

COMPORTAMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN CON MUROS-PANTALLA DEL TÚNEL DE LA LÍNEA 3 TRAMO PALMARET-ALAMEDA DEL METRO DE VALENCIA

Pedro Sola y Gustavo Armijo.
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
GEOCISA, Geotecnia y Cimientos, S.A.

Francisco Roldán y Teodoro Martín.
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
DRACUPAL, UTE Dragados, S.A. y Cubiertas MZOV, S.A.

RESUMEN

En el presente artículo se describen las características y los resultados de la auscultación efectuada durante la construcción del túnel, en zanja con muros-pantalla y en algún trozo con presolera de jet-grouting, para el Tramo Palmaret-Alameda de la Línea 3 del Metro de Valencia. La extensa instrumentación instalada ha permitido medir los movimientos producidos por la excavación, así como las presiones del terreno y en los arranques de la bóveda, junto con las deformaciones de las armaduras de refuerzo. El seguimiento continuo ha hecho posible el estudio de las diferentes fases de ejecución, comprobando la validez de las hipótesis y el comportamiento previsto por el proyecto, tanto para el conjunto estructura-terreno, como para los criterios adoptados de cara a la influencia de los movimientos sobre las edificaciones. En algún caso, los resultados de la auscultación han aconsejado modificaciones en el proceso constructivo para disminuir la influencia sobre el entorno.

ABSTRACT

This article describes the characteristics and the results of the monitoring undertaken during the construction of a cut and cover tunnel, in some parts with jet-grouting underneath the floor slab, for the section from Palmaret to Alameda of Line 3 of the underground system in Valencia. The extensive instrumentation installed made possible the measurement of the movements caused by the excavation, of the stresses in the ground and in the ends of the roof slab, and of the deformations of the steel reinforcement bars. Continuous monitoring has enabled the study of the different phases of the construction to be undertaken, checking the validity of the assumptions made and the behaviour predicted by the project in so far as the structure-ground interaction is concerned, as well as the criteria adopted with respect to the influence on the structures of the movements produced.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el período que va desde junio 1992 hasta junio de 1994, estuvo en curso la ejecución de las obras de infraestructura para la nueva línea III del Metro de Valencia. El tramo en cuestión tiene una longitud de 2.978 m y discurre desde la Estación de Palmaret hasta el Paseo de la Alameda, junto al antiguo cauce del río Turia (ver figura nº 1: Planta de situación). El tramo comprende la ejecución de 3 estaciones intermedias: Machado, Benimaclet y Facultades, y discurre en su totalidad por una zona altamente urbanizada.

La obra se ha proyectado como túnel artificial, excavado al amparo de muros-pantalla continuos de hormigón armado. La sección se completa con bóveda y contrabóveda y el revestimiento definitivo interior.

Al finalizar la obra se han ejecutado un total de 6.000 m de muros-pantalla de hormigón armado, de 0,80 m de espesor. Su construcción se ha realizado con la técnica de excavación y hormigonado bajo lodo bentonítico. La profundidad es variable entre 16,0 y 27,0 m, lo que supone una superficie total superior a 110.000 m².

2. CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA

2.1. EL TERRENO

El terreno por el que discurre la obra tiene una estructura típica de cuaternario aluvial: rellenos superficiales y arcillas limo-arenosas, a veces con materia orgánica, hasta 3 a 10 m de profundidad.

Figura 1. Planta de situación.

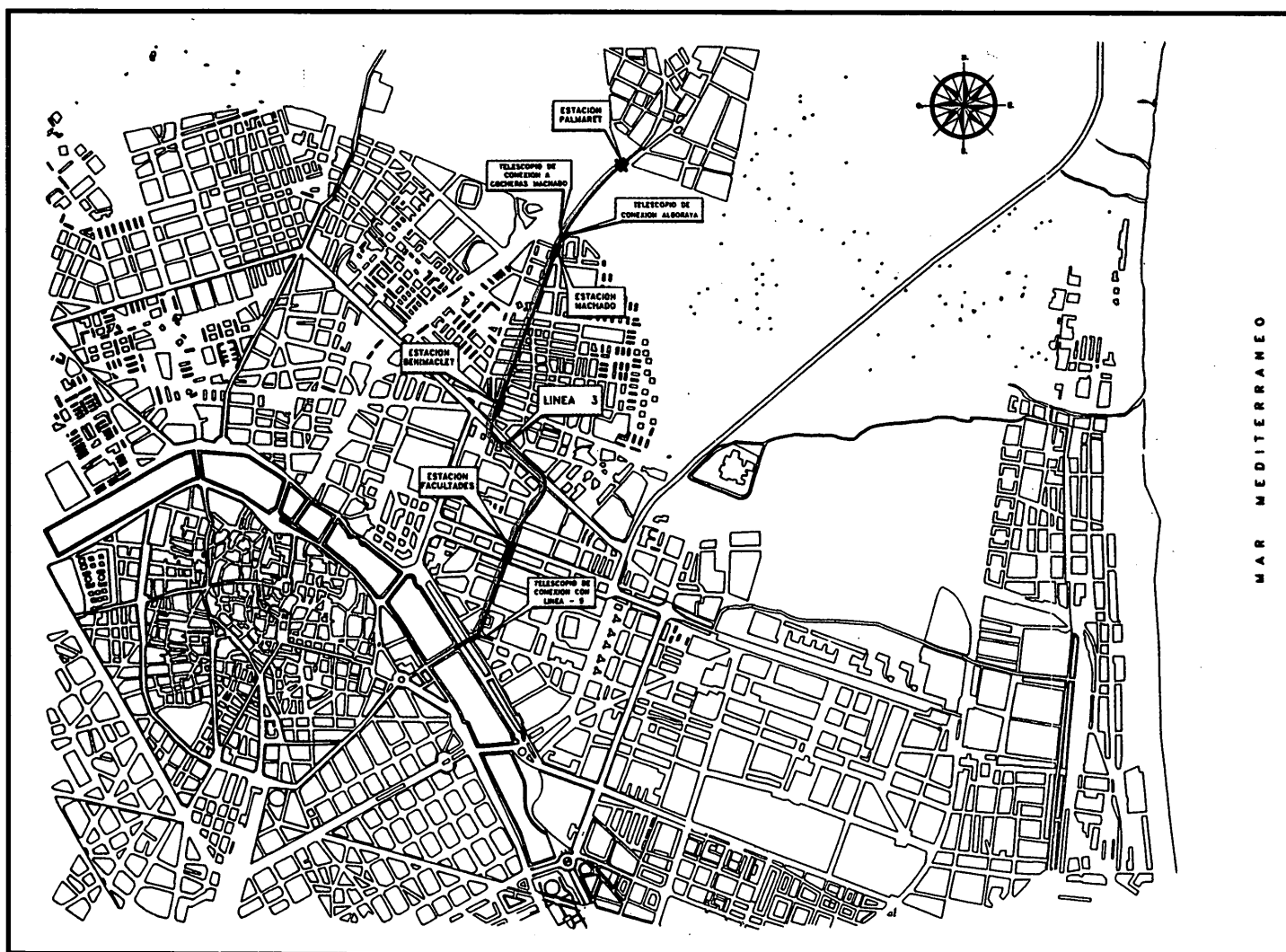
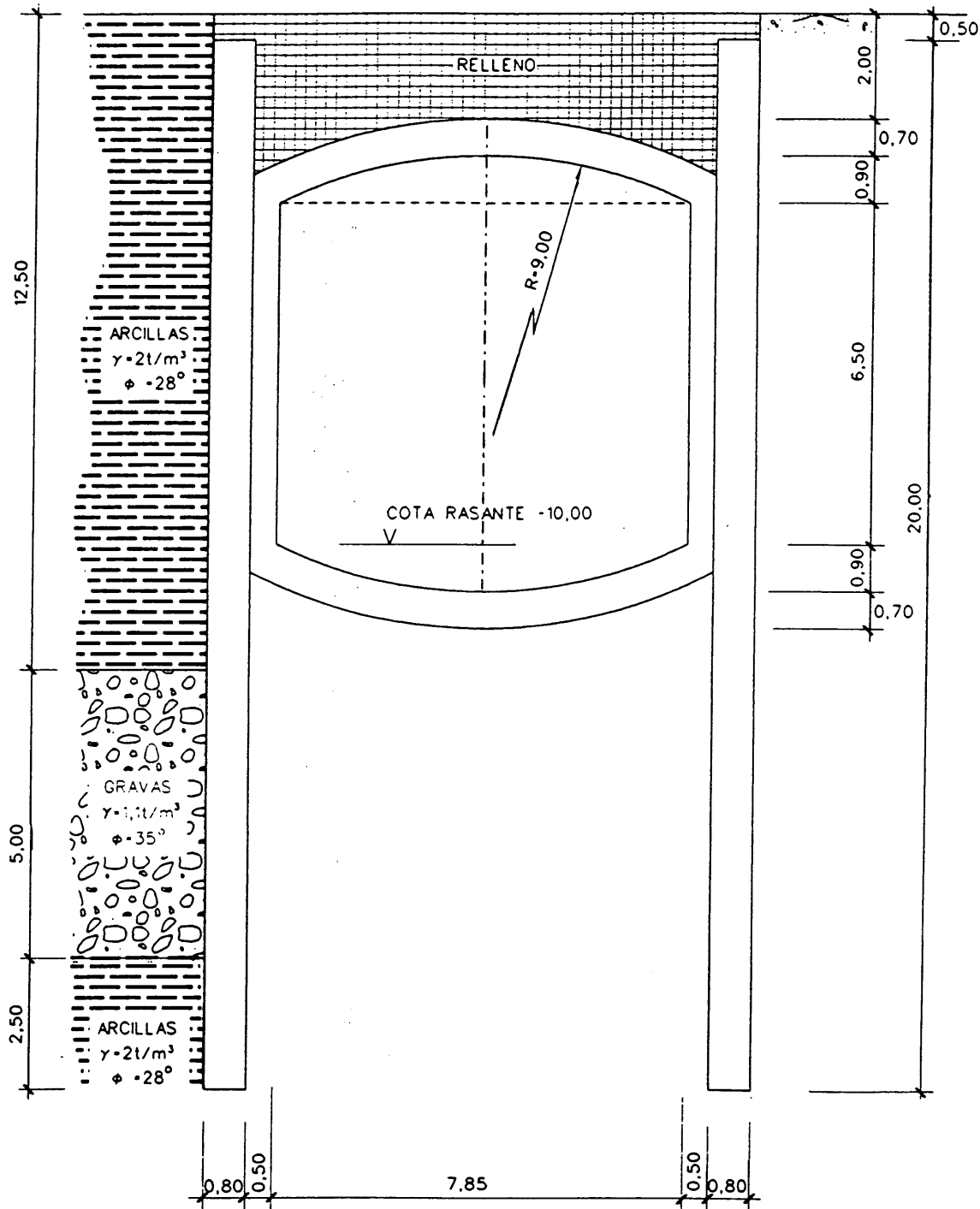


