

EL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS DURANTE LA CONSTRUCCION DE LAS ESTACIONES DE METRO DE SEVILLA ⁽¹⁾

J. L. JUSTO (*)
A. JARAMILLO (**)
J. A. REIN (***)

RESUMEN. Durante la construcción de las estaciones de metro de Sevilla, algunos edificios antiguos han sufrido importantes daños. Las estaciones fueron excavadas desde los pozos de acceso en un estrato de arcilla miocena dura. El eje del túnel está a una profundidad media de 36 metros. «La pérdida de suelo», V_s , se ha reducido desde el 2,3 % al 1,6 % del volumen de la excavación, V_0 , reforzando las cerchas y el revestimiento de gunita en las galerías, evitando mantener varias galerías abiertas simultáneamente y disminuyendo el tiempo que las galerías permanecen abiertas. Se han estudiado los parámetros de la cubeta de asentos. Se hacen consideraciones acerca del daño sufrido por diferentes edificios, tipos de estructura y cimentación, sus asentos y posición con respecto al túnel de la estación.

ABSTRACT. During the construction of the subway stations in Seville, some old buildings have suffered considerable damage. The stations were excavated from access shafts in a hard miocene clay stratum. The axis of the tunnel is at an average depth of 36 metres. The «loss of soil», V_s , has been reduced from 2.3 % to 1.6 % of the volume of excavation, V_0 , reinforcing the temporary ribs and the coating of gunite in the galleries, avoiding keeping various galleries open simultaneously and reducing the time that the galleries remain open. The parameters of the settlement bowl have been studied. Various considerations about the damage caused to different buildings, have been made, together with the kind of structure and foundation, their settlement and position with respect to the station tunnel.

INTRODUCCION

Los problemas para el metro de Sevilla comenzaron con la construcción de las estaciones profundas de San Bernardo, Puerta de Jerez y Plaza Nueva.

Los primeros incidentes sucedieron en 1981 y 1982, durante la excavación de los pozos de acceso, realizados con la ayuda de muros pantalla, debido a la erosión interna producida por juntas defectuosas. El hundimiento posterior afectó a un monumento y al pavimento.

Durante 1982 y 1983 los daños producidos principalmente a tres importantes edificios anti-

guos por la excavación de las estaciones profundas provocaron una campaña de prensa que sirvió como excusa para paralizar indefinidamente las obras. Cuando esta decisión fue tomada, se habían gastado unos 5.000 millones de pesetas y se habían terminado alrededor de 3 km de túnel superficial y tres estaciones profundas.

EL TERRENO

La figura 1 muestra el perfil medio del terreno y la posición de los túneles en las tres estaciones subterráneas profundas.

Las estaciones fueron excavadas desde los pozos de acceso en el substrato rígido de Sevilla, un lecho de arcilla miocena plástica de muy firme a dura, localmente llamada «marga azul».

La marga azul está cubierta por un estrato de gravas muy densas. Sobre este estrato hay suelos más o menos comprensibles.

El contenido medio de carbonatos de la marga azul es del 26 % (Uriel y Oteo, 1977). El módulo de deformación medido en el laboratorio varía de

(*) Catedrático del Área de Ingeniería del Terreno, Director del Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla.

(**) Profesor Titular, Universidad de Sevilla.

(***) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de División de la Dirección General de Infraestructura del Transporte del Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones.

(1) Comunicación presentada al Simposio Internacional «Interacción Suelo-Estructura», París, 1987.

