

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

IV.1 Celdas de presión

Las celdas utilizadas en la línea 12 del metro son dispositivos con la más alta tecnología en el mercado y el fabricante da una garantía por cada dispositivo que vende, la información correspondiente puede ser consultada en las referencias al final de esta tesis. Antes de cualquier instalación, las celdas deben ser probadas con la unidad de lectura correspondiente una vez que están disponibles en el sitio donde serán colocadas, para que de esta forma se pueda detectar alguna anomalía por fabricación o alguna otra causada durante la importación. Después de verificar su correcto funcionamiento se debe conocer el arreglo en el que serán colocadas, para el caso del anillo 188 se hizo un arreglo ortogonal.

Al ser embebidas en la dovela requieren de un proceso manual para ser colocadas, durante este proceso crucial de colocado en la dovela se requiere de técnicos capacitados para este trabajo, además, con la supervisión correspondiente de un ingeniero del área de instrumentación se garantiza una correcta instalación, ya que una vez embebida en la dovela no será posible extraer la celda para hacer alguna reparación o modificación.

El monitoreo de las celdas durante el periodo estipulado por el proyecto también debe ser realizado por personal capacitado, y una gran variedad de lecturas da un mejor panorama para poder detectar algún error en el monitoreo, mismo que de detectarse deberá ser corregido a la brevedad. El personal encargado del procesamiento de los datos también deberá contar con los conocimientos suficientes para poder manejar las hojas de cálculo creadas para dicho procesamiento, además, deberá poseer conocimientos en el área de estructuras, geotecnia y principios básicos de hidráulica para de esta forma poder tener un criterio adecuado para informar de algún comportamiento que pudiera poner en riesgo la seguridad del personal de obra, de los futuros usuarios de la línea 12 o de algún daño en la estructura.

IV.2 Sistema de convergencias y divergencias automatizado

De los dispositivos utilizados en el monitoreo de la línea 12 el metro, en particular del tramo en estudio correspondiente a la lumbrera de acceso hasta la estación Mexicaltzingo, el sistema de convergencias automatizado es el que cuenta con la mayor tecnología disponible, su sistema micro eléctrico-mecánico (MENS), permitió medir en tiempo real los posibles desplazamientos relativos en la geometría de los anillos 28 y 103. Una vez instalado en el anillo correspondiente se puede proceder a la automatización del sistema, permitiendo de esta forma un gran historial de lecturas (o un historial con pocas lecturas si así se requiere), que ya no están sujetos a errores humanos de monitoreo.

Sin embargo, la instalación de los 6 tilt meters (clinómetros) en cada anillo, está a cargo de técnicos capacitados para dicho fin, ya que el factor humano puede alterar los

resultados arrojados por el sistema de convergencias, es necesario contar con la supervisión suficiente para evitar errores en la instalación. Otra cosa que se debe considerar es que durante el proceso constructivo del túnel los dispositivos están en todo momento propensos a deterioro o pérdida total por alguna maniobra propia de la construcción, por lo cual también es recomendable supervisar aquellos trabajos que pudieran poner en riesgo la integridad de los dispositivos.

El sistema de convergencias resultó muy adecuado para el monitoreo en la zona de carros y pórticos del escudo, ya que la poca visibilidad por la estructura metálica del escudo imposibilita las convergencias tradicionales a base de levantamientos topográficos.

El software que acompaña a la automatización del sistema, permite optimizar tiempo en el procesamiento de los datos, pero como es bien sabido en el ámbito ingenieril, se requiere de ingenieros con conceptos y criterio adecuado para la correcta interpretación de los resultados y por ende del comportamiento de las convergencias en el anillo, ya que la tecnología no sustituye todavía a la labor de un buen ingeniero.

IV.3 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro

Este dispositivo que permite en un mismo barreno monitorear desplazamientos verticales y desplazamientos horizontales, mostró a través del monitoreo correspondiente las distintas etapas constructivas del túnel y el comportamiento del terreno al paso del escudo.

Al igual que los dispositivos antes mencionados, el fabricante garantiza el correcto funcionamiento de la tubería tipo ABS para inclinómetro y de las arañas magnéticas utilizadas para el extensómetro, aun así, estos deben ser probados antes de su colocación in situ, y es la etapa de la instalación donde se debe prestar mucha atención para evitar fallas en los dispositivos generadas por una mala instalación. Se debe tener cuidado también al momento de hacer el barreno en el suelo, esto con el fin de no dañar alguna línea de conducción de agua, luz, drenaje, etcétera.