Figura 2.
Sección sin tapón
de jet-grouting



Bajo estas últimas existen sucesiones de grava arenosa de elevada permeabilidad y limos arcillosos poco permeables, hasta profundidades variables entre 15 y 25 m. En profundidad existe un predominio de los niveles lenticulares de limos ar-

cillosos de potencia y continuidad lateral variables.

Los niveles freáticos en la ciudad han tenido fuertes oscilaciones en el tiempo, situándose en ciertas épocas muy próximos a la superficie del

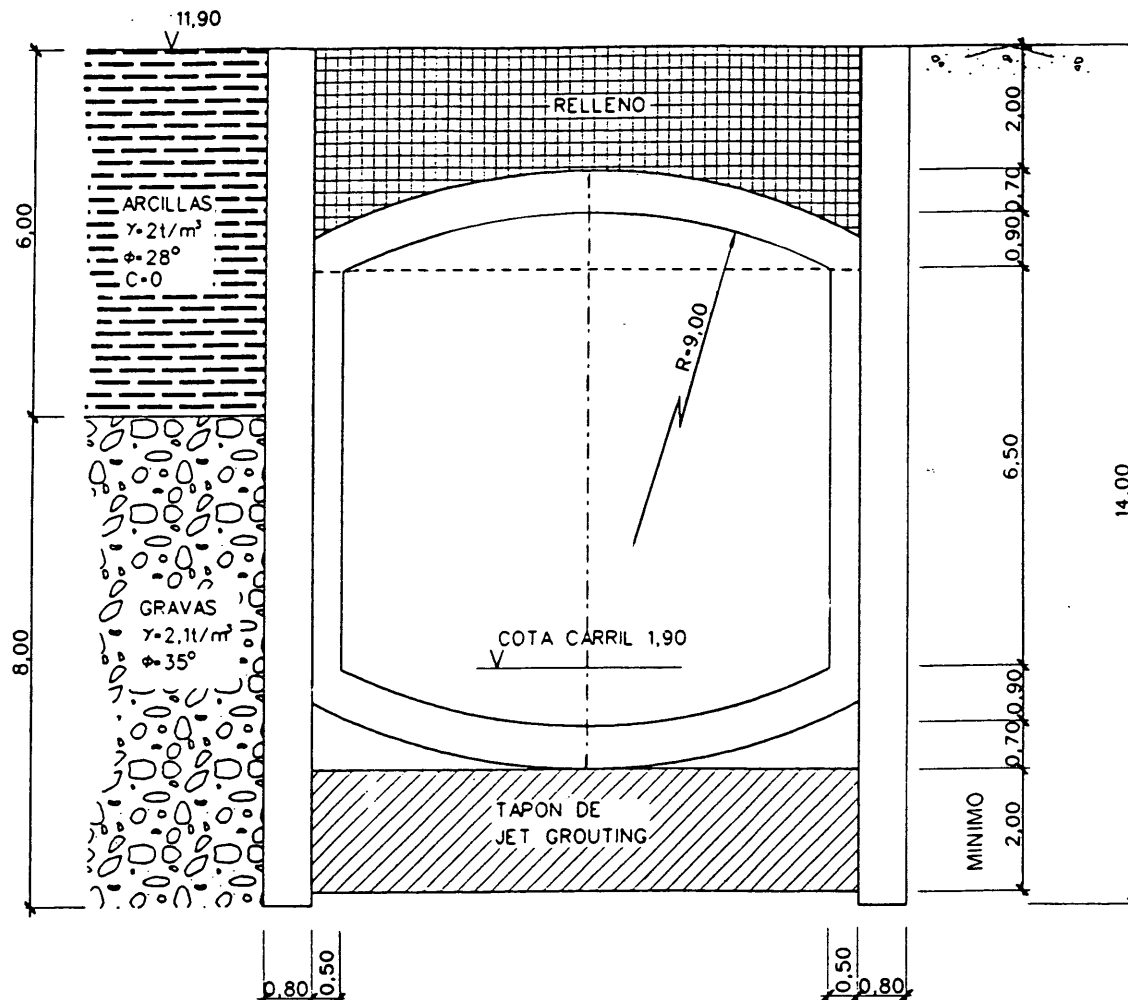


Figura 3.
Sección con tapón
de jet-grouting.

terreno (en algunos puntos) y en torno a 6 m de profundidad en la actualidad.

2.2. SECCIONES CONSTRUCTIVAS TIPO

El proyecto contempla varias secciones transversales con diferente geometría, que por su tipología estructural se pueden reducir tan solo a dos secciones tipo que se distinguen por la existencia de una presolera, o tapón de fondo, construida con la técnica de inyección tipo jet-grouting.

La sección transversal representativa de la mayor parte del túnel ha comprendido muros-pantalla empotrados en los niveles limo-arcillosos subyacentes a la máxima profundidad excavada, cuando éstos tienen continuidad y espesor suficientes para lograr impermeabilidad y resistencia frente a la subpresión del freático (Figura nº 2).

En el resto, la ausencia de niveles limo-arcillosos de entidad y localización adecuadas, ha obligado a un tratamiento con inyecciones tipo jet-grouting para configurar una presolera entre muros-pantalla e inmediatamente por debajo de la contrabóveda (Figura nº 3).

Esta solución que ha permitido acortar la longitud de los muros-pantalla al actuar como estampidor o codal durante la construcción de la contrabóveda, y efectuar toda la excavación prácticamente en seco, fue diseñada para resistir los empujes horizontales del terreno, y lo que es más importante, la subpresión igual al desnivel piezométrico creado por la excavación. Además, esta solución tiene la ventaja de minorar el efecto barrera sobre el flujo del acuífero.

