

Movimientos controlados durante la ampliación del Metro de Madrid (1995-99)

Carlos S.Oteo Mazo

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Univversidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

En el presente artículo se presenta una visión general de los Planes de Auscultación desarrollados por la Comunidad de Madrid para controlar los movimientos inducidos en el terreno y estructuras próximas, por las obras de ampliación del Metro de Madrid, así como diversos resultados prácticos obtenidos durante el período 1995-1999. Además se incluye algún análisis numérico realizado para interpretar resultados y el modelo de análisis deducido de dichas observaciones –el Modelo Madrid– y algunos de los sistemas utilizados para evitar daños en edificios o instalaciones superficiales.

ABSTRACT

The present article gives an overview of the Monitoring Plans carried out by the Comunidad de Madrid to control movements in soil and neighbouring buildings as a result of the Madrid Metro Extension Work, together with some of the practical results obtained over the period of the work from 1995-1999. The article includes a description of the numerical analysis employed to interpret the results, the model of analysis taken from the said observations - the Madrid Model - and some of the systems employed to prevent damage to buildings or installations.

1. INTRODUCCIÓN

Como se ha dicho en otros trabajos de este volumen, durante los cuatro últimos años (1995-99) el Gobierno de la Comunidad de Madrid, ha llevado a cabo una nueva Ampliación del Metro de Madrid. Gracias a ello, la Red del Metro ha pasado de unos 120 Km de longitud a tener 169 Km. De la Nueva Ampliación, unos 28 Km., se han realizado en túnel, 9,5 Km – incluyendo estaciones-, con el método Milán o “cut-and-cover” - al abrigo de pantallas continuas de hormigón armado- y unos 12 Km se han realizado a cielo abierto, en excavaciones en talud y a poca profundidad.

La obra subterránea se ha llevado a cabo, principalmente, utilizando Tuneladoras, del tipo E.P.B. (“Earth Pressure Balanced”), con diámetros entre 9,40 m (4 TBM para doble línea) y 6,70 m (2 TBM para línea única). La mayor parte ha sido ejecutada con las Tuneladoras de mayor diámetro. Además, se ha excavado una Estación (llamada “Guzmán el Bueno”) de forma subterránea, con el tradicional “método alemán” de excavación multifase. En unos 3 Km de longitud del túnel de línea se ha usado el Método Tradicional de Madrid (derivado del antiguo Método Belga de sección partida).

Dado el gran volumen de obra subterránea ejecutada y la velocidad de avance (la media diaria absoluta ha variado entre 12

y 16 m, habiéndose llegado, en alguna ocasión, a avances de 39 m/día), ha sido necesario estudiar previamente la posible repercusión de la excavación en edificios e instalaciones próximas, desarrollando, al mismo tiempo, un amplio programa de instrumentación. Este programa ha sido controlado por una unidad especial (denominado U.S.A.C., siglas de Unidad de Seguimiento, Auscultación y Control), a fin de tener centralizado el estado general de la obra (avances, presiones medidas en el frente de Tuneladoras, asentos y su evolución temporal de cada punto de control, etc.) y poder tomar las decisiones necesarias en cada caso.

2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

El terreno atravesado por las obras en cuestión es el típico de la zona Norte y Nordeste de Madrid, correspondiendo al predominio de depósitos pliocénicos, de tipo arcósico, procedentes de la erosión de granitos y gneises de la Sierra de Guadarrama. En la Línea 1 también se ha atravesado el sustrato mioceno de arcillas preconsolidadas ("peñuelas") y las margas yesíferas del sustrato del sur de la ciudad, junto con los productos de alteración cáustica que les acompaña. En las obras han incidido, por tanto,

- ▼ Rellenos antrópicos, flojos y colapsables .
- ▼ Sedimentos aluviales cuaternarios en vaguadas y paleocauces, de naturaleza muy dispar: limos blandos, arenas flojas, etc.
- ▼ Los sedimentos pliocénicos en sus diversas graduaciones: a) "Arena de Miga", b) "arena tosquiza", arena algo arcillosa con finos entre 25 y 40%; c) "Tosco arenoso", con finos entre 40 y 60%; d) "Tosco", que es una arcilla rígida, algo arenosa; e) y "Tosco arcilloso" en que ya predomina el comportamiento arcilloso y en el que se encuentra alguna capa "activa (de cierta expansividad).
- ▼ Sedimentos miocénicos, afectados en menor grado por las obras y que están constituidos por arcillas rígidas, fisuradas, grises, marrones y verdosas "peñuelas", con algo de yeso y esmectitas. A veces estas "peñuelas" han sido redepasitadas en tiempos recientes o se han utilizado como rellenos en el sur de Madrid ("peñuelas reblandecidas").
- ▼ Las margas yesíferas y la roca yesífera, muy duras, surcadas por simas de disolución, rellenas de material muy blando. A veces, están recubiertos por productos de alteración cáustica, muy blandos. (0 a 3 golpes del S.P.T)

Las propiedades geotécnicas de estos materiales son muy diferentes, según se trate de materiales recientes o antiguos y según el contenido de finos. La Tabla 1 resume sus propiedades geotécnicas más habituales. La Figura 1 muestra la variación de la resistencia a compresión simple, q_u , y del módulo de deformación en extensión, (a utilizar en los problemas de subsiden-

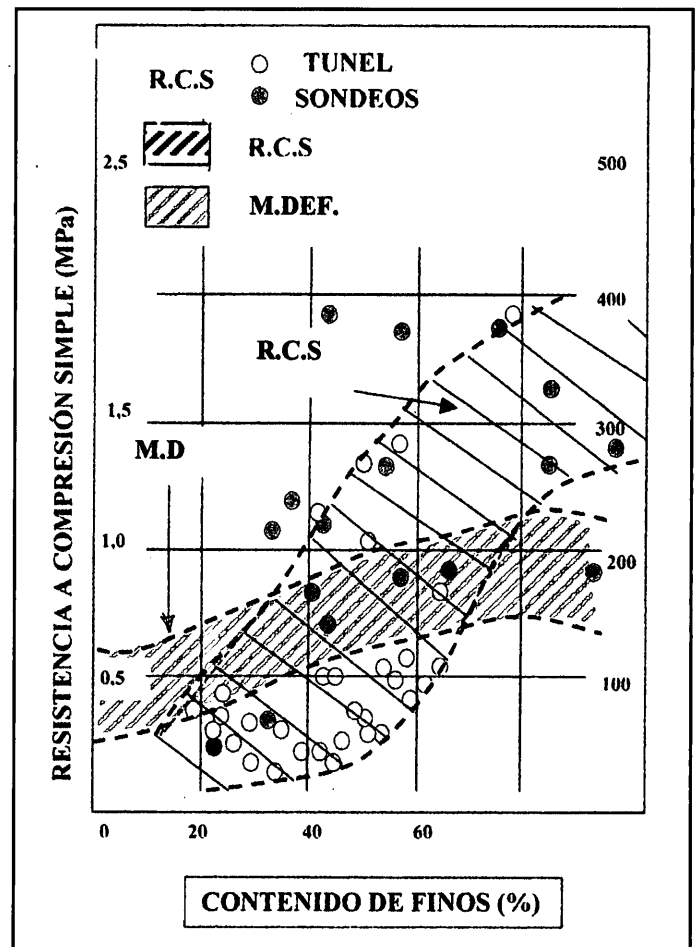


Figura 1. Variación de la resistencia a compresión simple y del módulo de deformación en decompresión con el contenido de finos en los suelos miocenos de Madrid (Oteo, 1995).

cia) con el contenido de finos. En esa Figura se observa como aumentan los valores de q_u con el contenido de finos, sobre todo en los suelos pliocénicos, debido a que se trata de materiales "preconsolidados", en parte cementados por la presencia de microcristales de feldespato y cuarzo (DE LA FUENTE Y OTEO, 1984).

Los materiales pliocénicos con más del 60% de finos son prácticamente impermeables, mientras que las capas de "arena de miga" pueden ser bastante permeables, según los finos que contengan, su grado de cementación, etc. Generalmente, por eso, van asociados a flujos de agua. Pero, afortunadamente, aunque en una misma vertical existan dos o más capas de "arena de miga" no suelen estar en comunicación, gracias a la alternancia con otras capas más impermeables. Esto hace que las presiones de agua en el terreno no superen los 3-10 m. de columna de agua (30-100 KPa), por lo que, en principio, las Tuneladoras no tienen que soportar presiones importantes en su frente (del orden de 150-200 KPa, incluyendo la presión efectiva del terreno y esa presión de agua).

