La zona de hastiales y contrabóveda de la caverna se ha excavado en el tercer nivel geotécnico distinguido y que alcanza el resto de la profundidad reconocida con los sondeos. Está formado principalmente por los típicos materiales arcillosos conocidos como toscos, existiendo también algunas intercalaciones de arena de miga (una de ellas de espesor métrico). El tosco aparece en general muy compacto $N_{SPT} > 50$. Un segundo nivel de agua se detectó dentro de un nivel permeable de arenas de miga que alcanza una cota piezométrica inferior a la que corresponde al nivel superior detectado en la base del tramo suprayacente de arenas de miga (cota 634 en el extremo Gran Vía y cota 628 en el de Puerta del Sol).

Asimismo, a cotas superiores se han detectado algunos niveles "colgados" de agua dentro de los materiales granulares más permeables excavados principalmente en la zona de la bóveda.

3.1 Parámetros Geotécnicos

A partir de los numerosos ensayos realizados durante la fase de investigación geotécnica y a las experiencias disponibles sobre los suelos de Madrid, se adoptaron en Proyecto como parámetros geotécnicos básicos los que se indican en la **tabla 1**:

Unidad	g (t/m ³)	c' (t/cm ²)	f	E (MPa) (H. optima)	E (MPa) (H. pésima.)	n
Rellenos antrópicos	1,95	0,5	28	15	12,5	0,35
Arena de Miga	2,05	0,5	38	80	50	0,3
Arena Tosquiza	2,1	3	31	100	60	0,3
Tosco Arenoso	2,1	3	31	100	60	0,3
Tosco	2	4	30	300	150	0,3

4. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CAVERNA DE ANDENES

La magnitud de la sección transversal de la Caverna, el bajo recubrimiento y la existencia de edificaciones en superficie planteaban dificultades constructivas especiales. En la fase de Proyecto se consideraron diversos procesos constructivos. Todos ellos consistían, en líneas generales, en dividir la sección de la Caverna en otras más pequeñas que se irían ejecutando y sosteniendo de forma consecutiva hasta completar la sección total.

Se optó finalmente por el denominado "Método Alemán" del que existían precedentes en Madrid y cuyas últimas realizaciones habían sido la estación de Argüelles en la Línea 6 del Metro y la de Guzmán El Bueno en la Línea 7. Básicamente, el método consiste en seguir un proceso ordenado de excavación y hormigonado de galerías sucesivas en hastiales y bóveda, que se acometen con procedimientos mineros tradicionales.

En primer lugar, se ejecutan los dos hastiales a lo largo de la Caverna y una galería superior en la clave de la futura bóveda. A continuación, desde uno de los extremos de la Estación se van realizando en retroceso de forma consecutiva la excavación y hormigonado de las galerías transversales que van siguiendo la directriz de la bóveda ("costillas"). Posteriormente se inicia el vaciado interior y parcial de la Caverna, para finalmente proceder a ejecutar por bataches la excavación y hormigonado de la contrabóveda.

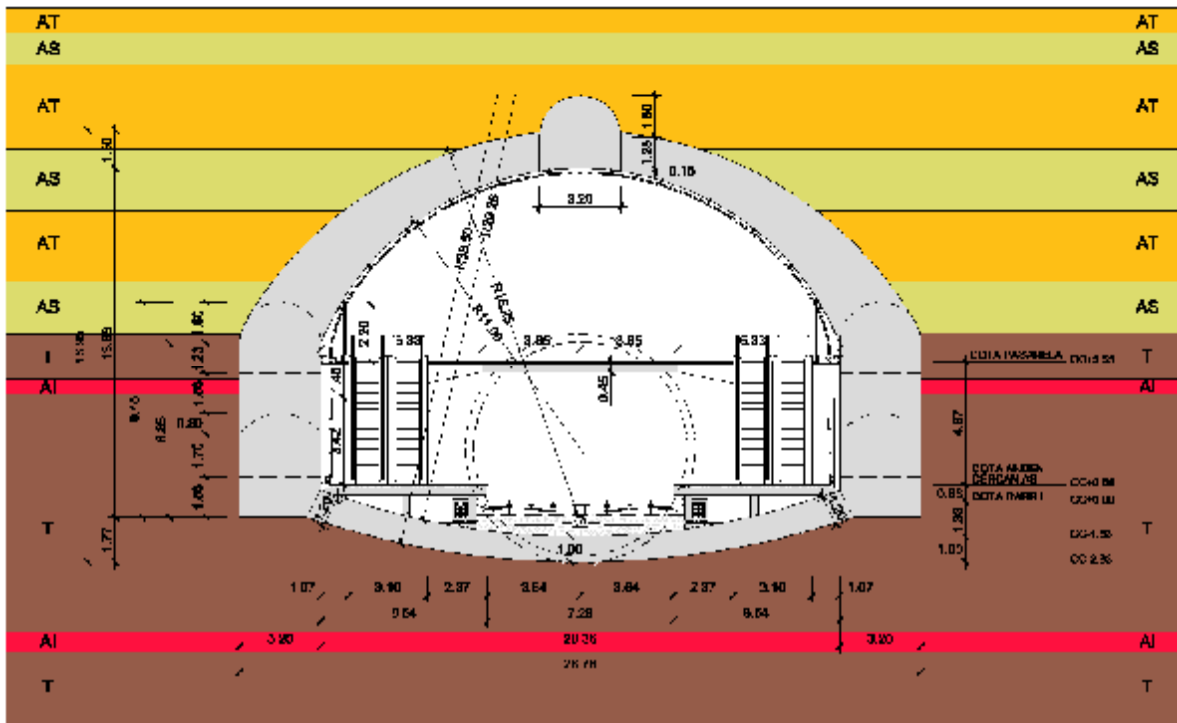
4.1 Modificación de la sección transversal de Proyecto

La sección transversal del Proyecto tenía los hastiales con una altura total de unos 12 metros e iba dotada de un refuerzo con armaduras extendido a la zona superior de dichos hastiales (2 m) y al arranque de la bóveda (4 m) donde, de acuerdo con los cálculos realizados, se producían fuertes compresiones en el intradós (≈ 17 MPa) y tracciones en el trasdós ($\approx 1,5$ MPa). El refuerzo consistía en una doble capa de $\phi 25$ a 15 en ambas caras.

Para la ejecución de los hastiales el Proyecto consideraba la excavación en su zona alta de una galería longitudinal de $\approx 4,5$ m de altura que se profundizaba posteriormente hasta el nivel de base por medio de pozos prismáticos de planta rectangular y de $\approx 7,5$ metros de altura ejecutados de forma alterna. La altura total de los hastiales era de ≈ 12 metros.

Teniendo en cuenta las dificultades constructivas que planteaba la elevada altura de los hastiales (pozos de 7,5 m de profundidad y de excavación manual con necesidad de entibación) así como la necesidad de tener que reforzar la zona de confluencia de hastiales y bóveda, se decidió, en la fase inicial de la obra, estudiar una nueva sección transversal de la Caverna en la que se disminuía la altura y espesor de los hastiales y, al mismo tiempo, se reducía el radio de curvatura de la bóveda y contrabóveda.

El estudio comparativo entre la sección de Proyecto y la sección modificada se hizo mediante un cálculo en 2D de elementos finitos con el programa Plaxis y aplicando en ambos casos las mismas hipótesis (perfiles del terreno, parámetros de los materiales, relajación de tensiones, etc.) y el mismo proceso constructivo.



4.2 Fases Constructivas

En la **figura nº 7** se resumen de forma esquemática las fases de excavación, hormigonado y tratamientos de la Caverna de Andenes. Tal y como se observa en dicha figura, durante la ejecución de las primeras galerías por los hastiales, entre las fases 1 y 2 que se indican, fue cuando tuvo lugar el paso del escudo EPB perforando el túnel de línea a lo largo de la zona central de la Caverna.

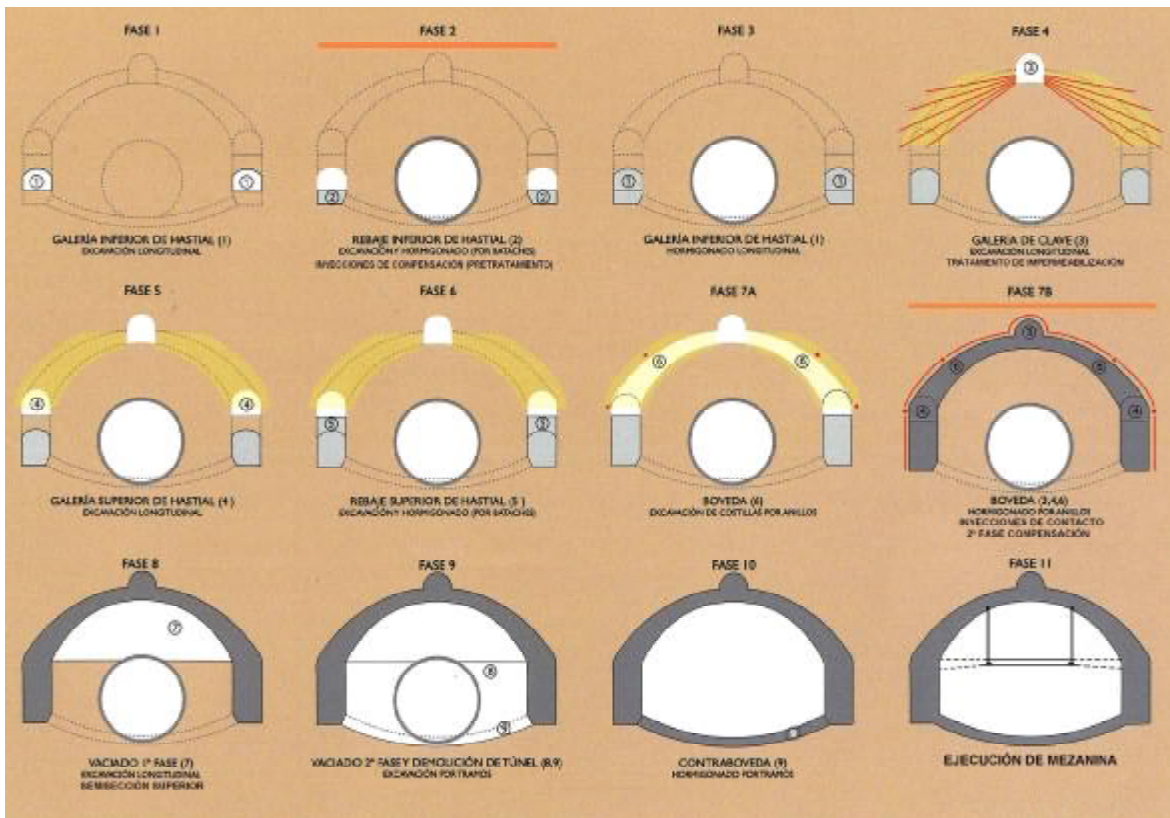


Figura nº 7. Fases Constructivas

Durante la ejecución de las galerías inferiores de hastiales (fases 1 y 2) se realizó la primera fase de las inyecciones de compensación (pretratamiento con relleno de huecos en el terreno y puesta en carga inicial).

Una vez concluida la excavación y hormigonado de la bóveda así como las inyecciones de contacto en su trasdós, se inició la segunda fase de las inyecciones de compensación (fase 7B). La decisión sobre el momento de inicio de esta segunda fase de compensación y su extensión espacial y temporal se tomó de acuerdo con los datos de asientos proporcionados por la auscultación. Dicho momento estuvo en correspondencia con el que resultaba más adecuado en los cálculos que se hicieron al comienzo de la obra (simulando los efectos que en los asientos producía el tratamiento de compensación) y se situó entre el final de la excavación, hormigonado e inyección de contacto de la bóveda, y el comienzo del vaciado interior de la Caverna.

Durante las fases iniciales de la obra se intentó realizar sin éxito la descarga del acuífero superior a través de drenes y pozos tal y como se contemplaba en el Proyecto. No haberlo logrado planteaba serias dificultades para la excavación de las galerías superiores de los hastiales y, especialmente, para las galerías transversales de la bóveda ("costillas") pues ambas se situaban en los materiales más permeables con predominio de las arenas de miga.

Esta circunstancia condujo a la necesidad de intentar realizar un tratamiento de impermeabilización de las arenas por medio de inyecciones de gel de silicato, actividad ésta que no estaba prevista en el Proyecto.

