

# ANÁLISIS DE LOS ASIENTOS INDUCIDOS POR LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES MEDIANTE EL MÉTODO CLÁSICO DE MADRID

## ANALYSIS OF SUBSIDENCE CAUSED BY THE BELGIUM METHOD OF TUNNEL EXCAVATION

LUIS MEDINA RODRÍGUEZ. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
*Profesor Titular Interino de la Universidad de A Coruña*  
CARLOS NÚÑEZ TEMES. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

**RESUMEN:** El artículo describe el modelo numérico desarrollado para la predicción de subsidencias producidas por la excavación de túneles mediante el método clásico de Madrid (también llamado Método Belga). El modelo reproduce la secuencia completa de la excavación y permite la modificación de los parámetros del suelo, de las fases de ejecución, de las características del túnel y del sostenimiento. La comparación de los resultados del modelo con los datos reales de auscultación de la reciente Ampliación del Metro de Madrid (1995-1999) muestra que se pueden predecir los asientos medidos mediante el método que se propone, por lo que se convierte en una herramienta útil para futuros proyectos.

**PALABRAS CLAVE:** TÚNELES, MODELOS NUMÉRICOS, SUBSIDENCIA, AUSCULTACIÓN

**ABSTRACT:** A FLAC 3-D model has been developed to predict ground subsidence resulting from the traditional Belgium method of excavation. The model reproduces the full excavation process and allows the simple modification of parameters regarding soil type, work stages, tunnel and linings. A comparison between numerical results and monitoring data from the recent Madrid Metro extension (1995-1999) shows that the movements observed could have been predicted by using the proposed excavation model. The model may, subsequently, be considered as a powerful tool for similar projects in the future.

**KEYWORDS:** TUNNELS, NUMERICAL MODELS, SUBSIDENCE, MONITORING FIELD

### 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de ampliación del metro de Madrid 1995-1999 consistió en la excavación de 38 km de túnel y 34 estaciones en 40 meses. Los métodos de excavación empleados en la construcción del túnel de línea han sido la utilización de tuneladoras o escudos de presión de tierras y el Método Clásico de Madrid (también llamado Método Belga).

Los tramos realizados en la ampliación mediante éste último método son:

- Línea 1: *Miguel Hernández – Congosto*, 2830 metros.
- Línea 7: *Avenida de América – Guzmán el Bueno*, 2470 metros.
- Línea 10: *Príncipe Pío – Plaza de España*, 1100 metros y *Alonso Martínez – Nuevos Ministerios*, 1620 metros.

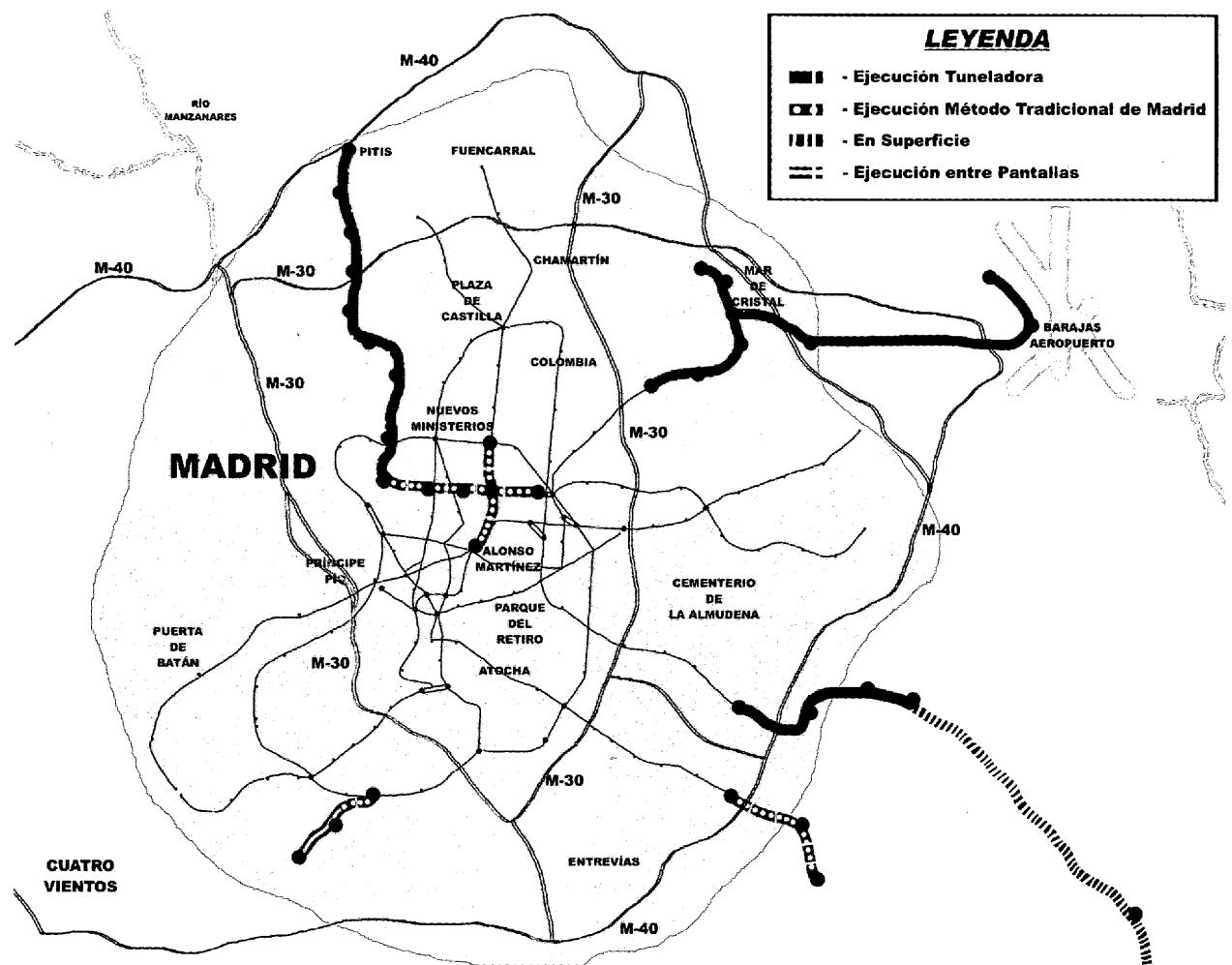
- Línea 11: *Plaza Elíptica – Pan Bendito*, 300 metros.
- Otros tramos menores de conexión entre líneas.