TABLA 1. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

Material	Contenido de fibras	Densidad seca (%) (Kg/m ³)	Humedad (%) media	Límite líquido	Límite plástico	Módulo presiométrico	Cohesión media (MPa)	Angulo de roz. (kPa)	SPT medio
Rellenos y Aluvial	15 - 80	1550	8 - 20	25 - 55	15 - 40	6 - 15	0	28	5-15
Arena de Miga y Tosquiza	20 - 40	1860	9 - 14	25 - 40	15 - 20	100 - 200	20	35	30-R*
Tosco arenoso	40 - 60	1850	10 - 28	28 - 43	18 - 25	125 - 250	30	33	40-R
Tosco	60 - 85	1780	10 - 35	33-55	20 - 28	150 - 300	50	32	R
Peñuela	85 - 95	1650	18 - 35	47-100	20 - 40	70 - 150	30	30	50-R
Peñuela reblandecida	85 - 95	1550	25 - 38	47-100	20 - 40	4 - 25	5	28	5-R
Producto alteración cárstica	85 - 95	1350	25 - 38	45 - 75	20 - 40	2 - 6	0	22	0-8
Yeso	≥ 80	2050	≥ 10	NP - 50	NP - 30	500 - 1000	20	35	R*

(*) R = 60 golpes/30 cm

Los parámetros de la Tabla 1 son generales y los resistentes-deformacionales se refieren a ensayos de compresión, es decir, corresponden a fenómeno de carga, como lo que ocurre debajo de una zapata. Los módulos de deformación de la Fig.1 corresponden a extensión, es decir, con trayectorias de tensiones similares a las que se producen por encima de un túnel, por lo que son apropiados para el estudio de subsidencia. Sin embargo para fenómenos de relajación o descarga, los parámetros (al ser tomados como constantes) deben de ser otros. Así, por ejemplo, para el cálculo de pantallas, en la Ampliación del Metro se han tomado los que se incluyen en la Tabla recomendada por MELIS, OTEO y RODRÍGUEZ ORTIZ (1999), por corresponder a otra trayectoria de tensiones.

3. PLANIFICACIÓN Y CONTROL

Para que un Plan tan ambicioso como el de la Ampliación del Metro de Madrid pudiera tener resultado, fue desarrollado y gestionado con una absoluta rigurosidad y control, ya que había que intentar prever cualquier incidencia esperable en el desarrollo de las obras. Para ello se intentó:

- ▼ 1.- Contar con contratistas preparados y con suficientes recursos técnicos.
- ▼ 2.- Recurrir a maquinaria moderna de excavación de túneles, así como distribuir su uso, en el espacio y en el tiempo.
- ▼ 3.- Coordinar el trabajo de las tuneladoras con la ejecución de las estaciones y tramos a cielo abierto.
- ▼ 4.- Establecer un equipo de apoyo técnico para resolver, rápidamente, tanto los problemas geotécnico-estructurales presentes durante las fases de Proyecto, como lo que apareciesen durante la construcción (Asesoramiento Básico).
- ▼ 5.- Crear un proceso de control que sirva para la toma de decisiones y conocer en cada momento la marcha de la obra, interacción con edificios y estructuras, etc.

Por ello, desde el principio se pretendió:

- ▼ Establecer modelos de comportamiento representativos de la "realidad geotécnica" y aplicables a los problemas de diseño (sostenimiento y revestimiento de túneles, pantallas continuas de contención, etc.)
- ▼ Evaluar el efecto sobre las construcciones en el entorno próximo.
- ▼ Establecer un sistema de auscultación que permitiera conocer: a) El grado de seguridad de las obras. B) La idoneidad de los parámetros supuestos para el terreno. C) Los movimientos reales del terreno y de las estructuras próximas para corregir o dar el visto bueno a las previsiones realizadas, etc. Es decir, zonificar el trazado de acuerdo con el riesgo de posible afectación en las excavaciones sobre edificios próximos.

Todo ello se ha podido conseguir a través de dos Unidades:

A) La UNIDAD DE ASESORAMIENTO ESPECIAL (U.A.E), controlada directamente por la Dirección General de Infraestructura del Transporte, a través de los Servicios de Proyecto y Construcción de la Comunidad de Madrid (estos Servicios son los responsables de las Direcciones de obra) o los propios Directores de Obra. Está compuesto por un grupo de asesores especiales en temas geotécnicos y de construcción de túneles, cuyo trabajo se completa - cuando es necesario- por los servicios técnicos de las empresas constructoras o por empresas especializadas.

B) La UNIDAD DE SEGUIMIENTO, AUSCULTACIÓN Y CONTROL (U.S.A.C), que depende directamente del Servicio de Planificación de la Dirección General de Infraestructura de Transporte y que cuenta como asesores a los miembros del consejo de la U.A.E. Esta U.S.A.C tiene a su cargo:

- ▼ El diseño de los programas de auscultación.
- ▼ La planificación y realización de trabajos de campo especiales para completar el conocimiento geotécnico en puntos concretos.
- ▼ La realización de ensayos de laboratorio especiales para la comprobación de parámetros geotécnicos no convencionales.
- ▼ La supervisión de la instalación de los diversos aparatos de auscultación.
- ▼ El desarrollo y puesta a punto de un Sistema Integrado de Tratamiento de Datos, en el que se almacenan los datos de la auscultación de todas las obras, insertándolos en un Sistema Geográfico para visualizarlos fácilmente.

Un punto importante al que se dio máxima importancia fue el estimar el valor de los movimientos que pasan los niveles de alarma establecidos previamente (los denominados "verde", "ambar" y "rojo") a fin de tener información previa a la llegada a los "puntos calientes" o de mayor riesgo, (Verde = Ningún problema previsible, del orden de 5 mm de asiento, salvo en casos especiales, que se reduce a 3 mm; Ambar = posibles problemas, del orden de 5 - 10 mm; Rojo = Problemas con asiento mayor de 10 mm.)

Toda esa información permite adquirir experiencias para la misma obra o permitir que la Dirección de Obras y U.A.E. asimilen experiencias obtenidas en puntos muy diferentes de la ciudad de Madrid. Ello ha permitido la elaboración del Modelo Madrid, para evaluar la subsidencia, que más adelante se comenta.

4. PLANES DE AUSCULTACIÓN

4.1. Introducción

Para todos los tramos de la Ampliación del Metro se ha elaborado un Plan de Instrumentación y Control (preparado por los contratistas, con las bases fijadas por la U.S.A.C. y ajustado por la Dirección de Obra) cuyos objetivos principales son:

- ▼ Seguimiento de los movimientos producidos por las obras en el terreno en las edificaciones del entorno.

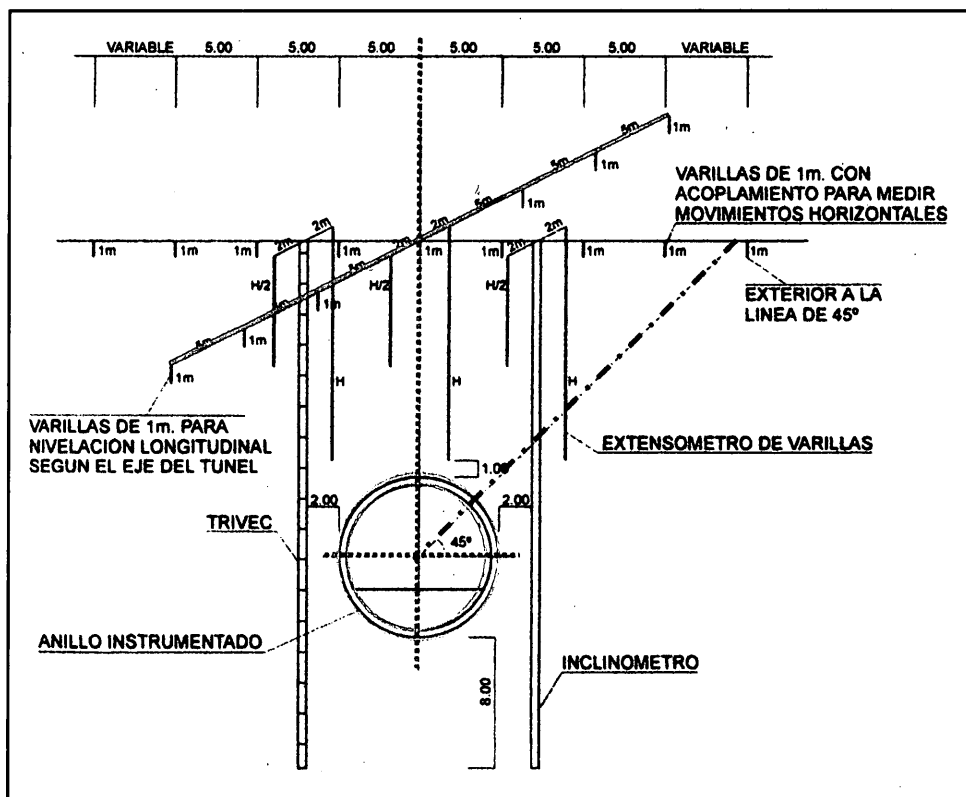


Figura 2. Sección de instrumentación para túnel realizado con EPB. (Rodríguez Ortiz, 1997)

- ▼ Medida de tensiones y de formaciones en los sostenimientos del túnel de línea.
- ▼ Control del comportamiento de las pantallas y elementos estructurales de las estaciones.

