

Máster Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas



ÁREA: C5
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

TRATAMIENTOS PARA AUMENTAR LA
ESTABILIDAD Y PROTECCIÓN DE EDIFICIOS

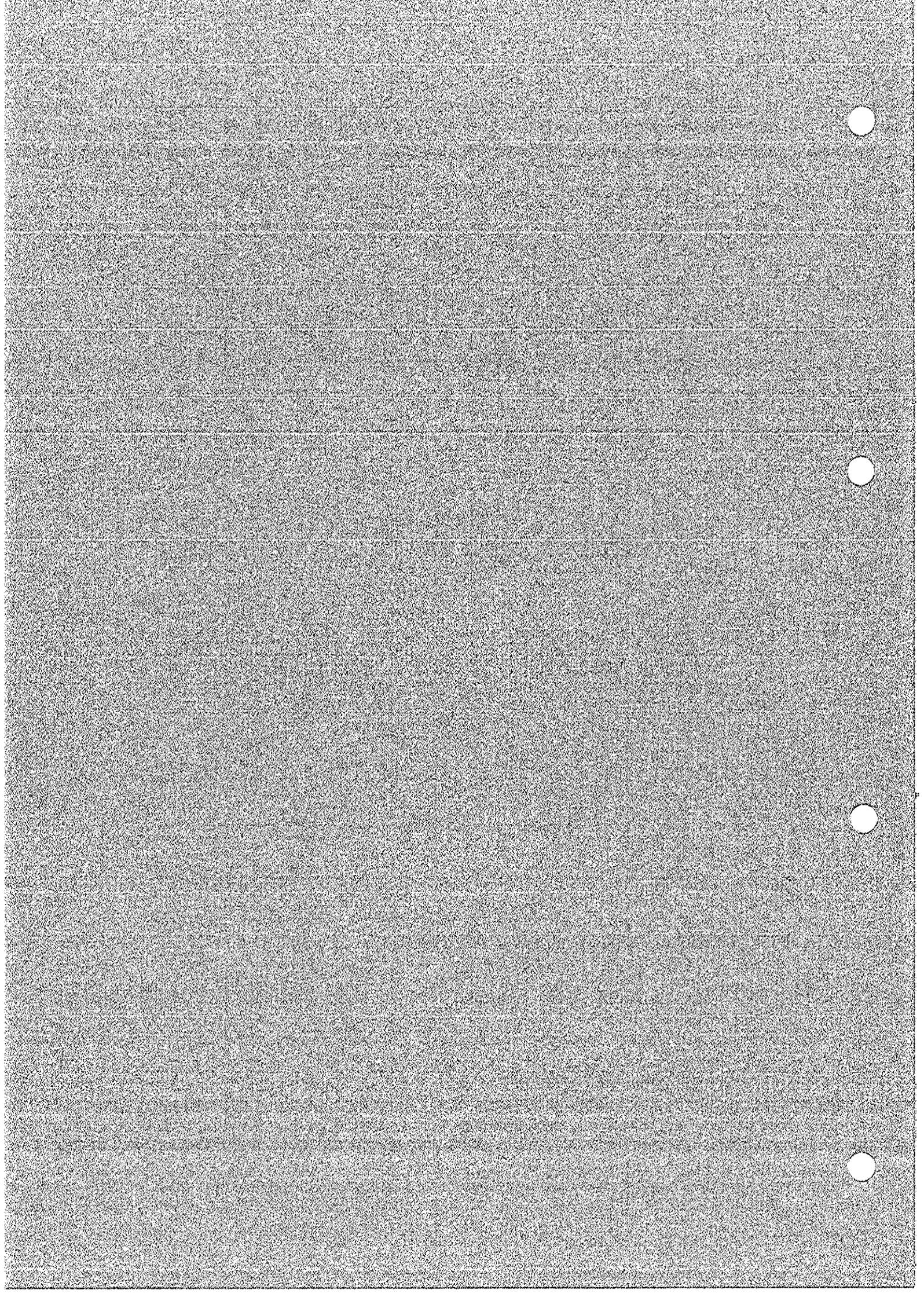
PONENTES: Carlos Oteo

Dr. I. C. C. P.

Catedrático de la Universidad
de A. Coruña

Día: 25/05/07

Hora: 18:15 a 20:15



**I MASTER UNIVERSITARIO EN TÚNELES Y OBRAS
SUBTERRÁNEAS – 2006
AETOS – U.P.M. – C.I.C.C.P.**

**TRATAMIENTO PARA AUMENTAR LA
ESTABILIDAD Y PROTECCIÓN DE
EDIFICIOS**

**Carlos Oteo Mazo
Catedrático de Ing. del Terreno
Dpto. de Tecnología de la Construcción
Universidade da Coruña**

1. PROBLEMÁTICA GEOTÉCNICA EN EL DISEÑO.

Desde el punto de vista geotécnico, cabe distinguir diversos problemas que se plantean al querer construir una excavación urbana. En primer lugar consideraremos los presentes a la hora del diseño:

A.1) Problemas de reconocimiento geotécnico, centrados en conocer la naturaleza de los diferentes estratos presentes, distinguir (en el entorno del túnel, sobre todo) las capas más blandas y/o menos coherentes (presencia de arenas con agua), espesores de rellenos, etc. La utilización de testificaciones geofísicas puede permitir distinguir horizontes de mayor contenido arenoso, y con agua. Los penetrómetros dinámicos pueden ayudar a determinar los espesores de rellenos, etc.

A.2) Definición clara del nivel o niveles piezométricos, así como el orden de magnitud de los caudales de agua que pueden aportar las diferentes capas. Así, por ejemplo en Madrid y otras ciudades de la Meseta Central, es necesario distinguir entre un nivel de agua que dé presión hidrostática a medio y largo plazo (es imprescindible tenerlo en cuenta para el diseño de excavaciones al abrigo de pantallas continuas) y entre el problema de una capa de arena que aporte un caudal importante de agua en la bóveda de un túnel o estación construida subterráneamente por métodos tradicionales (las presiones pueden no constituir problema a medio o largo plazo y, sin embargo, crear importantes problemas de estabilidad a corto plazo). La detección de estos niveles piezométricos es un problema importante y, en diversas ocasiones, lo hemos abordado realizando dos sondeos (incluso a destroza), muy próximos entre sí, con diferentes longitudes e instalando en ellos piezómetros de tubo abierto, a fin de separar niveles distintos. Ello ha permitido después el poder utilizar leyes de presiones como las de la Fig. 1, lo que permite en sótanos, pasos subterráneos, Estaciones de Metro y en túneles de línea (construidas con pantallas continuas) una gran economía.

A.3) Problemas de afección a edificios próximos, para lo que hay que definir las características de cimentación de los edificios e instalaciones cercanas al túnel a diseñar, en una franja -a cada lado del eje del túnel- de una anchura al menos 2,5 veces la profundidad de la solera del túnel. Debe de hacerse una cartografía de dichas instalaciones que incluya: Tipo de cimentación, número de sótanos, tipo de estructura, posición de juntas paralelas al túnel, estado general de la estructura y de servicios próximos, fotografías de anomalías, etc. Este levantamiento deben realizarlo técnicos con experiencia en problemas de interacción suelo - estructura.

A.4) Dificultades para simular el comportamiento en el caso de túneles y su interacción con el terreno próximo, especialmente en lo que se refiere a la estimación de la subsidencia (asientos y movimientos horizontales) que la excavación del túnel origina en el terreno próximo. Actualmente existen Códigos numéricos (de elementos y diferencias finitas, como PRAXIS, ANSYS, FLAC-3D, etc) para reproducir estos análisis en 2 y 3 dimensiones. Fruto de los mismos y de ajuste a las medidas realizadas en Madrid- a finales de los 70 y de los 90- es el Modelo Madrid (Oteo et al, 1999). En la Fig. 2 se reproduce este modelo.

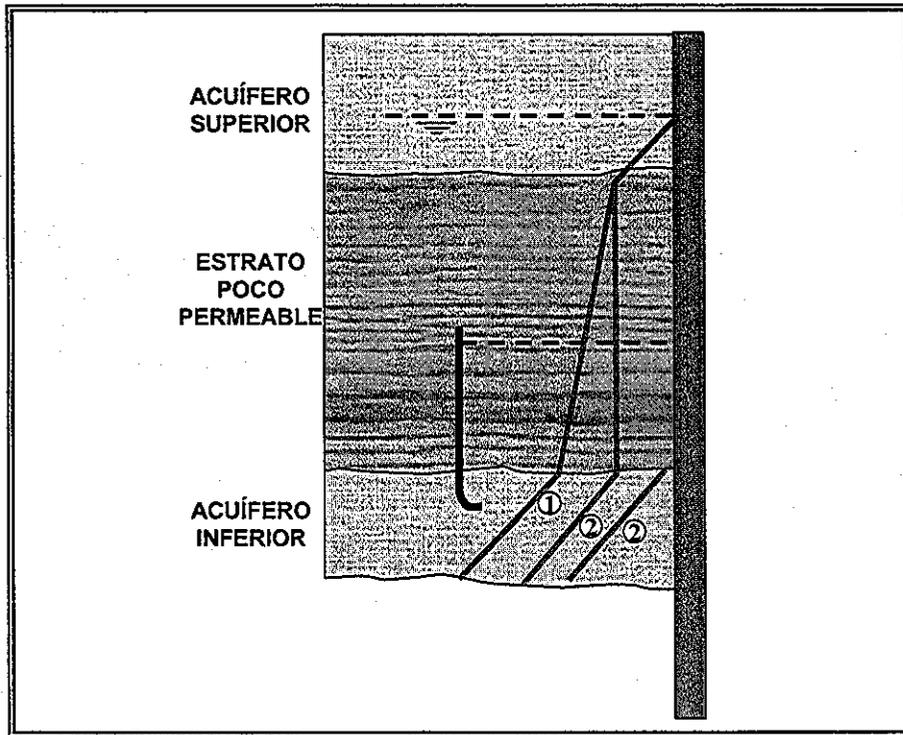


FIG. 1.- LEYES DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS ADOPTADAS EN EL CÁLCULO DE PANTALLAS.

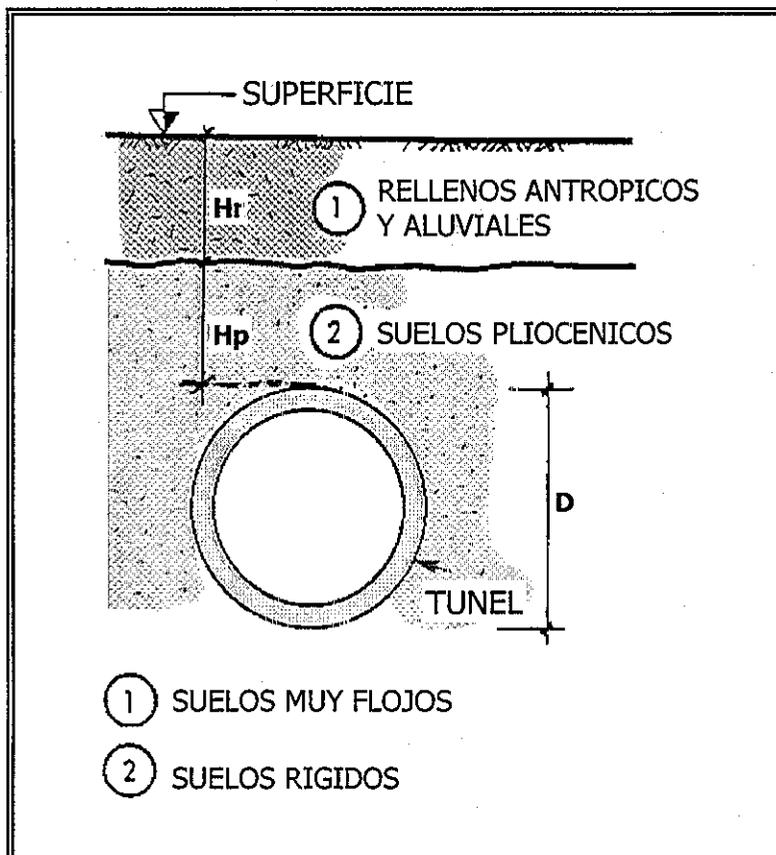


FIG. 2.a.- PERFIL ESQUEMÁTICO PARA ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA EN MADRID.