Con la cota a la que se encontraba el agua fue posible ejecutar en condiciones secas la excavación de la galería superior situada en la clave de la bóveda. Desde esta galería se procedió a realizar el tratamiento del terreno con inyecciones de gel de silicato en sentido descendente y extendiéndolo a la futura zona de bóveda y parte superior de hastiales (fase 4).

Por otra parte, de acuerdo con los cálculos realizados, no era posible completar a lo largo de la Caverna una buena parte de su excavación interior para realizar posteriormente el cierre final de la sección transversal con la excavación y hormigonado de la contrabóveda. Hacerlo así, obligaba a disponer entre ambos hastiales de un puntal provisional intermedio que tuviera una capacidad mecánica (sin mayorar) de unas 110 Tn/m. La colocación de dicho puntal dificultaba de manera considerable el proceso constructivo, razón por la que se optó por evitarlo

realizando la excavación interior de la semisección superior en toda la longitud de la Caverna hasta una cota ligeramente inferior a la clave del túnel de línea (fase 8) y, posteriormente, acometer por tramos de 6 a 10 metros de longitud lo que suponía la excavación de la parte inferior, la demolición de las dovelas del túnel y el perfilado y hormigonado de la contrabóveda (fases 9 y 10).

5. CÁLCULOS REALIZADOS

Una vez definida la nueva geometría de la sección transversal de la Caverna, se procedió a realizar un modelo numérico tridimensional que permitiera reproducir la secuencia constructiva de las excavaciones y hormigonado del revestimiento simulando también, al mismo tiempo, las inyecciones de compensación previstas para minimizar los movimientos que se pudieran inducir en las estructuras existentes en superficie. Para ello se contó con la colaboración de **ITASCA** que utilizó el programa de diferencias finitas FLAC 3D, asignando al terreno un modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb y del tipo greenfield (sin introducir la rigidez de los edificios).

La metodología utilizada para simular el efecto de las inyecciones de compensación consiste, básicamente, en provocar un aumento de volumen o expansión de los elementos introduciendo unas presiones ficticias en el mismo a modo de impulsos, y dejando que los elementos vuelvan a un equilibrio mecánico. El proceso se realiza hasta que la deformación volumétrica producida en el elemento sea la correspondiente a una cierta fracción del volumen inyectado.

Se realizaron cálculos con distintas hipótesis sobre el número de fases en las que realizar la compensación, el momento de acometerlas y la intensidad de la inyección expresada en l/m².

En el momento de realizar los cálculos se desconoce el valor real de la eficiencia de la inyección de compensación. Por ello se postula el volumen de inyección necesario para obtener un levantamiento unitario, parámetro éste que depende de muchos factores y cambia de unas zonas a otras, resultando, por consiguiente, difícil de anticipar. Con los cálculos no se pretendía

realmente determinar los volúmenes de inyección necesarios para conseguir una cierta compensación, sino estimar los asentamientos que se producirían en el caso de no llevarla a cabo, así como hallar el momento más adecuado para realizarla.

De estos cálculos se obtuvieron como conclusiones principales:

- Si no se realizaban inyecciones de compensación los asentamientos máximos se situaban entre 15 y 25 mm. Era clara la necesidad de reducir los asentamientos que se generaban en superficie y ello se podía conseguir por medio de la inyección de compensación.
- La fase constructiva correspondiente a la ejecución de la bóveda era la que suponía un mayor incremento de asentamientos (9 – 12 mm).
- No había diferencias significativas entre los resultados que se obtenían con las hipótesis de simulación de la inyección como expansión isótropa y como expansión vertical.

En la **figura nº 8** se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de los máximos asentamientos calculados en la sección del P.K. 1+770 en 3 supuestos diferentes. Dos de ellos realizando dos fases de inyecciones de compensación (caso D con expansión isótropa y caso E con expansión vertical) y el otro supuesto sin realización de la inyección (caso F).

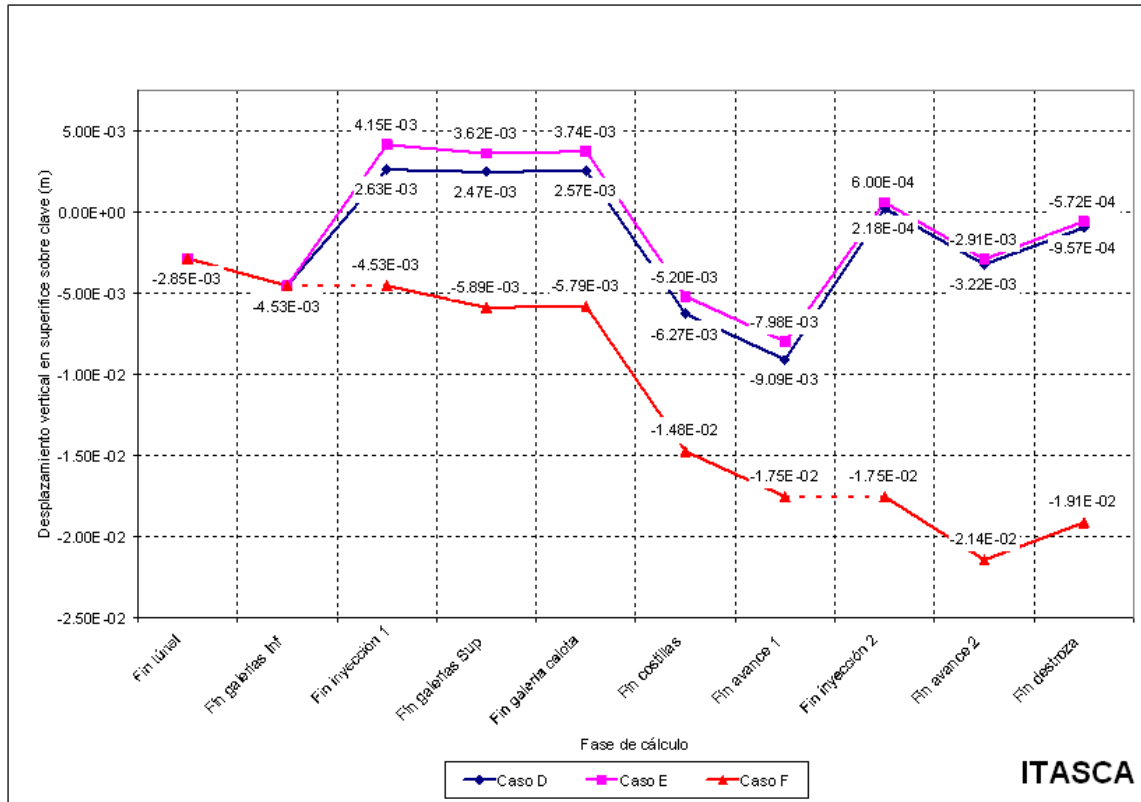


Figura nº 8. P.K. 1+770. Evolución de Asientos en superficie sobre Clave

6. AUSCULTACIÓN DISPUESTA

En la fase de Proyecto se realizó un estudio detallado caracterizando las edificaciones y servicios existentes en el entorno de la Obra. Dicha caracterización se basaba en el riesgo o sensibilidad estructural que las edificaciones afectadas presentaban en función de su tipología y frente a los movimientos o asentamientos que pudieran producirse en sus cimentaciones como consecuencia de las excavaciones de la Estación.

Los cálculos realizados para determinar los movimientos y asentamientos provocados por la obra indicaban que con el método constructivo adoptado, que suponía una subdivisión importante de la excavación y hormigonado del revestimiento en galerías de pequeña sección,

y el tratamiento de inyecciones de compensación previsto, dichos movimientos no produjeron daños importantes en las edificaciones y servicios existentes. Considerando el criterio de Boscarding y Cording (1989) que relaciona el nivel de daños con la pareja de valores de deformación horizontal y distorsión angular, se obtenían categorías de niveles de daños despreciables sin llegar a la consideración de ligeros.

Para poder controlar los efectos inducidos por las excavaciones en el terreno y en las edificaciones existentes, se delimitó una zona de unos 120 metros de anchura centrada en el eje de la obra y de unos 400 metros de longitud extendida a lo largo del vestíbulo y de la Caverna, sobrepasando a ésta hasta llegar a la zona de la Gran Vía. Dentro de esta zona se establecieron del orden de 450 puntos de control de auscultación en lo que se refiere a regletas e hitos de nivelación en superficie y a extensómetros colocados en sondeos. Además se colocaron 5 inclinómetros y 10 piezómetros (localizados dentro de los dos niveles de agua existentes).

En las excavaciones de las distintas galerías se realizó un control de convergencias y movimientos de su sostenimiento, control que también se llevó a cabo en los revestimientos del túnel de Línea y de la Caverna. Asimismo se controlaron los asentamientos inducidos en las Obras de Metro correspondientes a la Línea 1 (regletas) y la Línea 2 (electroniveles).

Por último, para conocer la evolución de algunas fisuras detectadas en el entorno de la Obra se dispuso el correspondiente control de apertura de fisuras.

Los trabajos correspondientes a la implantación y al seguimiento de la auscultación fueron realizados por **GEOCISA**. En los momentos de mayor actividad estuvieron presentes en obra 4 equipos de 2 personas que se encargaban del mantenimiento de los equipos instalados, de la realización de las campañas de lecturas diarias y de la elaboración de informes con carácter semanal.

En la **figura nº 9** se presenta una planta que recoge la auscultación implantada desde superficie y los electroniveles colocados en la Línea 2 de Metro.

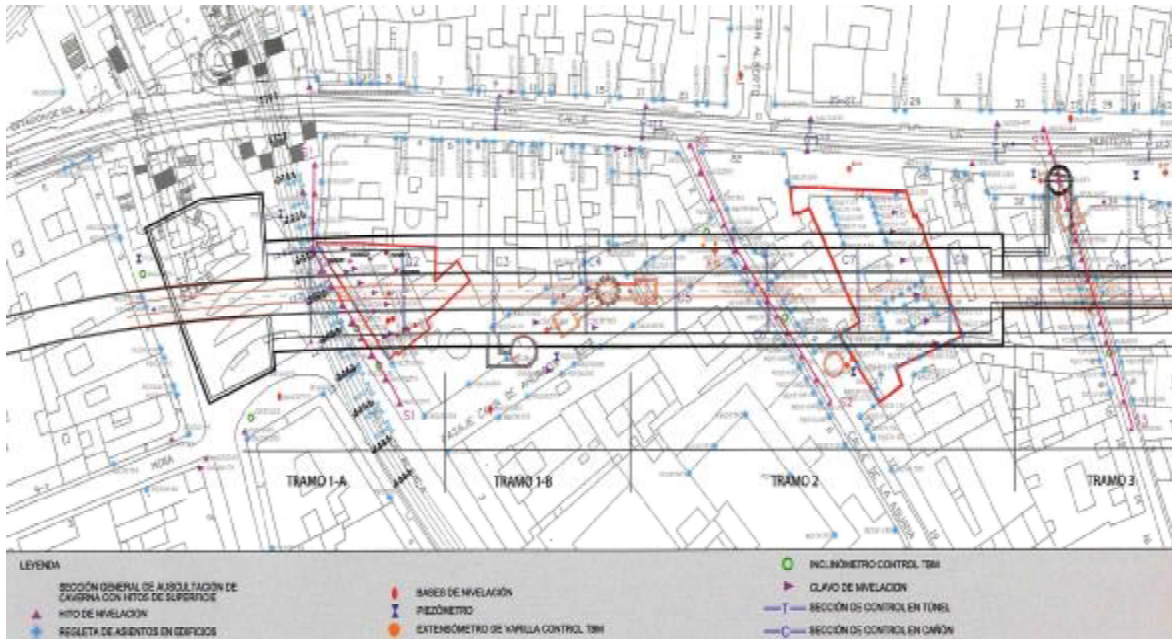


Figura nº 9. Planta de Auscultación en superficie y electroniveles en la Línea 2 del Metro

7. EJECUCIÓN DE LA OBRA Y SEGUIMIENTO DE LA AUSCULTACIÓN

7.1 Excavación y sostenimiento de galerías

La obra de la Caverna comenzó en el mes de marzo de 2004 con la excavación de 4 pozos de acceso situados en: dos pozos en Pasaje Caja de ahorros, uno en C/ Aduana y uno en C/ Montera esquina a C/ Jardines. Tres de éstos se corresponden con pozos definitivos de emergencia y ventilación.