Estas medidas, junto con los datos referentes al terreno e hidrogeológicos permiten la comparación con las estimaciones o predicciones realizadas en la etapa de Proyecto y la evaluación del comportamiento de la obra respecto a los umbrales de seguridad previamente establecidos, adoptando, en su caso, las correcciones o modificaciones oportunas.

4.2-Criterios de Instrumentación para Control de la Subsidencia

En el caso de control de movimientos que aquí nos ocupa, la situación de los dispositivos de instrumentación y su distribución deberían partir de tener tramos homogéneos previamente definidos, de modo tal que se dispusiera, al menos, de una sección de control representativa dentro de cada zona.

En los tramos en los que el criterio de control global estaba calificado como VERDE, se instaló (MELIS, OTEO y R.ORTIZ, 1999):

- ▼ Un hito de nivelación en superficie sobre la clave del túnel cada 40-50 m.
- ▼ Una sección constituida, como mínimo, por 5 hitos de nivelación en superficie, situados transversalmente al eje de la traza, cubriendo la anchura previsible de la cubeta de asientos. En principio se disponían secciones mínimas de control cada 250-300 m, aproximadamente, siempre que la edificación existente lo permitiera.
- ▼ 1 hito profundo para referencia topográfica de nivelación cada 250-300 m.

En los tramos en los que el criterio de control global estaba calificado como AMBAR, además de lo anterior:

- ▼ Clavos para regletas de nivelación en edificaciones.
- ▼ Extensómetros de varilla simple a H-2m y H/2 sobre el eje, siendo H el espesor de la cobertera.
- ▼ 1 inclinómetro entre edificios y la excavación a una distancia de unos 2 m. del borde exterior del túnel, con una profundidad tal que la base del inclinómetro estuviera situada un diámetro.

En los tramos en los que el criterio de control global estaba calificado como ROJO o en aquellos en los que se deseaban analizar modelos singulares de se estudiaba en cada plan de Auscultación la conveniencia de establecer otros dispositivos como:

- ▼ Extensómetro incremental sobre la clave del túnel o punto próximo.
- ▼ Trivec sobre la clave del túnel o sobre sus riñones
- ▼ Electroniveles situados en líneas paralelas y/o transversales al eje del túnel
- ▼ Instrumentación de fisuras existentes previamente en edificios próximos.

Además, en algunos puntos se instalaban secciones de estudio para comprobar la verdadera forma de la cubeta de asientos en cuyo caso se empleaban montajes, como el que aparece en la fig.2.

5. MÉTODOS INICIALES PARA EVALUACIÓN DE SUBSIDENCIA

Inicialmente se utilizaron dos grandes grupos de métodos para estimar los asientos de subsidencia:

- ▼ Métodos Nivel A: Son procedimientos teórico-empíricos que permiten evaluar de forma rápida la ley de asientos (generalmente, volumen de asientos, Vs, situación del punto de inflexión i, etc) Como los de PECK y otros autores.

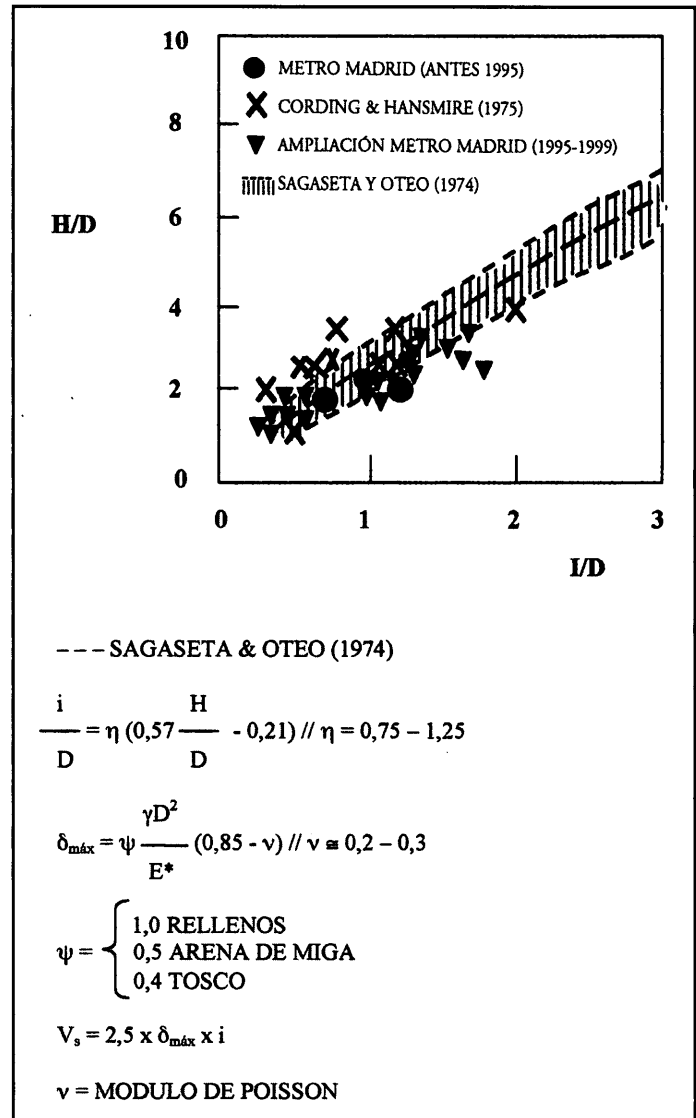


Figura 3. Modelo semiempírico de Sagaseta y Oteo.

- ▼ Métodos Nivel B: Se trata de métodos numéricos que, utilizando códigos de elementos finitos, analizaban casos particulares, reproduciendo en detalle la estratigrafía de la zona.

Entre los métodos del Nivel A el más clásico es el del Profesor PECK (1969) en que –siguiendo la idea de SMITH- se toma la ley de asientos igual a una ley de distribución normal o ley de Gauss. La situación del punto de inflexión (distancia i al eje del túnel) queda definido por un gráfico experimental que dió PECK. Años después hemos mostrado que, al disponer de nuevas medidas reales se puede tomar otra ley diferente para definir i (SAGASETA y OTEO, 1974), Fig. 3.

También puede aplicarse la idea de PECK, determinando Vs con otras expresiones teóricas o experimentales. En España y algunos otros países iberoamericanos (Venezuela, Cuba, Brasil,

etc.) se ha utilizado el método de SAGASETA y OTEO (deducido a partir de análisis no dimensionales y el método de elementos finitos) corregido a partir de mediciones reales que ha dado muy buenos resultados, al compararse con medidas reales (OTEO y SAGASETA, 1996). Con este método el asiento máximo, d_{max} , y el parámetro i (Fig.3) pueden determinarse con las expresiones:

$$\delta_{max} = \psi \frac{\gamma D^2}{E} (0,85 - v)$$

$$i/D = \eta (0,52 H/D - 0,21)$$

en las que se supone un terreno homogéneo, de densidad aparente γ , módulo de deformación aparente de decompresión E y módulo de Poisson v , en el que se excava un túnel de diámetro medio D y de profundidad hasta su eje H . ψ es un coeficiente constructivo empírico que en los terrenos terciarios de Madrid vale del orden de 0,3 - 0,5; η vale entre 0,75 y 1,25.