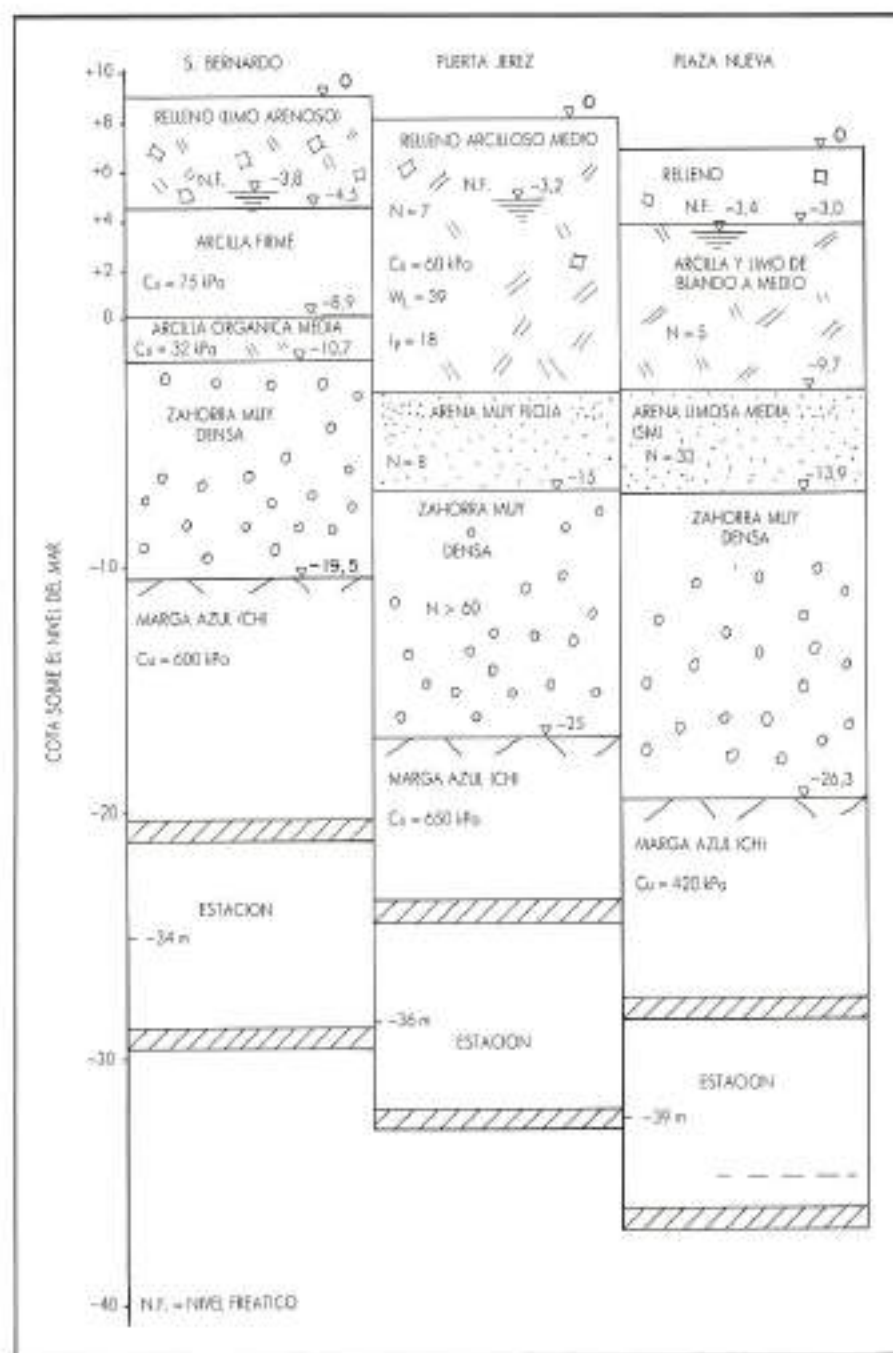


FIGURA 1. Perfil del terreno y posiciones de los túneles en las tres estaciones del metro profundo.

20 a 56 MPa. El módulo de deformación vertical medido en placas de carga varía de 50 a 200 MPa, y el horizontal de 120 a 570 MPa.

Durante la excavación de un pozo, el levantamiento de una placa situada a una profundidad de 36 m dio un módulo de elasticidad medio de 190 MPa (Uriel y Oteo, 1977).

EL METRO PROFUNDO DE SEVILLA

A través del casco antiguo de Sevilla se diseñó un metro profundo, debido a que no había amplias avenidas para construir un metro superficial.

El metro profundo se excava en túnel en la marga azul. La profundidad de la clave del túnel en las estaciones es de 29 m en San Bernardo,

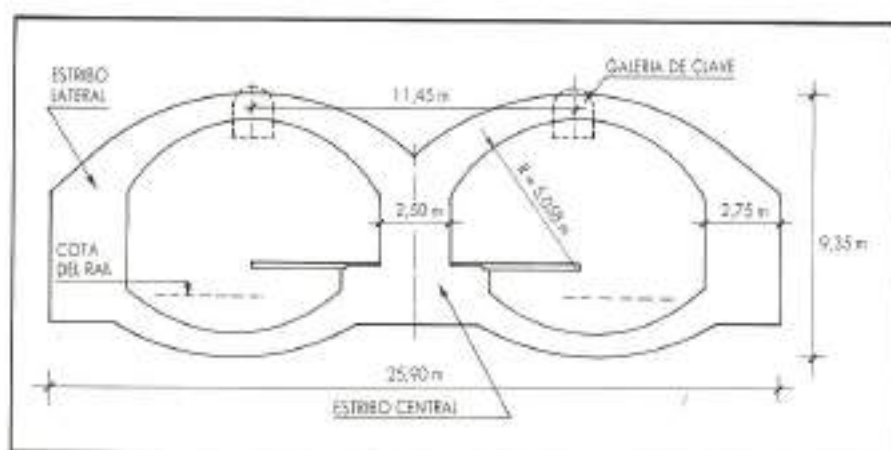


FIGURA 2. Sección transversal de estación del metro profundo.

