

Monitoreo de los principales parámetros de una máquina tuneladora para el control de asentamientos durante la excavación en una zona urbana

Diana GUTIÉRREZ UCLÉS^{a,1} and Carlos David MARTÍNEZ ZARAZUA^a

^a*Lumbreras y Túneles S.A de C.V.*

Resumen. Durante la construcción de un túnel urbano mediante una máquina tuneladora, es necesario llevar el monitoreo de los principales parámetros que influyen en la generación de asentamientos en superficie durante el paso de la TBM, para el monitoreo es necesario dar seguimiento puntual y en tiempo real a la presión de tierras en el frente de excavación y la presión de inyección de mortero durante la salida del anillo del escudo, siendo estas las etapas más críticas durante el proceso constructivo. En este artículo se presenta el análisis de los valores obtenidos durante la excavación de la Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara y los asentamientos que se presentaron al paso de la máquina tuneladora.

Palabras Clave. Túnel, tuneladora, parámetros, asentamientos, control, mortero, inyección, bentonita, EPB, TBM, presión de tierras, zona urbana.

1. Introducción

1.1. Descripción general del proyecto

El Proyecto de la Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara forma parte de un metro del Transporte Ferroviario Multimodal de 21.45 km que se compone de tres frentes, dos viaductos y un tramo subterráneo. Éste último, tiene una longitud de 5.35 km y está constituido por dos trincheras, una entrada y una de salida, cinco estaciones subterráneas, tres salidas de emergencias y un Centro de Tránsito Modal (CETRAM). Para la construcción del túnel se empleó una máquina tuneladora con un diámetro de excavación de 11.55 m, una longitud de escudo de 12 m y una longitud de back up de 120 m. El revestimiento está constituido de 6 dovelas más una pieza clave con un espesor de 0.38 m, 1.80 m de longitud y una resistencia a la compresión f_c de 400 kg/cm².

1.2. Geología regional de la Ciudad de Guadalajara

El municipio de Guadalajara se localiza dentro de la cuenca del Valle de Atemajac, debido a sus características topográficas y climatológicas en la Zona Centro de

¹ M.I. Diana Gutiérrez Uclés, Lumbreras y Túneles S.A. de C.V., Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara, Supervisor de EPB, Guadalajara, Jalisco, diana.ucles@lytsa.com.mx

Guadalajara predomina una estratigrafía típica, la cual se puede resumir en estratos de arena pumítica, caracterizada localmente como arenas limosas, o arenas jalosas, de espesor variable con compacidad baja; la cuales suelen aumentar proporcionalmente con la profundidad. Subyacentemente a estos estratos, predomina la presencia de un macizo rocoso de basalto de resistencia muy blanda y un grado de meteorización variable [1].

2. Proceso de excavación

El proceso de excavación del túnel se llevó a cabo mediante una tuneladora, T.B.M. (Tunnel Boring Machine) en modo EPB (Earth Pressure Balance). El principio fundamental del modo EPB es lograr el equilibrio entre la presión existente del terreno excavado y la presión que ejerce la máquina, minimizando las posibles alteraciones al terreno circundante [2].

Para el seguimiento, control y monitoreo de la excavación se utilizó un software especializado que permite visualizar en tiempo real los parámetros de excavación y detectar errores de operación que afecten la estabilidad del túnel (Figura 1). Para fines de este trabajo solo se tomaron en cuenta los parámetros que están relacionados con la generación de movimientos en superficie durante el proceso de excavación (presión de tierras, mortero y bentonita). Los umbrales de control fueron establecidos previamente en la hoja de seguimiento de excavación (dependientes del tipo de suelo, nivel de aguas freáticas, profundada a excavar y condiciones específicas del lugar).

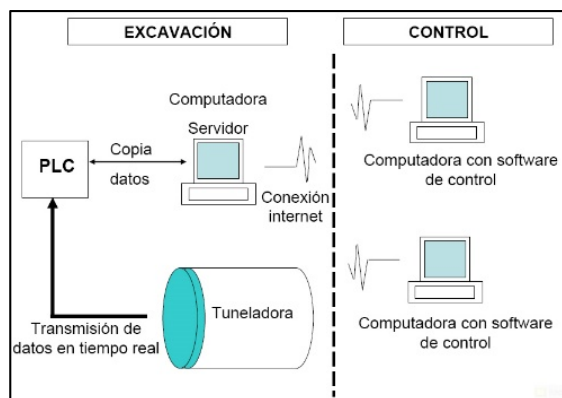


Figura 1. Esquema del procesamiento de datos [3].