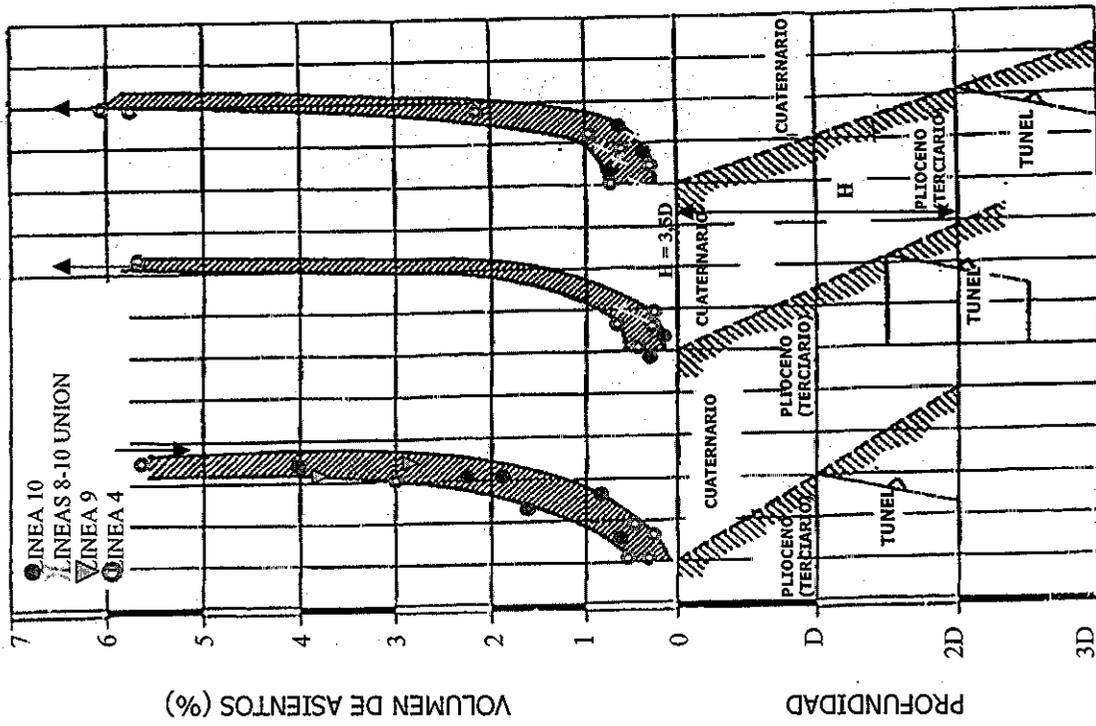


FIG. 2.c.- VOLUMEN DE ASIENTOS.

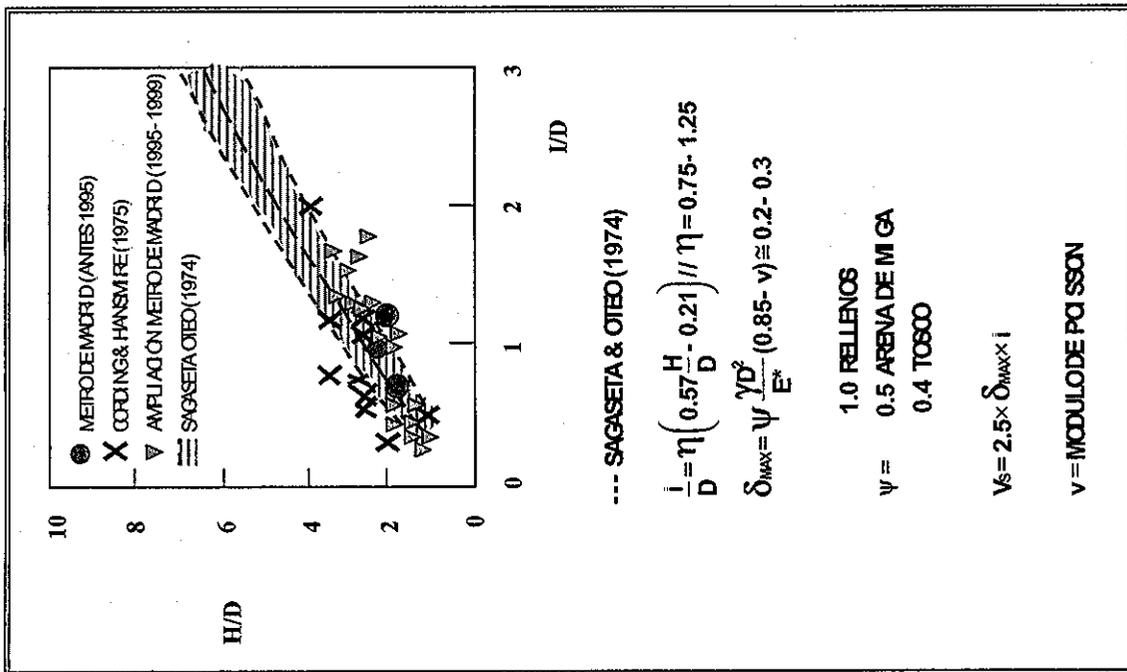


FIG. 2.b.- SITUACIÓN PUNTO DE INFLEXIÓN LEY DE ASIENTOS (CAMPAÑA DE GAUSS).

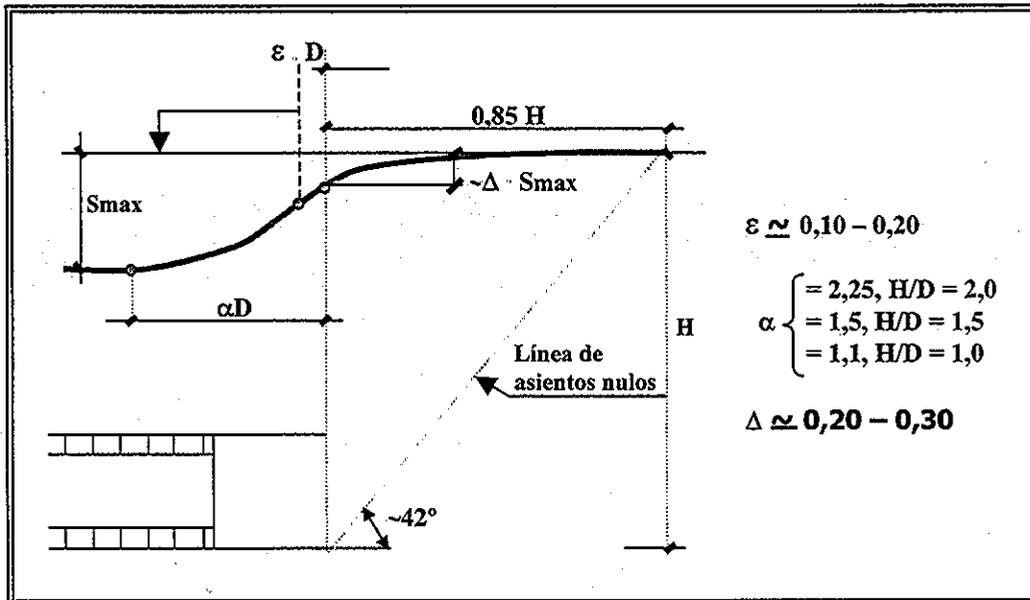


FIG. 2.d.- SITUACIÓN PUNTO INFLEXIÓN LEY DE ASIENTOS (CAMPANA DE GAUSS).

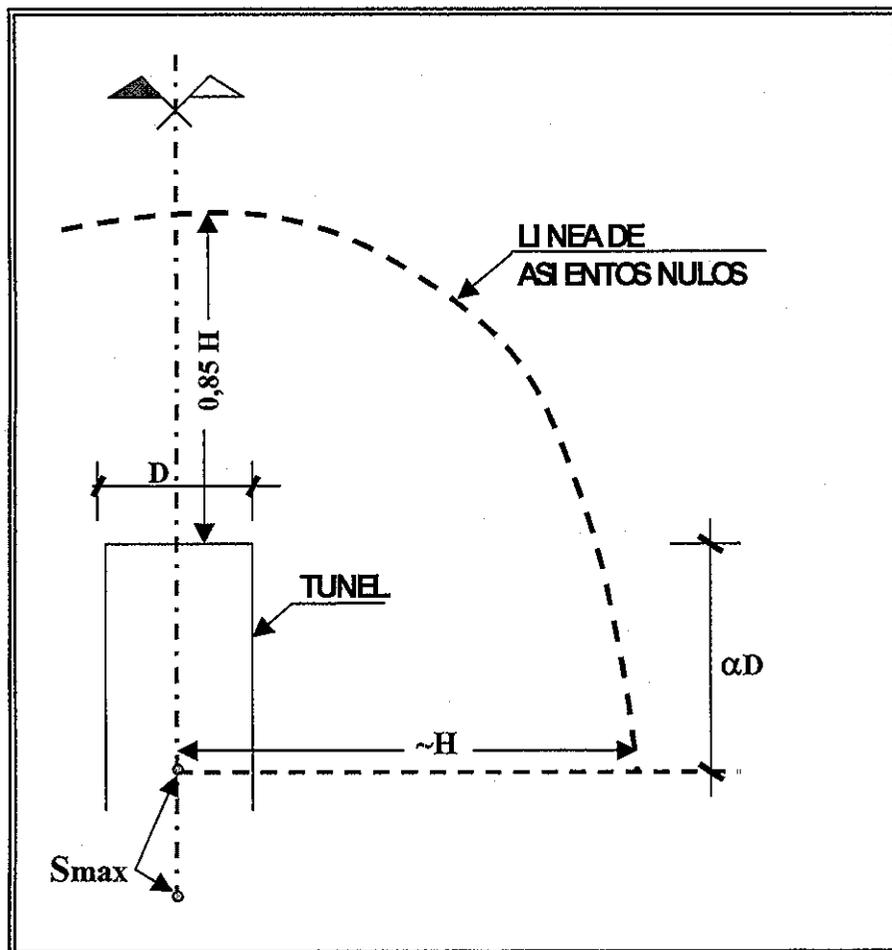


FIG. 2.e.- EXTENSIÓN SUPERFICIAL DE ASIENTOS OBTENIDOS EN ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL (OTEO, 1977).