Específicamente, el tratamiento de fondo con jet-grouting fue definido tras la realización de áreas de prueba para calibrar los parámetros teóricos

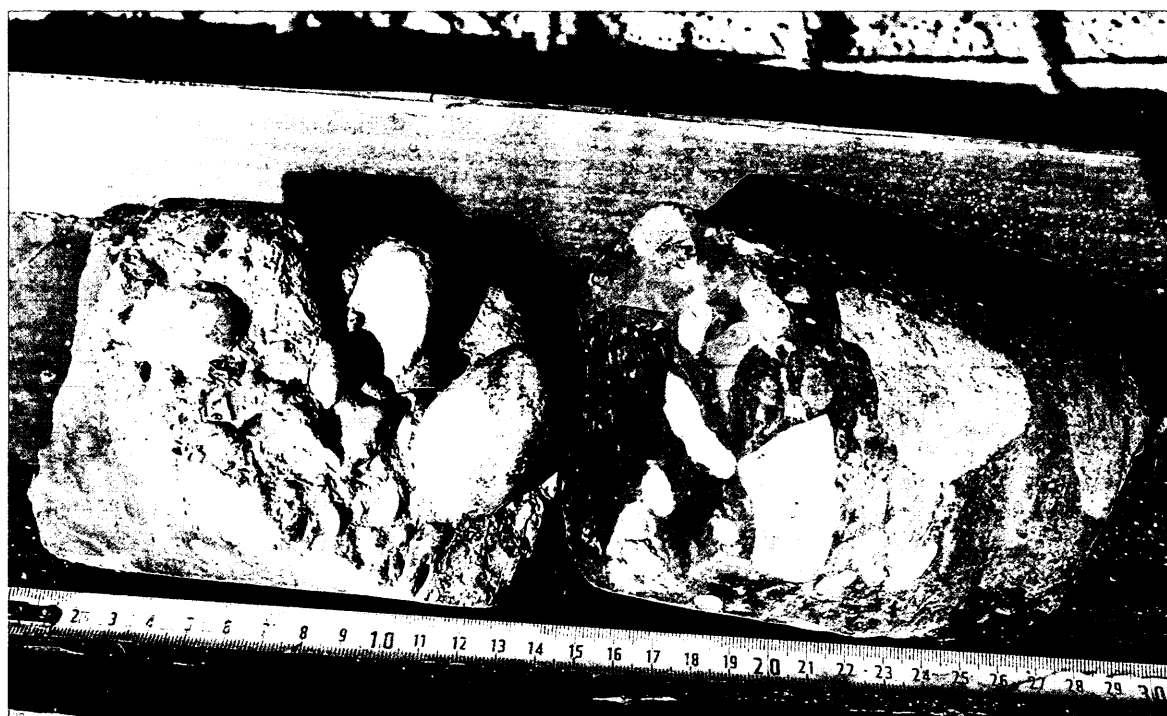


Foto 1. Testigo recuperado de jet-grouting.

fijados en proyecto para jet triple. La disposición final de taladros en planta se hizo según una malla triangular equilátera con una separación entre ejes de 1,20 m, y el consumo de cemento fue variable entre 650 y 1000 kg/m, según la proporción de finos del terreno tratado.

El número de unidades ejecutadas ha sido de unos 15.000 taladros, con un espesor de tratamiento entre 2,0 y 4,5 m. Esto ha supuesto un total de 225.000 m de perforación y unos 35.000 m tratados. La foto nº 1 muestra un testigo recuperado de terreno tratado con jet-grouting y la foto nº 2, parte de una columna de jet-grouting descubierta en la zona del área de prueba.

2.3. FASES DE EJECUCIÓN

Las fases de ejecución para el tipo de secciones de muros-pantalla con tapón de jet-grouting se resumen en la figura nº 4.

Los muros-pantalla sin tapón de jet-grouting se diferencian de los anteriores en su ejecución únicamente por la ausencia de la fase 3.

3. INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN

Se efectuó un Proyecto de Instrumentación y Auscultación para el control de diversas magnitu-

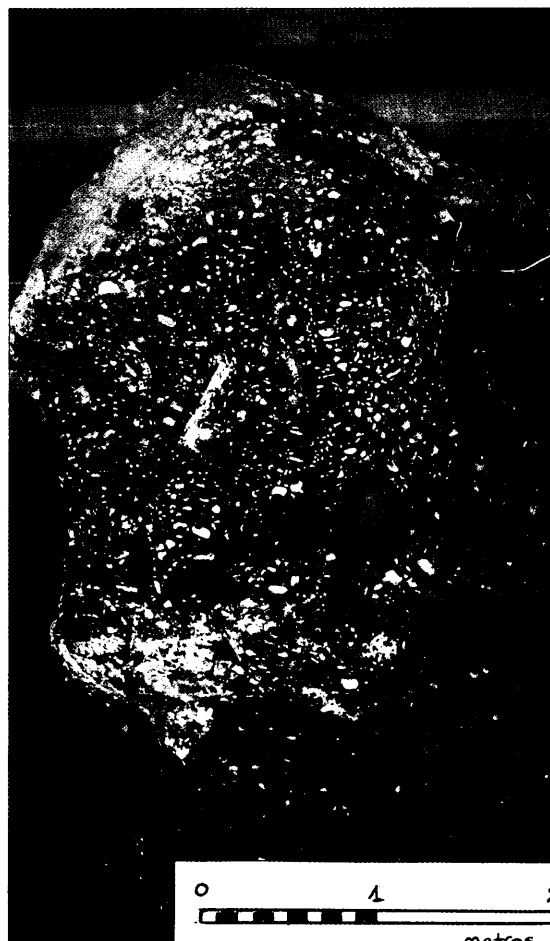


Foto 2. Columna de jet-grouting.

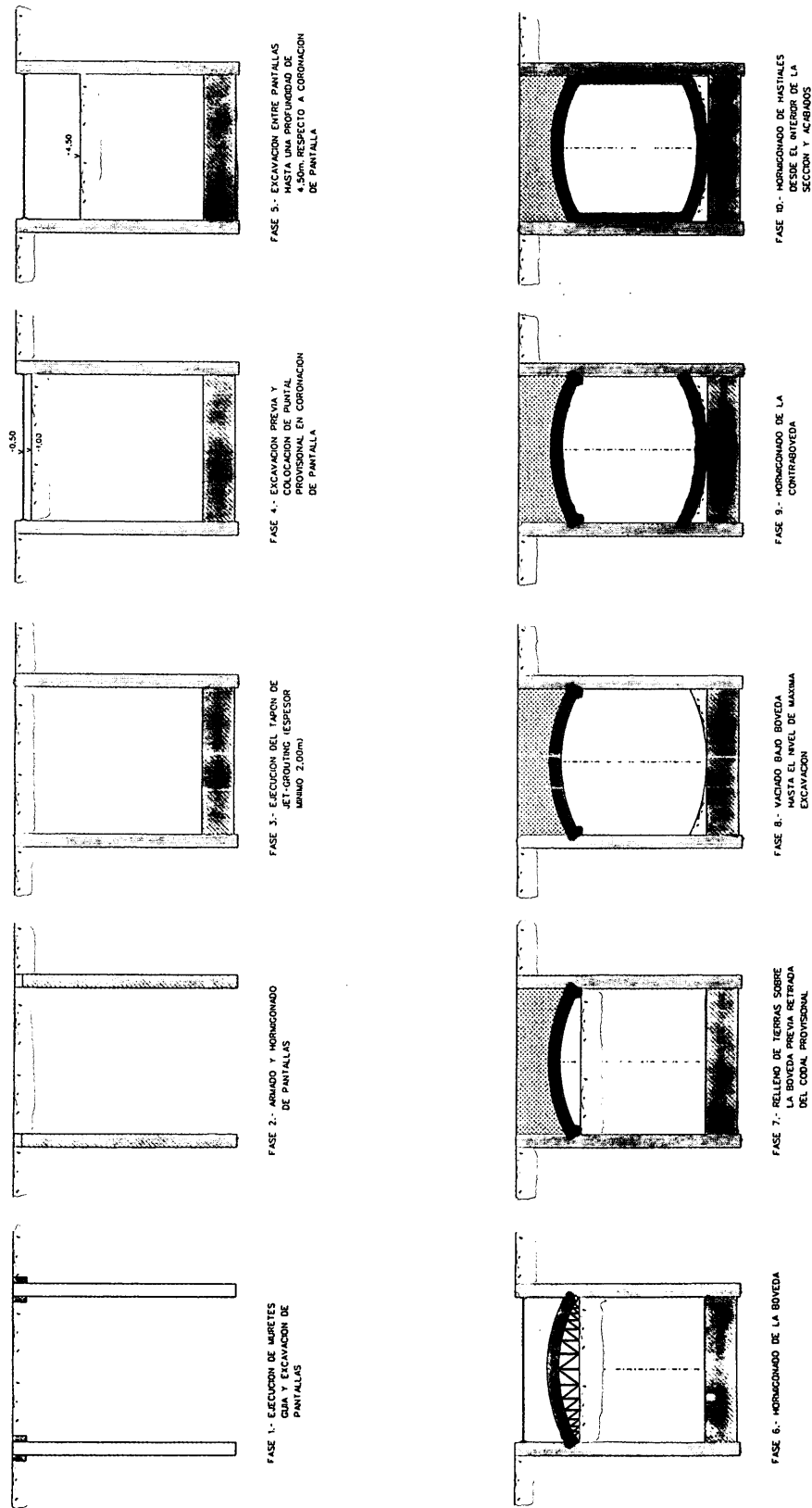
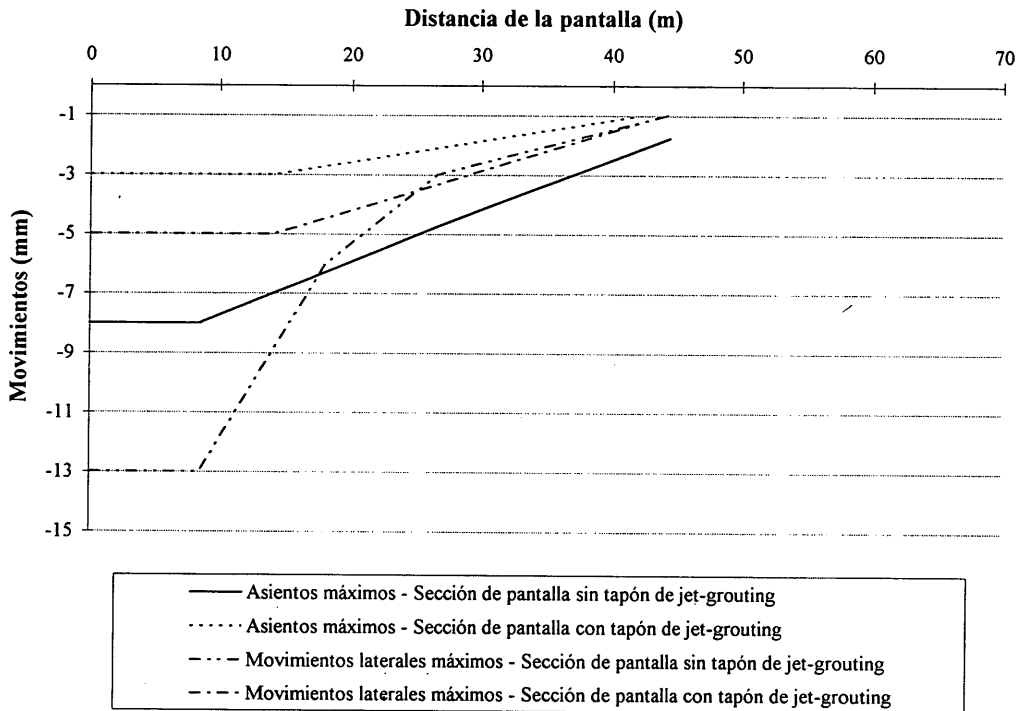


