

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Auscultación en la construcción de túneles en zonas urbanas y
aplicación a la Primera Línea del Metro de Quito**

Proyecto Técnico

José Antonio Guillén Martínez

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, 17 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Auscultación en la construcción de túneles en zonas urbanas y aplicación a la Primera
Línea del Metro de Quito**

José Antonio Guillén Martínez

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan José Recalde, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 17 de diciembre de 2018

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: José Antonio Guillén Martínez

Código: 00109783

Cédula de Identidad: 1003318753

Lugar y fecha: Quito, 17 de diciembre de 2018

DEDICATORIA

Todo lo que he obtenido a lo largo de mi vida y mi carrera es gracias a la bendición de Dios y la Virgen María por darme una familia, a la cual, quiero dedicarles todos estos años de esfuerzo. A mis padres, mis hermanos, que han sido una guía constante a lo largo de mis ciclos académicos.

Un agradecimiento a todos los profesores de la Universidad San Francisco de Quito que pude conocer durante estos años, ellos han sabido forjar en mí grandes aptitudes profesionales y sobre todo humanas.

Un especial agradecimiento a mi tutor de trabajo de titulación, Juan José Recalde por su guía y su apoyo a lo largo de este trabajo.

Resumen

En la construcción de túneles, en zonas urbanas especialmente, se pueden producir diferentes movimientos ya sean verticales u horizontales. Estos movimientos pueden darse debido al cambio de presión que producen por las excavaciones cerca de la obra. Para evitar daños económicos, estructurales y sociales es necesario implementar el control y monitoreo constante de los mismos mediante auscultación de túneles. Dentro de la metodología para una correcta auscultación es altamente recomendable tener un correcto plan de auscultación y llevar de manera organizada las lecturas previas que se realizaron en cada instrumentación.

En el presente proyecto técnico se identificaron los tipos de instrumentación para auscultación en la construcción de túneles, para así, levantar la información sobre sus fundamentos de operación y la instrumentación existente para la primera línea del Metro de Quito.

De igual manera se encuentra la redacción de un reporte del estado del arte, que permite al técnico tener una guía y referencias de cómo utilizar la instrumentación para realizar auscultación de construcción de túneles en zonas urbanas. Así como un análisis de los datos obtenidos dentro de la primera línea del Metro de Quito.

Abstract

In the construction of tunnels, in urban areas especially, different movements can be produced, either vertical or horizontal. These movements can occur due to the pressure change produced by excavations near the project construction. In order to avoid economic, structural and social damages, it is necessary to implement the control and constant monitoring of them by means of auscultation of tunnels. Within the methodology for a correct auscultation, it is highly advisable to have a correct auscultation plan and to take in an organized way the previous readings that were made in each instrumentation.

In the present technical project, the types of instrumentation for auscultation in the construction of tunnels were identified, in order to raise the information about its operational foundations and the existing instrumentation for the first line of the “Metro de Quito”.

Similarly, the drafting of a state-of-the-art report is available, which allows the technician to have a guide and references on how to use instrumentation to conduct auscultation of tunnel construction in urban areas. As well as an analysis of the data obtained within the first line of the “Metro de Quito” is found.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción.....	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Justificación	21
1.3 Objetivos.....	22
1.4 Actitud y Resultados Esperados.....	23
1.5 Definiciones.....	23
Capítulo 2 Desarrollo del Tema	26
2.1 Revisión de Literatura.....	26
2.1.1 Recursos Técnicos Existentes.....	26
2.1.2 Excavaciones en Suelos.....	33
2.1.3 Primera Línea del Metro de Quito	40
2.2 Metodología para Auscultación en Construcción de Túneles Subterráneos.....	45
2.2.1 Plan de Auscultación.....	45
2.2.2 Lecturas Previas.....	46
2.2.3 Posibles Errores de Auscultación	47
2.3 Desarrollo del Reporte del Arte	49
2.4 Levantamiento de Información Existente para el Metro de Quito	50
2.4.1 Instrumentación para Presiones, Esfuerzos y Empujes	50
2.4.2 Instrumentación para Deformaciones	50
2.4.3 Instrumentación y Métodos para Control de Movimientos	51

2.4.4 Instrumentación para Medir la Presión del Agua	51
2.4.5 Análisis de los Datos Obtenidos del Metro de Quito.....	51
Capítulo 3 Conclusiones y Recomendaciones	67
3.1 Conclusiones	67
3.2 Recomendaciones	68
Capítulo 4 Referencias	70
Anexo A Encuesta a cerca del Transporte Público de Quito.....	73
Anexo B Reporte del Estado del Arte para Auscultación en la Construcción de Túneles en Zonas Urbanas	77

Lista de figuras

Figura 1. Ciudades con Mayores Horas Gastadas en Tráfico Masivo en Quito.....	12
Figura 2. Porcentaje del Sistema Integrado de Transporte Masivo en Quito	14
Figura 3. Rutas de Transporte Dentro del Distrito Metropolitano de Quito	15
Figura 4. Vista General Primera Línea del Metro de Quito	16
Figura 5. Información General sobre la 1ra Línea del Metro de Quito	17
Figura 6. Beneficios al Construir la Primera Línea del Metro de Quito.....	18
Figura 7. Guía Técnica de AETOS para Instrumentación y Auscultación	28
Figura 8. Uso del Inclinómetro	29
Figura 9. Instrumentación Geotécnica para Monitoreo	30
Figura 10. Monitoreo en Túneles Convencionales	31
Figura 11. Guía para Túneles en Roca	32
Figura 12. Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos	33
Figura 13. Tuneladora EPB	34
Figura 14. Tuneladora EPB Colocando Dovelas	36
Figura 15. Colocación de Pantalla de Hormigón Armado	37
Figura 16. Vaciado de Vestíbulo y Contra Bóveda	38
Figura 17. Instrumentación en Sección de Estación.....	42
Figura 18. Instrumentación en Sección de Túnel.....	53
Figura 19. Leyenda de Instrumentación	54
Figura 20. Medición de una Regleta de Nivelación Instalada.....	55

Figura 21. Resultados de Medición de las Regletas de Nivelación en una Estación	56
Figura 22. Hito de Nivelación Instalado en Sitio.....	57
Figura 23. Resultados de Medición de los Hitos de Nivelación en una Estación.....	58
Figura 24. Prisma Instalado en Superficie	59
Figura 25. Teodolito Automático Instalado en Superficie	60
Figura 26. Resultados de Medición de Prismas en Sección de una Estación.....	61
Figura 27. Colocación de Inclinómetro en Armadura de Pantalla.....	62
Figura 28. Resultados de Medición de un Inclinómetro en Estación.....	63
Figura 29. Medición de Piezómetro mediante Cuerda Vibrante.....	64
Figura 30. Resultados de Medición de Piezómetros en Sección de Estación.....	65
Figura 31. Ejemplo de Clavos de Nivelación.....	66
Figura 32. Resultados de Medición de Clavos de Nivelación en Sección de Estación....	67

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la ciudad de Quito, República del Ecuador, se han construido varias obras de movilización debido al incremento de la demanda lo largo del tiempo, sin embargo, los problemas del transporte público en Quito se han agudizado. Diario El Comercio hizo una encuesta (ver Anexo A) a cerca del transporte público de Quito, la cual concluyó que el transporte público no ha mejorado (El Comercio, 2016). Como manifestó el alcalde Augusto Barrera en el año 2012, “Quito crece casi 50 a 60 mil personas cada año, eso significa que nos toca hacer una ciudad para ese número de personas anualmente” (Diario El Comercio, 2012). Esto también es producto del parque automotriz de la ciudad, que en la actualidad es de aproximadamente 450 mil vehículos, congestionando la circulación en la ciudad y emitiendo gases de efecto invernadero (El Comercio, 2012). Según el reporte de estudio Global Traffic Scorecard, realizado por la consultora de transporte INRIX y observado en la Figura 1, Quito consta en el puesto número 86 como la ciudad que más tiempo se pierde en tráfico (El Comercio, 2017).

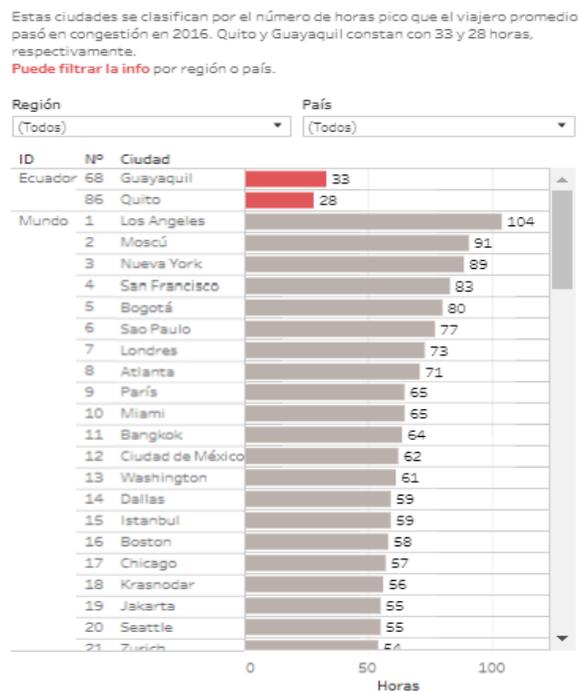


Figura 1. Ciudades con mayores horas gastadas en tráfico vehicular (El Comercio, 2017)

➤ Problemas de movilidad en Quito

En la ciudad de Quito se realizan aproximadamente 3 750 000 viajes diarios, de los cuales más de 2 000 000 son de transporte público, siendo casi solo la mitad viajes en transporte público. Esto se debe a los varios problemas que existen dentro del transporte público, generando molestias en los usuarios por lo que prefieren utilizar su transporte privado. Uno de los problemas es la mala distribución de las rutas, existiendo varias cooperativas de transporte que van por la misma ruta, generando una mayor competencia entre las mismas, pero a su vez, generando un mayor tráfico. Otro problema es la inseguridad dentro del transporte público, transformada en una batalla diaria la cual la población tiene que lidiar,

especialmente los adolescentes, mujeres embarazadas y los de tercera edad. (Revista Espacios, 2018).

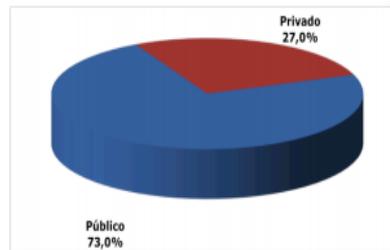
Como experiencia del autor un dato importante, un usuario para movilizarse ya sea en transporte público o vehículo propio y tomando como punto de partida el sector El Labrador, y como punto de llegada Quitumbe ubicada en la parte Sur de la ciudad, el usuario deber recorrer un tiempo promedio de una hora veinte minutos (1h:20min). Este tiempo ocasiona una molestia para los usuarios debido a los altos tiempos de viaje que muchos deben tomar en cuenta en su día a día.

Debido a los diversos problemas que presenta Quito en movilidad, se han presentado a lo largo de los años varias opciones de mejora. Durante la alcaldía de Álvaro Pérez Intriago en el año 1978 se desarrolló el plan integral de desarrollo urbano de Quito, incluyendo en ese tiempo un metro subterráneo. En el año 1995 se instauró el sistema trolebús, luego el sistema Eco Vía en 2001 y el sistema Metro Vía en 2001. Durante la administración municipal de Paco Moncayo (2000-2009) se propuso un sistema de rieles denominado Tren Rápido de Quito (TRAQ).

➤ **Sistema de transporte urbano existente**

Dentro del transporte público de Quito, existen viajes que se los debe realizar en distintas etapas. Es decir, en ciertas circunstancias es necesario tomar varios transportes para llegar a un destino, esto genera en el usuario una pérdida de tiempo bastante alta. En la Figura 2, se puede observar con mejor detalle los porcentajes que el transporte masivo en Quito representa.

Movilidad mecanizada		Viajes		Etapas	
Público	Uso general	2.230.584	61,9%	3.050.272	67,3%
	Escolar y empresa	398.474	11,1%	417.107	9,2%
	Total público	2.629.058	73,0%	3.467.379	76,5%
Privado	Auto	833.279	23,1%	856.800	18,9%
	Taxi	141.271	3,9%	207.848	4,6%
	Total privado	974.550	27,0%	1.064.648	23,5%
Total movilidad mecanizada		3.603.609	100,0%	4.532.027	100,0%



Etapas transporte público (viajeros)			
Metrobús-Q		785.791	22,7%
Troncales		512.856	65,3%
	Trolebús	45,6%	
	CCN	26,7%	
	Ecovía	19,7%	
	Sur Oriental	8,0%	
Alimentadoras		272.935	34,7%
Convencional/Parroquial		2.201.959	63,5%
Escolar/Empresa		417.107	12,0%
Camionetas informales		62.522	1,8%
Total transporte público		3.467.379	100,0%

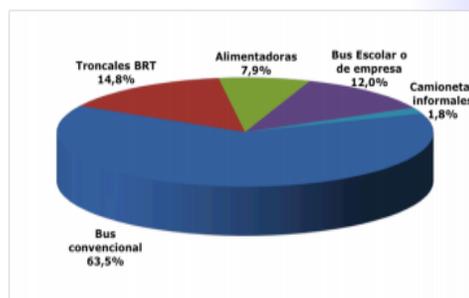


Figura 2. Porcentajes del Sistema Integrado de Transporte Masivo en Quito (SITM), (EPMMQ, 2012)

En la Figura 3 se presenta una vista general de la Primera Línea del Metro de Quito, de igual manera se puede observar las diferentes rutas de integración que existen actualmente dentro del Distrito Metropolitano de Quito (El Telégrafo, 2015)



Figura 3. Rutas de Transporte dentro del Distrito Metropolitano de Quito (El Telégrafo, 2015)

➤ Línea 1 del Metro de Quito

Durante la administración de Augusto Barrera (2009-2014), se descartó el sistema TRAQ mencionado anteriormente como una de las posibles soluciones a la movilidad en Quito. Como una nueva propuesta se contrató el estudio de pre factibilidad del Metro de Quito para que se estudie la necesidad y la importancia de planificar y obtener un sistema de transporte masivo subterráneo. Según A. Barrera, la finalidad no fue municipalizar todo el transporte público en la capital, “lo que se busca es integrar al gran circuito a las unidades de las cooperativas privadas” (Diario El Comercio, 2012).

Una vez aprobados los estudios de pre factibilidad, se diseñó la Primera Línea del Metro de Quito. Esta Línea 1, sería la primera ruta que conforme el Metro de

Quito, teniendo una longitud de 22 km, tal como lo puede observar en la Figura 4 que se presenta una vista general de la Primera Línea del Metro de Quito, en donde se observa el trazado final, contemplando un total de 15 estaciones/paradas. Las estaciones estarán separadas entre sí 1.2 a 1.3 km (1200 -1300 metros).

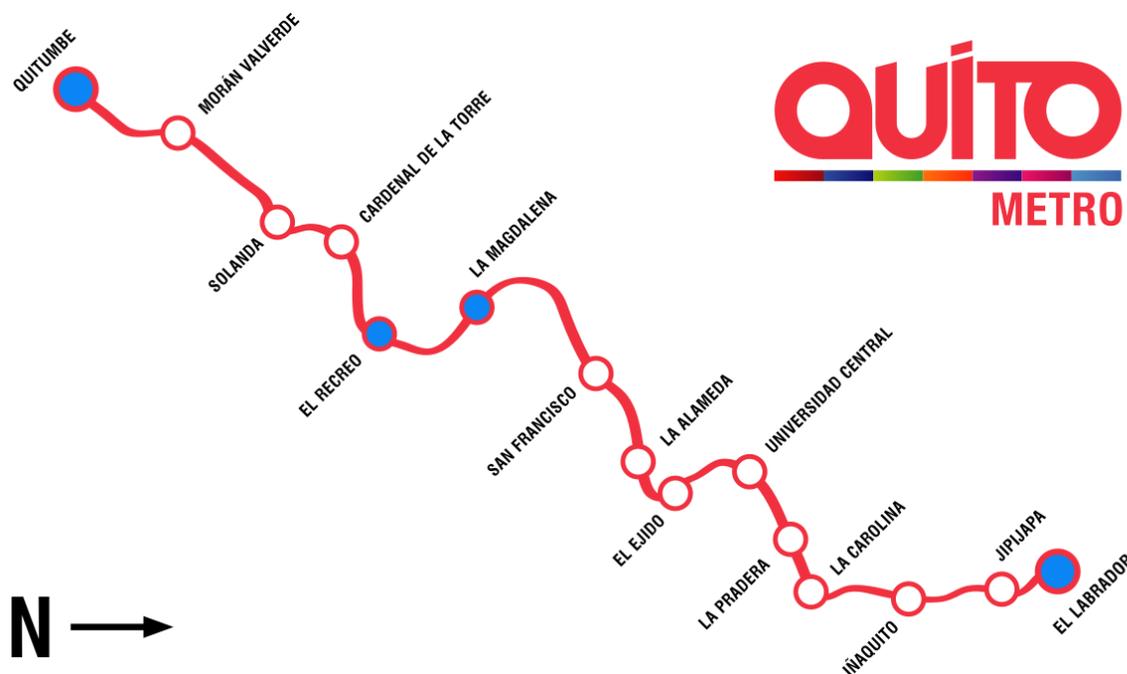


Figura 4. Vista general Primera Línea del Metro de Quito (Metro de Quito, 2015)

La Primera Línea del Metro de Quito se la dividió en dos fases. La primera fase compuesta por la construcción de la estación La Magdalena y el Labrador, siendo en el año 2013 donde empezó su ejecución. La segunda fase, se compone por la construcción de los 22 km de túnel, así como la construcción de las 13 estaciones restantes teniendo en cuenta todas las obras e instalaciones complementarias que están requieren (Metro de Quito, 2016).

Para el trazado geométrico de la Primera Línea del Metro de Quito, se realizó un estudio previo de las posibles afectaciones a los predios que se encontraban cerca de la zona de influencia del túnel. Esto se lo realizó a lo largo de toda la línea, tomando en cuenta las redes de servicios básicos y públicos como agua potable, alcantarillado, redes eléctricas, colectores, etc. (Metro de Quito, 2018)

Por otro lado, al realizar un Metro en una ciudad como Quito, definitivamente ayudará a la movilización de los ciudadanos, lo cual genera una gran integración de la ciudad. La Primera Línea del Metro de Quito será considerada como la arteria principal de un Sistema Integrado de Transporte. Un usuario que utilice el Metro y tomando en cuenta el mismo punto de partida y llegada mencionados anteriormente, un usuario necesita apenas 34 minutos (El Telégrafo, 2015). Otros beneficios e información que presentará la Primera Línea del Metro de Quito se pueden apreciar en la Figura 5 que se presenta a continuación:

Capacidad por desplazamiento:	1.500 personas por viaje en cada tren
Demanda esperada:	500.000 pasajeros en el primer año de operación
Longitud Total:	22 km (Quitumbe - El Labrador)
Estaciones:	15 operativas y 5 de reserva con accesibilidad universal
Material Movil:	18 trenes de 6 vagones por tren, en total 108 vagones
Tiempo de viaje:	34 minutos de Quitumbe a El Labrador
Velocidad promedio:	37 Km/Hr
Métodos Constructivos:	Tuneladora: 18 km Tradicional: 2.1 km Entre Pantallas: 1.2 km
Tiempo de construcción:	Fase 1: 18 meses Fase 2: 36 meses

Figura 5. Información General sobre la 1ª Línea del Metro de Quito, (Metro de Quito, 2017)

Al realizar un proyecto como lo es la primera línea del Metro de Quito, tiene beneficios dentro de la movilización para la gente dentro de la ciudad. Tales como se menciones en la Figura 6 presentada a continuación:

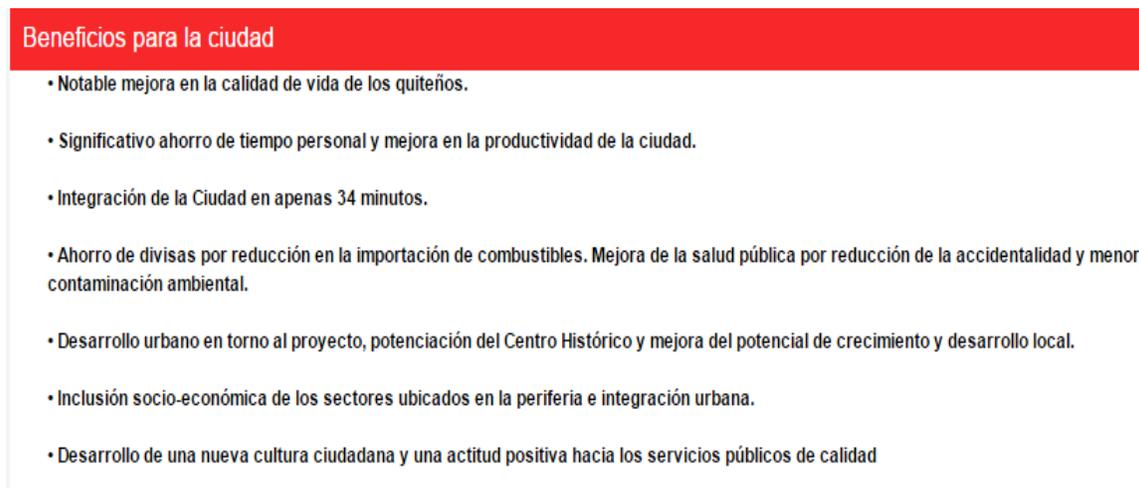


Figura 6. Beneficios al construir la 1ª Línea del Metro de Quito (Metro de Quito, 2017)

➤ Retos en las construcciones subterránea

Para poder realizar un Metro subterráneo en una ciudad como Quito, partiendo que la misma tiene un carácter único al ser Patrimonio de la Humanidad, es necesario tomar en cuenta los retos que se puedan presentar dentro del proceso constructivo.

Estos retos, por ejemplo, se enfocan en el control de asentamientos que pueden presentarse en distintas edificaciones a lo largo del eje del túnel. Para poder tener un control riguroso a este reto, se realizaron más de 3000 inspecciones de edificaciones, para determinar cómo es su estado y qué medidas se pueden tomar para evitar un colapso de cualquiera de ellas. Como se mencionó anteriormente, Quito al ser una ciudad de

Patrimonio, las inspecciones a mayor detalle fueron en las edificaciones del Centro histórico, así como, conventos, construcciones e iglesias (Metro de Quito,2018).

Otro reto dentro de la parte Patrimonial se encuentra el tema arqueológico. Al ser un Metro subterráneo y existiendo una gran historia antigua, el INPC (Instituto Nacional de Patrimonio Cultural) dispone que se debe realizar las debidas excavaciones arqueológicas y paleontológico en ciertas zonas de la Primera Línea del Metro de Quito. De igual manera determinan realizar un plan adecuado de manejo de bienes patrimoniales (Metro de Quito, 2018).

La parte Geológica y Geotécnica, es uno de los retos más grandes que se suelen presentar en ciudades que se encuentran cerca o dentro de la Cordillera de los Andes, ya que se encuentran rodeadas de un sin número de volcanes, generando tipos de suelos únicos. Es por eso por lo que se realizó el primer estudio integral de la geología de la ciudad, en donde se pudo determinar los tipos de suelos que existen a lo largo de la ciudad de Quito, especialmente por donde se construiría la Primera Línea. Muchos de los ensayos y técnicas que se utilizaron, fueron realizadas por primera vez en la ciudad de Quito. En donde se logró obtener, tal como lo expresa la página oficial del Metro de Quito “La elaboración del informe geotécnico, determina la estratigrafía, litología, espesor, secuencia de los suelos; la caracterización geomecánica del subsuelo de Quito, elabora un perfil geológico – geotécnico continuo e identifica los puntos especiales: suelos blandos, presencia de agua, cruce de quebradas, etc.” (Metro de Quito, 2018).

La gran ventaja de utilizar la parte subterránea de una zona urbana es el aprovechar el “gran espacio” que existe debajo de la tierra. Esto puede ayudar en la ampliación de las

instalaciones dentro de la ciudad, ya que el espacio superficial se encuentra “Ocupado”. En otras palabras, cuando una ciudad crece, las autoridades de esta buscan ampliar los servicios urbanos. Al pensar en la ampliación, se enfocan en las soluciones que tiene como objetivo utilizar los espacios de “mas” arriba o “mas” abajo del terreno. Para esto se debe tener los conocimientos necesarios, sobre cuáles son los procedimientos de ejecución de dichas soluciones y que sean compatibles con la economía de la ciudad.