En cuanto a los métodos numéricos, de tipo B, se han utilizado códigos de elementos finitos, como el ANSYS o el PLAXIS, en dos y tres dimensiones para estudiar casos particulares complejos, reproduciendo en cada caso el sistema constructivo e incluso en el caso de las Tuneladoras, el proceso de avance con la inyección paulatina del trasdós de dovelas (fig.4).

6. MEDIDAS OBTENIDAS

Son innumerables los datos disponibles, deducidos de lo que se ha medido en las diversas líneas construidas.

En bastantes secciones se ha podido determinar muy bien la curva de asientos superficiales, lo que permite estimar no solo el asiento superficial máximo, sino la posición del centro de inflexión. En la Fig.5, se han representado varias de estas curvas, a manera de ejemplo, sin que se pretenda más que mostrar ejemplos diversos y no todo el panorama de datos disponible.

Parte de los datos de la posición del punto de inflexión (es decir, la distancia entre ese punto y el eje del túnel, i) se han representado en la Fig. 3, comparándolos con los datos antiguos del propio Metro de Madrid y otros valores medidos disponibles. Como se aprecia en dicha figura, la ley propuesta por SAGASETA y OTEO sigue siendo válida. También podría corregirse esa ley y utilizar una del tipo:

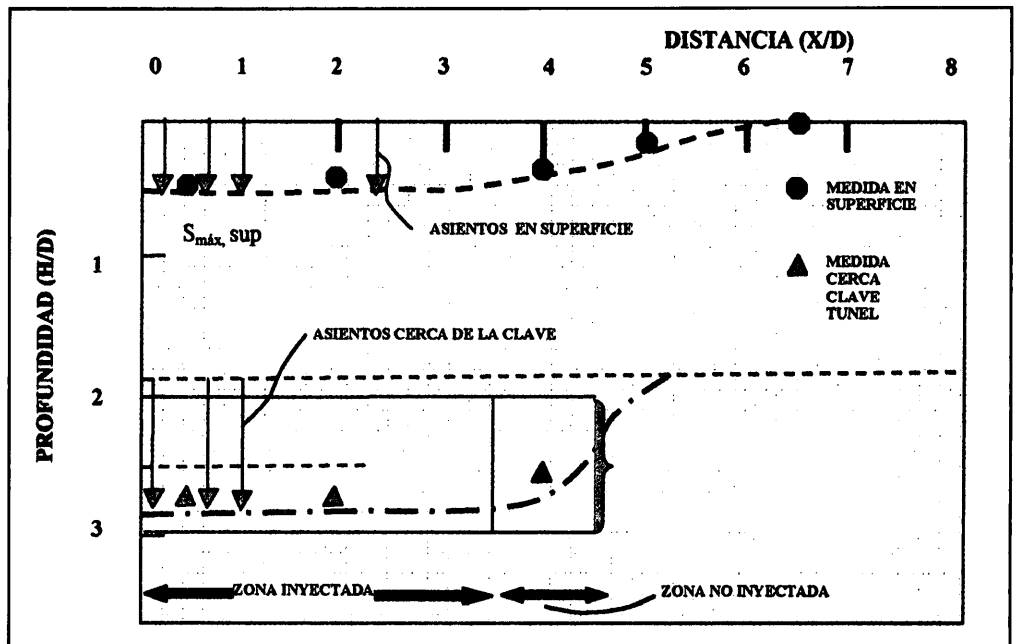


Figura 4. Asientos calculados y medidos, debidos al avance de un equipo EPB de 19,40 m. (Análisis teórico 3D con código ANSYS realizado por P. de la Fuente).

$$i = K \cdot H$$

como suelen utilizar los técnicos ingleses, a partir de la recomendación de 1982 de O'REILLY, basada en nuestras medidas y referencias previas. En ese caso, el valor de K a utilizar sería del orden de 0,50 - 0,60.

En la Fig.6 adjunta, pueden verse diversos valores de los asientos medidos en superficie, sobre el eje del túnel, tanto sobre túneles ejecutados con E.P.B como con "Método Tradicional de Madrid". En esta figura se han representado los volúmenes de asientos, V_s , es decir, el área (por m, l.) entre la superficie horizontal primitiva y la superficie deformada, es decir, el área encerrada por la curva de asientos, referida a la sección del túnel, expresado en %. Como se aprecia en dicha figura se han deducido volúmenes (ó áreas) de asientos entre valores muy pequeños (0,25% de la sección del túnel e inferiores) y valores considerables (6-8%).

Los valores mayores corresponden a excavaciones con espesores importantes de rellenos y suelos blandos por encima de la clave (e, incluso, en parte de la sección del túnel), lo que suele ir acompañado de problemas de inestabilidad sobre la clave del túnel, y en su frente (caso del Método Tradicional de Madrid), e incluso a socavones, lo cual viene a suponer volúmenes de asientos de 4% o superiores. En esos casos, la curva de Gauss como ley de asientos es algo dudosa, ya que se concentra mucho sobre el propio túnel.

Los valores menores (por debajo del 0,5%) corresponden a túneles excavados totalmente en terreno pliocénico y con recubrimiento apreciable de este terreno por encima de la cla-

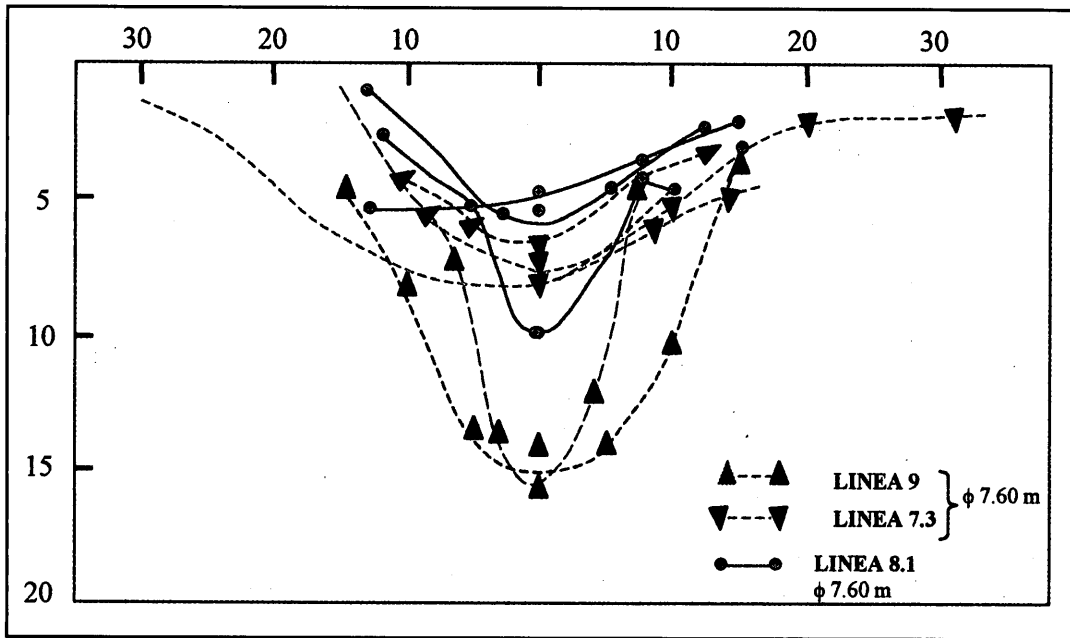


Figura 5. Algunos ejemplos de asentamientos medidos sobre túneles excavados con EPB.