3. Deformaciones

Los cambios derivados de la construcción de un túnel producen alteraciones en el estado de esfuerzos del suelo, mismas que pueden originar problemas de estabilidad y traducirse en deformaciones que van del rango elástico a la falla. Para predecir y limitar las deformaciones es necesario identificar los mecanismos asociados a la formación de asentamientos derivados de la excavación de un túnel [4].

Las deformaciones durante el proceso de excavación tienen lugar en 5 diferentes etapas (Figura 2):

Deformación previa a la llega del escudo: movimiento superficial que ocurre dentro de la zona de influencia por delante del escudo y es causada por la perturbación generada en el terreno.

Deformación del suelo en el frente de excavación: ocurre a la llegada del escudo y es debido a la relajación de esfuerzos en el medio y la reducción del esfuerzo principal menor a casi nulo.

Deformación radial del suelo en el escudo de la TBM: se debe principalmente al seccionamiento cónico que presenta el escudo y la sobreexcavación.

Deformación radial del suelo en el revestimiento: debido a la diferencia que existe entre la sección excavada y el revestimiento (espacio anular, también conocido como gap) y depende de una correcta inyección mortero.

Asentamiento a largo plazo: Este asentamiento depende del tipo de suelo y se presenta principalmente en suelos cohesivos-arcillosos o compresibles debido a la consolidación de suelo a largo plazo y creep.

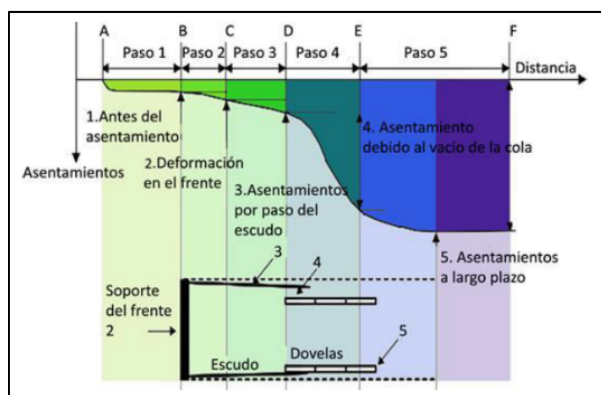


Figura 2. Asentamientos debidos al paso de una máquina tuneladora [5].

4. Parámetros

Para el control de asentamiento debido al paso de la TBM solo se toman en cuenta cuatro parámetros, los cuales se presentan en distintas etapas del proceso constructivo.

4.1. Presión en el frente de excavación

El control de la presión en la cámara de excavación es primordial para minimizar las subsidencias en superficie. La presión de frente es obtenida a través de la geología, la presión hidrostática, la presencia de edificios próximos al paso de la tuneladora y la sobrecarga que esto implica. Por lo anterior, es de vital importancia tener esclarecido las condiciones del terreno y los probables mecanismos de falla que se pudieran presentar, siendo esta la base fundamental para establecer los valores de los umbrales de control para el seguimiento de la excavación.

El sistema de equilibrio de presión de tierras esta interrelacionado con el volumen de material extraído mediante el tornillo sinfín, es decir, se debe establecer un equilibrio entre el material que entra a la cámara de excavación y el que es extraído sin generar pérdida de presión. La máquina dispone de detectores de presión en la cámara y tornillo

cuyas lecturas permiten el monitoreo de la presión de soporte ejercida por el escudo en tiempo real.

4.2. Presiones radiales en el escudo de la TBM

Los asentamientos que tienen lugar en el escudo de la TBM están relacionados con la sobreexcavación efectuada por la sección cónica del escudo (diseñada para facilitar el avance y evita un atascamiento debido a la relajación de esfuerzos). Para minimizar los movimientos que se generan debido a las presiones radiales, durante la excavación se realiza la inyección de bentonita en el escudo que proporcionan un sostenimiento positivo entre la cabeza de corte y el escudo, disminuye la fricción entre el escudo y el material circundante y facilita el avance efectivo de la TBM.