32 m en Puerta de Jerez y 34 m en Plaza Nueva (fig. 1).

Como la marga es un estrato muy impermeable, se eliminó de esta manera el acceso de agua al túnel. Este acceso podía haber provocado muchas dificultades durante la excavación y una importante subsidencia en superficie.

La cubierta de marga por encima de la excavación era de 10 m en San Bernardo, 6,5 m en Puerta Jerez y 8 m en Plaza Nueva.

MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

La figura 2 muestra una sección transversal de la estación. Debido a sus grandes dimensiones no se intentó construir con escudo, sino con un método menos mecanizado.

El método original de construcción, designado como método T1, ha sido descrito por Saura et al. (1984) y Oteo et al. (1987).

En resumen, consiste en excavar en una primera fase los 2/3 inferiores de los estribos central y

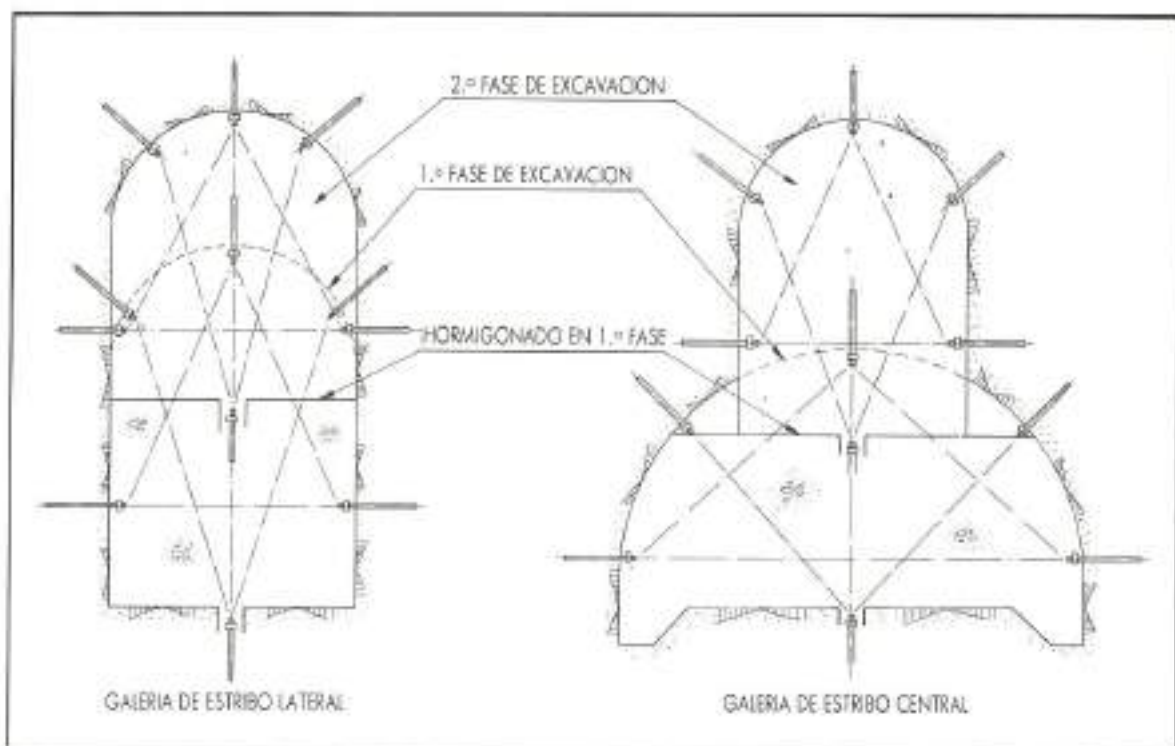


FIGURA 3. Galerías de estribos y perras para la medida de convergencias.

laterales y rellenar 2/3 de ellos con hormigón (fig. 3). En una segunda fase, se excavan el resto de los estribos y las dos galerías de clave (fig. 2). Después de esto, se excava la bóveda desde las galerías de clave mediante arcos alternados de 1,5 m de anchura. Estos arcos se rellenan con hormigón. A continuación se excavan y rellenan de hormigón los restantes arcos, incluyendo la parte superior de los estribos y las galerías de clave. Se excava el resto de la estación, y finalmente se hormigona la contrabóveda.

Como la subsidencia en superficie con el primer procedimiento fue importante, se introdujeron algunas mejoras en el sistema constructivo. Los soportes temporales fueron reforzados, se evitó mantener abiertas varias galerías a la misma vez,

y se acortó el tiempo que las galerías permanecían abiertas. Se usó temporalmente el sistema T2, y se adoptó finalmente el sistema T3 (Oteo et al., 1987).