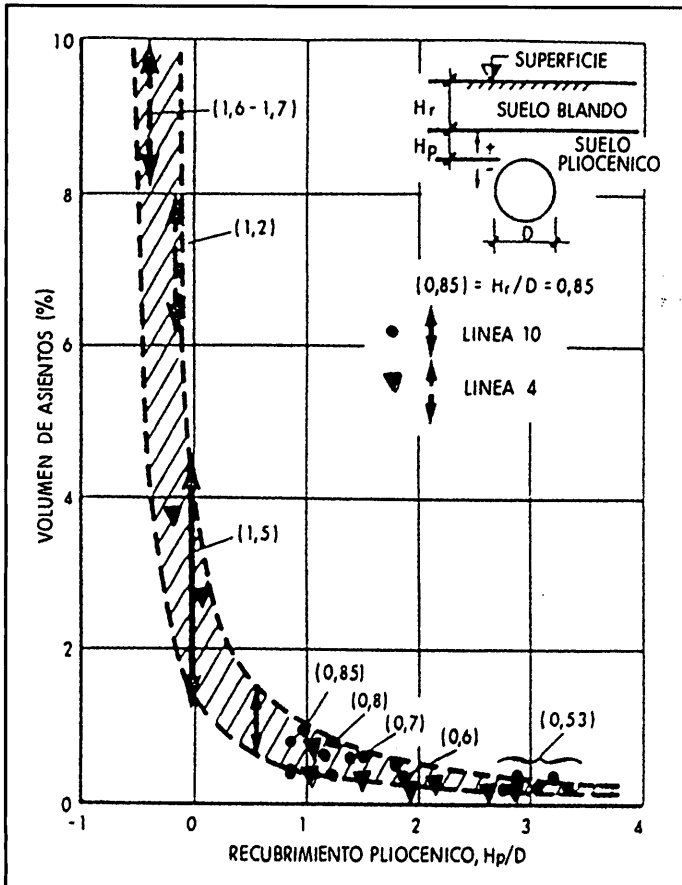


Figura 6. Diversas medidas realizadas durante la ampliación del Metro de Madrid.

ve del túnel (superior a 1-1,5 veces el diámetro, D, del túnel).

De lo medido, tanto en superficie como en profundidad (en la que los asentamientos pueden duplicarse, como se deduce de la comparación tridimensional presentada en la Fig.4), se han obtenido diversas conclusiones:

▼ Es posible considerar como representativo, en general, el modelo simplificado de terreno de la fig.7, es decir: un recubrimiento superficial flojo (reellenos antrópicos y aluviales flojos; en caso de terrazas compactas, pueden considerarse en el es-

trato más inferior, con un espesor del orden de la mitad del real) y un estrato resistente (generalmente pliocénico), inferior. El espesor relativo del relleno, respecto al diámetro del túnel, y del recubrimiento del terreno resistente por encima de la clave (H_p/D) tienen una marcada influencia en el volumen total de asentamientos.

▼ La evolución de los asentamientos es rápida (generalmente se estabilizan entre 3 y 7 días después del paso del túnel).

▼ El asentamiento de un punto, el día que pasa el túnel por debajo de él, es del orden de 0 a 20% del máximo. A veces se registran ligeros levantamientos iniciales, al excavar con el sistema E.P.B, los cuales se pueden llegar a mantener si la presión del frente es elevada.

▼ El punto de inflexión, está, habitualmente, una distancia del eje del túnel entre 7 y 13 m. según la profundidad y el diámetro de la excavación.

▼ El espesor de reellenos superficiales no influye prácticamente cuando el recubrimiento en terreno pliocénico por encima de la clave del túnel es de 2 diámetros o superior. Si el recubrimiento varía entre 0,75 y 2 D, el volumen de asentamientos varía entre el 0,15 y el 1% de la sección excavada. Para recubrimientos entre 0,75 D y 0, el volumen de asentamientos varía entre 0,6 y el 4%.

▼ En caso de que la sección de excavación afecte a reellenos antrópicos se pueden producir problemas de hundimiento superficial.

▼ El método de SAGASETA y OTEO (1974), con las correcciones descritas por OTEO y SAGASETA (1996) puede adoptarse para el terreno homogéneo, sin considerable influencia del relleno ($H_p \geq 1 - 1,5 D$).

7. INTERPRETACIÓN DE LOS ASIENTOS MEDIDOS

Para interpretar los valores medidos se han llevado a cabo diversos análisis empíricos, teóricos, etc, en la línea de los dos sistemas de análisis teóricos antes descritos (Niveles A y B de conocimiento).

Es de destacar, entre ellos, los análisis realizados con el programa FLAC-3D, en diferencias finitas, y que ha constituido el núcleo de la tesis Doctoral de uno de los autores de este trabajo (L.Medina), dirigida por otro de los mismos (M.Melis) y leída en la Universidade da Coruña. En este análisis se ha intentado reproducir el proceso de excavación o del avance de la tuneladora, suponiéndolo discontinuo; es decir, que se excavan instantáneamente cilindros de túnel de cada uno de estos bloques y se permite el reajuste del estado tensional en la malla. El modelo permite decidir si la perforación se lleva a cabo con frente abierto (sin presión de tierras) o con frente cerrado (presurizando las tierras contenidas en la cámara frontal de la TBM para evitar problemas de inestabilidad en dicho frente).

Se ha optado por la opción de grandes deformaciones (se permite que la malla se deforme). Ya se comentó anteriormente que pueden presentarse movimientos importantes en el suelo, y esta opción es la más adecuada para reproducirlos. Esto no es incongruente con imponer un modelo elástico y lineal basándose en que se esperan pequeñas deformaciones unitarias. Aunque, realmente, el objetivo fundamental del empleo de grandes deformaciones es conseguir una simulación más correcta del rozamiento entre tuneladora y suelo.

En cada desplazamiento de la tuneladora, o cada paso de excavación se efectúan las operaciones que se describen a continuación:

- ▼ a) Eliminación de los elementos correspondientes al frente del túnel (en una longitud correspondiente a un anillo).
- ▼ b) Generación de una interfaz en toda la superficie libre originada por la excavación. Al trabajar en el modo de grandes deformaciones, la malla se deforma; la interfaz creada permite que se produzca el correspondiente rozamiento entre las mallas de la tuneladora y el suelo cuándo y dónde las mismas entren en contacto.
- ▼ c) Avance de la tuneladora una distancia igual a la longitud de túnel excavada. Los módulos de los elementos que componen la tuneladora se han elegido suficientemente elevados como para que puedan desprejarse sus deformaciones frente a las deformaciones del suelo, pero sin llegar a los valores reales, que al ser muy altos crearían problemas de convergencia en el programa.
- ▼ d) Aplicación de la presión de inyección, tras el paso de la tuneladora, sobre las paredes del túnel.

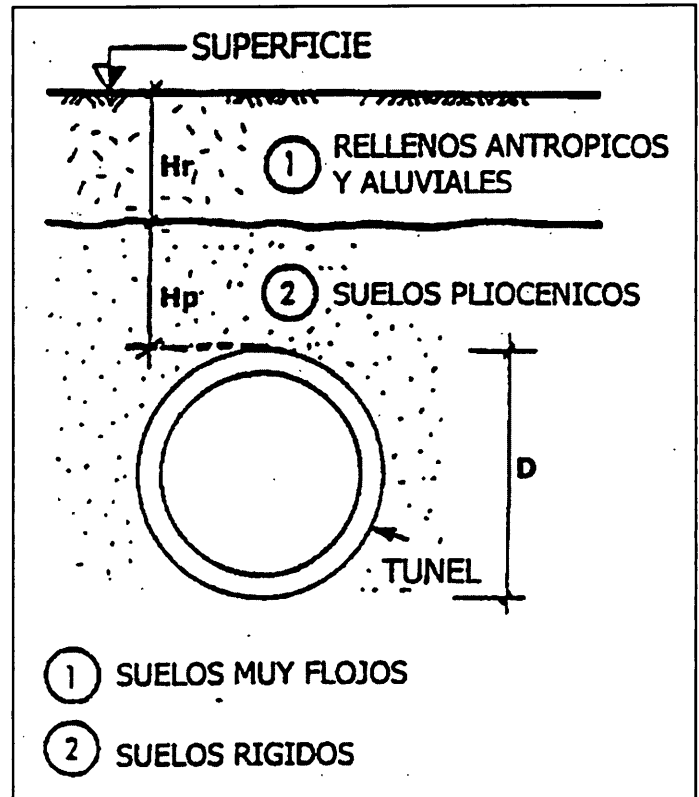


Figura 7. Perfil esquemático para análisis de la subsidencia en Madrid.

