

SUBSIDENCIA Y AUSCULTACIÓN EN LOS TÚNELES DEL METRO DE MADRID

Carlos Oteo Mazo.

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
*Responsable del Area de Ingeniería del Terreno del
Dpto. de Ingeniería Civil de la Universidad de Granada.*

José M^a Rodríguez Ortiz.

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
*Catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones
de la E.T.S. de Arquitectura de la U.P. de Madrid.*

RESUMEN

En el presente trabajo se exponen diversas consideraciones sobre la magnitud de la subsidencia que origina la excavación de túneles, los métodos para calcularla y las primeras experiencias obtenidas en la actual Ampliación del Metro de Madrid. Así mismo se presentan las líneas básicas del programa de instrumentación y auscultación que está desarrollando la Comunidad de Madrid, tanto por motivos de seguridad como de análisis científico del comportamiento real de las obras del Metro.

ABSTRACT

The authors examine several questions related to the amount of settlements induced by tunnel excavation (subsidence), the methods of calculation, as well as the first experiences gained through the current enlargement of the Madrid Subway Network. A method for estimating settlements is also proposed. The guidelines of the monitoring and instrumentation program implemented by the Comunidad de Madrid are presented. The aim of this program is the analysis of the actual behaviour of the works and to assure the best safety conditions.

1. LA SUBSIDENCIA. CARACTERÍSTICAS GENERALES

La excavación de terreno en una obra subterránea introduce una clara alteración en el estado tensional inicial del mismo, con tendencia a producir tracciones horizontales en clave, aumento de la compresión vertical en hastiales, de compresión entre la superficie y la clave del túnel, etc. Ello, tie-

ne como consecuencia la inducción de un campo de deformaciones en el terreno, que tiende a cerrarse en torno a la excavación (con extensión entre la superficie y la clave del túnel, levantamiento ligero del fondo de la excavación, etc) y que viene a equivaler a desplazamientos radiales hacia el túnel. Esto significa que habrá movimientos de la superficie y sus proximidades con componentes vertical (asiento) y horizontal (lo que, a menudo, se

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
enero de 1998.

olvida). A un fenómeno de este tipo se le denomina "subsistencia" y tiene gran importancia en los túneles urbanos, por la repercusión de estos movimientos -no uniformes- en los edificios próximos.

Figura 1. Esquema de movimientos y deformaciones superficiales.

Generalmente, se presta atención primordial a los movimientos superficiales, ya que en superficie o cerca de ella suelen estar las cimentaciones de los edificios próximos, y, además, se considera -simplificadamente- el problema bidimensional. En la Fig. 1 se presenta un esquema de los movimientos y deformaciones que se producen en la superficie. Habitualmente lo que se trata es de determinar la ley de asientos para conocer su afección -al no ser constante- en los edificios próximos.

Pero estos esquemas olvidan que el movimiento se produce a lo largo del tiempo y que, además, es tridimensional. En general, el movimiento de un punto de la superficie comienza un cierto tiempo antes de que el frente de excavación llegue a su vertical (o sea, cuando éste se encuentra a cierta distancia de ese punto). En Madrid el asiento al pasar el frente de excavación por un punto puede ser del orden del 20-30% del final. A veces, según el sistema de excavación (por ejemplo, con escudo y comprimiendo el terreno), se pueden registrar levantamientos del terreno (en materiales rígidos y en avance rápido, sin drenaje) antes de llegar al túnel.

En la Fig. 2 se muestran algunas medidas realizadas en Madrid (suelos tosquizos) producidas por diferentes sistemas

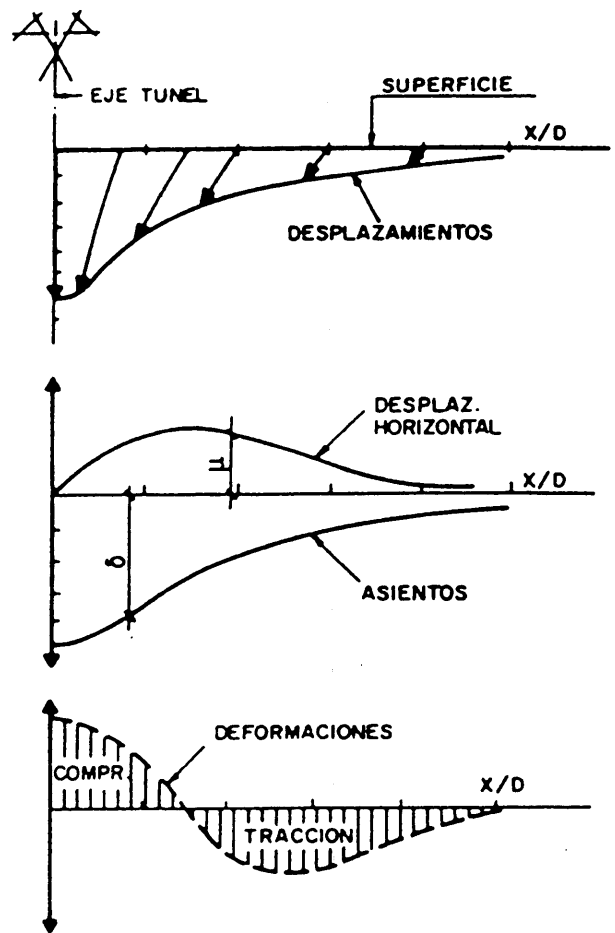
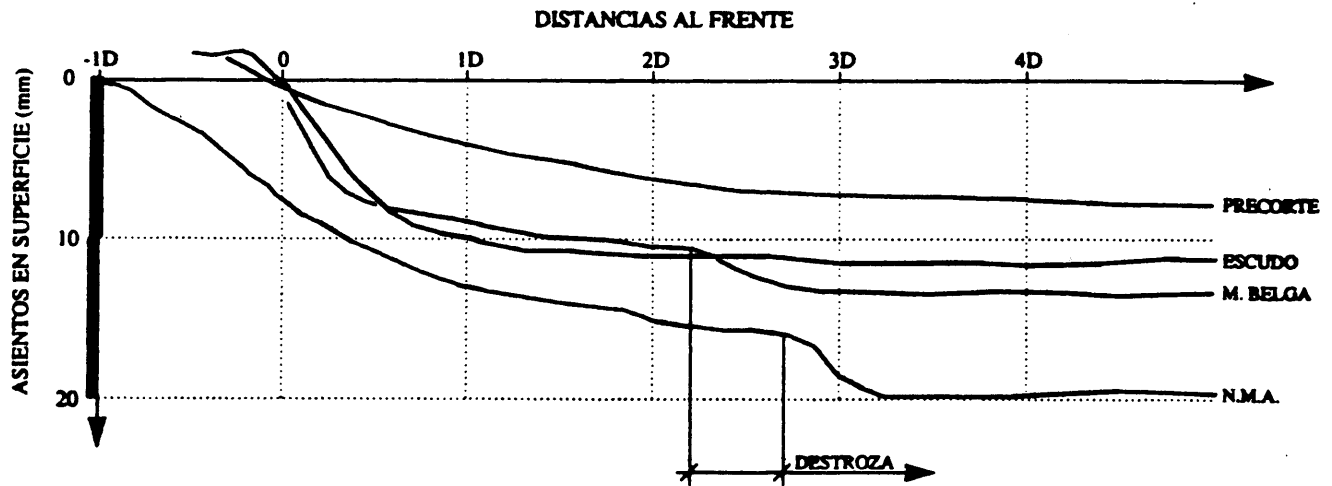


Figura 2. Evolución de asientos medidos en la Línea 6, con diversos métodos constructivos (R. Ortiz, 1993).



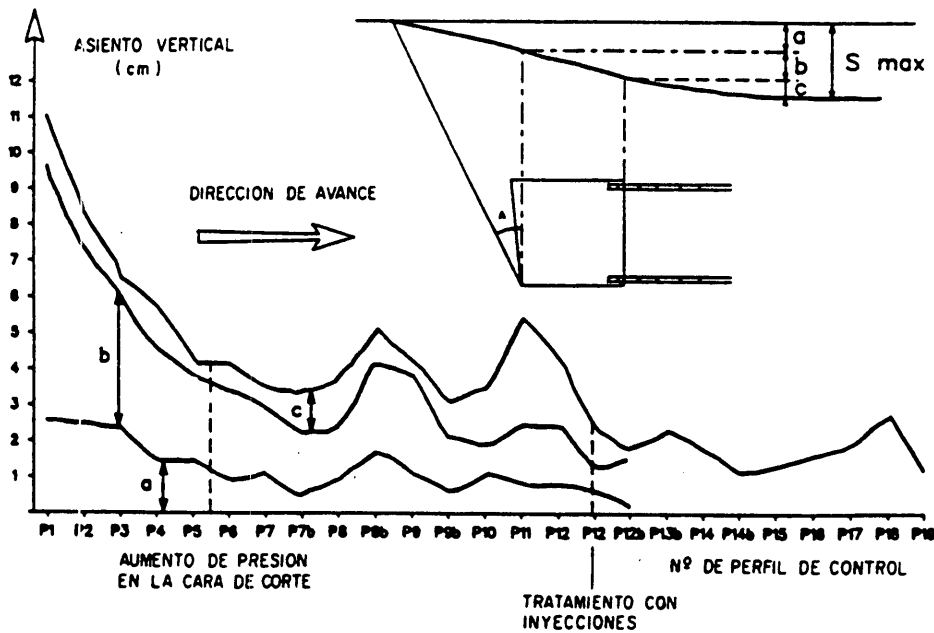


Figura 3. Asientos longitudinales medidos en el Metro de Lille, con separación de tres causas (Pantet, Kastneiz y Piraud, 1993).

produce antes de llegar el frente del escudo al punto considerado (de compresión frontal), del orden del 50-60% se produce por el paso del propio escudo (por el hueco que queda entre éste y el terreno excavado) y el resto del asiento (10-40%) se produce por el paso de la zona que lleva ya el revestimiento y ha quedado inyectada.

En definitiva deben de tenerse en cuenta las tres dimensiones geométricas que llevan a la generación de una cubeta de asientos como la de la Fig. 4, llamada por algunos "cubeta de Attewell", más la cuarta dimensión -el tiempo- que influye, extraordinariamente, en la magnitud

de la relajación total que va a experimentar el terreno.

constructivos. Además, en el movimiento final influyen diversos factores, como la geometría del problema (profundidad del túnel y recubrimiento del terreno resistente), características del terreno (propiedades geotécnicas, heterogeneidad, presencia del agua, ...), etc.

En la Fig. 3 se muestra una posible explicación de las fracciones de movimiento que produce un determinado sistema constructivo, el escudo excavador de frente cerrado utilizado en el Metro de Lille: del orden del 20-30% del movimiento se

2. FORMA DE EVALUAR LA SUBSIDENCIA

La magnitud total de los asientos superficiales (Fig. 1) suele evaluarse refiriendo su volumen total (por m.l.) respecto al volumen excavado (por m.l.). Es decir, se habla de una "perdida de terreno" superficial, o "volumen de asientos", o "área de la cubeta de asientos", denominándola V_s y refiriéndola a la sección transversal Ω excavada en %. Magnitudes habituales pueden ser desde el 0,1 al 5%.