CONVERGENCIAS

Se colocaron pernos en la excavación de las galerías de estribos (fig. 3) para la medida del desplazamiento relativo de puntos en lados opuestos de las galerías (convergencias).

La figura 4 muestra la relación entre las convergencias verticales medias medidas con los sistemas T1, T2 y T3.

Se alcanzaron las siguientes conclusiones:

1. La adopción de los sistemas T2 y T3 reduce la

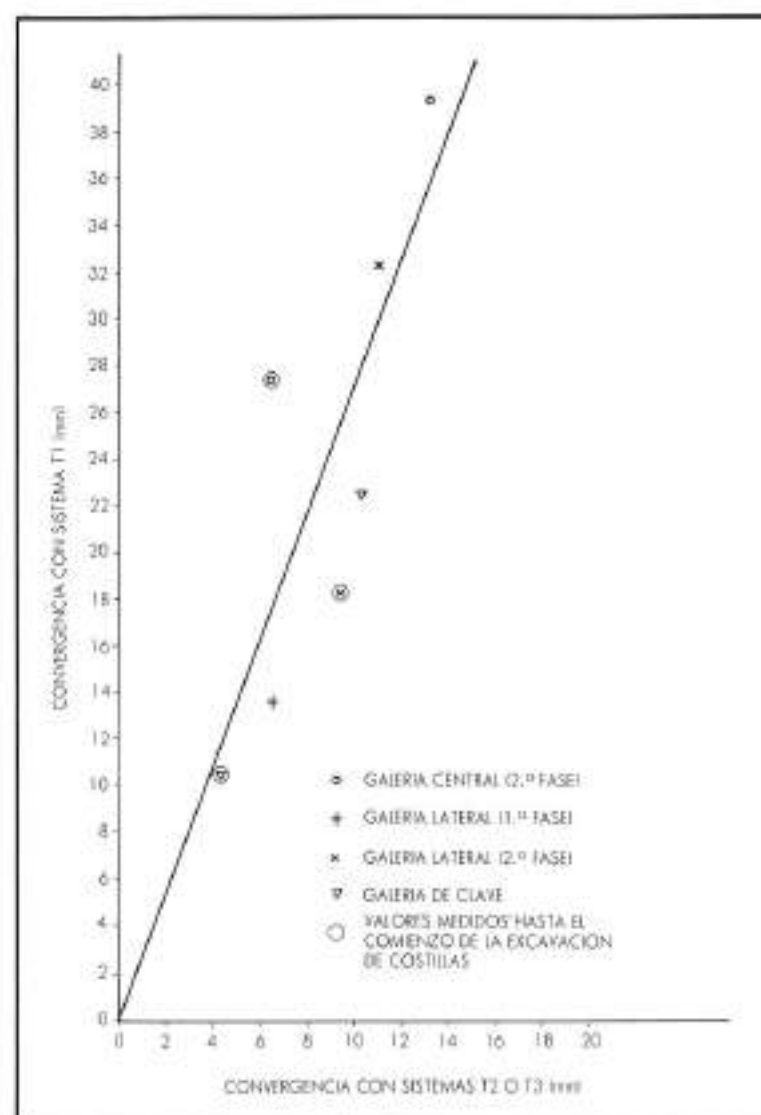


FIGURA 4. Comparación entre convergencias utilizando los sistemas constructivos T1, y T2 o T3.

«pérdida de terreno» a una media del 37 % de las pérdidas en el sistema original.

2. La reducción de «pérdida de terreno» es más importante en las galerías centrales, debido a la influencia de ambas galerías laterales en la plastificación del terreno circundante a la galería central en el sistema T1.

3. Las convergencias son mayores en la segunda fase de la excavación, debido a que el terreno está más plastificado.

SUBSIDENCIA

La figura 5 es una planta de la estación de Plaza Nueva. Las líneas de igual subsidencia superficial corresponden a las operaciones de construcción indicadas en el pie de la figura que se ha dibujado.

Los asientos son mucho mayores en la dirección Duque, debido a que durante el tiempo al que corresponden los asientos, las operaciones de construcción en ese lado son mucho más importan-

tes que en el otro. También el número de puntos de nivelación en el lado de Puerta Jerez es demasiado pequeño para definir apropiadamente las líneas de igual asiento.

Se han realizado muchos dibujos similares para tratar de encontrar la relación entre operaciones de construcción y subsidencia. La forma de las líneas de igual asiento no se aleja del círculo, cuyo centro está situado entre el pozo y el final de la estación.

Se ha dibujado la línea de máxima pendiente de la cubeta de asientos, sabiendo que corresponde a la distancia mínima entre líneas de igual asiento.