➤ **Importancia de la auscultación**

La auscultación en la ingeniería tiene como significado el monitorear todo el tiempo las obras, antes, durante y después de su ejecución. El objetivo principal de monitorearlas constantemente es obtener diferentes parámetros, los cuales permitan evaluar el estado de las obras, sus constantes y sus variables, y así poder actuar frente a las diversas circunstancias que pueden presentarse. La auscultación se ha convertido en una potente herramienta para la ingeniería.

Este método se lo puede utilizar para obras complejas, como, por ejemplo, la ampliación o creación de nuevas líneas en el Metro de Madrid, el cual que fue inaugurado en el año 1919. A lo largo de las décadas se han ido implementado líneas nuevas, con la ayuda de la auscultación que avanza tecnológicamente todo el tiempo, es posible evaluar la seguridad de la obra en tiempo real. Para esto es necesario crear adecuadamente un plan de auscultación el cual sea ideal para el tipo de obra que se esté realizando.

El mundo subterráneo ha sido una de las grandes inquietudes a lo largo de la historia. El pensar en un mundo bajo tierra, siempre ha generado controversia, ya que no se sabe con exactitud qué es lo que existe bajo tierra, lo que genera un misterio. El subsuelo en

zonas urbanas se ha utilizado para diversos propósitos: Desde cementerios bajo tierra, hasta túneles que conectan de extremo a extremo ciudades enteras. Sin embargo, en las grandes ciudades del mundo, existen obras subterráneas que han cumplido importantes propósitos prácticos e ingenieriles, generando una importante solución y siendo el subsuelo un elemento indispensable para la parte urbana de las ciudades.

A continuación, se mencionan varios ejemplos de utilización del subsuelo: Un centro comercial ubicado en la ciudad, necesita de parqueaderos, los cuales la mayoría se los realiza bajo el suelo. De igual manera dentro del parque de diversiones de Disney, ubicado en la ciudad de Orlando, se encuentra una gran red de túneles, utilizada para las instalaciones de todo tipo para su debido funcionamiento. Otro ejemplo en la utilización subterránea del suelo, esta vez enfocándonos en la parte de movilización, están los distintos pasos a desnivel que se construyen en las ciudades. Dentro de las ciudades que tienen una alta congestión de tráfico, se realizan pasos a desnivel para que la congestión disminuya, tomando en cuenta las características del tipo de suelo que se posee.

1.2 Justificación

Un buen sistema de auscultación permite el control durante la fase constructiva de una obra, y ajuste de las hipótesis asumidas en los diseños, así como la evaluación de la seguridad de la obra. El principal motivo por el cual se ha elegido este tema es por la construcción de la primera Línea del Metro de Quito. Esta primera Línea, es de suma importancia, ya que, por primera vez se ejecuta a nivel nacional. Esto conlleva a que se deban tomar muchas precauciones a la hora de implementarla y ejecutarla. Muchos de los

conocimientos ingenieriles aplicables son nuevos en el país, lo que hace que sea un reto para todos los ingenieros y personas que participan de este proyecto.

El reto, se simplifica a tener un control preciso y constante sobre lo que ocurre antes, durante y después de la ejecución de la primera Línea del Metro de Quito. Esta línea, como se observó anteriormente, atraviesa una zona declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, por lo que la auscultación debe ser rigurosa.

Tanto la construcción como la fiscalización de este proyecto contara con la participación de compañías y personal técnico con amplia experiencia en construcción de obras subterráneas en zonas urbanas. Es importante que exista una transferencia de estos conocimientos a los ingenieros locales, en particular como realizar una auscultación de calidad para monitorear los efectos de los trabajos en construcción subterránea. El autor del presente trabajo de titulación tuvo la oportunidad de participar activamente en los servicios de auscultación para este proyecto, por lo que se planteó realizar el trabajo de titulación en este tema. Esto puede ser esencial y de mucha ayuda para posibles trabajos a futuro, en los cuales se podría llevar a cabo la implementación de nuevas líneas al Metro de Quito, tomando en cuenta la experiencia previa obtenida al realizar este tema.

1.3 Objetivos

Los objetivos planteados para este trabajo de titulación son:

- (i) Conocer tipos de instrumentación, fundamentos de su funcionamiento y procedimientos.
- (ii) Desarrollar un Reporte del Estado del Arte en instrumentación en construcción de túneles.

- (iii) Analizar datos obtenidos por la instrumentación en la construcción de la Primera Línea del Metro de Quito.

1.4 Actividades y Resultados Esperados

Las actividades realizadas fueron:

- a) Identificar de tipos de instrumentación para auscultación en la construcción de túneles que se utilizan de forma general.
- b) Estudiar y levantar información sobre los fundamentos de operación de la instrumentación.
- c) Determinar los procedimientos de instrumentación tanto en forma general, como la existente dentro de la 1ª Línea del Metro de Quito.

Los resultados esperados son:

- a) Redactar un Reporte del Estado del Arte en auscultación.
- b) Obtener los datos de auscultación existentes disponibles para la 1ª Línea del Metro de Quito.
- c) Realizar un análisis de los datos obtenidos dentro del mismo.

1.5 Definiciones

Es importante definir cierta terminología para no tener confusiones de conceptos debido a que varias palabras pueden tener varios significados que no se encuentran fácilmente y que estén dentro de este tema. Para esto se utilizó la fuente más confiable en

el habla castellana; el Diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española de la Lengua, 2009). Las palabras para tomar en cuenta dentro de este trabajo de titulación son:

Auscultación: Es el procedimiento por el cual se evalúa en qué condiciones se encuentra una infraestructura, cuando está en uso o en condiciones de estarlo, y sin interferir demasiado con los usuarios normales de la infraestructura. Es un procedimiento habitual en grandes obras de ingeniería, como presas, puentes, vías de ferrocarril y en aviación (Wikipedia, 2018).

Instrumentación: Es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática (Wikipedia, 2018). En otras palabras y como definición por parte del autor, es la instalación y disposición de los diversos sensores que son utilizados para la lectura de las distintas magnitudes geotécnicas que se pretende controlar durante el proceso de auscultación del elemento constructivo. Se puede instrumentar, durante la obra, después de la construcción, e incluso, en fase de proyecto para evaluar las condiciones iniciales y determinar los parámetros de diseño.

Túnel: Obra subterránea que permítame la comunicación entre dos sitios, para el transporte vehicular y/o peatonal, vías de ferrocarril o canal. Por lo general son construcciones artificiales (Construmática, 2018).

Lectura cero: Por experiencia del autor en este trabajo de titulación, se define como la primera lectura realizada de algún tipo de sensor, el cual se lo instrumentó previamente. Esta lectura es la guía y base para las siguientes lecturas. Es decir, todas las siguientes lecturas se las comparará con respecto a la inicial. Se recomienda realizar más de 2 veces la lectura inicial, con el fin de prevenir errores, ya sean de los aparatos o errores humanos.

Umbrales: Por experiencia del autor en este trabajo de titulación, se define como los parámetros en los cuales se encuentran los límites de cada instrumento instalado. Estos límites proporcionan al experto en auscultación, información de cuál es el estado real de lo que se quiere medir, utilizando el sensor específico para ese tipo de medición. Los umbrales se los acuerda previamente, dependiendo de la situación de control sabiendo así, si se encuentran dentro de los parámetros permitidos o existe algún problema según las lecturas lo cual exija un control de monitoreo más frecuente o incluso en casos más extremos una detención de la obra para medidas correctivas, como pueden ser mejoramientos, ya sean del suelo (Inyecciones), edificaciones, etc.

Sensor: Un sensor es un objeto capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y así, poder transformarlas en una variable eléctrica. Los sensores pueden convertir un tipo de energía, en otra. (Wikipedia, 2018)

Monitorear: Controlar el desarrollo de una acción o un suceso a través de uno o varios monitores/aparatos. (Oxford Dictionaries, 2018).

Mira: Es una regla graduada que permite mediante un nivel topográfico, medir desniveles, es decir, diferencias de altura. Con una mira, también se pueden medir distancias con métodos trigonométricos, o mediante un teodolito, o bien un taquímetro. (Wikipedia, 2018).

Nivel de precisión: Instrumento que tiene como finalidad la medición de desniveles entre puntos que se hallan a distintas alturas o el traslado de cotas de un punto conocido a otro desconocido. (Wikipedia, 2017)

Asentamientos: Por experiencia del autor en este trabajo de titulación, se define como la compresión de masa o bien la deformación vertical del terreno. Este fenómeno puede tener lugar tanto hacia arriba, como hacia abajo. Se da como consecuencia de deformaciones en el suelo.

Fiabilidad: El término fiabilidad es descrito en el diccionario de la RAE como "probabilidad de buen funcionamiento de algo" (Wikipedia, 2018).

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Revisión de Literatura

2.1.1 Recursos técnicos existentes

Dentro de la auscultación e instrumentación geotécnica o estructural en general, no existe una normativa oficial que indique sus procedimientos exactos y puntuales de como tomar medidas. Lo que existen son guías, las cuales suelen referirse a ensayos concretos en los que se utiliza instrumentación y se indica que se debe medir.

En instrumentación se suelen seguir recomendaciones de diversos autores, basadas en la experiencia previa generalmente. Esas recomendaciones obviamente no son de obligado cumplimiento, pero sirven de guía para el diseño y a su vez, en la parte práctica, generar un buen plan de auscultación. Estas fuentes sirven de respaldo en el supuesto caso que algo salga mal. Esto quiere decir que siempre se puede alegar que la auscultación se ha realizado de acuerdo con los usos y prácticas comunes y aceptadas. A continuación, se pueden encontrar las diversas fuentes que existen y que se aplican en diversas regiones del globo:

- Guía técnica de AETOS “*Instrumentación y auscultación en el proyecto y construcción de túneles urbanos*”. Esta guía que se puede observar en la Figura 7 es muy utilizada en Europa, debido a que es realizada y actualizada constantemente en España, siendo un país con gran potencial para la construcción de túneles y a su vez, poder generar este tipo de guías. Esta guía es parte de un gran plan maestro dentro de la asociación de obras subterráneas en España, ya que, lo que buscan es difundir constantemente los conocimientos técnicos. Estos

conocimientos técnicos son aplicados por especialistas con experiencia en obras subterráneas, cubriendo vacíos que pueden existir en la documentación y normativas (AETOS, 2014). Esta guía es común utilizarla en Latinoamérica debido a que su gran mayoría de países comparten el mismo idioma y la guía se encuentra escrita en Castellano.

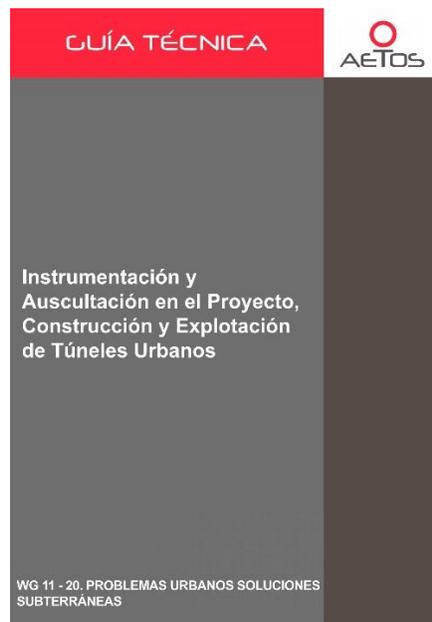


Figura 7. Guía Técnica de Aetos para instrumentación y Auscultación. (AETOS, 2014)

- Dentro de los Estados Unidos, existen varias fuentes que son utilizadas dentro del ámbito geotécnico. Una de estas es la publicación del Transportation Research Board llamada “*Use of Inclinometers for geotechnical instrumentation on transportation projects*” (ver Figura 8) enfocándose netamente en el uso del inclinómetro en proyectos de transporte.

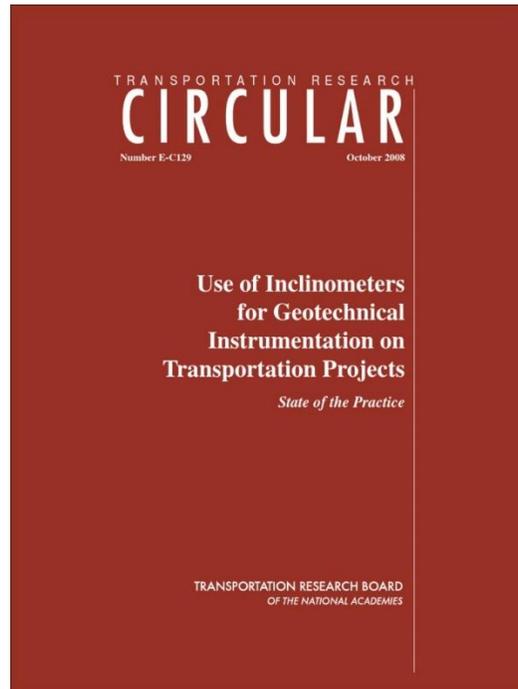


Figura 8. Uso del Inclínómetro. (Transportation Research Board, 2008)

- Otra fuente de información utilizada en Estados Unidos son los libros especializados. El más reconocido y completo es “*Geotechnical engineering for monitoring field performance*” de John Dunnycliff (ver Figura 9), siendo un autor que se enfoca en los distintos procedimientos de instalación y toma de medidas de los diferentes tipos de instrumentos que se pueden encontrar en una obra, así como recomendaciones para el diseño.

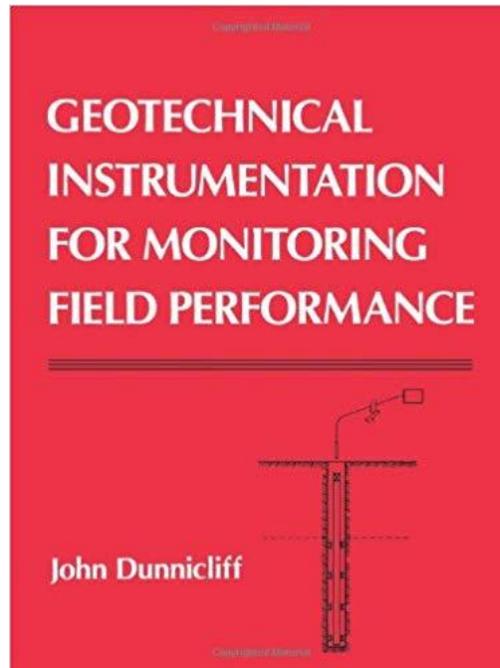


Figura 9. Instrumentación Geotécnica para Monitoreo. (Dunnycliff. J. 1989)

- El mismo autor anterior, John Dunnycliff también edita una publicación llamada “*Geotechnical Instrumentation News*”, donde se publican artículos relativos a la instrumentación geotécnica.
- Slope Indicator Company, es una empresa la cual brinda ciertas guías de cómo se deben utilizar los instrumentos, por qué es importante el uso de instrumentación dentro de un proyecto, cual es el beneficio de este, etc. “*Application Guide*” es su ejemplo más claro de lo ya mencionado.
- En la India tienen un organismo que regula las construcciones de túneles. Este organismo en el control de movimientos del suelo y monitoreo utiliza una publicación muy completa llamada “*Real-time Monitoring for Very Shallow Tunneling in Urban Settings*”.

- En el caso de Austria tienen un libro guía muy reconocido, es utilizado en muchas partes de Europa, ya que es muy completo. El libro presenta un concepto general para la aplicación de monitoreo en túneles, es decir una idea completa de cómo se debe aplicar la auscultación a lo largo de un proyecto subterráneo. El nombre del libro es “*Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling*” (ver Figura 10)

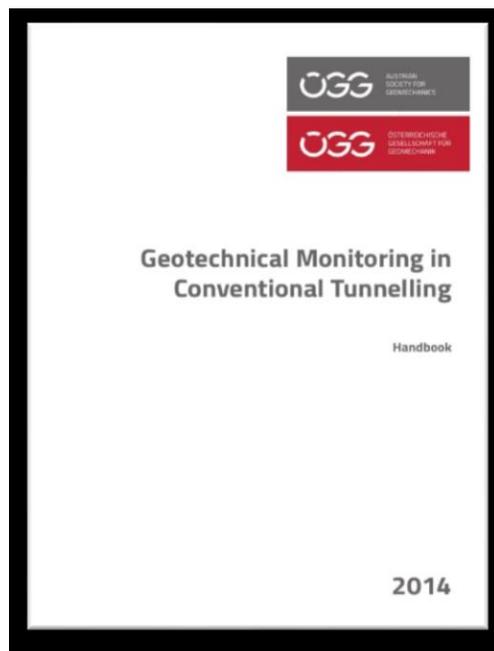


Figura 10. Monitoreo en Túneles Convencionales. (OGG, 2014)

- Existen organismos en muchas regiones del planeta, cada uno con sus guías y lineamientos que es aconsejable tomarlos en cuenta y si es posible aplicarlos directamente. Un ejemplo claro es la guía utilizada en Asia para construir túneles en roca, lo cual requiere de un gran control y plan de auscultación “*Practical Guide to Rock Tunnelling*” (ver Figura 11). Esta guía es contemplada por el

organismo de Tunnelling Association of India, la cual es muy reconocida en su área por las diversas publicaciones e investigaciones que realiza.

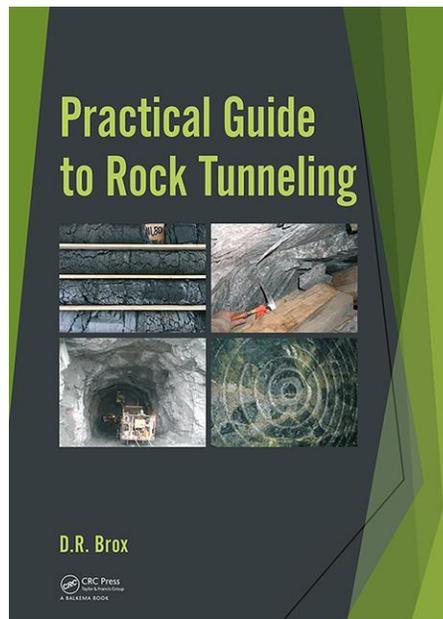


Figura 11. Guía para Túneles en Roca. (Brox, D., 2017)

- Para cada una de las guías, libros, publicaciones, etc, mencionadas anteriormente, han sido revisadas y aprobadas por el organismo de International Tunnelling Association (ITA) siendo durante más de 40 años, la asociación con el objetivo de fomentar el uso del subsuelo, con el beneficio de las personas, el medio ambiente y el desarrollo sostenible y promover los avances en la planificación (Wikipedia, 2018). De igual manera contempla el diseño, construcción, mantenimiento y seguridad de túneles y espacios subterráneos (ver Figura 12). Siendo la máxima organización a cerca de túneles a nivel global, la ITA tiene en su amplia

experiencia con más de 177 trabajos en 299 publicaciones en 5 diferentes idiomas (WorldCat, 2018).



Figura 12. Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos (ITA, 2018)

2.1.2 Excavaciones en suelos

- **Procesos constructivos**

Los procesos constructivos para túneles tienen como objetivos lograr construir el túnel completo en el menor tiempo posible y a un bajo costo. Esto depende en donde se encuentre ubicado el proyecto. Es importante realizar una buena auscultación durante la ejecución de un túnel, debido a la extracción de material la cual genera una alteración en el estado inicial del terreno, que lleva consigo la generación de movimientos en las proximidades a fin de reestablecer el equilibrio tensional del suelo. Los desplazamientos del terreno tienen un carácter aproximadamente radial, hacia el centro del túnel y según su magnitud, pueden originar deformaciones peligrosas para los edificios, instalaciones o accesos situados en la superficie del terreno. Estos movimientos radiales dan lugar a asentamientos en superficie, así como a movimientos horizontales. Los asentamientos en superficie pueden alcanzar magnitudes considerables comprendidas entre las décimas de milímetro hasta las decenas de centímetros,

tomando en cuenta que la relación que existe entre una obra subterránea y el entorno que lo rodea es bilateral, es decir que es evidente la interacción que existe entre ambas, sin embargo, no se afectan con la misma intensidad.

Para la construcción de un túnel, es importante su proceso constructivo, en el caso particular del Metro de Quito, se utiliza un método el cual tiene como protagonista las tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance), generando como su propio nombre lo indica, un balance en la presión del suelo al momento de generar el túnel. La conocida EPB (ver Figura 13), tiene un sistema de montaje de dovelas, el cual se considera el método más seguro en terrenos blandos, inestables o con una alta presencia de agua, siendo una gran ventaja en sitios con presencia urbana o estructuras importantes.



Figura 13. Tuneladora EPB (Wikipedia, 2018)

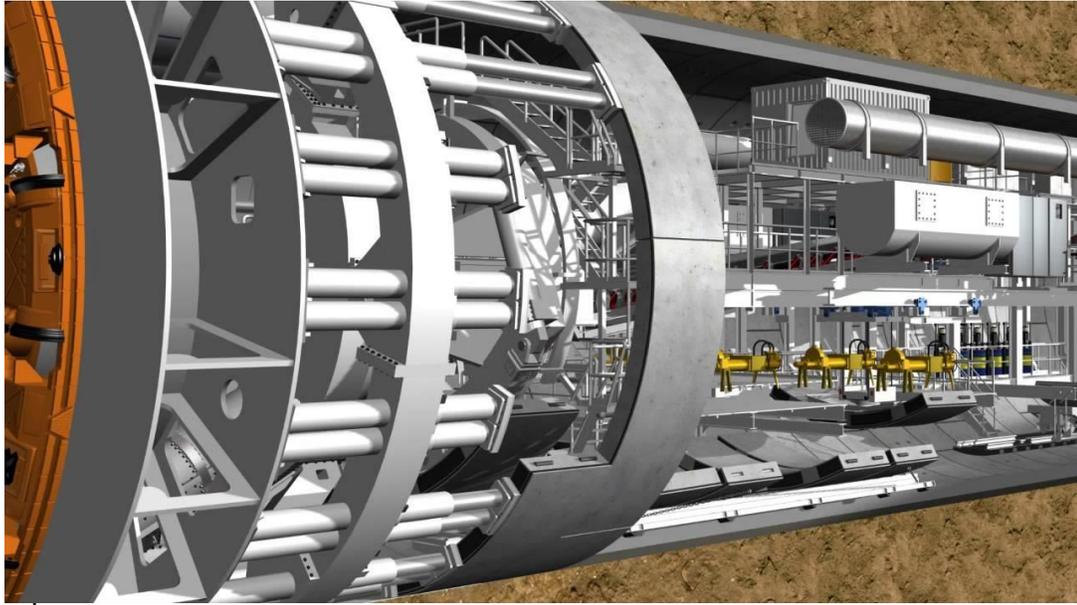
La tuneladora cuenta con diferentes elementos que conforman a la misma, los cuales son: Rueda de corte destinada a cortar el terreno, cilindros de propulsión transmitiendo la energía para el avance, el tornillo sin fin destinado para la extracción controlada del material excavado, un colocador de dovelas giratorio

encargado de colocar las dovelas, un sistema de banda capaz de sacar los escombros.

Una vez ensamblada la tuneladora en sitio, con todos sus elementos, la misma empieza la excavación accionado por 14 motores hidráulicos impulsada por los cilindros de propulsión. Las piezas de corte en la punta de la rueda dependen del tipo de terreno a la cual se está perforando. De igual manera, es necesario la utilización de espumas o bentonita la cual ayuda a que el terreno sea más suave al momento de excavar. La denominada cámara de tierras mantiene un control de presiones todo el tiempo, producida por la entrada y salida del material en la misma, gracias a esta cámara se puede conseguir un confinamiento artificial del terreno excavado. Esto ayuda notablemente a los posibles asentamientos o levantamientos generados en superficie.

La extracción del material es manejada por el tornillo sin fin accionado por varios motores hidráulicos, enviando los escombros hacia la cinta transportadora. Una vez que se ha excavado una distancia requerida, se procede a la colocación del anillo de dovelas (ver figura 14). Este anillo de dovelas sirve tanto de revestimiento del túnel, como contra soporte para el avance del escudo principal de la tuneladora. El proceso se repite a lo largo de todo el trazado. Para que la máquina se mueva, los cilindros de propulsión transmiten la fuerza necesaria para la excavación del terreno, apoyados los mismos en el anillo de dovelas colocado anteriormente. Las dovelas son de hormigón prefabricado, las cuales son

realizadas en fábricas externas con las especificaciones técnicas que cada una la requiera.