A.5) Dificultades análogas a las del punto anterior, para la estimación de movimientos del terreno en el trasdós de pantallas. En este caso se vuelve a presentar el eterno dilema de la selección de parámetros geotécnicos – y de modelos –, claro está representativos. El problema suele ser difícil de resolver, porque no disponemos de herramientas de cálculo sencillas que sean universales para todos los problemas. La experiencia geotécnica de los últimos años ha llevado a la utilización de modelos de interacción suelo-estructura de revestimientos, distribución de tensiones bajo zapatas, etc. Pero para problemas de empujes de tierras sobre pantallas se ha llegado al uso de métodos de diferencias finitas con ley de empujes- desplazamientos como la de la Fig. 3 con el empleo de programas tan conocidos como el Denébola o el Ridó. Para estos casos han de establecerse parámetros geotécnicos adecuados, determinados a partir de ensayos de laboratorio y filtrados por la práctica.

A.6) Una vez diseñados los elementos constituirán la obra subterránea y los desplazamientos que pueden inducir, se han de proceder a realizar su posible incidencia sobre edificios e instalaciones próximas, para lo que han de usarse los datos geotécnicos y el conocimientos del estado de edificios deducido de la cartografía y revisión de los mismos. Si los movimientos diferenciales y absolutos superan los límites de peligrosidad, será necesario diseñar las intervenciones geotécnicas adecuadas. (debe de cambiarse el trazado del túnel hasta recalzar el edificio, pasando por tratamientos del terreno que consigan disminuir los movimientos previstos).

2. PROBLEMÁTICA GEOTECNICA EN LA CONSTRUCCIÓN

A nivel de ejecución de la obra estos problemas vuelven a presentarse, con la diferencia de que ya no se trata de un análisis teórico, sino que empiezan a contar los factores reales típicos: Plazos, costos, condicionamientos reales (como posibles cortes de tráfico), protestas de posibles afectados, etc. Es el momento de llevar a cabo todo lo anteriormente expuesto, al nivel necesario para ejecutar la obra realmente.

Ha de completarse el reconocimiento geotécnico con el detalle adecuado, lo cual es diferente según el proceso constructivo seleccionado a nivel de proyecto: si se usan métodos de excavación con frente abierto, es muy importante determinar la presencia de capas arenosas con agua, ya que dan lugar a inestabilidades de frente y bóveda, así como el espesor real de recubrimiento de terreno resistente por encima de la clave y el espesor de rellenos antrópicos superficiales. Pero si se usan máquinas integrales de frente cerrado y compensación de empujes de tierras (máquinas tipo E.P.B.), la presencia de una capa de arena con agua pasa a ser un incidente muchas veces inapreciable, pero sigue siendo importante conocer el espesor real de rellenos sobre la clave del túnel y la distancia a éste, ya que pueden producirse "chimeneas" que se notan en superficie y que se pueden arrastrar más de 200m., como os ha ocurrido en la prolongación de la Línea 4 del Metro de Madrid (Avda. de Emigrantes).

Sin embargo en estaciones y túneles con pantallas es importante comprobar la situación - o situaciones - real del nivel piezométrico y el espesor de terrenos permeables e impermeables, para poder aplicar leyes como las de la Fig 1. Muchas veces los niveles que se indican en sondeos a nivel de proyecto no son muy representativos, pues no se han limpiado y vaciado adecuadamente los taladros y ha quedado el agua de refrigeración de la perforación, indicando niveles freáticos falsos. Por eso es importante, al comenzar obras de cierta envergadura comprobar en las perforaciones de pilotes o módulos de pantalla la situación real del nivel freático y proceder a recalcular los esfuerzos en la pantalla si es necesario. Hemos detectado tanto el problema de suponer que no hay agua (Zona Sur de Madrid, en la Línea 1 y 11, o sea, en Villa de Vallecas y en Carabanchel), y después existir un nivel muy alto, como todo lo contrario (Unión Líneas 8 y 10, Paseo de la Castellana y Metrosur, en Fuenlabrada).

A veces es necesario revisar el estado de los edificios, a partir de la Cartografía de Proyecto, sobre todo en las zonas que se hayan establecido como peligrosas, tanto por el estado del edificio como por la posible afección del túnel a su estructura. Al iniciar la construcción deben revisarse los datos disponibles y realizar fotos -con reconocimiento notarial- para establecer el estado real de los edificios, acera y servicios y evitar reclamaciones indebidas.

También es el momento de reconsiderar los cálculos de movimientos inducidos, sobre todo con el trazado ya definitivo, con el conocimiento real de lo que va sucediendo a lo largo de la obra, etc. Y es el momento de llevar a cabo el Plan de Auscultación que permita ir tarando los modelos de previsión de movimientos y corrigiendo las previsiones, a fin de ajustarlas a las características reales del terreno y del proceso constructivo empleado en cada zona, a la presión de tierras que empleado en cada zona, a la presión de tierras que se venga utilizando en el frente de avance (caso de la E.P.B.), etc.

En esta fase de construcción es en la que las operaciones de comprobación de hipótesis y control adquieren una gran importancia. Deben formar parte de un adecuado Plan de Instrumentación y Seguimiento que permita conocer el grado de seguridad de las obras subterráneas y a cielo abierto, comprobar que los esfuerzos y desplazamientos no superan lo previsto en el diseño (o en el rediseño, que es habitual realizar al comienzo de la obra) y que el nivel de calidad de construcción es el previsto.

Para llevar a cabo este control, la Comunidad de Madrid puso a punto -durante la Ampliación del Metro de Madrid, 1995-2003- la Unidad de Seguimiento, Auscultación y Control, con objeto de centralizar, codificar, analizar, interpretar de forma general, todos los datos que se derivaban de los Planes de Instrumentación y Auscultación de cada una de las diversas obras y los datos provenientes de la construcción de los túneles, a través de lo registrado durante la ejecución con las 6 máquinas de tipo E.P.B. utilizados (uno de \varnothing 6,40 m., otro de \varnothing 7,00 m. y cuatro de \varnothing 9,40 m.). Esta Unidad y las organizaciones montadas en cada obra (las S.E.A. o unidades especializadas, supervisadas por las Direcciones de Obra y construidas por técnicos del Contratista y Empresas especializadas en instrumentación geotécnica) han permitido conocer en cada momento -y relacionar entre sí- las siguientes variables:

- Desplazamientos del terreno y edificios próximos.
- Empujes sobre pantallas continuas y revestimientos de túneles, así como sus movimientos y esfuerzos.
- Módulos presiométricos del terreno y estratigrafías de detalle.
- Presiones en el frente de las tuneladoras, empujes de gatos, volúmenes de inyección alrededor de dovelas, etc.

En la Fig. 3 puede verse un ejemplo de sección instrumentada alrededor del túnel realizado con escudo.

Toda esta información ha sido utilizada tanto para el desarrollo inmediato de las obras como para la elaboración de conclusiones y modelos a utilizar en las siguientes obras, como las mejoras introducidas en el diseño de una nueva tuneladora (en construcción al redactar estas líneas), que incluso perfore en yesos (Metrosur de Getafe), o el Modelo Madrid, acompañado de las debidas interpretaciones, incluidos análisis en tres dimensiones (OTEO y otros, 1999; MEDINA, 2000).

El seguimiento de movimientos del terreno y edificios ha dado muy buenos resultados y han permitido tomar decisiones adecuadas, tanto por mostrar - a veces - que los desplazamientos estaban dentro de lo que se consideraba "no peligroso" para las instalaciones próximas, como por - en ocasiones de crisis - permitir dar la señal de alarma con el tiempo adecuado o para permitir no sobrepasar los niveles de riesgo durante tratamientos preventivos del terreno. Este control es muy importante ya que los movimientos pueden alcanzar valores considerables, principalmente cuando existen espesores apreciables de rellenos antrópicos (heterogéneos, deformables y colapsables) en superficie. En la Fig. 4 se muestra un resumen de algunas medidas características del volumen de asientos medidos en superficie, V_s , (expresado en % de la sección del túnel excavado), respecto al espesor del recubrimiento de sedimentos pliocénicos (el terreno

firme de Madrid), para diversos espesores relativos de rellenos antrópicos (OTEO y otros, 1999). Puede apreciarse en dicha figura como con recubrimientos de terreno firme de más de un diámetro en la clave, el volumen de asientos es inferior al 1 % y llegan a bajar al 0,25 %, mientras que con recubrimientos nulos o con rellenos ocupando parte de la sección excavada hemos llegado a medir volúmenes de asiento del 8-10 %, lo que viene a corresponder más a fenómenos de inestabilidad que a deformaciones generales. De hecho en esas ocasiones se han producido algunas "chimeneas" que llegaban a superficie. Sin embargo el control de asientos y el seguimiento del proceso permitían, previamente, tomar decisiones adecuadas:

- A) Tratar y mejorar el terreno, antes de excavarlo.
- B) Establecer pantallas de defensas para evitar que los edificios próximos fueran afectados.
- C) Aislar una zona de superficie para que no circularan personas y vehículos desde antes de que se acercara el frente de excavación, etc.
- D) Recalzar la estructura.
- E) Expropiar el edificio, aceptar previamente indemnizaciones, declarar la ruina cuando el edificio está en muy mal estado, etc.
- F) Actuar sobre el procedimiento de ejecución de la excavación, para disminuir las deformaciones que provoca.

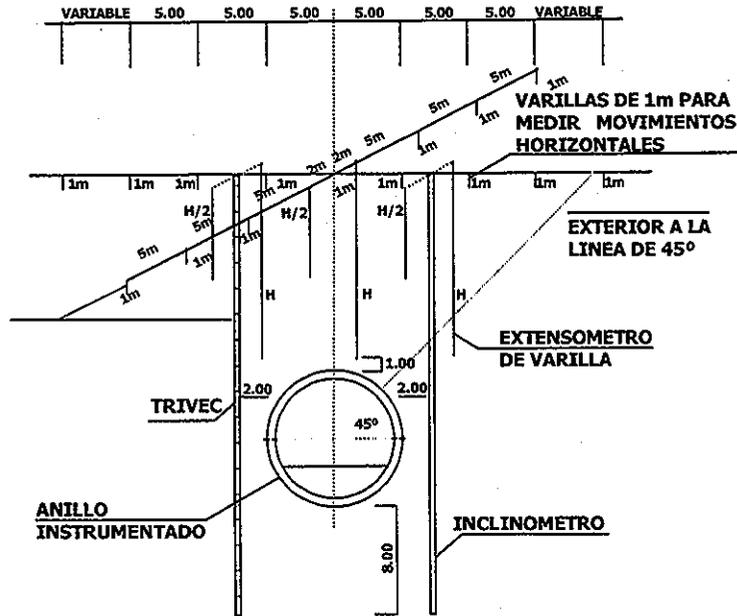


FIG. 3.- SECCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN PARA TÚNEL REALIZADO CON EPB (RODRÍGUEZ ORTIZ, 1997).