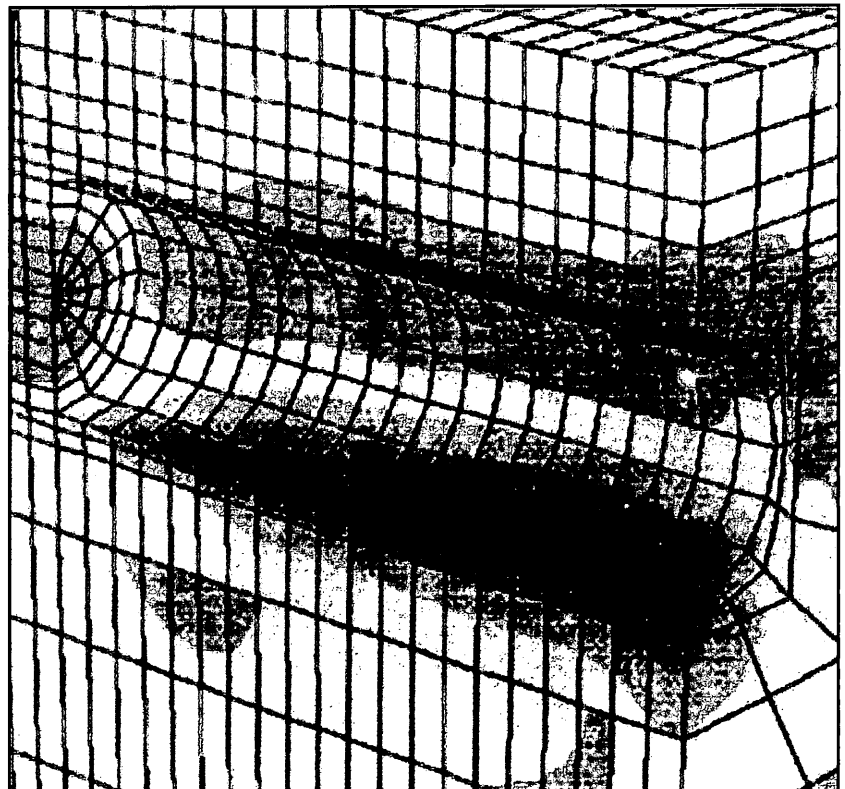


Figura 8. Malla de elementos finitos tridimensionales con zonas plastificadas.

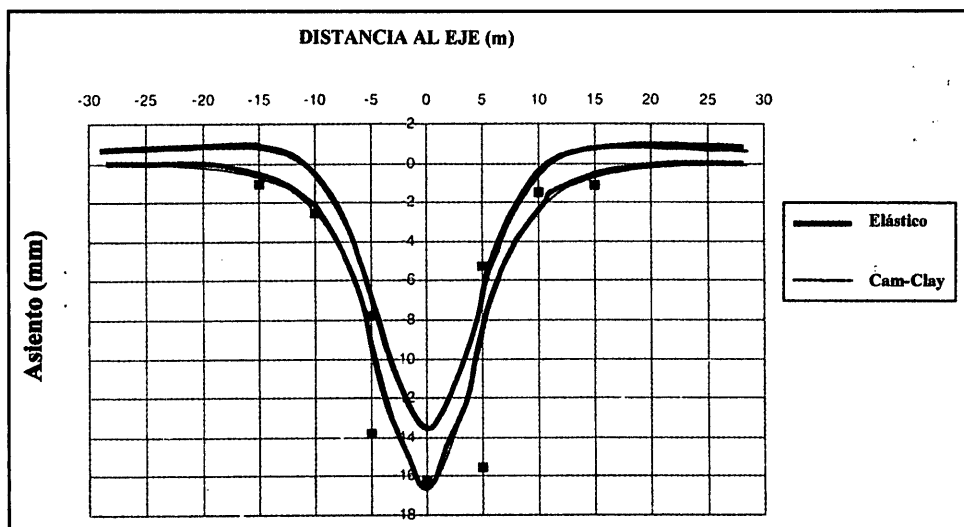


Figura 9. Asientos medidos en la Línea 4, cerca del Liceo Francés (PK 21220).

A poca distancia de la cola de la TBM la inyección está sin fraguar (no tiene rigidez). Se supone que la inyección fragua a las 6 horas de ponerse en obra. Como el avance medio de la TBM puede estimarse en 1 m/hora, la zona en la que se aplica la presión de inyección, manteniendo "inactivo" el sostenimiento se tomó igual a 6 metros.

▼ e) Fraguado de la inyección a 6 metros de la cola de la TBM. A partir de esta distancia, se aplican los parámetros elásticos correspondientes a la inyección endurecida. De esta forma, el suelo puede ya transmitir esfuerzos sobre el sostenimiento.

▼ f) Generación de los elementos que modelan los anillos. Aunque el sostenimiento está formado por anillos, y estos por dovelas, unidos todos entre sí por medio de pernos metálicos, la simulación del mismo se efectuará por medio de una lámina continua, discretizada en su espesor con tres elementos, a la que se van "soldando" nuevos anillos a medida que progresa la excavación.

▼ g) Aplicación de la presión de tierras en el frente (en el caso de que se trabaje con frente cerrado y se emplee dicha presión para mejorar las condiciones de estabilidad del frente).

▼ h) El peso del Back-up de la tuneladora se añade al peso de los anillos del sostenimiento, en el tramo de túnel correspondiente a la longitud de aquél.

Con las dimensiones empleadas en el presente trabajo, el "gap", o espacio que debe rellenarse con mortero de inyección, tiene unos espesores de 170 mm y 140 mm en las partes superior e inferior, respectivamente.

Se han repetido diversas modelizaciones con tres modelos constitutivos distintos: el elástico lineal, el elasto-plástico de Mohr-Coulomb y el Cam-Clay modificado. Los parámetros empleados con ellos son los justificados en la tesis doctoral de L. Medina (2000). En la figura 8, por ejemplo, puede verse la malla

utilizada y los elementos plastificados en el caso de hipótesis de elasto-plasticidad, con el criterio de Mohr-Coulomb como criterio de rotura. Como se aprecia, la extensión de la zona plastificada es pequeña, tal como ya hace años dedujimos con análisis bidimensionales (SAGASETA y OTEO, 1974).

En la fig.9 se presentan las medidas obtenidas en una sección instrumentada en la Línea 4 (Esperanza-Mar de Cristal). Los asientos (en terrenos pliocénicos, con el eje del túnel, de 9,40 m) a unos 9,5 de profundidad) llegaron a ser unos 16 mm. Las modelaciones teóricas pueden ajustarse bastante bien a la medida, tanto con un modelo elástico como con el modelo de la Cam-Clay, aunque la

modelación elástica, en este caso, tiende a dar unos levantamientos laterales no existentes, mostrados quizá por el hecho de usar los mismos módulos en extensión que en compresión. El modelo Cam-Clay, al utilizar diferentes módulos, puede reproducir algo mejor la relajación tensional en la zona situada por debajo del túnel. Este problema suele obviarse en análisis elásticos cortando la malla a una distancia de la solera del túnel del orden de 0,75 D o adjudicando al terreno, en esa zona, un gradiente en el módulo de deformación, de forma que sea menos deformable.

En la fig.10 pueden verse los movimientos horizontales medidos en un inclinómetro en el PK. 0+214 del tramo de la Línea

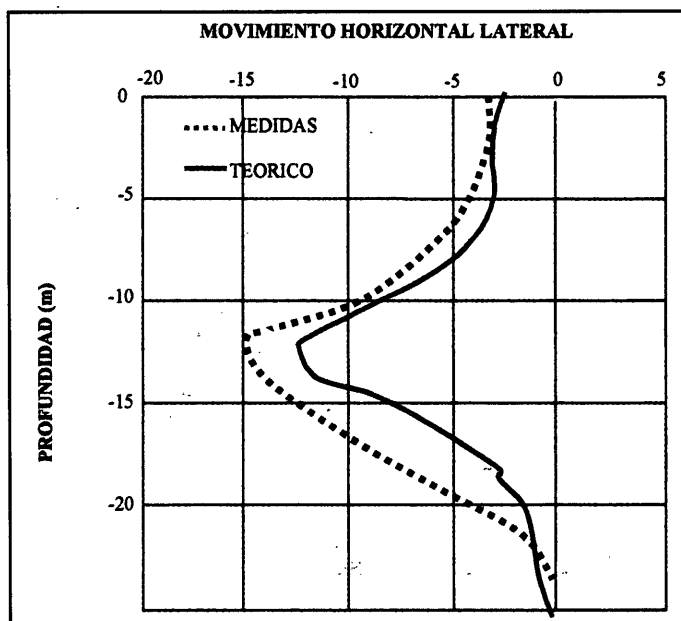


Figura 10. Mar de Cristal-Campo de las Naciones PK0+214. Medidas realizadas con un inclinómetro a 1 m. del hastial del túnel.