4.3. Deformación en la cola del escudo

La diferencia que existe entre el escudo y el revestimiento definitivo es el causante de los mayores asentamientos durante la construcción de un túnel con TBM, lo anterior es correcto siempre y cuando se tenga un buen manejo de presiones en el frente de excavación. Es importante señalar que se debe tener un control minucioso del volumen de mortero inyectado, ya que este debe ser correlacionado con el volumen teórico y la medición sistemática del mismo es fundamental para controlar los asentamientos en superficie. Un volumen de inyección significativamente más alto que el calculado puede representar una sobreexcavación o bien, una dispersión del material en una cavidad preexistente en el terreno natural.

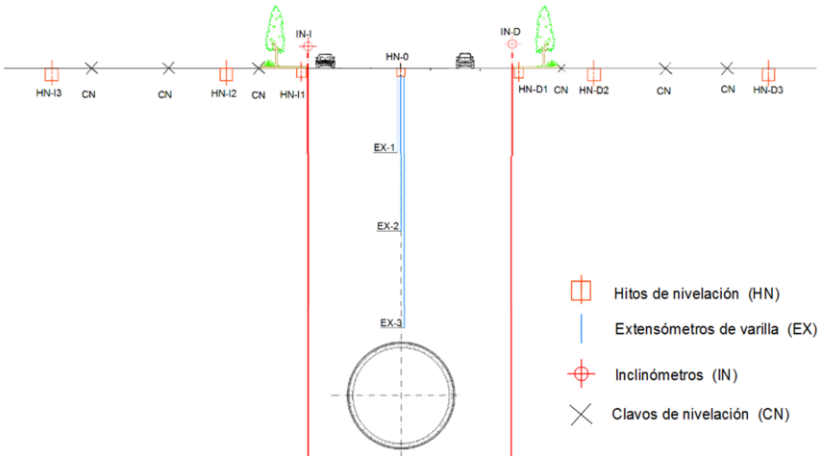


Figura 3. Arreglo típico de una Sección de Control.

5. Análisis de asentamiento en zona urbana

Para el análisis de asentamientos, se tomaron en cuenta los datos obtenidos durante la excavación del segundo intertramo (Alcalde-Catedral 10+455-11+260) del Proyecto de la Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara; compuesto por 18 Secciones de Control y la información recopilada de 587 anillos.

El arreglo típico de una Sección de Control incluye 7 Hitos de Nivelación (uno al eje y tres a cada lado), 3 Extensómetros de Varilla (a diferentes profundidades), Clavos de Nivelación para el monitoreo de edificios aledaños y en algunos casos la instalación de 2 Inclínómetros (uno por lado) para medición de deformación del terreno en profundidad o dos Piezómetros (en suelo y roca) para el control del nivel freático (Figura 3).

5.1. Presión en el frente de excavación

El inicio del análisis de asentamiento comienza en la cabeza de corte con la presión en el frente. En la Figura 4 se muestra la gráfica con las presiones de tierra en la clave, la línea verde indica la presión de referencia establecida en las hojas de seguimiento; mientras que, los puntos representan las lecturas registradas durante el avance. Se puede observar que al inicio y al final existe una mayor dispersión debido a la presencia de las estaciones (zona que posteriormente serían excavadas), sin embargo, la zona de interés, ente los anillos 600 y 1050 presentan lecturas próximas al umbral verde.

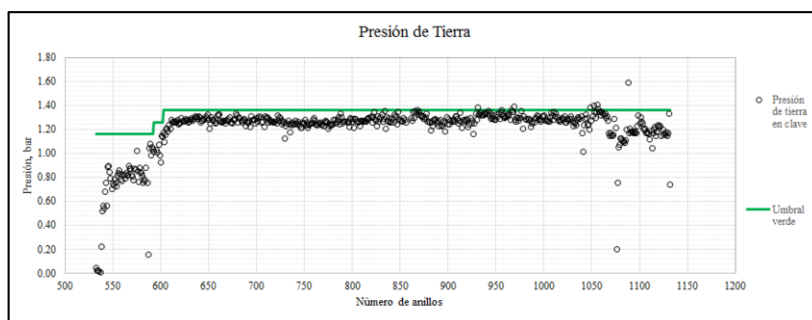


Figura 4. Gráfica de presión de tierras en la clave.