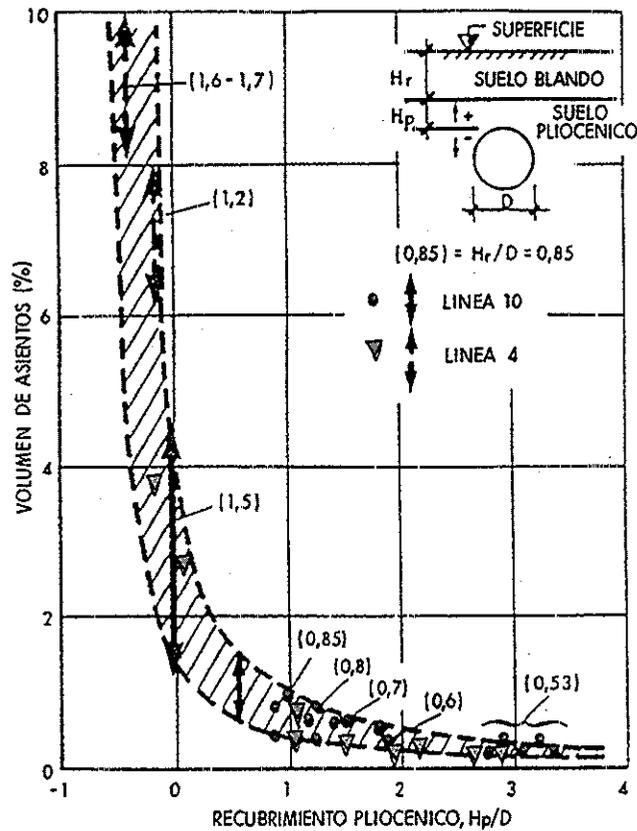


FIG. 4.- RESUMEN DE MEDIDAS DE VOLUMEN DE ASIENTOS (OTEO ET AL, 1999).

3. TRATAMIENTOS DEL TERRENO

Cuando las deformaciones inducidas por la excavación se consideran peligrosas, es necesario planificar las actuaciones geotécnicas necesarias para garantizar la estabilidad de las estructuras y evitar daños sobre personas y haciendas.

A tal efecto la metodología de actuación debe ser la siguiente:

- Previsión de movimientos con métodos simplificados
- Cartografía del estado de edificio, estableciendo niveles de peligrosidad según su estado, antigüedad, etc.
- Clasificación de nivel de riesgo sobre edificios próximos en base a las dos actuaciones anteriores (con revisión de cálculos de movimientos en los edificios de mayor riesgo).
- Análisis del problema y toma de la decisión que se consideraba más adecuada que iba desde hacer tratamientos previos del terreno hasta la expropiación de alguna vivienda en mal estado (o declaración de ruina de edificios ya peligrosos y desalojaos), pasando por la solución de considerar que el riesgo era muy pequeño y que bastaba tan solo con controlar los movimientos.
- A continuación se instrumentará el edificio y el terreno con las referencias adecuadas y se procede a controlar lo que va pasando en el terreno al acercarse al túnel y al pasar cerca del edificio. Para ellos se instrumentan también secciones de control situadas relativamente cerca del edificio en cuestión para comprobar (antes de llegar al mismo) si las hipótesis de cálculo son correctas o demasiado conservadoras.

Dentro de los tratamientos preventivos que pueden usarse en ámbito urbano destacan:

- Los "paraguas" de micropilotes, armados con tubo metálico y destinado a establecer una "prebóveda" (antes de excavar) en terrenos flojos y evitar problemas de estabilidad o movimientos por encima. En la Fig. 5 puede verse la realización de un "paraguas" de este tipo llevado a cabo en al Línea 1 del Metro de Madrid, En este caso se utilizaron 12 micropilotes de Ø100 mm. en tubo de acero de Ø_{ext} 89 mm., con inyección de contorno con relación agua/cemento de 0,5 y una longitud de 50 m. (el terreno era tan blando sobre la bóveda que el resultado de este tratamiento era adecuado para asegurar la estabilidad pero no para evitar asientos importantes). El inconveniente de estos paraguas con métodos tradicionales es que obligan a realzar la sección de túnel (Fig. 5). También hemos usado esta solución (aunque sin realzar, con micros inclinados) en el cruce de la Línea 7.1 bajo el túnel de R.E.N.F.E Chamartín-Atocha, en el Paseo de la Castellana de Madrid, cruce que, al ser perpendicular, permitía la operación de protección con micropilotes de unos 15-18 m de longitud. Por supuesto estos micros también han sido utilizados

como “Prebóvedas” en el arranque de túneles -realizados con métodos convencionales- desde pozos o rampas de acero.

- Inyecciones por tobera y alta presión, comúnmente denominadas jet-grouting, utilizadas de forma diversa: a) Como paraguas o Prebóvedas en terrenos blandos en zona de clave. En la Línea 6, cerca de la Puerta de S. Vicente de Madrid, se utilizaron así excavándose a continuación con el método austriaco (cerchas y gunita), sistema que no dio muy buen resultado en ese caso, pero que en Milán, por ejemplo, ha dado sus frutos, con un empleo masivo. b) Como tratamientos especiales, como es el caso de necesitar cambiar las herramientas de corte en el frente de una tuneladora en una zona con arenas ya mucha agua. Desde superficie puede conseguirse, con columnas de jet-grouting, una sección lo suficientemente impermeable como para acceder al frente, (Fig. 6) y no ~~caer~~ caer al nivel freático lo que podría influir sobre edificios próximos. También lo hemos utilizado en zonas de llegada de tuneladoras a estaciones para evitar la formación de socavones al romper la pantalla de cierre de alguna estación, (Fig. 7) c) Como pantalla de protección de edificios, para cortar la cubetas de asientos superficiales, tanto verticales como inclinadas, para ajustarse a los servicios existentes. La Fig. 8 muestra un ejemplo de esta solución, en la Avenida de García Lorca de la Villa de Vallecas (Línea 1). En la Fig. 9 se puede ver los asientos teóricos previstos y los medidos realmente, comprobándose el acierto de las previsiones en las zonas próximas a los túneles, pero cómo dichos movimientos disminuyen, considerablemente, a partir de la zona de la pantalla de jet. En la Fig. 10 puede verse un análisis con el Código Plaxis de elementos finitos de una barrera de este tipo, próxima a un edificio. En las Figs. 11 y 12 se ven soluciones para proteger edificios y otras instalaciones con una sola fila de columnas de jet-grouting o con doble fila (tienda de campaña).
- Barreras o pantallas con módulos de pantalla o con pilotes asilados, con análogo propósito que las barreras de jet-grouting que acabamos de describir. Lo normal es que se utilicen barreras discontinuas de pilotes. Dada su mayor rigidez, las barreras con pilotes pueden ser más efectivas que las de jet-grouting, según la separación de cada elemento y el diámetro utilizado. Sin embargo, generalmente deben de ser verticales, lo que crea un problema de mayor ocupación en superficie y de posible incidencia con servicio (tuberías de gas, conducciones de teléfonos, etc), lo que da una ventaja a las “pantallas” de jet, al poder ser inclinadas y situarse en posiciones diversas. En la Fig. 13 puede verse el efecto de la presencia de una barrera de pilotes verticales como protección de un edificio, según análisis realizado por de la Fuente (2000).

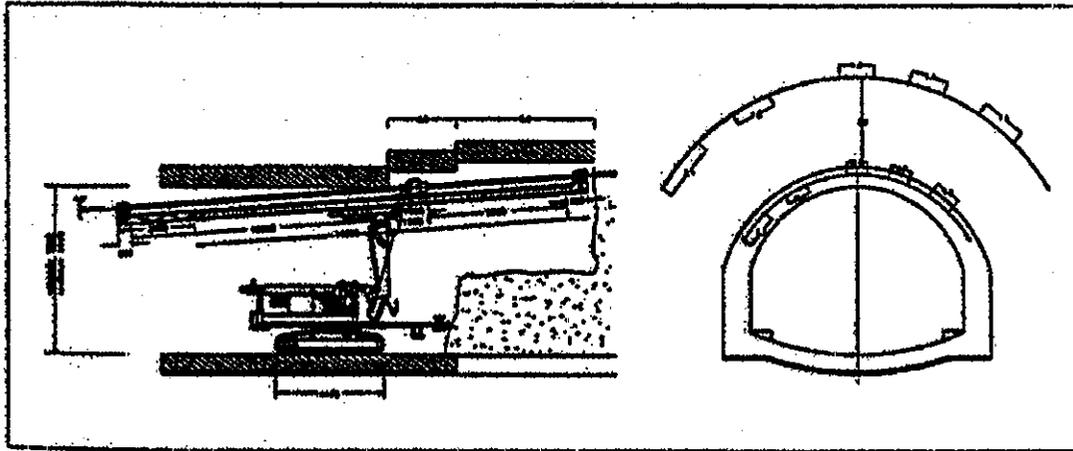


FIG. 5.- "PARAGUAS" DE MICROPILOTES.

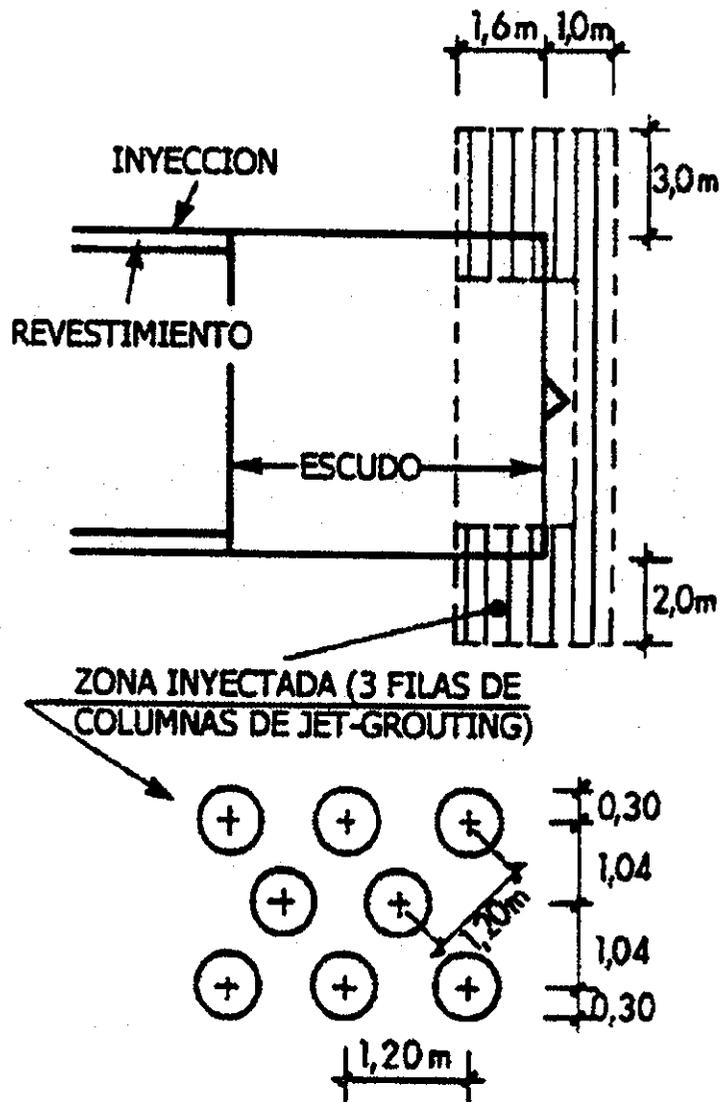


FIG. 6.- ESQUEMA DE TRATAMIENTO DEL TERRENO POR CAMBIOS DE PICAS EN EL FRENTE DEL ESCUDO EN ZONAS DE ARENAS CON AGUA (MELIS Y OTROS, 2000).