4. Tuneladora EPB colocando dovelas (Wikipedia, 2018)

Un sistema automatizado e informático que posee la tuneladora permite una exacta perforación, teniendo un alto rendimiento de avance tanto cuantitativo como cualitativo del trabajo.

Por otro lado, se tiene la construcción de las estaciones, las cuales serán utilizadas por las personas para ingresar a los trenes transportadores. Las estaciones y el túnel pueden ser construidas a la par, sin embargo, se recomienda realizar primero las estaciones para luego dar paso al túnel. Para las estaciones, el método utilizado es el de “Cut and Cover” con losa de cubierta de vigas. Este método consiste en la ejecución previa de unas pantallas de

hormigón armado (ver Figura 15), así como de los pilares interiores que conforman la estructura principal de sostenimiento de la estación.



Figura 15. Colocación de pantalla de hormigón armado

A continuación, se excava el interior hasta la cota de vestíbulo (ver Figura 16) donde se ejecutará la losa de hormigón. En este punto ya se podría colocar las vigas en la cabeza de las pantallas para poder fundir la losa de compresión superior permitiendo el relleno y restablecimiento de los servicios en superficie de ser el caso. La excavación prosigue bajo la losa del vestíbulo (ver figura 16),

atreves de huecos dejados en la misma hasta la cota inferior de contra bóveda o anden. Una vez ejecutada la losa de fondo se da paso al forjado auxiliares y a los acabados de la estación según lo requiera el diseño.



Figura 16. Vaciado de vestíbulo y contra bóveda

- **Propiedades del suelo**

En el momento que se quiere construir un túnel, es indispensable que se conozcan las propiedades del suelo en el cual se va a trabajar. A su vez, es necesario saber cómo se comportará el suelo debido a los trabajos que se realizarán. Por ejemplo, al momento que la tuneladora empieza su excavación

del túnel, el suelo cambia sus propiedades mecánicas y por consecuencia sus propiedades físicas. Estas propiedades físicas son en su mayoría las deformaciones que se producen en el suelo y que pueden ser transmitidas y afectadas a las estructuras de la superficie. Las deformaciones se dan por la relación entre las tensiones y deformaciones del terreno, lo cual, permite evaluar los movimientos verticales y horizontales que puede existir.

Para poder evaluar los asentamientos que pueden existir hay que tomar en cuenta que el suelo es de carácter heterogéneo, lo que hace más complejo determinar sus asentamientos debido a sus distintos comportamientos que podría tener en un área respectiva. Estos asentamientos pueden ser: Instantáneo, de consolidación primaria y de fluencia. El asentamiento instantáneo se da en el momento en que se aplica la carga y se comporta de manera elástica. La consolidación primaria se produce por un cambio volumétrico conforme pasa el tiempo, eso sucede normalmente por la liberación de presiones por efectos del agua intersticial. Por último, el asentamiento de fluencia se da por la combinación de varios fenómenos, tanto el contacto de las partículas del suelo, la eliminación de materia orgánica o por degradación de partículas.

En el caso que estos efectos físicos (asentamientos, movimientos, deformaciones) lleguen a ser grandes, puede generar una catástrofe en elementos que se encuentren en la superficie, es decir, en las estructuras. En zonas urbanas normalmente hay la presencia de estructuras patrimoniales e importantes, por lo que medir y controlar los efectos que se producen en ellas

por efectos de excavación de un túnel es totalmente necesario. La auscultación es el método adecuado que se puede utilizar para tener un control antes, durante y después de la ejecución de la obra.

2.1.3 Primera Línea del Metro de Quito

- **Conformación del Metro de Quito**

El Metro de Quito se divide en 2 fases. La primera fase está compuesta por la construcción de la estación del Labrador (antiguo aeropuerto) y la estación de la Magdalena. Iniciaron sus construcciones en enero del 2013 y en marzo del mismo año respectivamente. Como dato, para diciembre del 2013 el avance de ambas estaciones era de un 51%. Esta primera fase se licitó en julio del 2010, después de que Metro Madrid haya presentado los diseños definitivos de ingeniería (Wikipedia, 2018). El presupuesto referencial para esta fase fue de sesenta y cuatro millones ochocientos quince mil trecientos nueve con cero ocho/100 dólares de los Estados Unidos de América (US\$64.815.309,08) más IVA. Teniendo un plazo estimado de 18 meses contando a partir de la suscripción del contrato (Metro de Quito, 2018). En noviembre del 2012, la empresa Metro de Quito adjudicó la construcción de ambas estaciones a la empresa española Acciona Infraestructuras, entre cinco empresas que ofrecieron construir esta fase.

La segunda fase del Metro de Quito se divide en 2 subpartes. La construcción del túnel (22 km), las 13 estaciones restantes que incluyen

instalaciones y sus obras complementarias constituyen la primera parte. La segunda subparte es adquisición del material rodante. En el 2013 se firmó un contrato con el consorcio español GMQ, constando con el asesoramiento técnico del proyecto. En el 2015 se lanzó la licitación para la fiscalización de la segunda fase, la cual fue adjudicada a Metro Alianza con un valor de 27,9 millones de dólares de los Estados Unidos de América (Wikipedia, 2018).

En octubre del 2015 se adjudicó el contrato para la construcción de la segunda fase al consorcio Acciona-Odebrecht. El plazo del contrato es de 42 meses, los cuales empezaron a contar oficialmente desde enero del 2016 y se entregará en julio del 2019. El costo total de esta fase es de 1538 millones de dólares de los Estados Unidos de América, cubierto el 63% por el Municipio de Quito y el 37% restante mediante a bancos a nivel mundial. En el 2016 se recibieron las tres tuneladoras construidas con especificaciones para adaptarse al suelo de la ciudad de Quito. Las tuneladoras fueron denominadas con el nombre de “La Carolina”, “La Guaragua” y “Luz de América”; teniendo las tres tuneladoras una longitud de 110 metros y un diámetro de 9,36 metros (Wikipedia, 2018).

- **Estudios y diseño**

Previamente a la construcción del Metro de Quito se realizaron varios estudios y diseños, los cuales fueron variando a lo largo del tiempo. Sin embargo, en la búsqueda de los estudios realizados previamente se encontraron los que se muestran a continuación:

Movilidad

La idea del Municipio de Quito es generar una red integral de movilización en la ciudad para los pasajeros, para esto, es necesario definir un nuevo esquema de transporte para Quito. Para el nuevo esquema, se realizaron más de setenta y siete mil encuestas a domicilio, trabajos de campo, mediciones, conteo de tráfico tanto de pasajeros como de vehículos. De igual manera se aplicaron sistemas informáticos y métodos matemáticos especializados en transportes para poder generar el nuevo modelo integrado de transporte (Metro Quito, 2018).

El eje del transporte masivo es el Metro de Quito, proporcionando a los ciudadanos una forma más fácil y eficiente de movilización. Generando con el esquema nuevo de movilidad, una red integrada con los distintos corredores ya existentes. Esto genera un ahorro de tiempo y dinero en el usuario, ya que se tiene planificado que para la utilización del sistema integrado de transporte se necesite un solo boleto. Las encuestas domiciliarias de movilidad del Distrito Metropolitano de Quito fueron realizadas por Metro Madrid en el año 2012.

Geológicos y Geotécnicos

Como se mencionó con anterioridad, el suelo puede ser muy diverso en áreas pequeñas, más aún en áreas grandes de subsuelo, para esto se requiere de una clasificación de suelo que permita determinar con qué tipo de suelos nos enfrentaremos al momento de realizar la excavación. Dentro de las actividades

que se realizaron dentro de este estudio son: Obtención de testigos de perforación, ensayos SPT, toma de muestras tipo Shelby, ensayos de permeabilidad, toma de medidas de niveles freáticos, ensayos down hole, análisis químicos de muestras de agua, u otros.

Se realizaron ensayos de sismica pasiva, ejecutando más de 70 sondeos a lo largo del trazado, estos sondeos se los realizaron cada 300 metros y dos sondeos por estación. Se extrajeron más de 900 muestras para las pruebas de campo, ensayos de laboratorio y ensayos geofísicos (Metro Quito, 2018).

Metro Madrid fue el encargado de realizar estos estudios, los cuales determinaron la estratigrafía, litología, espesor y poder generar el perfil geológico – geotécnico de la ciudad de Quito (Metro Quito, 2018). Se determinó el tipo de suelo que tiene cada zona de Quito, en el sector del sur, gracias a los sondeos realizados se determinó la presencia de tobas, arenas finas y arcillas. Esto es común en ese sector debido a los múltiples rellenos que presenta el sector. Del conjunto mencionado, notamos la presencia de interestratificación de la arcilla y arena de color verde, tiene una gradación normal con líticos sub redondos debido a su tipo de deposición fluvial, variando el espesor entre 20 cm a 50 cm.

En el sector del norte de Quito, se pudo determinar que predomina la presencia de la cangahua, conformada por limos arenosos, con colores amarillos y con presencia de pómez y cenizas debido a los volcanes cercanos. En donde la cangahua presenta una mejor compacidad en las profundidades de 15 a 20

metros, esto genera una ayuda en el momento de realizar las excavaciones teniendo una mejor consistencia.

En la búsqueda de los documentos e información que es de dominio público, no se encontró un mapa de perfiles geológico de la ciudad de Quito.

Factibilidad de la Primera Línea

La primera línea del Metro de Quito pasará sobre o bajo 14 quebradas sin que se vean comprometidos los cauces y a su vez, los suelos que se conoce que no son muy competentes se les realizará compactación o de ser el caso un mejoramiento. Gracias al estudio geológico, se pudo determinar que el Metro pasaría sin ningún problema por debajo de los servicios que se encuentran en la parte subterránea. Pasaría a una profundidad de más de 26 metros, lo cual lo hace seguro.

Metro de Madrid realizó el trazado de la primera línea, basándose en criterios como condiciones geográficas, condiciones topográficas, demanda por parte de los usuarios, comodidad y bajo parámetros de seguridad donde sea segura tener salidas de emergencia (Metro Quito, 2018). A lo largo de los 22 kilómetros de túnel, se tienen pozos de ventilación, sistemas de seguridad, sistema de alarmas y control de mandos en la estación de Quitumbe. Este estudio se lo realizó en el año 2012 por la empresa consultora Metro Madrid.

Patrimonio y Arqueología

Se realizó enfocándose en estaciones y sitios que fueron analizados como fundamentales. En las estaciones como el Ejido, San Francisco, así como el Panecillo, Solanda y Quitumbe se realizaron mediciones, observaciones y pruebas de pala bajo la metodología que lo determina la Ley de Patrimonio Cultural. Estos estudios arqueológicos fueron realizados por la doctora María Aguilera en el año 2012, tal como lo indica el Metro de Quito en su página web. El informe de la doctora Aguilera, confirma que en las 4 estaciones da el resultado como negativo, es decir, que no se encontraron restos arqueológicos (Metro Quito, 2018). La excepción fue la plaza de San Francisco, en donde si se encontraron restos arqueológicos, determinando materiales culturales. En este caso se determinó que se realicen nuevos procesos de investigación.

El Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) define en su informe presentado, que se deben realizar controles permanentes durante la excavación del túnel. De igual manera anuncia que se deben realizar nuevas excavaciones que permitan completar los estudios que se pudieron obtener tras las excavaciones iniciales. Así como realizar dentro del proyecto, un plan de manejo de los bienes patrimoniales que se encontraron (Metro Quito, 2018).

2.2 Metodología para auscultación en construcción de túneles subterráneos.

2.2.1 Plan de auscultación

El plan de auscultación se debe planificar antes de comenzar los trabajos en obra, en el cual se lo debe tratar cuidadosamente en ciertos aspectos que son de importancia. De igual manera, se debe tomar en cuenta los procesos susceptibles de ser auscultados, las magnitudes a medir, la implantación de la instrumentación (adecuándola al ritmo de la obra) y la campaña de lecturas. En otras palabras, el plan de auscultación debe ser un documento que explique todas las fases que componen el Proceso de Instrumentación y Auscultación, tomando en cuenta que tiene que especificarse su cronograma correspondiente, como se podrá observar a continuación con más detalles (Del Saz, S. 2007):

- Definición de las magnitudes por medir, especificando los parámetros del fenómeno geotécnico a controlar, como el rango de este o la precisión necesaria.
- Definición de los dispositivos más adecuados a instalar para que la fiabilidad, durabilidad y procedimiento de las medidas sean los deseados.
- Instalación de los Sensores en obra, adecuándola convenientemente a la marcha de la obra.
- Diseño de las campañas de lecturas: frecuencias y metodología.
- Interpretación y conclusiones, estableciendo los necesarios valores de los umbrales.

- Establecimiento de unas pautas y procesos de retroalimentación que permita optimizar, ampliar y/o modificar el Plan en función de los resultados obtenidos y la realidad de la obra.

2.2.2 Lecturas Previas

Muchas obras civiles actualmente no utilizan instrumentación para monitorear el comportamiento de sus entornos, debido a que esta actividad no se encuentra como obligatoria en ningún reglamento, además que sus aplicaciones e implementaciones son poco conocidas, especialmente en Ecuador. Sin embargo, cuando se trata de una obra subterránea de importancia social, económica e incluso política como lo es el Metro de Quito, es esencial utilizar estos métodos de monitoreo. El monitoreo ayuda a reducir riesgos en las obras, mejora la seguridad de los trabajadores e incluso puede minimizar costos.

Para poder tener resultados adecuados es necesario realizar varias lecturas iniciales, denominadas como “Lecturas Cero”, se realizan varias debido a que con una sola lectura no basta, con el fin de prevenir errores ya sean de los aparatos o humanos. Esta lectura cero se la realiza una vez instalada la instrumentación correspondiente a la sección a monitorear y se realiza una planificación de la frecuencia de las lecturas y seguimiento, esto depende de la demanda en cada fase de obra y se realizan los informes correspondientes, analizando los datos obtenidos y comparándolos con los parámetros o también conocidos como umbrales.

Para utilizar este tipo de umbrales, aparte de saber interpretarlos, es importante saber actuar de la manera que corresponde ante la situación que reflejen los datos. Es por eso por lo que cuando se sobrepasa alguno de los umbrales, es necesario tener claro un protocolo de actuación dependiendo de la situación que amerite y que indique las actuaciones de cada uno de los actores, ya sean técnicos de instrumentación, ingenieros especializados, directores de obras, u otros.

2.2.3 Posibles Errores de Auscultación

Instalación de instrumentación

Durante la instalación de instrumentación para una obra como el Metro de Quito, es importante tener mucha precaución. Existen ciertos sensores (instrumentación de medición) los cuales, debido a su funcionamiento no arrojan lecturas absolutas sino parciales. Es por eso por lo que, se debe realizar una cuidadosa planificación previa y registrar el momento exacto de su “Lectura Cero”.

La instalación de un instrumento de estas características debido a su funcionamiento no debería ser muy demorosa con respecto al momento en que el elemento estructural cercano se someta a carga. Esto puede generar pérdida de información correspondiente a dicha carga, lo que hace estar por el lado de la inseguridad al no tener una información adecuada. Se pueden generar confusiones en los umbrales al momento de analizar los datos, ya que, pueden estar más cerca de los umbrales de alarma y no de lo que realmente sucede.

Interpretación de datos

Este es uno de los puntos más débiles dentro del plan de auscultación, debido a que se genera una gran cantidad de información de diferentes tipos de instrumentación que se debe procesar y a veces es difícil manejar. Puede ser un trabajo laborioso debido a que se debe generar una gran cantidad de informes con los datos obtenidos. Estos datos deben ser interpretados, sin embargo, se pueden cometer muchos errores al manejar inadecuadamente esa información, tomando en cuenta que es de suma importancia saber diferenciar cuales datos e información tienen que ser incluidas y excluidas de los informes. En ocasiones puede ser más perjudicial un exceso de información mal tratada, que la propia información faltante.

Fiabilidad de los sensores de instrumentación

Dentro de la instrumentación existen varios sensores los cuales son utilizados para medir ciertas variables. Estos sensores pueden estar en una vida útil extrema al igual que la obra, lo cual puede ser algo negativo para el sensor y por ende para la obra. Se puede prevenir esto encontrando un punto de equilibrio en función de lo que se defina en cada sensor, es decir, en las condiciones climáticas que se encuentre, cuanta importancia tiene la información que genera ese dicho sensor y los medios disponibles que existen para su respectivo mantenimiento.

Otro punto que se debe tomar en cuenta es el denominado “actuación a fallo”, esto quiere decir que no necesariamente se debe esperar que el elemento falle para ser sustituido, de ser así, se recomienda tener esto en cuenta dentro de los informes y análisis de información, debido a que puede variar y puede generar cambios extremos dentro de los umbrales.

2.3 Desarrollo del Reporte del Estado del Arte

El entregable principal del presente trabajo de titulación es desarrollar un Reporte del Estado del Arte para auscultación en la construcción de túneles en zonas urbanas. Para su desarrollo, se realizaron las siguientes actividades:

- Investigación acerca del tipo de instrumentación que existe en general a nivel global.
- Obtención de información otorgada por la constructora Consorcio Línea 1.
- Clasificación del tipo de instrumentación a ser utilizada en auscultación.
- Clasificación del tipo de instrumentación a utilizarse dentro de la Primera Línea del Metro de Quito.

En el Anexo B se presenta el documento técnico correspondiente, titulado Reporte del Estado del Arte para Auscultación en la construcción de túneles en zonas urbanas. Este documento recoge información técnica encontrada, así como los conocimientos adquiridos por el autor en su participación en el proyecto.

2.4 Levantamiento de información sobre instrumentación existente para la auscultación en el Metro de Quito

Para la construcción del Metro de Quito se utiliza cierto tipo de instrumentación que es utilizadas a lo largo del proyecto. La instrumentación puede ser extensa ya que, cada proyecto puede requerir distintos tipos de instrumentación para un mismo fin. A continuación, se presentan el tipo de instrumentación que se utiliza para la construcción de la primera línea del Metro de Quito para cada una de sus categorías:

2.4.1 Instrumentación para tensiones, esfuerzos, y empujes

- Células de presión en túnel
- Células de presión en pantallas
- Células de presión en dovelas

2.4.2 Instrumentación para deformaciones

- Extensómetro de varilla en túnel
- Extensómetro de varilla en superficie
- Extensómetro de cuerda vibrante en armadura de dovelas
- Extensómetro de cuerda vibrante en armadura de pantallas

2.4.3 Instrumentación y métodos para control de movimientos

- Inclínómetros verticales en el terreno (ver)
- Inclínómetros en pantallas
- Hitos de nivelación (ver)
- Regletas de nivelación (ver)

- Clavos de nivelación (ver)
- Prismas automáticos (ver)
- Análisis de fisuras y juntas
- Análisis de fisuras con terna de puntos

2.4.4 Instrumentación para medir presión de agua

- Piezómetro abierto (ver)
- Piezómetro de cuerda vibrante

2.4.5 Análisis de los datos obtenidos del Metro de Quito

Durante la investigación de este trabajo de titulación, el autor dentro de su participación en el proyecto tuvo la posibilidad de obtener información sobre la instrumentación que existe en una de las estaciones y en una sección del túnel de la Primera Línea del Metro de Quito. Por cuestiones de confidencialidad no se colocará el nombre de la estación ni de la sección de túnel, sin embargo, se puede observar en la Figura 17 cómo queda un plano de una sección de instrumentación en estaciones.

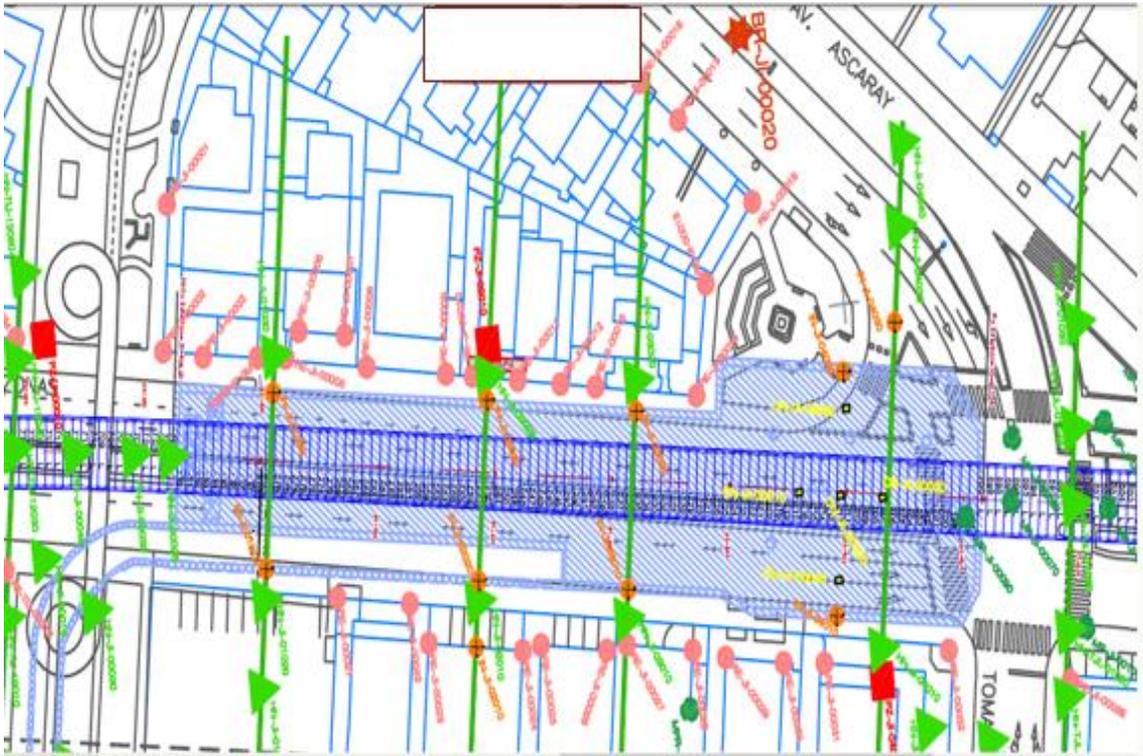


Figura 17. Instrumentación en sección de estación (WebGeom, 2018)

En esta estación, se instalaron diversos instrumentos para su respectivo control y monitoreo a lo largo del proyecto. Por otro lado, en la Figura 18 se observa cómo queda el plano de instrumentación en una sección de túnel, así como en la Figura 19 se presenta una leyenda de lo que significa cada marca y cada color en los planos de las Figura 17 y 18. Es necesario que cada instrumento tenga su propio código para realizar una auscultación correcta y no existan errores. Hay que tomar en cuenta que no necesariamente en cada sección debe haber toda la instrumentación que tiene la leyenda. Esto depende del análisis previo de qué tipo de instrumentación y la cantidad que se

A continuación, y tomando como ejemplo la sección de estación, se presentan los tipos de instrumentación que se encontraron para el control y monitoreo de la Primera Línea del Metro de Quito.

Regletas de nivelación en estación:

Las regletas de nivelación son utilizadas para un control de movimiento verticales. En la Figura 17 representan los puntos rojos redondos. Usualmente son colocadas en las fachadas de las edificaciones como se muestra en la Figura 20. Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B.



Figura 20. Medición de una regleta de nivelación instalada

En la Figura 21 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma horizontal que se encuentra dentro de la gráfica representa las distintas regletas de nivelación que existen en la estación que se está analizando. En donde en el eje de las “x” se encuentra el rango de fechas en días en los cuales se midió la instrumentación. En el eje de las “y” se encuentran los asentamientos o levantamientos medidos en milímetros (mm), lo cual representa ya sea asentamientos o levantamientos de la estructura que se encuentra en la superficie y que, a su vez, tiene colocada una regleta de nivelación. Las líneas de color amarillo y rojo respectivamente, que se observan en la parte inferior de la gráfica representan los umbrales máximos que se están permitidos. Las lecturas de los instrumentos no deberían exceder estos umbrales, ya que representan grandes asentamientos. Para más información sobre los umbrales se recomienda revisar el Anexo B.

