



Estudio de la instrumentación y métodos de monitoreo en el terreno y estructuras durante la construcción de túneles convencionales y mecanizados

Artículo presentado en el 6o Simposio Internacional de Túneles y Lumbreras en Suelos y Rocas.

Ángel CASTRO
Sixense México
Ciudad de México, México.

Damien TAMAGNAN
Sixense México
Ciudad de México, México.

Resumen

La ingeniería geotécnica, en particular el área de túneles y obras subterráneas, ha dado gran importancia en años recientes a la utilización de instrumentos de medición *in situ* y técnicas *ex situ* para la determinación del comportamiento del subsuelo y las estructuras circundantes alrededor de una obra. Además, por medio de los datos recolectados, es posible verificar la hipótesis de diseño y mantener vigilados los umbrales permisibles de comportamiento. En el presente trabajo, se aborda de manera general el uso de los distintos métodos e instrumentos de medición para túneles de construcción convencional y de tipo mecanizado, considerando los fenómenos asociados con el comportamiento del terreno durante la construcción de estas obras. Finalmente, se hace énfasis en una propuesta de metodología para ayudar en la elección de los instrumentos y métodos observacionales para una obra subterránea.

1. Introducción

1.1. Instrumentación geotécnica en túneles

La ingeniería geotécnica, en el área de túneles y obras subterráneas, se puede definir como una de las ramas de la ingeniería que existe en dos principales campos: un mundo teórico donde, con base en distintas hipótesis y generalizaciones, se puede llegar a formulaciones numéricas que predicen, dentro de un margen de error, el comportamiento del terreno donde se ejecuta una obra particular; y un mundo práctico, en donde los distintos fenómenos observados directamente en campo se pueden describir de manera general en términos cualitativos. E. DiBiagio (2013) describe a la instrumentación como el enlace existente entre el mundo teórico y el mundo práctico.

La instrumentación y los sistemas de monitoreo deben entenderse en dos aproximaciones. La primera de ellas es con la finalidad de organizar observaciones en los distintos

cambios geológicos, para determinar la línea base y poder predecir el inicio de cambios que representen un riesgo para la estructura en construcción o ya construida. La segunda es monitorizar parámetros técnicos y operacionales de la estructura en construcción, de forma directa o indirecta, para determinar y predecir procesos destructivos y poder evaluar la estabilidad.

En este artículo se presentan los distintos métodos de monitoreo y los instrumentos asociados a la medición de los fenómenos presentes durante la construcción túneles y obras subterráneas.

1.2. El método observacional

El método observacional descrito por Spross (2017) toma en consideración dos partes fundamentales, que incluyen la instrumentación y recolección de información cuantitativa y fiable del lugar para elaborar un prediseño adecuado; y la parte de seguimiento durante la construcción. Esta última es fundamental para la aplicación del método, debido a que gracias al sistema de monitoreo empleado, es posible realizar iteraciones hasta encontrar el diseño verdaderamente óptimo.