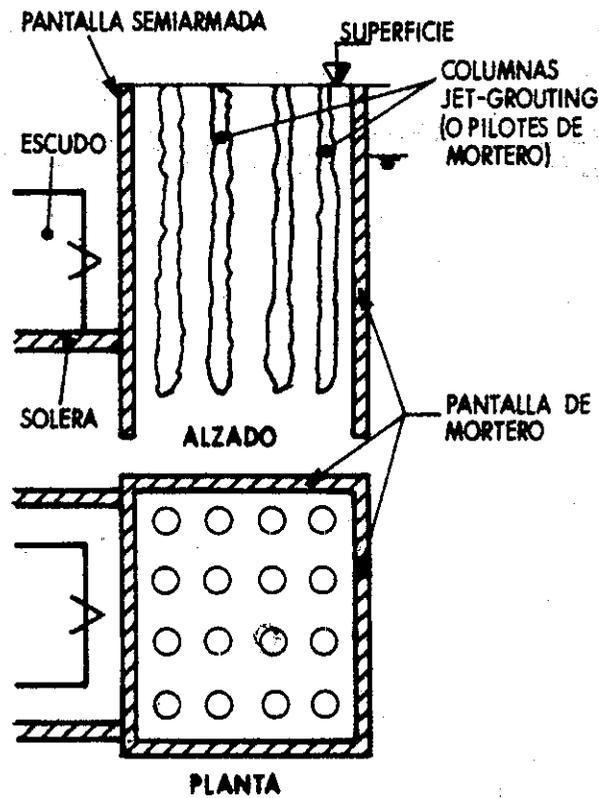


FIG. 7.- REFUERZO DE TERRENO PARA OBTENER UN RECINTO ESTABLE, CON EMPUJES PEQUEÑOS Y ESTANCO.

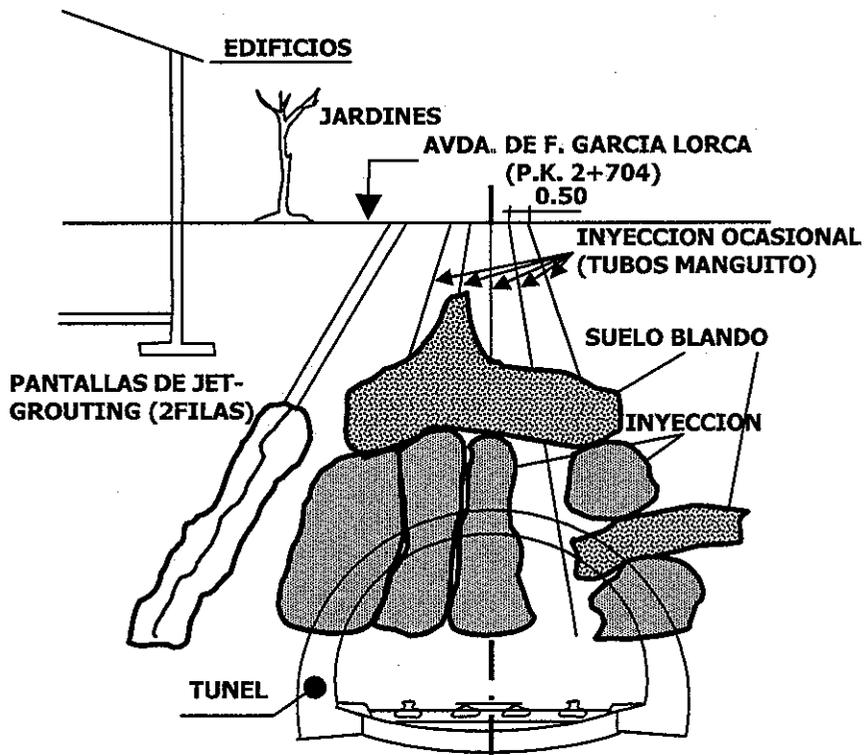


FIG. 8.- TRATAMIENTO CON JET-GROUTING EN LA LÍNEA 1 (MELIS ET AL, 1999).

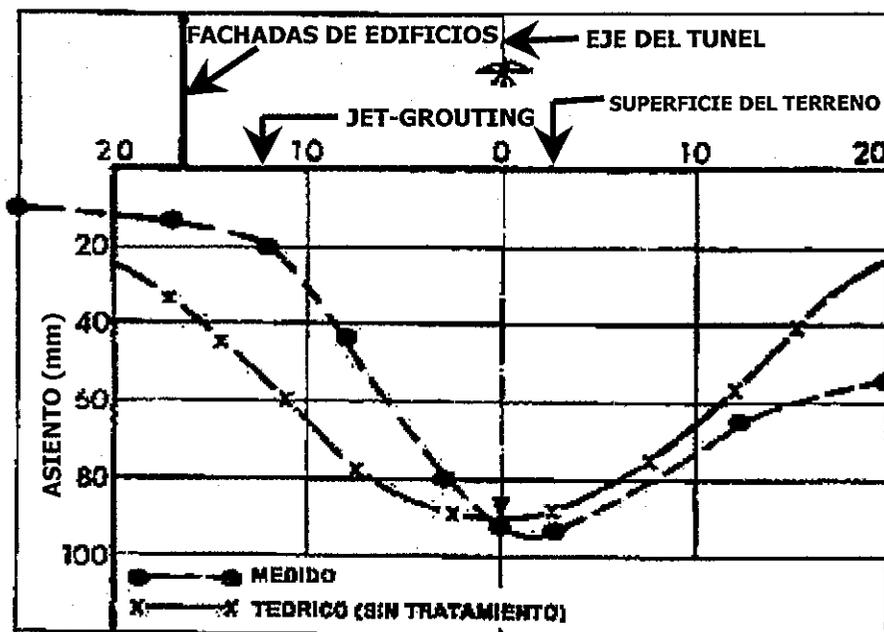


FIG. 9.- ASIENTOS MEDIDOS EN ZONA CON TRATAMIENTO DE JET-GROUTING, LÍNEA 1 (MELIS ET AL, 1999).

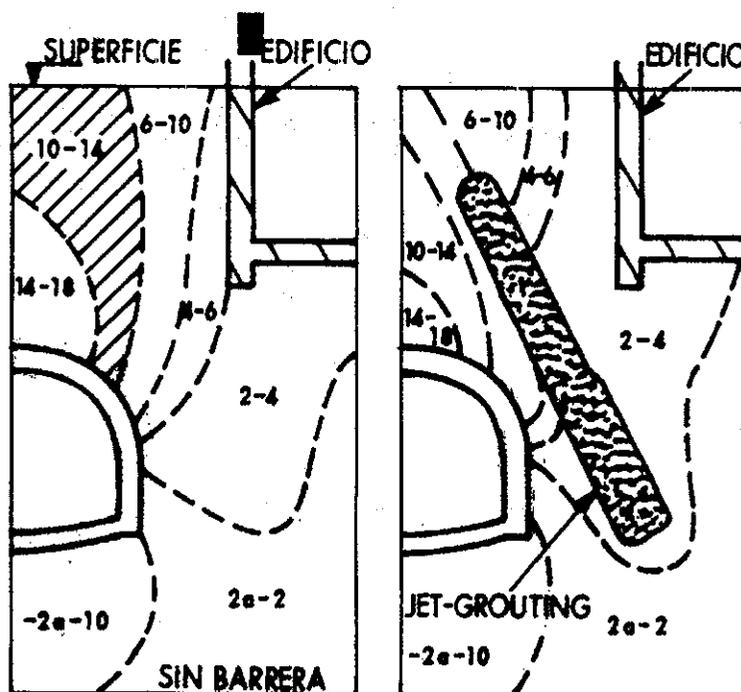


FIG. 10.- INFLUENCIA TEÓRICA DE UNA BARRERA DE JET-GROUTING (MOVIMIENTOS EN mm DOS FILAS DE COLUMNAS SEPARADAS 1,50 m EN LA MISMA FILA).

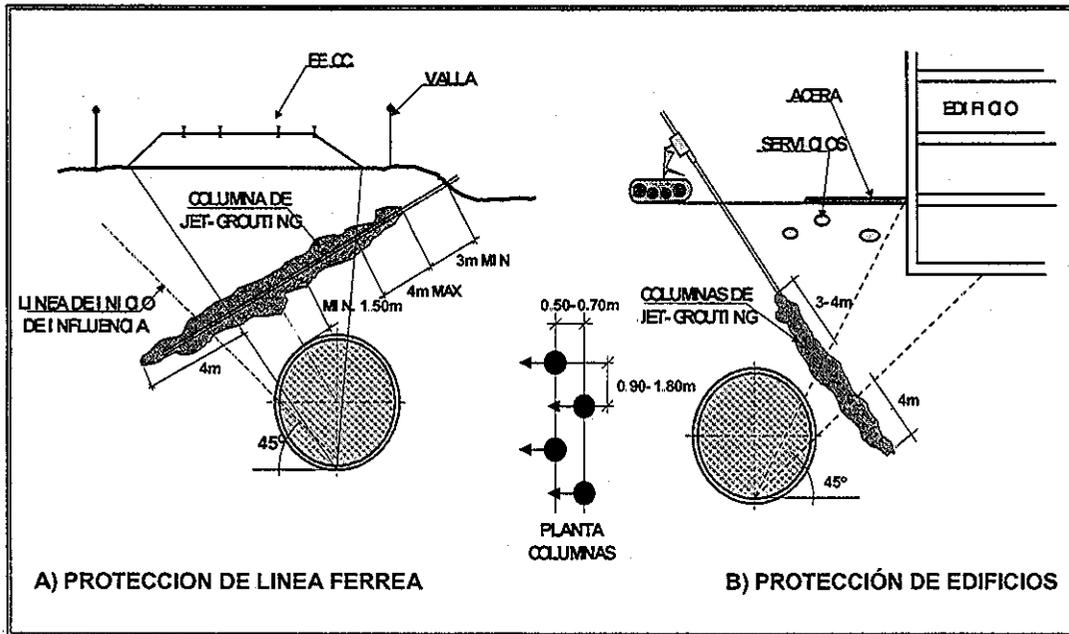


FIG. 11.- PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS CON UNA LÍNEA DE JET-GROUTING.

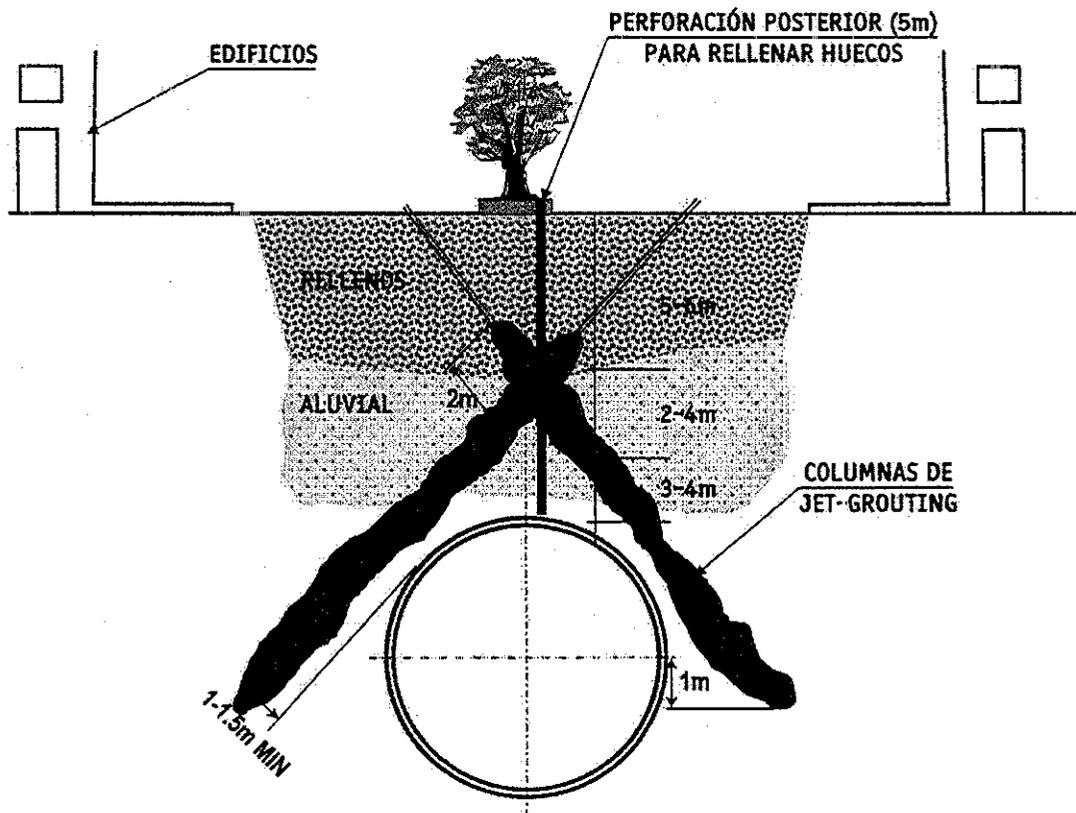


FIG. 12.- SOLUCIÓN EN "TIENDA DE CAMPAÑA" EN AVENIDAS Y BAJO AUTOVÍAS.