Después de estudiar detenidamente 30 cubetas de asiento, se ha asumido que tienen la forma de una superficie de revolución, cuya generatriz es, siguiendo a Peck (1969), la campana de Gauss:

$$s = s_{\max} e^{-x^2/2l^2} \quad (1)$$

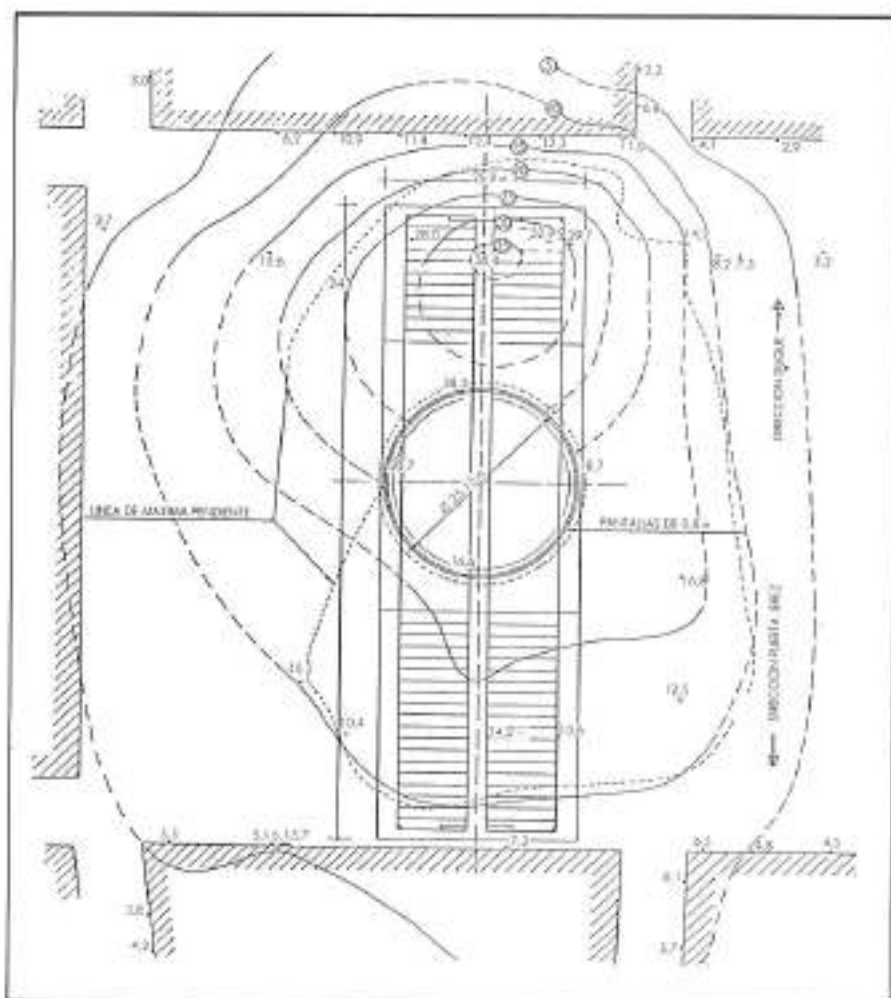


FIGURA 5. Líneas de igual subsidencia (mm) producidos por operaciones constructivas a partir de la 2.ª fase de excavación de estribos en dirección Pta. del Duque, y desde el final de la construcción de estribos y bóveda en dirección Pta. Jerez (290 días).

donde i es el radio del círculo de máxima pendiente, y s_{max} el máximo asiento.

El volumen total de la cubeta de asientos puede ser obtenido mediante integración, y es:

$$V_c = 2\pi s_{max} i^2 \quad (2)$$

El volumen de asientos, ΔV_a , limitado por la línea de asiento s es:

$$\frac{\Delta V_a}{V_c} = 1 - \frac{s}{s_{max}} \quad (3)$$

La ecuación 3 permite estimar V_c cuando no se han dibujado todas las líneas de igual asiento, a partir de V_a , s y s_{max} .

En muchos casos, se ha encontrado una línea de asiento 0. El radio del círculo de igual área es i_0 .

Estación-dirección	s_{max} mm	i m	i_0 m
S. Bernardo-Telescopio	118	17-22	40-49
S. Bernardo-Pta. Jerez	45	7-18	48
Pta. Jerez-S. Bernardo	124	19-22-22	47
Pta. Jerez-Pza. Nueva	24	22	52
Pza. Nueva-Cuquis	50	17	49
Media		18	48

TABLA 1. Asiento máximo, y radios de los círculos equivalentes de pendiente máxima y asiento nulo para cada estación y dirección.

La tabla 1 muestra s_{max} desde el comienzo de la excavación del túnel de la estación. Los radios i e i_0 corresponden a diferentes fases de construcción.