En Londres se han medido valores de V_s del orden del 1-4% (extraordinariamente 3-16%) y en otros casos ingleses se ha llegado al intervalo 2-10%. En el caso de Madrid, con escudo Robbins abierto y túnel de doble vía se obtuvieron volúmenes de asientos del 0,1-0,4% en terrenos terciarios duros, con recubrimiento total (distancia entre la clave y la superficie, H_s) del orden de 2,5-3 veces la anchura del túnel,

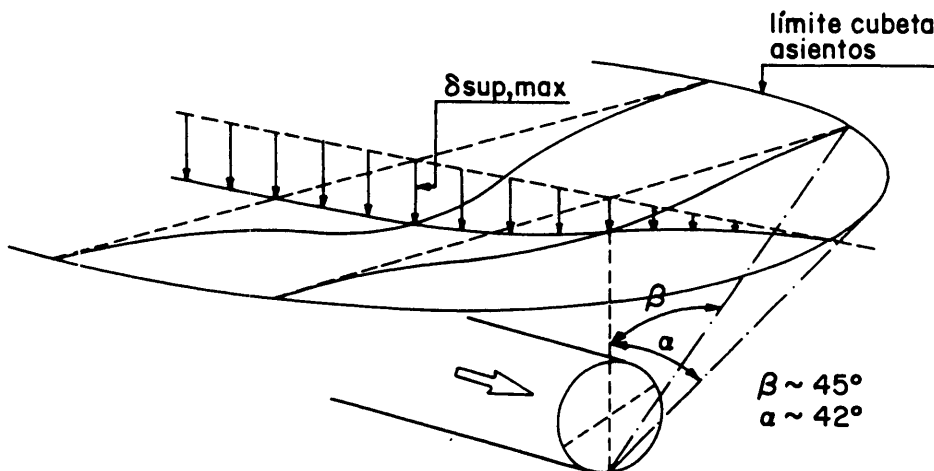


Figura 4. Cubeta de subsidencia o de Attewell

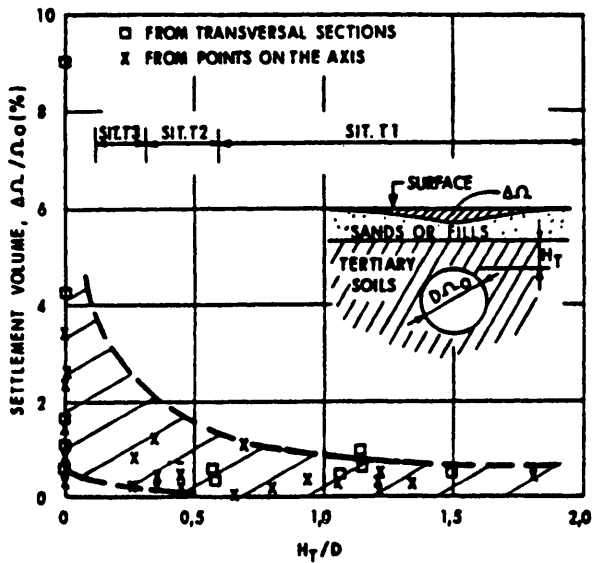


Figura 5. Volúmenes de asentamientos medidos en la Línea 10, con escudo Lovat, 0 7,40 m (Melis y otros, 1997).

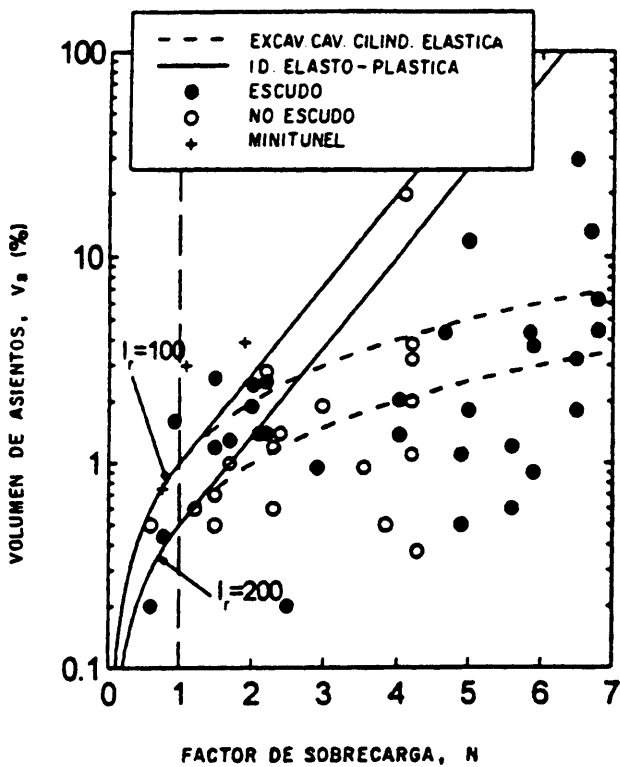


Figura 6. Volumen de asentamientos en función del factor de sobrecarga (basado en Clough y Schmidt, 1981).

con un recubrimiento de material resistente, H_c , casi análogo a H_s .

En la línea 10 del Metro de Madrid, en el tramo excavado cerca del Río Manzanares durante el año 1996, con un escudo Lovat, semicerrado, de 7,40 m, se han obtenido valores de V_s entre 0,1 y 4,2% (Fig. 5).

Recientemente, en el Paseo de la Castellana de Madrid, con el Método Madrid de excavación a sección partida, atravesando arenas tosquizas (con recubrimiento aluvial) se han obtenido volúmenes de asentamientos del 0,3-0,5%.

La Fig. 6 (Oteo y Sagaseta, 1996) recopila numerosos datos sobre volúmenes de asentamientos medidos en túneles excavados con y sin escudo, en función del factor de sobrecarga $N=(p_o-p_i)/c_u$, siendo p_o la sobrecarga total de tierras en el eje del túnel, p_i la presión interna del túnel (si existe) y c_u la resistencia al corte sin drenaje del terreno. V_s varía entre 0,2 y 30%, con una concentración de valores medidos entre 0,5 y 4%. En esa misma figura se incluyen resultados teóricos (excavación de hueco en régimen elástico o elastoplástico), en función de un índice de rigidez $I_r(=G/c_u)$, siendo G el módulo de deformación transversal, solución debida a Sagaseta (1987).

La ley de asentamientos puede asimilarse a una Campana de Gauss (Peck, 1969). Esta hipótesis permite definir la ley de asentamientos a partir de dos de los tres parámetros siguientes.

- ▼ El volumen de asentamientos, V_s
- ▼ La situación del punto de inflexión, i (distancia del eje de simetría a ese punto)
- ▼ El asiento máximo, $\delta_{m\acute{a}x}$, sobre la clave del túnel

La relación entre estos tres parámetros es:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i}$$

Por ello, es muy habitual que, fijado un volumen de asentamientos, a partir de datos empíricos, baste conocer el valor de i para conocer muy bien los asentamientos previsibles. El propio Peck (1969) dio un gráfico para determinar i , en función de la profundidad relativa del túnel, H/D , y del tipo de terreno, a partir de unos pocos datos experimentales (Fig. 7). Posteriormente estudios teóricos llevaron a Sagaseta y Oteo (1974) a proponer la ley que figura también en la Fig. 7 que, comparada con muchos más datos reales, resulta más adecuada, para su uso práctico. Esta ley tiene como expresión (Oteo y Sagaseta, 1982);

$$\frac{i}{D/2} = \eta \left(1,05 \frac{H}{D} - 0,42 \right)$$

siendo η un coeficiente de dispersión que varía entre 0,7 (materiales muy rígidos) y 1,3 (materiales poco coherentes).

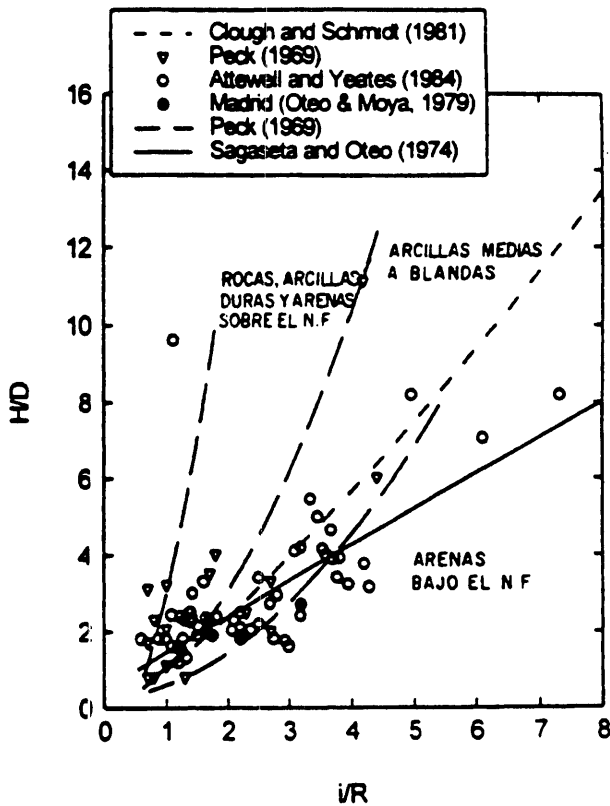


Figura 7. Localización del punto de inflexión.

continuación se asume que el volumen de asientos es una fracción de dicha pérdida de sección: $V_s = \alpha V_0$, con α del orden de 0,65 (túneles construidos rápidamente) a 0,75 (túneles con entibación de tipo medio). Conociendo el valor de i por los métodos empíricos antes citados, queda resuelto el problema. Con estas hipótesis resulta:

$$V_s = \alpha(1 + K_0)\sigma_v \frac{1 + \nu_s}{E_s} \Omega$$

siendo Ω la sección excavada, ν_s el módulo de Poisson del terreno y E_s su módulo de deformación. Este método puede complementarse considerando la plastificación del terreno (OTEO, 1980). La proximidad de la superficie y el no considerar el revestimiento pueden hacer poco útil este procedimiento.

3.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este sistema permite ajustarse perfectamente a la estratigrafía del problema y no necesita considerar el terreno como elástico. Sin embargo resulta, generalmente, difícil simular todo el problema con un análisis bidimensional. Es habitual el uso del método de elementos finitos bidimensionalmente, en deformación plana, con diversas hipótesis;

- ▼ Considerar el terreno como elástico, para simplificar. Si el parámetro $c/\gamma D$ (c =cohesión, γ = peso específico del terreno) es superior a 1,0, la posible plastificación sólo supondría un aumento en el asiento superficial inferior al 15% (Sagaseta y Oteo 1974b).
- ▼ El módulo de deformación del terreno puede considerarse constante, aunque la introducción de un gradiente con la profundidad suele ser más real.
- ▼ Si los parámetros en carga y descarga son iguales, el nivel de base de la malla no debe estar muy lejos de la solera del túnel, pues si no la descarga da lugar a levantamientos de dicha solera no-reales y que cambian los asientos. La distancia desde la solera al final de la malla debe ser del orden de D a $2D$.
- ▼ Por encima de la clave, el módulo de deformación del terreno tiene que ser el de de compresión o descarga (del orden de 500 Kp/cm² para arenas de miga sueltas, 800 para arenas tosquizas, 1200 para el tosco y 1500-1800 kp/cm² para peñuelas).
- ▼ El introducir un módulo de deformación alto (el de recompresión) por debajo del túnel, resulta conveniente y elimina los problemas anteriores.
- ▼ Las tensiones horizontales deben de introducirse antes de fijar las condiciones de desplazamiento horizontal a los

O'Reilly y New (1983) han simplificado la expresión anterior y recomiendan utilizar: $i=K.H$, con $K=0,4$ para arcillas rígidas y 0,7 para arcillas limosas blandas, en base a la solución anterior y datos reales.

Sagaseta (1987) ha propuesto para la curva de asientos una variación sobre la ley de Gauss, a partir de estudios elásticos:

$$\delta(x) = \delta_{\max} \frac{1}{1 + (x/H)^2}$$

Con este sistema (primero fijar el volumen de asientos y luego la posición del punto de inflexión), se pueden estimar los asientos previsible, admitiendo que tienen una forma de ley de Gauss.

3. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE MOVIMIENTOS

3.1. MÉTODO DEL SEMIESPACIO ELASTICO

La idea es calcular la pérdida de sección, V_0 , al excavar un túnel circular en un semiespacio elástico, sometido a unas tensiones verticales σ'_v y a unas horizontales $K_0 \sigma'_v$ (K_0 = coeficiente de empuje en reposo), sin considerar el revestimiento. A

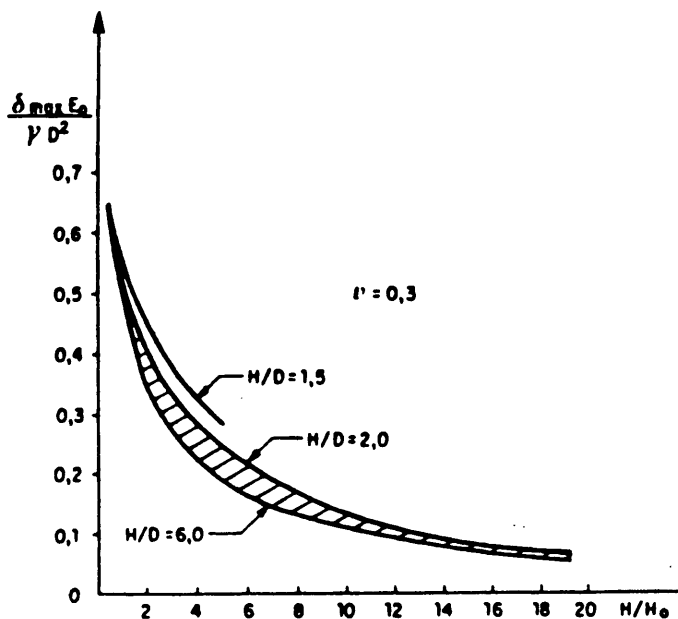


Figura 8. Asientos superficiales máximos y relación entre el asiento superficial máximo y asiento en la clave. (De la Fuente y Oteo, 1996).

bordes laterales de la malla y las tensiones geostáticas deben introducirse antes de realizar cualquier cálculo.