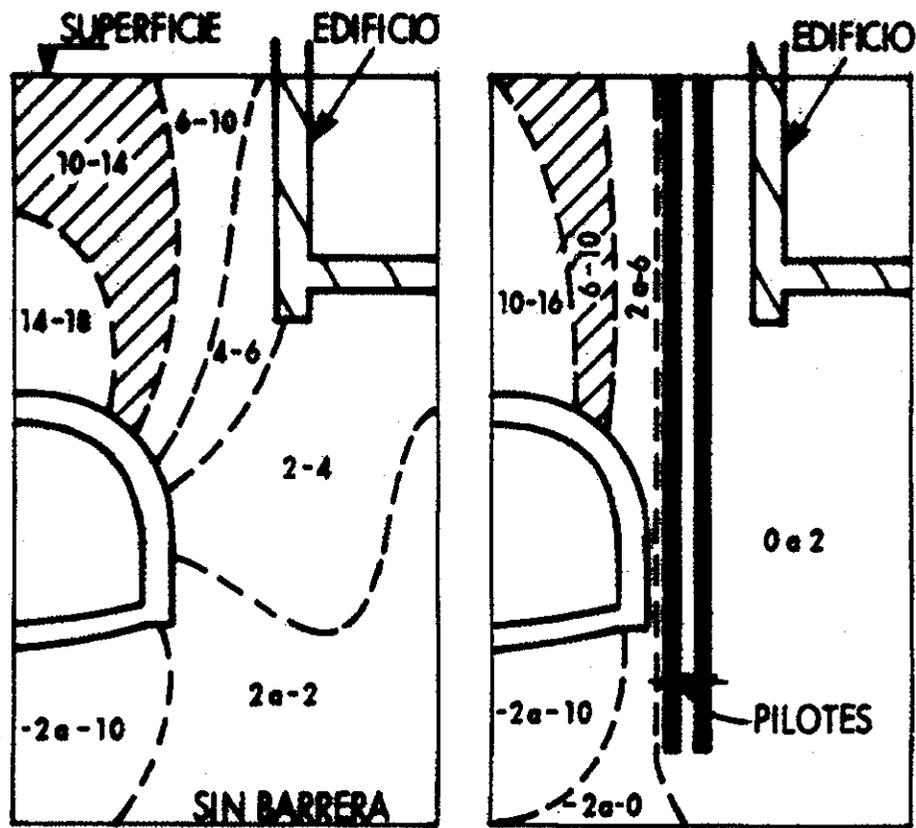


FIG. 13.- INFLUENCIA TEÓRICA DE UNA BARRERA DE DOS FILAS DE PILOTES Ø 650 mm, SEPARADOS 1 m EN LA MISMA FILA (MOVS. EN mm).

- Congelación del terreno. Se trata de una medida provisional para dar una cohesión importante en el terreno (clave de túneles, presolera de estaciones, etc) mientras se efectúa la excavación subterránea. Tiene a nuestro juicio, varios inconvenientes: a) En el caso de gravas con cierta velocidad del agua subálvea la congelación es difícil y necesita inyecciones complementarias (Metro de Valencia y Metro de Sevilla). B) La congelación en "terreno caliente", como las margas presenta muchas dificultades, y a veces, solo se consigue destrozarse la marga. C) La descongelación produce asentamientos apreciables, como hemos comprobado en los Metros de Sevilla y Toulouse.
- Inyecciones convencionales de lechada de cemento, con la técnica de manguitos, habitualmente utilizadas para mejorar las propiedades de terrenos de escasa competencia. En propiedades de terrenos de escasa competencia. En la Fig. 14 puede verse el tratamiento efectuado en la Línea 4 del Metro de Madrid, en la zona de su paso bajo la Autovía A-10.
- Inyecciones de compensación, cuyo fundamento estriba en introducir un cierto volumen de lechada o mortero (bentonita-cemento y algo de arena) que compriman el terreno en el área afectada por los movimientos del túnel a fin de que cause un cierto levantamiento de la superficie del terreno, el cual compense el asiento por la excavación. El volumen total inyectado V_i lo hemos denominado coeficiente de eficacia de la inyección y varían normalmente, entre 4 y 6, aunque puede llegar a 8-10. Las inyecciones suelen hacerse con taladros horizontales, desde pozos verticales próximos, pero también pueden hacerse con taladros inclinados desde superficie o desde alguna galería próxima (como en el caso de la Estación de Guzmán el Bueno, de la Línea 7, Fig. 15). En los taladros se instalan tuberías con tubos-manguitos (cada 0,5m., por ejemplo) para poder reinyectar las veces que se considere necesario

Normalmente la máxima longitud de taladros suele ser de unos 50-55 m. En una primera fase (acondicionamiento o preparación) se realiza inyección en varias, veces controlando que los levantamientos de edificios sean inferiores a 2-3 mm., a fin de que los siguientes volúmenes inyectados cuando pase el túnel tengan mayor eficacia. Generalmente, en esta fase inicial, se inyecta 5-8 l/m² cada vez, mientras que en la propia compensación suele utilizarse 8-12 l/m², dada la necesidad de ajustarse a la velocidad de avance del túnel.

Todas estas técnicas pueden usarse bien en excavaciones subterráneas, bien en las de cielo abierto. Sin embargo, en estas últimas se puede dar la circunstancia de que su proximidad a los edificios en cuestión sea muy pequeña y no permita el establecer "barreras" de protección (con jet, pilotes, etc). En ese caso, muchas veces no queda más remedio que actuar sobre el sistema de ejecución, cambiándole a otro que dé menos deformaciones. Ello equivale, en general, a rigidizar las pantallas de entibación (mayor espesor de lo normal), a aumentar la rigidez y frecuencia de puntales (incluyendo precomprensión de los mismos), a utilizar el procedimiento descendente-ascendente (ejecución de pilares embebidos en pilotes que permiten ir arriostrando las pantallas cuando se va excavando), tratamiento especial de juntas (para evitar fugas de agua y arrastres), achiques interiores de agua (con prolongación de pantallas), etc.

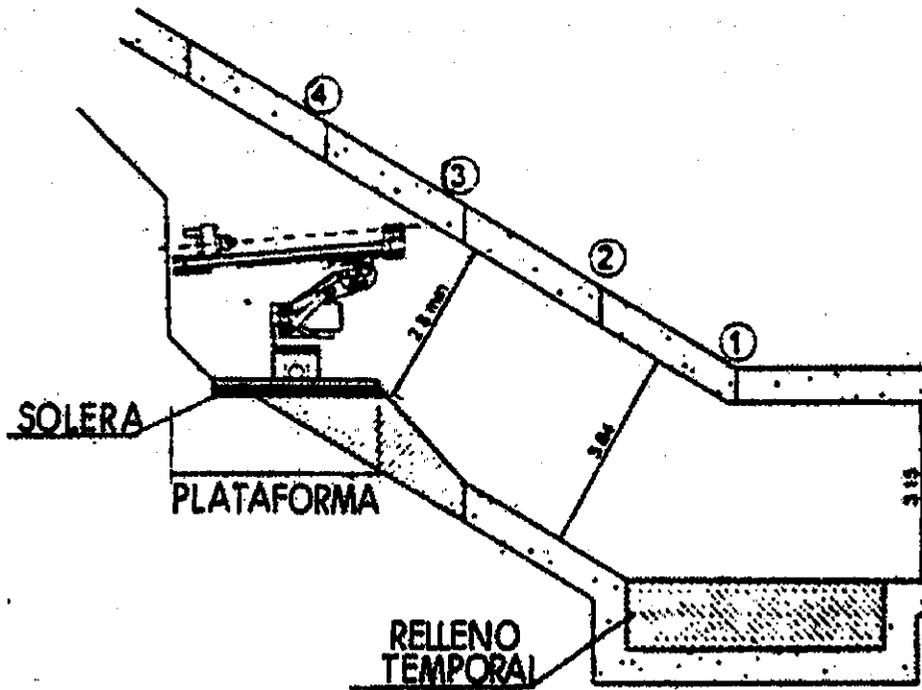


FIG. 15 .b.- PERFORACIÓN DE TALADROS PARA COMPENSACIÓN DESDE GALERÍA.

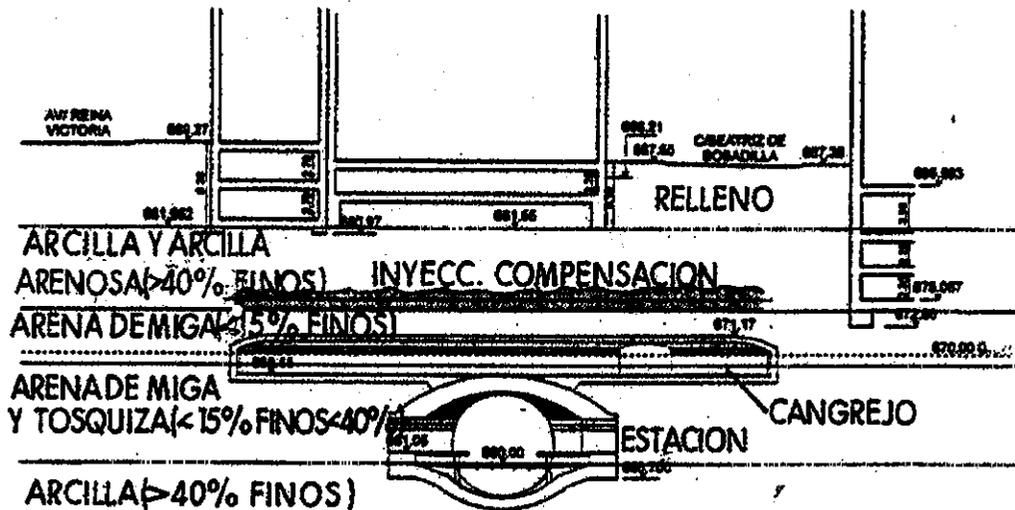


FIG. 15.c.- INYECCIONES DE COMPENSACIÓN EN LA ESTACIÓN DE GUZMÁN EL BUENO (TRABADA Y R. ORTIZ, 1999).