Vemos que i e i_0 son relativamente constantes, independientemente de la fase constructiva y estación. Attewell y Yeates (1984) indican que i es aproximadamente la mitad de la profundidad del eje del túnel. En Sevilla, estas profundidades son 34, 36 y 39 m. La media de i es la mitad de esta profundidad.

El radio medio del círculo equivalente de asiento cero es $2,7 i$, no lejano del $\sqrt{2\pi i}$ (v. McCusker, 1982).

La figura 6 muestra la relación entre s_{max} y el volumen de excavación V_c . Se ha indicado el método constructivo, pero su influencia está menos clara que en la figura 4 porque los métodos constructivos están mezclados para cada estación. La relación no está lejos de ser lineal; esto es consecuencia de la ecuación 2, la constancia de i y la poca variación relativa de la relación V_a/V_c , según veremos más adelante.

Un parámetro muy importante es la relación entre el volumen de asientos, ΔV_a , y el volumen de excavación, ΔV_c . La figura 7 muestra la relación de este parámetro con la velocidad de construcción y procedimiento constructivo, para las diferentes fases de la construcción. Se han dibujado diferentes líneas de regresión para diferentes procedimientos constructivos. Vemos la importancia de la velocidad de construcción para bajar la relación $\Delta V_a/\Delta V_c$.

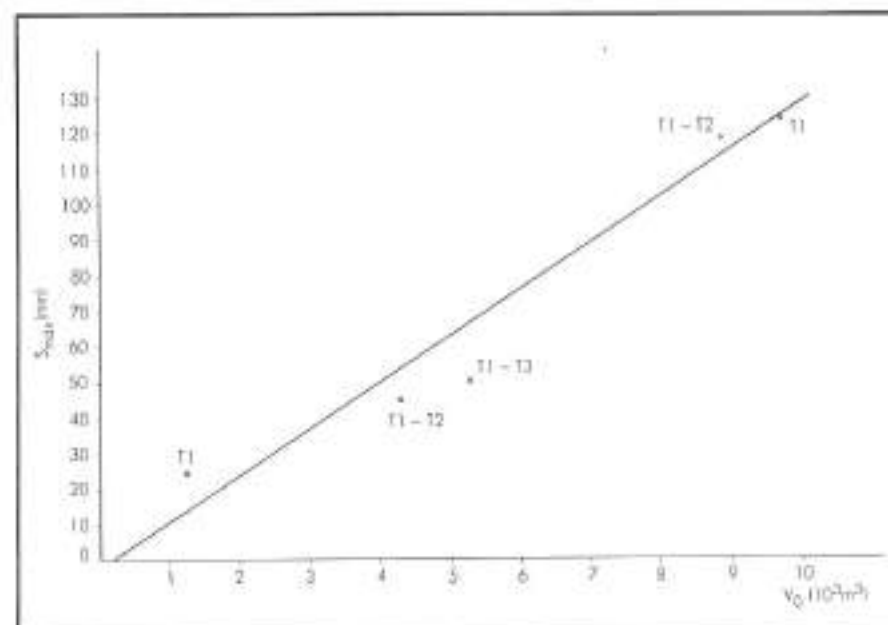


FIGURA 6. Regresión entre el asiento máximo, s_{max} , y el volumen de excavación, V_c .



- PILOTES
- INYECCIONES
- ANCLAJES

PILOTES • PANTALLAS • HORMIGONES INYECTADOS COLCRETE • INYECCIONES DE CEMENTO Y QUIMICAS • SONDEOS DE RECONOCIMIENTO.

