

Capítulo 3: Determinación de los movimientos inducidos por la excavación del túnel

3.1 Introducción

Para poder registrar y controlar los posibles movimientos, tanto en superficie como en profundidad, producidos por la excavación del túnel, se ha implantado un conjunto de instrumentación a lo largo de toda la traza del túnel.

Posteriormente, con los datos extraídos de esta instrumentación y utilizando una base teórica, que se detallara más adelante, se determina una aproximación de la cubeta de asientos y un valor de la pérdida de volumen.

Gran parte de lo expuesto en este capítulo, se ha extraído de: Orfila, T. Moyà, N. y Della Valle, N. (2006). Gestión de la excavación con escudo a presión de tierra para la atenuación de asientos en superficie. Experiencia en suelos granulares bajo el nivel freático. 32ª Jornada sobre Obras de Interés Geotécnico, 28 de noviembre de 2006.

3.2 Instrumentación utilizada

Hay que remarcar que dentro de la instrumentación se engloban, tanto la instrumentación topográfica, utilizada para determinar los movimientos en superficie y los movimientos de las estructuras próximas a la traza del túnel, como la instrumentación que se encuentra en el interior del terreno.

3.2.1 Instrumentación topográfica

3.2.1.1 Instrumentación topográfica en superficie

La instrumentación topográfica que se instala en la superficie del terreno tiene la finalidad de registrar las deformaciones superficiales. Además, de ser las encargadas de las correcciones que hay que hacer sobre la instrumentación que hay en el terreno.

La instrumentación topográfica de superficie consta de dos tipos de hitos distintos. Uno de ellos es un hito de nivelación, el cual nos da los movimientos en el eje z (vertical). El siguiente hito, es el que se denomina combinado, ya que permite registrar los movimientos verticales y los horizontales.

En el caso de los hitos de nivelación, además, se utilizan para nivelar la zona superior de los extensómetros y así corregir los datos registrados con este tipo de instrumentación. Mientras que, con los hitos combinados se corrigen los movimientos verticales y horizontales, y así determinar los desplazamientos horizontales "reales" que se extraen de los inclinómetros.

3.2.1.2 Instrumentación topográfica en las estructuras próximas

En este caso la instrumentación utilizada se encuentra instalada en las propias estructuras y así poder ver las afecciones que la construcción del túnel produce sobre ellas.

Esta instrumentación consiste en una serie de prismas topográficos, atornillados a las fachadas de los edificios o estructuras de las cuales se quiere determinar los movimientos. Las medidas sobre estos prismas permiten conocer los movimientos en las tres direcciones del espacio.

La colocación de estos prismas a diversas alturas permite determinar las variaciones en la inclinación. En el caso de no ser posible se completa la instrumentación mediante bases clinométricas.

3.2.2 Instrumentación del terreno

Este tipo de instrumentación se suele agrupar formando una sección de control "tipo" (Figura 35). Estas secciones de control están formadas por un extensómetro a dos metros por encima de la clave del túnel, un par de inclinómetros, uno a cada lado del túnel, hasta una profundidad superior a tres metros la solera del túnel y un par de extensómetros, uno a cada lado del túnel y exteriores a los inclinómetros.