El extensómetro magnético reportó expansiones en la parte más somera demostrando así las expansiones generadas por el paso de la tuneladora por el punto instrumentado, además, registró los asentamientos posteriores al paso del escudo y con los datos obtenidos de asentamientos y expansiones se pudo verificar el correcto comportamiento de la construcción del túnel; con las lecturas posteriores se mostró una clara estabilidad en el terreno, lo que garantiza la seguridad de la obra y de las construcciones aledañas.

El inclinómetro por su parte, sirvió para medir los movimientos horizontales en el terreno a diferentes profundidades, como se pudo ver en la gráfica la zona de mayor flexión en la tubería es la que corresponde a los hastiales del túnel, esto resulta lógico ya que es en

esa zona donde el inclinómetro está más cerca del túnel y por tanto recibe un mayor empuje del suelo al paso del escudo tipo EPB.

Se nota también que la recuperación en la gráfica del inclinómetro es paulatina y que la estabilidad en el terreno se alcanza en función del tiempo. Con el inclinómetro se pudo determinar que no existía riesgo alguno por la construcción del túnel y que el proceso constructivo utilizado en esa zona fue el adecuado.

El monitoreo del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro se realiza con una brigada de campo especializada, los errores humanos pueden estar presentes en la recolección de los datos, por lo que al tener una gran variedad de lecturas se minimiza la posibilidad de contar con datos erróneos.

Otra cosa que es necesaria añadir es que las sondas utilizadas para el monitoreo del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro deben ser calibradas periódicamente (por lo menos una vez al año), para contar con la precisión requerida en la toma de lecturas. El procesamiento e interpretación de datos corresponde a ingenieros con criterio y conocimientos suficientes para determinar si existe algún riesgo o anomalía durante el proceso constructivo del túnel.

IV.4 Referencias superficiales sobre el eje del trazo

La topografía usada para los levantamientos de las referencias superficiales reportó expansiones y asentamientos sobre el eje del trazo, debido a la profundidad mayor a 11 metros del nivel de rodamiento de la avenida Ermita con respecto al extradós la clave del túnel, estos asentamientos y expansiones fueron relativamente pequeños (en comparación con los que registró el extensómetro de barras), sin embargo, queda demostrado que la influencia del proceso constructivo del túnel se hace presente aún en la superficie.

Las referencias superficiales también sirvieron para determinar si en algún momento se tenía que limitar la circulación de vehículos sobre la avenida Ermita, en este caso, debido a los desplazamientos mínimos en la superficie del terreno, no se tuvo que tomar alguna medida de cierre de carriles de manera total o parcial en la avenida ya mencionada.

El sistema de levantamientos topográficos está sujeto a los posibles errores ya conocidos tales como son, mala calibración la estación topográfica, errores al capturar los datos, cambios por temperatura, daños en las referencias colocadas en el pavimento, etcétera. Sin embargo, los errores ya mencionados resultaron mínimos y no alteraron de ninguna manera los resultados del monitoreo.

El sistema de referencias superficiales topográficas es un método que ha probado su eficacia en diversas obras de ingeniería. Del sistema de instrumentación utilizado en el tramo de estudio que comprende esta tesis, el sistema de referencias superficiales es

quizás el más usado en la actualidad y seguramente se seguirá utilizando de manera habitual en otras obras dado que es fácil de instalar y de monitorear, además de que su precio de instalación puede resultar más bajo en comparación con los otros dispositivos mencionados en esta tesis.

IV.5 Extensómetro de Barras

El extensómetro de barras instalado en el cadenamiento 20+715.250 sobre el eje de trazo de la línea 12, tiene la característica de que fue ensamblado en la obra con la debida supervisión del departamento de instrumentación, esto para reducir los costos por adquisición de un extensómetro de importación. El principio de funcionamiento básico consiste en que al ser empujado desde la base el extensómetro registrará expansiones en la superficie y caso contrario, al registrarse pérdida de suelo en la base del extensómetro este registrará asentamientos en la superficie.

Los asentamientos y expansiones fueron mayores en comparación con los registrados con las referencias superficiales, esto como ya se dijo en un capítulo anterior es debido a que las barras están a diferentes profundidades, razón por la cual estas son más sensibles al paso del escudo por el punto instrumentado. El extensómetro permitió verificar un buen comportamiento del sistema constructivo al paso del escudo y después de que el túnel quedó construido con el recubrimiento primario a base de dovelas.