Figura 4. Fases de ejecución. Sección con tapón de jet-grouting.

CRITERIOS EMPIRICOS DE ASIENTOS Y DE MOVIMIENTOS LATERALES

Figura 5.



des de la obra, con la realización posterior de lecturas periódicas, junto con el procesado de la información y el análisis de los resultados correspondiente.

Los objetivos generales de la instrumentación se resumen en los dos puntos siguientes:

- ▼ Controlar los efectos de las obras sobre el entorno, con especial atención a las edificaciones adyacentes, a fin de preservarlas de posibles afecciones.
- ▼ Conocer el estado de tensión y deformación del conjunto suelo-estructura, para compararlo con los modelos teóricos adoptados para el diseño, y comprobar que, a lo largo de la obra, se mantienen los coeficientes de seguridad previstos, o introducir las modificaciones necesarias.

Para el cálculo de proyecto se utilizó el programa STRUDL, consistente en un modelo elástico que representa los elementos estructurales como vigas, y el efecto del terreno como muelles con unas constantes de rigidez determinadas, según el tipo de suelo. Teniendo en cuenta este modelo

elástico, y los criterios empíricos de daños y movimientos adoptados en el proyecto (ver figuras números 5 y 6), la instrumentación se desarrolló en dos niveles:

Primer nivel.

Instrumentación extendida a toda la obra y su área de influencia, que comprendió:

- ▼ Control de asientos en edificaciones próximas (regletas de nivelación referidas a bases

Figura 6.

CRITERIO DE MOVIMIENTOS ADICIONALES ADMISIBLES EN EDIFICIOS

	ASIENTO ADMISIBLE	DISTORSION ANGULAR	DIFERENCIAL HORIZONTAL
Edificios cimentados superficialmente sin daño aparente.	15 mm	1/1000	0,2%
Edificios cimentados superficialmente con daños.	8 mm	1/2000	0,1%



Foto 3. Edificio con fisura instrumentada en la fachada.

fijas, y fisuras instrumentadas mediante chinchetas - Fotos 3 y 4).

▼ Control de deformaciones horizontales y verticales en los viales próximos a los muros-pantalla (alineaciones de hitos implantados en el terreno, hasta distancias superiores a 60 m del eje del túnel, ver Figura nº 7).

▼ Control de movimientos horizontales entre pantallas (medida de convergencias).

▼ Control de niveles freáticos (piezómetros extendidos a lo largo de la obra, dentro y fuera del recinto).

Segundo Nivel.

Instrumentación localizada en secciones de control representativas del conjunto. Se colocaron un total de cuatro secciones instrumentadas, dos de pantallas con tapón de jet-grouting y dos de pantallas sin tapón.

Cada sección, de modo general, comprendió:

▼ Medida de desplazamientos horizontales, a lo largo de toda su profundidad, en pantallas (tuberías con sondas inclinométricas biaxiales).