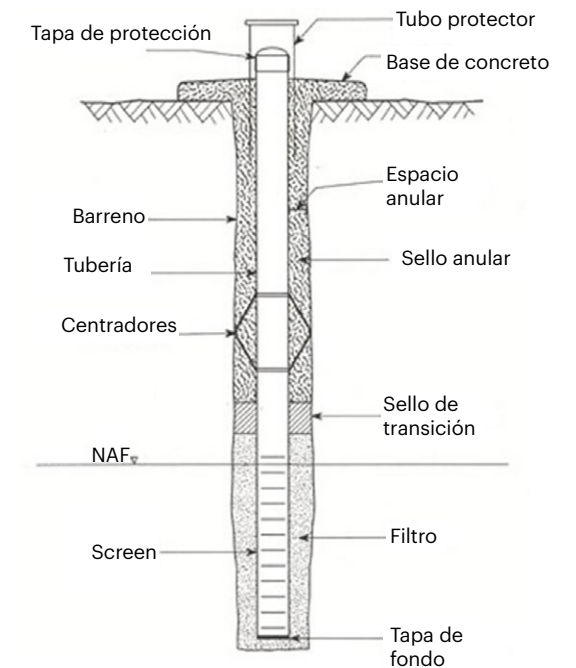
El método observacional, también llamado método experimental por el propio Terzaghi, se basa en los puntos listados a continuación: 1) basar el diseño inicial en toda la información con la que se puede contar; 2) realizar un inventario detallado de todas las posibles diferencias entre la realidad y las suposiciones; 3) ejecutar un primer cálculo basado en las suposiciones derivadas de la información recolectada originalmente; 4) medir en campo los fenómenos en los cuales se basa el primer cálculo y comparar con lo computado originalmente y finalmente; 5) iterar en un nuevo cálculo con la información medida. Este último paso debe repetirse hasta que, con ayuda de la data obtenida con instrumentos, la diferencia entre los datos de campo y los datos de cálculo se conviertan en verdadero conocimiento acerca del comportamiento del terreno y las estructuras circundantes Patel (2006).

En el presente artículo, se ha decidido presentar de forma breve la importancia de la instrumentación en las obras subterráneas y su relación con el método observacional, debido a que en las secciones siguientes se expondrán los distintos fenómenos teóricos, durante la construcción de un túnel o una obra subterránea, y la manera en que estos son medibles con ayuda de los instrumentos actualmente disponibles en el mercado.

2. Instrumentación y métodos de medición

2.1. Clasificación de instrumentación

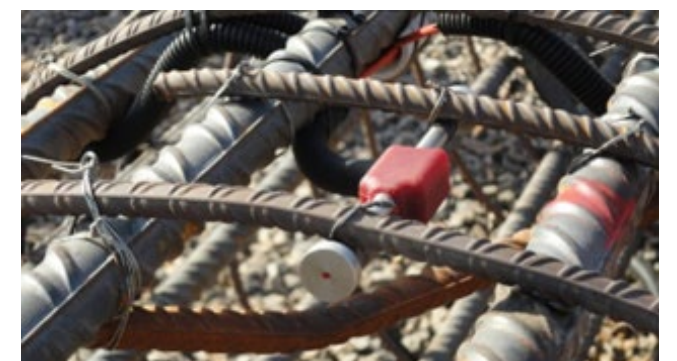
Es importante tener un orden para abordar la gran cantidad de instrumentos existentes en el mercado. Debido a esta situación, se selecciona la clasificación propuesta por Dunicliff (1988), categorización que a pesar de tener mucho tiempo de existir nos proporciona una visión general para ordenar los tipos de sensores, lo anterior basándose en el hecho de que los sistemas de instrumentación consisten de 3 principales partes: 1) un transductor, 2) un sistema de adquisición y 3) un sistema de comunicación entre los dos anteriores.



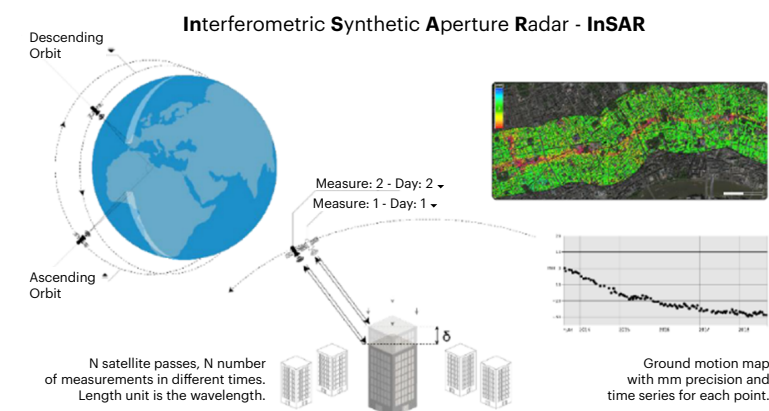
▲ Figura 1. Diagrama de instalación de un pozo de observación.