En la **figura nº 10** se presenta un cronograma de lo que ha sido la ejecución de la obra desde su inicio hasta el momento actual cuando se encuentra la Mezanina terminada y están pendientes de realizarse los trabajos de arquitectura e instalaciones.



Figura nº 10. Caverna Sol-Gran Vía. Cronograma de trabajos

Durante el año 2005 los trabajos se concentraron principalmente en la realización de pozos de acceso, la excavación y hormigonado de las galerías inferiores y de la clave, y la ejecución de la primera fase de pretratamiento de la compensación.

Pronto se pusieron de manifiesto las dificultades que presentaba el agua en la excavación y sostenimiento de las galerías situadas dentro de las zonas arenosas, y la dificultad de rebajar el nivel de agua del acuífero superior. A finales de 2005 se tomó la decisión de realizar un tratamiento de impermeabilización y consolidación de las arenas con inyecciones de gel de silicato que permitiera realizar en condiciones de seguridad razonable la excavación de la galería superior de los hastiales y de las "costillas" que forman la bóveda.

Las inyecciones con gel de silicato produjeron una mejora substancial al reducir considerablemente la afluencia de agua a las excavaciones y aumentar la cohesión de las arenas. Sin embargo, no fue posible completar en la forma deseada el tratamiento en toda la longitud de la Caverna debido a los levantamientos que dichas inyecciones provocaban en

superficie. La decisión del tratamiento con gel de silicato se había tomado después de haber realizado el pretratamiento de las inyecciones de compensación. Esto supuso encontrarse un terreno en cierta manera ya preparado o "precargado" que respondió con levantamientos de forma rápida ante las inyecciones de impermeabilización.

El valor elevado del ángulo con el que se iniciaba la bóveda hacía muy dificultoso el arranque de las excavaciones de las "costillas" desde la galería superior de los hastiales, especialmente en las zonas con presencia de agua. Esta circunstancia hizo que tras haber ejecutado aproximadamente un 20% de las "costillas", se modificara el proceso constructivo ejecutando una 3ª galería horizontal en la zona de inicio de la bóveda. De esta forma se elevaba la cota de arranque de las "costillas" reduciéndose en ellas la carga de agua y el ángulo de inclinación inicial.

En las galerías longitudinales de clave y hastiales (de unos 8 m² de sección) se utilizaron como elementos de sostenimiento cerchas metálicas THN – 21/m y una entibación cuajada de tablas de madera y tresillones de acero corrugado ϕ 32. En la base se dispuso un puntal metálico del mismo perfil que las cerchas. El hormigonado de las galerías de hastiales se realizaba en tramos de unos 6 metros realizando tapes transversales con entibación de madera y nervometal.

En las galerías transversales de sección rectangular y de 2 m de ancho que constituían las "costillas" de la bóveda, se dispusieron puntales de madera (rollizos) de álamo negro de 0,20 m de diámetro que recogían las longarinas de perfil THN – 21 situadas en el techo y espaciadas 0,50 m. La entibación se realizaba con madera en techo, solera y hastial.

El hormigonado de cada una de las costillas de la bóveda y de las galerías superiores de los hastiales se realizó en dos fases. En la primera se hormigonaba el tramo comprendido entre un hastial y la galería de la clave, y en la segunda fase se hormigonaba el resto de la "costilla" incluyendo el tramo correspondiente de la galería de clave. Entre ambas fases se dejaba una junta de hormigonado inclinada con la intención de acuñar las dos partes de la bóveda.

También se encofraban las juntas transversales entre "costillas" con nervometal a fin de obtener una superficie adecuada de conexión entre hormigones.

En la **figura nº 11** se muestran secciones transversales de las galerías de hastiales, clave y "costillas".

A medida que avanzaba la excavación y hormigonado de las "costillas" de la bóveda, se iban realizando a cierta distancia las inyecciones de relleno en su trasdós. Estas inyecciones de contacto se realizaron a través de tubos de PVC longitudinales que estaban alojados previamente en puntos de la bóveda, galería de clave y en la zona superior de los hastiales. Las inyecciones de relleno supusieron un volumen total de 360 m³ en toda la Caverna.

7.2 Tratamiento de impermeabilización en los niveles arenosos

Al no haberse conseguido el drenaje del acuífero superior se decidió realizar un tratamiento de impermeabilización de los niveles arenosos donde se situaba dicho acuífero y que afectaban principalmente a la galería superior de los hastiales y a la zona de la bóveda.

Los niveles arenosos con agua presentaban problemas de estabilidad en las excavaciones dificultando los trabajos de forma considerable en los aspectos de seguridad y rapidez. Resultaba necesario proporcionar al terreno una cierta cohesión y dotarle de una impermeabilidad suficiente.

Este trabajo fue realizado por la empresa **SITE** entre diciembre de 2005 y junio de 2006. Tras unas pruebas iniciales con distintos tipos de tratamiento, a base de microcementos y silicatos, se optó finalmente por utilizar el gel de silicato de sodio en solución acuosa. Existen bastantes experiencias del empleo con éxito de este tratamiento en las arenas de miga de Madrid y en arenas de grano medio con un porcentaje de finos que no supere el 25%. Este producto presenta inicialmente una viscosidad parecida a la del agua, viscosidad que mantiene durante un cierto tiempo permitiendo su manejo, inyección y penetración en el terreno, para después de manera bastante repentina, endurecer en forma de gel de sílice.

Desde la galería superior de la clave se acometieron las perforaciones en abanico extendidas a la zona donde habrían de excavarse la galería superior de hastiales y las "costillas" de la bóveda. En la **figura nº 12** se presenta una sección transversal de la Caverna donde se muestra la zona a la que se extendió el tratamiento.

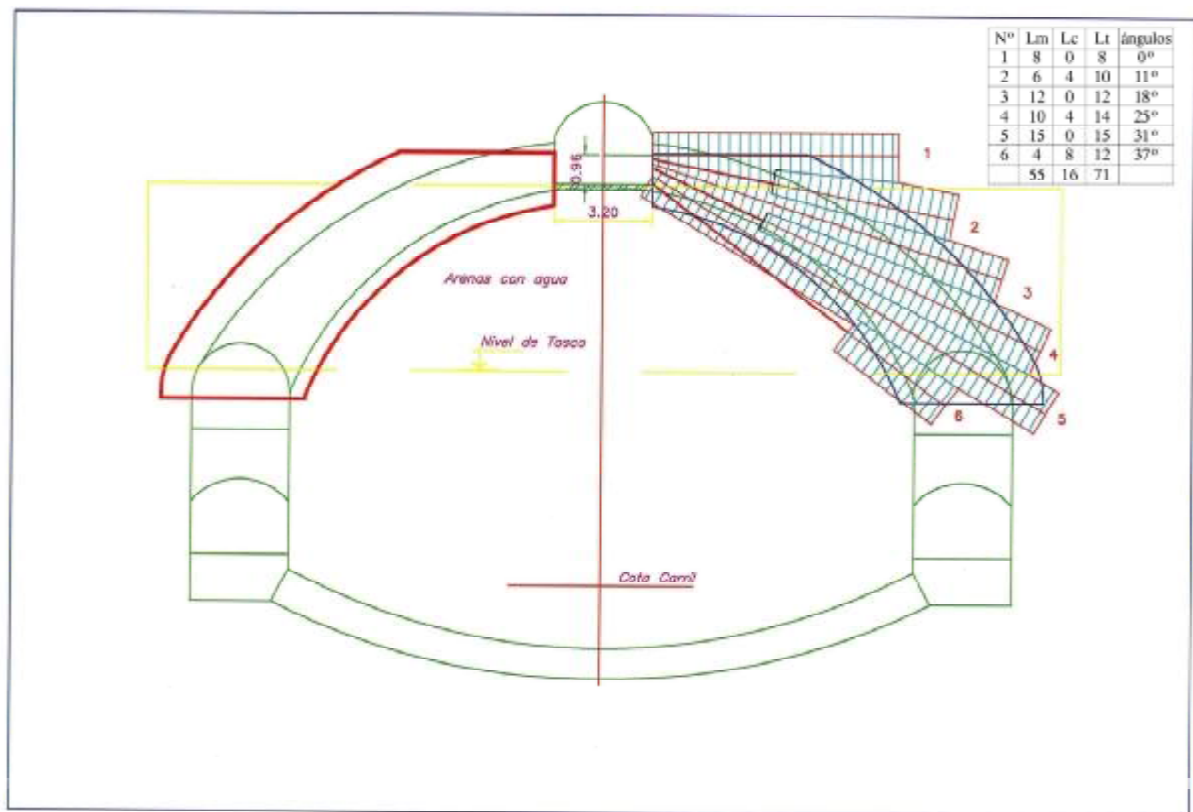


Figura nº 12. Zonas de aplicación del tratamiento con gel de sílice

Los taladros se ejecutaron con un espaciamiento aproximado de 1,50 m y con una perforación muy cuidada y esmerada buscando la mínima alteración del terreno.

Se dispuso en ellos tubería de PVC, equipada con 3 manguitos por metro lineal, relleno del espacio anular con una lechada de cemento-bentonita. Transcurridas al menos 24 horas, se iniciaba el tratamiento con doble obturador y procediendo en sentido ascendente desde el

manguito inferior hacia los superiores, hasta completar el taladro. Tras producirse la rotura de la vaina exterior forzando la presión, se procedía a la regulación de la bomba de inyección de impulsión continua ajustando los parámetros de tratamiento.

En líneas generales, estos parámetros se mantuvieron constantes aunque sufrieron modificaciones para afrontar algunas circunstancias, como fue el momento en el que se produjeron levantamientos significativos en la superficie. Los límites habituales de trabajo y las mediciones aproximadas finales fueron:

- Presión máxima 9 – 12 bar (reducción ocasional a 7 bar).
- Caudal de inyección 5 – 8 l/minuto.
- Volumen máximo inyectado 150 l/manguito.
- M.L. Perforación con tubería lisa \approx 5.300 m.
- M.L. Perforación con tubería con manguito \approx 21.000 m.
- M³ Gel de silicato inyectado \approx 5.000 m³.

7.3 Tratamiento de compensación de asientos.

Los trabajos relativos a la compensación de los asientos generados por la construcción de la Caverna fueron ejecutados por **GEOCISA**. Se realizaron inyecciones de cemento desde 5 puntos (cañón en Línea 1 de Metro y 4 pozos más) distribuidos en el entorno de la obra y desde los que se abarcaba una superficie total de tratamiento de unos 16.500 m². Se perforaron un total de 412 taladros que supusieron unos 15.000 metros de tubos-manguito.

En la **figura nº 13** se muestra la disposición en planta de los puntos desde donde se realizó el tratamiento y en el cuadro adjunto se indican algunos datos de interés de cada uno de ellos.



Pozos	Área generada (m ²)	Nº Taladros	Long. Máx. taladro (m)	Cota plano compensación	Distancia mínima desde plano de compensación		Densidad media de inyección	
					Clave Caverna (m)	Cimentaciones Edificios (m)	Fase pretratamiento edificios (l/m ²)	Fase Compensación (l/m ²)
Pozo Cañón Línea 1 del Metro	1.400	53	48	640,75	≈ 4	≈ 5	140	50 (Bajo Línea 2 Metro) 200 (Bajo edificios)
Pozo C/ Pasaje zona A	4.200	84	55	641,50	≈ 4	≈ 3	75 – 125	60 - 220
Pozo C/ Pasaje zona B	3.000	85	45	641,50	≈ 4	≈ 4	100	125
Pozo C/ Aduana	3.800	100	51	641,50	≈ 4	≈ 2,5	125	94
Pozo C/ Montera Esquina C/ Jardines	4.000	90	50	644	≈ 6,5	≈ 11,5	75 – 110	177
TOTAL	16.500	412						

En la **figura nº 14** se recogen dos perfiles transversales (P.K. 1+770 y P.K. 1+892) donde se muestra la posición del plano de compensación en relación con la Caverna y las cimentaciones.

La perforación de los taladros y la primera fase de pretratamiento se llevó a cabo entre los meses de marzo y julio de 2005. La densidad media de inyección se situó entre 75 y 140 l/m². Las presiones fueron generalmente del orden de 6 bar y se redujeron a 3 bar bajo la línea 2 del Metro y bajo el Parking de la C/ Aduana, donde era menor la distancia entre el plano de tratamiento y las cimentaciones.

Se estableció un límite para el caudal mínimo de inyección de 3 l/minuto (mantenido durante más de 1 minuto). Asimismo, el límite de levantamiento puntual establecido en superficie fue de 2–3 mm.