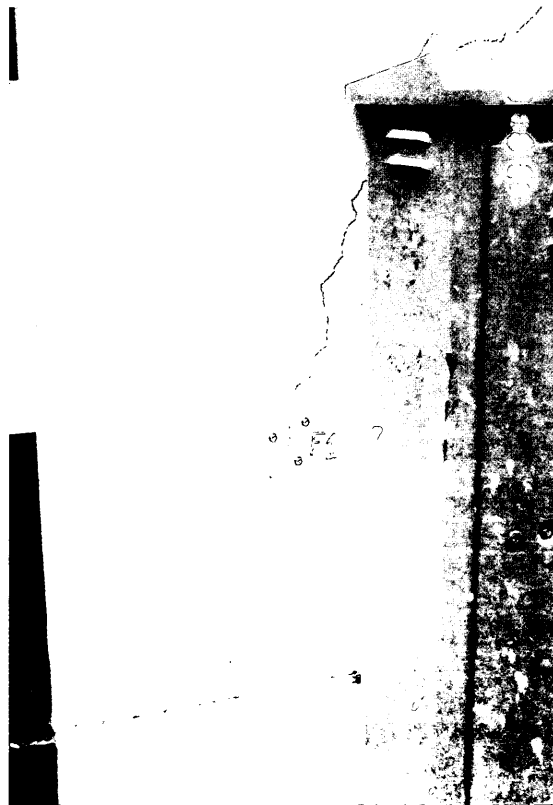


Foto 4. Fisura instrumentada

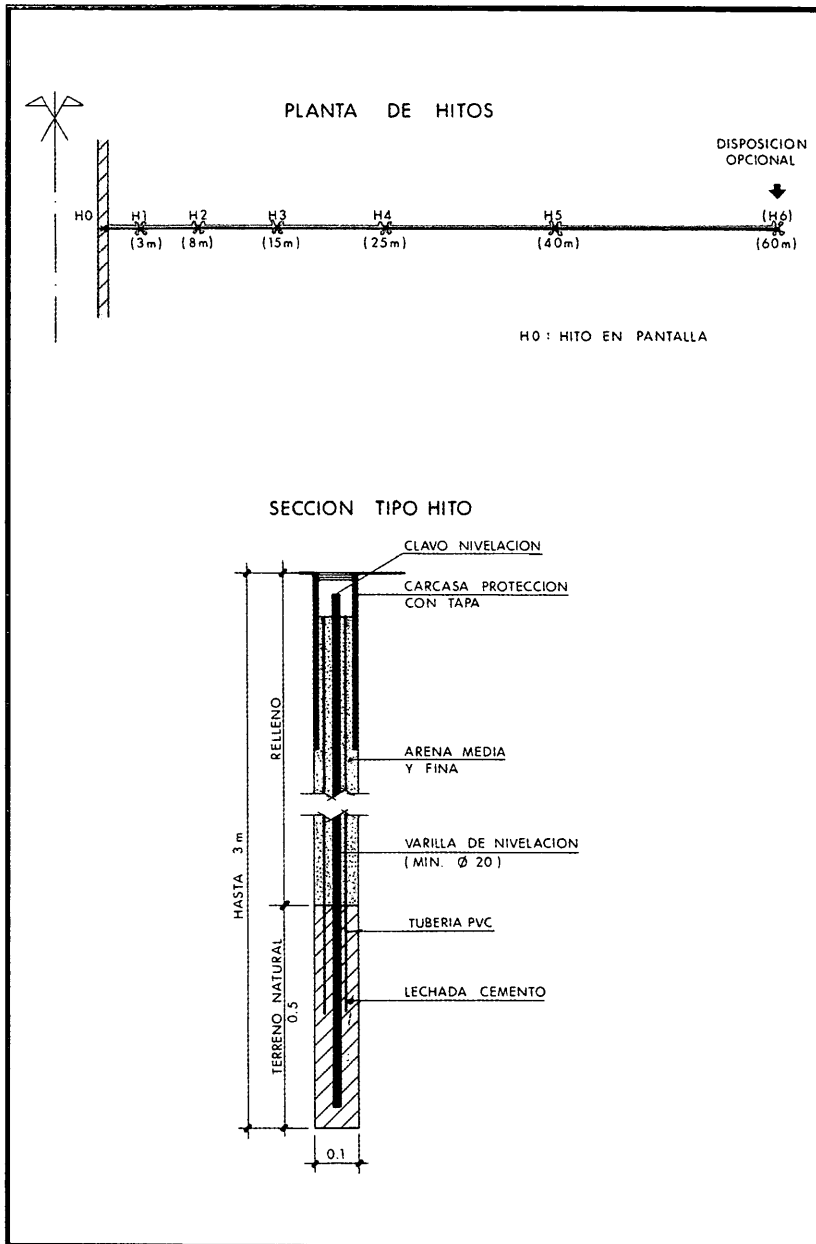


Figura 7. Situación de hitos en sección de control de movimientos.

- ▼ Medida de deformaciones-tensiones, en armaduras de pantallas (extensómetros de cuerda vibrante - Foto nº 5).
- ▼ Medida de esfuerzos en codales (células de presión de cuerda vibrante - Foto nº 6).
- ▼ Medida de temperaturas para el análisis de la influencia térmica en las magnitudes registradas.
- ▼ Medida de empujes del terreno (células de presión total de cuerda vibrante - Foto nº 7).
- ▼ Medidas de niveles freáticos junto a las secciones instrumentadas (piezómetros eléctricos).

▼ Medidas de asientos en la propia pantalla (nivelación de precisión referida a bases fijas ejecutadas a tal efecto).

La figura nº 8 representa la sección instrumentada de la pantalla de la calle José María Pinazo, como ejemplo de la instrumentación en una pantalla tipo I-B, es decir sin tratamiento de fondo. La foto nº 8 muestra el izado de la armadura instrumentada de este tipo de pantalla.

Además de estos dos niveles de instrumentación, se ha hecho una nivelación de precisión en la Estación de Benimaclet, zona donde se registraron mayores movimientos, mediante clavos dispuestos sobre una losa en superficie, para seguir de cerca esta zona problemática.

4. RESULTADOS DE LA AUSCULTACIÓN

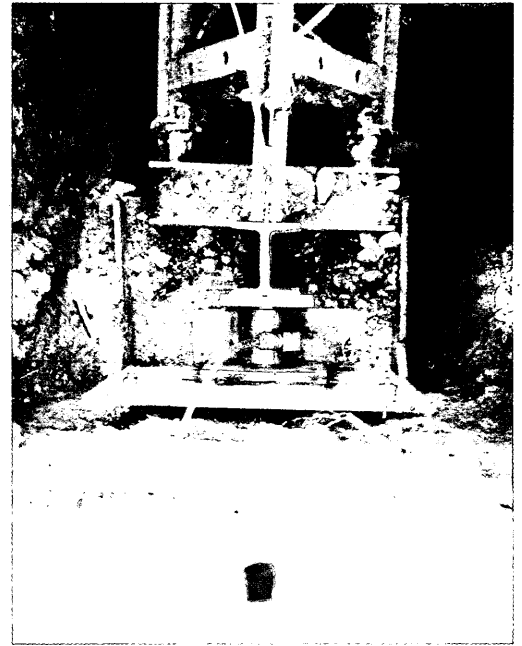
A lo largo de los dos años de duración de la obra, se registraron y analizaron las mediciones dadas por los instrumentos de control. La foto nº 9 muestra una estación automática de adquisición de datos en una sección de control instrumentada. La información recogida durante estos trabajos se concretó en unos informes emitidos mensualmente.

Los resultados de estas mediciones se compararon con los criterios empíricos de movimientos y deformaciones fijados como admisibles en el Plan de Instrumentación y Auscultación, establecido antes del comienzo de la obra. Como ejemplo de los resultados de estas mediciones, la figura nº 9 muestra la variación de tensiones en el trasdós de la pantalla en función del tiempo, medida con los extensómetros.

Los resultados también se compararon con el comportamiento previsto por el modelo teórico adoptado en el cálculo de proyecto, para comprobar la validez y exactitud de este último para representar el caso estudiado y para sacar conclusiones que permitan optimizar su uso en el diseño futuro de estructuras similares.

4.1. MOVIMIENTOS EN EL TERRENO

De las gráficas que relacionan los movimientos del terreno previstos en el proyecto con los medidos por medio de las secciones de hitos, se puede deducir que, en general, los asientos y los movimientos laterales hacia la excavación registra-



dos, han sido inferiores a los máximos calculados previamente (ver figura nº 10).

Los movimientos laterales máximos medidos en las secciones de pantalla con y sin tapón de jet-grouting, han oscilado entre 1 y 2 mm (frente a los 5 mm previstos) y entre 2 y 6 mm (frente a los 3 mm previstos), respectivamente. En cuanto a los asentamientos máximos medidos, estos han oscilado entre 1 y 2 mm (frente a los 3 mm previstos) y entre 0,5 y 1,5 mm (frente a los 8 mm previstos), respectivamente.

Además de lo anterior, resulta conveniente destacar que se han registrado movimientos más allá de la distancia a los muros pantalla a la cual estos se anularían, según las previsiones de proyecto, es decir, 50 a 55 m. En el caso de las secciones sin tapón de jet-grouting se han medido movimientos laterales de 2 mm a distancias de 65 m del muro pantalla, mientras que en ambos tipos de secciones se han medido asentamientos entre 0,5 y 2 mm a distancias de 55 a 65 m. Este hecho no tiene una explicación clara, pero probablemente tenga que ver con el descenso del nivel freático por drenaje y la época general de sequía (asentamientos), y con la precisión del sistema de medida (movimientos laterales).

4.2. MOVIMIENTOS EN LOS EDIFICIOS

En las zonas sin tapón de jet-grouting, los edificios próximos a la traza, cimentados superficial-

mente, no han sufrido daños durante la ejecución de la obra. Los movimientos registrados en ellos han sido descensos, con máximos en torno de los 10 mm, y las distorsiones angulares máximas asociados a estos movimientos han sido del orden de $1/6000$. Ambos máximos no han superado los valores de los movimientos adicionales admisibles para edificios ya construidos, fijados mediante criterios empíricos, que aparecen en la Figura 6.

En las zonas con tapón de jet-grouting, los movimientos máximos registrados en los edificios próximos a la traza, con cimentación superficial,

Foto 5.
Extensómetro de
cuerda vibrante.
A la derecha, foto 6.
Células de presión
de cuerda vibrante
en codal.

Foto 7.
Células de presión
total.