▲ Figura 2. Estación total robotizada en interior de túnel para medición de convergencias.



▲ Figura 3. Strain gauge para medición de deformaciones, instalado en armadura de acero.



▲ Figura 4. Diagrama de funcionamiento del sistema InSAR.

2.1.1. Transductores mecánicos

Los transductores mecánicos son los elementos esenciales de conversión de un fenómeno físico a una medición ingenieril, estos responden a cambios físicos del estado de un sistema y proporcionan una salida de una forma distinta.

Los transductores mecánicos más comunes son los diales y los micrómetros. Algunos de los ejemplos de estos transductores se encuentran en medidores de juntas mecánicas, medidores de convergencias, *tiltmeters* mecánicos, extensómetros fijos, etc. Uno de los principales problemas de los instrumentos con este tipo de transductores es el inherente a su construcción y la susceptibilidad a la entrada de polvo entre los engranajes del mecanismo.

2.1.2. Transductores hidráulicos

El sistema de transductores hidráulicos de tubo Bourdon es uno de los más utilizados en instrumentos geotécnicos; los manómetros creados con este funcionamiento sirven para medir presiones de nivel medio a nivel alto. Los instrumentos que utilizan más comúnmente este sistema son los piezómetros hidráulicos, las celdas de carga hidráulicas y algunas unidades de lecturas para transductores neumáticos.

El funcionamiento se basa en un tubo curvo de forma espiral, el cual se mueve hacia afuera cuando la presión dentro del tubo es mayor que la presión externa, y hacia adentro cuando la presión interna es menor. El movimiento descrito es proporcional a la presión a medir y se acopla a un mecanismo con puntero Webster (2014).

2.1.3. Transductores eléctricos

Los transductores eléctricos consisten de dos principales partes, un elemento primario de medición referido a un sensor, y una unidad de transmisión, la cual produce una señal eléctrica y tiene una relación conocida a la medición física Webster (2014).

Algunos de los más comunes instrumentos eléctricos son los LVDT, *strain gauges*, transformadores diferenciales de corriente continua.

2.1.4. Transductores de cuerda vibrante

Estos se usan en instrumentos para la medición de presión en piezómetros, celdas de presión en tierra, celdas de carga, medidores de asentamiento

de nivel líquido y directamente en *strain gauges* (o galgas extensiométricas) en superficies y embebidos.

El funcionamiento de estos transductores se basa en una cuerda de acero que es sujeta por sus extremos y es tensionada de tal modo que sea posible que vibre en su frecuencia natural. La frecuencia de las vibraciones varía con el esfuerzo producido entre los extremos sujetos. La cuerda de acero está sujeta magnéticamente a una bobina, la cual es utilizada para medir la frecuencia de medición Bordes (1985).

2.2. Métodos de medición indirecta

Además de los distintos instrumentos instalados en sitio para poder entregar una medición directa de los fenómenos a medir, existen métodos de medición indirecta, algunos ejemplos de estos pueden encontrarse principalmente en el monitoreo de desplazamientos de grandes áreas (Kavvadas, 2005).

2.2.1. Estación total robotizada

Las estaciones totales robotizadas pueden medir y rastrear el cambio de posición relativo en puntos específicos a través del tiempo. El sistema se basa en una estación total, con prismas colocados en la zona de influencia de la construcción y un sistema de prismas de referencia afuera del área de influencia, con las cuales se determinan las coordenadas del sistema completo.

2.2.2. Interferometría radar de apertura sintética

La interferometría radar satelital es una técnica de medición no invasiva capaz de medir el movimiento milimétrico del terreno para áreas grandes, tanto en entornos urbanos como no urbanos. La técnica de monitoreo satelital se basa en la explotación de imágenes de radar de apertura sintética (SAR). La imagen SAR es una imagen compleja en el sentido matemático. Contiene información de amplitud y fase. Las soluciones basadas en interferometría SAR (InSAR) utilizan la información de fase de dos o más imágenes SAR adquiridas sobre la misma área en diferentes fechas para calcular la información de desplazamientos de tierra.