CIMYSON

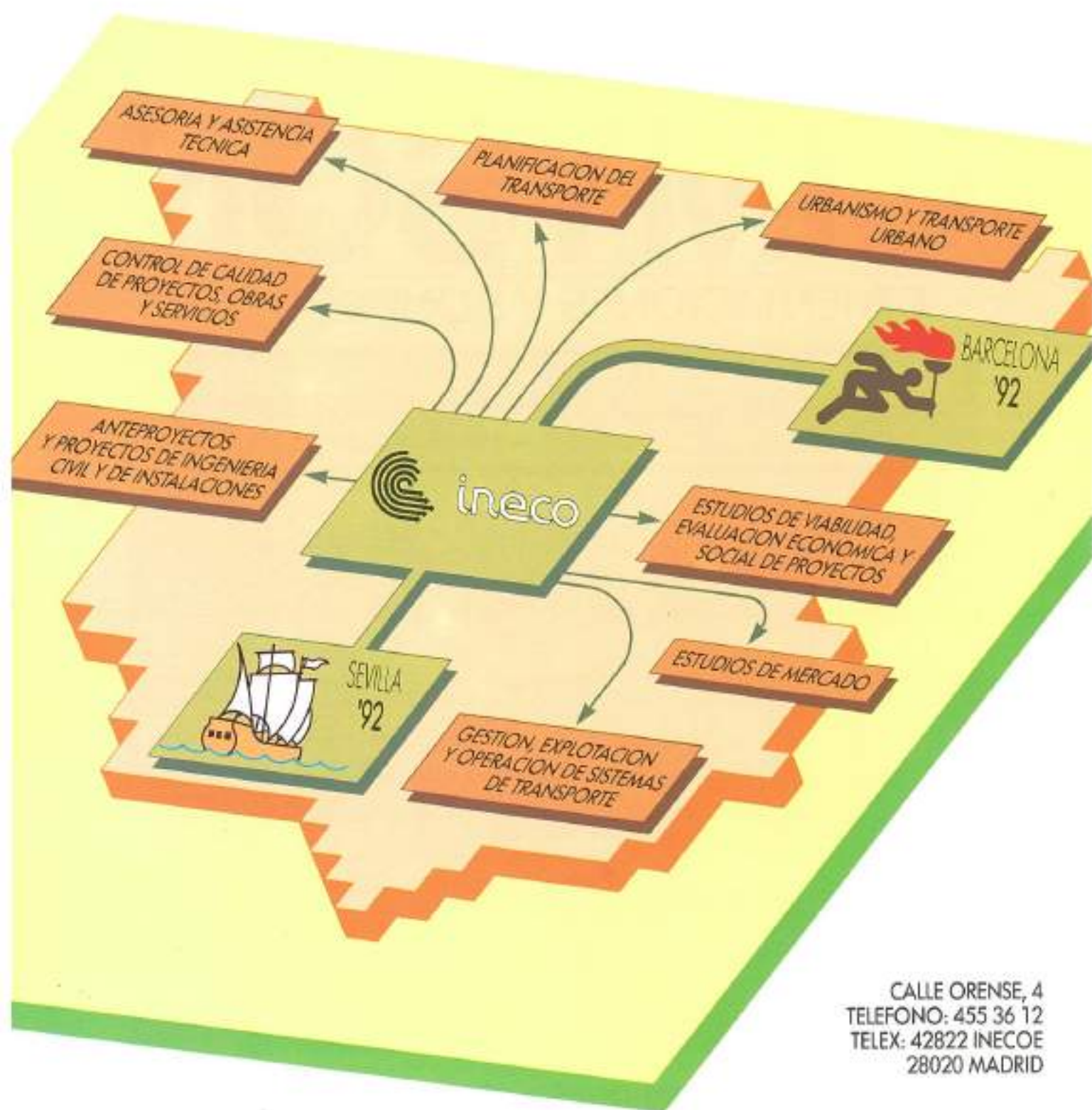
CIMENTACIONES Y SONDEOS, S.A.



CIMENTACIONES Y SONDEOS, S.A.

Alcalá, 65, 4ª dcha. • 28014 Madrid • Teléfs. 593 16 87 - 593 06 70

INECO PARTICIPA EN LOS GRANDES ACONTECIMIENTOS DEL TRANSPORTE



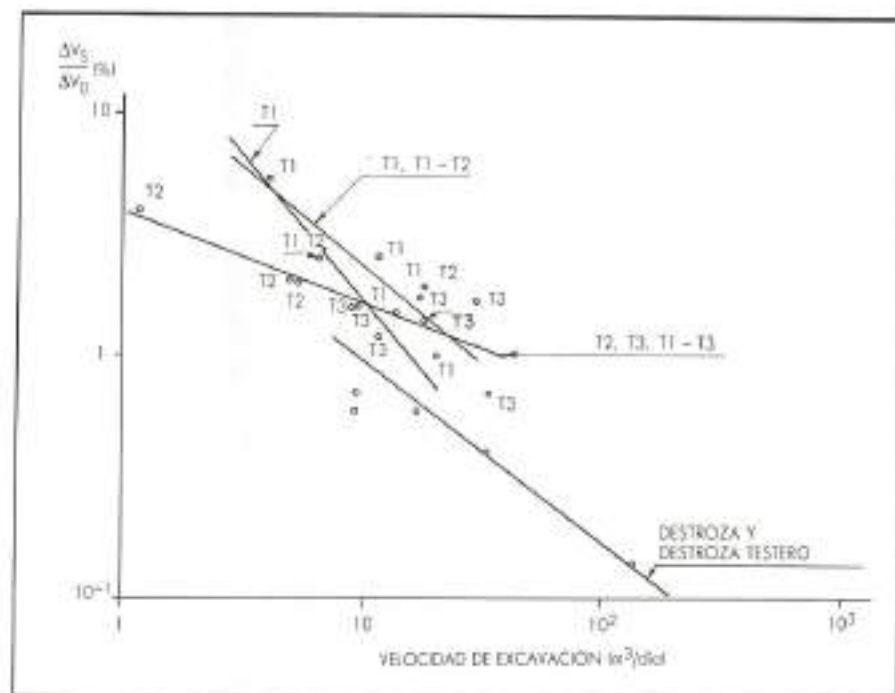


FIGURA 7. Volumen de asientos por unidad de volumen excavado, $\Delta V_s/\Delta V_0$, en función de la velocidad de excavación y del sistema constructivo.