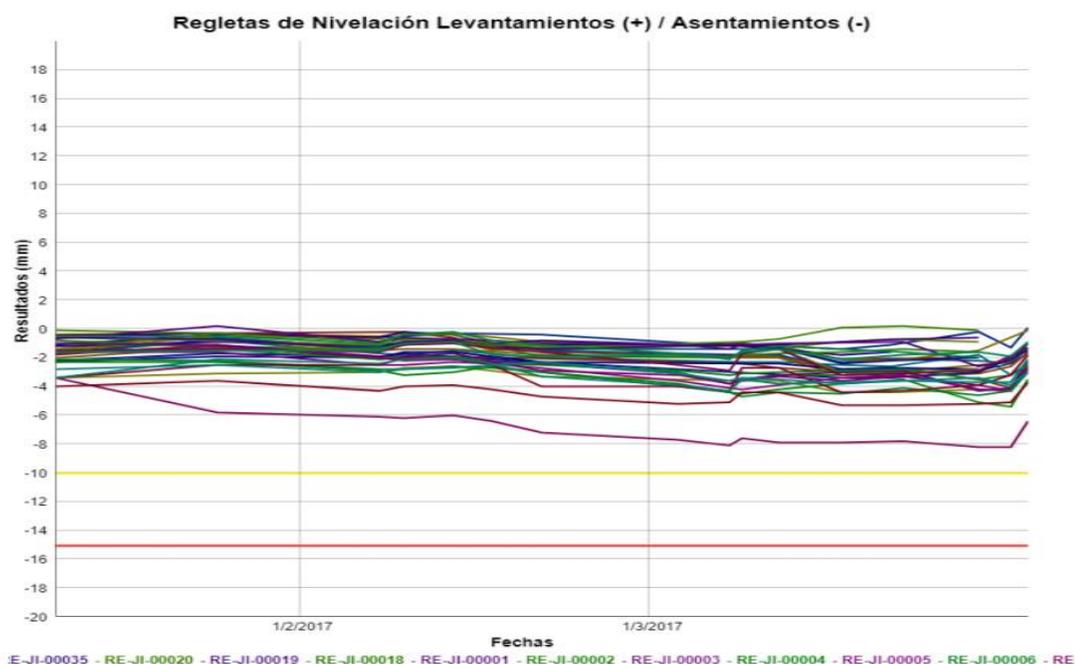


Figura 21. Resultados de medición de las regletas de nivelación en una estación

(WebGeom, 2018)

Analizando la Figura 21 se puede notar que, en efecto, hay la presencia de asentamientos y en ciertos casos unos pequeños levantamientos. Sin embargo, no sobrepasan los umbrales, lo cual se puede decir que especialmente los asentamientos son permisibles.

Hitos de nivelación en estación

Los hitos de nivelación son utilizados para un control de movimiento verticales. En la Figura 17 representan los triángulos verdes. Usualmente son colocados en el suelo desde la superficie como se muestra en la Figura 22. Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B.



Figura 22. Hito de nivelación instalado en sitio

En la Figura 23 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma horizontal que se encuentra dentro de la gráfica representa los distintos hitos de nivelación que existen en

Analizando la Figura 23 se puede notar que, en efecto, hay la presencia de asentamientos y en ciertos casos levantamientos. Sin embargo, no sobrepasan los umbrales, lo cual se puede decir que los asentamientos y levantamientos son permisibles.

Prismas automáticos en estación

Los prismas automáticos son utilizados para un control de movimiento verticales. En la Figura 17 representan los círculos verdes. Usualmente son colocados en fachadas de estructuras importantes o bien en superficie en zonas que requieran lecturas todo el tiempo (ver Figura 24) y se pueden medir mediante un teodolito robotizado que bien puede ser instalado en altura o en superficie (ver Figura 25). Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B.



Figura 24. Prisma instalado en superficie



Figura 25. Teodolito automático instalado en superficie

En la Figura 26 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma horizontal que se encuentra dentro de la gráfica representa los distintos prismas que existen en la estación que se está analizando. En donde en el eje de las “x” se encuentra el rango de fechas en días en los cuales se midió la instrumentación. En el eje de las “y” se encuentran los asentamientos o levantamientos medidos en milímetros (mm), lo cual representa ya sean asentamientos o levantamientos de la zona o de la estructura en la cual se encuentra instalado el prisma y que generalmente se encuentran cerca de la obra. Para más información sobre los umbrales se recomienda revisar el Anexo B.

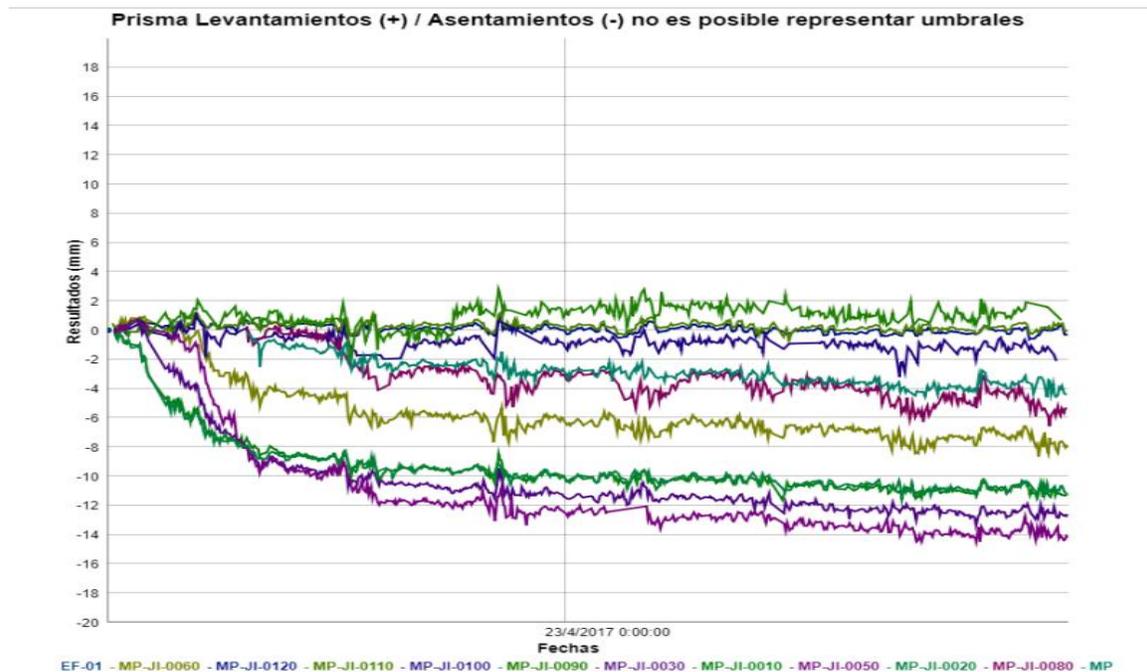


Figura 26. Resultados de medición de prismas en sección de una estación

(WebGeom, 2018)

Analizando la Figura 26 se puede notar que, en efecto, hay la presencia de asentamientos y en ciertos casos levantamientos. Sin embargo, no es posible representar los umbrales por la gran cantidad de medidas que estos representan.

Inclinómetros en estación

Los inclinómetros son utilizados para controlar como su propio nombre lo dice, las inclinaciones. En la Figura 17 representan los círculos de color naranja. Usualmente son embebidos en pantallas o en el terreno cercano a la estación como se muestra en la Figura 27. Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B.



Figura 27. Colocación de inclinómetro en armadura de pantalla

En la Figura 28 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma vertical que se encuentra dentro de la gráfica representa las distintas fechas que fue medido el instrumento que existe en la estación que se está analizando. En donde en el eje de las “x” se encuentra las inclinaciones generadas, medidas en milímetros (mm) y el eje de las “y” representa la profundidad a la cual se encuentra instalado el inclinómetro. Para más información sobre los umbrales se recomienda revisar el Anexo B.

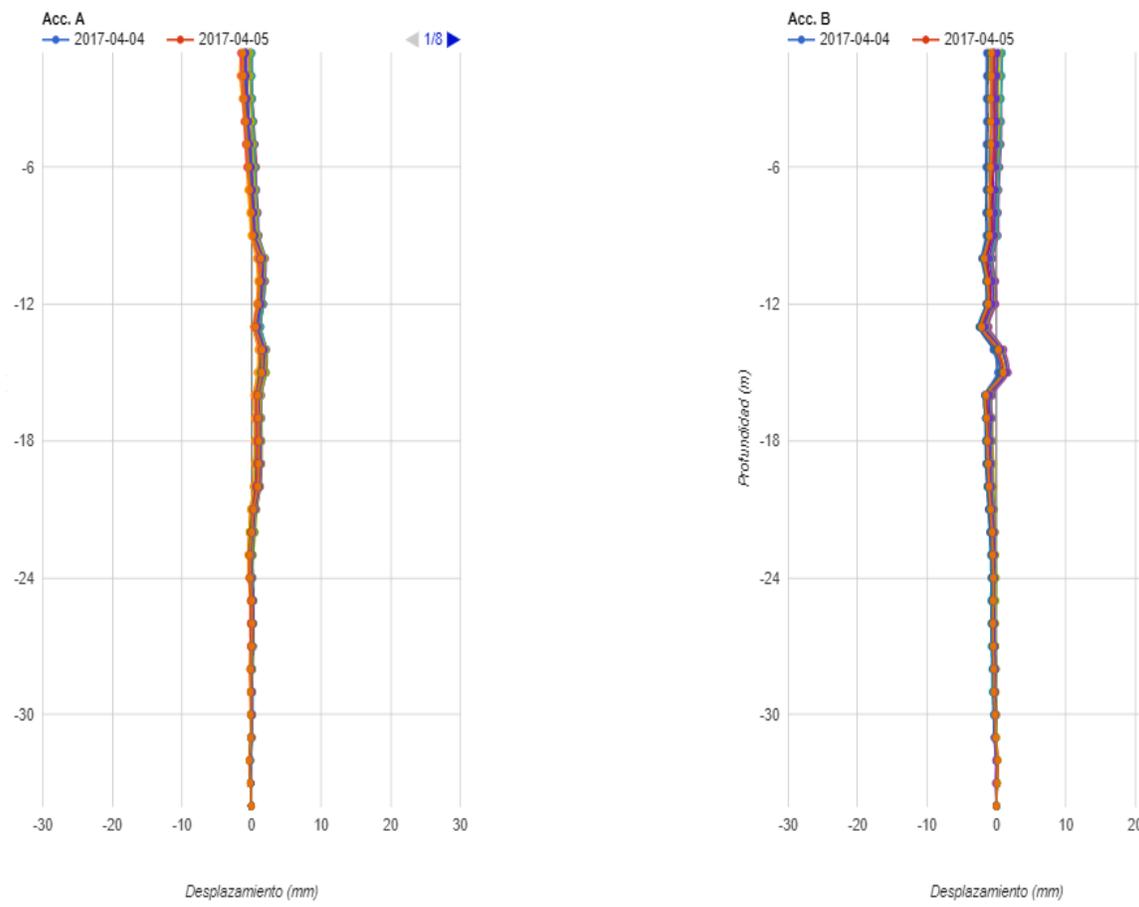


Figura 28. Resultados de medición de un inclinómetro en estación

(WebGeom, 2018)

Analizando la Figura 28 se puede notar que, en efecto, hay la presencia de inclinaciones. Sin embargo, se observa que son realmente pequeñas comparadas con los umbrales que se definieron para la obra de la Primera Línea del Metro de Quito, no pasan los 3 mm. Con esto se puede decir que las inclinaciones en este instrumento son permisibles.

Piezómetros en estación

Los piezómetros son utilizados para controlar la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático. En la Figura 17 representan los cuadrados de color rojo. Usualmente son instalados en el terreno cercano a la estación como se muestra en la Figura 29. Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B.



Figura 29. Medición de piezómetro mediante cuerda vibrante

En la Figura 30 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma horizontal que se encuentra dentro de la gráfica representa cada piezómetro que está instalado en esa sección de la estación que se está analizando. En donde en el eje de las “x” se encuentran las fechas en las que se tomó los datos, medidos en días y el eje de las “y” representa la

profundidad a la cual se encontró que se encuentra el nivel freático, medido en metros (m). Para más información sobre los umbrales se recomienda revisar el Anexo B.

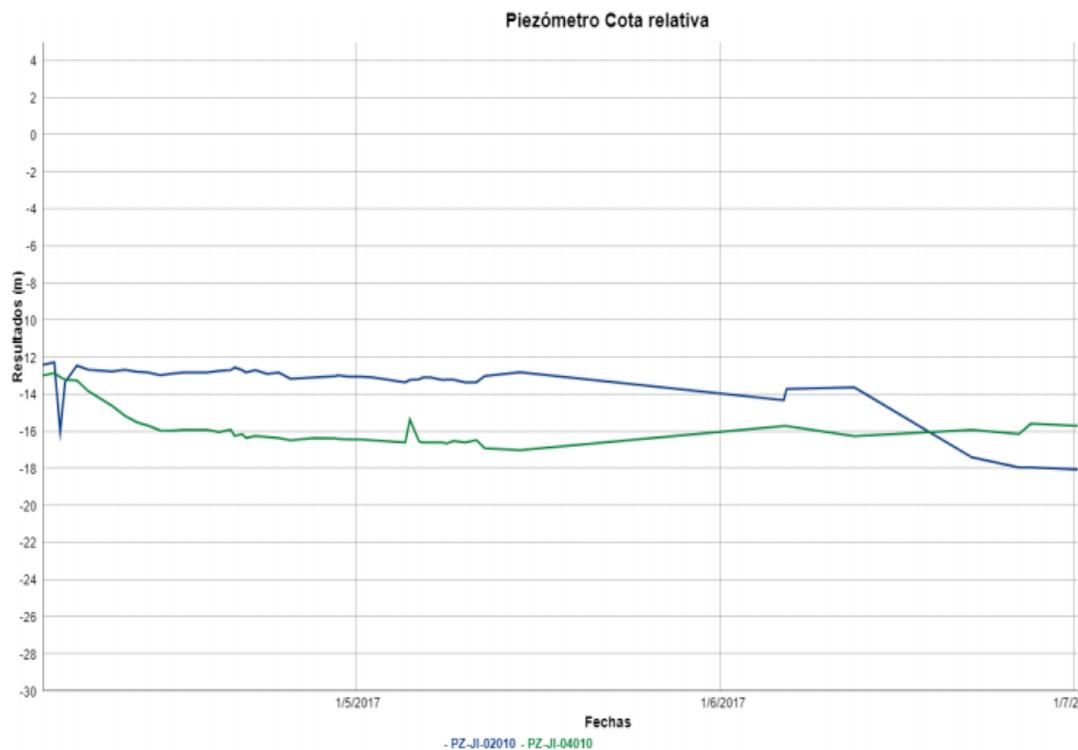


Figura 30. Resultados de la medición de piezómetros en sección de estación
(WebGeom, 2018)

Analizando la Figura 30 se puede notar que, en distintos días medidos, el nivel freático va variando. Esto puede generarse por las distintas excavaciones o movimientos de tierras que se hicieron en el sector y en las fechas indicadas, causando un cambio en las presiones del suelo y por ende en los acuíferos que existen en la parte subterránea. Esto puede producir una variación a la cual se encuentra el nivel freático. En este caso no ha

umbrales para comparar, ya que justamente lo que se requiere es saber la profundidad a la cual se encuentra.

Clavos de nivelación en estación

Los clavos de nivelación son utilizados para controlar movimientos verticales del terreno. En la Figura 17 representan los cuadrados de color amarillo. Si se requiere más información acerca de su respectiva instalación y forma de medir, se recomienda ver el Anexo B. En la Figura 31 se puede apreciar un ejemplo de como son los clavos de nivelación.



Figura 31. Ejemplo de clavos de nivelación. (Wikipedia, 2018)

En la Figura 32 se presenta una gráfica en donde cada línea de forma horizontal que se encuentra dentro de la gráfica representa cada clavo de nivelación que se encuentra instalado en esa sección de la estación que se está analizando. En donde en el eje de las “x” se encuentran las fechas en las que se tomó los datos, medidos en días y el eje de las

“y” representa los asentamientos y levantamientos medidos en milímetros (mm). Para más información sobre los umbrales se recomienda revisar el Anexo B.

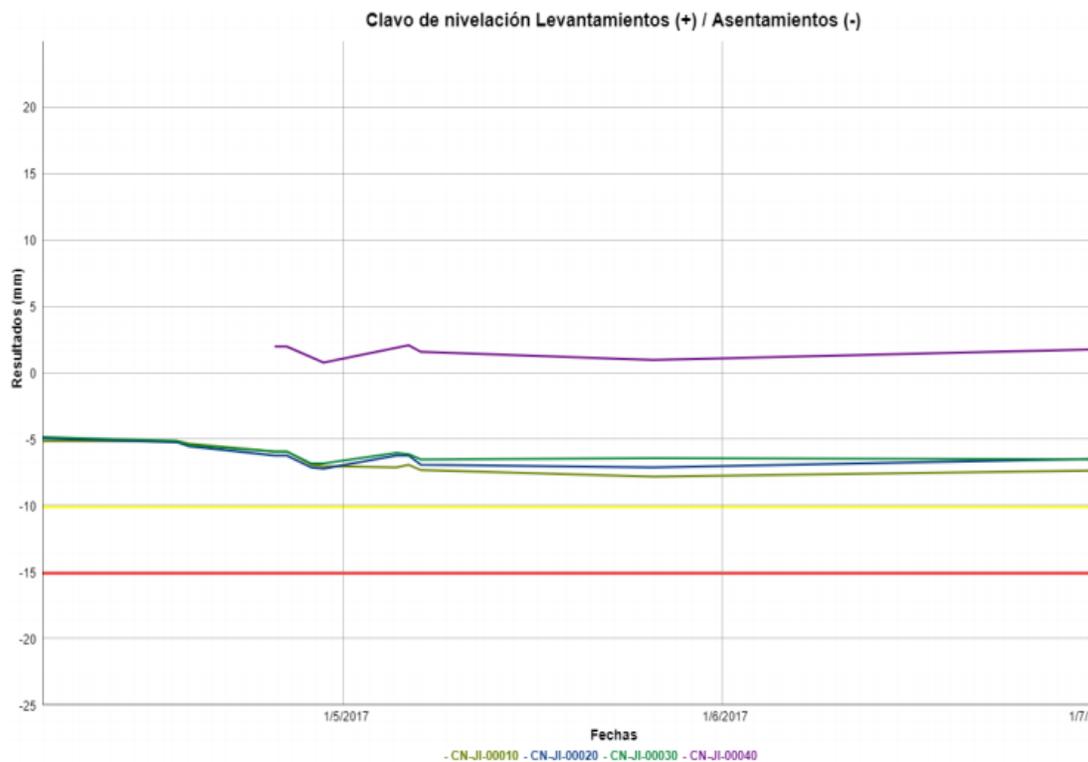


Figura 32. Resultados de la medición de clavos de nivelación en sección de estación
(WebGeom, 2018)

Analizando la Figura 32 se puede notar, en efecto, hay la presencia de asentamientos y en ciertos casos levantamientos. Sin embargo, no sobrepasan los umbrales, lo cual se puede decir que los asentamientos y levantamientos son permisibles.

CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

Del desarrollo del presente trabajo de titulación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El Metro de Quito es una obra de alta importancia para el país desde el punto de vista económico (costo) y a su vez, el servicio que brindará a la ciudadanía será un beneficio considerable.
- Es importante realizar auscultación en la construcción de obras subterráneas. En particular cuando se trata de obras que se realizar en zonas urbanas, tomando en cuenta el patrimonio que estas puedan presentar.
- Realizar estudios previos a la construcción de una obra subterránea es esencial. Estos estudios pueden ser de movilidad, geológicos, geotécnicos, arqueológicos (tratándose de lugares patrimoniales), paleontológicos, geográficos, topográficos, ambientales, sociales e incluso el impacto urbano que una obra de tal magnitud generará. Estos estudios pueden ser realizados a niveles de prefactibilidad, factibilidad o definitivos.
- Para poder realizar una correcta auscultación, es necesario crear un plan de auscultación y será realizado previamente a la ejecución de la obra. Debe ser claro, ordenado y conciso. Es decir, este documento debe explicar todas las fases que componen el proceso de instrumentación.

- En la instrumentación como su nombre lo dice, son los instrumentos los necesarios para realizar una auscultación adecuada. Dentro de las categorías que pueden existir en la auscultación de forma general son las siguientes: Auscultación de tensiones, esfuerzos, y empujes. Auscultación de deformaciones. Auscultación de movimientos. Auscultación para medir la presión del agua. Inspección de túneles mediante tecnología láser y otras.
- Se desarrollo un Reporte del Estado del Arte que permite al técnico tener una guía y referencias de cómo utilizar la instrumentación para realizar auscultación de construcción de túneles en zonas urbanas.

3.2 Recomendaciones

Del desarrollo del presente trabajo de titulación se puede recomendar lo siguiente:

- Auscultar con la correcta instrumentación puede minimizar los riesgos de que ocurra un accidente, asentamientos, deformaciones, etc. No es necesario esperar a que suceda algo para actuar, más bien controlar constantemente para evitar que suceda algo de mayor magnitud.
- Para no cometer errores en la interpretación de los datos, es recomendable e importante que se establezca de forma clara qué finalidad tiene cada una de la instrumentación instalada en campo y de igual manera dimensionar dicha instrumentación, esto quiere decir, que se recomienda que tanto de esa instrumentación se va a ubicar en una sección determinada.

- Al momento de adquirir los instrumentos para auscultar un proyecto, se recomienda que sea equipo de marcas reconocidas, es decir, que sean fiables. En el caso de utilizar equipo que no sean nuevos, se debe tener la certeza que se encuentren calibrados correctamente y por empresas calificadas.
- Si es que se comete un error o existe algún problema en campo o a su vez, en la realización de informes, es necesario tener en cuenta cual es el proceso para aplicar. Se debe tener un organigrama del personal, lo cual es muy útil para saber informar al superior más cercano a cerca del error o problema y así actuar de manera correcta y rápida.
- Se recomienda investigar si existen nuevos tipos de instrumentos en forma general. Estos equipos pueden ser más sofisticados, lo que podrían permitir al especialista tener una mejor lectura y no cometer errores.
- Se recomienda utilizar herramientas digitales para tener un buen control dentro del plan de auscultación. Ya que debe ser ordenado y claro. Para un futuro análisis, se podría crear una aplicación o un software informático más sofisticado para proyectos que requieran de auscultación.
- Así como la tecnología avanza con el tiempo y pueden crear nuevos tipos de instrumentos y softwares, es importante que el técnico se mantenga actualizado. Si no es el caso, se recomienda que se realicen capacitaciones técnicas a las personas que lo requieran.