5.2. Presiones radiales en el escudo de la TBM

Para minimizar los asentamientos debido a las presiones radiales del escudo, durante la excavación se realizó la inyección de bentonita, el volumen promedio por anillo oscilo entre 0.50 y 3.00 m³, siendo el volumen de referencia de 2.00 m³ (Figura 5). Aunque la variación es amplia, no se presentaron asentamientos significativos debidos a este parámetro.

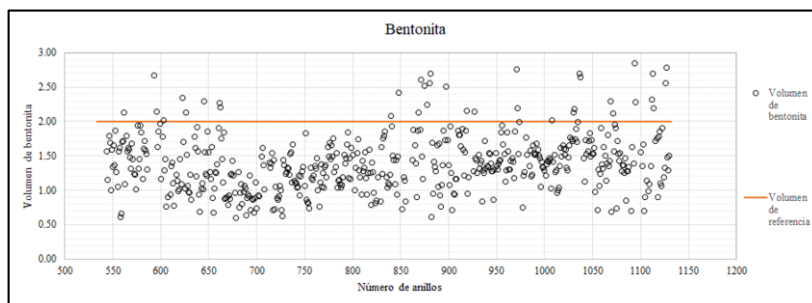


Figura 5. Volumen de inyección de Bentonita.

5.3. Deformación en la cola del escudo

Para el análisis del comportamiento de los parámetros de la cola del escudo se deben analizar dos variables: el volumen adecuado de mortero inyectado y la correcta presión de inyección de mortero, ambos influyen significativamente en los asentamientos. El volumen de inyección de mortero no debe ser menor al volumen teórico estimado, de ser así, las oquedades dan lugar a la generación de asentamientos. Por otro lado, la presión con la que es inyectado el mortero, deber estar por encima de la presión de la cámara de excavación para lograr vencer la presión que ejerce el suelo y permitir la entrada de material en el espacio anular.

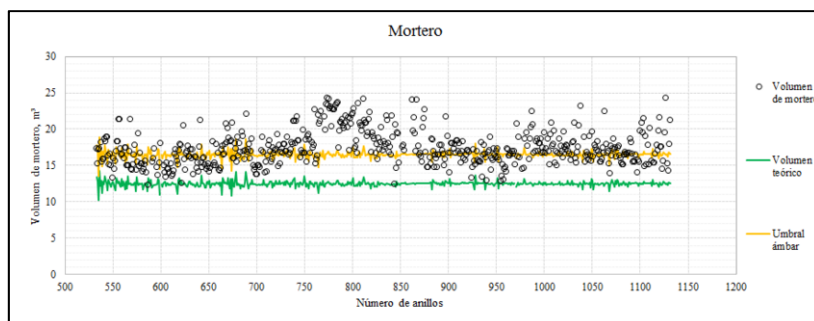
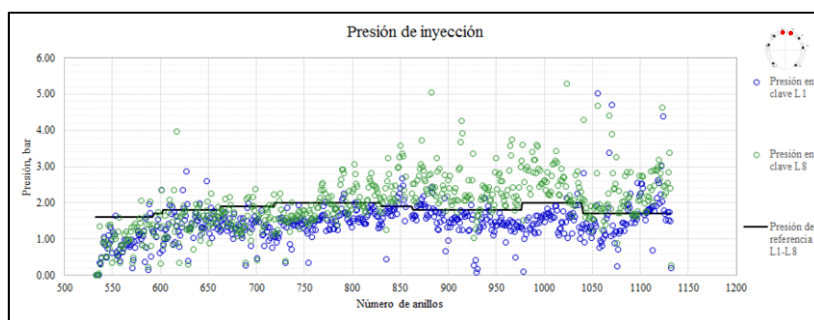
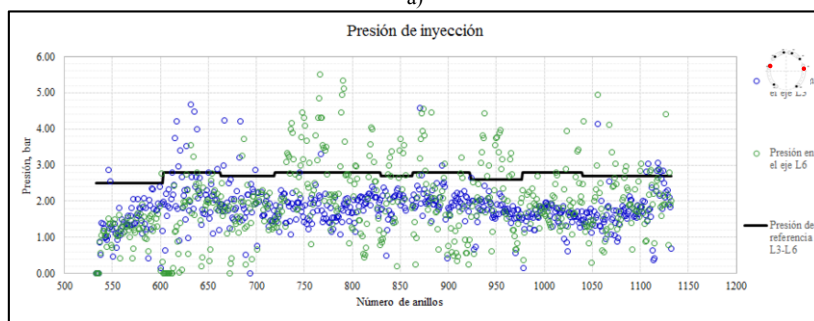


Figura 6. Volumen de inyección de Mortero.



a)



b)

Figura 7. Presiones de inyección de mortero: a) presión de inyección en la clave b) presiones de inyección en el eje.