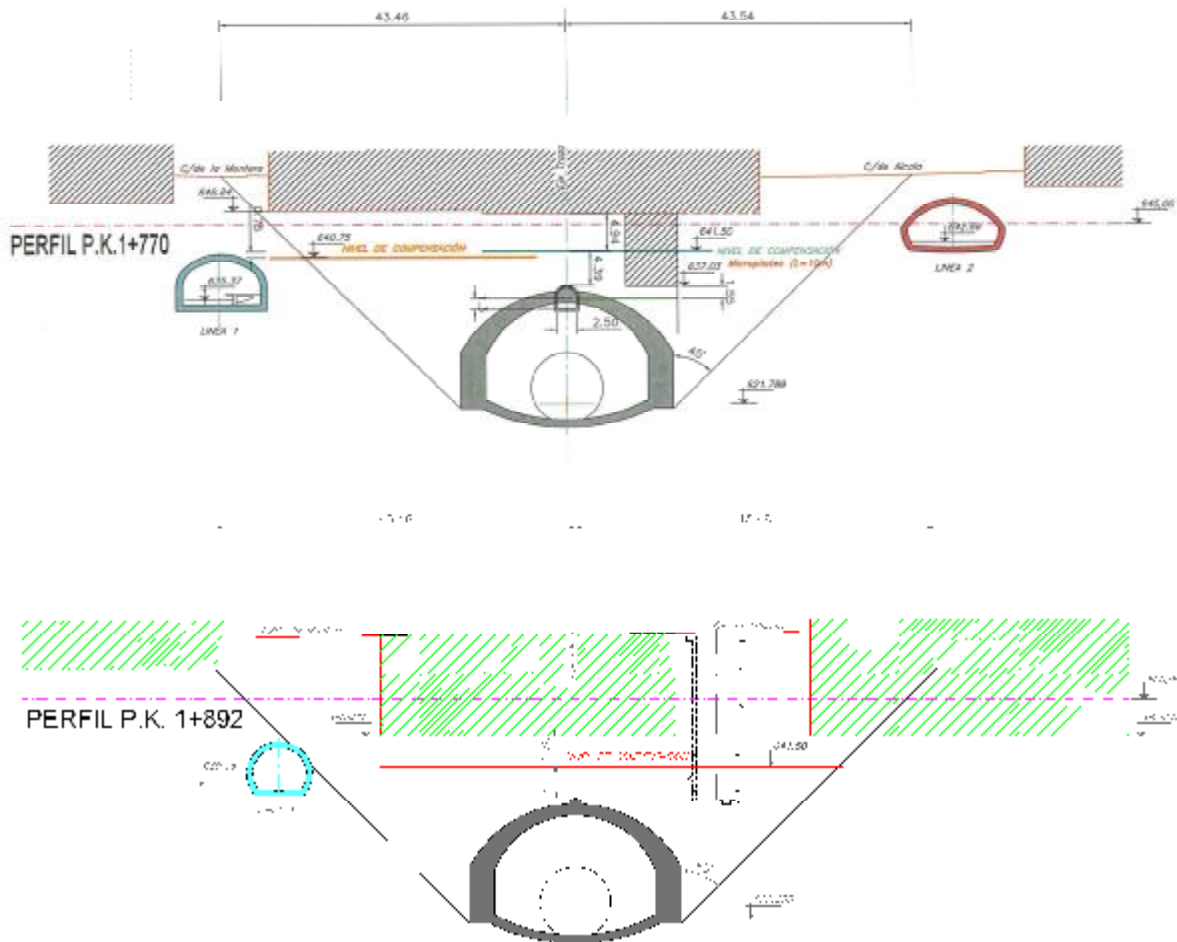


Figura nº 14. Secciones transversales con indicación de la posición del plano de compensación

La longitud máxima de los taladros fue del orden de 50 metros y en ellos se colocaron tubos-manguito de acero de 73 mm de diámetro exterior y 6 mm de espesor de pared. Se dispusieron 2 manguitos por metro lineal. Los taladros se perforaron con 135 mm de diámetro y se abanicaron en planta con una separación máxima teórica de 2 m.

La fase de compensación de asientos (segunda fase del tratamiento) tuvo lugar entre los meses de marzo y agosto de 2007, dos años después de la primera fase de pretratamiento. El largo

período de tiempo transcurrido entre ambas fases obligó a un mantenimiento esmerado de los tubos de inyección (limpiezas periódicas) al objeto de mantener en buen funcionamiento las válvulas de inyección. También se había aumentado el diámetro del tubo para favorecer su lavado y el desplazamiento de los obturadores. La densidad media de inyección fue bastante variable, según las zonas, quedando comprendida entre 50 y 220 l/m².

En la **figura nº 15A y 15B** se presenta una planta donde se recogen las densidades de inyección finales correspondientes a la fase de compensación.

Los parámetros del tratamiento de compensación se fueron modificando, de manera paulatina y controlada, teniendo en cuenta los volúmenes admitidos y los levantamientos que se estaban produciendo. Se comenzaron estableciendo unos límites de presiones y volúmenes por manguito de 4 bar y 150 litros respectivamente que fueron incrementándose hasta acabar alcanzando en algunas zonas valores máximos de presión y volúmenes de 35 bar y 500 litros respectivamente.

En general, los límites máximos de la presión se mantenían hasta completar un cierto volumen de inyección por manguito, y, una vez superado, se solían reconsiderar dichos límites a la baja en función de los levantamientos que se estaban produciendo. El caudal mínimo de inyección en la fase de compensación fue del orden de 6 l/minuto, y en general estuvo situado en valores bajos del orden de 8 – 10 l/minuto.

Si bien, normalmente, el volumen máximo de inyección en cada episodio se sitúa entre 75 - 100 l por manguito, fueron muchos los casos en los que se superó dicho volumen, debido a que el terreno no acababa de reaccionar y acusar levantamientos. En algunos manguitos han llegado a realizarse hasta 6 episodios de inyección entre las dos fases del tratamiento.

La compensación se iba realizando a medida que progresaban los trabajos de inyección de relleno del trasdós de la bóveda y de la zona alta de los hastiales. Se estableció una distancia mínima de resguardo equivalente a 8 "costillas" (16 metros) entre la zona de compensación y el frente de avance de la inyección de relleno.

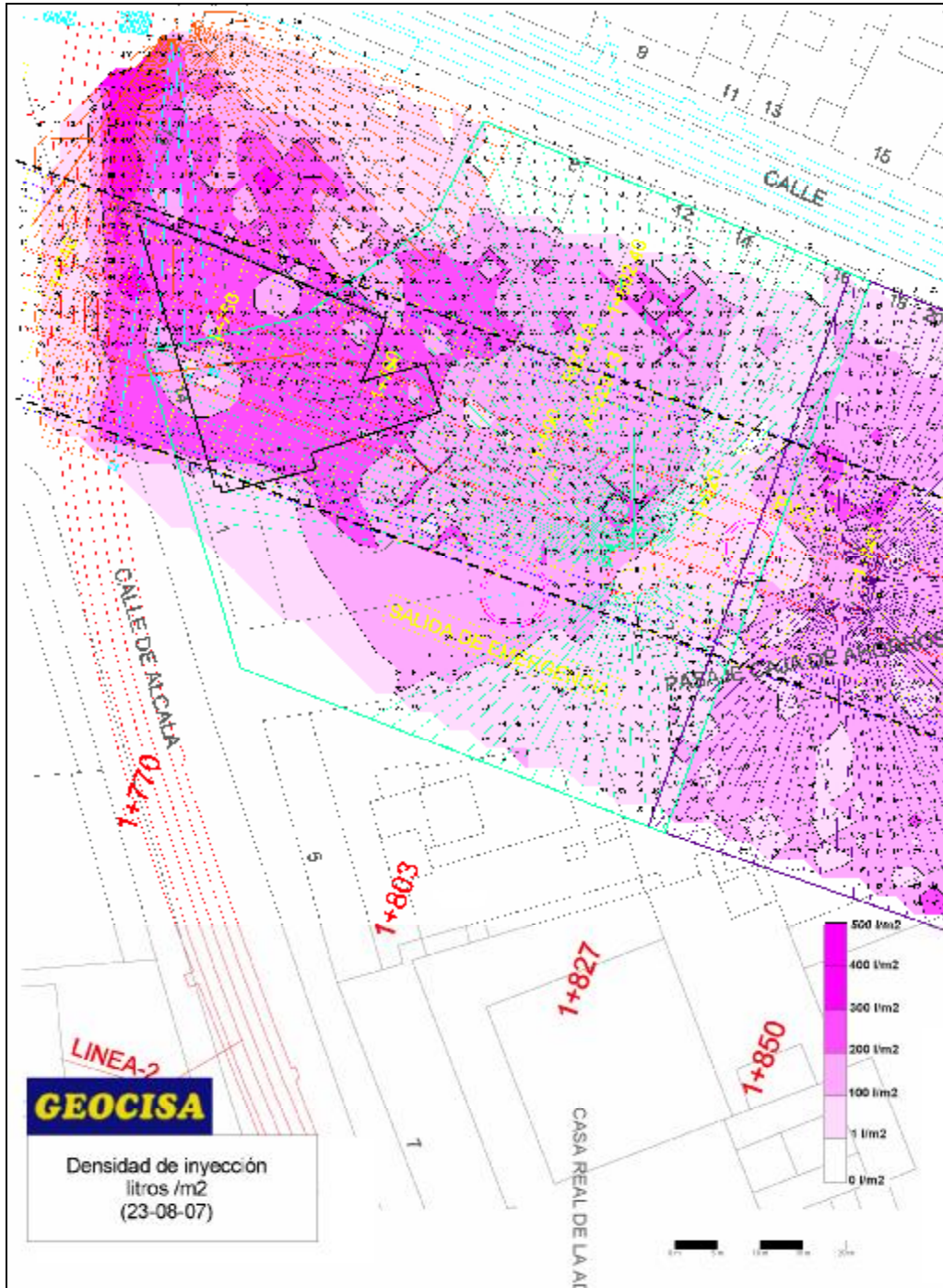


Figura nº 15A. Planta de densidades finales de la inyección de compensación

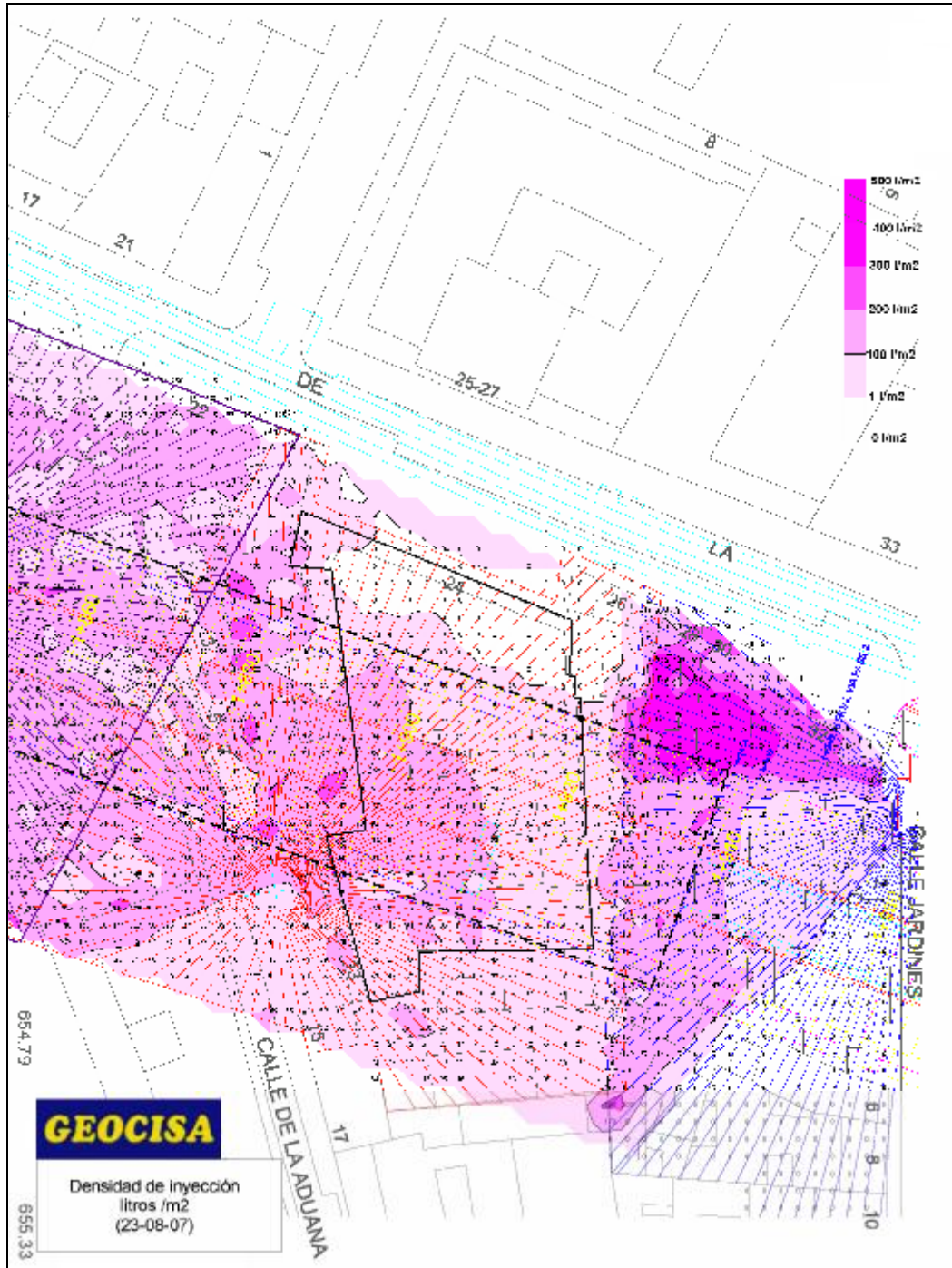


Figura nº 15B. Planta de densidades finales de la inyección de compensación

La compensación se comenzó con una dosificación de la mezcla 1:1,5 (agua/cemento) que, posteriormente se redujo a 1:1.