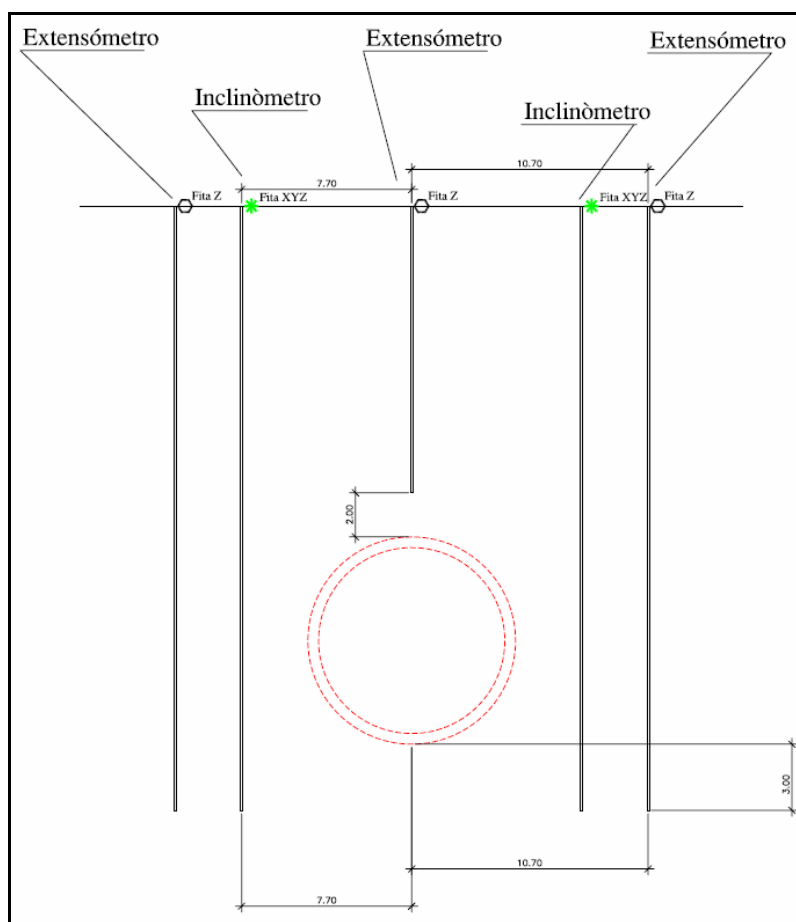


Figura 35. Esquema de la sección tipo.

Gracias a estos instrumentos, se consigue determinar los movimientos inducidos por la excavación del túnel, tanto en dirección vertical (extensómetro) como en horizontal (inclinómetros) en diferentes profundidades.

Además, gracias a los datos que se obtienen de los extensómetros y los inclinómetros, se puede determinar la pérdida de volumen que se genera en profundidad, que posteriormente se relacionara con la generada en superficie.

3.3 Lectura de datos

Las lecturas de los instrumentos se realizan con periodicidad variable, en función de la posición de la máquina. A continuación se muestran la frecuencia de medida en la situación en la que la máquina esta situada, entre los 200 metros antes de llegar a la sección de control y los 100 metros posteriores a la sección de control (Tabla 7).

Cabe destacar que esta es la situación en la que se registran los mayores movimientos.

Instrumento	Nivelación	Topografía Horizontal	Piezómetro	Inclinómetro	Extensómetro	Clinómetro
Frecuencias de lectura	Diaría	Semanal	Diaría	Dos veces por semana	Diaría	Diaría

Tabla 7. Frecuencias de lectura de datos.

3.4 Determinación de la cubeta de asientos y la pérdida de volumen

3.4.1 Base teórica

3.4.1.1 Método de Peck para la estimación de la cubeta de asientos

El método descrito por Peck (1969) se basa en una hipótesis fundamental, que aproxima la curva de asientos transversales al túnel, a una distribución expresada por una campana de Gauss invertida.

Esta curva (Figura 36) queda definida geoméricamente por una serie de parámetros que se definen teniendo en cuenta que el área encerrada por la mencionada campana de Gauss será igual a la variación de la sección experimentada por la excavación (llamada pérdida de suelo y expresada generalmente como V_L). Este parámetro equivale a la superficie encerrada por la curva por unidad de longitud y se expresa mediante la expresión (1):

$$S_V = S_{\max} \cdot e^{\left(\frac{-y}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

Donde:

- S_V es el asiento en abcisa y (distancia horizontal a la vertical del eje del túnel).
- S_{\max} es el asiento máximo en superficie (en la vertical del eje del túnel).
- y es la abcisa medida desde la vertical de la clave del túnel.
- i es la abcisa del punto de inflexión de la campana de Gauss.

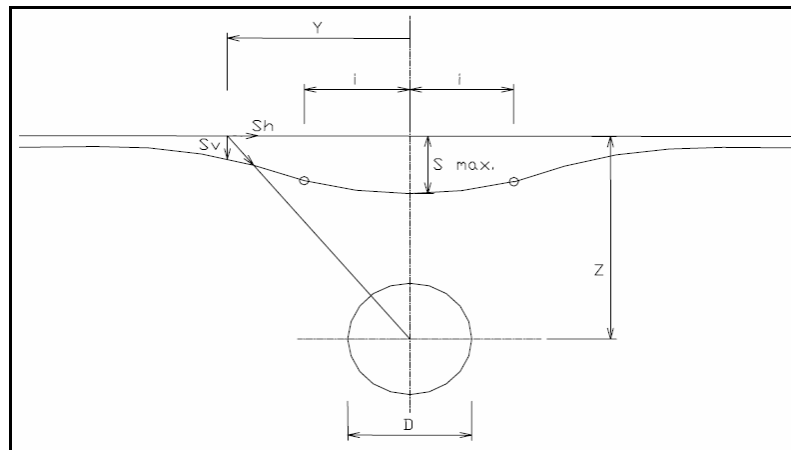


Figura 36. Geometría de la cubeta de asientos generada por la excavación según Peck.