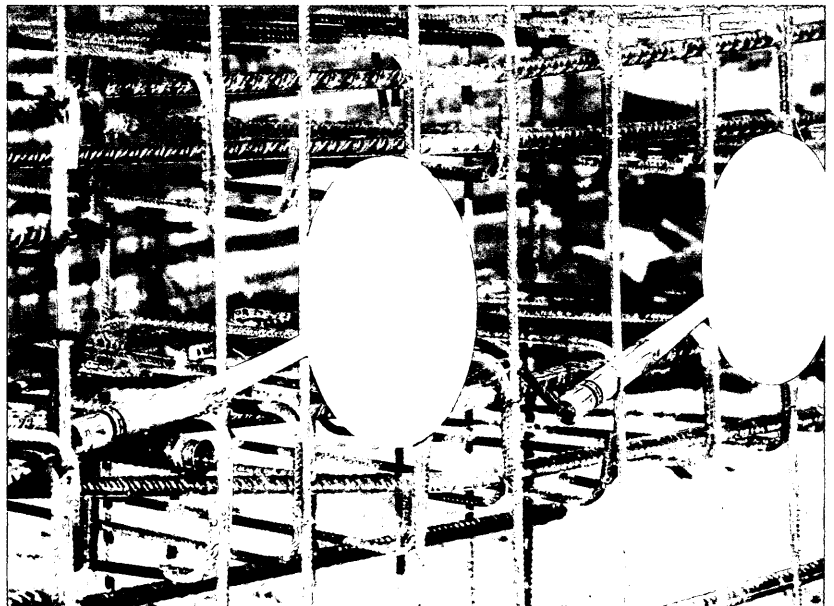
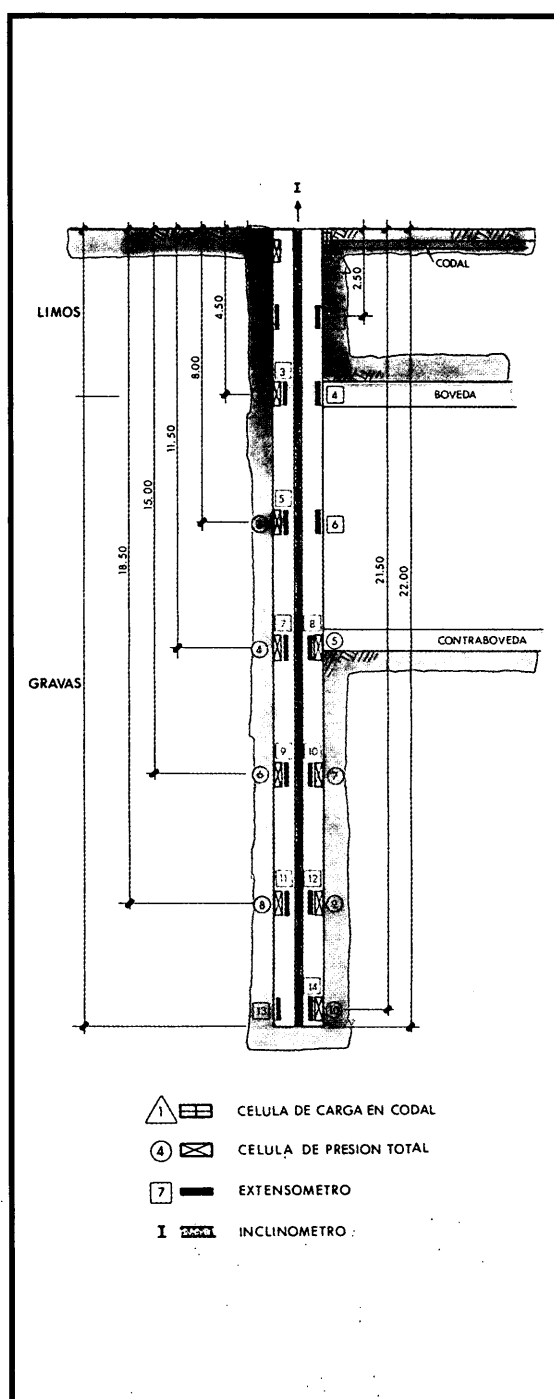


Figura 8.
Instrumentación de
pantallas.



han sido, en general, ascensos. Dentro de estas zonas, en los edificios que no tenían daños antes de comenzar la obra, no ha habido daños durante la ejecución de los trabajos y se han registrado unos ascensos máximos del orden de 12 mm, unas distorsiones angulares cercanas a 1/5000 y unos diferenciales horizontales del 0,05%, aproximadamente. Al igual que en el caso de las zonas

sin tapón de jet-grouting, estos máximos no han superado los valores de los movimientos adicionales admisibles mencionados. En cambio, en los edificios que tenían daños antes de comenzar la obra, tanto los ascensos máximos registrados (15 mm), como las distorsiones angulares máximas (1/1500) y los diferenciales horizontales máximos (0,27%), han superado los valores de los movimientos adicionales admisibles. En este caso ha habido daños en tabiquería y complementos, sin afectar a la estructura. Más aún, teniendo en cuenta el valor de la distorsión angular máxima citado y que las luces de los edificios son de 5 m aproximadamente, incluso quedaría un margen de unos 20 mm hasta llegar a los daños estructurales.

En función de lo anterior se puede concluir, con carácter general, que el criterio de movimientos adicionales admisibles para edificios que se resume en la Figura 6, ha funcionado bien como criterio de daños.

La ejecución del tapón de jet-grouting dió lugar a los ascensos mencionados, los cuales fueron producidos por un efecto pistón del chorro de lechada en un recinto cerrado, al no poder retornar ésta por el taladro de inyección y transmitirse, en consecuencia, la presión al agua del acuífero que ocupa las gravas. Los movimientos mayores originados por esta causa se dieron en la zona de Benimaclet, en la cual, con base en los datos aportados por la instrumentación, se dispuso un cambio en el sistema de ejecución consistente en efectuar el tratamiento después de una excavación previa hasta el nivel freático, para evitar el riesgo de obturación del taladro, y reducir la presión del agua con pozos. Esta misma instrumentación, junto con las inspecciones visuales, permitieron comprobar que el cambio del sistema de ejecución adoptado en esa zona fue correcto.

4.3.OSCILACIONES DEL NIVEL FREÁTICO

Las oscilaciones máximas del nivel freático, registradas desde Agosto de 1992, han presentado una media de 1,2 m, que se encuentra dentro del rango normal de variaciones estacionales (menores de 1 a 2 m). Por lo tanto, la influencia de las obras en este sentido, se puede considerar como asumible por el entorno.

Asimismo, las profundidades mínimas y máximas alcanzadas por el nivel freático en los piezómetros distribuidos a lo largo de la traza, han sido de 4,8 m y de 8,8 m, respectivamente.

4.4. PRESIONES EN EL CONTACTO PANTALLA-TERRENO

Considerando por un lado los diagramas de presión en función de la profundidad asumidos en el cálculo de proyecto, y por el otro, las presiones en el contacto pantalla-terreno registradas por las células, se puede afirmar que las presiones medidas ("reales") se han mantenido, en general, por debajo de las de proyecto ("teóricas"), y sólo en algunas células las han superado levemente. La figura nº 11 muestra el gráfico comparativo correspondiente a las secciones de pantallas instrumentadas sin tapón de jet-grouting, una vez terminada la ejecución de la obra.

La diferencia entre las presiones medidas y las de proyecto ha llegado, en valor absoluto, a un máximo de $0,6 \text{ kg/cm}^2$ (lo cual corresponde a un 80 % aproximadamente).

La excepción a lo anterior la constituyen algunos casos donde las presiones medidas han superado a las de cálculo en $0,1$ a $0,2 \text{ kg/cm}^2$, valores que representan incrementos puntuales de entre un 5 y un 25%.

4.5. DEFORMACIONES EN LOS MUROS-PANTALLA

Para los valores máximos de las deformaciones en las barras de la armadura de las pantallas (1,3%), medidos con los extensómetros, los niveles de tensiones correspondientes no superan el 65% de la resistencia de cálculo (4.000 kg/cm^2). Asimismo, de acuerdo con la EH-91, estas deformaciones no pasan del 37% de la máxima deformación que fisuraría al hormigón (3,5%). Por tanto, las condiciones de trabajo pueden considerarse buenas.

4.6. ESFUERZOS EN LOS MUROS PANTALLAS

Las leyes de esfuerzos que se deducen de la instrumentación colocada en las secciones de pantalla, particular-

mente de los extensómetros, se corresponden bastante bien con los modelos estudiados en el proyecto.

Sin embargo, los valores máximos de los momentos (20 m.t) y de los cortantes (17 t) obtenidos

Foto 8.
Izados de armadura instrumentada.