7.4 Excavación interior de la Caverna y ejecución de la Mezanina.

Una vez realizadas las inyecciones de compensación de asientos se inició la excavación interior de la Caverna. Como medida de precaución se comenzó con una pequeña excavación localizada en la parte superior de la sección para comprobar la respuesta inicial que pudiera producir en los asientos el vaciado de la Caverna. Al comprobar que esta respuesta no resultaba significativa se amplió la sección de excavación, llegando finalmente a completarse la semisección superior en un plazo de dos meses.

A continuación se procedió por tramos de 6 a 10 metros a la demolición del anillo de dovelas del túnel de línea y a la excavación y hormigonado de la contrabóveda, operaciones que se llevaron a cabo entre octubre de 2007 y enero de 2008.

Finalmente, entre los meses de febrero y abril de 2008 se realizó la construcción de la Mezanina situada en el nivel superior de la sección transversal. Está formada por una losa de hormigón armado de 35 cm de espesor que en las zonas con escaleras de acceso al andén va conectada a los hastiales de la Estación, mientras que en el resto de la Caverna va colgada de la bóveda por medio de tirantes de acero de ϕ 45 provistos de tensores de unión que permiten ajustar su posición.

En las **figuras nº 16 y 17** se recogen fotografías que muestran los trabajos de ejecución de la contrabóveda y la mezanina.



Figura nº 16. Ejecución de la contrabóveda



Figura nº 17. Ejecución de la Mezanina

7.5 Seguimiento de la auscultación.

7.5.1. Piezometría

Se controlaron los dos niveles de agua detectados en la fase de Proyecto. En líneas generales la cota piezométrica del nivel superior en la zona central de la Caverna tuvo descensos y recuperaciones durante la ejecución de la obra con una variación máxima de unos 3 metros a lo largo de los 4 años y medio registrados. La cota media de dicho nivel ha sido aproximadamente la 633, lo que supone una posición intermedia entre la cota de arranque de la bóveda(≈ 629) y la que corresponde a la clave (≈ 636).

Por otra parte, en el mismo período de tiempo, la cota piezométrica del nivel inferior se ha visto afectada por las excavaciones y ha ido disminuyendo de forma paulatina registrando un descenso total de unos 4 a 8 metros (situándose entre las cotas 615 y 628) en la zona Central de la Caverna, mientras que ese mismo nivel permaneció sin muchas variaciones en las zonas extremas de la obra. En Gran Vía se mantuvo alrededor de la cota 628 y en Sol alrededor de la 625.

En las **figura nº 18** se muestra la evolución de los piezómetros situados en las inmediaciones de la zona central de la Caverna.

Las excavaciones del Túnel de Línea y de la propia Caverna han provocado un descenso lento del acuífero inferior situado en los niveles tosquizos más impermeables, mientras que no han afectado prácticamente al acuífero superior situado en los niveles de arenas de miga y arenas tosquizas. Esto es lo que dificultó de manera especial la ejecución del avance de las "costillas" que constituyen la bóveda y obligó al tratamiento de impermeabilización de las arenas con gel de silicato.

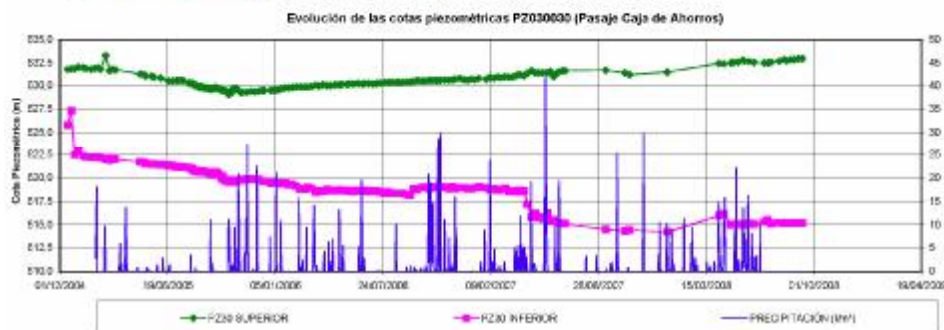
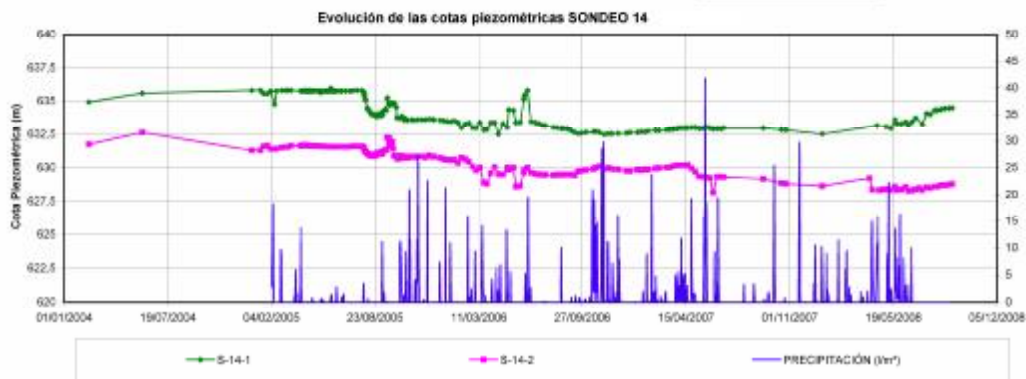
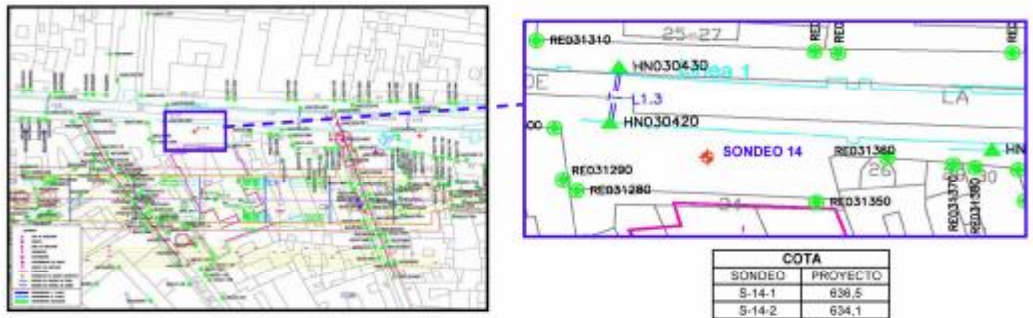


Figura nº 18. Piezómetros en sondeo 14 y en la Zona de Pasaje de Caja de Ahorros

7.5.2. Asientos en superficie y en Metro Línea 2

En el cuadro adjunto se resumen los levantamientos y asentamientos medidos en distintas zonas de la superficie y en la zona del Parking de la C/ Aduana, correspondientes a las fases constructivas que han resultado más significativas desde el punto de vista de los movimientos inducidos en el terreno. También se recogen los intervalos en los que ha quedado el asiento final total medido en dichas zonas.

MOVIMIENTOS INDUCIDOS EN DISTINTAS ZONAS DE LA OBRA (Valores en mm)					
Fase constructiva	Puerta del Sol (Inicio Caverna) » P.K.1+750	Pasaje Caja de Ahorros (Zona Central Caverna) » P.K.1+800	C/ Aduana » P.K.1+860	» P.K.1+890	C/ Jardines (Sobrepasado el final de la Caverna)
Pretratamiento de compensación + Inyección gel de silicato	+9 a +13 (+10)	+8 a +10 (+9)	+5 a +9 (+7)	+6 a +12 (+10)	+2
Excavación y hormigonado de la bóveda por "costillas"	-12 a -20 (-17)	-13 a -18 (-16)	-10 a -20 (-14)	-10 a -20 (-15)	-4
Inyección Compensación (2ª fase)	+4 a +14 (+8)	+7 a +9 (+8)	+5 a +11 (+8)	+7 a +17 (+11)	0 a +2
Nivelación final de los puntos controlados	+7 a -10	+4 a -1	+2 a -11	+10 a -7	-5 a -9

+ Levantamientos - Asientos

En las **figuras n^{os} 19, 20 y 21** se muestran gráficas con la evolución de los movimientos medidos en las secciones transversales P.K. 1+750, P.K. 1+830 y P.K. 1+900. Se observa que con las inyecciones de impermeabilización se han llegado a producir levantamientos del orden de 8 a 12 mm. Posteriormente, con la excavación por "costillas" y hormigonado de la bóveda se produjeron asientos del orden de 15 a 20 mm. Por último, con el tratamiento de compensación se volvieron a producir levantamientos comprendidos entre 7 y 17 mm.

Al final de la obra los movimientos a origen correspondientes a levantamientos y asientos medidos en superficie han quedado prácticamente comprendidos entre +10 y -10 mm en todo el área de influencia de la Caverna. Asimismo, los movimientos diferenciales o distorsiones angulares han sido en general inferiores al 1/1000.