Durante la excavación las presiones de inyección del mortero se mantuvieron por debajo de la línea de referencia, sin embargo, el volumen de inyección fue mayor al volumen teórico (Figura 6), lo que indica que las presiones bajas no afectaron el ingreso de material en la zona del gap (Figura 7). Cabe destacar que el volumen de mortero inyectado y los umbrales de control depende del avance efectivo de cada anillo.

5.4. Asentamientos en superficie.

Durante el proceso de excavación se realizó seguimiento topográfico minucioso de los movimientos reflejados en superficie, la frecuencia de lectura daba inicio 50 m y aumentaba hasta 3 lecturas por día cuando la máquina se encontraba posicionada en la Sección de Control de acuerdo con el Plan General de Instrumentación [6].

En la Figura 8 se muestra el perfil de asentamiento producido durante el paso de la TBM en una Sección de Control, como se puede apreciar, a la llegada de la TBM no se presentan perturbaciones significativas en los instrumentos; los movimientos comienzan a registrarse una vez que la TBM se encuentra en la Sección de Control, sin embargo, los mayores movimientos se registran durante la salida del anillo y la inyección de mortero en el espacio anular.

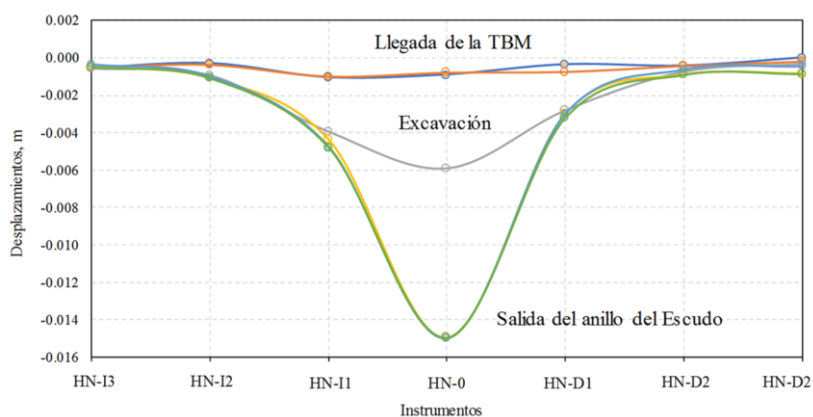


Figura 8. Perfil de asentamientos de una Sección de Control, Hitos de Nivelación.

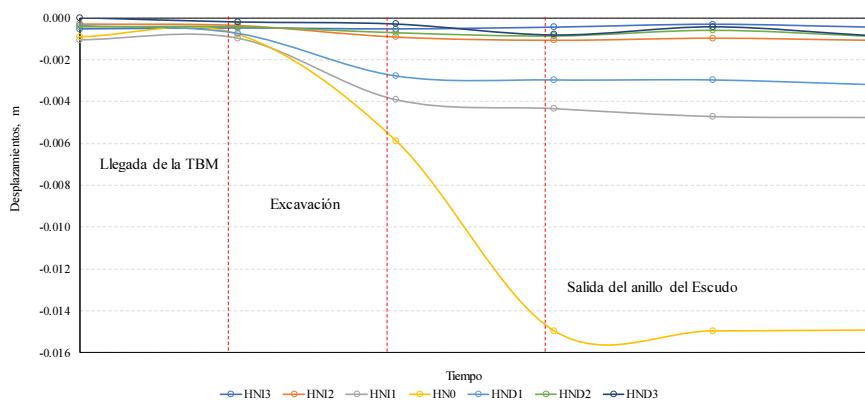


Figura 9. Asentamientos en función del tiempo de una Sección de Control, Hitos de Nivelación.

En la Figura 9 se muestran los movimientos registrados en los Hitos de una Sección de Control respecto al tiempo, lo cual esclarece el comportamiento y se identifican perfectamente las 3 etapas del proceso constructivo: la pequeña perturbación debido a la llegada de la TBM, durante el proceso de excavación se aprecia un ligero asentamiento y el mayor movimiento se puede apreciar durante la salida del anillo del escudo. También se puede observar que el Hito central (HN0) es el que sufre mayor movimiento, seguido de los hitos izquierdo HN-I1 y derecho HN-D1.