Todas estas líneas están resaltadas en el mapa de la red de Metro de Madrid que muestra la figura 1.

El nuevo proyecto de ampliación de la red de Metro de Madrid (1999-2003) parte de la misma premisa de seguridad en las obras, tanto para los operarios como para las edificaciones cercanas, por lo que confía la ejecución de los túneles de línea a los escudos de presión de tierras.

El Método Clásico de Madrid se convierte en una herramienta imprescindible para aquellos puntos en los que la implantación de toda la infraestructura necesaria para las tuneladoras sea imposible por motivos de espacio, tan frecuentes en una gran ciudad como Madrid. Además, surgen también problemas de gálibo en el paso de estas máquinas por estaciones ya construidas.

**Figura 1:**  
Ampliación del  
Metro de  
Madrid  
(1995-1999).



En esta nueva ampliación, se están construyendo mediante el Método Clásico de Madrid 1925 m de la línea 8, entre las estaciones de Nuevos Ministerios y Colombia, como parte de la línea que permitirá la conexión del centro administrativo y de negocios de la capital con el aeropuerto de Barajas en menos de 15 minutos de trayecto, con la posibilidad de facturar el equipaje en el intercambiador de Nuevos Ministerios.

También se ejecutan mediante este método 1739 metros de túnel en el término municipal de Fuenlabrada, dentro del ambicioso cinturón que unirá las cinco ciudades del sudeste de Madrid con la actual línea 10, Metrosur.

El método clásico de Madrid consiste en la apertura de una pequeña galería en la clave del túnel, que se va ensanchando progresivamente hasta que se completa la sección del túnel. Este método ha sido elegido para la Ampliación del Metro de Madrid en vez de los métodos de frente abierto (NATM, ADECO, etc.) de cara a evitar inestabilidades y colapsos en el frente del túnel, con los consiguientes riesgos para los operarios y de carácter estructural para los edificios situados en la superficie. Además, desde el punto de vista del

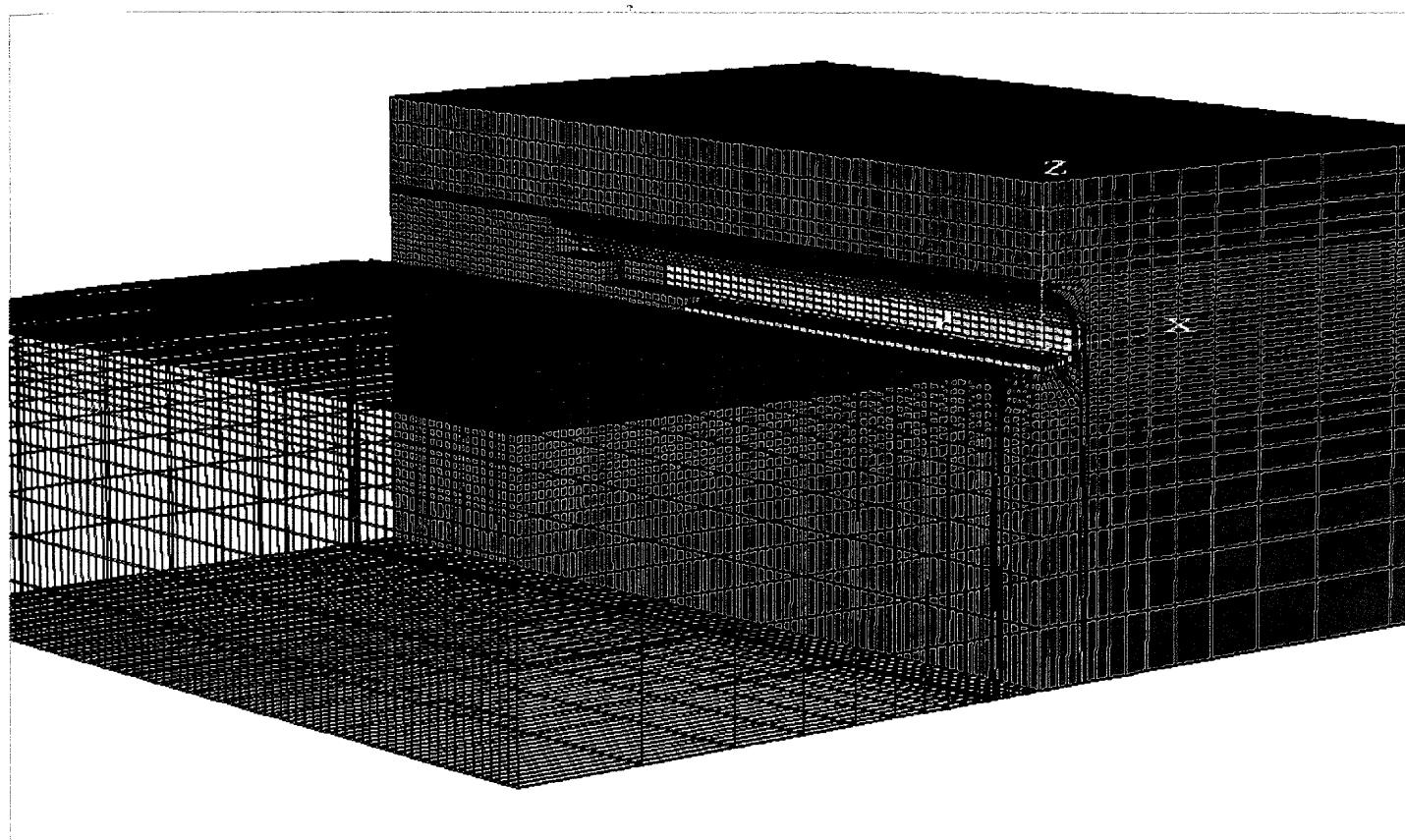
trabajador, los trabajos de excavación son más seguros cuanto menor sea el frente abierto sin entibación, ya que los posibles problemas pueden ser resueltos mediante la entibación, taponando con sacos, etc.).

El objeto del artículo es describir la simulación numérica en tres dimensiones que se ha llevado a cabo, que recoge todas las características del proceso de excavación mediante este método.

Los datos reales de secciones instrumentadas de la pasada Ampliación han servido para verificar y validar el modelo, convirtiéndolo en una herramienta útil para futuros proyectos en los que sea necesario predecir subsidencias debidas a la excavación de túneles mediante este método, de cara a encontrar zonas más sensibles a lo largo del trazado y a decidir eventuales medidas correctoras antes y durante la excavación.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Como se ha comentado en el apartado anterior el fundamento del Método Clásico de Madrid es la apertura de una



**Figura 2:** Vista general de la malla y sistema de coordenadas adoptado x, y, z.

pequeña galería en la clave del túnel, galería que se ensancha hasta permitir hormigonar la bóveda y una vez que ésta adquiera rigidez se completa la sección con la ejecución de los paramentos verticales y el posterior cerrado de la sección mediante el hormigonado de la contrabóveda.