4. EXPERIENCIA RECIENTES

En la Ampliación del Metro de Madrid 1995-99 las dos técnicas más utilizadas para evitar o limitar daños en edificios próximos han sido las barreras de jet-grouting (Línea 1, Línea 4, Línea 9, etc.) y las inyecciones de compensación (Línea 7, Línea 1 y Líneas 8 y 10). En el caso de barreras de jet se ha utilizado siempre jet-1 y los taladros en dos filas, separadas 70 cm. La separación entre columnas de una misma fila ha dependido de la naturaleza del terreno. En la Fig. 16 aparece nuestra posible recomendación sobre dicha separación en función del módulo medio de deformación del terreno existente desde la superficie hasta el centro del túnel, variando desde uno 70 cm. hasta el orden de 1,60. En la Fig. 17 se expone un ejemplo de tratamiento utilizado en la Línea 4, para defender algunos edificios del Liceo Francés. La previsión de asientos indicaba valores máximos del orden de, al menos 20 cm. Sobre la clave del túnel y de unos 8 c. en el edificio próximo. Con la barrera construida, al excavar el túnel con una tuneladora N.F.M., de \varnothing 9,40m., los asientos sobre su clave variaron entre 17 y 30 cm. pero en el edificio fueron de algún milímetro. El empleo de jet-3 puede ser peligroso, por los levantamientos que puede inferir.

En cuanto a las ~~inyecciones de compensación se han utilizado:~~ a) En la Línea 7 (una de ellas es el caso de la Fig. 15). b) En la unión de las Líneas 8-10, en el Paseo de la Castellana, en su cruce bajo el túnel, de RENFE Chamartín-Atocha (Fig. 18) con taladros horizontales de hasta 40 ml., insertaos en un espacio vertical de unos 2 m. de espesor y manteniendo el servicio del túnel de RENFE (el de mayor tráfico de España). c) En la Línea 4 bajo un edificio muy alto. D) En la Línea 1, en la Villa de Vallecas, en que la previsión de asientos era de uno 7-8 cm. en clave ($V_s \cong 2\%$) y e que había que pasar bajo muchos edificios en estado de conservación dudoso; dado que se comprobó la realidad de la previsión, se procedió a un tratamiento masivo de compensación (Fig. 19) ya que por encima de la clave del túnel había terreno flojos (aluviales y "peñuelas" redepositadas y utilizadas como relleno de antiguas vaguadas, explotaciones de yeso, etc.). La Fig. 20 muestra la evolución de asientos obtenidos y los volúmenes inyectados para el acondicionamiento fueron del orden de 40-80 l/m² y el volumen de compensación de 150 a 210 l/m² (en un caso excepcional llegó a ser de 415 l/m²). La compensación se hizo desde pozos (Fig. 19), pero, en algún caso especial se hizo desde el propio frente de excavación (realizado con el método tradicional de Madrid y desde la calle.

Para tener una idea de la variación del coeficiente de eficacia, ξ , en terrenos de Madrid se puede utilizar la Fig.21 adjunta, resumen de diversas medidas reales, tanto en acondicionamiento como en compensación. Como alcanza valores de 15 a 25 (mayores cuanto peor es el terreno), mientras que en compensación estamos en magnitudes del orden de 2 a 4,5. En el caso de la Villa de Vallecas, del que disponemos de muchos datos, se puede ver como ξ , varió a lo largo de todo el proceso de inyección, desde 24 hasta 4-5 de una forma casi continua (Fig.21).

En cuanto al uso de cada solución de las aquí expuestas, ello depende de varios factores: a) De la situación relativa de las cimentaciones y del túnel. b) De los medios y plaza disponibles (posibilidad de ejecutar pozos próximos, por ejemplo). c) De los servicios próximos (gas, luz, etc.) d) Tipo de terreno existente. e) Experiencia en el uso de las técnicas.

En la Fig. 22 se da un criterio personal para la utilización de los diversos sistemas que hemos comentado con el objeto de defender edificios próximos.

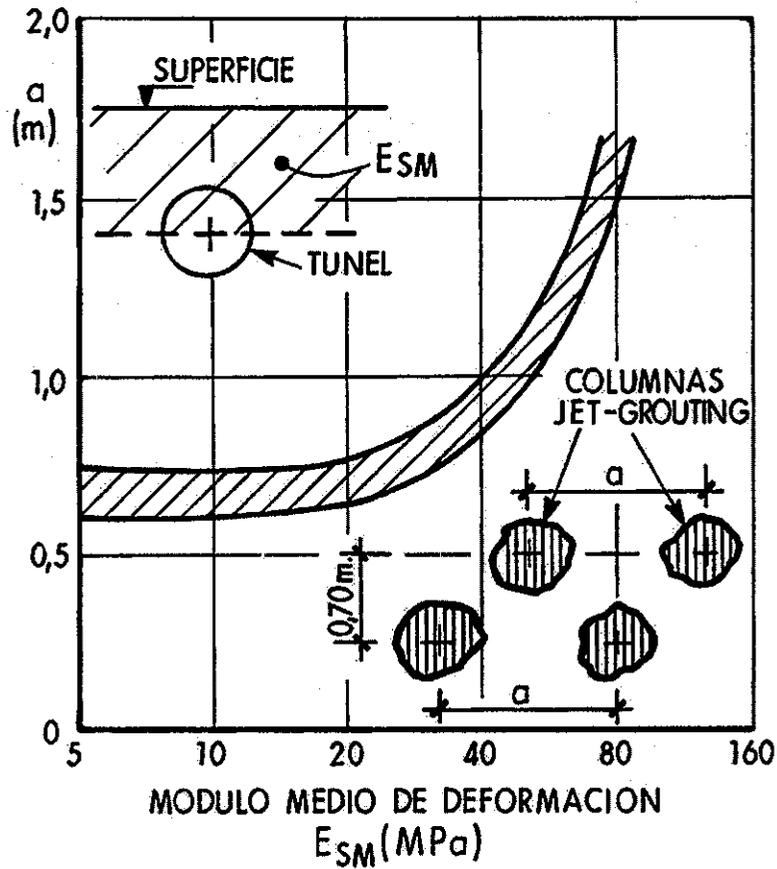


FIG. 16.- SEPARACIÓN ENTRE COLUMNAS DE BARRERAS DE PROTECCIÓN.

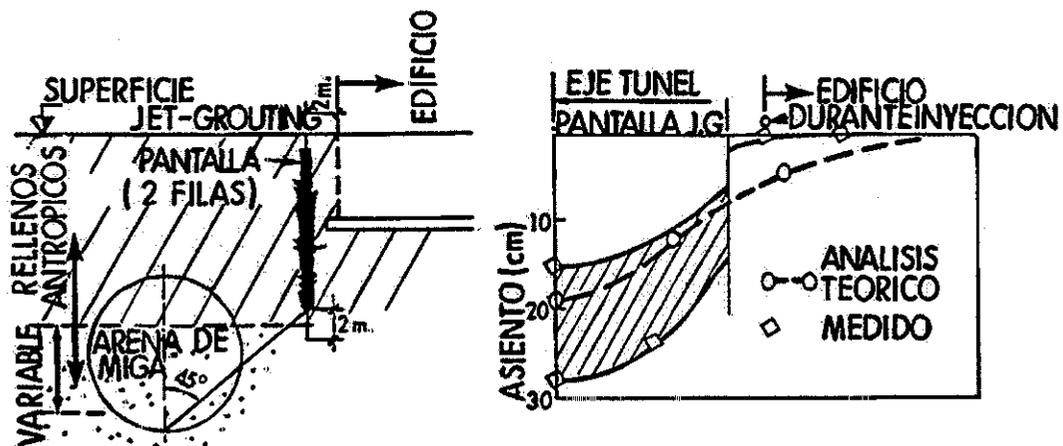


FIG. 17.- LICEO FRANCÉS. LÍNEA 4 – SOLUCIÓN Y ASIENTOS MEDIDOS (MELIS ET AL, 1999).

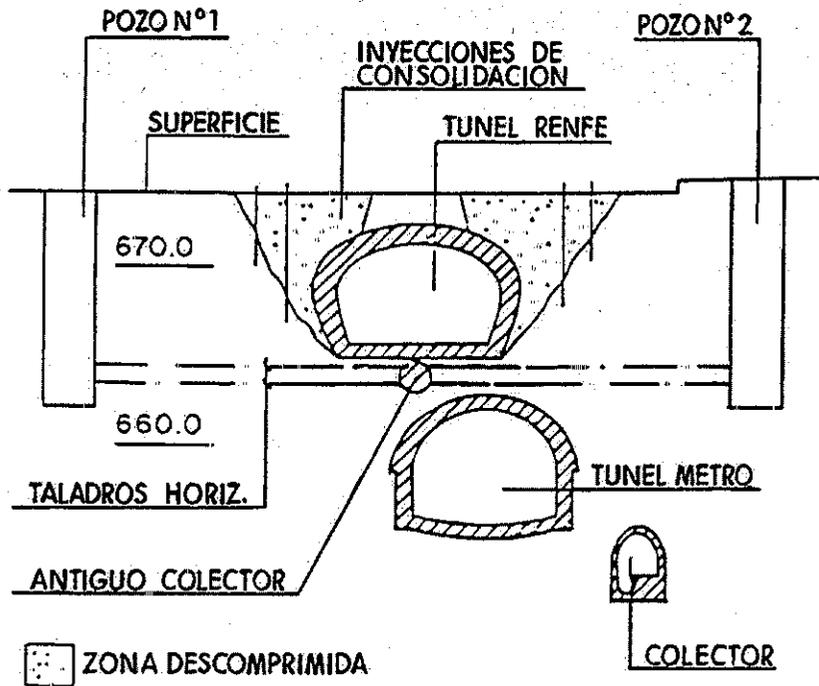


FIG. 18.- UNIÓN LÍNEAS 8-10, TRATAMIENTO DE COMPENSACIÓN TALADROS EN PLATA.

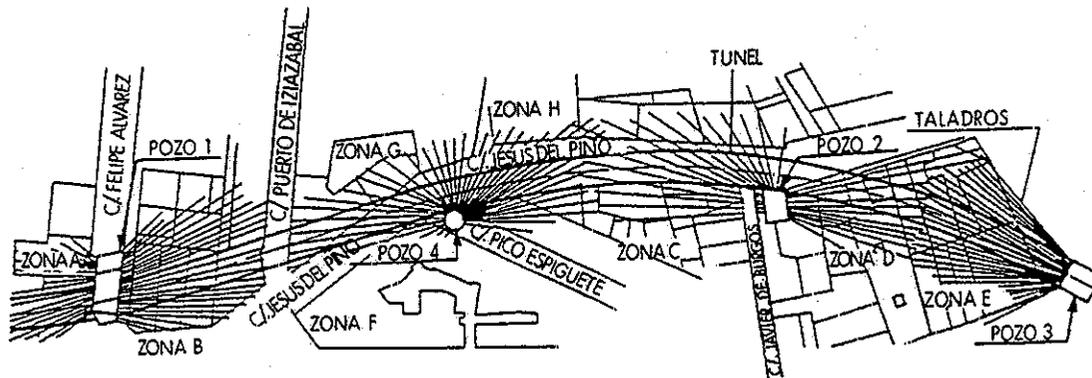


FIG. 19.a.- POZOS PARA INYECCIONES DE COMPENSACIÓN EN LA LÍNEA 1. (ARNAIZ ET AL, 1999).