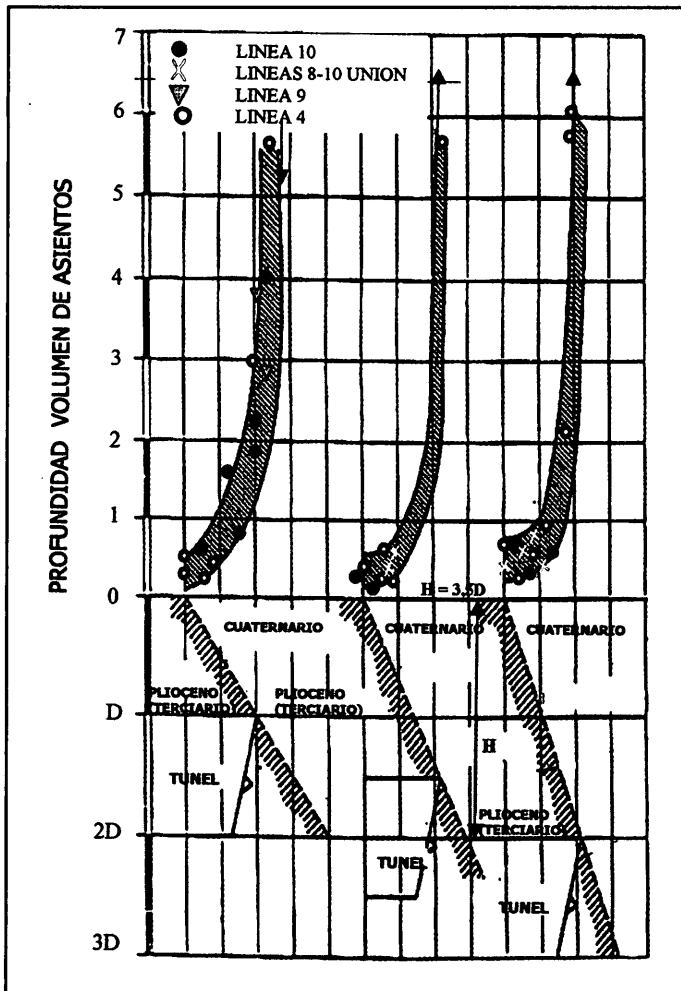


Figura 11: Modelo Madrid. (Oteo y otros, 1999).

8.1 (Mar de Cristal- Campo de las Naciones). El túnel tenía 6,40 m. de diámetro, su eje estaba a 12,5 m. de profundidad, no se empleó presión de tierras y el inclinómetro estaba a 1 m. del mástil del túnel. Puede verse que la simulación con el modelo de Cam-Clay puede reproducir bastante bien los movimientos registrados.

Muchas más simulaciones de este tipo, como ya se ha dicho, pueden verse en la Tesis Doctoral de L. Medina.

8. EL MODELO MADRID

Como ya hemos comentado, la instrumentación instalada permitió establecer el orden de magnitud real de los asientos superficiales en unos cuantos casos fijos. Las experiencias obtenidas en las Líneas 10, 1, 8 y 9, en que los rellenos superficiales tenían espesores apreciables, permitieron detectar la importancia del espesor de terreno resistente por encima de la clave del túnel y la influencia del recubrimiento superficial. Este último parámetro no se había tenido en cuenta, por simplificación, en el modelo semiempírico de Sagasta y Oteo.

Por eso se consideró como válido, a efectos simplificativos, el modelo de la Figura 7, en el que se distinguen dos niveles estratigráficos. Uno claramente flojo, con módulo de deformación entre 8 y 15 MPa y otro rígido con módulo de decompresión del orden de 50-150 MPa.

Esta idea junto con las otras conclusiones obtenidas de las medidas realizadas (Ver apartado 7), y junto con análisis de elementos finitos en 2 y 3 dimensiones, nos han llevado a desarrollar (y proponer para su uso prático) el Modelo Madrid para predicción de subsidencias, que supone los siguientes ítems:

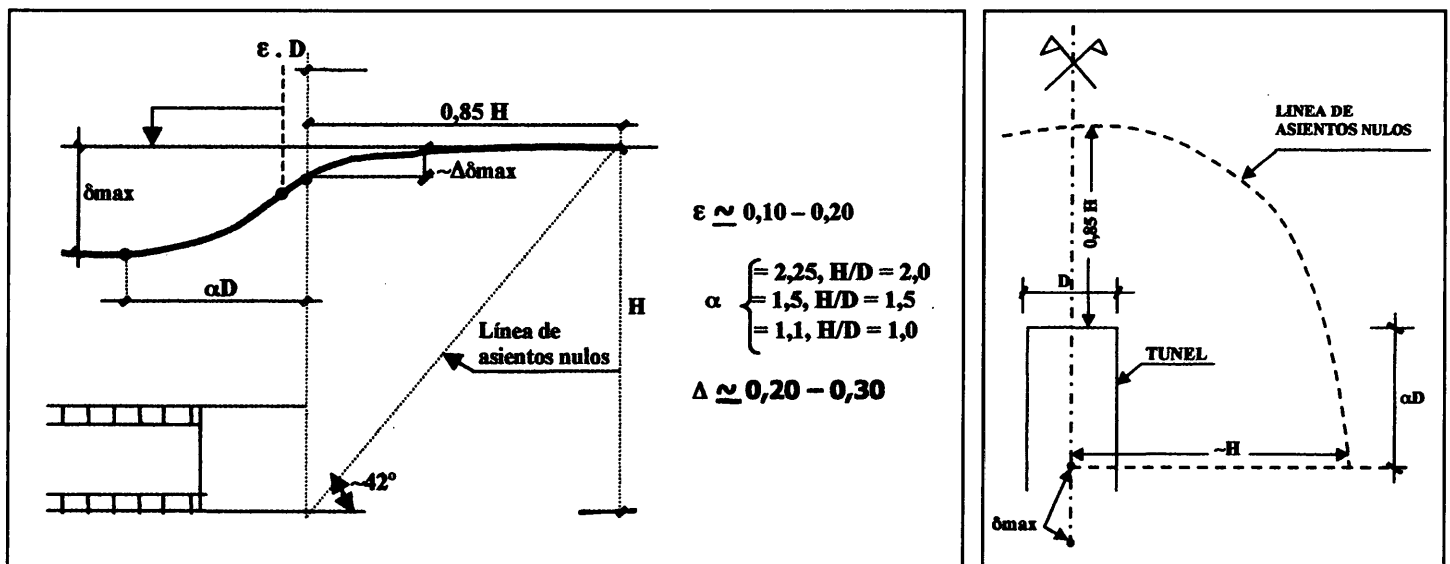


Figura 12. Ley semiempírica de asientos superficiales longitudinales sobre el eje del túnel. A la derecha, figura 13, definición semiempírica de la cubeta de Attewell (Deducida de análisis teóricos tridimensionales).

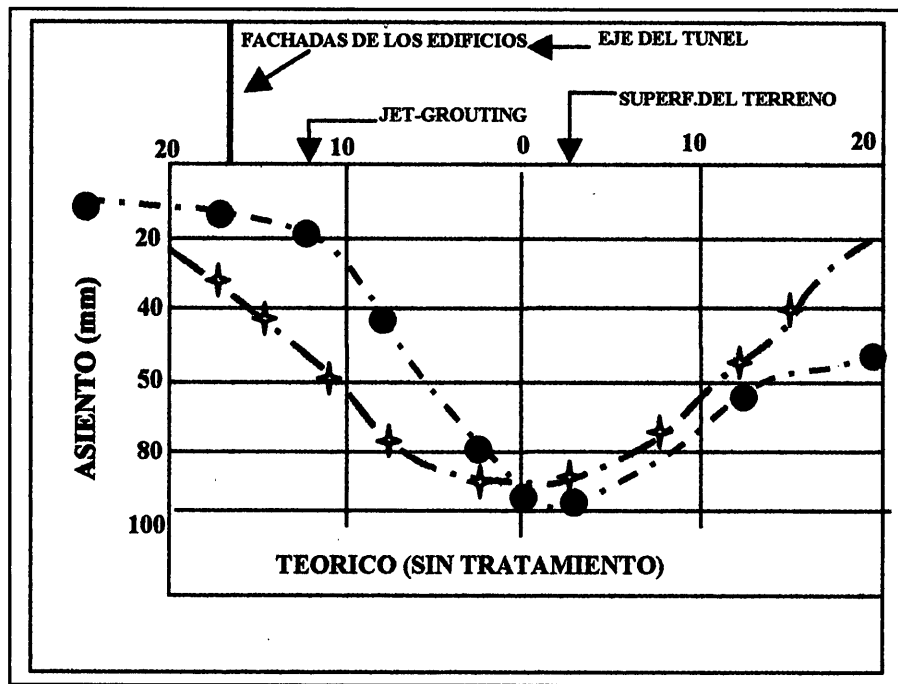


Figura 14. Asientos medidos en zona con tratamiento de Jet-Grouting. Línea 1 (Melis y otros, 1999).