La modelización numérica del proceso de excavación de túneles mediante este método se ha llevado a cabo con el programa comercial FLAC<sup>3D</sup>.

FLAC<sup>3D</sup> (*Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*) es un programa tridimensional, que emplea un esquema explícito de diferencias finitas, y que permite simular el comportamiento elasto-plástico de suelos, rocas u otros materiales estructurales.

Ofrece un amplio abanico de posibilidades para resolver complejos problemas ingenieriles, y en especial geotécnicos. El programa incorpora 10 modelos de comportamiento para los materiales y permite establecer superficies de separación entre distintas partes de la malla (*interfases*), para representar la presencia de grietas, fallas, contacto entre distintos materiales, etc. Permite, además, la modelización de flujos de agua en suelos saturados y de problemas acoplados flujo-deformación (modelo saturado).

Elementos estructurales, tales como sostenimientos de túneles, vigas, pilotes, anclajes, cables, pantallas o geotextiles, que interaccionen entre ellos o con el suelo que les ro-

dea también pueden modelarse y ser incorporados al modelo.

Cuenta con un lenguaje propio de programación, que permite la adaptación del programa a las necesidades específicas del usuario.

## 2.1. Dominio de suelo. Dimensiones de la malla.

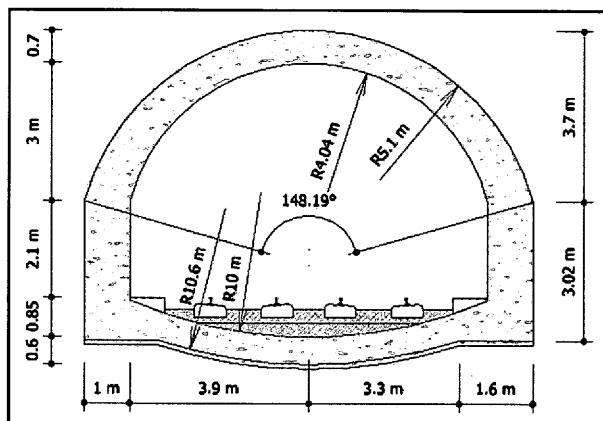
La figura 2 muestra una vista general de la malla y el sistema de coordenadas adoptado. El origen se sitúa en el centro del túnel al comienzo de la malla. El eje Z es vertical, el eje Y va en la dirección del túnel y el eje X es ortogonal a ellos.

Las dimensiones de la malla se han elegido de modo que las condiciones de contorno no modifiquen los resultados en el área de influencia de la excavación.

La base de la malla se sitúa a una distancia de 4 veces el ancho de la sección desde el centro del túnel.

El ancho de la malla es de 8 veces la profundidad del túnel en esa sección, y la longitud se elige en función del número de pasos de excavación que se deseen. Debe tenerse cuidado con la distancia desde el frente de excavación hasta que la sección está completamente finalizada, y la distancia entre el frente de la excavación y la sección que se analiza, pues los movimientos deben estar estabilizados.

**Figura 3:**  
Sección tipo  
del túnel de  
línea  
excavado por  
el Método  
Clásico de  
Madrid.



Para este trabajo, la longitud de la malla y de la excavación es de 100 y 75 m, respectivamente. Esta dimensión representa unos 40 y 30 anillos, según las dimensiones habituales utilizadas en los trabajos del Metro de Madrid.

Todas estas variables son fácilmente modificables en el modelo por el usuario, lo que permite su sencilla adaptación a obras de otras características y la realización de un análisis de sensibilidad sobre los parámetros que se desee (tiene especial interés, fijar un criterio para la longitud del 'paso' en función de los movimientos admisibles y las características geotécnicas del macizo)

## 2.2. Geometría de la sección. Generación de la malla.

La figura 3 muestra la sección que se emplea habitualmente en los túneles de línea excavados mediante el Método Clásico de Madrid.

El contorno exterior consiste en dos arcos de circunferencia, en la bóveda y en la solera, y dos líneas verticales

en los hastiales. Con poco trabajo, se puede adaptar el modelo a otras secciones de similares características.

En la figura 4, se representan las dimensiones de las áreas excavadas en cada una de las fases que se explican más adelante, hasta completar un área de sección completa excavada de 58,68 m<sup>2</sup>.

El radio de la bóveda es de 5,1 metros y el de la solera de 10,6 metros, mientras que el ancho total de la sección es de 9,8 metros. El resto de las dimensiones necesarias para definir completamente la sección se muestran en la figura 3.

De acuerdo con las fases de la excavación del túnel, la sección se ha modelizado según cuatro bloques:

- Avance
- Destroza
- Hastiales
- Solera o contrabóveda

## 2.3. Modelo constitutivo del suelo

Se ha elegido el modelo Mohr-Coulomb como constitutivo del suelo, debido que todos los parámetros geotécnicos ( $E$ ,  $\nu$ ,  $c$  y  $\varphi$ ) que es preciso definir para cada estrato son perfectamente conocidos para los suelos blandos de Madrid. Están recogidos en la Tabla 1.

## 2.4. Estado de tensiones iniciales

Las tensiones horizontales de las condiciones iniciales del suelo se han obtenido mediante la expresión de Alpan (Alpan, 1967):

$$K_o = K_{o_n} \cdot OCR^{ff} \quad (1)$$

**TABLA 1: PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LOS SUELOS DE MADRID.**

	Módulo de deformación (Subsid.) $E$ (MPa)	Coefficiente de Poisson $\nu$	Peso específico	Cohesión $c$ (kPa)	Ángulo de rozamiento interno $\varphi$ (°)
Rellenos antrópicos	8-10	0.35	1.8	0	28
Rellenos aluviales	10-15	0.32	2.0	0	32
Arena de migra	55-75	0.3	2.0	5-10	35
Arena tosquizo	80-100	0.3	2.05	10-15	33
Tosco arenoso	130	0.3	2.08	20-25	32.5
Tosco	200	0.3	2.1	30-40	30
Peñuela	200	0.28	2.0	50-60	28
Peñ. Reblandecida	10	0.35	2.0	0-10	28
Yesos	400	0.26	2.3	70-100	28