Con el fin de mostrar el comportamiento que presentan los instrumentos de las 18 Secciones de Control durante el paso de la TBM, en la Figura 10 se muestran los asentamientos registrados en los instrumentos en función del tiempo. En algunas de las secciones se presentaron pequeños movimientos positivos, sin embargo, el comportamiento generalizado de las secciones obedece las mismas condiciones.

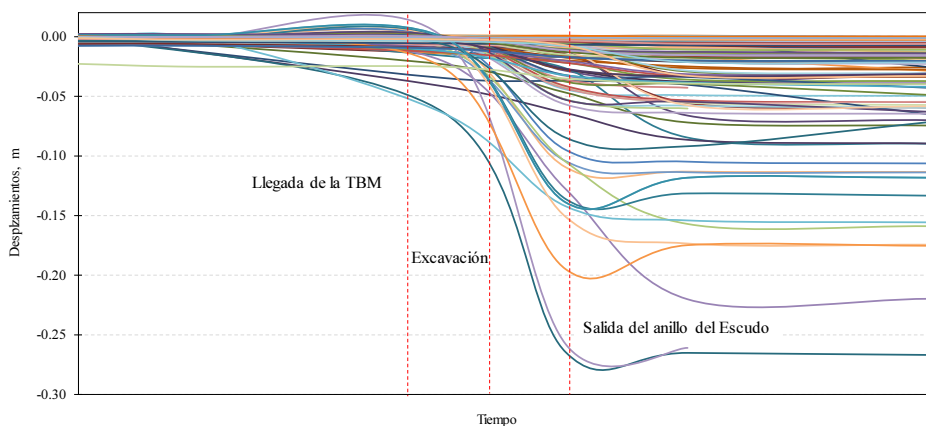


Figura 10. Conjunto de perfiles de asentamientos del intertramo.

6. Comentarios finales

Como se pudo apreciar en el desarrollo de este documento, los asentamientos producidos durante la excavación de un túnel se desarrollan en tres diferentes etapas, sin embargo, un adecuado control de presión de tierras (frente de excavación) y una buena inyección de mortero (en la cola del escudo) son cruciales en la mitigación de movimientos en superficie. Es importante señalar que, para dar seguimiento puntual, es de vital importancia contar con las herramientas necesarias y personal capacitado para analizar en tiempo real los parámetros de excavación en cada anillo.

Es importante realizar una campaña de exploración exhaustiva para tener esclarecidas las condiciones geológicas y los parámetros geotécnicos del sitio, debido a que son parte fundamental para establecer los valores de los umbrales de control y las presiones de referencia.

El desarrollo del estudio de los parámetros de la TBM, junto con los datos de medición de la instrumentación en superficie fue posible mediante la “Metodología para el análisis de los parámetros de la excavación mecanizada del túnel en tiempo real y su interacción suelo y estructuras vecinas” que la empresa Lumbreras y Túneles S.A de C.V certificó en ISO 9001:2015, siendo la primera empresa de Supervisión en Latinoamérica.

Referencias

- [1] SENER Grupo de Ingeniería, S.A. (2014). Informe de Campaña Geotécnica Complementaria del Proyecto TEU Guadalajara.
- [2] SENER Grupo de Ingeniería, S.A. (2015). Documento descriptivo del proceso constructivo y cálculo estructural de la obra subterránea del Proyecto TEU Guadalajara
- [3] Comulada M & Maidl, U. (2014). Control de procesos y gestión de datos para la excavación de túneles con tuneladora.
- [4] San Román O. (2017). “Análisis de medidas de protección en túneles”, Posgrado UNAM., México
- [5] Sugiyama T., Hagiwara T., Nomoto T., Nomoto M., Ano Y., Mair R.J., Bolton M.D. & Soga K. (1999): Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension - East London, Soils and Foundation, Vol. 39, No.3, pp. 99-112. Japanese Geotechnical Society.
- [6] Consorcio Túnel Guadalajara S.A.P.I. de C.V., Vorsevi Soldata. (2016), Plan General de Auscultación para estaciones y túnel INST2-PGA001 Rev. 3.