• Parámetro i

El parámetro i , define la abscisa del punto de inflexión respecto de la vertical del eje del túnel. Gracias a este parámetro se puede definir la zona de la cubeta en la que la inclinación del terreno será mayor y por tanto, donde los daños en las estructuras pueden ser más importantes. Además, mediante este parámetro se define la zona de compresión (arrufo), comprendida entre $-i$ e i , de la zona de tracción (quebranto).

Según las observaciones empíricas de *O'Reilly* (1982) y *New* (1991) se estableció una expresión (2) para aproximar el parámetro i como una función lineal con la profundidad del túnel.

$$i = K \cdot H \quad (2)$$

Donde:

H representa la profundidad del eje del túnel respecto de la superficie.

K es un parámetro que depende del tipo de terreno. Los valores de K oscilan entre 0,25 (en suelos granulares) y 0,50 (en suelos cohesivos).

Los asientos en profundidad, tal y como se ha demostrado empíricamente, muestran cubetas mucho más planas, con lo cual se deduce que el valor de K aumenta con la profundidad. Es por eso que *Mair*, *Taylor* y *Bracegirdle* (1993) definieron la expresión (3):

$$i = K \cdot (H - Z) \quad (3)$$

Donde Z representa la profundidad del plano en el que se fija i y el valor de K , creciente con la profundidad, se puede estimar mediante una nueva expresión (4):

$$K = \frac{0,175 + 0,325 \cdot \left(1 - \frac{Z}{H}\right)}{1 - \frac{Z}{H}} \quad (4)$$

3.4.1.2 Pérdida de volumen

De las propiedades de la curva de *Gauss*, puede considerarse que el asiento máximo sobre la vertical del túnel puede expresarse en función de la pérdida de volumen (área encerrada en la curva) y el parámetro i , mediante la siguiente expresión (5):

$$S_{\max} = \frac{V_s}{2,5 \cdot i} \quad (5)$$

Donde V_s es la pérdida de volumen, que se puede expresar como (6):

$$V_s = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot A \quad (6)$$

Siendo A el área de la sección excavada y $\Delta V/V_0$ la pérdida de suelo referida en tanto por ciento.

3.5 Aproximación de la cubeta teórica a partir de los asientos medidos *in situ* y determinación de la pérdida de volumen

Según la base teórica desarrollada en el apartado anterior, se ha podido observar como la curva teórica de *Peck* queda totalmente definida a partir de los parámetros i y S_{\max} . A su vez, y teniendo en cuenta las expresiones anteriores, podemos, también, definir la cubeta a partir de los parámetros K y V_s (además de los parámetros geométricos de la excavación).

Teniendo en cuenta estas hipótesis, se define el procedimiento por el cual se podrán aproximar los asientos medidos por los hitos de nivelación a una curva teórica de asientos, estimada según el método de *Peck*.

En primer lugar, se representan los valores medidos con los hitos de una misma sección de control. A continuación, se ajusta la curva teórica a partir de la variación de los parámetros K y V_s . La variación del parámetro K está relativamente limitada, dado que el terreno no es lo suficientemente variable para que el parámetro K varíe de forma considerable en un tramo de dimensiones reducidas y geología uniforme. Teniendo en cuenta esta última hipótesis, se deberá limitar la variabilidad del parámetro del terreno y el parámetro que gozará de mayor libertad para ajustar la curva teórica a los valores de los hitos, será la pérdida de volumen (V_s).

3.6 Conclusiones

En este apartado se ha intentado mostrar, de forma clara, una de las muchas maneras que hay para determinar la geometría de la curva de asientos, y como determinar el valor del parámetro de la pérdida de volumen.

En la práctica, la determinación de la geometría de la curva de asientos y de la pérdida de volumen tiene una gran importancia, ya que en primera instancia, en el caso de la curva de asientos, conseguimos determinar la zona susceptible de movimientos. Además de cuantificar la magnitud de estos posibles movimientos y encontrar la zona potencialmente más desfavorable para las estructuras que se encuentran en las inmediaciones del túnel, que es la que se encuentra en las proximidades del punto de inflexión (i).

Mientras que, la gran importancia que tiene la determinación de la pérdida de volumen, no únicamente es por la de posibilitar la obtención de la curva de asientos, sino que, es un parámetro muy extendido en el ámbito de túneles para dar una idea o "cuantificar" los posibles asientos que se van a producir. De esta forma, además, el valor de la pérdida de volumen es un parámetro que se utiliza para mostrar la calidad con la que se ha realizado la construcción del túnel. En consecuencia, en muchos proyectos de túneles se encuentra delimitado el valor de la pérdida de volumen que se puede causar. Siendo muy habitual el valor de el 1% como cota superior de la pérdida de volumen.