▼ La excavación bidimensional no puede eliminar todas las tensiones geostáticas en el contorno de excavación antes de introducir el sostenimiento, a fin de tener en cuenta el efecto tridimensional en el frente. A este efecto debe, en una primera fase, mantenerse una tensión del orden de $\epsilon \sigma'_{v_0}$, siendo σ'_{v_0} la tensión efectiva inicial; ϵ puede ser del orden de 0,75-0,90, según hemos deducido de análisis tridimensionales. A continuación puede simularse la colocación del sostenimiento, al mismo tiempo que se eliminan totalmente las tensiones geostáticas en el borde de excavación.

Si se considera una excavación circular, en terreno elástico, sin sostenimiento, el problema puede estudiarse paramétricamente, a partir del teorema de Buckingham. Si el terreno no es homogéneo y el módulo de deformación es E_0 en superficie y tiene gradiente $\forall E$ con la profundidad, Z , se tomaría:

$$E = E_0 + \forall E Z = E_0 (1 + Z/H_0)$$

Es decir, con un gradiente: $\forall E = E_0/H$. Este caso ha sido resuelto por De la Fuente y Oteo (1996), adaptando la ley de asientos superficiales a una campana de Gauss.

El asiento superficial, $\delta_{m\acute{a}x}$ valdría como estas hipótesis:

$$\frac{\delta_{max} E_0}{\gamma D^2} = \frac{1}{(0,45 + \nu) \frac{H}{H_0} + (1 + \nu)}$$

siendo ν el módulo de Poisson del terreno. Si el módulo de deformación es constante con la profundidad:

$$\frac{\delta_{max} E}{\gamma D^2} = 0,85 - \nu$$

solución obtenida por Sagaseta y Oteo (1974). En la Fig. 8 se reproducen los máximos asientos y los máximos movimientos en la clave obtenidos con este procedimiento.

3.3. MÉTODO SEMIEMPIRICO

A partir de los trabajos teóricos iniciales de Sagaseta y Oteo (1974), proponemos utilizar el siguiente procedimiento SEMIEMPIRICO (ya utilizado con éxito en los Metros de Madrid, Sevilla, Barcelona, Caracas, Toulouse, Londres, etc.), a veces denominado STSM (Semiempirical Tunnelling Subsidence Method):

▼ La ley de asientos superficiales transversales se adopta como una campana de Gauss:

$$\delta = \delta_{max} \cdot \exp(-x^2/2i^2)$$

Figura 9. Ley semiempírica de asientos superficiales longitudinales sobre el eje del túnel.

(También podría utilizarse la ley de Sagasetta, más apropiada si hay elementos rígidos en superficie).

▼ La posición del punto de inflexión, i , se determina con la expresión:

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

siendo η un coeficiente que varía desde 0,7 (suelos muy cohesivos) a 1,3 (suelos sueltos).

▼ El asiento máximo, $\delta_{m\acute{a}x}$, puede tomarse a partir de la expresión:

$$\frac{\delta_{m\acute{a}x} E}{\gamma D^2} = \Psi (0,85 - v)$$

siendo Ψ un coeficiente que introduce la influencia del proceso constructivo y que puede valer 0,5 para suelos: arcillo-arenosos rígidos y arcillas rígidas ("tosco" y arenas tosquizas de Madrid) y 0,4 en arcillas rígidas ("peñuelas de Madrid"). En túneles con escudo abierto, mala entibación y retraso de inyección de contacto, Ψ puede llegar a valer del orden de 0,75 y en el caso de parada de túneles sin presión en el frente alcanza el valor de 1,0. En el caso de considerar un gradiente del módulo de deformación con la profundidad, la expresión sería la de De la Fuente y Oteo (1996), (apartado anterior), afectada del coeficiente Ψ .

▼ El volumen de asientos, V_s

$$\text{es: } V_s = 2,5 \cdot \delta_{m\acute{a}x} \cdot i$$

▼ Para considerar la influencia de la deformabilidad longitudinalmente, puede usarse la curva representada en la Fig. 9, determinada a partir de cálculos tridimensionales, (De la Fuente y Oteo, 1997, informe no publicado).

▼ Para determinar la cubeta de asientos superficial o de Attewell, puede utilizarse la Fig. 10.

▼ Para determinar los movimientos horizontales puede utilizarse la ley simplificada de la Fig. 11, en que el movimiento máximo, $u_{m\acute{a}x}$, vale:

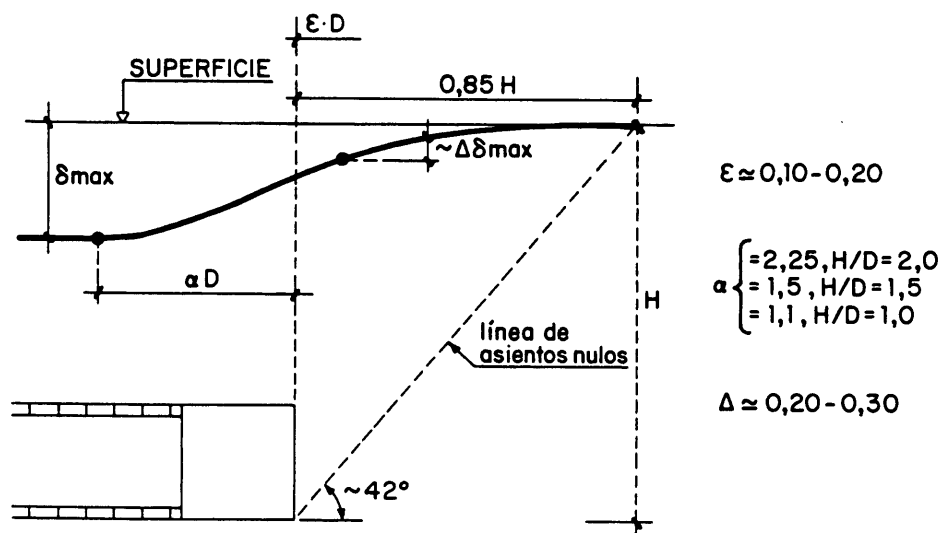
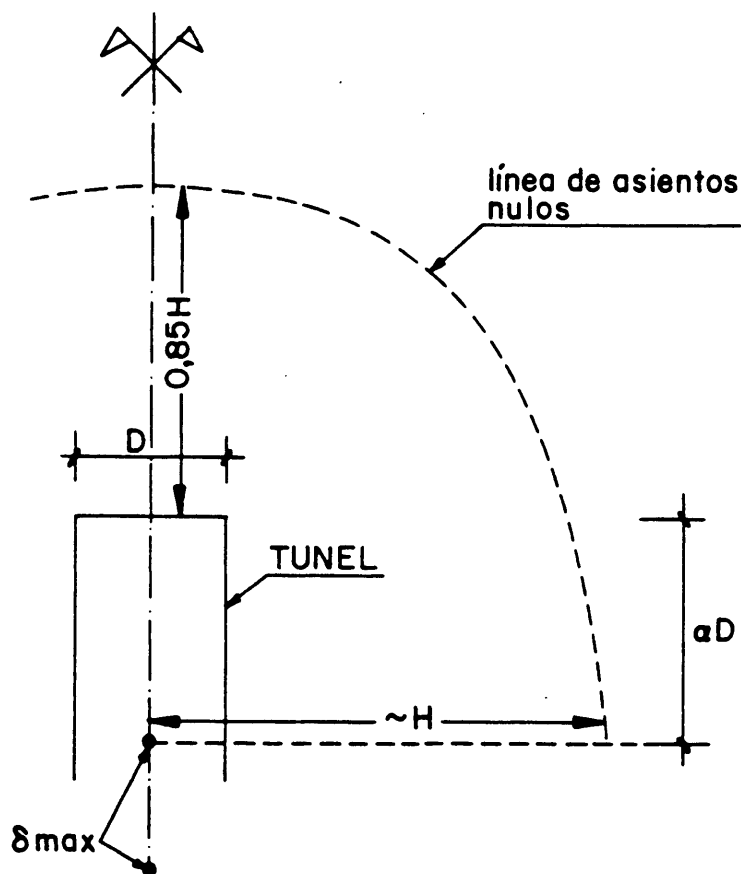


Figura 10. Definición semiempírica de la cubeta de Attewell (deducida de análisis teóricos tridimensionales).



$$\frac{u_{\max} E_0}{\gamma D^2} = \frac{\Psi}{\frac{H}{H_0} + 2,75}$$

Si el gradiente del módulo de deformación es nulo:

$$\frac{u_{\max} E_0}{\gamma D^2} = \beta(0,27 - 0,3v)$$

$$u_{\max} = 0,3 \beta \delta_{\max}$$

Siendo $\beta = 1,0$ para suelos normalmente consolidados, $\beta = 3$ para arcillas rígidas como el "tosco" de Madrid y $\beta = 2$ para arcillas medias como la de Londres.

▼ Los dos parámetros que permiten definir geoméricamente la ley de movimientos horizontales, i y d (Fig. 11) se obtienen de las expresiones:

$$i/D = 0,55 H/D - 0,21$$

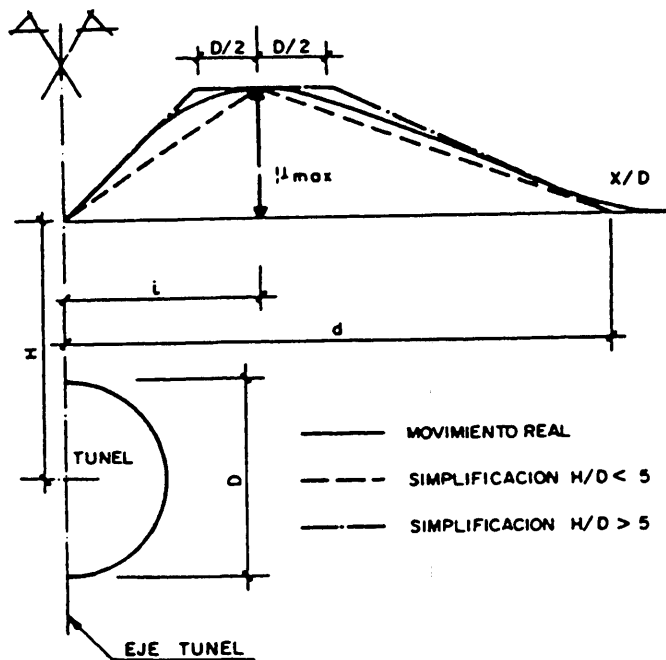
$$d/D = 1,50 H/D - 0,50$$

4. EXPERIENCIAS EN MADRID

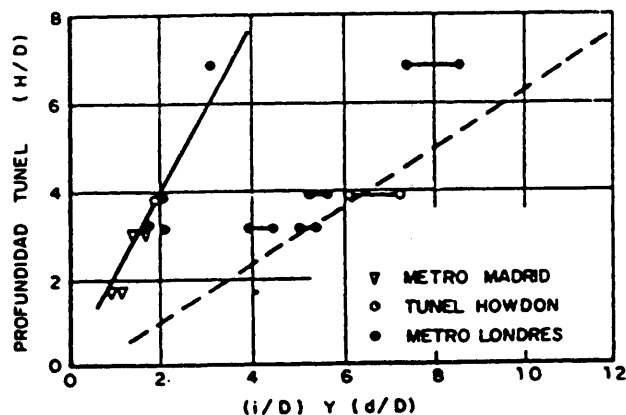
En las obras del Metro de Madrid ha habido ocasión de medir asientos y movimientos horizontales.

En la Fig. 12 se ha representado la evolución del asiento medido en las Líneas 10 (con escudo cerrado Lovat) y en la Línea 9 (con escudo Robbins abierto). En ambos casos, atravesando terrenos pliocénicos, se han obtenido asientos desde 1 a 12 mm, que (salvo en caso de paradas) se estabilizaron de 2 a 7 días después de pasar el escudo por el punto de control. En cuanto al punto de inflexión, al hablar de esto en el apartado 2 ya se mostraron algunos valores reales medidos en Madrid, que se ajustan suficientemente a la ley de variación antes propuesta. El punto de inflexión estaba, en la Línea 9, en unos 8-12 m del eje y en la Línea 10 a unos 10-13 m. O sea, i/D entre 0,95 y 1,60 lo que está en el orden de magnitud de lo previsible.