CAPÍTULO 4. REFERENCIAS

- Vazquez, L. (2016). ¿Cree que ha mejorado el servicio de transporte público en Quito? Retrieved from <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-servicio-transportepublico-acuerdo-municipio.html>
- Coba, G. (2017). Dos ciudades ecuatorianas entre las 100 urbes principales con más horas perdidas en el tráfico. Retrieved from <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-guayaquil-ecuador-trafficoinforme.html>
- Celi, S. (2018). Análisis del sistema de transporte público privado de la ciudad de Quito - Ecuador. Retrieved from <http://www.revistaespacios.com/a18v39n19/a18v39n19p01.pdf>
- 2'400.000 de viajes persona en el Sistema de Transporte al día. (2017). Retrieved from <http://www.quitoinforma.gob.ec/2017/08/16/2400-000-de-personas-se-movilizan-el-sistema-de-transporte-al-dia/>
- Macías, V. (2016). SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO (SITM) - PDF. Retrieved from <https://docplayer.es/23453513-Sistema-integrado-de-transporte-masivo-sitm.html>
- Estudios - Metro de Quito. (2018). Retrieved from <http://www.metrodequito.gob.ec/el-proyecto/estudios/>
- Metro de Quito - El Metro es una realidad. (2018). Retrieved from <http://www.metrodequito.gob.ec/>
- Schmitter, J. (2016). Obras subterráneas, en las áreas urbanas con subsuelo poco competente. Retrieved from <https://es.slideshare.net/AcademiaDeIngenieriaMx/obras-subterrneas-en-las-reas-urbanas-con-subsuelo-poco-competentecivil>
- Ramos, L. (2017). Túneles y ciudades: un vistazo a la vida urbana bajo la superficie. Retrieved from <http://www.urban-hub.com/es/cities/tuneles-y-ciudades-un-vistazo-a-la-vida-urbana-bajo-la-superficie/>

- Metro de Quito. (2017). Retrieved from https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Metro_de_Quito&oldid=99538894
- Geocisa | Instrumentación Geotécnica. (2014). Retrieved from http://www.geocisa.com/?page_id=1306
- monitorear | Definición de monitorear en español de Oxford Dictionaries. (2018). Retrieved from <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/monitorear>
- Metro de Madrid. (2017). Retrieved from https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Metro_de_Madrid&oldid=99527515
- Rodríguez Vega, A. (2012). *Diccionario básico de la lengua española*. León: Everest.
- El Metro integrará al transporte masivo. (2011). Retrieved from <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/metro-integrara-al-transporte-masivo.html>
- Alcalde Barrera habló del metro de Quito en el Enlace Ciudadano. (2012). Retrieved from <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/alcalde-barrera-hablo-del-metro.html>
- Sola, & Del Saz. (2007). *CURSO DE GEOTECNIA PARA INFRAESTRUCTURAS*. MADRID.
- (2018). Retrieved from <http://dle.rae.es/?id=HpsmYNC>
- Hernández, J. (2000). Apuntes de geotécnica. Universidad de Granada
- Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on. (2008). Retrieved from <https://studylib.net/doc/8110417/use-of-inclinometers-for-geotechnical-instrumentation-on>
- EGV consultores, & Ecuator. (2015). WebGeom - Metro de Quito. Retrieved from <http://metrouio.ecuador.com/>
- Presentación Guía Técnica: Instrumentación y Auscultación en el Proyecto y Construcción de Túneles Urbanos - AETOS. (2014). Retrieved from

<http://www.aetos.es/guia-tecnica-instrumentacion-y-auscultacion-en-el-proyecto-y-construccion-de-tuneles-urbanos/>

gall, v., burn, v., & john, r. (2018). Real-Time Monitoring for Very Shallow Tunneling in Urban Settings. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/268382947_Real-Time_Monitoring_for_Very_Shallow_Tunneling_in_Urban_Settings

Publications - Austrian Society for Geomechanics. (2018). Retrieved from

<https://www.oegg.at/en/the-oegg-2/publications-112/>

Geotechnical Monitoring in Convencional Tunneling. (2014). Retrieved from

http://www.ytmk.org.tr/files/files/OeGG_Monitoring_Handbook.pdf

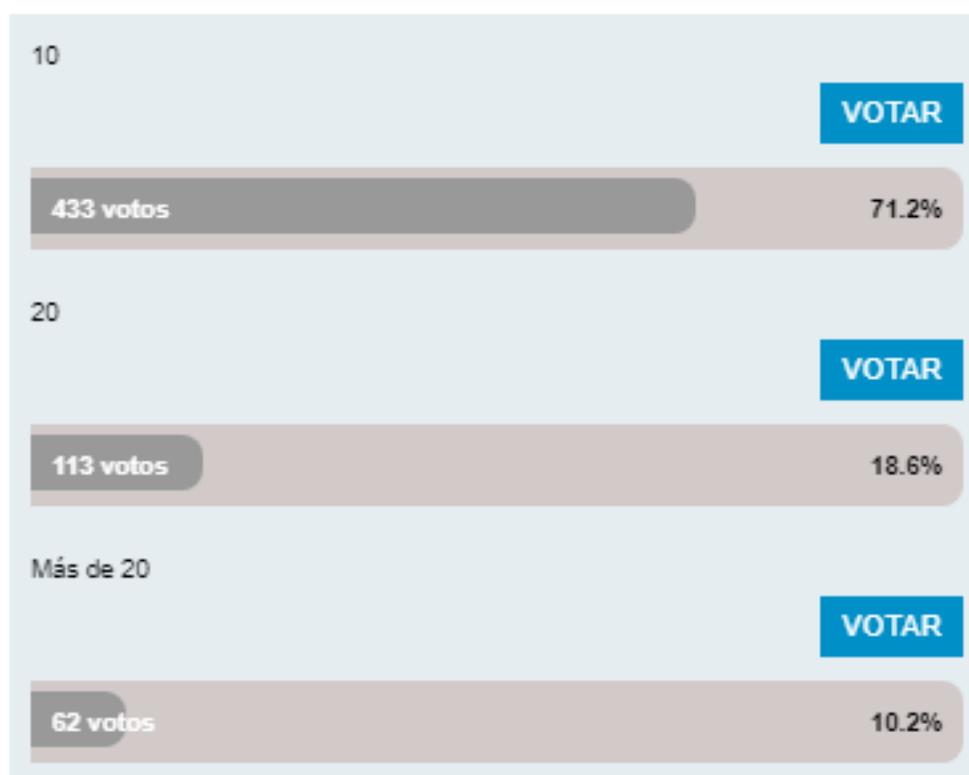
ANEXO A

Encuesta a cerca del transporte público de Quito

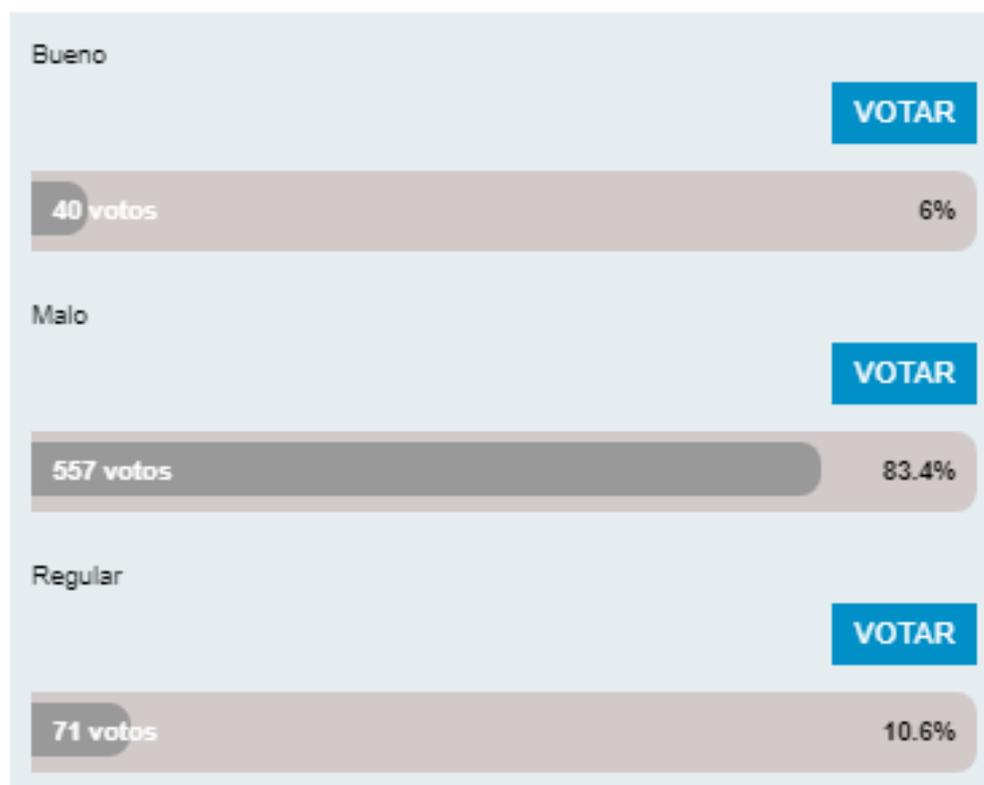
¿Es usuario de transporte público?



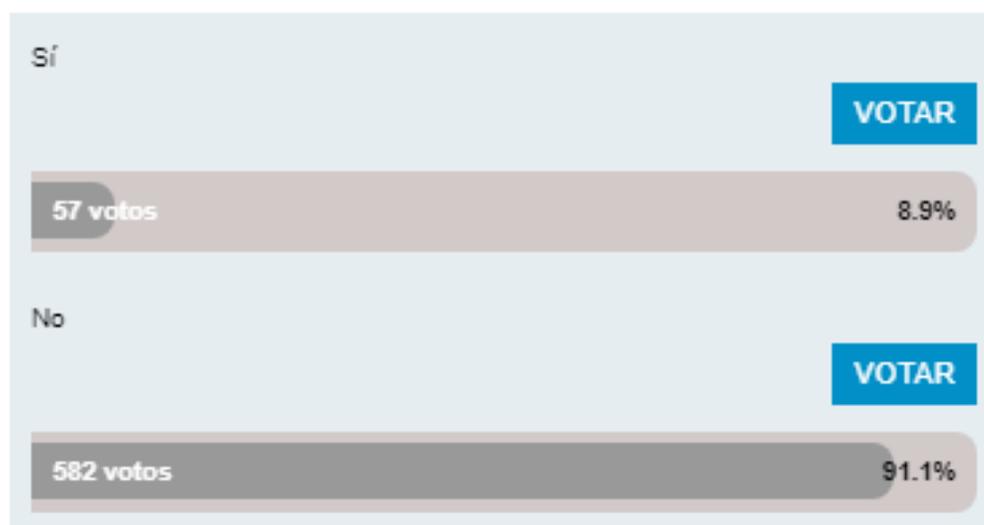
¿Cuántas veces a la semana usa usted el servicio de buses?



¿Cómo calificaría el servicio de este transporte en Quito?



¿Cree que ha mejorado este servicio en la capital, después del acuerdo entre transportistas y autoridades municipales?



¿Qué le disgusta más del transporte público?

Exceso de pasajeros

VOTAR

399 votos

64.9%

Exceso de velocidad

VOTAR

60 votos

9.8%

Trato del conductor o ayudante

VOTAR

50 votos

8.1%

Las tarifas

VOTAR

1 votos

0.2%

Competencias entre unidades

VOTAR

46 votos

7.5%

ANEXO B

DOCUMENTO GUÍA

QUE CONTIENE REPORTE DEL ESTADO DEL

ARTE

PARA AUSCULTACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

DE TÚNELES EN ZONAS URBANAS

REPORTE DEL ESTADO DEL ARTE

PARA AUSCULTACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE

TÚNELES EN ZONAS URBANAS

José Antonio Guillén Martínez

Universidad San Francisco de Quito

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo 1 - Introducción

Capítulo 2 – Definiciones

Capítulo 3 - Sensores geotécnicos para

auscultación de tensiones, esfuerzos y empuje

- 3.1 Células de presión en túnel
- 3.2 Células de presión en pantallas
- 3.3 Células de presión en dovelas

Capítulo 4 – Auscultación de deformaciones

- 4.1 Extensómetro de varilla en túnel
- 4.2 Extensómetro de varilla en superficie
- 4.3 Extensómetro de cuerda vibrante

Capítulo 5 – Auscultación de Movimientos

- 5.1 Inclínómetro verticales en el terreno
- 5.2 Inclínómetros en pantallas
- 5.3 Clinómetros
- 5.4 Hitos de nivelación

Capítulo 6 – Movimientos Relativos

“Convergencias y Nivelación”

- 6.1 Pernos de convergencia en túnel
- 6.2 Dianas de puntería
- 6.3 Control topográfico

Capítulo 7 – Análisis de Fisuras y Juntas

- 7.1 Análisis con fisurómetro
- 7.2 Análisis con terna de puntas
- 7.3 Análisis con dianas de puntería

Capítulo 8 – Auscultación de la Presión del Agua

- 8.1 Piezómetro abierto
- 8.2 Piezómetro de cuerda vibrante

Capítulo 9 – Referencias

Capítulo 1 - Introducción

Para la realización de obras de infraestructura es necesario tener el control técnico de la misma, control se refiere a la medición real que sucede dentro de las obras y a sus alrededores. La Auscultación es una técnica que ayuda en este tipo de actividades, al tener dentro de un plan de auscultación diversos equipos e instrumentos que permiten realizar estas mediciones antes, durante y después de su ejecución.

Es importante definir qué tipo de instrumentación se utilizará en la obra a realizarse. A continuación, se presenta la instrumentación principal que puede utilizarse en la auscultación para la construcción de túneles subterráneos dentro de zonas urbanas.

Capítulo 2 – Definiciones

Para poder entender las definiciones, hay que tomar en cuenta que las mismas se las realiza con la idea de ser definidas según la ingeniería y en ciertos casos por la misma física, aplicadas al tema central que es la auscultación de túneles.

Geotecnia: Consiste en utilizar los conceptos de la ingeniería para desarrollar obras públicas dependiendo de las cualidades de los materiales que se encuentren en el suelo del planeta. Es una rama de la ingeniería civil.

Auscultación: Es un proceso en el cual se evalúa, se mide y se monitorea el comportamiento de infraestructuras y de obras civiles, obteniendo parámetros y variables que permitan evaluar el estado de estas.

Tensiones: Son fuerzas internas accionantes debido a cambios realizados en el suelo. Estas fuerzas actúan sobre un área aplicada y pueden ser generadas de forma natural o generadas por el hombre, ya sean directa o indirectamente.

Esfuerzos: Fuerza que es aplicada contra una resistencia que sirve para contrarrestar o revertirlo. En otras palabras, es la fuerza que actúa sobre un cuerpo para deformarlo.

Empuje: Realizar una fuerza o presión, ya sea físicamente o simbólicamente contra algo o alguien para repelerlo, desplazarlo o aguantarlo.

Sensores: Dispositivos diseñados para detectar y recibir estímulos externos, transformados en otras magnitudes y por ende poder responder ante ellas.

Transductor de cuerda vibrante: Es un tipo de dispositivo que recibe un tipo de energía y lo transforma en otra. En este caso genera energía eléctrica debido a esfuerzos mecánicos, lo que produce vibraciones en la cuerda y, por ende, genera frecuencias las cuales pueden ser medidas.

Transductor potenciométrico: Es un dispositivo que indica el aumento o la reducción de potencia o de una variable en específico, debido a la acción o fuerza ejercida por un cambio de posición.

Prefabricado: En la construcción, soy cuyas partes se envían ya fabricadas previamente en un lugar específico hacia el lugar de su armado o ensamblaje, donde solo se las colocará y se las fijará.

Umrales o semáforo: Parámetros en los cuales se encuentran los límites de cada instrumento instalado. Estos límites proporcionan al experto en auscultación, información de cuál es el estado real de lo que se quiere medir, utilizando el sensor específico para ese tipo de medición. Los umbrales se los acuerda previamente, dependiendo de la situación de control (Ver Figura 1), sabiendo así si se encuentran dentro de los parámetros permitidos o existe algún problema según las lecturas lo cual exija un control de monitoreo más frecuente o incluso en casos más extremos una detención de la obra para medidas correctivas, como pueden ser mejoramientos, ya sean del suelo (Inyecciones), edificaciones, etc.

SITUACIÓN DE CONTROL	MEDIDAS DE ACTUACIÓN
VERDE	Proseguir con la frecuencia de lecturas establecida en el presente plan. Continuar con el proceso según lo previsto.
ÁMBAR	Incrementar la frecuencia de lecturas si es preciso, evaluando la situación a partir de la velocidad de variación del parámetro registrado. Efectuar una inspección visual somera. Continuar según lo previsto.
ROJO	Establecer un análisis específico de la situación. Colocación de instrumentación complementaria si fuera preciso. Valorar la necesidad de introducir medidas correctoras, refuerzo o protección de las estructuras o elementos afectados.

Figura 1. Ejemplo de umbrales – parámetros (Consorcio Línea, 2018)

Vía GSM: Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (Global System for Mobile Communications en inglés). Utilizada para conectarse a una computadora, a través de un celular móvil.

Estratos de suelo: Son capas en donde se presentan las divisiones de los distintos sedimentos que existen en el suelo, ya sean rocas sedimentarias, rocas piroclásticas o rocas metamórficas.

Capítulo 3 - Sensores geotécnicos para auscultación de tensiones, esfuerzos y empuje

En esta sección es ideal la utilización de células de presión o también conocidas como celdas de presiones, las cuales, tienen como objetivo registrar y controlar la presión total ejercida sobre una estructura o sostenimiento. La célula o celda de presión, está constituida por una doble capa metálica de forma circular o rectangular, rellena de mercurio o aceite, la presión que actúa sobre la célula se trasmite al transductor de presión a través del aceite, éste la transforma en una salida en voltios, la cual es transformada a unidades de presión con la carta de calibración de cada célula que suministra el fabricante. Puede ser leída por una unidad de lectura o por un equipo de registro de datos. Las células de presión registran variaciones de presión a partir de una lectura inicial, por lo que es de gran importancia elegir adecuadamente el momento en que se toma dicha lectura.

3.1 Células de presión en túnel

Principios de operación:

Las células de presión son instrumentos que miden presiones, las cuales pueden ser radiales como tangenciales, el objetivo principal de la instalación de dichas células es obtener la distribución de cargas a las que está sometido el sostenimiento del túnel. El propósito general de instalar este tipo de instrumentación a lo largo de los túneles es tener un control adecuado de todas las presiones que está ejerciendo el suelo hacia el túnel en todas sus direcciones, es por eso por lo que se tiene las celdas de presión tangenciales, radiales y total, las cuales se utilizan para medir subpresiones en la contra bóveda.

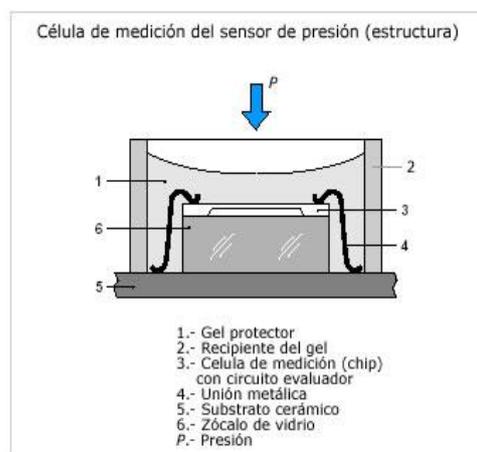


Figura 2. Esquema de una célula o celda de presión (Wikipedia, 2018)

Para poder aplicar el procedimiento de la figura 3, para la instalación del sistema, previamente se definirá la posición de las células en el sostenimiento del túnel según se requiera y se procederá a marcarlas en la armadura si la hubiera o bien en el propio terreno. Además, es importante analizar los siguientes puntos:

- Orientación del sensor, en función de la dirección en la que queremos medir la presión.
- Situación del punto donde se ubicará la caja de protección.
- Tipo de protección para el cable y el sensor, en función de las condiciones externas.

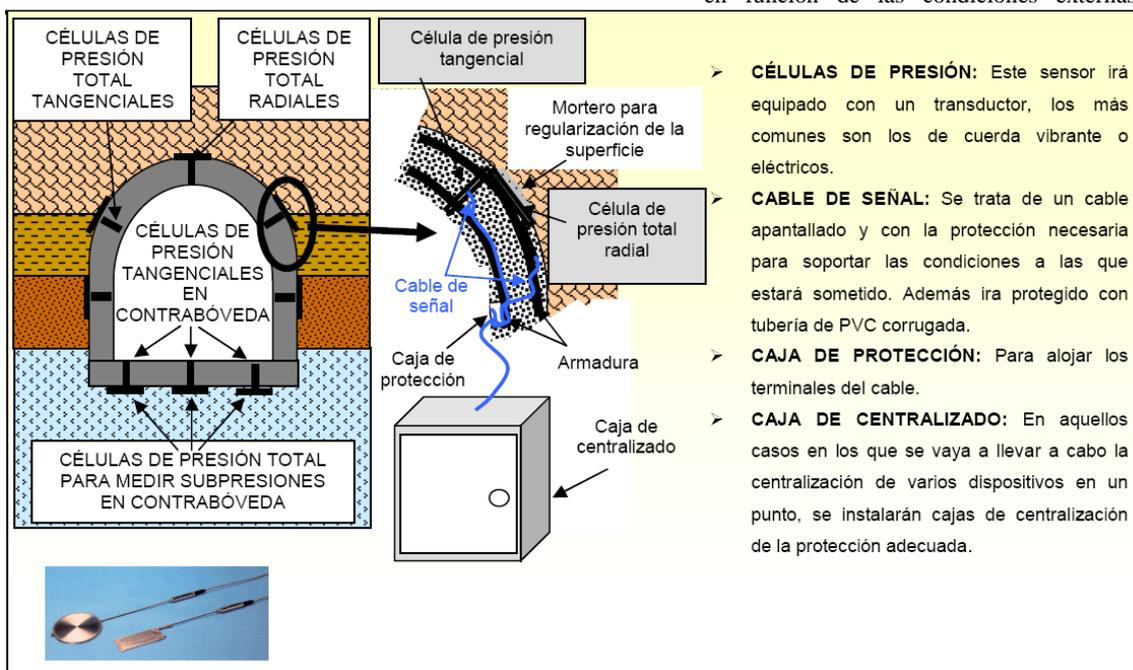


Figura 3. Esquema de instalación de célula de presión en túneles (Consorcio Línea 1, 2017)

Procedimiento de instalación:

Una vez que se ha definido el diseño del sistema, se procederá a su respectiva instalación. La instalación se realizará siguiendo los siguientes puntos:

- Preparación de la armadura y de la superficie.** La célula debe instalarse directamente en la armadura, colocando el mortero de regularización en la superficie sobre la que se va a apoyar la parte activa de la célula, como, por ejemplo, el caso de las presiones radiales.
- Instalación de célula de presión.** El sensor se instala mediante alambre de amarre a la armadura, a las barras auxiliares o al terreno, de modo que deberá quedar con la parte activa perfectamente apoyada sobre la superficie en la que se requiere medir las presiones. Esta operación la llevará a cabo personal con experiencia en este tipo de instalación para
- que las características del sensor no se vean afectadas durante el proceso de instalación.
- Protección y fijación del cable.** El cable, estará perfectamente protegido con la tubería de PVC corrugado. Esta tubería se amarra en distintos puntos de la armadura o del terreno hasta la caja de protección o de centralización según proceda.
- Instalación de la caja de protección.** Una vez concluida la instalación del sensor y del cable, se colocará la caja de protección, en la cual se alojan los terminales de uno o varios aparatos.
- Instalación de la caja de centralización.** Se debe colocar la caja de centralización, a la cual llegan los cables de los distintos aparatos desde sus respectivas cajas de protección.

Consideraciones especiales:

- a) En aquellos casos en los que exista armadura, pero su disposición no sea la adecuada para una colocación de la célula en el punto de instalación y con la orientación requerida, se podrán colocar barras auxiliares a las que se sujeta la célula.



Figura 4. Colocación de célula en pared de excavación (Consortio Línea 1, 2017)

3.2 Células de presión en pantallas**Principios de operación:**

En este caso particular, se puede controlar la presión ejercida por el suelo sobre la pantalla en la que se instala. El diseño especial de este sistema tiene como finalidad asegurar que la parte activa de la célula esté en contacto con el suelo, de ahí la necesidad del sistema hidráulico de empuje. En la figura 5 se muestra

un esquema para la instalación respectiva de células de presión en pantalla. Mientras que en la figura 5, se muestra una fotografía del montaje del instrumento en la armadura de la pantalla previo a su colocación y fundición de la pantalla. La célula de presión total es igual a la que llamamos célula o celda de presión, con la pequeña diferencia que la primera debe tener incorporado un sistema hidráulico de empuje, el cual ayuda a accionar desde la superficie debido que la célula de presión se encontrará a grandes profundidades, lo que hace difícil su acceso.

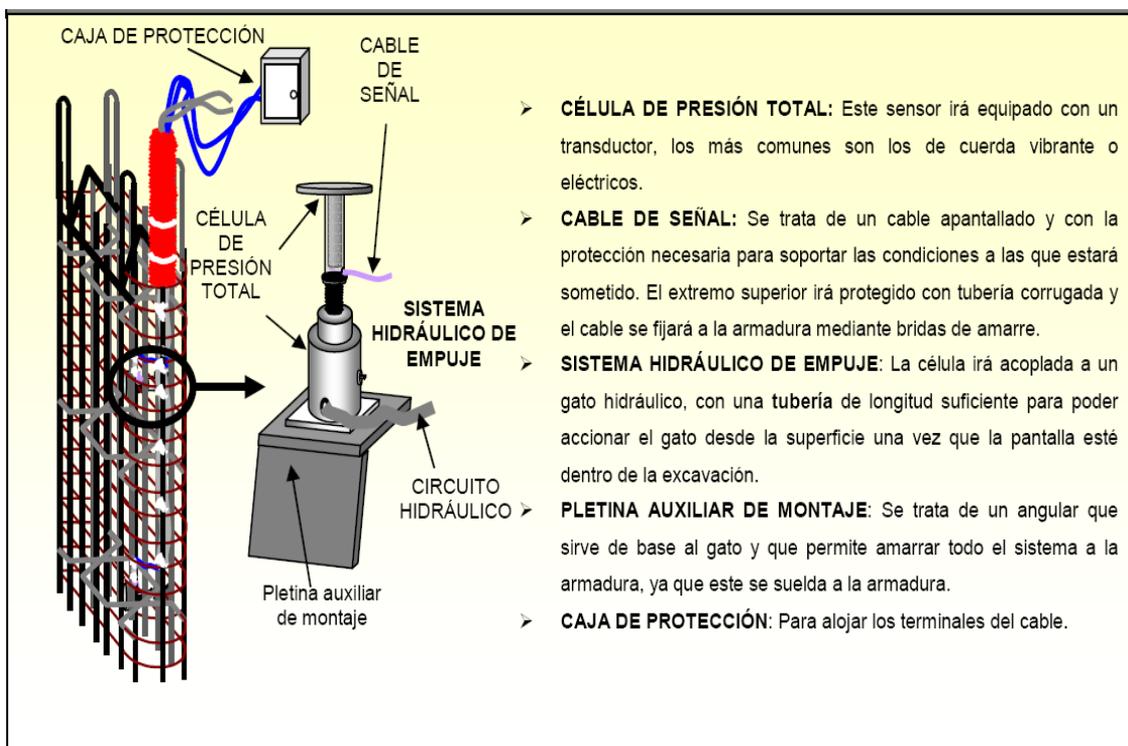


Figura 5. Esquema de instalación de células de presión en pantallas (Consortio Línea 1, 2017)



Figura 6. Célula de presión y sistema hidráulico instalado en armadura de pantalla

Como trabajo previo a la instalación de las células de presión en pantallas y para dimensionar correctamente tanto el sistema hidráulico como el cable de señal, se debe replantear sobre la armadura su posición, conocer el espesor de pantalla, la profundidad de excavación, la situación del punto de centralización y el tipo de protección para el cable y el circuito hidráulico.