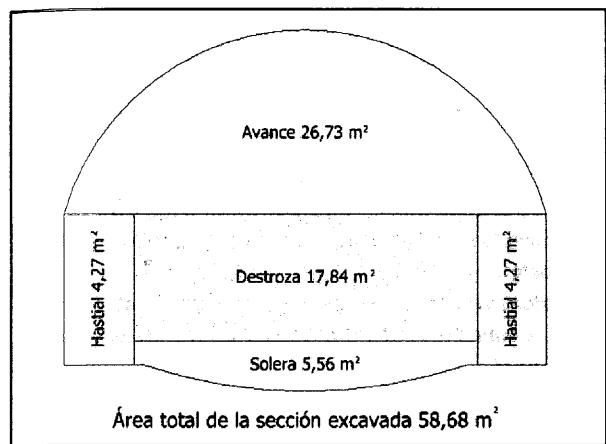


Figura 4: Sección de excavación.

donde  $K_0$  es el coeficiente de empuje al reposo,  $K_{0nc}$  es el coeficiente de empuje al reposo en condiciones normalmente consolidadas,  $OCR$  es el grado de sobreconsolidación y  $ff$  es un parámetro de depende del suelo.

Según Medina (2000)  $K_{0nc} \approx 0.41$ ,  $ff \approx 0.47$ . Y la variación de  $K_0$  con la profundidad ( $z$ ) en función de la profundidad del túnel ( $z_0$ ) y de la máxima cota que haya alcanzado el suelo en la historia geológica ( $z_{max}$ ) se rige por las siguientes ecuaciones (2-3).

$$K_0 = K_{0nc} \cdot \left( \frac{z_{max} - z_0 + z}{z} \right)^{ff}; \quad \text{si } z \geq 14m \quad (2)$$

$$K_0 = K_{0nc} + \left( \frac{K_0(14m) - 0.41}{14} \right)^{ff} \cdot z; \quad \text{si } z < 14m \quad (3)$$

## 2.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se han fijado en desplazamientos del suelo (el programa permite también establecer la ley de tensiones en los contornos de la malla):

- $y = 0$ , movimiento en  $y$  impeditido
- $y$  = longitud de la malla, mov.  $y$  impeditido
- $z$  = base de la malla mov.  $x, y, z$  impeditidos
- $x = \pm$  ancho de la malla, mov.  $x$  impeditido

## 2.6. Proceso de excavación.

En la Figura 5 se representan todos los pasos del método clásico de Madrid que básicamente se pueden resumir en:

- Excavación de la mina de avance y de la bóveda

- Hormigonado del sostenimiento definitivo de la bóveda en anillos de longitud variable en función de las características geotécnicas
- Con un retraso desde el frente de 3 anillos se efectúa el vaciado de la zona central, llamada 'destroza'
- A continuación se ejecutan los hastiales en ambos laterales, pero con la precaución de que nunca se deje la bóveda sin apoyo
- Por último, se excava hasta la cota de solera y se ejecuta la contrabóveda que completa la sección

El programa de trabajos consiste en ejecutar un anillo completo (excavación y hormigonado) y dos hastiales por día de trabajo de lunes a viernes, destinando el sábado a ejecutar la solera correspondiente al avance semanal y a tareas de limpieza del túnel.

En cada uno de los siguientes apartados se explican con detenimiento las tareas de cada fase y cómo se ha modelizado cada elemento.

### 2.6.1. Galería de avance y sección de ensanche

La excavación comienza en la sección de mina, de unas dimensiones aproximadas de 1.8 metros de alto, 1.5 metros de ancho y la longitud del anillo de fondo.

Por detrás de ésta, se excava el resto de la bóveda, ampliando la mina existente desde el centro hacia los laterales. La entibación se realiza a base de tablas que se apoyan en unos perfiles metálicos longitudinales en forma de omega, llamados 'longarinas', que en un extremo están embebidos en el último anillo de sostenimiento hormigonado y en el frente se apoyan en 'pies derechos', rollizos de madera de álamo negro (madera muy deformable) que se apoyan directamente sobre el suelo.

### 2.6.2. Generación del sostenimiento

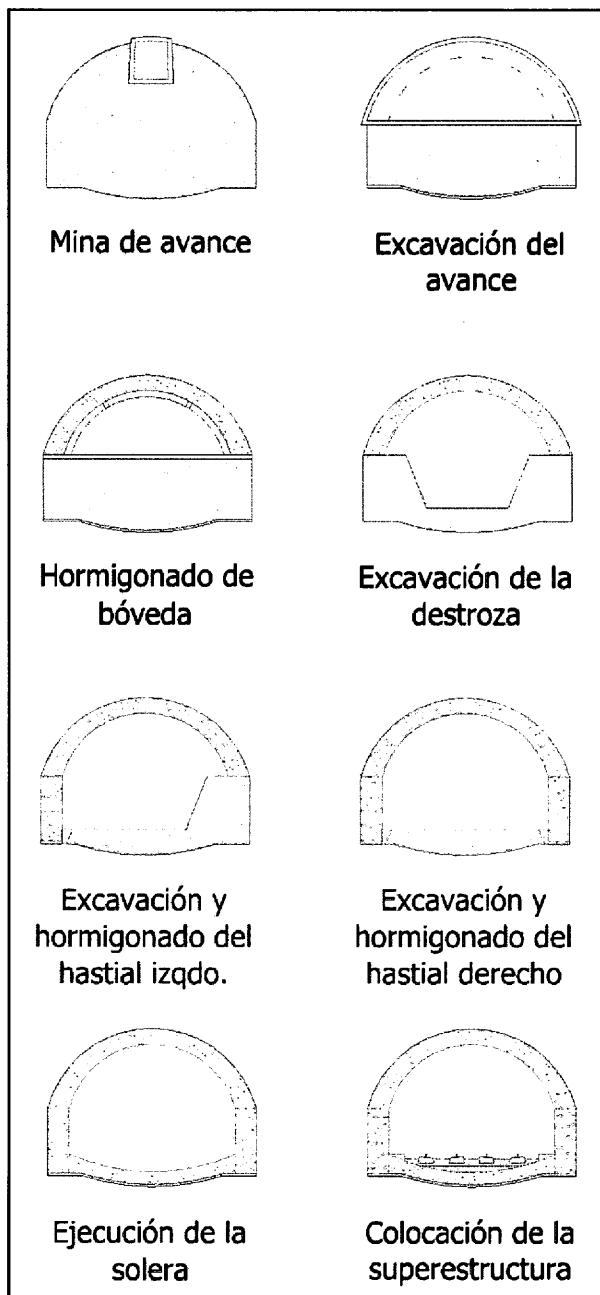
El sostenimiento definitivo es una bóveda de hormigón de sección variable (espesor de 0.7 m en la clave y 1 metro en la unión con los hastiales). Se hormigona en cuanto está excavada la sección de avance, llenando el espacio comprendido entre el encofrado (tres piezas metálicas apoyadas en puntas) y la entibación del suelo, dejando embebidas las tablas y las longarinas. Lo habitual es que existan tres juegos de encofrados por cada frente de excavación, por lo que se desencofra tres días después del hormigonado.