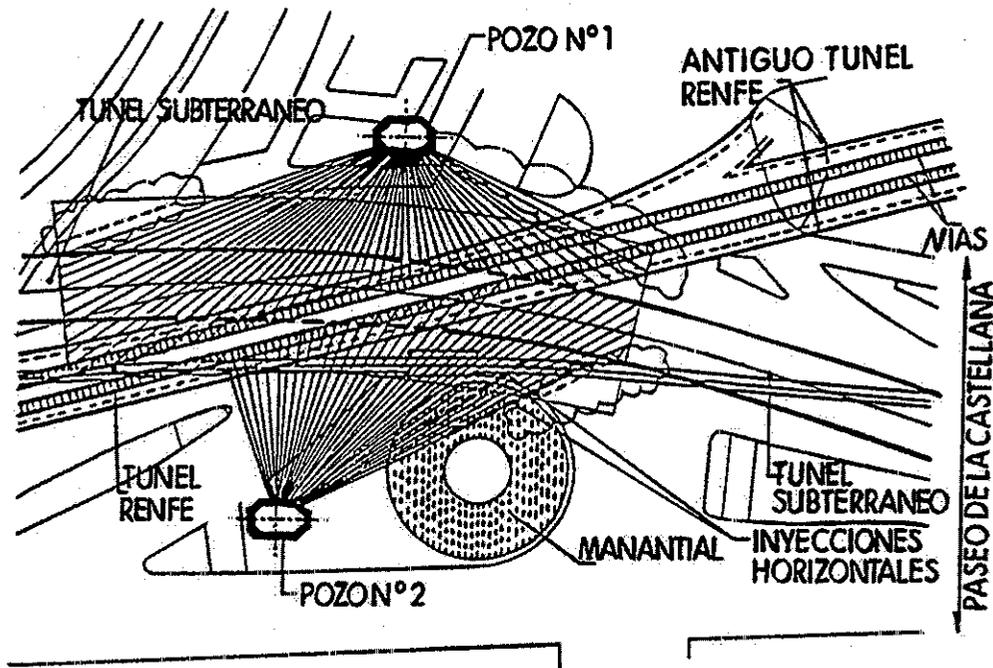


FIG. 19b.- UNIONES LÍNEAS 8-10. TRATAMIENTO DE COMPENSACIÓN (TALADROS EN PLANTA).

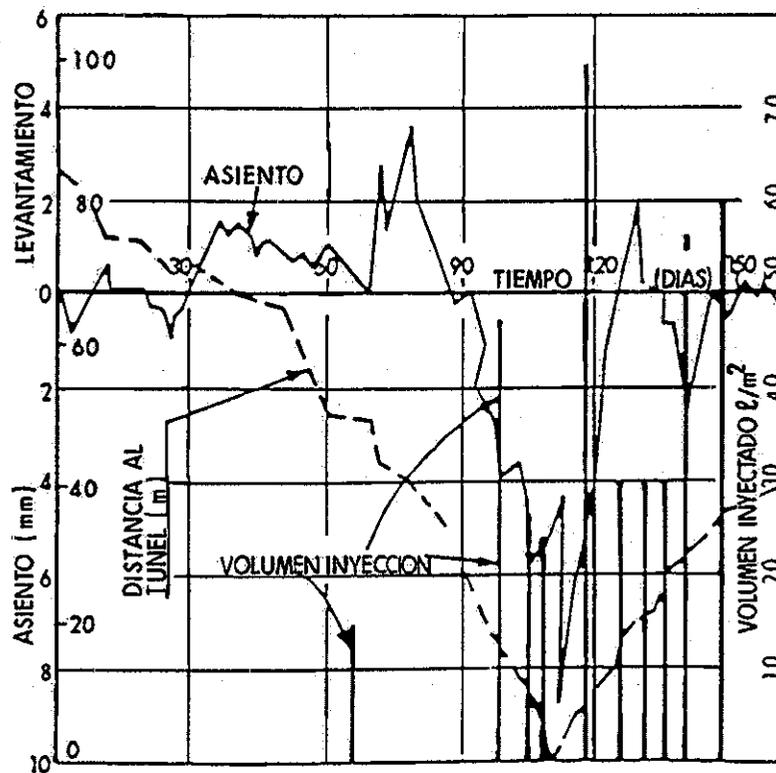


FIG. 20.- ASIENTOS MEDIDOS DURANTE LA COMPENSACIÓN.

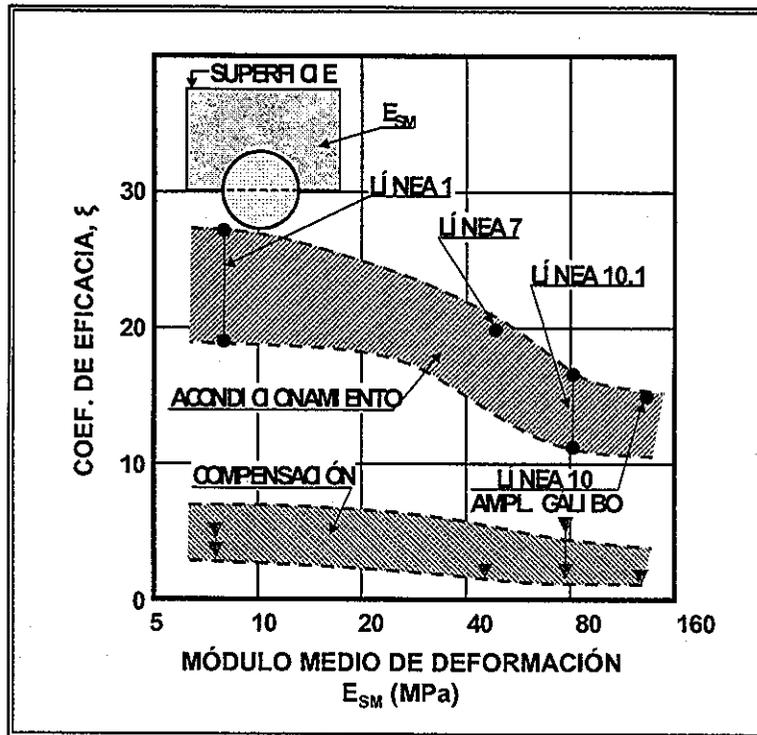


FIG. 21.- COEFICIENTE DE EFICACIA EN INYECCIONES DE COMPENSACIÓN EN FUNCIÓN.

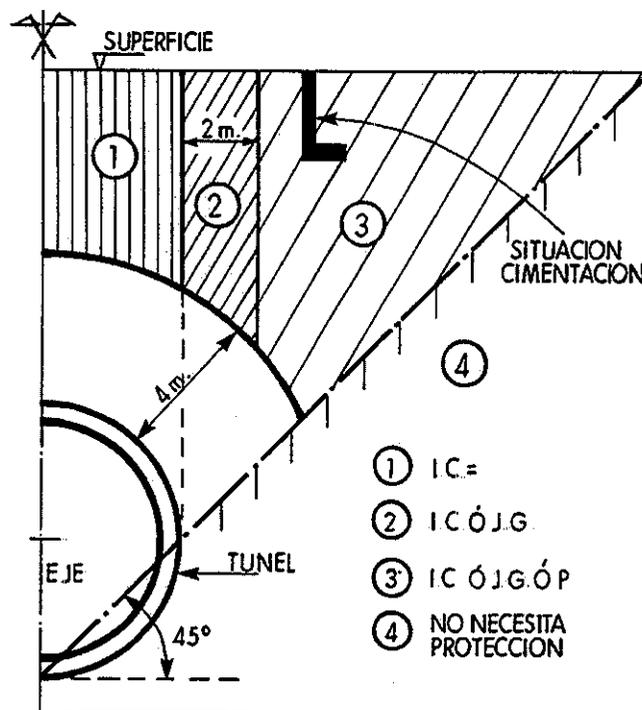


FIG. 22.- POSIBLES SOLUCIONES PARA BARRERAS DE PROTECCIÓN EN FUNCIÓN DE LA SITUACIÓN DE CIMENTACIONES.

IC. = INYECCIÓN COMPENSACIÓN.
 J.G. = JET-GROUTING
 P = PILOTES.

5. CONCLUSIONES

- El tipo de actuaciones geotécnicas en ámbito urbano son diversos: desde las destinadas a conocer bien el terreno y los niveles piezométricos hasta las orientadas a evitar daños a los edificios.
- Al realizar obras subterráneas en ámbito urbano es necesario estudiar tanto los movimientos a originar como el estado de los edificios a afectar.
- Se dispone, hoy día, de técnicas diversas para establecer barreras (pantallas de jet-grouting y pilotes, principalmente) que defiendan edificios y para compensar los asientos que se vayan produciendo (inyecciones de compactación o compensación).
- En estas páginas se han dado diversos criterio de diseño geotécnico para proyectar estas actuaciones, durante las cuales debe mantenerse un control absoluto de movimiento.
- En cualquier caso, todas esas deben complementarse con las instrumentaciones adecuadas y un control permanente durante su ejecución.

6. REFERENCIAS

Arnaiz, M; Oteo, C; Ferrer, P; Simic, D y Melis, M (1999) "Ground improvement during excavation of the Madrid Underground's Line 1 Extension" Proc. I.T.S. World Tunnel Symp. Oslo, Junio.

Arnaiz, M; Melis, M; Oteo, C; y Simic, D: (1999). "Soil treatment for the underground extension of Madrid Metro". Proc. XIV Int. Conf. On Tunnel Construction and Piling'99 Londres Septiembre.

De la Fuente, P. y Oteo, C. (2000). Estudio Teórico no publicado. Fundación Agustín de Betancourt.

Medina, L (2000). Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras en los suelos tosquizados de Madrid". Tesis Doctoral. Universidad de Coruña. Director: M. Melis.

Melis, M; Oteo, C; Trabada, J. y Sala, P. (1998). "Crossing of an underground tunnel bored in clayey sand under an old railway tunnel in Madrid". Proc. I.T.S. World Tunnel Symp. Sao Paulo. Abril.

Melis, M; Arnáiz, M.; Mendaña, F.; Fernández, R. y Oteo, C. (1999). Experience gained in Madrid during the construction of tunnels crossing urban fills with T.B.S. " Proc. 12 the European Conf. On Soil Mechanics and Geotech. Eng., Amsterdam, Junio.

Melis M.; Oteo, C. y Rodríguez Ortiz, J.M^a (2000). "Estrategia geotécnica aplicada a la Ampliación del Metro de Madrid, 1995-99". Geotecnia en el Año 2000. Libro Homenaje a J.A. Jiménez Salas. Soc. Esp. Mecánica del Suelo. CEDEX. Madrid.

Muzas, F (1989) "Efecto barrera de las obras lineales". Simp. Sobre el agua y el terreno en las infraestructuras. Torremolinos.

Oteo, C.; Arnaiz, M.; Trabada, J. y Melis, M. (1999) "The Madrid Model: A semiempirical method for subsidence estimating". Proc. I.T.A. World Tunnel Symp. Oslo Junio.

Oteo, C. (2000). "actuaciones en el terreno en ámbito urbano". Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras de Transporte. Barcelona, Ponencia General.

Rodríguez Ortiz, J.M. (1997). "Criterios de diseño geotécnico de tramos de túnel y estaciones a cielo abierto". Jornadas Técnicas sobre la Ampliación del Metro de Madrid. F.A.B. Madrid.

Trabada, J. y Rodríguez Ortiz, J.M. (1999) "Construction of a Large Cavern beneath existing Buildings for the Madrid Subway". Proc. I.T.A. World Tunnel Symp. Oslo, Junio.