Procedimiento de instalación:

Una vez resuelto el diseño del sistema y hecho el pre-montaje en taller, procedemos a su instalación en la armadura de la pantalla, siguiendo los siguientes pasos:

- a) **Preparación de la armadura.** Se realiza el armado de la armadura en sitio, en la cual hay que tomar en cuenta las especificaciones que se requieran para esa pantalla.
- b) **Instalación del sensor.** Se fija el sensor y el gato hidráulico a la armadura.
- c) **Protección y fijación del cable y del circuito hidráulico.** Consiste en revestir el cable de señal y el circuito hidráulico con la protección adecuada y fijarlos a la armadura para que estos no sufran ningún daño durante el posterior hormigonado de la pantalla.
- d) **Comprobación del circuito hidráulico de empuje.** Se probará el correcto funcionamiento del sistema hidráulico antes de introducir la armadura en la excavación.
- e) **Accionamiento del sistema hidráulico de empuje.** Una vez que la armadura de la

pantalla se introduce en la excavación, se bombea aceite desde la superficie del terreno a través del circuito hidráulico, hasta asegurarse que la parte activa de la célula está

totalmente en contacto con el terreno de la excavación.

- f) **Instalación de la caja de protección.** Una vez introducida la armadura en la excavación, se colocará la caja de protección o de centralización según proceda, a la cual llegan los terminales de los distintos aparatos.

Consideraciones especiales:

- a) En el caso de que se requiera instalar la célula de presión en un lugar de difícil sostenimiento con la armadura, se podrá utilizar barras de acero auxiliares. Para esto hay que tomar en cuenta que estas barras auxiliares se deben amarrar o soldar en el exterior, es decir, antes que la pantalla sea ingresada en su sitio.
- b) En la figura 7 se puede observar el levantamiento de la armadura de una pantalla, lista para ser colocada en su sitio. De igual manera se puede notar la tubería blanca de PVC, la cual es la protección del cable de señal y del circuito hidráulico. Al ser una pantalla de una longitud considerable, es recomendable siempre analizar previamente la ubicación, dirección y colocación de los sensores.



Figura 7. Levantamiento de una armadura de pantalla mediante grúa (Consortio Línea 1, 2017)

3.3 Células de presión en dovelas

Principios de operación:

El objetivo del montaje de las células de presión es registrar la presión que ejerce el terreno sobre el sostenimiento del túnel, en este caso sobre las dovelas que conforman el anillo de sostenimiento. En la figura 8 se aprecia el esquema de instalación de una célula o celda de presión, colocada en la armadura de una dovela prefabricada, esto quiere decir que la célula de presión debe ser ubicada correctamente dentro de la armadura y posteriormente colarla de hormigón.

Procedimiento de instalación:

- a) Se debe armar la armadura de la dovela, esto normalmente se lo realiza en un lugar de toda la obra, donde se especializan al armado y hormigonado de cada una de las dovelas, las cuales el conjunto de varias, forman un anillo. Los túneles están conformados por cientos o hasta de miles de anillos.
- b) Para la instalación de estas células de presión, como trabajo previo, se replanteará su posición y se marcarán en las armaduras ya armadas, donde se tomará en cuenta la longitud de cable necesario para llegar a la caja de protección y adicionalmente también se colocará la caja de protección donde se la requiera.



Figura 8. Esquema de instalación de célula de presión en dovelas prefabricadas (Consortio Línea 1, 2017)

- c) Posteriormente, se amarra la célula y el cable de señal a la armadura, llevándolo hasta la caja de protección antes de trasladar la armadura al molde de hormigonado.
- d) En el momento en el que se vaya a instalar el anillo instrumentado en el túnel, se descubrirán las cajas de protección y se conectará los terminales de los sensores a la caja de centralización de esa sección.
- e) En la figura 10 se puede observar al especialista colocar una celda de presión en la armadura de la dovela, que posteriormente será colada de hormigón.
- f) A continuación, se procede a la hormigonada de la dovela, una vez fraguada se marcará la misma con su correspondiente nombre y se almacenará hasta el momento en el que se vaya a proceder a su instalación.
- g) En la figura 9 se puede ver la dovela dentro del molde de hormigonado y en la cara superior se encuentra la célula de presión de forma perpendicular a la presión que ejerce el suelo sobre la propia dovela, con esto se asegura que los datos obtenidos sean los correctos y los que se requieren.



Figura 9. Dovela prefabricada hormigonada (Consortio Línea, 2017)

Consideraciones especiales:

- a) En el caso de que se requiera instalar la célula de presión en un lugar de difícil sostenimiento con la armadura de la dovela, se podrá utilizar barras de acero auxiliares. Para esto hay que tomar en cuenta que estas barras auxiliares se deben amarrar o soldar en el exterior, es decir, antes que la dovela



Figura 10. Colocación de celda de presión en armadura del prefabricado (Consortio Línea 1, 2017)

sea ingresada en el molde y posteriormente hormigonada.

Capítulo 4 – Auscultación de deformaciones

Es de suma importancia tener un control adecuado de movimientos o deformaciones verticales. Estas son provocadas por trabajos cercanos que se realizan en obra y que pueden afectar tanto a estructuras como a servicios básicos que se encuentren próximos a la zona de influencia. Con esto podemos evitar que existan desastres dentro del proyecto. Para esto se tienen diferentes aparatos de instrumentación, los cuales se mencionarán a continuación.

4.1 Extensómetro de varilla en túnel

Principios de operación:

El objeto de la instalación de extensómetros de varilla en túnel, anclados a distinta profundidad respecto al anillo de sostenimiento, es obtener los desplazamientos relativos producidos entre el punto de anclaje del extremo de cada extensómetro y el propio sostenimiento del túnel. El motivo de estos desplazamientos es que tras la excavación de la sección se produce una descompresión alrededor del túnel y una redistribución de las tensiones originales en la superficie excavada, lo causa deformaciones en sentido radial que progresan hacia el centro de la sección. En el caso de alcanzarse la tensión de plastificación se producirá una corona de terreno plastificado alrededor de la excavación cuyo espesor depende de las características del terreno. En la figura 11 se puede observar el esquema de instalación para un extensómetro de varilla aplicada en el túnel.

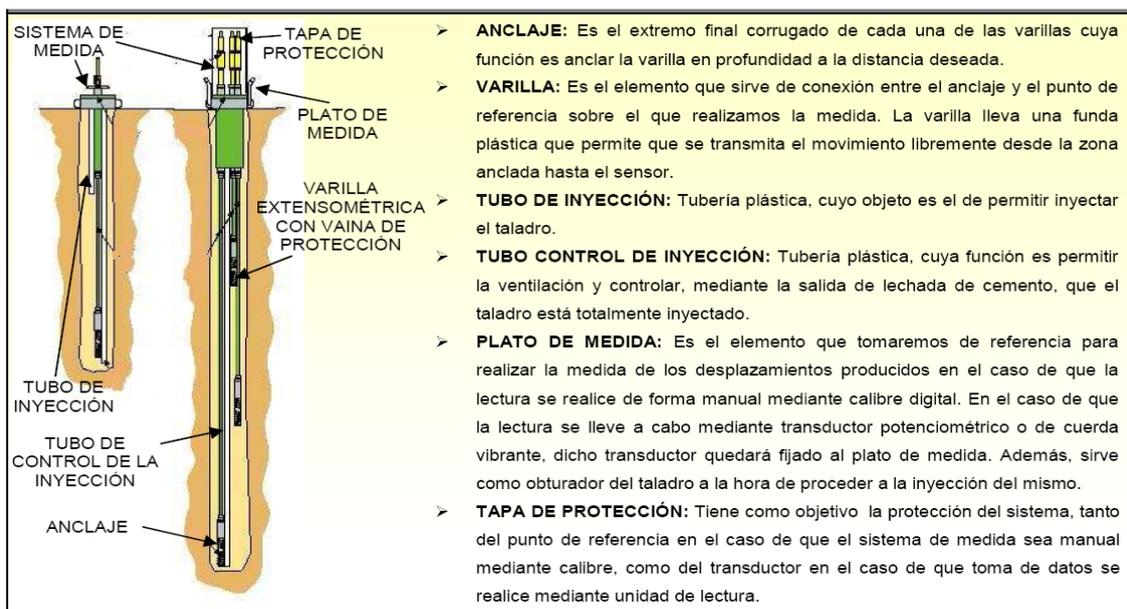


Figura 11. Esquema de instalación de extensómetro de varilla (Consortio Línea, 2017)

Procedimiento de instalación:

- Antes de llevar a cabo la instalación del extensómetro se debe definir el tipo de extensómetro, su ubicación y profundidad.
- A la hora de determinar la profundidad, se debe tener en cuenta, que la varilla más larga, debe estar anclada en un punto situado fuera de la zona susceptible de sufrir desplazamientos en el momento en el que se produce la descompresión del terreno circundante al sostenimiento. En la figura 12 se muestran los elementos que suele ser parte de un extensómetro de varilla, en donde se observan las distintas varillas de distintos tamaños, el plato de medida, la tapa de protección junto con sus cables necesarios para las lecturas respectivas.



Figura 12. Elemento de extensómetro de varilla (Consortio Línea I, 2017)

- Posteriormente se replantea sobre el túnel su posición y se realizará un sondeo mecánico.
- El diámetro de la perforación debe permitir el correcto montaje del extensómetro y la inyección del espacio entre el extensómetro y el suelo, se preverá que la posición de la cabeza del extensómetro quede embutida y al ras de la dovela. Para lo cual, según el caso,

puede ser necesario agrandar el diámetro de la perforación en los primeros centímetros de esta.

- Una vez hecha la perforación con el diámetro, longitud y ángulo correspondiente, se introduce el conjunto de varillaje, ducto de salida de aire y ducto de inyección de lechada. En el tapón de boca de la perforación, se colocará un producto de sellado rápido que servirá para taponar rápidamente el taladro impidiendo la filtración de la lechada mientras se inyecta. Se deja fraguar el producto de sellado mientras se realiza el montaje de los siguientes extensómetros.
- Una vez terminado el montaje de todos los extensómetros y comprobado que el producto de sellado haya fraguado, se comenzará la inyección de la lechada de cemento (o cemento-bentonita según corresponda) con acelerante de fraguado y siguiendo el mismo orden en que se montaron, controlando en cada caso que la lechada se inyecte hasta que salga por el tubo de descarga.
- Luego se montan las cabezas de los extensómetros y la tapa de protección; pasadas 24 horas, como mínimo, podrá realizarse la primera lectura de los sensores.

En la figura 13 se puede observar un extensómetro de varilla ya colocado y fraguado completamente.

En este punto se puede ya realizar la primera lectura, tomando en cuenta que se puede ver como se dejó el ducto de ventilación para que internamente siga fraguando la mezcla inyectada. Se pueden ver sus 3 varillas con sus respectivos cables que conducen las mediciones respectivas.

De igual manera podemos las protecciones tipo, para los extensómetros de varilla.



Figura 13. Extensómetro de varilla colocado y protección tipo Consorcio Línea 1, 2017)

Obtención de datos y mediciones:

En función del sistema de extensómetros instalado el método de lectura será el siguiente:

- Extensómetros con transductor de cuerda vibrante o potencio métricos, consiste en conectar directamente los terminales de los dispositivos, al cable suministrado con la unidad de lectura; aunque existe la posibilidad de conectar el cable de la unidad a una caja de centralizado donde previamente se han conectado y centralizado varios dispositivos. La unidad de lectura muestra en el computador el dato de la lectura realizada en ese momento, el cual se apuntará en una tabla según el tipo de dispositivo a medir.
- También se puede acumular las lecturas realizadas a lo largo del día en los distintos dispositivos. Y de ser necesario, posteriormente proceder a su descarga de los datos en el computador.
- Una vez obtenidas las lecturas, en la fase de procesamiento de datos, se podrá observar

cómo van variando o manteniéndose los datos según vayan generándose distintas circunstancias en la obra. Esto quiere decir, que para que se tome una decisión con respecto a las lecturas realizadas, debe ser analizado por el experto, el cual definirá dentro de que parte de los umbrales de medida se encuentra el resultado y cuál es la acción que se debe tomar ante dicho resultado.

- Existe la posibilidad de llevar a cabo una adquisición de datos de forma continua, mediante un sistema automático de adquisición de datos, de modo que se pueda proceder a la descarga de los datos almacenados, a un computador portátil en el que previamente se cargó el software adecuado.
- Para la adquisición de datos desde un computador externo, basta con instalar un sistema vía cable, vía radio o vía GSM al sistema automático de adquisición de datos, de modo que podemos conectar con el controlador en cualquier momento y de esta forma obtener los datos almacenados en la memoria.

En la figura 14 se pueden observar distintos tipos de equipos que ayudan a la medición de extensómetros, los cuales pueden ser muy sencillos como es el caso del cuadro derecho de la figura, siendo un extensómetro manual y digital, el cual puede ser utilizado para superficies o lugares donde no se requiera mayor precisión, utilizado muchas veces en laboratorios. Por otro lado, los del cuadrante izquierdo son unidades de lectura más sofisticadas, en el sentido que requieren de un mayor control al momento de tomar las lecturas y deben ser cuidadosamente colocados en campo para que den lecturas con medidas precisas.



Figura 14. Equipos de medición para extensómetros de varilla (Consorcio Línea 1, 2017)

Consideraciones especiales:

En el caso de los extensómetros con transductor de desplazamiento se puede realizar un tipo de cableado, el cual, sea llevado hasta el punto de medida. Una vez que se tiene la longitud de cable adecuada, se podrá instalar una caja de protección o una caja de centralización según proceda.

4.2 Extensómetro de varilla en superficie

Principios de operación:

El extensómetro de varilla en superficie, anclados a distinta profundidad respecto a la superficie, sirve para obtener o medir los desplazamientos relativos producidos entre el punto de anclaje del extremo de cada extensómetro y la superficie del terreno. Esto puede producirse debido a trabajos que se realicen cerca de este. Este tipo de extensómetro suele ser colocado en las zonas cercanas de afectación, en

donde se prevé que puedan existir daños debido a excavaciones profundas, movimiento de maquinaria pesada e incluso cuando se tienen varias capas de suelos distintos. Cuando el estudio de suelos determina que existe una diferencia en el tipo de suelo que se encuentra cercano a la obra, es de vital importancia el extensómetro de varilla en superficie, debido a que se puede obtener los distintos asentamientos que se generan en los distintos estratos de suelo.

En la figura 15, se puede observar una instalación tipo de un extensómetro de varilla en la superficie, tomando en cuenta que este se encuentra colocado cercano al túnel. Esto quiere decir que el objetivo principal de colocar allí el extensómetro es saber cómo afecta el túnel a los distintos estratos de suelo. Y se puede observar que la medición se la realiza desde la superficie mediante nivelación de precisión.

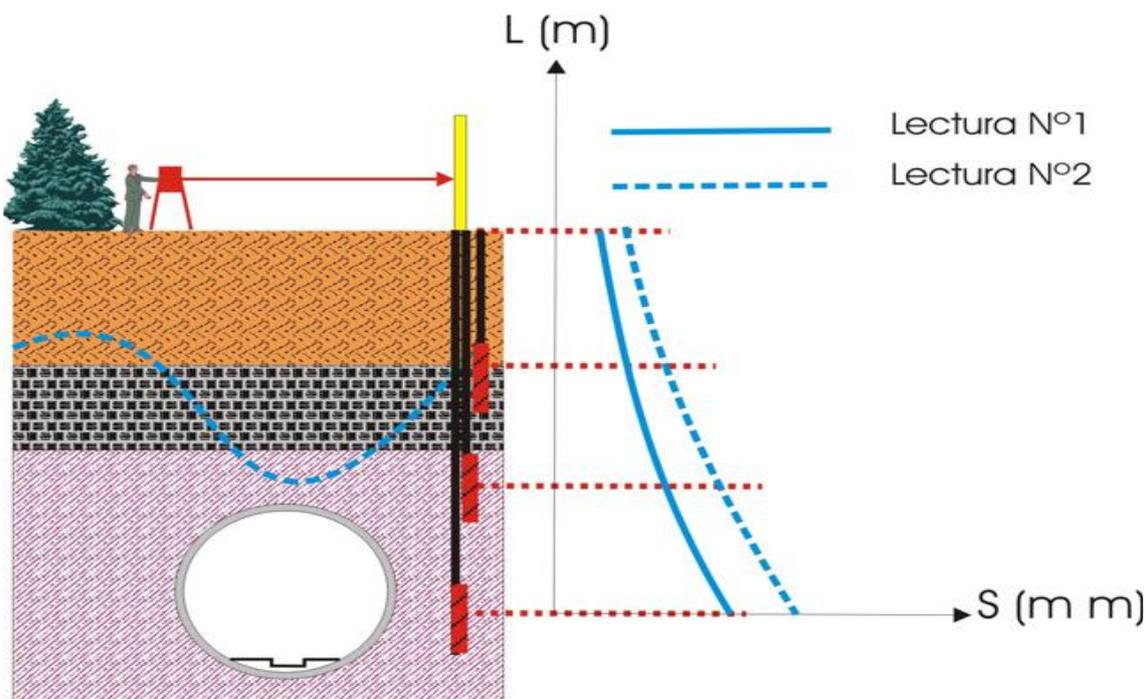


Figura 15. Instalación en superficies y representación de lecturas (Consortio Línea 1, 2017)

Procedimientos de instalación:

- Definida su ubicación y profundidad, se replantea sobre el terreno su posición y se realizará un sondeo mecánico. Es muy importante que el diámetro de la perforación debe permitir el correcto montaje del extensómetro y la inyección del espacio entre el extensómetro y el terreno.
- Una vez hecha la perforación, se retirará el equipo de perforación. Se introduce el conjunto de varillas, el tubo respectivo de salida de aire y el tubo de inyección de lechada.
- Terminado el montaje de los extensómetros, se comenzará la inyección de la lechada de cemento con aditivo que ayude en la aceleración de fraguado, controlando en cada caso que la lechada se inyecte hasta que salga por el tubo de descarga.
- Luego se montan las cabezas de los extensómetros para poder realizar la medida con calibre digital o mediante nivelación de precisión.
- Para finalizar la instalación se coloca la tapa de protección, pasadas 24 horas como

mínimo, podrá realizarse la primera lectura de los sensores.

Obtención de datos y mediciones:

Al tratarse de sensores ubicados en un sondeo realizado desde la superficie, la toma de medidas será similar. Los datos obtenidos a partir de cada uno de los extensómetros de varilla instalados en el terreno son datos relativos, puesto que hay que tener en cuenta que el plato de medida experimentará un asentamiento normal al experimentado por el terreno en superficie y que puede ser distinto al experimentado por cada uno de los puntos de anclaje situados a distintas profundidades. Estos movimientos relativos pueden corregirse y considerarse absolutos, para hacer esto es necesario realizar una nivelación de precisión de los platos, medida desde una base fija de nivelación, puede ser una base de referencia (BR), que permita obtener el asentamiento en superficie y de esta forma corregir los datos obtenidos de los extensómetros de varilla a partir de la lectura realizada.

Consideraciones especiales

En el caso de que el seguimiento se lleve a cabo con nivelación de precisión se debe que colocar una cabeza semiesférica de nivelación en el plato de anclaje.

4.3 Extensómetro de cuerda vibrante

Principios de operación:

El extensómetro de cuerda vibrante se lo emplea para medir las deformaciones que se pueden generar tanto en el acero como en el hormigón, en este caso, el acero de la armadura de una dovela, perteneciente al túnel, como a su vez, en el acero que forma la armadura de la pantalla. Al ser un sensor de cuerda vibrante, quiere decir que, al percibir una deformación, genera voltajes o corrientes a partir de lo que respecta a un esfuerzo mecánico. Este tipo de esfuerzos mecánicos son generados por las presiones, en este caso, si bien puede ser la presión que se genere dentro de la misma dovela debido al hormigón o incluso por la presión del suelo generada sobre pantalla en sí. Estas presiones generan frecuencias vibratorias en un pequeño cable que se encuentra tensionado dentro del extensómetro, con esto se mide una variación por medio de una bobina electromagnética como se muestra puede observar en la figura 16, siendo un esquema del sistema general de cuerda vibrante.

El extensómetro de cuerda vibrante puede ser colocado en una barra de la armadura de dovelas y también en la armadura de la pantalla, lo cual permite registrar la deformación producida en la armadura. Como podría también ser instalada en la armadura de las dovelas que conforman el túnel y poder registrar la deformación que se genera en el hormigón, para lograr esto simplemente se modificaría la dirección en como se coloca el sensor.

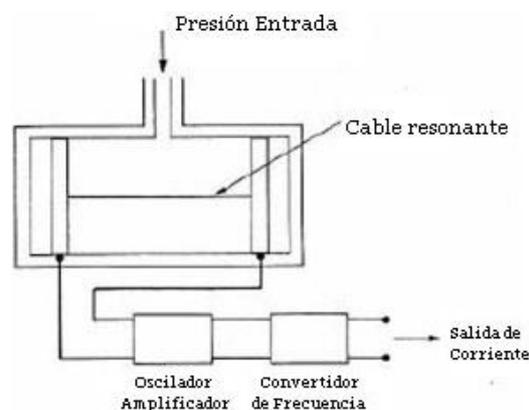


Figura 16. Esquema de cuerda vibrante (Wikipedia, 2017)

Procedimientos de instalación:

Conocido el módulo de elasticidad del material en el que se encuentran instalados en el caso del acero y el módulo de Young en el caso del hormigón, se estima la tensión a la que está sometido el material en ese punto.

Para la instalación del sistema ya sea en armadura de dovelas, armadura de pantallas y en hormigón de dovelas, se sugiere seguir los siguientes pasos:

- Previamente se replanteará y se marcarán las barras de la armadura de dovela y pantalla en la que se va a instalar el extensómetro.
- Después se prepara la superficie de las barras de la armadura de dovela y pantalla en la que se van a colocar los dispositivos y se suelda el extensómetro de cuerda vibrante a ellas, como se muestra en la figura 17. Tomando en cuenta que la soldadura del sensor al perfil sea totalmente eficaz, la superficie sobre la que instalará el sensor debe estar exenta de grasa, pintura, óxido o irregularidades. Debe ser soldado a las barras de acero, ya que, lo que se intenta medir son las deformaciones en el acero de la armadura que corresponde a una dovela o a una pantalla en sí.
- A continuación, se coloca el excitador en la dirección requerida y se amarra el cable de señal a la armadura de dovela o pantalla, llevándolo hasta la caja de protección antes de trasladar la armadura de dovela al molde de hormigonado y a su vez la pantalla ser introducida y colada de hormigón en sitio.



Figura 17. Colocación de extensómetro de cuerda vibrante en acero de dovela (Consortio Línea 1, 2017)

Consideraciones especiales:

a) Extensómetro de cuerda vibrante en armadura de dovelas

En la figura 18 se puede observar el esquema de cómo quedaría instalado el extensómetro de cuerda vibrante dentro de la dovela. Este esquema representa simplemente la armadura como tal, es decir, antes de ser llevada a su molde para colarla de hormigón.