Como se comenta más adelante, las propiedades del sostenimiento varían con la edad del hormigón.

### 2.6.3. Excavación de la destroza

La siguiente fase constructiva es la de la excavación de la parte central del túnel, dejando unas bermas en los latera-

**Figura 5:**  
Fases de la  
excavación  
mediante el  
Método  
Clásico de  
Madrid.



les que permitan el apoyo de la bóveda en el terreno hasta la ejecución de los hastiales. La excavación de esta zona se realiza con máquina excavadora retirando también los materiales que proceden del avance. Se suele dejar una rampa en alguno de los laterales para permitir el acceso de los operarios al frente de excavación.

#### 2.6.4 . Ejecución de hastiales

Finalizada la destroza se procede a excavar las bermas que se han dejado y a hormigonar los muros laterales de la

sección. Los hastiales se realizan en módulos de la misma longitud que los anillos, con dos precauciones:

- La junta entre anillos consecutivos debe coincidir aproximadamente en el centro del batache, para evitar que durante la excavación un anillo de la bóveda quede completamente descalzado, manteniendo medio anillo apoyado en el terreno o en el hastial ejecutado anteriormente.
- Por razones similares no se excavan nunca dos bataches enfrentados, por lo que los hastiales de un lado van siempre retrasados un anillo respecto del otro.

#### 2.6.5. Ejecución de la solera

Como se comentó al citar el programa de trabajos el cierre de la sección se realiza un día por semana, ejecutando toda la longitud que se haya avanzado.

La solera se excava con máquina, hormigonando contra el terreno y con la ayuda de plantillas para conseguir la forma de la contrabóveda descrita en la figura 3.

#### 2.7. Propiedades mecánicas del hormigón.

Se ha considerado conveniente modelizar la evolución de la resistencia de los elementos que componen la sección con la edad del hormigón.

Se han tenido en cuenta las prescripciones de la instrucción EHE que propone la expresión 4 para el cálculo de la rigidez

$$E_{0,f} = 10,000 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,f}} \quad (4)$$

Donde  $E_{0,f}$  es la rigidez a 28 días y  $f_{cm}$  es la resistencia media a 28 días. Para la evolución de E con el tiempo la instrucción propone la aplicación de un factor de ajuste,  $\beta$ , de cuya representación se obtiene la gráfica de la figura 6 en función del tipo de cemento empleado.

#### 2.8. Interfases. Localización y propiedades.

Las interfaces representan superficies en las que puede ocurrir una separación o deslizamiento relativo. Por ejemplo, juntas, fallas o planos de estratificación en un medio geológico, interacción entre terreno y estructura o el contacto entre dos materiales distintos. Pero también permiten la unión de submallas independientes.

En el modelo que se describe se han generado en los siguientes lugares:

- 1. Frente del túnel, en el área de contacto con el frente del sostenimiento recién hormigonado.

- 2. Apoyo del sostenimiento sobre el terreno.
- 3. Contacto de los hastiales con el terreno
- 4. Contacto del frente de la solera con el terreno

La interfaz debe ser generada en una superficie en la que inicialmente no estén en contacto los elementos. Por tanto, se genera sobre los elementos del suelo una vez realizada la excavación; al mismo tiempo, se generan los elementos del sostenimiento correspondiente en el exterior del modelo y se desplazan hasta su ubicación definitiva. Una vez en este punto, se solidariza el elemento recién creado con el resto de los elementos que conforman el sostenimiento del túnel, para que trabajen de modo único y conjunto.

Las propiedades que se han atribuido a estas superficies de contacto entresuelo y hormigón son las siguientes:

- $k_n$  y  $k_s$ , rigidez normal y de corte. Se adoptan valores elevados para ellas ( $10^9$  kN/m) según las indicaciones del manual de FLAC<sup>3D</sup> (Itasca C.G. 1997).
- Cohesión ( $c$ ) y ángulo de rozamiento ( $\delta$ ). Según Bowles (1988) son razonables valores de  $\delta$  entre  $0.6$  y  $0.8\varphi$ , y  $c$  se toma desde  $0.5$  a  $0.7c_u$ , con un valor máximo no superior a  $50$  kPa. Para todas las simulaciones que se presentan en el apartado siguiente se han adoptado valores de  $\delta = 22^\circ$  y  $c = 50$  kPa.

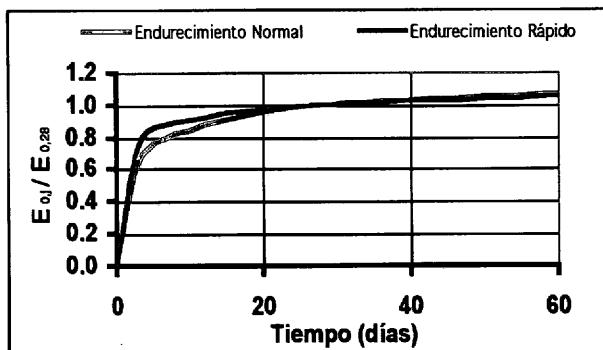


Figura 6:  
Evolución del  
módulo de  
elasticidad del  
sostenimiento  
en función de  
la edad del  
hormigón (EHE  
1999).

### 3. RESULTADOS

Para verificar y validar el modelo numérico de excavación que se ha desarrollado se han comparado sus resultados con datos reales procedentes de las secciones instrumentadas en el plan de Ampliación del Metro de Madrid. De todas las líneas que se han construido mediante el método Clásico de Madrid las secciones a analizar se han elegido según los siguientes criterios:

- Deben tener el número de instrumentos necesarios para definir completamente la forma y magnitud de la cubeta de asientos en superficie.