En la Fig. 5, ya se presentaron los volúmenes de asientos deducidos en el caso de la Línea 10, con escudo Lovat, con el túnel en terreno pliocénico y un recubrimiento de rellenos y arenas flojas (de 2 a 5 m). En ese caso el valor de V_s fue de 0,2 a 1%, mientras que si todo el terreno por encima del eje del túnel son suelos aluviales y rellenos, el volumen de asientos llegó a ser superior al 4%, llegando a formarse chimeneas en superficie. Con un recubrimiento de terreno terciario superior a 0,8D, el asiento máximo fue inferior a 5 mm, aunque en la zona de arenas flojas llegó a 130



A) SIMPLIFICACION DE LA LEY DE MOVIMIENTOS HORIZONTALES SUPERFICIALES



B) COMPARACION ENTRE VALORES TEORICOS Y REALES DE i/D Y d/D

Figura 11. Movimientos horizontales superficiales (Oteo, 1993).

mm. Si el recubrimiento en terciario era superior a 0,6D no fue necesario avanzar con "presión de tierras". En las líneas actualmente en construcción se han obtenido magnitudes de V_s similares a las comentadas.

5. MÉTODOS PARA REDUCIR LA SUBSIDENCIA

Pueden distinguirse diferentes procedimientos:

▼ Refuerzo de cimientos de las estructuras próximas, recalzando con micropilotes, llevando a estos hasta una zona que no se prevean movimientos. Este sistema se ha utilizado, a veces, a posteriori, una vez introducidos los daños.

▼ Ejecución de paredes continuas de protección, situadas entre el edificio y el túnel, que pueden ser realizadas con pantallas continuas (ancladas o no), pilotes tangentes, jet-grouting, etc.

▼ Refuerzo del terreno mediante inyecciones en la zona de la bóveda, mediante "paraguas" de jet-grouting, reforzado el frente con bulones de fibra de vidrio, etc.

▼ Compensación de asentamientos mediante inyección de compensación, creando un bulbo que empuje el terreno y compense los asentamientos. Esta operación debe iniciarse un poco antes de llegar el túnel y realizarse en varias fases para compensar los movimientos que se vayan produciendo. Esta técnica se ha utilizado en diversos Metros (Baltimore, Washington, Caracas, Londres, etc.) y las inyecciones pueden hacerse desde superficie o desde pozos verticales. En el Metro de Madrid se han aplicado ya estas inyecciones, por ejemplo en el cruce del Metro con el túnel de R.E.N.F.E. que discurre a lo largo del Paseo de la Castellana (Fig. 13)

▼ Cambios del proceso constructivo, introduciendo mejoras o adecuando el diseño, inyectando huecos entre sostenimiento y terreno, acortando el plazo de apertura de galerías, disminuyendo el área del frente que se abre de una sola vez, rigidizando sostenimientos relativos, etc.

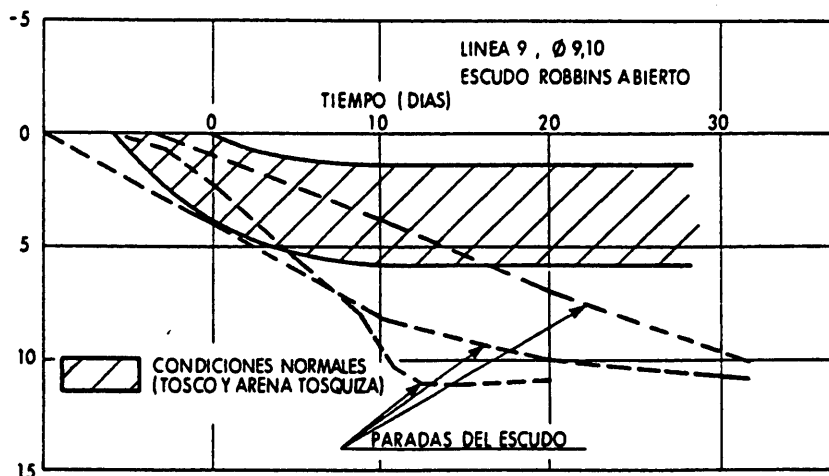
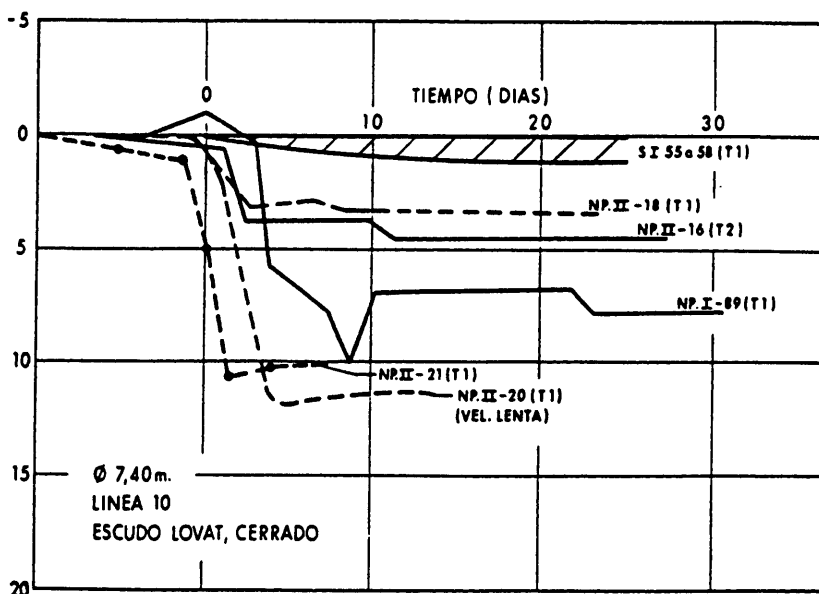


Figura 12. Evolución de asentamientos superficiales en las Líneas 9 y 10 del Metro de Madrid.

6. INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Para todos los tramos de la Ampliación del Metro se ha elaborado un Plan de Instrumentación y Control (preparado por los contratistas y ajustado por la Dirección de Obra) cuyos objetivos principales son:

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

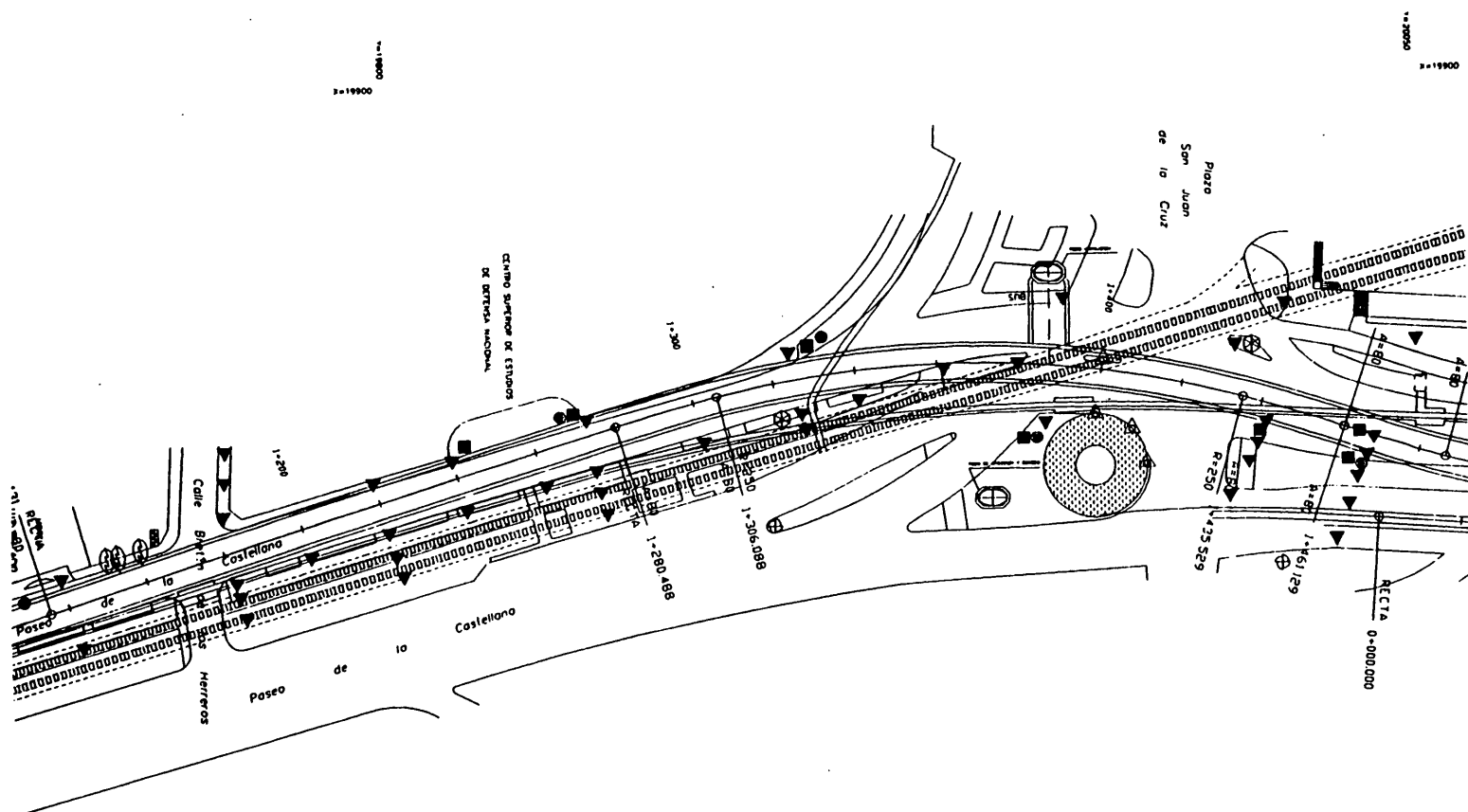


Figura 13a. Cruce de la unión de las Líneas 8 y 10 del Metro de Madrid bajo el túnel de R.E.N.F.E. en el Paseo de la Castellana.

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.

Desde el primer momento se planteó la discusión entre equipos de lectura manual o sensorizados para lectura digital y transmisión electrónica de datos. Razones de coste y eficacia han llevado a sistemas de lectura sencillos aunque las lecturas son comunicadas con la máxima rapidez por ordenador al centro de proceso de datos.

6.2 DISPOSITIVOS Y EQUIPOS DE AUSCULTACIÓN

Para el control de cada una de las magnitudes que se consideran como guías de comportamiento se emplean los elementos que de manera genérica se describen a continuación.

6.2.1.- Manifestaciones en el entorno

▼ a) Medida de asientos en superficie

Se realiza mediante hitos de nivelación firmemente implantados en el terreno, a profundidades del orden de 1,0 m (fig. 14), salvando los pavimentos y las posibles capas cementadas artificiales.

Las lecturas se refieren a bases fijas o puntos de referencia situados fuera de la zona de influencia de las Obras. Las bases fijas suelen consistir en tubos o varillas ancladas a gran profundidad (generalmente unos 20-25 m) e independizadas de los movimientos de las capas superiores. También se han utilizado como referencia estructuras o edificios pilotados.

▼ b) Medida de asientos o desplazamientos en profundidad

Se ha preferido la instalación de varillas ancladas a diversas profundidades (generalmente H/3 o 5 m, 2H/3 o H/2 y H-1 m, siendo H la profundidad de la clave del túnel) en lugar de complicados extensómetros de 3 varillas con sensores potenciométricos, para medida de desplazamientos verticales relativos. Las lecturas se realizan por nivelación convencional de alta precisión.

Además se han instalado algunos extensómetros incrementales (Sliding micrometer o TRIVEC), que permiten obtener series de acortamientos-alargamientos verticales, cada metro, de tuberías extensométricas instaladas a diferentes profundidades.