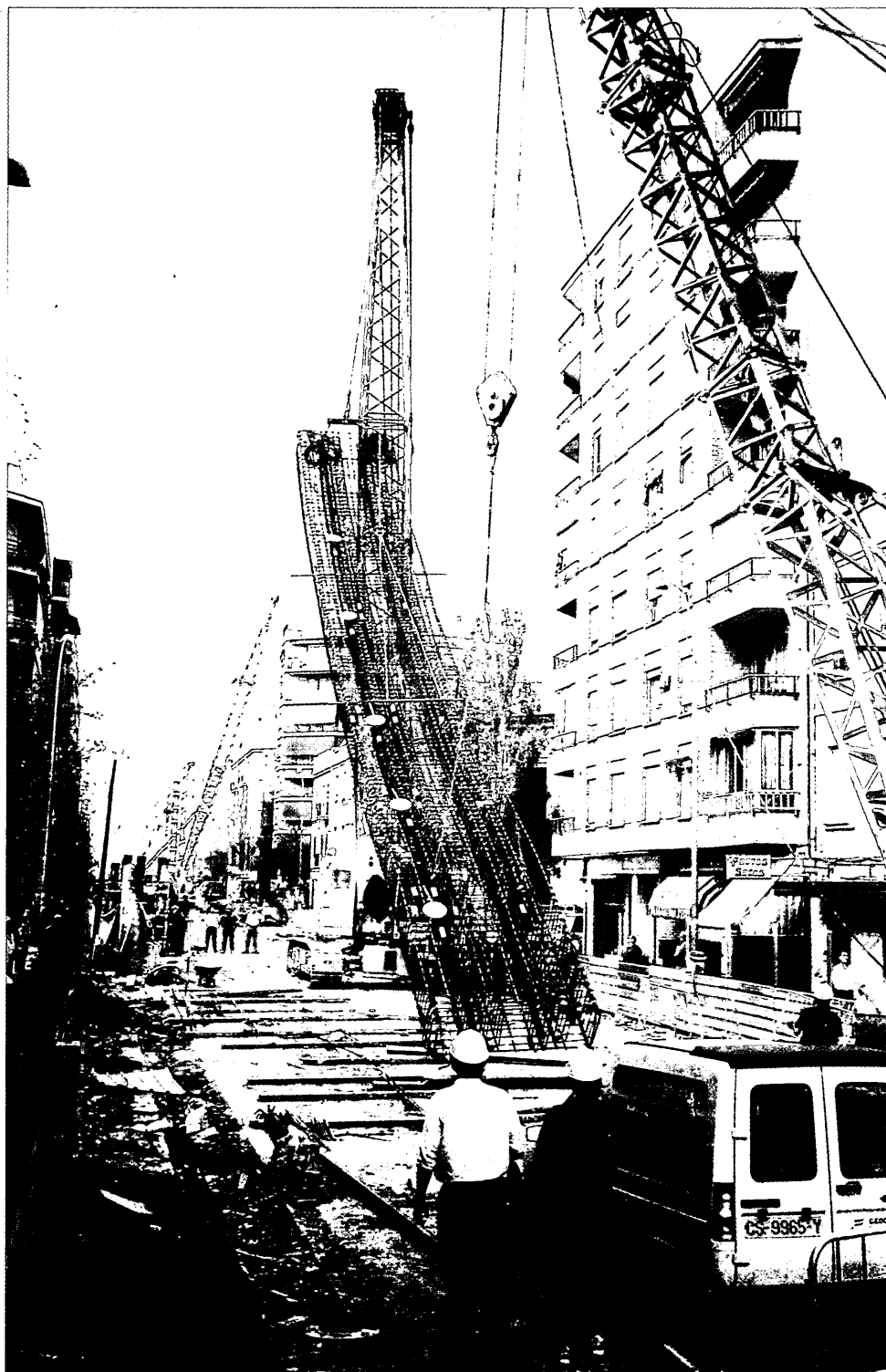


Figura 9.

EXTENSOMETROS EN INTRADOS DE PANTALLAS

C/ VILLA DE MURO P.K. 1+487

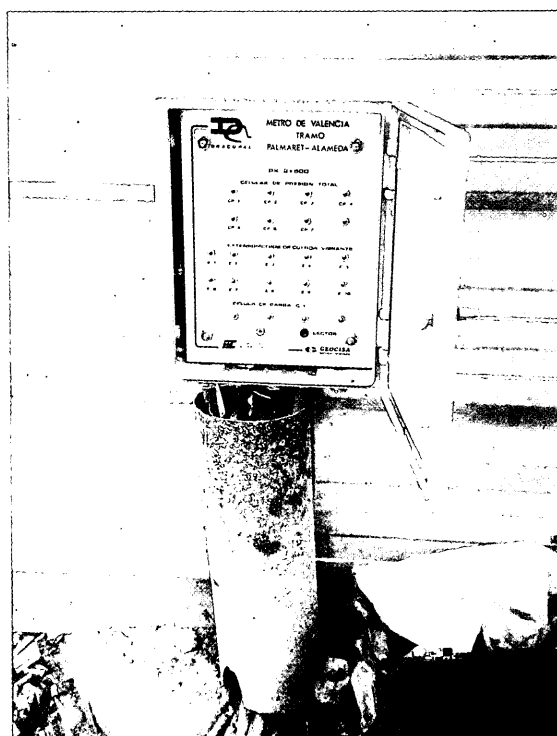
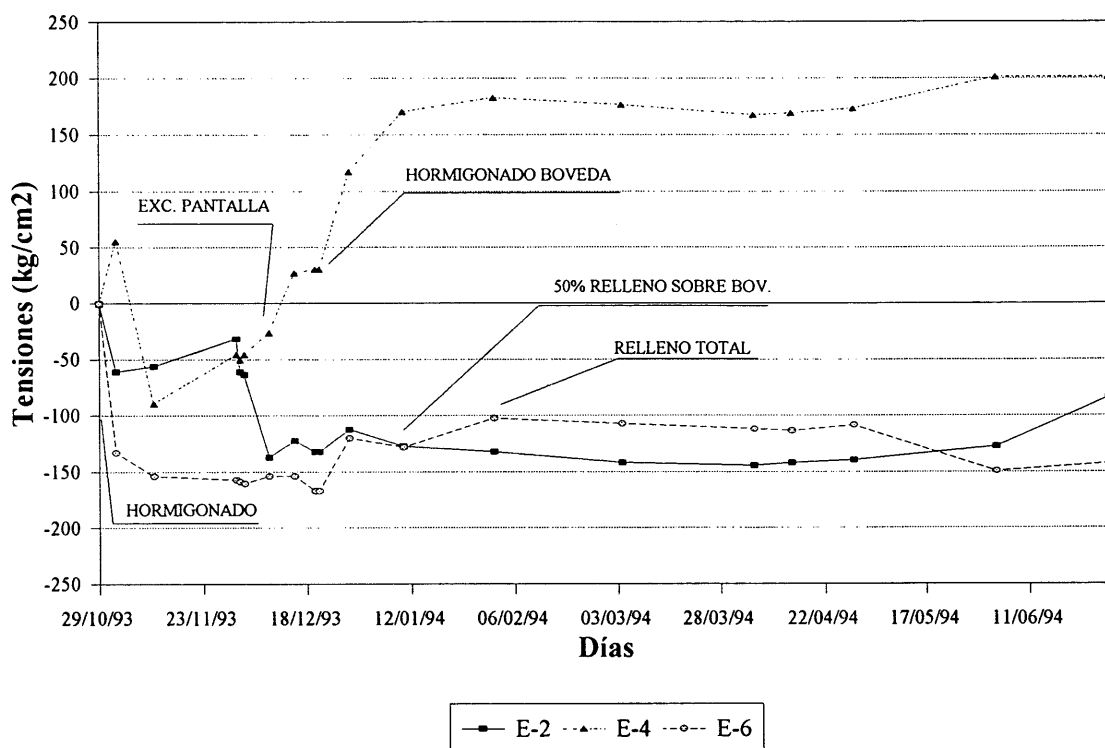


Foto 9.

a partir de las deformaciones máximas mencionadas, resultan del orden de la mitad de los máximos de cálculo adoptados. Esta diferencia, del lado de la seguridad, se debería principalmente a dos causas: por un lado la diferencia señalada entre los diagramas de presiones en el trasdós adoptados para el cálculo, y por el otro, una inadecuada elección de las constantes de los muelles con los que se ha modelizado el tapón de jet-grouting y la movilización de los empujes pasivos.