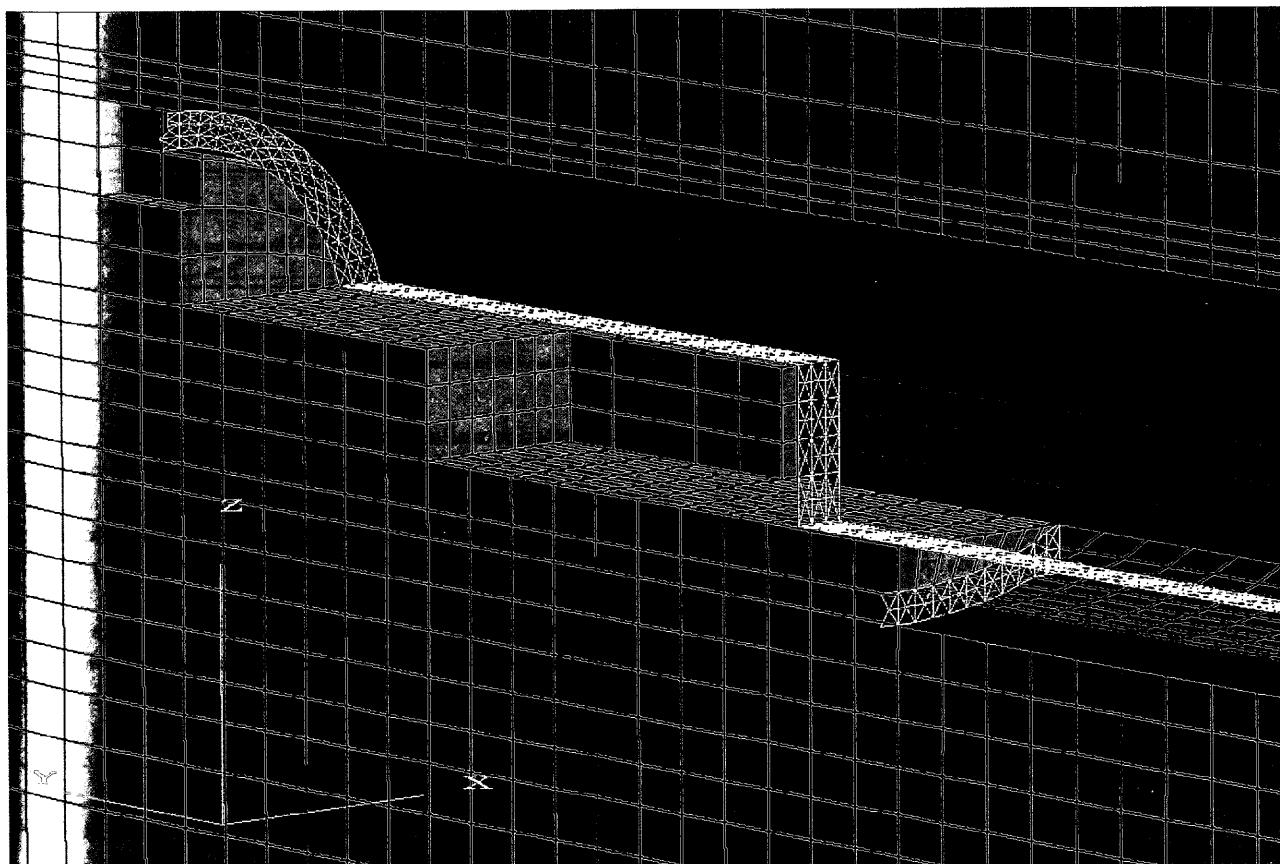
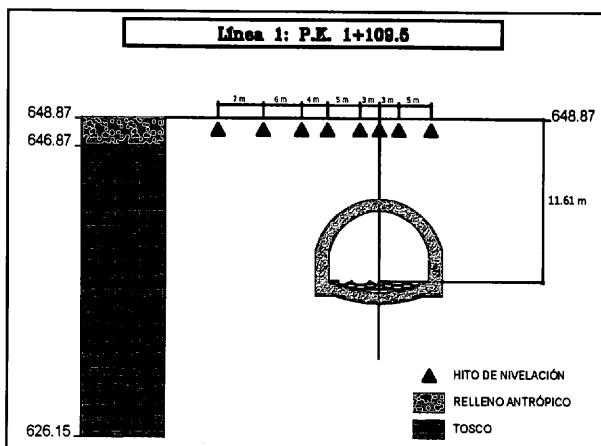
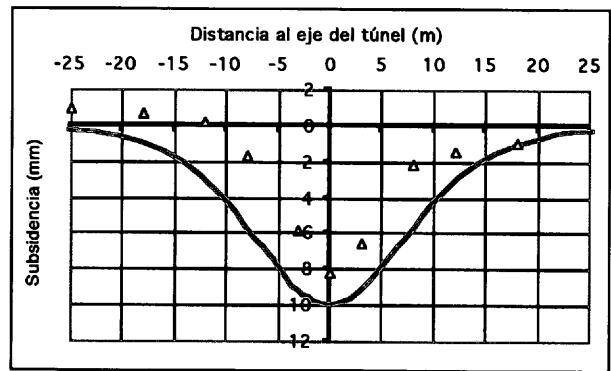
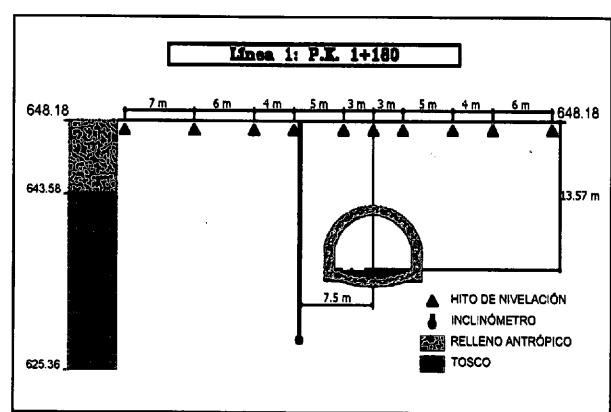
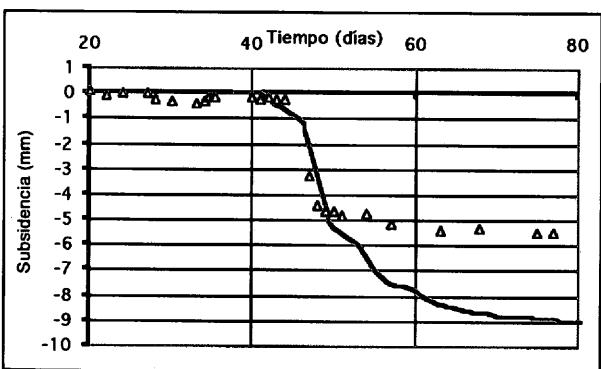
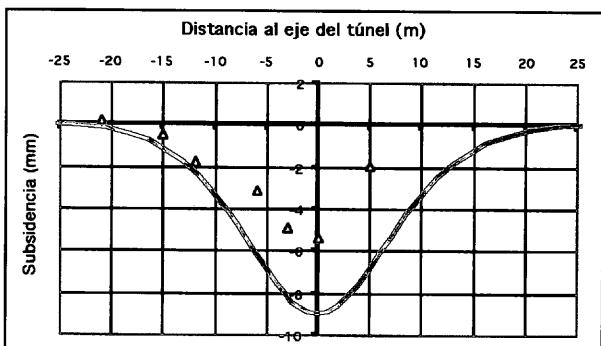