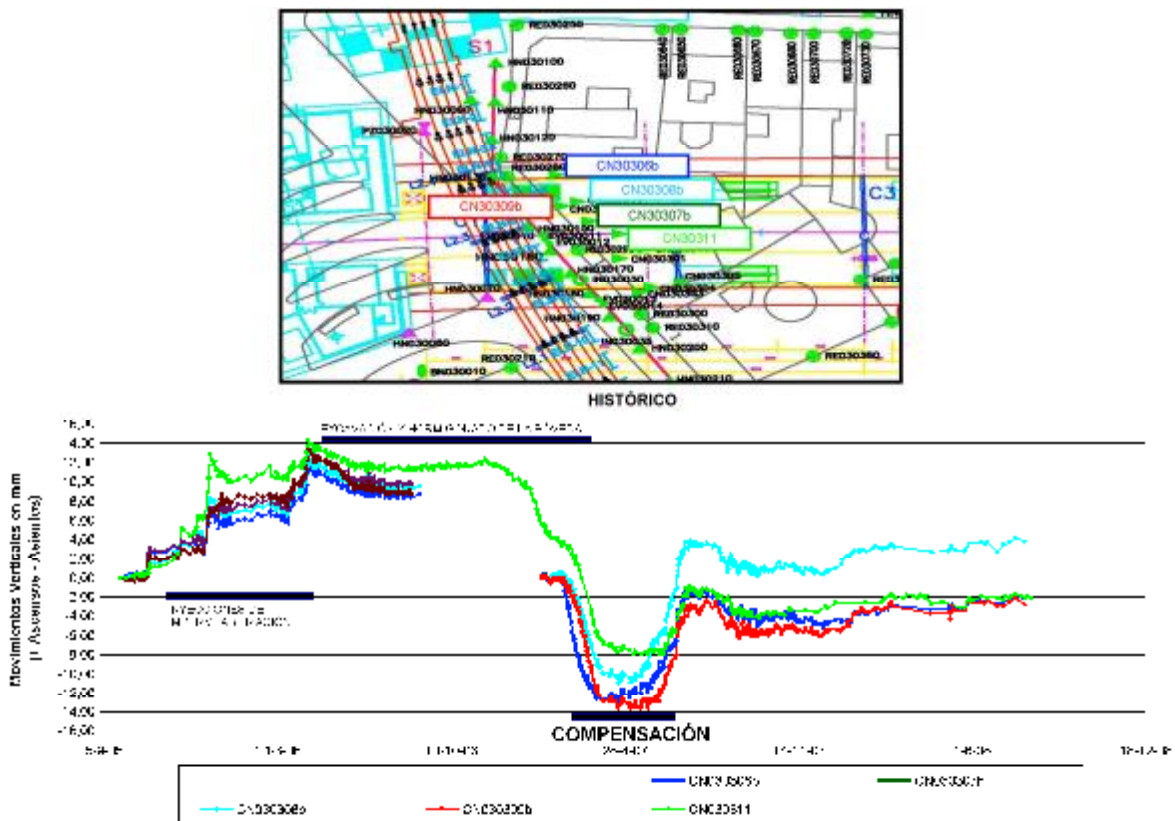


Figura nº 19. Control de asientos en superficie (P.K. 1+750)

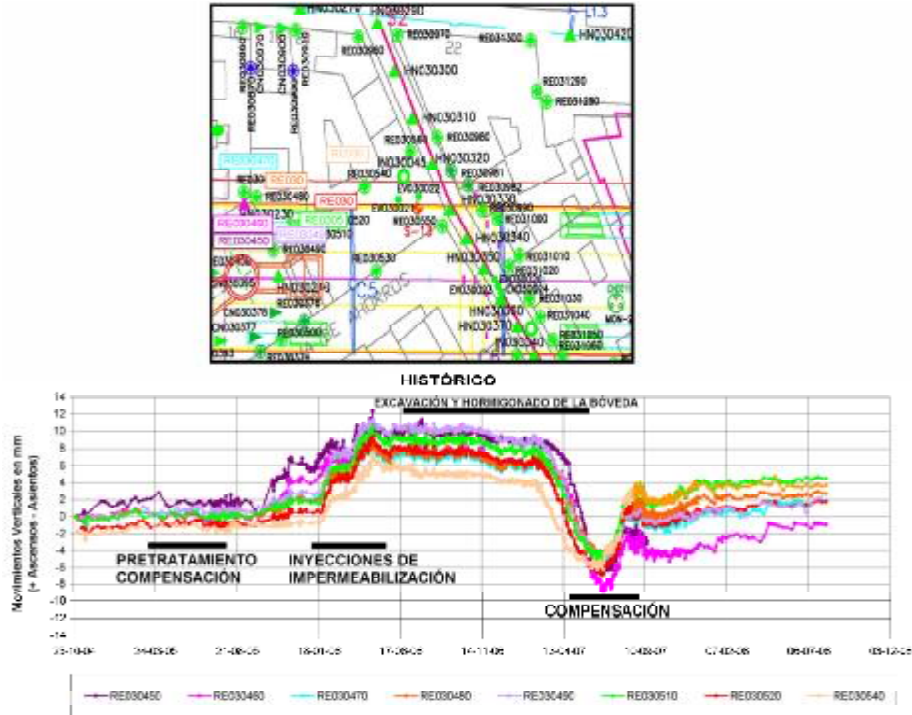


Figura nº 20. Control de asientos en superficie (P.K. 1+830)

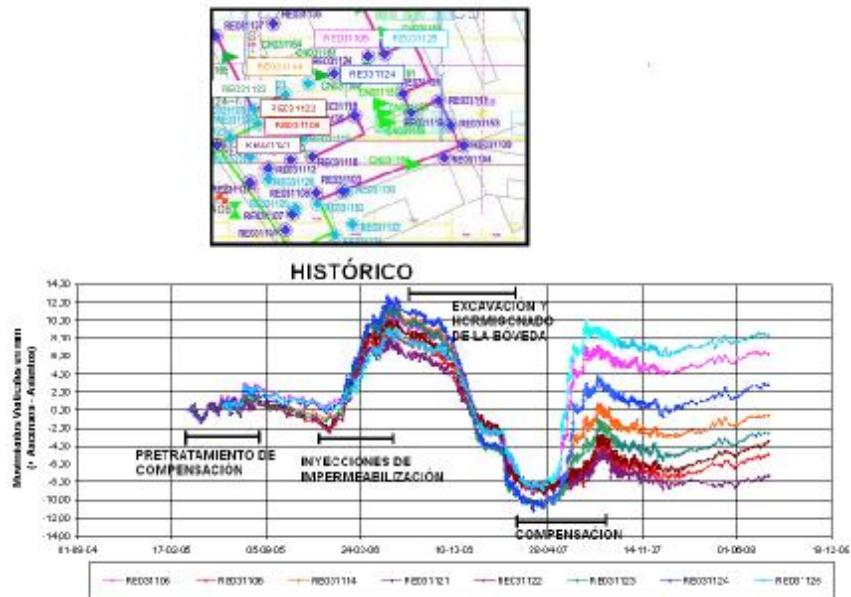


Figura nº 21. Control de asientos en superficie (P.K. 1+900)

En la **figura nº 22** se muestra, a partir de una línea continua de electroniveles, un perfil de la deformada de la línea 2 del Metro que cruza a unos 4 metros por encima de la Caverna en su extremo inicial de Puerta del Sol. El asiento máximo alcanzado ha sido del orden de 17 mm.

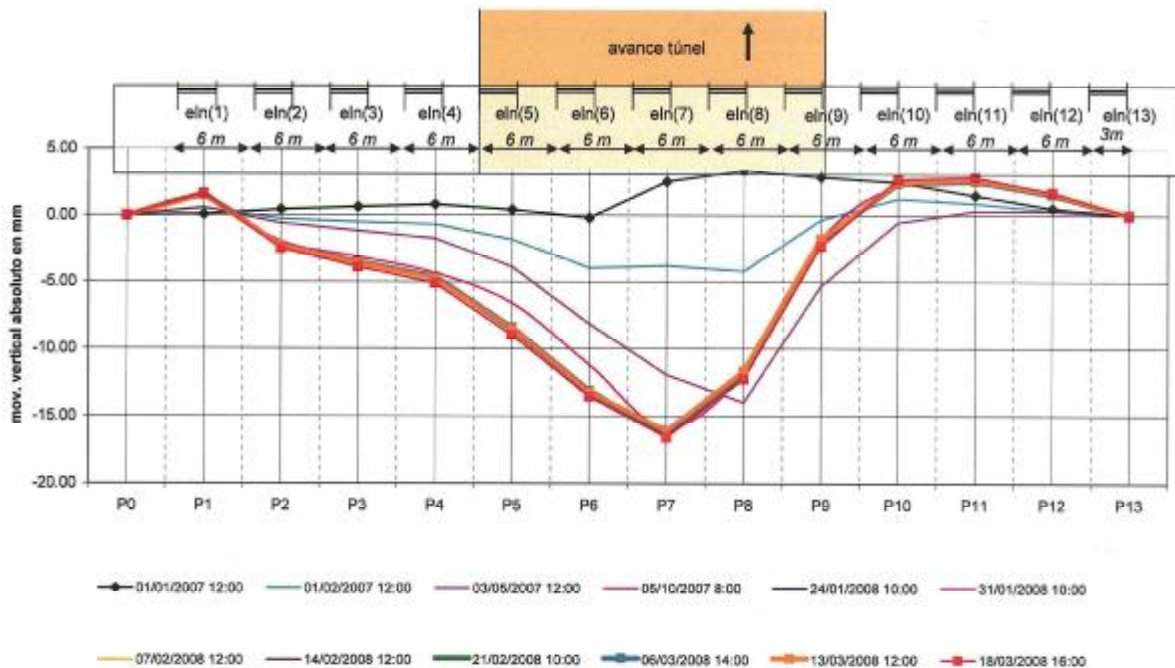


Figura nº 22. Línea 2 del Metro. Aproximación de la deformada suponiendo una línea continua de electroniveles

En las **figuras nº 23 y 24** se muestran las isóneas de los asientos a origen medidos en superficie y correspondientes al momento anterior a la realización de la compensación y a la situación final una vez completada la contrabóveda de la Caverna.

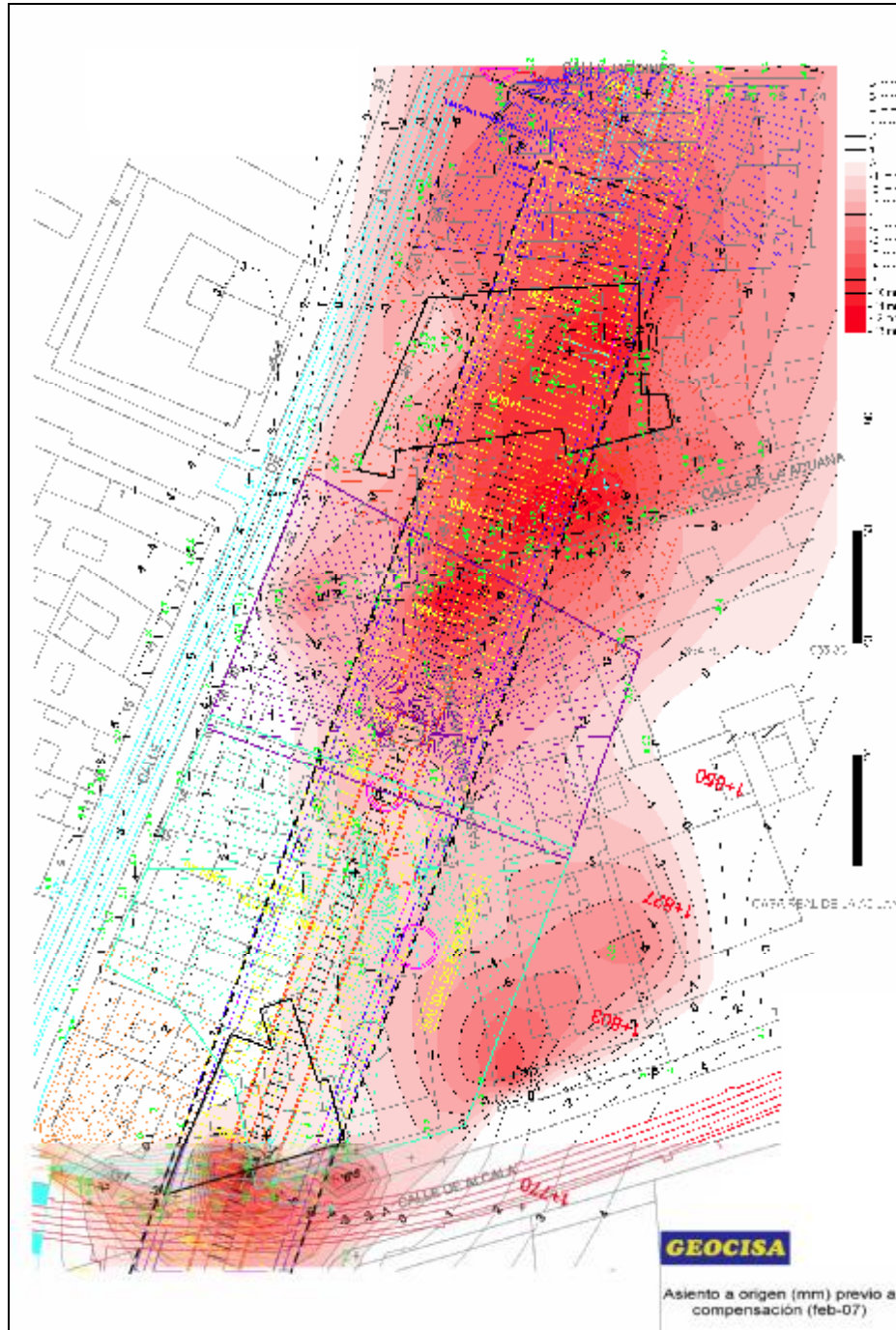


Figura nº 23. Isolíneas de los asientos (previo a compensación)