3. Fenómenos asociados a la construcción de túneles

Durante la construcción de túneles y obras subterráneas, se producen movimientos y cambios tenso-deformacionales alrededor de las estructuras, tanto las que se encuentran en construcción como las adyacentes a estas. En

lo subsecuente, se tratarán a grandes rasgos los distintos fenómenos en el terreno y el tipo de instrumento existente en el mercado para realizar mediciones de los mismos.

3.1. Medición del nivel del agua

La construcción de túneles produce cambios en la distribución de la presión de poro, derivado de esta situación es importante tener presente tres aspectos; primero, la entrada de agua durante los trabajos de tuneleo impide la correcta ejecución de estos, lo cual resulta en un incremento de costos. Segundo, debido a que las características de resistencia tenso-deformación del suelo circundante están influidas por los esfuerzos efectivos, un cambio en la distribución de la presión de poro durante la construcción del túnel puede afectar la estabilidad a corto y largo plazo. Tercero, el descenso del nivel freático tiene un impacto en las estructuras cercanas, pudiendo producir asentamientos indeseados o no previstos durante el diseño del túnel o las obras subterráneas.

Para la medición del agua en obras subterráneas se tienen dos principales herramientas, los piezómetros y los pozos de observación.

3.1.1. Piezómetros

Son instrumentos geotécnicos que se utilizan para medir presiones de poro en puntos específicos. Estos pueden tener distintos principios de funcionamiento, desde los piezómetros tipo Casagrande con una construcción sencilla, basada en un tubo ranurado en la profundidad a la que se desea medir la presión de poro. Los de tipo resistivos, que hacen uso de cambios en la resistividad de ciertos materiales cuando son sometidos a esfuerzo mecánico, provocando que al pasar una corriente eléctrica, se genere una lectura distinta que se puede interpretar como una medición de la presión de poro. Hasta los de tipo cuerda vibrante, de los más comúnmente utilizados, que hacen uso de la lectura de la frecuencia de una cuerda metálica, previamente calibrada para la toma de lecturas Chungsik (2005).

3.1.2. Pozo de observación

Son instrumentos que ayudan a conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en sitio. La principal diferencia con los piezómetros radica en que los pozos se construyen para captar flujo de agua en prácticamente toda su longitud, mientras que los piezómetros solo capturan las presiones de manera puntual.

3.2. Medición de deformaciones

Uno de los principales parámetros a monitorear durante la construcción de túneles es la deformación del terreno circundante a la excavación, dentro del túnel y en sus diferentes elementos estructurales.

Los objetivos de medición en la deformación de túneles alejados de áreas urbanas y aquellos construidos en áreas densamente pobladas son distintos, aunque comparten algunos puntos. Para túneles alejados, el objetivo principal durante la construcción es que las presiones del terreno y de los elementos de soporte estén bien controladas, es decir, que exista un adecuado margen de seguridad ante colapsos. Los túneles urbanos tienen como objetivo principal el mantener vigilados los desplazamientos del terreno para garantizar que no se verán afectadas las estructuras circundantes, así como los sistemas de servicio del entorno urbano. Para el monitoreo de estas deformaciones, los márgenes suelen ser pequeños en comparación con los de sus homónimos más alejados de áreas densamente pobladas.

3.2.1. Medición de deformaciones al interior de la estructura subterránea

Cuando se hace referencia a las deformaciones al interior de la estructura, se habla de las deformaciones del propio túnel, es decir, de su geometría. Además, se refiere a la deformación de los materiales que conforman la propia estructura, por ejemplo, el armado de acero o el concreto.

3.2.1.1. Deformación de la geometría del túnel

Para la medición de la deformación de la geometría de los túneles y las obras subterráneas, es común la utilización de cinta de convergencias, cuya limitante principal es la propia geometría de la obra a monitorear, pues se debe tener acceso a los puntos de medición físicamente.