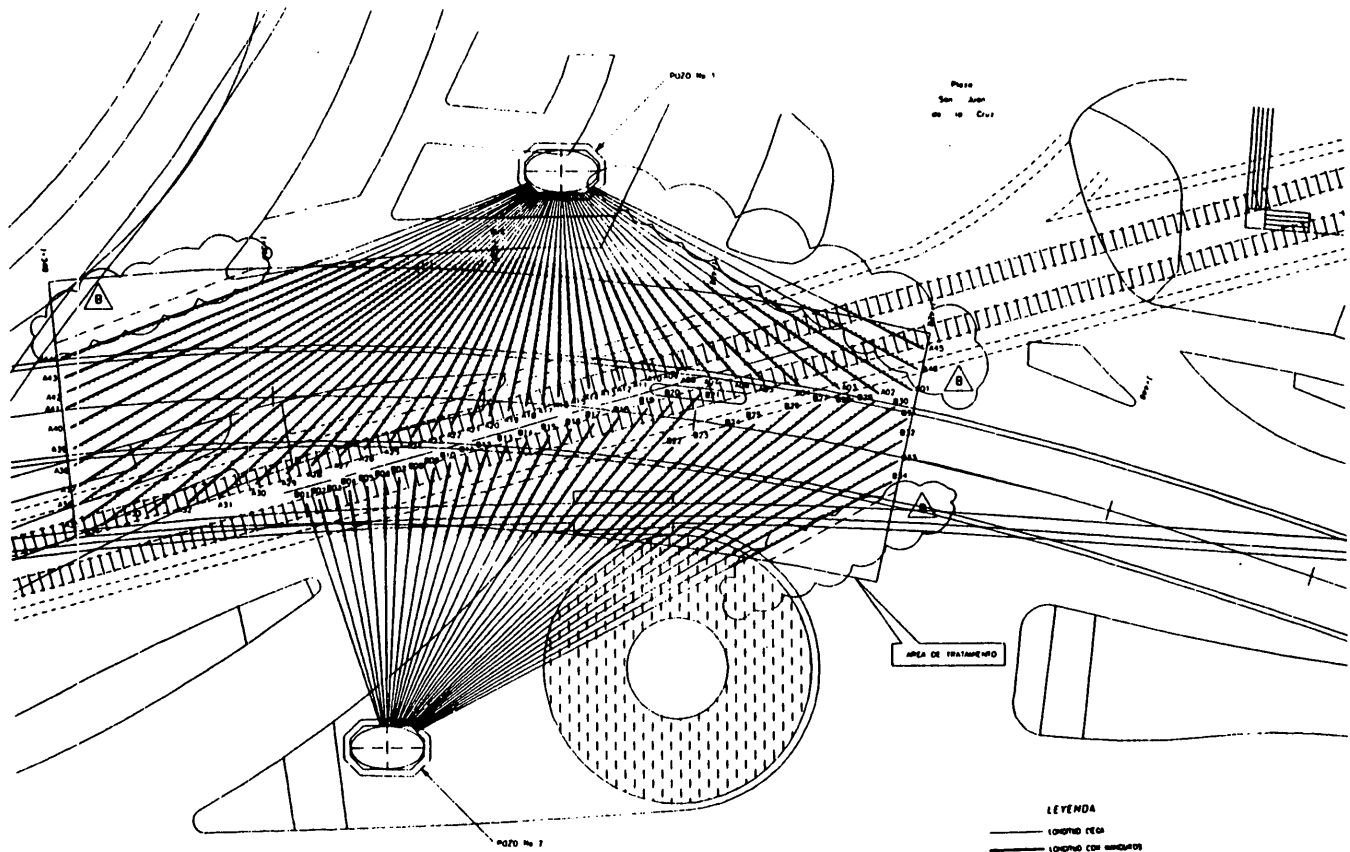
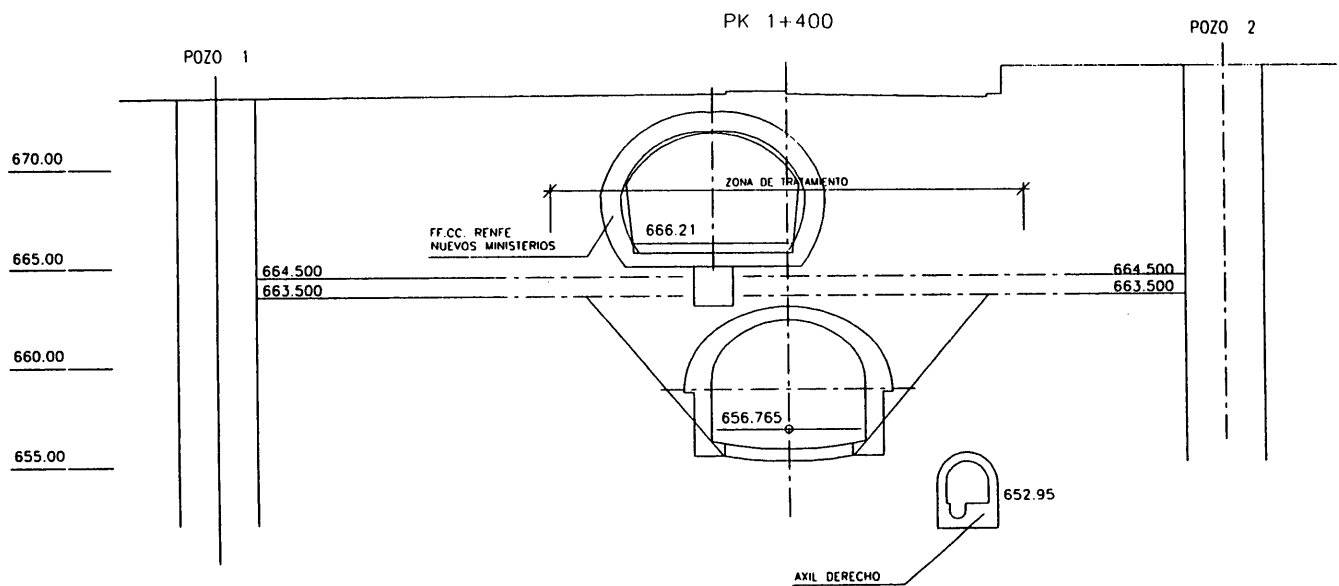


Figura 13b. Planta de la distribución de taladros horizontales (desde pozos verticales) por inyecciones de compactación bajo el túnel de R.E.N.F.E. (con inyección convencional previa junto a hastiales).

Figura 13c. Sección transversal del cruce de los dos túneles, mostrando situación de pozos y taladros horizontales para la compensación.



▼ c) Desplazamientos horizontales en superficie

Se controlan mediante taquimetría o cinta de convergencia entre hitos. Estos constan de un elemento firmemente anclado a unos 0,8- 1,0 m de profundidad el cual lleva un soporte para acoplamiento del trípode de referencia entre cada pareja de puntos de medida. (Precisión del sistema 0,1 mm)

▼ d) Desplazamientos horizontales en profundidad

Se utiliza el sistema habitual de medición mediante la disposición de tuberías de aluminio anodizado para medidas de desplazamientos con torpedo inclinométrico (biaxial).

Las medidas se obtienen cada 0,5 m, siendo acumulativas desde el pie de la tubería hasta la superficie del terreno, lo cual exige que el pie del inclinómetro esté fuera de la influencia del túnel, lo cual exige a veces grandes profundidades ya que se producen movimientos apreciables de descarga hasta 1 o 2 diámetros bajo la solera del túnel.

▼ e) Control de movimientos en edificaciones

Este es un tema de la mayor importancia por sus repercusiones sociales y económicas. Previamente al comienzo de las excavaciones se realiza un inventario de edificaciones, con el objeto de evitar la atribución de daños de origen anterior a las mismas y conocer aquellos edificios mas dañados o que pueden requerir cuidados especiales al trabajar en sus proximidades.

El control mas simple se realiza a través de la nivelación de precisión de clavos o regletas a situar en aceras, fachadas, muros de carga, etc, en la medida de lo posible en toda la zona de desarrollo de la cubeta de subsidencia, con objeto de poder determinar los eventuales giros, asentamientos diferenciales y absolutos de los edificios.

Esta nivelación se efectúa con nivel de precisión dotado con micrómetro y mira de invar para obtener precisiones de lectura de 0,1 mm refiriendo las medidas a bases externas a la zona de previsible influencia de las obras.

En casos especiales también se ha previsto un control continuo de asentamientos mediante "electroniveles", así como el seguimiento de giros o desplomes mediante taquímetro, plomada óptica, clinómetros, etc.

6.2.2.- Interacción terreno-estructura

▼ a) Presiones y empujes del terreno

En principio se intentan medir las presiones totales, radiales o tangenciales en los revestimientos de dovelas o convencionales y los empujes sobre las pantallas.

En el caso de las pantallas los empujes se controlan mediante la instalación de células de presión total de cuerda vibrante, paralelas a la pantalla. En unos casos se fijan las pantallas a la armadura de la pantalla procurando que la cara exterior de la célula quede en contacto con el terreno. Mas eficaz es la instalación en combinación con un gato hidráulico plano

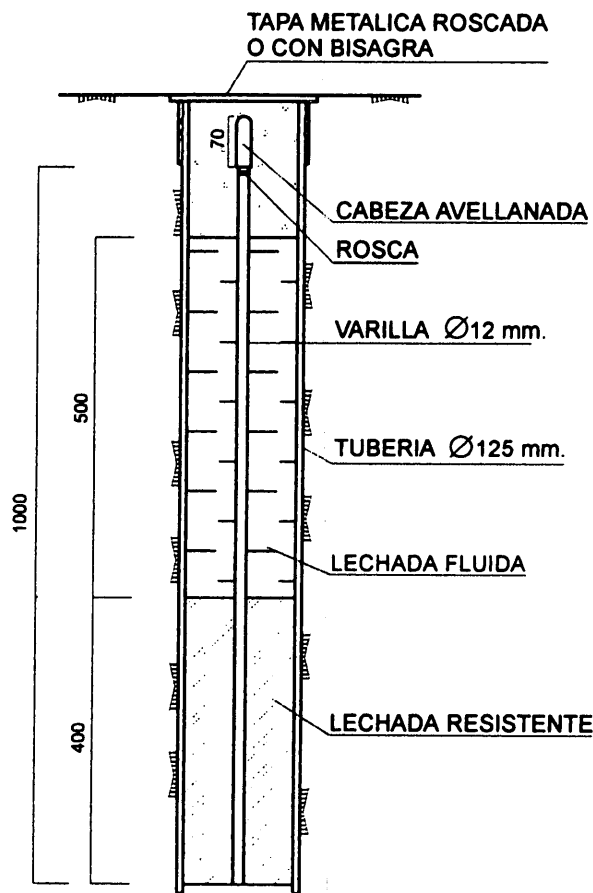


Figura 14. Hito para control de subsidencias por nivelación.

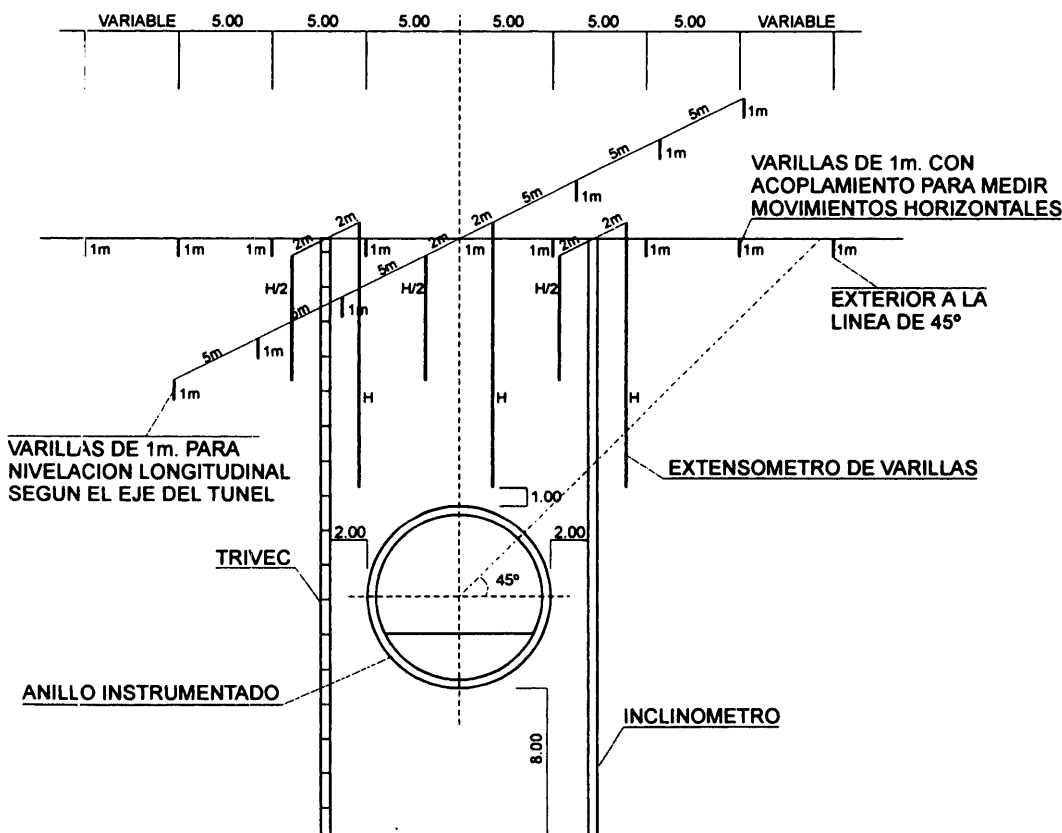
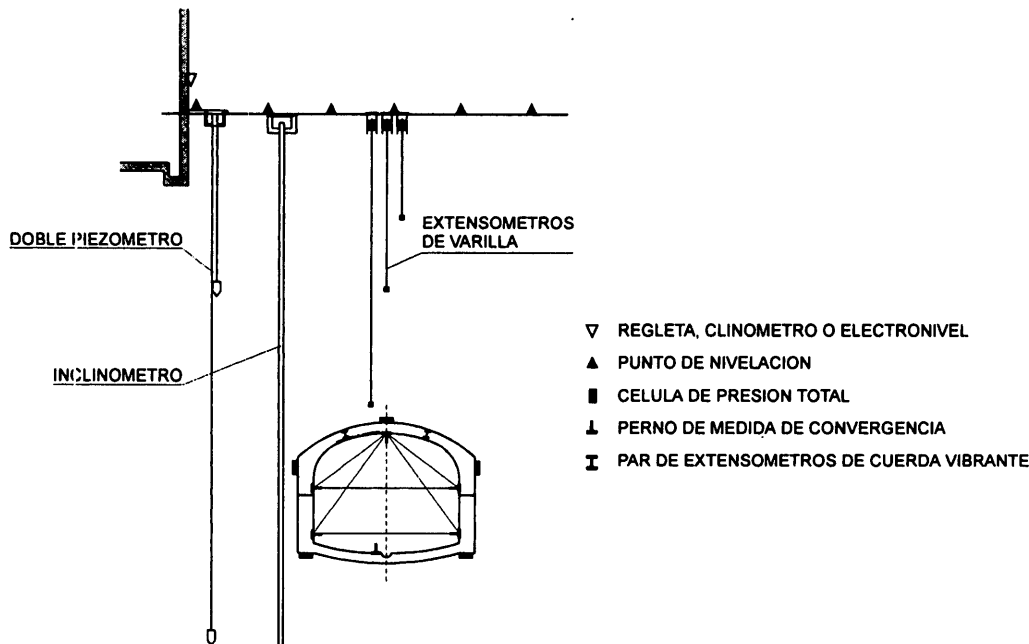
sujeto a la armadura de la pantalla; una vez introducida ésta, se acciona el gato para que la célula se sitúe contra el terreno.