▼ La ley de asientos superficiales es una campana de Gauss. El volumen de asientos puede tomarse de la fig.11, mientras que la posición de i se deduce de la fig.3.

▼ La cubeta superficial de asientos. Se puede definir con las indicaciones incluidas en las Figuras 12 y 13.

▼ En cuanto a los movimientos superficiales, u , horizontales, el mismo sistema antes indicado ha permitido relacionarlos con los asientos, a través de la expresión:

$$u_{\text{máx}} = e \cdot \delta_{\text{máx}}$$

▼ Para el coeficiente e que permite obtener $u_{\text{máx}}$, pueden tomarse: a) Suelos normalmente consolidados y suelos preconsolidados con pequeñas profundidades (H&D δ 2) $e = 0,3$. b) Suelos preconsolidados con profundidad mayor que cinco veces el diámetro: $e = 1,0$. c) Suelos preconsolidados con profundidades intermedias: $e = 0,65$.

▼ La Ley de movimientos horizontales puede verse en OTEO y SAGASETA (1996).

Para el caso de otras ciudades, que no fuera Madrid, con un esquema estratigráfico similar al de la fig. 7), bastaría afectar a los valores deducidos de la Figura 11 con un valor igual a la relación entre el módulo de deformación del lugar y el de Madrid.

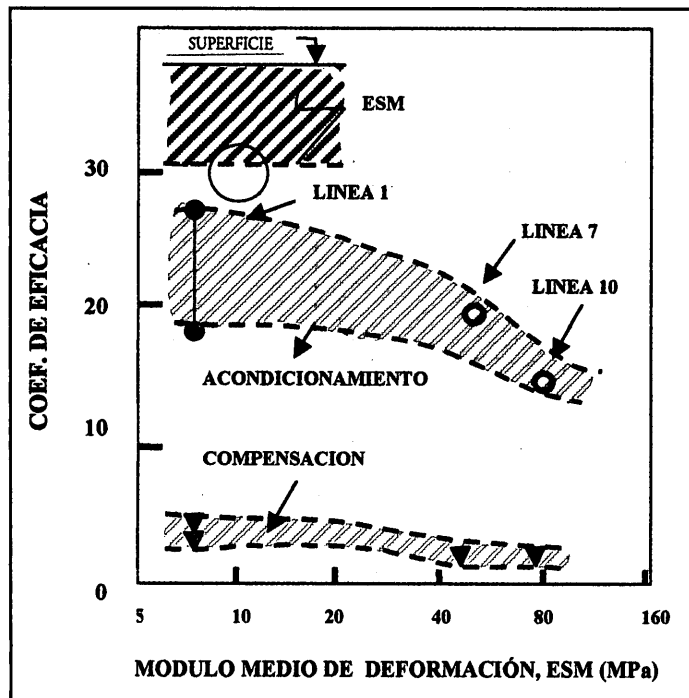


Figura 15. Coeficiente de eficacia en inyecciones de compensación en función de la deformación del terreno. (Oteo, 2000).

9.-TRATAMIENTOS PARA EVITAR DAÑOS EN EDIFICIOS O INSTALACIONES SUPERFICIALES

Aunque se sale del marco de este artículo el tema de los tratamientos efectuado para evitar daños en instalaciones próximas (cuando los asientos provocados eran superiores a los admisibles), queremos señalar que, en estos casos, se han utilizado diversos sistemas:

▼ Cuando los asientos previsibles no eran muy elevados, generalmente se optaba por la observación del comportamiento del terreno (contando con posibles pequeñas reparaciones posteriores).

▼ Cuando el edificio en cuestión estaba en muy mal estado se ha llegado a plantear la conveniencia de su expropiación o hasta de la declaración de su mina (como en el caso de un edificio abandonado en Vallecas).

▼ En el caso de solo posibles daños en el perímetro de calles, a veces se ha optado por pasar debajo aislando la zona del tráfico y reparando posteriormente (si se producían daños por la existencia de rellenos), en vez de proceder a grandes tratamientos del terreno. Sin embargo, en el caso de grandes vías de comunicación (A-10, por ejemplo) se optó por un refuerzo del terreno (rellenos) con inyecciones con manguitos.

▼ En otros casos de estructuras próximas se decidió ejecutar barreras de inyecciones por tobera y alta presión (jet-grouting), entre el túnel y el edificio, lo que se vió que daba un gran resultado como en el ejemplo de la fig.14, aunque estos tratamientos deben hacerse con buen diseño y cuidado, para no afectar a los edificios durante su ejecución.

▼ En otros casos de mayor envergadura y por estar situado el túnel bajo edificios, se utilizaron las inyecciones de compensación (Cruce de la Unión de las Líneas 8 y 10 bajo el Túnel de R.E.N.F.E en el Paseo de la Castellana, Estación de Guzmán el Bueno, Villa de Vallecas, etc). En estas situaciones es preciso un control riguroso del proceso de ejecución, volúmenes inyectados, movimientos inducidos, etc. En la fig. 15 se reproducen datos deducidos de medidas reales (Líneas 8-10, Línea 1 y Ampliación de Gálibo de la Línea 10), respecto al coeficiente de eficacia de estas inyecciones (relación entre el volumen inyectado y el volú-

men de movimientos verticales inducido), tanto en la fase inicial de acondicionamiento como en la final de compensación. (OTEO, 2000).

10. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento a D. Manuel Arnaiz, D.Jesús Trabada y D. Ildelfonso de Matías, de la Comunidad de Madrid, toda la confianza, apoyo y colaboración prestada durante el desarrollo de diversas obras. Asimismo, quieren agradecer su colaboración a las organizaciones que intervinieron en las medidas de asientos aquí expuestos: Miembros de la U.S.A.C, GEOCISA, RODIO-KRONSA, INMATEINSA, I.I.C., OFITECO, F.C.C., DRAGADOS, NECSO, FERROVIAL-AGROMAN y A.C.S. ■

REFERENCIAS

- DE LA FUENTE, P. y OTEO, C. (1984) "Propiedades tenso-deformacionales del tosco de Madrid". Cuadernos de Investigación nº11. CEDEX.
- MEDINA, L. (2000) "Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras con los suelos tosquizos de Madrid". Tesis Doctoral. Universidad da Coruña. Director: M. Melis.
- MELIS, M; ARNAIZ, M; P.FERRER; SIMIC, D. Y OTEO, C. (1999) "Ground improvement during excavation of the Madrid Underground's Line 1 Extension" Proc. World Tunnel Congress '99 Oslo, June, Vol. 2, pp 481-87.
- MELIS, M; OTEO, C.; R.ORTIZ, J.Mª (1999) "Estrategia geotécnica aplicada a la Ampliación del Metro de Madrid, 1995-99". Libro Homenaje a J.A. Jiménez Salas. CEDEX - S.E.M.S.
- OTEO, C.; ARNAIZ, M.; TRABADA J. y MELIS, M. (1999) "The Madrid Model: A semi-empirical method for subsidence estimating" Proc. World Tunnel Congress '99. Oslo, June Vol.2, pp. 163-70.

- OTEO, C. y RODRIGUEZ ORTIZ, J.Mª (1997) "Subsistencia y Auscultación en los túneles del Metro de Madrid " Revista de Obras Públicas nº3369, pp49-68.
- OTEO, C y SAGASETA, C. (1996) "Some Spanish experience on measurement and evaluation of ground displacement around urban tunnels" Proc. Int. Sym. Geotechnical on Geotech. Aspects of Underground Construction n Soft. Ground. London
- OTEO, C. (2000) "Actuaciones en el terreno en ámbito urbano" Simp. Nacional sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. Barcelona. Pp. 673-86.
- PECK, R (1969) "Deep excavation and tunneling in Soft ground" G. Report 7º Int. Symp. On S.M. and F.E. México. Sof the Art. Volume. Pp. 225-258.
- SAGASETA, C y OTEO, C. (1974) "Análisis de la Subsistencia originada por la excavación de Túneles". 1er Simp. Nac. de Túneles. Vol.1