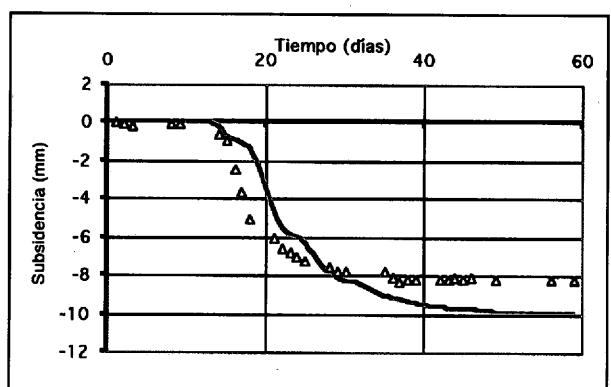
Figura 7:  
Detalle de la  
modelización  
del proceso de  
excavación.  
Localización de  
las interfaces.



A la izquierda.  
**Figura 8:** Perfil geotécnico. Línea 1, P.K. 1+109.  
**Figura 9:** Movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+109.  
**Figura 10:** Evolución de movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+109.



A la derecha.  
**Figura 11:** Perfil geotécnico. Línea 1, P.K. 1+180.  
**Figura 12:** Movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+180.  
**Figura 13:** Evolución de movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+180.



- Se rechazan las secciones con movimientos extremadamente pequeños, ya que éstos pueden estar muy influenciados por causas accidentales e implican errores relativos importantes.

- Del mismo modo, aquellas secciones en las que han sido necesarios tratamientos del terreno para proteger las edificaciones o servicios urbanos cercanos deben ser rechazadas por afectar a los movimientos del suelo. Actuaciones como barreras laterales de Jet-Grouting, inyecciones de compensación o pantallas de micropilotes requieren modelos específicos para simular sus movimientos.

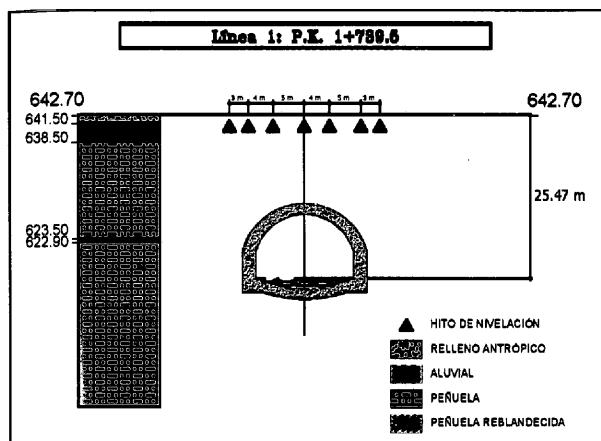
Los movimientos del suelo que se representan en las figuras de cada punto de estudio corresponden a los que

proporciona el modelo en una sección  $y = 7.5$  m, para evitar la influencia de la condición de contorno adoptada para el plano  $y = 0$ . Además, la longitud de túnel que se ha simulado permite garantizar que los movimientos se han estabilizado por completo en esa sección de estudio.

Los datos reales de auscultación y los resultados del modelo numérico se han representado por triángulos negros y líneas grises, respectivamente.

### 3.1. Línea 1, P.K. 1+109

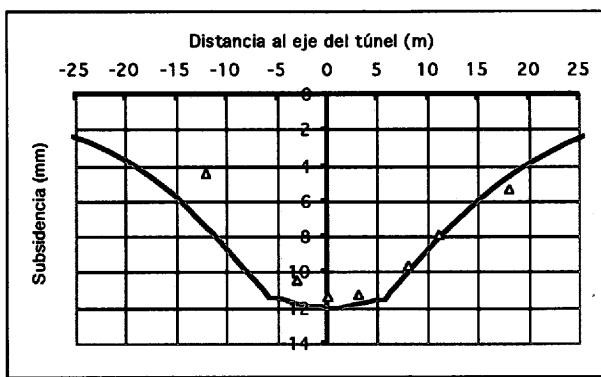
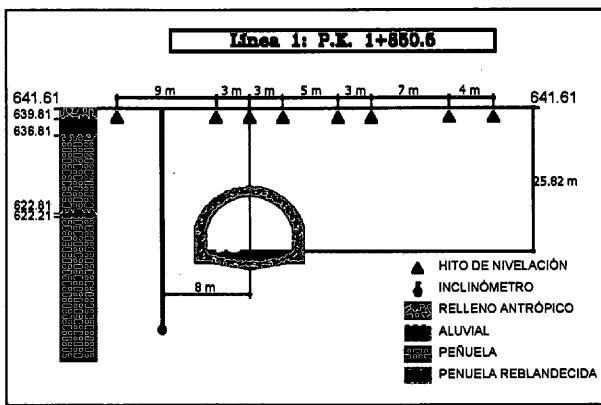
El perfil geotécnico correspondiente a esta sección está representado en la figura 8.



A la Izquierda.  
Figura 14: Perfil geotécnico. Línea 1, P.K. 1+789.5.

Figura 15:  
Movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+739.