También se colocan células de presión total debajo de la solera, directamente apoyada en el terreno, para control de las subpresiones.

En las secciones tipo instrumentadas en los anillos de túnel se colocan células de presión total de cuerda vibrante pegadas al trasdós de las dovelas, con el fin de conocer la presión de empuje del terreno sobre la misma. Aunque también se pueden colocar en las juntas entre dovelas (en un mismo anillo y entre anillos contiguos), encaminadas a evaluar los esfuerzos axiales que se producen entre las mismas, se ha optado finalmente por eliminarlas ya que los esfuerzos circunferenciales entre dovelas están muy enmascarados por el empernado y los empujes longitudinales, entre anillos, pueden deducirse a partir de las fuerzas transmitidas por los gatos de avance.

Las células empleadas son de cuerda vibrante, que han demostrado tener una gran fiabilidad a largo plazo. Por otra parte, las células de cuerda vibrante son menos rígidas y facilitan las medidas con deformaciones propias muy pequeñas.

Figura 15. Instrumentación de túnel de línea (Solo se ha representado un lado).



▼ b) Presiones del agua freática

Tiene interés el seguimiento de los niveles freáticos al paso de los túneles para evaluar el drenaje producido por los mismos, así como la eventual recuperación posterior de niveles con generación de presiones sobre los revestimientos.

En las secciones instrumentadas en las estaciones se instalan dos piezómetros de cuerda vibrante de respuesta rápida con la finalidad de conocer la ley real de presiones intersticiales ya que, como se indica en el capítulo de Criterios de Proyecto, no siempre se han adoptado leyes lineales de presiones.

▼ c) Tensiones en elementos estructurales

Para conocer la tensión de trabajo de las pantallas y de las dovelas de hormigón, se instalan extensómetros o tensímetros de cuerda vibrante, dentro de la masa de hormigón, previamente unidos a las armaduras. Se colocan por parejas en cada punto de medida, a distintos niveles, uno en cada cara de la armadura principal.

Adicionalmente, en los anillos correspondientes a las secciones instrumenta-

Figura 16. Sección de instrumentación para túnel realizado con EPB.

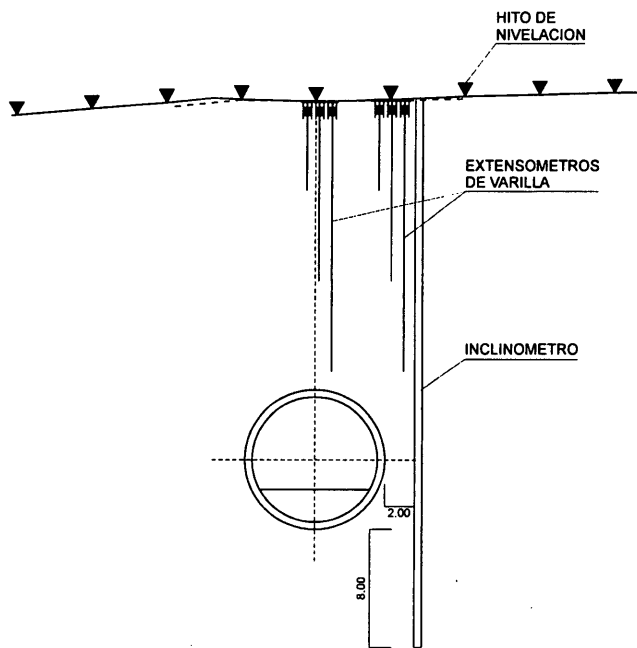


Figura 17. Sección de Instrumentación simplificada.

das en zona de túnel, se coloca una serie de parejas de extensómetros de cuerda vibrante, repartidos en las distintas dovelas (ver fig. 20), con el fin de medir los esfuerzos de flexión en las mismas y de compresión longitudinal originada por el empuje de los gatos.

La determinación de los esfuerzos en forjados y vigas de arriostramiento entre pantallas se efectúa mediante la colocación de extensómetros de cuerda vibrante en el centro de cada forjado, uno en cada cara de la armadura principal.

▼ d) Fuerzas en anclajes

En los pocos casos en que se recurre a anclajes se prevé la instalación de células anulares de carga con la finalidad de conocer las fuerzas a las que están trabajando los anclajes y seguir su evolución en el tiempo. Estas células pueden llegar a instalarse en el 5% de los anclajes provisionales.

▼ e) Convergencias en túnel de línea

Se han previsto 5 pernos por sección para el control de deformaciones relativas mediante cinta de convergencia (precisión de 0,1 mm). Se tropieza sin embargo con la dificultad de pasar la cinta a través del back-up de la tuneladora.

▼ f) Medida de deformaciones transversales en los muros-pantalla

Se realiza mediante tubería inclinométrica atada a las jaulas de armadura de pantalla previamente a su hormigonado, hasta el pie de las mismas, para medida de desplazamientos horizontales mediante torpedo inclinométrico (biaxial).

En algunos casos se ha preferido colocar el inclinómetro por el exterior de la pantalla, a muy escasa distancia de la misma, con objeto de descender por debajo del pie y alcanzar una zona en que pueda asegurarse la ausencia de movimientos horizontales.

Las pantallas de control llevan en cabeza clavos para el control taquimétrico de desplazamientos horizontales.

6.2.3.- Control sónico de integridad

Se ha previsto el reconocimiento de las pantallas por ultrasonidos, con la finalidad de detectar cortes, coqueas u otros defectos que de manera fortuita pidieran producirse.

Para este reconocimiento se colocan en los módulos de las pantallas de 2,50 metros, 5 tubos de auscultación solidarios a las armaduras, mientras que si el módulo es de 4 m se colocan 6 tubos.

Estos tubos de acero tienen que resistir la presión del hormigón y su diámetro interior será de dos pulgadas.

Estos controles se han limitado a dos secciones completas por estación, aunque pueden ampliarse si los resultados no son satisfactorios.

6.2.4.- Secciones de control

Los equipos anteriores se combinan en secciones determinadas, elegidas en función de la estratigrafía del terreno, la proximidad de edificios singulares, etc. En principio las secciones más completas, denominadas "Sección Túnel" para el caso del túnel de línea van a distancias entre 150 y 300 m, mientras que las secciones correspondientes a estaciones, denominadas "Sección Pantalla" (cielo abierto) o "Sección Estación" (cavernas) van en número de 2 o como mucho 3 en cada estación.

En la fig. 15 se muestra una sección típica para túnel realizado por el método convencional, aunque solo se ha representado la instrumentación típica de uno de los lados. En la fig. 16 aparece una sección típica de estación a cielo abierto, con la máxima complejidad de instrumentación. En muchos casos se eliminan los hitos longitudinales o se simplifica el número de extensómetros verticales de varilla (fig. 17).

En la fig. 18 se muestra una sección típica de estación realizada a cielo abierto, mientras que en la fig. 19 aparece la correspondiente a una estación realizada en caverna.

Existen también secciones de control, separadas unos 50-60 m, las cuales están formadas únicamente por una serie de hitos de nivelación.

6.3. PROGRAMAS DE MEDICIONES

Se han establecido programas de mediciones, adaptados al ritmo de construcción de las obras y buscando un compro-

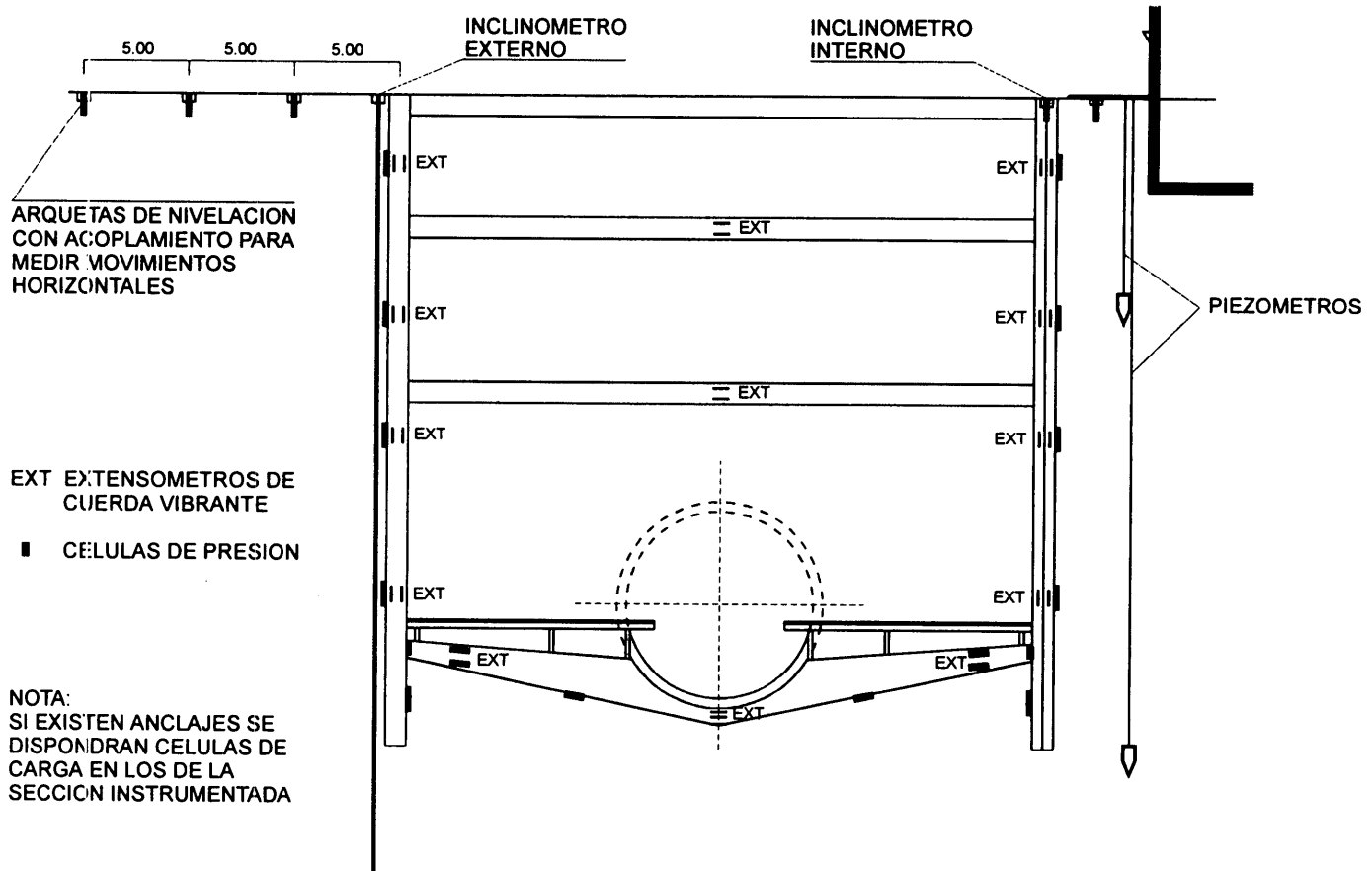


Figura 18. Instrumentación de Estación a cielo abierto.

miso entre la capacidad de los equipos humanos de medición y las posibilidades de elaboración e interpretación de resultados, todo ello en función de las necesidades de información sobre el comportamiento y efectos de la obra.