Los problemas que pudieran surgir derivados de la instalación son debido a una mala ubicación del punto que se requiere monitorear, daño en obras existentes tales como sistemas de agua potable, drenaje, cableado subterráneo, etcétera, que pudieran ser ocasionados por no contar con la información necesaria al momento de barrenar el terreno. También se deben realizar pruebas a los extensómetros antes de ser instalados in situ para corroborar su buen funcionamiento. La inyección de cemento bentonita debe ser la adecuada para no alterar la resistencia del terreno en el barreno donde se ubicará el extensómetro de barras.

Este dispositivo es monitoreado por medio de levantamientos topográficos, razón por la cual los errores en la toma de lecturas pueden estar presentes. Los datos procesados y la correcta interpretación de los mismos están a cargo de un ingeniero que debe reportar alguna anomalía o comportamiento que pueda poner en riesgo la obra y las construcciones aledañas. Para el caso del extensómetro de dos barras verticales instalado en el tramo de la lumbrera de entrada a la estación Mexicaltzingo, no se reportó ninguna anomalía durante el proceso constructivo del túnel, por lo cual no se tuvo que tomar alguna medida preventiva o correctiva en la construcción con escudo tipo EPB.

IV.6 Comportamiento del suelo-estructura

El sistema de instrumentación implementado en el intertramo en estudio, permitió medir in situ diferentes parámetros tales como asentamientos, expansiones, presión en la masa del suelo, superficies de falla, deformaciones relativas en el túnel, etcétera. Como se mencionó al principio esta tesis, la zona geotécnica a la que corresponde el intertramo es zona III o de lago, debido a esto la velocidad de deformación y presiones generadas por el agua en el subsuelo repercuten de manera significativa en el comportamiento del terreno.

El sistema de instrumentación implementado mostró la tendencia del comportamiento del terreno a diferentes profundidades y en diferentes zonas del túnel, así mismo, se pudieron comparar los parámetros medidos con aquellos que se obtuvieron de pruebas de laboratorio y se pudo con esto optimizar el diseño de las dovelas del túnel en los intertramos siguientes (la optimización del diseño generado por la instrumentación sale del alcance de esta tesis, para mayor información se puede consultar en las referencias dadas al final).

El terreno no presentó ningún parámetro que pudiera perjudicar la construcción del túnel, ni las construcciones aledañas. La correcta instalación y el monitoreo adecuado permitieron concluir que el proceso constructivo del túnel es confiable y que no representa daños a la infraestructura existente. El terreno lacustre por donde cruza el intertramo no afectó el buen funcionamiento del túnel en esta etapa de la obra, sin embargo, dado que el terreno se altera en función del tiempo, se debe implementar un sistema de instrumentación que permita monitorear las deformaciones y posibles comportamientos generados por la interacción del suelo con la estructura, esto durante la vida útil de la obra.

Debido a la gran longitud del túnel de la línea 12, no es posible implementar un sistema de instrumentación que cubra la mayor parte de la obra (a excepción de las referencias superficiales sobre el eje del trazo), razón por la cual se debe diseñar un sistema de instrumentación que permita medir aquellas zonas que sean representativas de la obra, y aquellos puntos que por su peculiaridad pudieran representar un riesgo mayor dada la ejecución de la obra. Además, la instrumentación se apoyó en las teorías existentes en cuanto a la mecánica de suelos se refiere, también toma en cuenta los reglamentos y normas de construcción vigentes para tener parámetros que permitan saber cuáles son las zonas y los límites que se deben considerar como tolerables dentro de la construcción del túnel.

Por último, la instrumentación en México es algo relativamente nuevo, por lo cual la bibliografía existente es escasa, razón por la cual se agradece al Departamento de instrumentación de la Línea 12 del metro por las facilidades prestadas para la realización de la presente tesis. La mejora y optimización de los sistemas de instrumentación estarán

acompañadas del avance tecnológico, sin embargo, los conceptos y el buen criterio de ingeniero deberán ser los que determinen si los datos de las mediciones que arrojen los dispositivos son aceptables o si se deben desechar por alguna anomalía cualquiera que esta sea.

Además, se debe contar siempre con una mente abierta, ya que aún muchas de las teorías de comportamiento de suelos y de estructura de materiales usan en la mayoría de casos hipótesis simplificadoras que no necesariamente pudieran corresponder al comportamiento real del suelo y de la estructura, por la cual es imprescindible seguir midiendo in situ para poder de esta manera contar con los datos y herramientas que puedan corroborar o desechar las teorías utilizadas en ingeniería.