Además, existen métodos de medición indirecta para llevar un control de la geometría de las estructuras subterráneas y de los túneles. El más empleado es el de las estaciones totales robotizadas. Estas basan su utilización en una estación total, prismas de referencias, a partir de los cuales se obtienen las coordenadas base, y prismas de control, los cuales funcionan para medir las deformaciones en los distintos ejes de manera puntual.

En fechas recientes, los instrumentos han evolucionado al grado de poder tener una gran automatización. Una parte de estos avances se pueden encontrar en los perfilómetros SAA (*Shape Accel Array*), los cuales permiten tener lecturas en tiempo real del contorno de la geometría del túnel.

3.2.1.2. Deformación de la estructura

En algunos casos, es necesario realizar la medición de la deformación de los distintos elementos que conforman la estructura, como el armado de acero y el concreto, ya sea debido a la validación de un diseño, a la implementación del método observacional, con la finalidad de mejorar en tiempo y costos la construcción, o como parte de un esquema de monitoreo en tiempo real. Para la medición de estos fenómenos estructurales se emplean instrumentos que suelen instalarse de forma embebida durante la construcción de los elementos.

Los *strain gauges* son uno de los instrumentos más empleados para determinar las micro-deformaciones tanto del concreto como del acero que conforman la estructura subterránea, actualmente estos equipos son relativamente fáciles de instalar (Franzius, 2003).

3.2.2. Medición de deformaciones en superficie y en el terreno circundante

La medición de las deformaciones, en superficie o cerca de la superficie en el terreno es de vital importancia en terrenos urbanos, donde el posible daño a estructuras de servicios y edificios debe ser minimizado. Los principales fenómenos asociados en superficie son los asentamientos y emersiones, inclinaciones y desplazamientos laterales.

Típicamente, las mediciones en superficie son realizadas mediante topografía, convencional y automatizada, mediciones InSAR, además de sistemas GPS, como los Geocube2, clinómetros, electroniveles y algunas mediciones adicionales, como las realizadas con medidores de juntas.

El funcionamiento esencial de la topografía automatizada fue descrito en la sección anterior, sin embargo, cabe resaltar que típicamente, las precisiones que este tipo de instrumento puede dar en el monitoreo llega a ser del orden de hasta ± 1 mm en distancias inferiores a 130 m (Kavvadas, 2005).

La interferometría radar satelital (InSAR) es una técnica de medición no invasiva capaz de medir el movimiento milimétrico del terreno para áreas grandes. La técnica de monitoreo satelital se basa en la explotación de imágenes de radar de apertura sintética (SAR). La imagen SAR es una imagen compleja en el sentido matemático. Contiene información de fase de dos o más imágenes SAR adquiridas sobre la misma área en diferentes fechas para calcular la información de desplazamientos de tierra. Las medidas de deformación se basan en la evolución actual de la metodología InSAR llamada *Persistent Scatter Interferometry* (PSI). El algoritmo identifica puntos comunes en cada imagen, que refleja de manera persistente a lo largo del periodo de estudio la señal de radar.

Geocube2 es un sensor basado en un sistema global de navegación por satélite (GNSS) que proporciona un monitoreo de la superficie del terreno y de edificaciones en tiempo real. La red de sensores es capaz de alcanzar precisiones del orden de ± 2 mm en XY y de ± 4 mm en vertical, esto dependiendo de las condiciones en campo.