A título indicativo pueden señalarse las siguientes frecuencias de medida:

▼ Movimientos de las pantallas en cabeza

En el caso de estaciones las lecturas de movimientos se hacen según desciende la excavación, cada 3 m de altura aproximadamente.

En los túneles de línea a cielo abierto y durante la fase de excavación del terreno entre pantallas, se toman dos lecturas semanales. Mas adelante se van espaciando hasta una lectura mensual.

▼ Convergencias en el túnel

Las lecturas se inician lo antes posible, con frecuencia diaria durante las dos primeras semanas. Posteriormente se pasa a una frecuencia semanal hasta la estabilización.

▼ Inclinómetros en pantallas

Una vez realizada la lectura inicial, las lecturas siguientes se ajustan al avance de las excavaciones, controlando cada 2-3 m de profundización. Una vez completada la excavación se toman lecturas semanales hasta la estabilización.

En estaciones el ritmo de medidas se ajusta a las diferentes fases constructivas (ejecución de forjados), rellenos sobre cubierta, etc.).

▼ Inclinómetros en túnel

Durante la fase de avance del escudo, se toman dos lecturas semanales cuando el frente de excavación esté situado entre 20 y 40 m por detrás de la tubería inclinométrica.

Cuando el frente de excavación se encuentra a menos de 20 metros por detrás o por delante de la tubería inclinométrica, se toma una lectura diaria.

Finalmente cuando el frente de excavación se encuentra a más de 20 m de la tubería inclinométrica, se toman dos lecturas por semana, hasta que éstas se estabilizan. Pasado un mes, se vuelve a tomar una nueva lectura y si ésta no es igual a la anterior, se toman dos lecturas semanales hasta que éstas se estabilizan. El proceso se repite mensualmente.

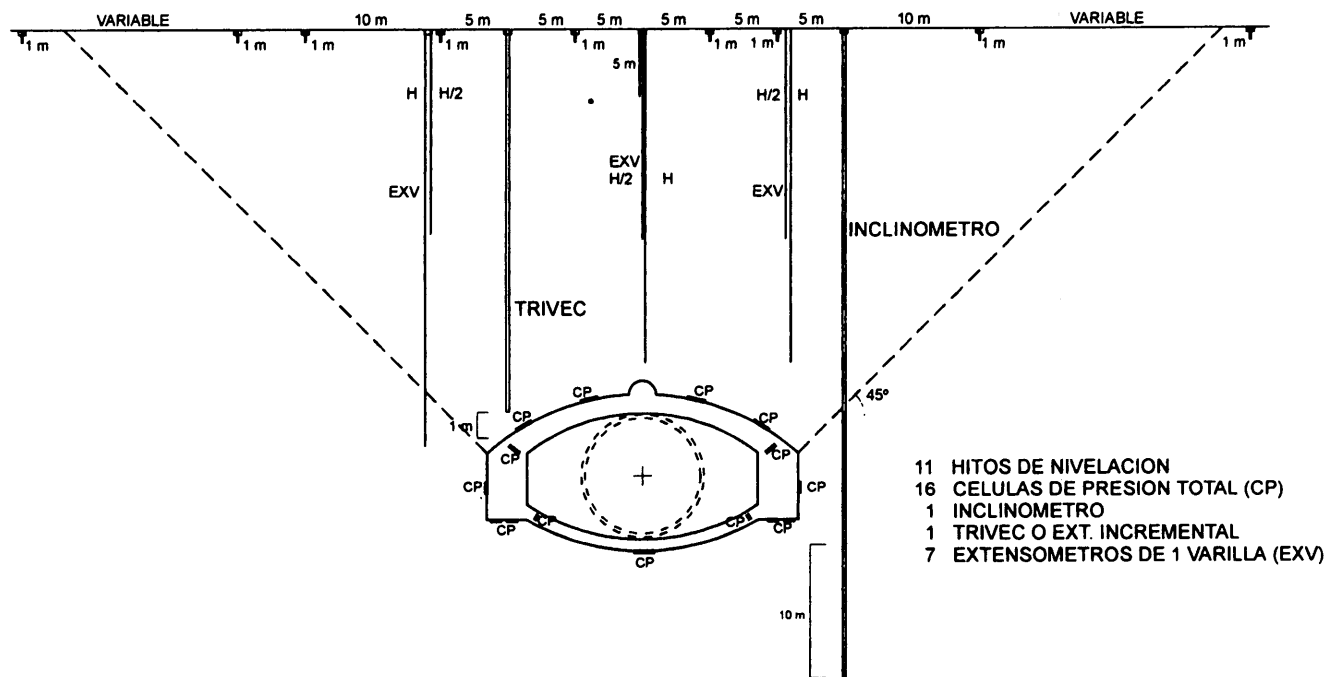


Figura 19. Instrumentación de Estación en caverna.

▼ Extensómetros y células de presión

En los módulos de pantalla se sigue una frecuencia análoga a la de las lecturas inclinométricas.

En el caso de las dovelas del túnel se toma una lectura diaria de las células de presión total y de los extensómetros desde su instalación hasta que las lecturas se estabilizan. Después de la estabilización se toman dos lecturas semanales durante el primer mes, continuando con una lectura semanal durante el segundo mes. En el caso de que las lecturas no estén dando resultados estabilizados, se vuelve a leer con la secuencia de lectura diaria.

Las lecturas de los extensómetros en forjados y arriostramientos se toman diariamente desde su colocación hasta que las lecturas se estabilizan.

▼ Otros controles

Es importante visitar una vez por semana como mínimo, las galerías de servicio e inspeccionar simultáneamente el estado de las tuberías y de las galerías cuando la excavación está a 25 m por delante y por detrás de los citados servicios.

También se incluye en estas operaciones la observación visual de pavimentos, aceras y edificios para detectar cualquier grieta o anomalía en los periodos entre campañas de medición.

6.4. LA UNIDAD DE SEGUIMIENTO Y AUSCULTACIÓN (U.S.A)

Aunque los resultados de las medidas quedan recogidos en Informes Parciales que se elaboran con una periodicidad de

15-30 días, por parte de un subcontratista especializado, desde el primer momento se planteó la necesidad de disponer de una información directa, prácticamente en tiempo real, del estado de los distintos tajos y del comportamiento de los sostenimientos y del terreno circundante, así como de los edificios afectados por las obras, no sólo como medida de control y seguimiento de las mismas sino como instrumento de aviso de incidencias y alerta para la adopción de medidas correctoras.

Por otro lado la adjudicación de los tramos a diversos contratistas que, a su vez, podían subcontratar los equipos de instrumentación a distintas empresas, obligaba a unificar criterios y a homogeneizar los sistemas de captación y tratamiento de datos para hacerlos más fácilmente manejables y utilizables por sus destinatarios.

Con estos fines se creó la denominada Unidad de Seguimiento y Auscultación (familiarmente la U.S.A.) bajo la dirección de D. Ildelfonso de Matías y con el apoyo de los Asesores de las Obras y los Directores Técnicos de cada tramo.

Esta Unidad centraliza la recepción y el tratamiento informático de datos, estando encargada de las funciones siguientes:

- ▼ Registrar los datos correspondientes al funcionamiento de las tuneladoras y a la instalación de los anillos de revestimiento.
- ▼ Almacenar la información previa referente a la estratigrafía y propiedades geotécnicas del terreno atravesado.

- ▼ Almacenar los resultados de las medidas procedentes de la auscultación.
- ▼ Predecir los valores esperables de subsidencias y asientos mediante modelos geomecánicos. Comparación de los mismos con los admisibles y emitir, en su caso, las correspondientes alertas.
- ▼ Comprobar el ajuste entre los valores estimados y los reales. Corrección en su caso de los parámetros de los modelos.
- ▼ Proponer modificaciones en las condiciones de ejecución para evitar las situaciones en que es previsible exceder las tolerancias.

El volumen de datos es enorme ya que la U.S.A. centraliza la información de 11 o más obras, en 6 de las cuales se utilizan tuneladoras.

En la fig. 21 se indica un esquema operativo de la U.S.A., el cual puede explicarse de la manera siguiente:

6.4.1.- Subtramos de control

Es evidente que resulta inviable y poco significativo el control continuo por lo que hay que dividir cada tramo de línea en

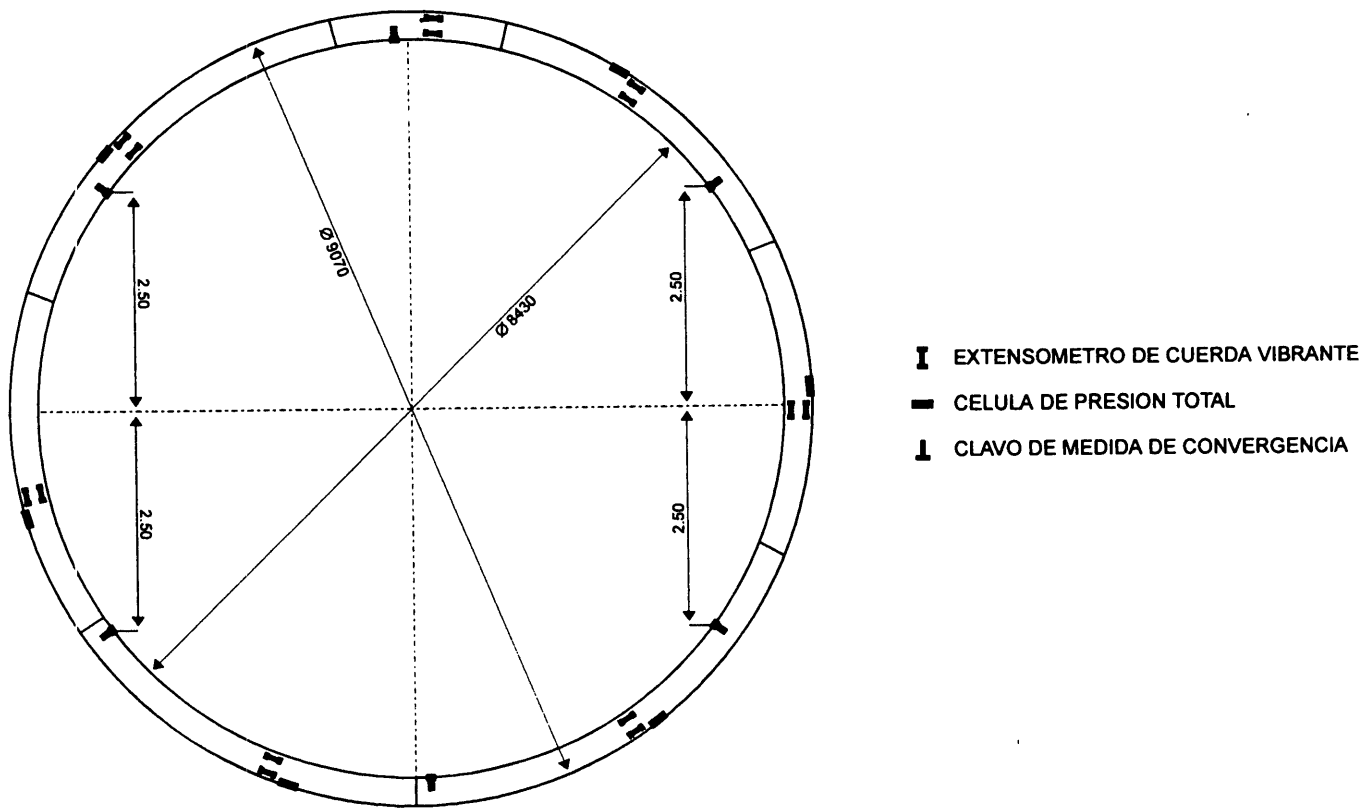
un número limitado de subtramos que se denominarán unidades o subtramos de control. Estos subtramos se definen como longitudes de traza entre 50 y 150 m que cumplen las siguientes condiciones:

- ▼ Pueden considerarse geométrica y geotécnicamente "homogeneos".
- ▼ Se dispone de información geotécnica suficiente (al menos un sondeo) para su caracterización.
- ▼ Existe al menos una sección o elemento de auscultación que permita disponer, en su día de datos reales de comportamiento.