Obtención de datos y mediciones:

Una vez instalado el anillo instrumentado en el túnel, o a su vez, la pantalla introducida en la excavación, se descubrirán las cajas de protección y se conectará los terminales de los sensores a la caja de centralización de esa sección, si procede. El método de lectura de estos aparatos consiste en conectar directamente los cables terminales de los dispositivos, al cable suministrado con la unidad de lectura, aunque existe la posibilidad de conectar el cable de la unidad a una caja de centralizado donde previamente se han conectado y centralizado uno o varios dispositivos.

La unidad de lectura se muestra en el dispositivo, el dato de la lectura realizada en ese momento, el cual se apuntará en una tabla de registro de mediciones según el tipo de dispositivo a medir. También se puede acumular las lecturas realizadas de los distintos dispositivos a lo largo del día y posteriormente proceder a su descarga en el computador, mediante un software adecuado al tipo de unidad de lectura utilizada. Algunos sensores poseen un termómetro, lo cual permite obtener también datos de temperatura.

Es importante tomar en cuenta, que el hormigonado de la dovela se lo debe realizar en la fábrica de esta y una vez fraguada se marcará la misma con su correspondiente nombre y se almacenará hasta el momento en el que se vaya a proceder a su instalación.

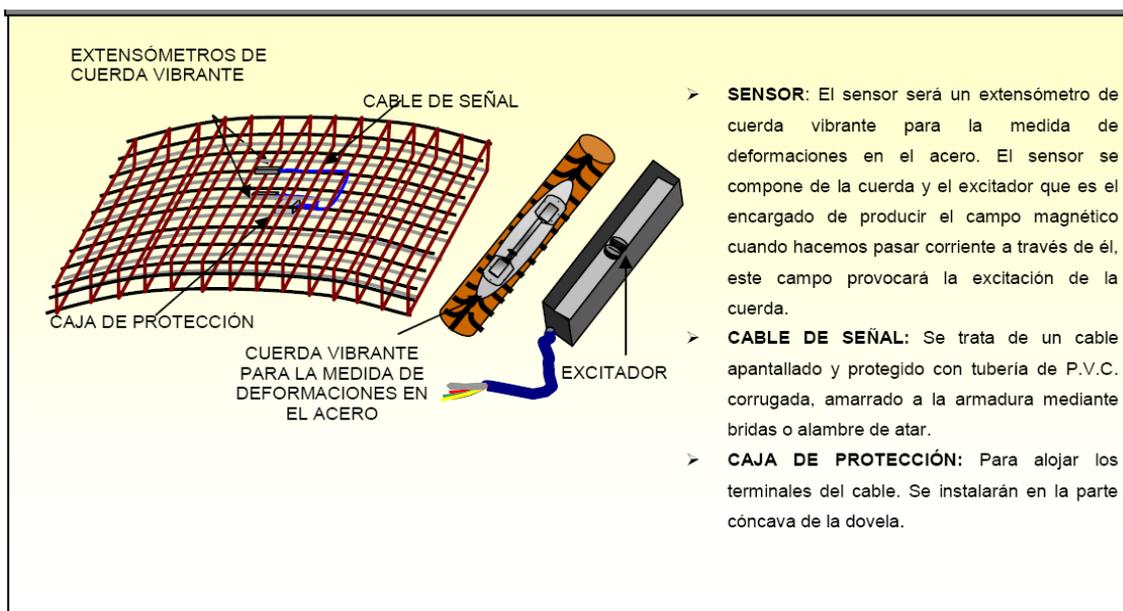


Figura 18. Esquema de instalación extensómetro en armadura de dovela (Consortio Línea 1, 2017)



Figura 19. Armadura de dovela con extensómetros instalados y célula de presión radial (Consocio Línea 1, 2017)

En la figura 19 se puede observar la armadura de una dovela dentro del molde, lista para ser hormigonada. En esta armadura de dovela, se encuentra fijado mediante soldadura el extensómetro de cuerda vibrante para medir las variaciones en el acero. De igual manera, se observa que se encuentra en la

b) Extensómetro de cuerda vibrante en armadura de pantallas

En la figura 20 se puede observar el esquema de cómo quedaría la instalación del extensómetro de cuerda vibrante en la armadura de una pantalla, tomando en cuenta que la pantalla que se muestra está

misma dovela una célula de presión. Con esta figura se puede demostrar que se pueden instalar varios sensores en una misma sección, al final del día lo que se requiere es optimizar el tiempo lo mejor posible, ya que, tiempo significa dinero.

lista para ser introducida en la excavación y posteriormente se haga el colado de hormigón. Los separadores en la pantalla son muy importantes al momento de introducir la pantalla, con esto se puede evitar una pérdida del sensor debido a su roce directo con el suelo

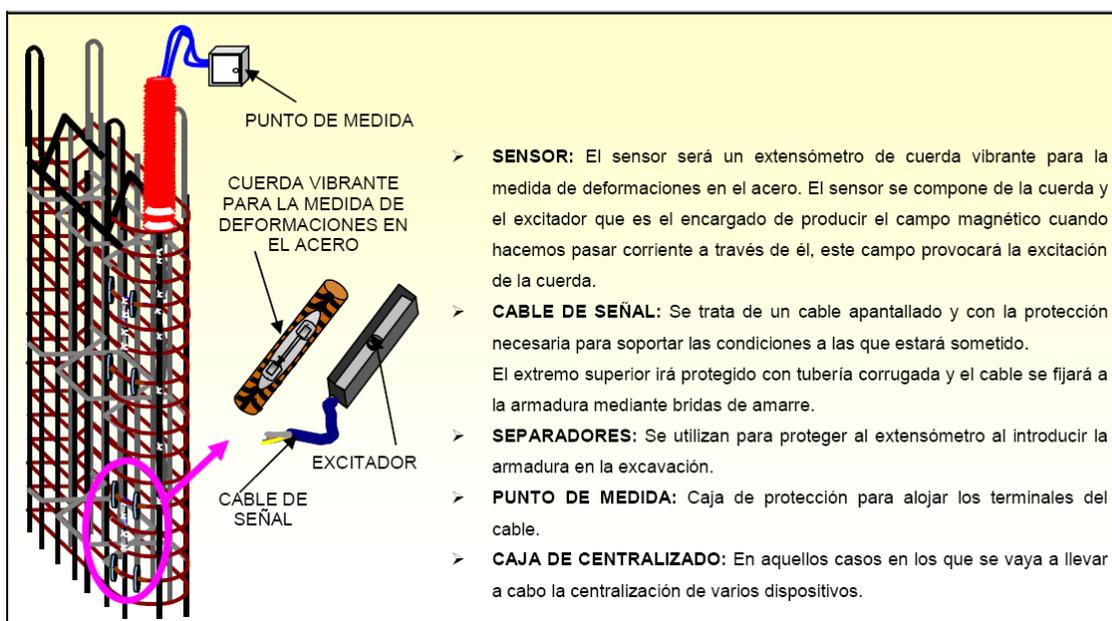


Figura 20. Esquema de instalación armadura de pantalla de hormigón con extensómetro de cuerda vibrante (Consocio Línea 1, 2017)

Una vez marcada la posición y orientación del sensor sobre las barras de la armadura y a su vez preparada correctamente la superficie como se mencionó anteriormente, el montaje definitivo se realizará según los siguientes pasos:

- a. **Instalación del sensor.** Las platinas del extensómetro deberán quedar soldadas de forma solidaria a la barra de la armadura, es decir, que se gaste soldadura tanto como sea necesario para que quede bien sujeto. Esto es esencial en armaduras de pantallas, debido a que las pantallas serán introducidas en excavaciones de gran profundidad. Tomando en cuenta que mientras más profundidad haya, la presión incrementará; esto podría afectar al sensor ya instalado.
- b. **Protección y fijación del cable a la estructura.** El cable debidamente protegido se amarra en distintos puntos de la armadura. Teniendo en cuenta que el cable debe estar sujeto en la mayor

cantidad de puntos de la pantalla para que no haya problema alguno.

- c. Una vez concluida la instalación del sensor y del cable e introducida la pantalla en la excavación, se colocará la caja de centralización, a la cual llegan los terminales de los aparatos instalado.
- c) **Extensómetro de cuerda vibrante en hormigón de dovelas**

Este tipo de extensómetros de cuerda vibrante nos va a permitir medir las deformaciones producidas en el hormigón. Conociendo el módulo de Young del material en el que se encuentran instalados, en este caso el hormigón, podemos tener una idea de los esfuerzos a los que está sometido el hormigón de la dovela en ese punto como se puede observar en la figura 21.

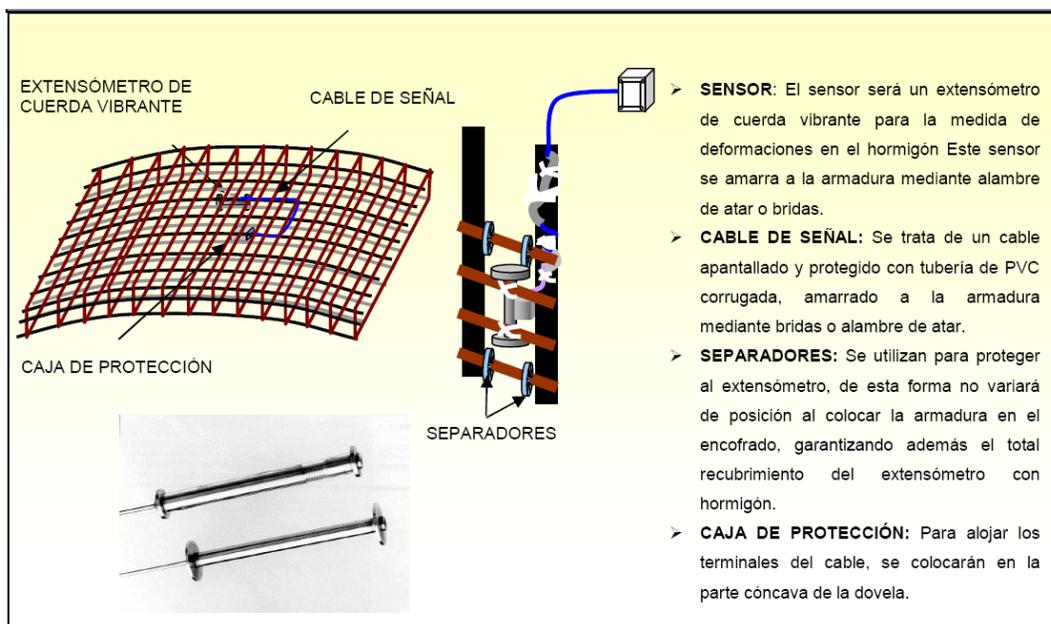


Figura 21. Esquema de dovela de hormigón con extensómetro de cuerda vibrante (Consocio Línea 1, 2017)

De ser el caso, para la instalación del sistema, simplemente se amarra el extensómetro a barras auxiliares de montaje. También se debe colocar una caja de protección en un punto accesible tras el hormigonado. Antes de trasladar la armadura al molde de hormigonado, se amarrará el cable de señal a las barras llevándolo hasta la caja de protección. Tras el hormigonado de la dovela en la fábrica y una vez fraguado el hormigón, se marcará la misma con su correspondiente nombre y se almacenará hasta el momento en el que se vaya a proceder a su instalación. Una vez instalado el anillo instrumentado en el túnel, se descubrirán

las cajas de protección y se conectará los terminales de los sensores a la caja de centralización de esa sección.

Capítulo 5 - Auscultación de Movimientos

Para comprobar las deformaciones o movimientos que sufre el terreno en determinadas circunstancias, debido a excavaciones que se estén realizando, es importante colocar dispositivos que reflejen este tipo de movimientos y puedan

ser controlados con precisión, ya que, al generar movimientos bruscos en el terreno puede ocasionar grandes problemas en superficie, donde normalmente en este tipo de obras (túneles en zonas urbanas) existen muchas viviendas. Para esto se prevé la instalación de tubería inclinométrica biaxial, clinómetros, hitos de nivelación, etc.

5.1 Inclinómetros verticales en el terreno

Principios de operación:

El uso del inclinómetro es utilizado principalmente hacia la medida de desplazamientos laterales del suelo, masas rocosas y estructuras de Ing. Civil. El funcionamiento del inclinómetro se basa en la medida de la deformación que sufre la tubería inclinométrica en el medio en el que se encuentra embebida. Los movimientos, se obtienen determinando la inclinación del eje del torpedo inclinométrico respecto de la vertical a varias profundidades y según los dos planos ortogonales que contienen el eje de la tubería. Para obtener la deformación de la tubería se debe acumular los desplazamientos en cada profundidad desde un punto fijo. Normalmente el punto fijo suele estar en su parte inferior.

Procedimiento de instalación:

Antes de llevar a cabo la instalación del inclinómetro debemos definir su ubicación y profundidad. Una vez que se han definido estos dos parámetros se puede proceder:

- Replanteo sobre el terreno su posición y se realizará un sondeo mecánico.
- El diámetro de la perforación debe permitir el correcto montaje de la tubería y la inyección del espacio existente entre la tubería y el terreno.
- El montaje de los tramos se realizará ensamblándolos mediante uniones y de manera que la unión quede perfecta, comenzando por el tramo que lleva el tapón de fondo.
- Amarraremos la manguera plástica de inyección a este tramo, en el caso de que el relleno se realice con lechada de cemento.
- Una vez introducida la tubería en el sondeo, inyectaremos la lechada de cemento hasta que suba a la boca del sondeo. Este trabajo se realizará rellenando el taladro a la vez que se retira el revestimiento del sondeo, con especial cuidado y control por personal con experiencia en este tipo de instalaciones.

En la figura 22 se puede observar un esquema de cómo debería quedar el inclinómetro ya instalado en el terreno con sus respectivas partes del proceso.

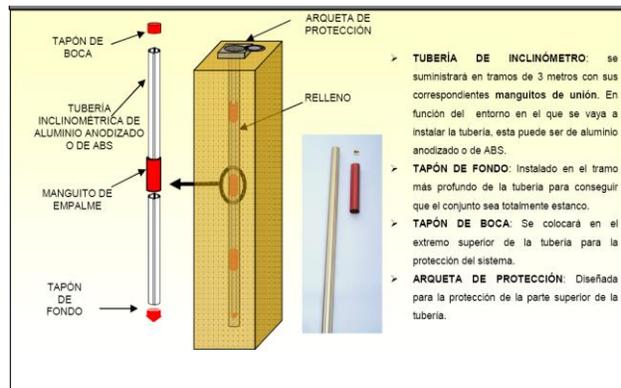


Figura 22. Esquema de inclinómetro vertical instalado (Consocio Línea 1, 2017)

En la figura 23 se puede observar un ejemplo de una perforación en donde se realizará el sondeo y posteriormente se instalará la tubería inclinométrica.



Figura 23. Perforación del sondeo donde se instalará el Inclinómetro vertical (Consocio Línea 1, 2017)

Obtención de datos y mediciones

La lectura de inclinómetros, la llevará a cabo un equipo formado por un técnico y un auxiliar equipados con el instrumental descrito. Para la obtención de datos y mediciones se puede seguir los siguientes pasos:

- El torpedo inclinométrico, se introduce en la tubería para la determinación de los movimientos producidos en el terreno o en la estructura.
- Las lecturas de desplazamiento se toman a intervalos de profundidad regulares (0.5m), medidos mediante marcadores que se disponen sobre el cable del sensor. De esta forma se obtiene un conjunto inicial de lecturas (lectura inicial o cero) en profundidades especificadas, de tal forma que las lecturas posteriores son realizadas en idénticas cotas.

- c) Las lecturas son siempre relativas y se referencian a esta lectura inicial o cero.
- d) La unidad de lectura permite el almacenamiento de las medidas realizadas a cada profundidad, así como del nombre del dispositivo y de la fecha de lectura.
- e) Posteriormente se procede a juntar toda la información en un computador mediante el software adecuado.
- f) La forma más clara de expresar la desviación lateral producida a lo largo de la tubería es mediante la representación en gráficas, en las cuales se representan las profundidades en metros en la vertical y las desviaciones de la vertical en mm en el eje horizontal.

Consideraciones especiales:

En el caso de trabajos en donde la inyección de lechada no se pueda llevar a cabo, se realizará el relleno mediante material granular. Finalmente se procederá a montar la arqueta de protección de material no corrosivo.

En la figura 24 se observa el equipo que normalmente es utilizado para realizar este tipo de mediciones. En donde el sensor también es conocido como torpedo, la unidad de lectura se la conoce también como datalogger. En el cable se puede colocar o marcar cada una de las medidas realizadas, actualmente hay cables que ya vienen marcados los 0.5 m.

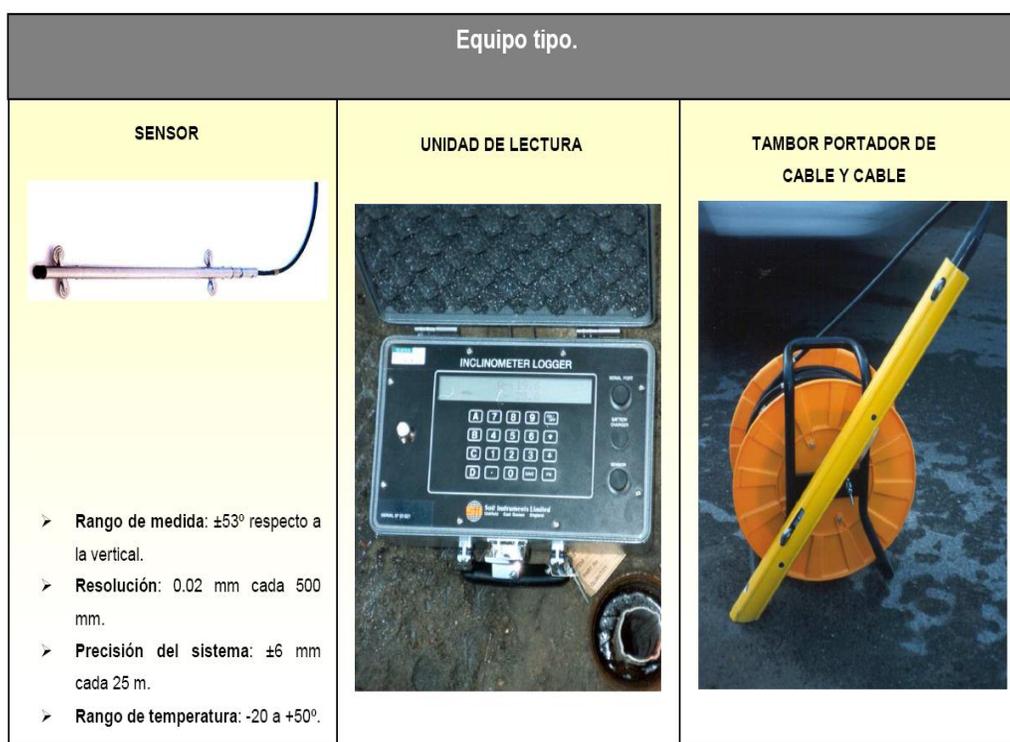


Figura 24. Equipo de medición para Inclinómetro vertical (Consocio Línea 1, 2017)

5.2 Inclinómetros en pantallas

Principios de operación:

Para comprobar las deformaciones que sufre una estructura de hormigón armado en determinadas circunstancias, se

prevé la instalación de tubería inclinométrica biaxial. El uso del inclinómetro se basa principalmente en la medida de desplazamientos laterales de las estructuras de ingeniería civil como se puede observar en la figura 25, en este caso el

inclinómetro se encuentra instalado en una armadura de pantalla.



Figura 25. Instalación de Inclínómetro en pantalla
(Consocio Línea 1, 2017)

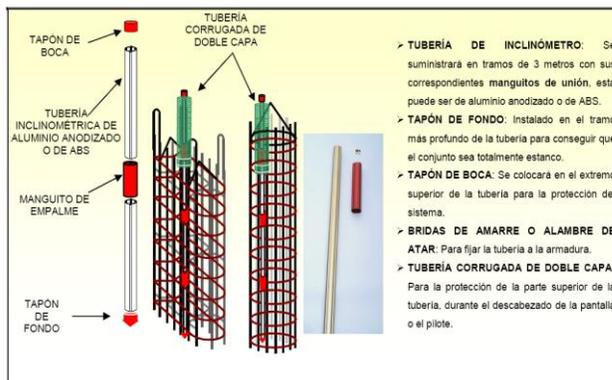
Procedimiento de instalación:

Para la instalación de este tipo de instrumentación, se sugiere seguir los siguientes pasos:

- a) Antes de llevar a cabo la instalación del inclinómetro debemos definir su ubicación en la armadura y la longitud del mismo.
- b) Posteriormente replantearemos su posición sobre la armadura, para lo cual debemos conocer cuál es la cara hacia la tierra y la cara excavación de la armadura.
- c) Para la instalación se armará los tramos de tubería a la vez que se introduce en la armadura, primero se introducirá el tramo que lleve el tapón de fondo.
- d) El montaje de los tramos se realizará armándolos mediante la unión y de manera de que la unión quede perfectamente estanca.
- e) Se fija la tubería a la armadura mediante alambre de atar. La parte superior de la tubería inclinométrica se protegerá mediante una tubería corrugada de diámetro apropiado, esta tubería se fijará a la armadura.
- f) A continuación, se coloca el tapón de boca y se lo sella de forma que quede totalmente aislado para que no se produzca la entrada de hormigón durante el hormigonado.
- g) Durante el descenso de la armadura en la excavación se procederá a tensar los amarres de la tubería a la armadura, en toda la longitud de esta.

- h) Una vez ejecutado el hormigonado se quitará el tapón de boca y se aumentará la longitud de la tubería lo suficiente, en función de las dimensiones de la viga de atado, la losa o el posterior relleno con material por encima de la losa.
- i) Una vez introducida la tubería en el sondeo, inyectaremos la lechada de cemento hasta que suba a la boca del sondeo. Este trabajo se realizará relleno del taladro a la vez que se retira el revestimiento del sondeo, con especial cuidado y control por personal con experiencia en este tipo de instalaciones.
- j) Finalmente se procederá a montar la arqueta de protección de material no corrosivo.

En la figura 26 se puede ver un esquema de cómo debería



quedar instalado el inclinómetro dentro de la pantalla.

Figura 26. Armadura dentro de la excavación con tubería inclinométrica (Consocio Línea 1, 2017)

Consideraciones especiales:

- a) En el caso de las armaduras, que debido a su longitud se introducen en la excavación en varios módulos, además de tensar los amarres se deberán ensamblar los diferentes tramos de tubería inclinométrica que previamente se han montado en cada módulo de armadura
- b) En el caso de trabajos en donde la inyección de lechada no se pueda llevar a cabo, se realizará el relleno mediante material granular.

5.3 Clinómetros

Principios de funcionamiento:

El objetivo de este sistema es medir el gradiente de inclinación de las superficies rocosas o estructuras civiles o el desplome en fachadas de edificación. Consiste en un cuerpo de acero inoxidable que contiene el sensor, montado sobre la superficie o estructura que se debe instrumentar. Para la instalación de estos dispositivos, como trabajo previo, se replanteará su posición. En la figura 27 se tiene un ejemplo de cómo se ve un clinómetro instalado.

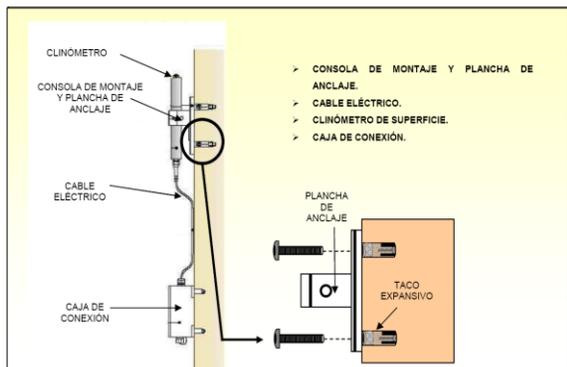


Figura 27. Instalación de clinómetros en fachada (Consocio Línea 1, 2017)

Procedimiento de instalación:

Para la instalación de un clinómetro de debe tomar en cuenta el siguiente procedimiento:

- a) La instalación de los clinómetros consiste en fijar la plancha de anclaje a la estructura cuya inclinación o desplome queremos controlar, mediante tacos expansivos y sus correspondientes tornillos de anclaje.
- b) Posteriormente se fija el clinómetro a la consola de montaje y se lleva el cable eléctrico hasta la posición en la que se vaya a ubicar la caja de conexión.
- c) El cable llevará la correspondiente protección según el medio en que se encuentre y se fijará a la estructura mediante bridas de anclaje.
- d) El sensor puede ser de tipo magnético-resistivo o servo acelerómetro, a su vez puede ser uniaxial o biaxial.
- e) Las especificaciones del modelo, incluso el rango de medición, se deben seleccionar congruentemente según las necesidades de cada aplicación.