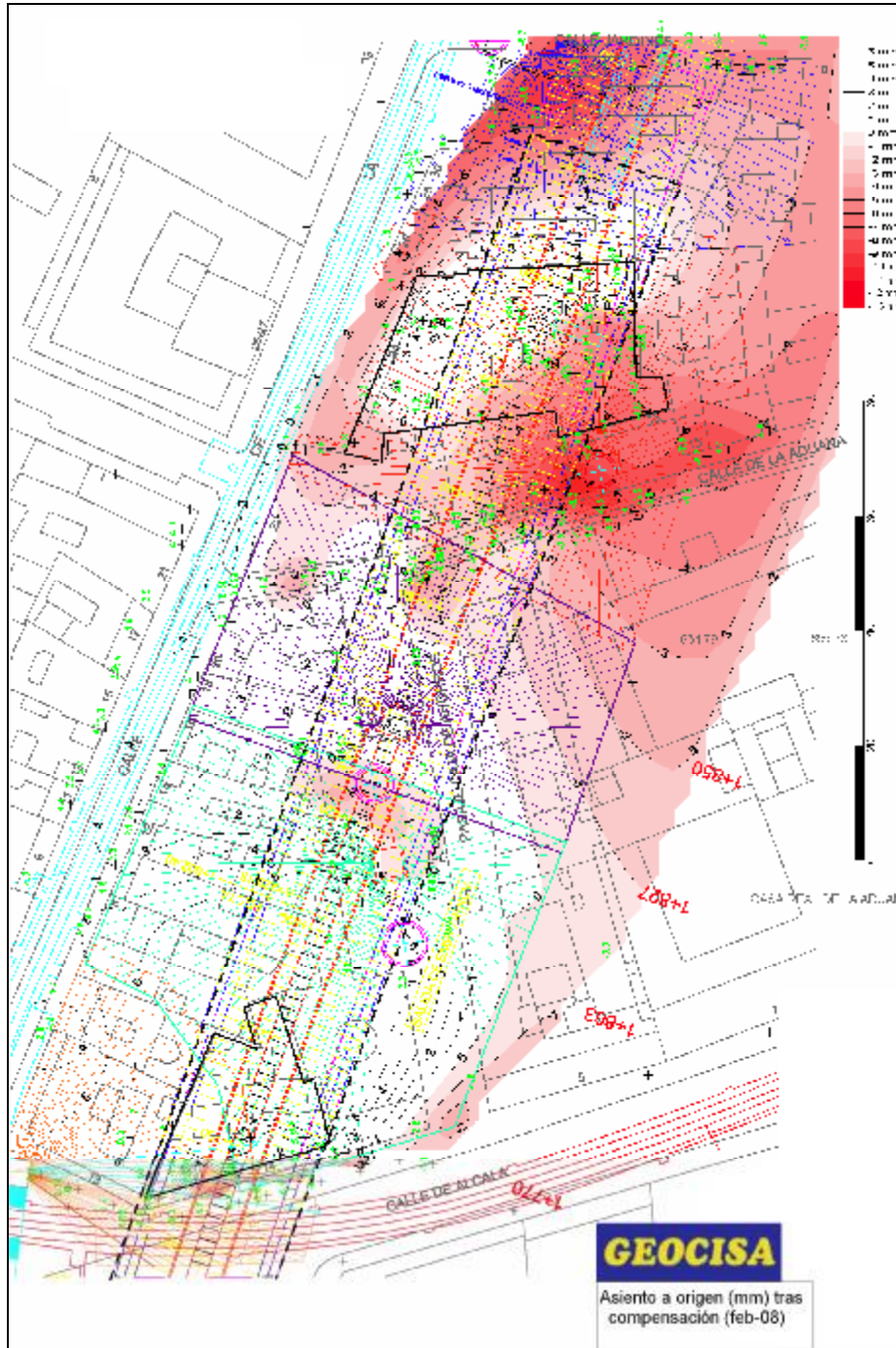


Figura nº 24. Isolíneas de los asientos (tras compensación)

7.5.3. Movimientos en el túnel de Línea y en la Caverna

Túnel de Línea

En las **figuras nºs 25 y 26** se muestran los valores de convergencia medidos en dos secciones del túnel de Línea que están situadas: una de ellas a la entrada del túnel en la zona del vestíbulo de Sol (sección SC-30, P.K. 1+710), y la otra a la salida del túnel por el extremo opuesto de la Caverna (sección SC-01, P.K. 1+952).

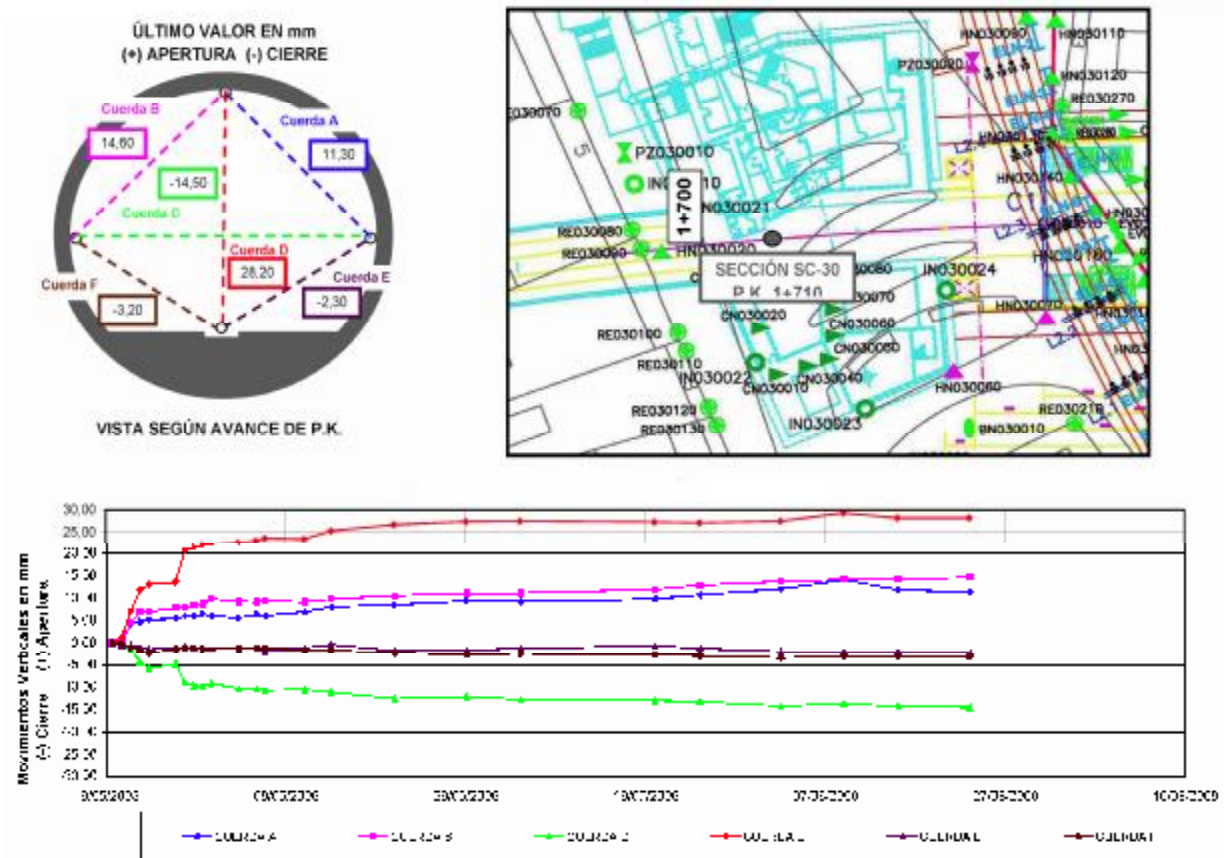


Figura nº 25. Convergencias Túnel Sección SC-30 P.K. 1+710

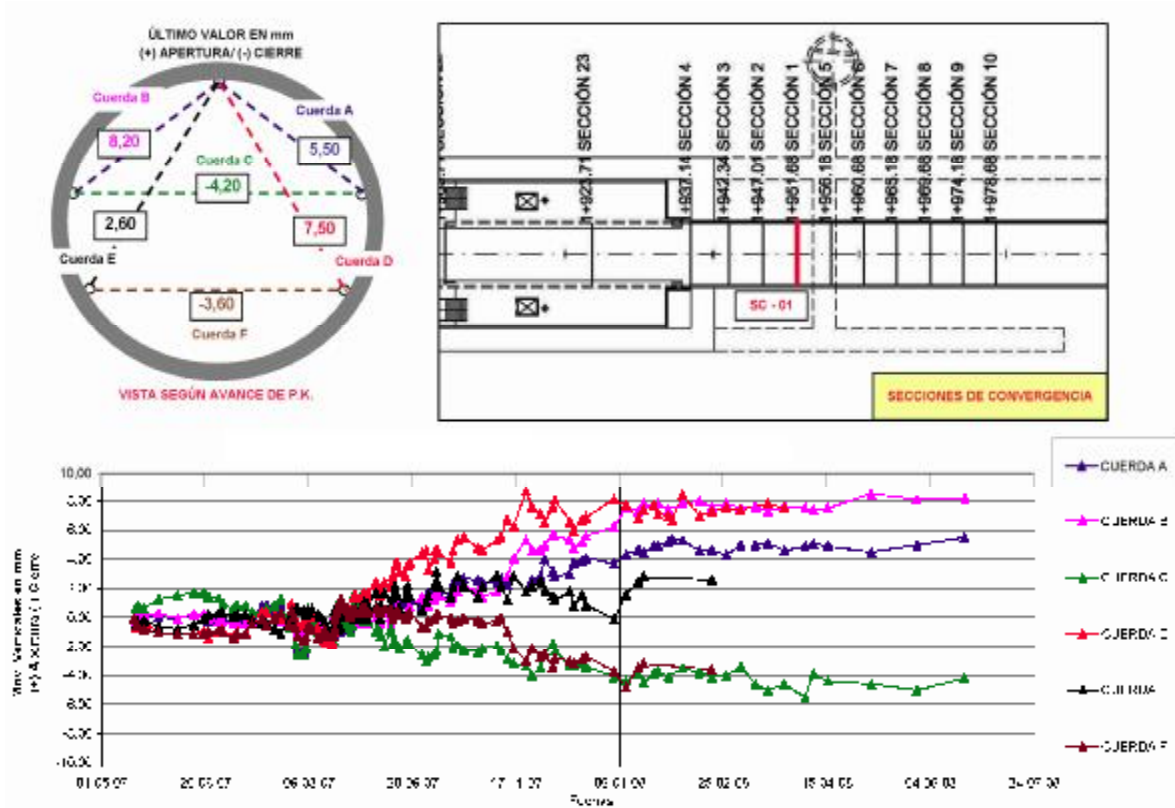


Figura nº 26. Convergencias Túnel SC-01 P.K. 1+951,68

En ambos casos se realizaron excavaciones por encima de la clave del túnel después de haberse ejecutado éste. En el primer caso se excavó el vestíbulo de Puerta del Sol y en el segundo se excavó una galería que arranca justo por encima de la clave y va ascendiendo hacia la zona de Gran Vía siguiendo la alineación del túnel.

Como consecuencia de la descarga que supusieron dichas excavaciones, el revestimiento del túnel experimentó una significativa ovalización con alargamiento del diámetro vertical y acortamiento del diámetro horizontal en los valores que se indican en el cuadro siguiente:

	Alargamiento Diámetro vertical (mm)	Acortamiento Diámetro Horizontal (mm)
Sección SC-30 (Bajo vestíbulo Sol) P.K. 1+710	≈ 27	≈ 14
Sección SC-01 P.K. 1+952	≈ 8	≈ 4

Estos valores supusieron una distorsión adicional en el anillo de dovelas del orden del 0,1% al 0,2% del diámetro sin que se produjeran daños en el revestimiento.

Caverna

En las **figuras nºs 27 y 28** se presentan dos secciones de la Caverna (SCC-8 y SCC-12) con las medidas de Convergencia y de descenso de la clave registradas desde el inicio de su excavación interior hasta después de terminada la ejecución de la contrabóveda.