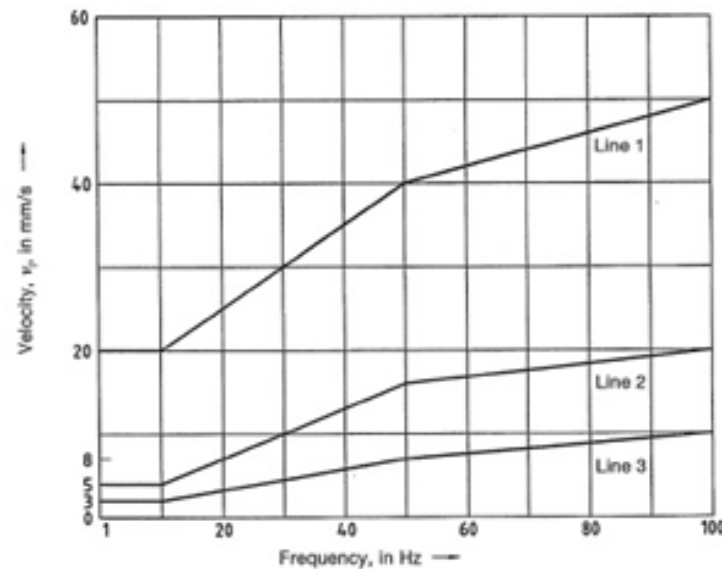
Los clinómetros, también conocidos como *tiltmeters*, consisten en transductores detectores de gravedad, tales como acelerómetros, cuerda vibrante, electroniveles, etcétera. Estos sensores son usados para detectar cambios en la inclinación o rotación de puntos en la estructura. La precisión típica se encuentra en el orden de ± 0.04 mm/m.

Las mediciones de las deformaciones en el terreno circundante son realizadas normalmente en los puntos considerados como críticos o con un valor particular. Los instrumentos considerados para estas mediciones son extensómetros multipuntos, extensómetros de tipo magnéticos, inclinómetros, placas de

Edificios/suelos	Suelto	Medio	Denso
Edificios históricos	2.5	5.0	10
Construcciones actuales	5.0	10	20
Construcciones reforzadas	15	30	50

AITES/ITA (2011).

▲ Tabla 1. Umbrales de velocidades pico de partícula (PPV) para estructuras y tipos de suelos.



▲ Figura 5. Curvas para valores de medición de vibraciones, relación velocidad - frecuencia, (Deutschnorm, 1999).

asentamiento, etc. El funcionamiento detallado de cada uno de los instrumentos comentados escapa a los alcances del presente artículo.

Los extensómetros multipunto suelen instalarse al interior del túnel y se utilizan para la medición de los desplazamientos de las paredes del túnel relativos a un punto fijo respecto a cada una de las barras que conforman el extensómetro. De igual modo, estos suelen instalarse de manera vertical desde la superficie para la medición de los asentamientos. Adicionalmente, las mediciones de los desplazamientos se utilizan para determinar la extensión de la zona de influencia del túnel.

Los extensómetros magnéticos se instalan en barrenos y miden desplazamientos relativos de puntos específicos en el barreno a lo largo de su eje. El funcionamiento de estos implica bajar una sonda, magnética o mecánica y registrar la posición de cada una de las marcas en el barreno.

Los inclinómetros se instalan en barrenos verticales y miden la inclinación en distintas profundidades con ayuda de una sonda que se hace descender por la tubería instalada. La integración de las inclinaciones medidas a lo largo del barreno, con ayuda de la probeta, sirven para determinar los desplazamientos laterales a lo largo del eje relativo del barreno.

3.3. Medición de esfuerzos

A pesar de que no es usual que se determine directamente de la instrumentación un valor de esfuerzos en campo, si es posible determinar con instrumentos que miden de manera precisa las deformaciones, y con base en el conocimiento de los módulos de elasticidad y el área afectada,

entonces calcular el esfuerzo o la fuerza que se aplica de manera puntual.

Tal como se comenta en el párrafo anterior, la determinación de las tensiones puede realizarse de forma puntual, usando instrumentos como los *strain gauges*, los cuales nos dan una micro-deformación. Adicional a esto, es necesario conocer con precisión los módulos de elasticidad de los materiales de los que se desea determinar el estado tensional. Usando un arreglo de varios de estos instrumentos, orientándolos para determinar los esfuerzos aplicados en direcciones específicas, es posible dar una idea general del estado tenso-deformacional de la estructura analizada.