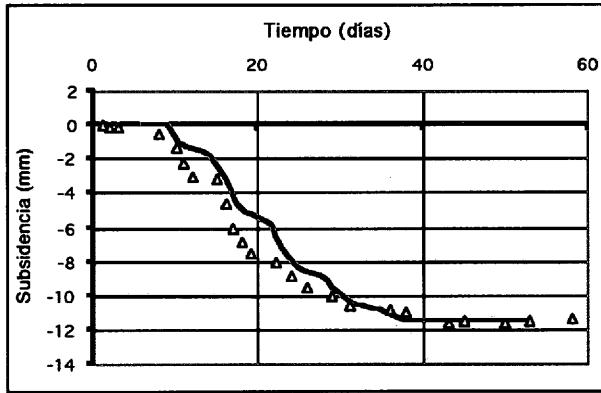
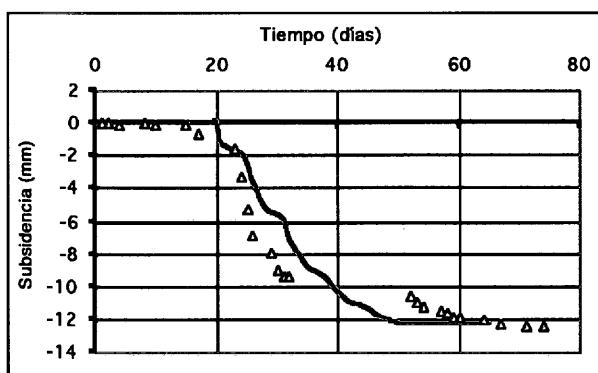
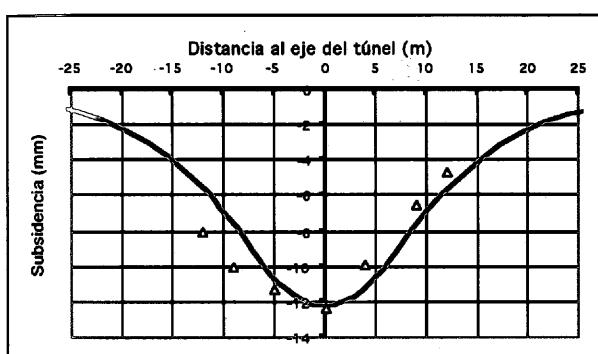
Figura 16:  
Evolución de movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+739.



A la derecha.  
Figura 17: Perfil geotécnico. Línea 1, P.K. 1+850.6.

Figura 18:  
Movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+850.6.

Figura 19:  
Evolución de movimientos en superficie. Datos reales y resultados del modelo numérico. Línea 1, P.K. 1+850.6.



Los asientos estimados y los datos reales de auscultación en superficie se comparan en la figura 9. Los resultados numéricos son mayores que los movimientos reales, 9 mm y 5 mm respectivamente sobre el eje del túnel.

La figura 10 representa la evolución de los asientos en la superficie en función de la distancia al frente de excavación. Se observa una importante discrepancia entre el máximo movimiento estimado y medido, aunque la forma de la curva se ajusta correctamente.

### 3.2. Línea 1, P.K. 1+180

La profundidad del eje del túnel en esta sección es de 13,57 metros y la instrumentación con la que cuenta es

de 10 hitos de nivelación y un inclinómetro, según se detalla en la figura 11.

Las figuras 12-13 muestran una buena correlación entre datos reales de auscultación y resultados numéricos.

### 3.3. Línea 1, P.K. 1+739

En esta sección, la profundidad del eje del túnel es de 25,47 m. Se han tomado datos de auscultación procedentes de 7 hitos de nivelación cuya disposición se detalla en la figura 14, en la que se añade además el perfil geotécnico considerado en la simulación.

Los datos reales de auscultación y los resultados del modelo numérico se comparan en las figuras 15-16. Se ha obtenido una buena aproximación.

### 3.4. Línea 1, P.K. 1+850

El perfil estratigráfico, los instrumentos de auscultación y las características geométricas de la sección se han detallado en la figura 17.

La comparación entre la predicción de movimientos del modelo numérico y los asientos realmente observados se muestra en las figuras 18 y 19 (movimientos finales en superficie y evolución en el tiempo de éstos en un punto situado sobre el eje de la excavación).

Se obtiene una buena aproximación en ambos casos. Los movimientos que se han medido no son simétricos debido, probablemente, a la heterogeneidad del suelo.

## 4. CONCLUSIONES

A lo largo del presente artículo se ha descrito un modelo tridimensional de *FLAC<sup>3D</sup>* que estima los movimientos que se originan en el suelo por la excavación de túneles mediante el método Clásico de Madrid.

El potencial del modelo, en lo que respecta a la predicción de subsidencias por la excavación en suelos y rocas blandas se ha contrastado por comparación con datos reales de auscultación de varias secciones instrumentadas durante los trabajos de la pasada Ampliación de la Red de Metro de Madrid 1995-99.

El modelo propuesto permite realizar estimaciones bastante correctas de los movimientos del suelo, si se introducen las características geométricas de la sección, su profundidad y el perfil geotécnico y los parámetros geotécnicos necesarios.

Los trabajos actuales de investigación para mejorar los resultados de este modelo se centran en:

- 1. El análisis de los movimientos del subsuelo. La dependencia de estos movimientos respecto de las condiciones iniciales que se introducen (el parámetro  $K_0$  cobra gran importancia), hace que se deban realizar análisis de varias secciones para precisar el alcance del modelo en la predicción de éstos movimientos.
- 2. El análisis de la estabilidad del frente del túnel. Sería interesante la obtención de un criterio que permita fijar las características del proceso de excavación en función de las características geotécnicas en las que se realiza la excavación. Hay muchos parámetros que actualmente se 'estiman' según la experiencia del encargado, y que se podrían regularizar: longitud del 'pase' de avance, distancia desde el frente de excavación al inicio de la destroza, etc. de cara a reducir los movimientos en superficie y a aumentar la seguridad de los trabajadores.
- 3. El tercer punto en el que se está haciendo hincapié es en la obtención de los parámetros geotécnicos del modelo de estado crítico Cam-Clay para los suelos blandos de Madrid. Se esperan mejores predicciones de los movimientos del suelo con el uso de ese modelo constitutivo en las simulaciones numéricas. ■

## BIBLIOGRAFÍA

- Alpan, I. 1967. The empirical evaluation of the coefficient  $K_0$  and  $K_{0R}$ . *Soil and found*, Tokyo, Vol. 7, Nº 1, Jan: 31-40.
- Bowles, J.E. 1988. *Foundation analysis and design*. Singapur: McGraw-Hill Book Company.
- British Standards Institution. 1987. *British standard code of practice nº 2*. London: BSI.
- Itasca Consulting Group. 1997. *FLAC<sup>3D</sup> Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D. Version 2.0*. Minneapolis.
- Medina, L. 2000. *Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras en los suelos tosquizos de Madrid*. PhD Thesis. University of A Coruña (Spain).
- Ministerio de Fomento. 1999. *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-99)*. Madrid: Centro de Publicaciones.