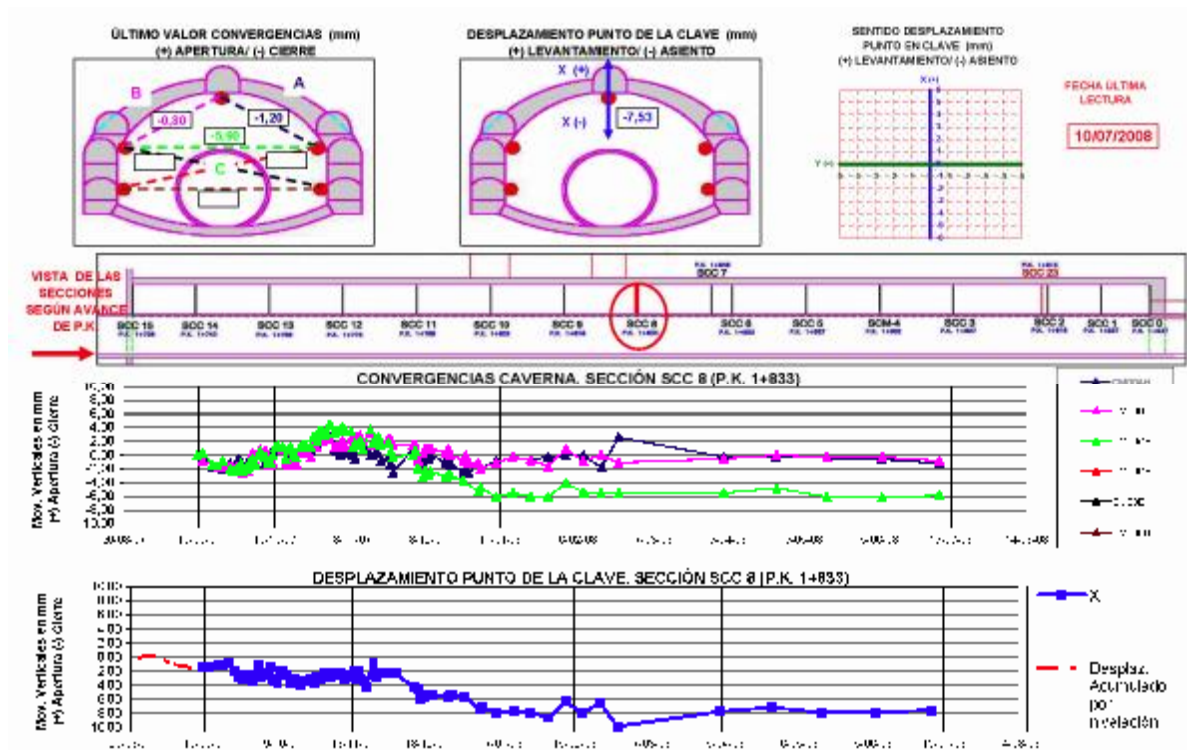


Figura nº 27. Movimientos en clave y hastiales de Caverna. SCC 8

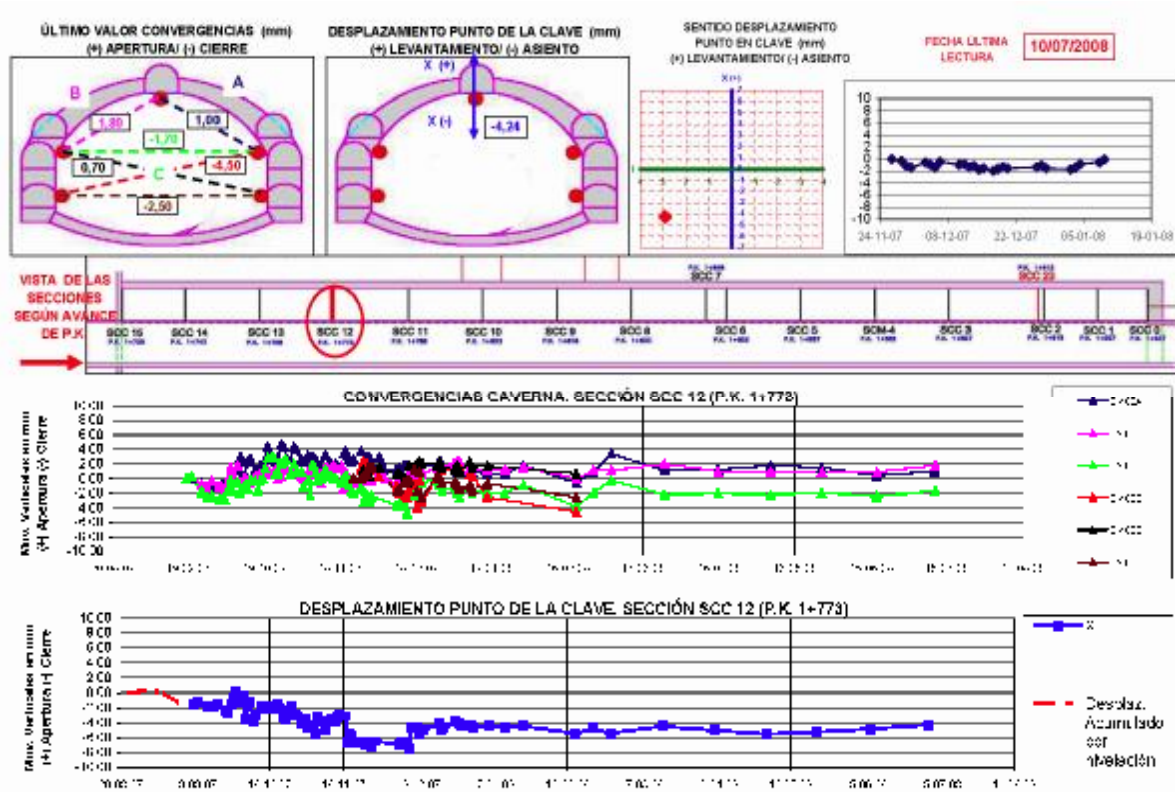


Figura nº 28. Movimientos en clave y hastiales de Caverna. SCC 12

En la **figura nº 29** se muestra un perfil longitudinal del descenso que experimentó la clave a lo largo de la Caverna.

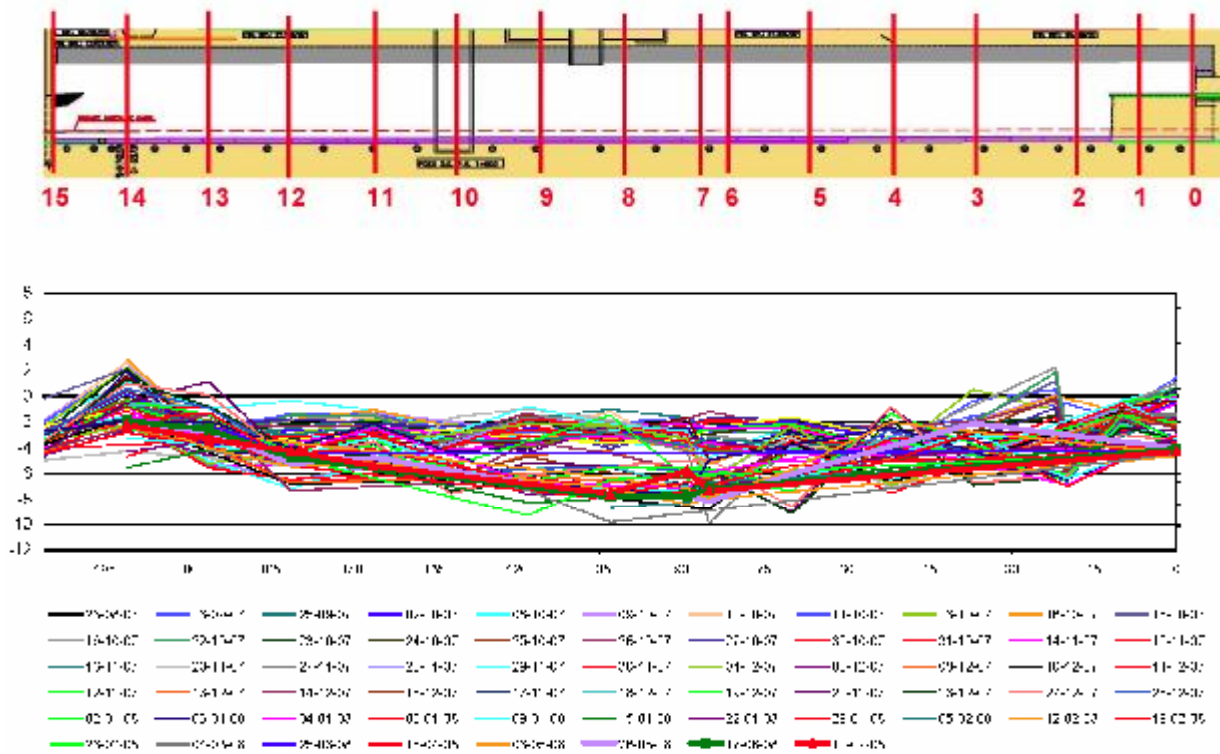


Figura nº 29. Movimientos en Clave Caverna

En las figuras anteriores se observa que el descenso máximo medido en la clave de la Caverna fue de unos 8 mm y el acortamiento máximo de la cuerda horizontal entre hastiales fue de unos 6 mm (SCC-8).

8. RESUMEN DE CONCLUSIONES

La Caverna de andenes de la nueva estación Subterránea para trenes de Cercanías, recientemente construida en la zona de Puerta del Sol, tiene 207 metros de longitud, 26,75 metros de ancho y unos 17 metros de altura. La sección transversal de excavación es de unos 375 m² y la clave de la bóveda se sitúa bajo la calle a una profundidad variable entre 14 y 21 metros.

Su construcción, dentro de los materiales pliocenos de Madrid, se ha realizado mediante el denominado "Método Alemán" siguiendo un proceso de excavación y hormigonado de galerías sucesivas y de sección reducida localizadas en hastiales y bóveda.

En una buena parte de la semisección superior las excavaciones se realizaron principalmente en arenas de miga y hubo que superar previamente problemas de afluencia de agua, mientras que la semisección inferior se excavó en materiales tosquizados más impermeables.

Se realizaron tratamientos de impermeabilización y consolidación de las arenas con inyecciones de gel de silicato, que permitieron mejorar significativamente las condiciones de trabajo.

Se realizaron también tratamientos de compensación de asientos con inyecciones de lechada de cemento. Los trabajos de compensación, combinados en todo momento con el control de la auscultación, se fueron ajustando a la respuesta del terreno y a las necesidades de corrección que se iban produciendo en las distintas zonas de la obra. Se llegaron a valores medios de densidad de la inyección del orden de 200 l/m².

La excavación de la Caverna se terminó con un resultado satisfactorio en lo que se refiere a los movimientos generados en superficie y a las afecciones provocadas en las edificaciones y servicios existentes. Dichos movimientos, controlados con una amplia red de nivelación, han quedado finalmente comprendidos entre +10 mm (levantamientos) y -10 mm (asientos) siendo las distorsiones angulares, en general, inferiores al 1/1000.

9. AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas, empresas y organismos públicos que han colaborado de una u otra manera en hacer posible la construcción de esta obra tan singular. Entre ellas se encuentra la Ingeniería SENER que fue la encargada de la redacción del proyecto para el Ministerio de Fomento.

En la fase de Construcción han tenido una intervención muy significativa:

- **Dirección de Obra:**

D. Pedro Lecuona García y D. Javier Gallego López (Directores de Obra)

D. Ignacio Benito Cases (Ayudante de la Dirección de Obra)

- **Asesores de la Dirección de Obra**

D. José María Rodríguez Ortiz (Asesor Geotécnico)

D. Carlos Serrano Aguilera (Geólogo)

- **Asesor del Ministerio de Fomento**

D. César Sagaseta Millán (Asesor Geotécnico)

- **Asistencia Técnica**

· PROINTEC. D. Miguel Guerrero Egea (Jefe de Unidad)

- **Empresas Colaboradoras**

· SITE. D. Julio Retuerto Mediavilla y D. José Polo Narro.

· GEOCISA. D. David Ruiz Alonso y D^a. María de Frutos García.

· ITASCA. D. Pedro Varona Eraso.

- **Personas de FCC en la obra**

· D. Alejandro Cisneros Müller (Delegado de Transportes)

· D. Ricardo Gil Edo (Subdelegado de Transportes)

· D. Juan Girón Garrido (Jefe de Departamento)

· D. José Luis del Valle Sánchez-Prieto (Jefe de Obra)

Los Servicios Técnicos de FCC quieren expresar a todas estas personas su reconocimiento y agradecimiento por el magnífico trabajo que han realizado y del que se ha pretendido transmitir con este artículo sus aspectos más geotécnicos.