Para la excavación completa la relación V/V_0 fue del 2,3 % para los sistemas T1 y T1-T2, y 1,6 % para los sistemas T3 y T1-T3.

COMPORTAMIENTO DE LOS EDIFICIOS

En San Bernardo hay una estación de ferrocarril construida a comienzos de siglo. El edificio tiene cerramiento de muros de carga de ladrillo, y en su interior vigas de hormigón armado y pilares metálicos. La construcción estaba en muy malas condiciones antes del comienzo de los trabajos subterráneos, con fisuras de alrededor de 1 cm, descenso de piezas de clave en arcos, asientos totales probablemente mayores de 5 cm, vigas fisuradas y daños graves (Justo, 1983).

El asiento adicional producido por las obras del metro puede variar entre 6 y 12 cm, siendo este último el más probable. Como resultado, el daño se ha incrementado enormemente. La máxima distorsión angular producida por la construcción del metro puede ser del orden de 1/30.

En la Puerta de Jerez dos edificios sufrieron daños.

El Palacio de Guardiola tiene muros de carga de ladrillo interiores y exteriores y columnas de mármol en un patio. Fue construido a finales del siglo pasado. El máximo asiento producido por su peso propio puede ser 13 cm, y los asientos diferenciales son importantes. Esto se refleja en las fisuras que presentaba el edificio antes de la cons-

trucción del metro, aunque el mantenimiento era bueno. Durante la construcción del metro el edificio probablemente sufrió asientos máximos de alrededor de 3 cm, y distorsiones angulares máximas de 1/480, que pueden justificar el daño sufrido por la fábrica antigua.

El edificio de la Equitativa estaba en muy malas condiciones antes que comenzasen los trabajos subterráneos (Justo, 1975). La construcción de la estación podría haber producido asientos de 12 cm en el edificio, de los cuales 3 cm fueron debidos a los dos refuerzos con micropilotes aplicados al edificio.

El resto de los edificios en San Bernardo y Puerta de Jerez sufrieron pocos daños o ninguno.

Los edificios en Palza Nueva, más modernos y algunos de ellos cimentados mediante pilotes, no sufrieron daños; los asientos variaron de 9 a 23 mm, y las distorsiones angulares de 1/1100 a 1/1700. MacKusker (1982) da una pendiente de 1/1000 como criterio de daño.

CONCLUSIONES

Se dan algunos datos acerca del alcance, forma y magnitud del asiento producido durante la construcción de las estaciones del metro profundo de Sevilla. Se ha estudiado la influencia de tres métodos constructivos diferentes y principalmente de la velocidad de construcción.

Los edificios antiguos podrían sufrir daños

importantes con asentamientos y distorsiones angulares tan pequeños como 3 cm y 1/500 respectivamente.

REFERENCIAS

- ATTEWELL, P. B., y YEATES, J., 1984. «Tunnelling in soil.» Capítulo 6 de «Ground Movements and Their Effects on Structures». Surrey Univ. Press, 132-215.
- GOMEZ, J., 1983. «Informe sobre daños en el edificio sito en Sevilla, Puerta de Jerez núm. 5.» Informe no publicado.
- JUSTO, J. L., 1983. «Dictamen sobre la consolidación de la cimentación de la estación de Renfe de San Bernardo.» Informe no publicado.
- MACKUSKER, T. G., 1982. «Soft ground tunnelling.»

- «Tunnel Engineering Handbook.» Van Nostrand, 70-92.
- OTEO, C.; REIN, J. A., y SOLA, P., 1987. «Tassements occasionés par l'excavation des gares souterraines du metro de Sevilla.» Colloque International Interactions Sols-structures, Paris.
- PECK, R. B., 1969. «Deep excavations and tunnelling in soft ground.» 7th Int. Conf. Soil Mech., Mexico. Volumen State of the Art, 225-290.
- SAURA, J.; JUSTO, J. L.; JARAMILLO, A., y GONZALEZ, A., 1984. «Un método de elementos tridimensionales para simular la construcción del metro.» Anales de Ing. Mec., 2:1:53-57.
- URIEL, S., y OTEO, C., 1977. «Propiedades geotécnicas de las margas azules de Sevilla.» Simposio Nacional Rocas Blandas, Madrid, vol. 1, A-9.