3.4. Medición de vibraciones

Durante la construcción de túneles y estructuras subterráneas, es importante investigar la influencia durante la construcción en las estructuras en la superficie. Las características de las vibraciones en superficie se ven influenciadas por el método constructivo empleado, las condiciones y características del subsuelo y el edificio que se desea monitorear. Existen códigos a seguir, como la Norma DIN-4150 para tomar como referencia durante la medición de las vibraciones en las estructuras.

Para la medición de las vibraciones durante la construcción de obras subterráneas, se emplean acelerómetros en lugares específicos y con filtros que permiten evitar la influencia de agentes externos, tales como los sismos.

4. Conclusiones

El monitoreo y la instrumentación, en el ámbito geotécnico y en particular para obras subterráneas, proporciona un apoyo fundamental para el método observacional. De este modo, es posible reducir costos y tiempos durante la construcción. Además, se puede tener un mejor control de riesgos durante la construcción. El correcto control de riesgos mediante el uso de la instrumentación incluye un programa de monitoreo efectivo y bien planificado previo a la construcción de la obra subterránea, adquisición continua de datos y una retroalimentación constante a partir de los datos cuantificados. Asimismo, proporciona modelos capaces de predecir el comportamiento de las estructuras basados en los datos y la respuesta del subsuelo y análisis inverso.

Es importante recordar las palabras de Ralph B. Peck con respecto a la instrumentación: "la instrumentación, vital para la obtención de respuestas cuantitativas para responder preguntas relevantes, es a menudo mal implementada. Existe el peligro de que la instrumentación sea desacreditada debido a su uso indiscriminado. Ningún instrumento debe ser instalado a menos que tenga por objetivo responder una pregunta técnica específica".

Referencias

- AITES/ITA WG2-Research. (2011). Monitoring and control in tunnel construction. Avignon: ITA Report n°009.
- BORDES, J. L., & DEBREUILLE, P. J. (1985). Some Facts About Long-Term Reliability of Vibrating Wire Instruments. Reliability of geotechnical instrumentation (págs. 20-27). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Chungsik, Y. (2005). Interaction between Tunneling and Groundwater— Numerical Investigation Using Three Dimensional Stress–Pore Pressure Coupled Analysis. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING (págs. 240-250). ASCE.
- Deutsche norm. (1999). Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. Alemania: DIN 4150-3.
- DiBiagio, E. (2013). Field Instrumentation — The Link Between Theory and Practice in Geotechnical Engineering. Seventh international conference on case histories in geotechnical engineering (págs. 1-25). Chicago: commemorate the legacy of Ralph B. Peck.
- Dorofeev, N. V., Grecheneva, A. V., Romanov, R. V., & Pankina, E. S. (2020). The selection of parameters and control points in the geotechnical monitoring system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (págs. 1-8). Atlanta: IOP Publishing.
- Dunncliff, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons.
- Fransius, J. N. (2003). Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence. [tesis de doctorado, Imperial College of Science, Technology and Medicine]. Londres, Inglaterra: Repositorio institucional-Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Górska, K., Muszynsky, Z., & Rybak, J. (2013). Displacement monitoring and sensitivity analysis in the observational method. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXV, N°3, 25-43.
- Kavvadas, M. J. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. ELSEVIER, 93-113.
- Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N., & Maertens, J. (2006). The Observational Method in Geotechnics. Innovative Design Tools in Geotechnics – Observational Method and Finite Element Method, 50-60.
- Segalini, A., Carri, A., & Savi, R. (2017). ROLE OF GEOTECHNICAL MONITORING: STATE OF THE ART AND NEW PERSPECTIVES. Geotekhnika, 1-10.
- Spross, J., & Johansson, F. (2017). When is the observational method in geotechnical engineering favourable? Structural safety 66, 17-26.
- Webster, J., & Eren, H. (2014). Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Boca Raton, FL: CRC Press; Taylor & Francis Group.