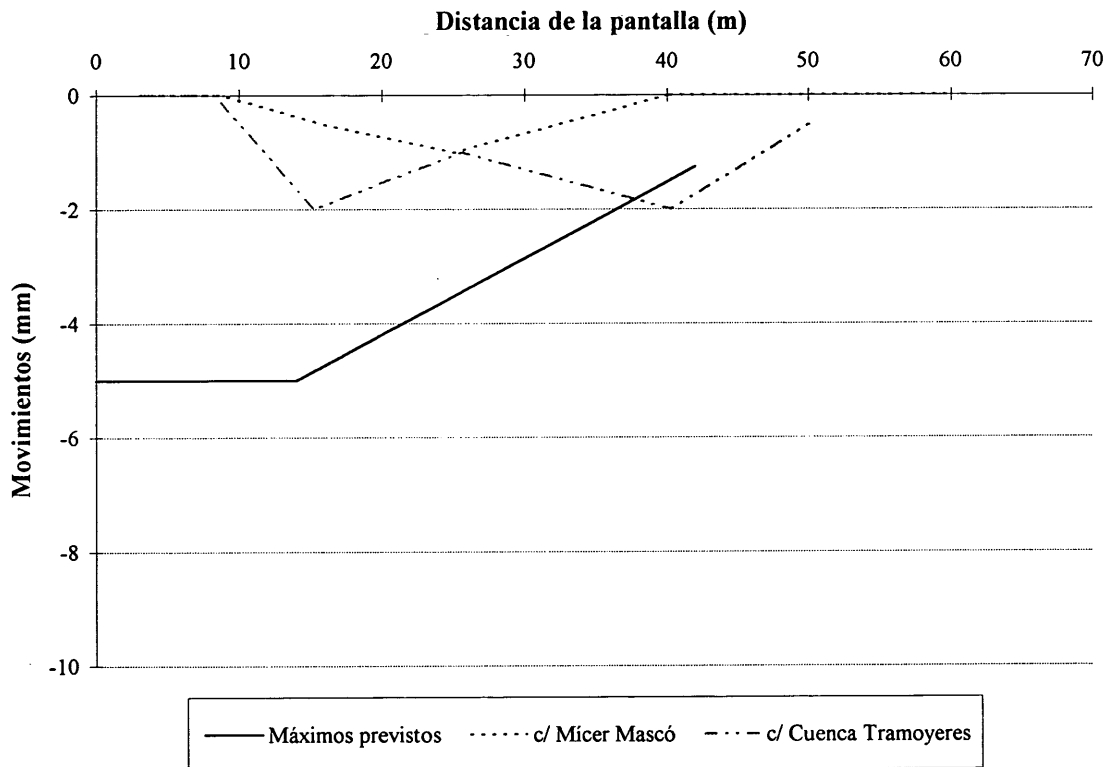
5. CONCLUSIONES

Sobre el comportamiento de la excavación en zanja con muros-pantalla del tramo Palmaret-Alameda de la línea 3 Metro de Valencia, se puede concluir lo siguiente:

- ▼ Debido al sistema de ejecución de los muros pantalla empleado (excavación con lodos bentoníticos, bataches cortos, etc), la influen-

Figura 10.

MOVIMIENTOS LATERALES PANTALLAS CON TAPON DE JET-GROUTING



cia de esta actuación sobre el entorno ha sido mínima.

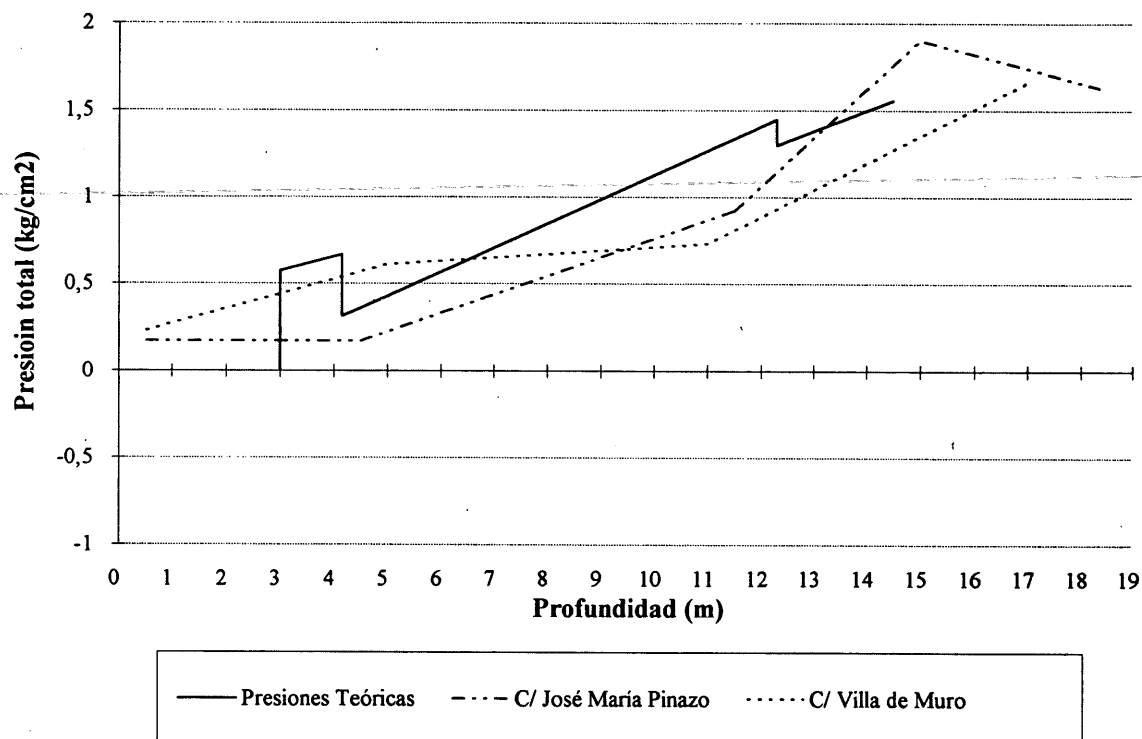
▼ En general, las dos secciones con tapón de jet-grouting y 14 m de longitud de pantallas han mostrado, desde el punto de vista de los esfuerzos y deformaciones, un comportamiento similar entre sí y similar al de las otras dos secciones con pantallas de 20 m de longitud y sin tapón de jet-grouting. De esto se deduce la conveniencia de emplear, en situaciones similares a las de esta obra, el tapón de jet-grouting, ya que además de la impermeabilidad y de eliminar la afección al acuífero, ofrece ventajas de tipo constructivo y sólo se puede presentar el inconveniente de generar movimientos de tipo ascensional, en algunos casos. No obstante, con una adecuada instrumentación y un buen seguimiento, que alerte sobre dichos movimientos y permita introducir cambios en el sistema de ejecución, se puede evitar este inconveniente.

▼ Los movimientos del terreno (asientos y movimientos laterales) registrados por medio de las secciones de hitos, han oscilado entre un 15 y un 50% de los valores previstos por el criterio empírico adoptado. Los valores máximos de los asientos y de los movimientos laterales han sido de 2 mm y 6 mm, respectivamente.

▼ Únicamente en los edificios cimentados superficialmente y con daños, los movimientos han superado los límites (movimientos adicionales admisibles) previstos por el criterio empírico adoptado. Como consecuencia de esto se han producido fisuras en los cerramientos en algunos de ellos, aunque sin llegar a afectarse la estructura. En consecuencia, teniendo en cuenta lo anterior y que los edificios que registraron movimientos inferiores a los límites fijados por este criterio no han sufrido ningún daño, puede afirmarse que el mismo resulta válido y, por lo tanto, podrá aplicarse en obras similares, en el futuro.

Figura 11.

PRESIONES TOTALES PANTALLAS SIN TAPON DE JET-GROUTING



▼ En general, los esfuerzos y deformaciones medidos en las secciones de pantalla se han mantenido por debajo de los valores de cálculo. Asimismo, las oscilaciones del nivel freático no han superado el rango de las variaciones estacionales y, por lo tanto, la influencia de las obras en este sentido, se puede considerar asumible por el entorno.

▼ La instrumentación utilizada para medir los movimientos en el entorno, las oscilaciones del nivel freático y los esfuerzos y deformaciones en los muros pantalla, así como la frecuencia con que se han tomado las lecturas, pueden considerarse suficientes, ya que han permitido cumplir con los objetivos perseguidos: comprobar las hipótesis de proyecto y advertir algún comportamiento anómalo con cierta ante-

lación, para poder introducir las correcciones oportunas.

▼ Una vez finalizada la ejecución de la obra, los gráficos de evolución, en función del tiempo, de los movimientos en el entorno y de los esfuerzos y deformaciones en las secciones de pantalla, muestran una situación de equilibrio, prácticamente.

6. AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Dirección General de Transporte de la Generalitat Valenciana por su estímulo y permiso para la publicación de este artículo, y a D. Manuel Romana Ruiz, Catedrático de la Universidad de Valencia, por su colaboración durante el desarrollo de los trabajos. ●