La variedad de edificios o estructuras puede hacer que un subtramo se divida en varias secciones de control que compartan la misma información geotécnica. Normalmente en un subtramo habrá de 1 a 3 secciones de control.

Aunque en algunos casos se dispondrá de datos para elaborar diagramas espaciales creemos que será conveniente un tratamiento aparte.

Figura 20. Instrumentación de un anillo de dovelas.



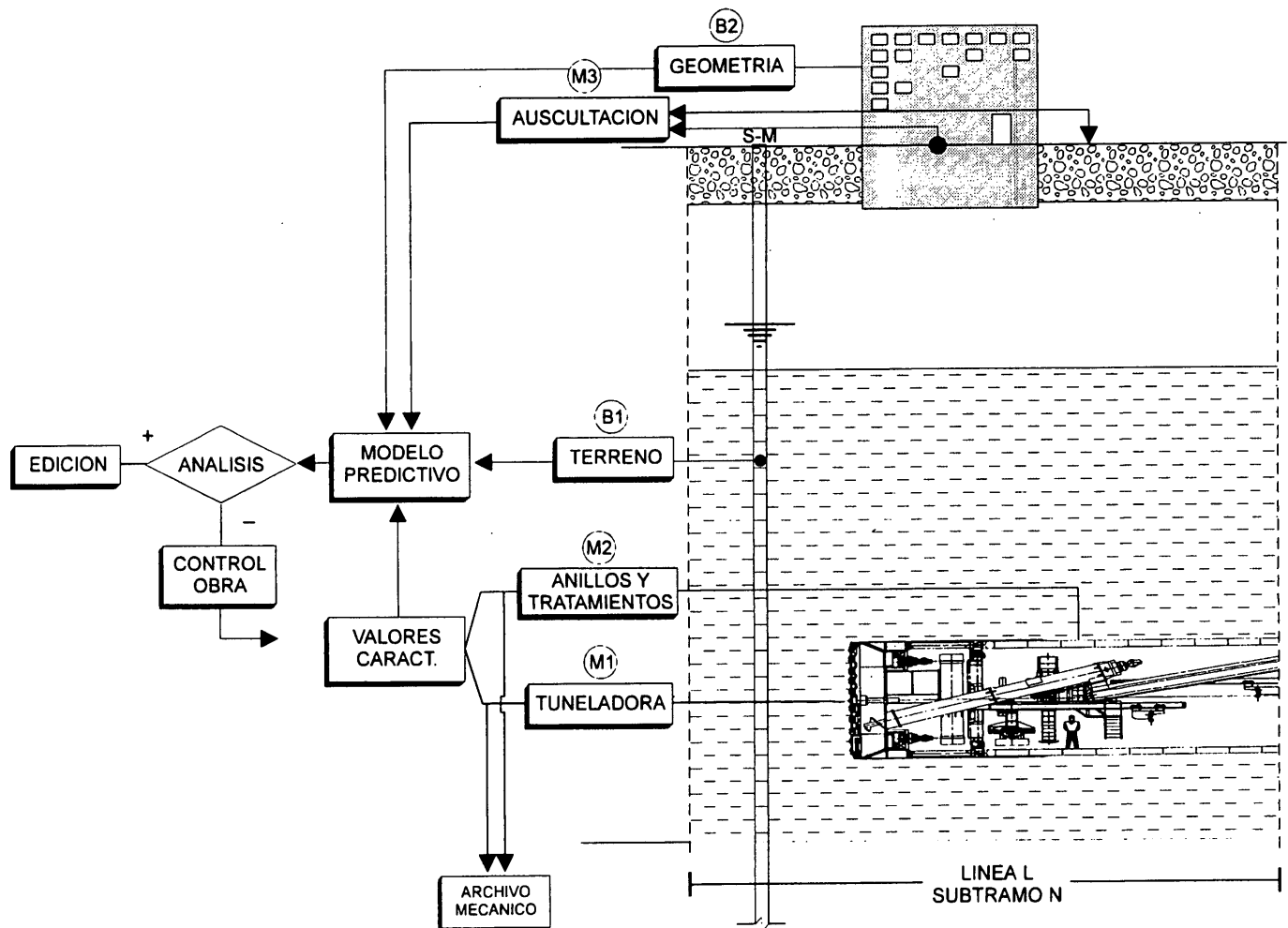


Figura 21. Esquema operativo de la Unidad de Seguimiento y Auscultación

6.4.2.- Bases de datos previos

Deben establecerse, para cada una de las líneas las dos bases de datos siguientes, particularizadas para cada uno de los subtramos de control:

- ▼ B1 - Perfiles del terreno, parámetros geomecánicos (función del modelo predictivo adoptado). Datos hidrogeológicos.
- ▼ B2 - Datos geométricos correspondientes a las secciones de control (incluyendo edificios o estructuras).

Estas bases son previas a las obras, aunque en algunos casos debe completarse la información actualmente disponible.

6.4.3.- Bases de datos de medidas

Para cada una de las líneas se obtendrá un gran número de resultados de medidas los cuales deben ordenarse en las bases de datos siguientes:

- ▼ M1 - Datos de la tuneladora
 - Posición
 - Fecha y hora de comienzo de excavación
 - Id. de final de excavación
 - Empuje total medio por anillo
 - Presión de tierras en cámara
 - Consumo de espumas
 - Volúmenes excavados

▼ M2 - Datos de los anillos

Posición e identificación
Números de identificación de dovelas
Convergencias
Extensímetros
Presiones totales
Inyecciones de trasdós
(volumen, presión, etc.)

▼ M3 - Datos de auscultación

Hitos de nivelación
Extensómetros
Inclinómetros
Extensómetro incremental
Trivec
Electroniveles

Las medidas que constituyen las bases de datos M1 y M2 constituyen el denominado archivo mecánico o de ejecución, el cual no es directamente utilizable ya que está particularizado para cada anillo (1,50 m) y los cálculos no pueden hacerse a ese nivel. Deberá existir un programa de obtención de valores característicos para cada subtramo de cálculo, es decir valores medios estadísticos que resulten representativos del conjunto de avances y de anillos.

6.4.4.- Modelo predictivo

En principio hay que pensar en un modelo no muy complicado y disponible comercialmente (ANSYS, ABAQUS, Z_SOIL, PLAXIS, etc.). No hay problema en utilizar modelos bidimensionales y quasi-elásticos ya que mediante los oportunos factores de ajuste será posible englobar fenómenos de plastificación, reología, etc.

En la modelización se considera la rigidez de los edificios o estructuras para lo cual se realizan algunos cálculos complementarios.

Este modelo se utiliza en dos fases principales:

▼ a) Precálculo

Con este programa y con los parámetros geotécnicos que se consideran más adecuados se hace la modelización y precálculo de todas las secciones de control. En los casos en que los valores de desplazamientos o tensiones superan los límites prefijados se pasa aviso a los Directores de Obra para que estudien la necesidad de medidas preventivas.

▼ b) Ajuste

A medida que se vayan obteniendo datos de medidas se podrán ir ajustando los parámetros de este modelo, rehaciendo los cálculos y revisando, en su caso, las indicaciones transmitidas a los Directores de Obra.

6.4.5.- Edición y presentación de resultados

Aunque todos los resultados pueden obtenerse mediante listados numéricos por impresora se ha elaborado un software que proporciona salidas gráficas tanto en impresora de color como en monitores. El proceso operativo va guiado por menús y es del tipo siguiente:

▼ Se teclea el número de línea y, opcionalmente:

- Un P.K. determinado (el programa busca la sección de control)
- Un subtramo o una sección de control

▼ Se pregunta por la posición del frente (esto puede ir acompañado de otra salida (panel) en que se vea el estado de todas las obras en tiempo real)

▼ Se solicita información de los tipos siguientes:

- Planta con localización de traza y edificios (eventualmente podrían aparecer fotografías de la zona o de los edificios)
- Terreno (estratigrafía, propiedades y nivel freático) con localización del túnel
- Instrumentación existente (gráfico de instalación)
- Gráficos de lecturas de un determinado elemento de control
- Datos medios referentes a la tuneladora
- Datos medios referentes a los anillos

▼ Se recuperan resultados del modelo predictivo referentes a

- Modelización realizada
- Curvas de subsidencia en superficie o a cualquier nivel
- Leyes verticales de asientos o movimientos horizontales
- Tensiones, esfuerzos y deformaciones en anillos
- Pérdidas de suelo
- Alertas emitidas a las Direcciones de Obra

▼ Se solicitan los análisis comparativos entre predicciones iniciales y medidas reales referentes a

- Subsidencias
- Desplazamientos
- Esfuerzos y tensiones
- Comportamiento de la tuneladora

▼ Información sobre modificación de parámetros para ajustar las predicciones a los resultados y comparación entre ambos.

▼ Información general de la marcha de las obras con salidas gráficas referentes a

- Longitudes ejecutadas
- Velocidades de avance
- Tiempos empleados en excavación, desescombro, colocación de dovelas, etc.
- Comparación con previsiones de los Planes de Obra
- Incidencias

Eventualmente podrá facilitarse el acceso al archivo mecánico en el que se pormenoriza cada avance o anillo, aunque creemos que éste solo tiene interés como control de ejecución y para problemas puntuales.

6.4.6.- Alertas y umbrales de riesgo

La mayor utilidad de la auscultación es la posibilidad de detectar aquellas situaciones en que el comportamiento del sistema túnel-terreno-edificios se sale de lo previsto o se exceden límites de movimientos previamente establecidos (umbrales de riesgo).

Estos umbrales son muy diversos pero los mas interesantes se refieren a

- ▼ Asientos máximos en superficie
- ▼ Volúmenes de excavación muy por encima de los nominales
- ▼ Pérdidas de suelo excesivas
- ▼ Distorsión de edificios
- ▼ Presiones hidrostáticas anormales
- ▼ Empujes del terreno superiores a los previstos

En principio estos umbrales se establecen a partir de los cálculos teóricos en fase de proyecto, la experiencia publicada o la que se va obteniendo en las propias obras del Metro.

7. REFERENCIAS

- Clough, G.W. y Schmidt, B. (1981). "Design and performance of excavation and tunnels in soft clay". Soft clay Eng. C.P. Brand y P. Brenner, editores. Elsevier. Amsterdam, pp: 569-634.
- De la Fuente, P. y Oteo, C. (1997). "Informe no publicado"
- De la Fuente, P. y Oteo, C. (1996). "Theoretical Research on the Subsidence originated by the underground construction in urban areas". Int. Symp. Rumanía.
- O'Reilly, M.P. y New, B.M. (1982). "Settlements above tunnels in the U.K. a Proc Tunnelling. 82. J.M.M. Londres. pp:137-181.
- Oteo, C. y Sagaseta, C. (1982). "Prediction of settlements due to under ground opennings". Symp. Numerical Models in Geomech. Zurich. pp: 653-659.
- Oteo, C. y Moya, J.F. (1979). "Evaluación de parámetros del suelo de Madrid con relación a la construcción de túneles". European Conf. on S.M. and F.E. Brighton. Traducido en el Boletín del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, nº 137, pp:27-37.
- Oteo, C. (1993). "Urban tunnels in hard soils". Int. Symp. on indurated Soil and Soft Rocks. General Report. Vol. III.
- Panet, A.; Kastne, R. y Piraud, J. (1993). "In situ Measurement and Calculation of displacement field above slurry shields". Int. Syposiun on Options for Tunnelling. Paris. pp:443-452.
- Peck, R.B. (1969). "Deep excavations and tunnelling in soft ground". Proc. 7th ICSMFE. México. State of the Art. Volume, pp:225-290.
- Sagaseta, C. y Oteo, C. (1974). "Análisis de la subsidencia original por la excavación de túneles". 1er Simposio Nacional sobre Túneles. Madrid. Vol. I.
- Sagaseta, C.; Moya, J.F. y Oteo, C. (1980). "Estimation of ground subsidence over urban tunnels". 2nd Conference on Ground Mov. and Structures. Cardiff. Session IV. ●