En la figura 28 podemos observar que puede haber diferentes tipos de clinómetros para cumplir el mismo propósito.

Clinómetro magnético-resistivo.	Clinómetro servoacelerómetro.
 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tipo: Uniaxial o biaxial ➤ Rango de medición: $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$. ➤ Resolución del sensor: 0.05 % Fondo de escala. ➤ Precisión(Linearidad+histeresis+repetibilidad): ± 0.5 % Fondo de escala. 	 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tipo: Uniaxial o biaxial ➤ Rango de medición: $\pm 14.5^\circ$, $\pm 30^\circ$. ➤ Resolución del sensor: 0.001 % Fondo de escala. ➤ Precisión(Linearidad+histeresis+repetibilidad): ± 0.07 %-0.005 % Fondo de escala.
Clinómetro de cuerda vibrante.	
 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rango de medición: $\pm 14.5^\circ$, $\pm 30^\circ$. ➤ Sensitividad: ± 10 Arcos de segundo (± 0.005 mm/m) ➤ Precisión(Linearidad+histeresis+repetibilidad): ± 0.1 % Fondo de escala. 	

Figura 28. Tipos de clinómetros (Consocio Línea 1, 2017)

Consideraciones especiales:

Cuando se necesita instalar varios clinómetros en una misma estructura o muy cercanos entre sí, de ser necesario, se podrían conectar varios sensores en un mismo punto utilizando una caja de centralización.

5.4 Hitos de nivelación

Principios de operación:

El objeto de la instalación de los hitos de nivelación es medir los movimientos verticales en la superficie del terreno provocados por la cercanía de obras en ejecución, principalmente durante los trabajos de excavación. Antes de realizar el montaje de los hitos y como trabajo previo se replanteará cada uno de los puntos marcando su posición en el terreno. También previamente y en el taller se efectuará el montaje de las cabezas de nivelación en cada una de las varillas de los hitos.

Procedimiento de instalación:

Finalizados los trabajos previos se efectuará la instalación de los hitos según los siguientes pasos:

- a) Ejecución del sondeo manual. Se realizará un sondeo a la profundidad determinada previamente.
- b) La profundidad que se puede alcanzar con un sondeo manual, y para este caso es de 1.50 m, el cual está ligado al tipo de terreno que vamos a atravesar.
- c) Posteriormente se rellenará la zona de anclaje con lechada de cemento.

- d) Se introduce la varilla con la cabeza de nivelación montada, todo debe estar perfectamente centrado.
- e) Una vez fraguada la lechada se puede rellenar el resto del espacio con arena, dejando libre la zona de la cabeza de nivelación.
- f) Por último, se montará la arqueta para protección del punto de medida.

En la figura 29 podemos observar un esquema de cómo debería quedar un hito de nivelación ya colocado en sitio, lugar donde se analizó anteriormente.

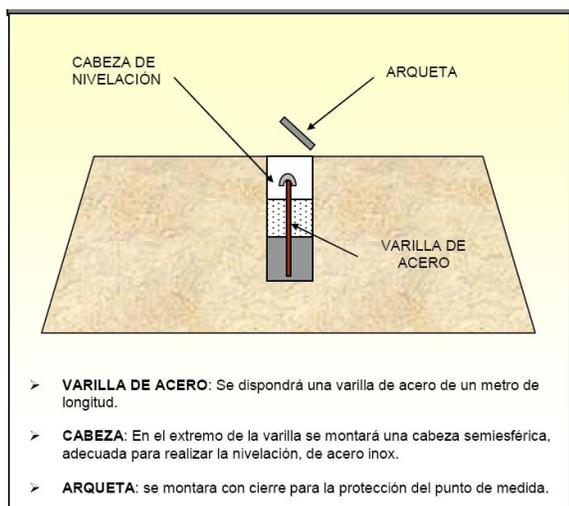


Figura 29. Instalación hito de nivelación. (Consocio Línea 1, 2017)

Obtención de datos y mediciones:

El control de diferentes dispositivos a través de la nivelación de precisión va a permitir determinar la posible afección que provoca la obra (excavación, descenso del nivel freático...) en el terreno adyacente y en los edificios y estructuras colindantes. El equipo topográfico encargado de realizar la nivelación estará compuesto por un Técnico y un Auxiliar. Para realizar las medidas se establecerá un itinerario a través del cual daremos a los diferentes dispositivos (regletas, hitos, etc...), cotas referidas a la base fija de nivelación. Comparando la nivelación con la lectura cero, que se ha de cada uno de los dispositivos, obtendremos el desplazamiento vertical sufrido por estos.

En la figura 30 podemos observar un ejemplo real, de cómo se vería un hito de nivelación colocado en sitio. Sin embargo, en esta figura la tapa de la arqueta se encuentra desprendida del instrumento, lo cual no puede pasar, ya que es la que lo protege.



Figura 30. Arqueta de protección para hito de nivelación

Consideraciones especiales:

Para un hito de profundidad menor a 1,50 metros, se la puede realizar manualmente. Sin embargo, por temas de seguridad normalmente para profundidades superiores a 1,50 metros se recomienda que se utilicen medios de perforación mecánicos.

Capítulo 6 - Movimientos Relativos “Convergencias y Nivelaciones”

6.1 Pernos de convergencia en túnel

Principios de operación:

La medida de convergencias en túnel nos va a permitir conocer las deformaciones que se produzcan en una sección, pudiendo medirse tanto en el contorno de excavación, como en el sostenimiento y/o revestimiento del túnel. En otras palabras, la medida de convergencia tiene como objeto obtener el movimiento relativo entre dos puntos (cuerda) a lo largo de las diferentes fases de una obra.

Para conseguir este objetivo instalaremos un número determinado de pernos anclados al terreno o al sostenimiento/revestimiento según corresponda.

Procedimiento de instalación:

Antes de llevar a cabo el montaje debe definirse correctamente el número de cuerdas que se van a instrumentar y la ubicación de los pernos para evitar interferencias con los diferentes elementos del túnel (ventilación, canalizaciones, catenaria, etc). La instalación de los pernos variará en función del elemento sobre el que se lo fijará. Para la instalación de los clavos de convergencia se recomienda seguir los siguientes pasos:

- a) **Ejecución de taladros:** Mediante un taladro percutor se hacen las perforaciones en la clave y hasta los del túnel en los puntos que previamente habremos marcado.
- b) El diámetro será el adecuado para la correcta instalación de los anclajes y la profundidad debe

ser suficiente para que la varilla de anclaje quede perfectamente asegurada al terreno.

- c) En el caso de que exista un sostenimiento metálico, previamente a la ejecución del taladro debemos realizar una abertura en la misma mediante corte como se puede observar en la figura 31 y en la figura 32 representa como debería verse un clavo de convergencia ya instalado en su totalidad.



Figura 31. Abertura mediante taladro en sostenimiento metálico (Consocio Línea 1, 2017)

- d) **Instalación de las varillas de anclaje:** Se introducen las varillas de anclaje en los taladros asegurándonos de que la profundidad del taladro es la adecuada, previamente se habrá rellenado el taladro con resina epóxica.
- e) **Protección del sistema:** Una vez que tenemos anclada la varilla al terreno, colocaremos la tapa de protección.

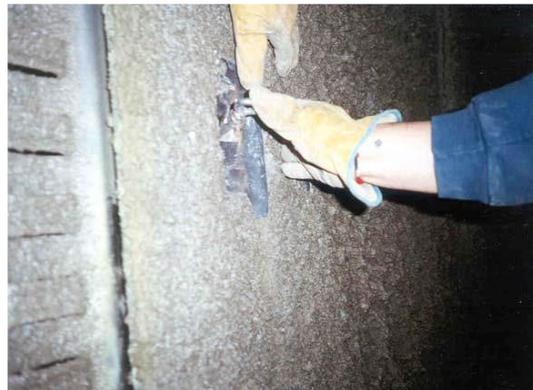


Figura 32. Colocación de perno de convergencia (Consocio Línea 1, 2017)

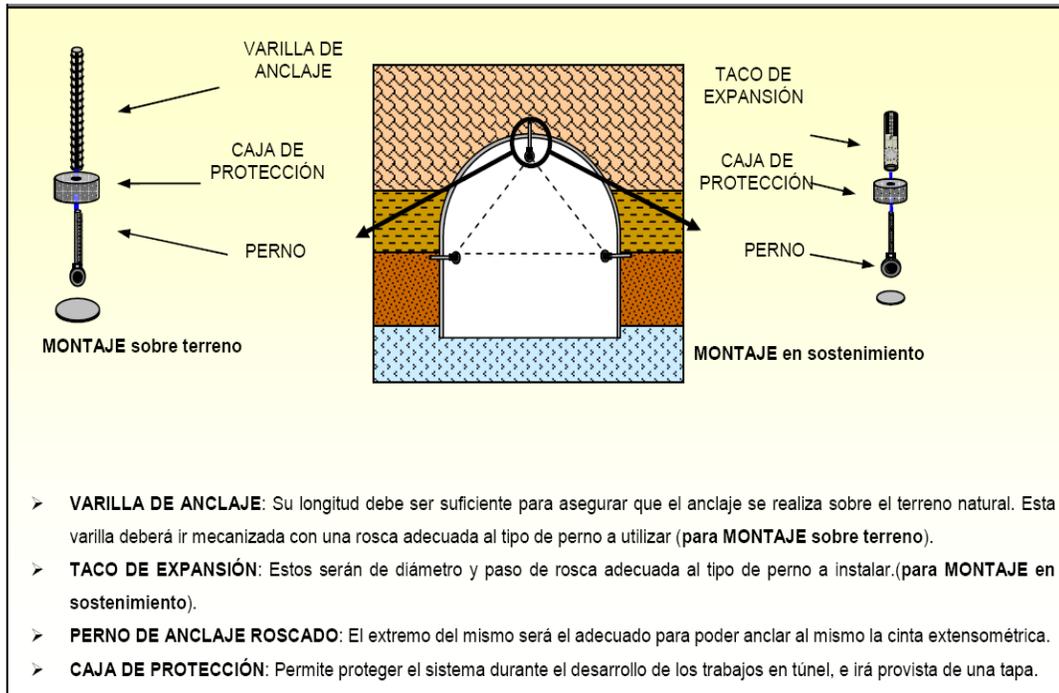


Figura 33. Esquema de instalación de pernos de convergencia en túnel (Consocio Línea 1, 2017)

En la figura 33 se obtiene un ejemplo del esquema de cómo se podría instalar los pernos de convergencia dentro de un túnel para su respectivo control.

Obtención de datos y mediciones:

La Toma de datos la llevará a cabo un equipo de personas formado por un técnico especialista y un auxiliar. Lo realizarán siguiendo los siguientes pasos:

- a) El equipo medirá con la ayuda de la cinta extensométrica la distancia entre los puntos de control (cuerdas), enganchando la cinta a los pernos dispuestos para tal fin.
- b) Simultáneamente con las lecturas, se registra la temperatura; pues este factor puede ser determinante en los desplazamientos medidos, debido a las posibles dilataciones o retracciones de los materiales.
- c) Estas lecturas obtenidas se referenciarán a la lectura cero, tomada antes del inicio de los trabajos, y de esta manera obtendremos el
- d) desplazamiento relativo entre los extremos de la cuerda.
- e) Para controlar los posibles defectos producidos en la cinta de convergencias debidas al uso, y tener

una referencia de medida en el caso de su rotura, se llevará a cabo un control de esta, al menos semanalmente, en un marco de referencia dispuesto en obra.

En la figura 34 se puede observar unos ejemplos de los tipos de equipos que pueden ser utilizados para medir esta instrumentación.



Figura 34. Equipo “tipo” de medidas de convergencia mediante cinta (Consocio Línea 1, 2017)

Consideraciones especiales:

En el caso específico de la instalación de pernos de convergencia en túneles, en los que se lleva a cabo un sostenimiento previo y posteriormente un sostenimiento definitivo de hormigón, existen dos posibilidades a la hora de diseñar el sistema, que son las siguientes:

- a) Instalación de varillas de anclaje de modo que sobresalgan de la roca una longitud suficiente para que, una vez ejecutado el revestimiento definitivo de hormigón, el perno quede enrasado con la superficie de este; de esta forma podremos llevar a cabo el seguimiento de las convergencias sin necesidad de cambiar el sistema de referencia entre una fase de sostenimiento y la otra. Para ello es necesario colocar sobre la cabeza del perno un encofrado que permita descubrirla una vez que fragüe el hormigón
- b) Instalación de varillas de anclaje sobre el sostenimiento de hormigón proyectado y posteriormente una vez que se ejecute el sostenimiento de hormigón colocaremos tacos expansivos. Esto conlleva el tener que establecer un sistema de referencia en cada fase, puesto que las varillas de anclaje colocadas en primera instancia quedarán bajo el hormigón, por lo tanto, existirá un periodo de tiempo entre una fase y otra en el que no se podrán tomar medidas.

Procedimiento de instalación:

- a) **Ejecución de taladros:** Mediante un taladro percutor se hacen las perforaciones en los puntos que previamente habremos marcado.
- b) **Instalación de los tacos expansivos:** Se introducen los tacos en los taladros asegurándonos de que la profundidad del taladro es la adecuada.
- c) **Colocación de los pernos de anclaje:** Una vez introducidos los tacos roscaremos los pernos en ellos de forma que los tacos se expanden haciendo solidario el perno a la estructura.

6.2 Dianas de puntería

Principios de operación:

Este sistema permite analizar las deformaciones producidas en el contorno de la excavación por medio del control de los movimientos en el sostenimiento del túnel. La principal ventaja de este sistema es que nos permite la medida de cuerdas de convergencia, aun resultando sus extremos inaccesibles o de difícil acceso. Además, ofrece menores interferencias con elementos del propio túnel que otros sistemas, como es el de lectura por medio de cinta

extensométrica. La figura 35 es un claro ejemplo de cómo funciona una diana de puntería ejecutada en el túnel.

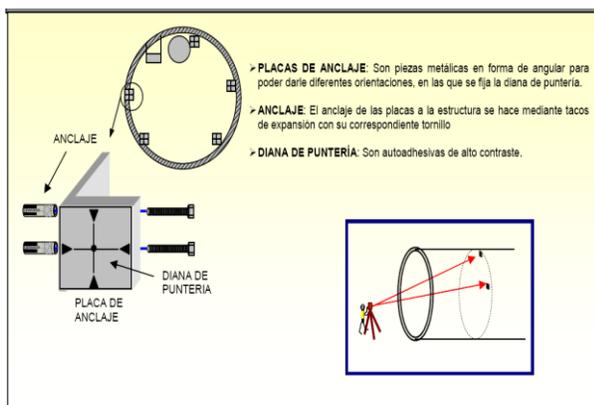


Figura 35. Lectura de convergencia con Diana de Puntería (Consocio Línea 1, 2017)

Procedimiento de instalación:

Para la instalación del instrumento se puede seguir los siguientes pasos y recomendaciones:

- Mediante un taladro percutor es posible incorporar pernos soldados a la placa de nivelación, con lo cual se puede medir además con cinta extensométrica para su comprobación y calibrado.
- Para ubicar estos puntos de control debemos tener en cuenta que deben ser visibles desde el punto de observación.
- También hay que tener especial cuidado a la hora de orientar las dianas para que el ángulo de incidencia de la visual sobre ésta se mantenga dentro de los límites marcados por el equipo de lectura.
- Una vez fijada la posición de los puntos de control y replanteados éstos en el sostenimiento del túnel.
- Posteriormente se coloca la placa de anclaje y apretamos los tornillos para que los tacos expandan hasta que quede firmemente anclado a la estructura y con la orientación deseada.

Obtención de datos y mediciones:

La medida de convergencias tiene como objeto obtener el movimiento relativo entre dos puntos (cuerda) a lo largo de las diferentes fases de una obra. Las lecturas con la estación total, las llevará a cabo un técnico especialista con experiencia en este tipo de trabajos, normalmente un topógrafo; recomendado que tenga mínimo dos años de

experiencia. Una estación total se puede observar en la figura 36 como un ejemplo de equipo a ser utilizado.

Esta toma de datos se realizará, esencialmente según los siguientes pasos:

- En el inicio se colocará el equipo en estación en el punto de observación.
- Seguidamente se empezará a realizar las mediciones a los puntos de control, y mediante una función específica del equipo obtendremos las distancias de las cuerdas de convergencia.
- Para eliminar errores mecánicos de la medición (errores de colimación horizontal, índice vertical y del compensador) se puede medir cada punto en las dos posiciones del telescopio, y si se desea incrementar la fiabilidad de las medidas se pueden analizar estadísticamente los datos, realizando diversas series de medidas.
- Simultáneamente con las lecturas se registra la temperatura, utilizando un termómetro digital como se puede observar en la figura 35 pues este factor puede ser determinante en los desplazamientos medidos, debido a que estos podrían verse afectados por dilataciones o retracciones de los materiales por cambios térmicos.
- Por último, se comparará esa medición con las distancias que se tienen registradas de esa cuerda, sacando el desplazamiento sufrido durante un periodo de tiempo determinado. En la siguiente fase de tratamiento de datos procedemos a la representación gráfica de estos desplazamientos relativos y de la evolución de la Temperatura durante el periodo de seguimiento.

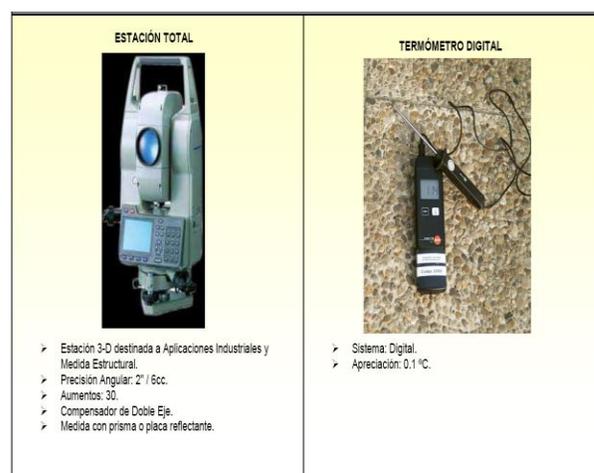


Figura 36. Equipo para medidas de convergencia mediante topografía (Consocio Línea 1, 2017)

6.3 Control topográfico

Principios de operación:

Además de los controles topográficos convencionales, mediante lecturas de dianas y prismas con estaciones totales de precisión apoyándose en bases fijas o pilares geodésicos, en la actualidad está teniendo cada vez más campo el uso de estaciones totales robotizadas para el control de movimientos. Este control topográfico puede aplicarse en diferentes entornos, como pueden ser el control de posibles afectaciones en la superficie, debidas a los trabajos de excavación y su afcción sobre elementos estructurales, el control de movimientos en túneles, el control de juntas y fisuras o el control de deslizamientos en laderas y taludes.

Procedimiento de instalación:

Para este seguimiento topográfico es necesario instalar puntos de control similares a los descritos con anterioridad: en secciones de túnel, fachadas y estructuras Dianas de Puntería y en superficie Hitos de Nivelación.

Obtención de datos y mediciones:

Las lecturas con este tipo de equipos, las llevará acabo un técnico especialista, auxiliado por un ayudante en los casos en los que se utilicen prismas móviles en lugar de dianas de puntería o prismas fijos, en los puntos de control.

La toma de datos se realizará, esencialmente según los siguientes pasos:

- Al inicio se realizará una lectura de una serie de puntos de referencia que nos servirán como orientación y cálculo de la posición del punto de observación, dentro del sistema de coordenadas determinado.

- Seguidamente se empezará a realizar las mediciones a los puntos de control.
- Para eliminar errores mecánicos de la medición (errores de colimación horizontal, índice vertical y del compensador) se pueden utilizar diferentes métodos o reglas, como, por ejemplo, medir cada punto en las dos posiciones del telescopio.
- Por último, se comparará esa medición con los datos que se tienen registrados de ese punto, sacando el desplazamiento sufrido durante un periodo de tiempo determinado.

Consideraciones especiales:

- En ciertas ocasiones para incrementar la fiabilidad de las medidas se pueden analizar estadísticamente los datos, realizando diversas series de medidas en un mismo instante de la obra.
- Si se automatiza el seguimiento del sistema de Control Topográfico, eliminamos la intervención humana en la toma de datos y presenta la gran ventaja de permitir la medición, el análisis y el aviso de cualquier anomalía en tiempo real.

En la figura 37 se observa un esquema de cómo funciona una estación robotizada, en donde es colocada fijamente en un punto en donde pueda disparar la lectura a cada uno de los primas requeridos. Estos prismas están colocados en este caso en la fachada de varias viviendas. Al ser un sistema automatizado, es altamente recomendable tener un equipo informático (computador) donde se almacene la información de forma directa.



Figura 37. Control topográfico automatizado mediante estación total robotizada en fachada de superficie (Consocio, 2017)

Capítulo 7 - Análisis de fisuras y juntas

Tiene como objeto obtener y analizar la evolución del desplazamiento entre dos puntos situados a ambos lados de una fisura en una determinada estructura. El seguimiento se llevará a cabo mientras que duren las causas que provocaron las fisuras o bien hasta el momento en el que se estabilicen los desplazamientos. El análisis de estas fisuras puede realizarse por cualquiera de los siguientes métodos:

7.1 Análisis de fisuras y juntas con fisurómetros

Principios de operación:

La ventaja fundamental que presenta este sistema de control de fisuras mediante fisurómetros, es que en el caso de los fisurómetros con transductor de desplazamiento una vez cableados hasta el punto de lectura, podemos llevar a cabo el seguimiento sin necesidad de tener acceso a la fisura; en el caso de los fisurómetros gráficos y digitales, la ventaja es la rapidez y eficacia de su instalación y que la lectura se realiza directamente de forma visual.

Procedimiento de instalación:

Para la instalación del sistema, se puede seguir los siguientes pasos:

- Como trabajo previo, se procederá al replanteo de los puntos en los que se ubicará el fisurómetro, marcando en la estructura los puntos de anclaje del aparato.
- Para situar correctamente los puntos de anclaje deberá considerarse el rango de medida del aparato y el sentido de movimiento, además se debe determinar las direcciones que se quiere medir en la fisura o junta.
- Para el caso de los fisurómetros con transductor de desplazamiento o digitales se colocará un dispositivo por dirección; si los fisurómetros se instalan perpendiculares a la fisura, la lectura obtenida representa el desplazamiento de apertura o cierre de la misma en esa dirección.
- Por otro lado, en función del número de fisurómetros que se instalen por fisura podremos obtener el desplazamiento producido en una, dos o las tres direcciones del espacio.
- En el caso de los fisurómetros gráficos obtenemos directamente, en la cuadrícula graduada, las dos componentes del desplazamiento contenidas en el plano de la estructura.
- Una vez ubicados los puntos sobre la estructura, se ejecutan los taladros de diámetro adecuado a los anclajes previstos.

- Posteriormente se introducen los anclajes en los taladros asegurándonos que la profundidad del taladro es la adecuada y metemos los tornillos por los orificios de fijación, roscándolos hasta que quede firmemente anclado a la estructura.

7.2 Análisis de fisuras y juntas con terna de puntos

Principios de operación:

La ventaja fundamental que presenta este sistema de control de fisuras mediante terna de puntos es la rapidez y eficacia de su instalación.

Procedimiento de instalación:

Para la instalación del sistema se puede utilizar los siguientes pasos y recomendaciones:

- Como trabajo previo se replantearán los puntos en los que se ubicará la terna, marcando en la estructura del túnel, los tres puntos y su nomenclatura.
- Se debe tratar adecuadamente la superficie de la estructura a instrumentar.
- Una vez ubicados los puntos, se procede a la instalación de la terna, para ello los discos metálicos se fijan a la superficie en la que se ubica la grieta o junta mediante un adhesivo especial de alto poder adherente, colocando dos de ellos a uno de los lados de la grieta y paralelos a la misma y el otro disco al lado contrario de la grieta o junta, formando en conjunto un triángulo.

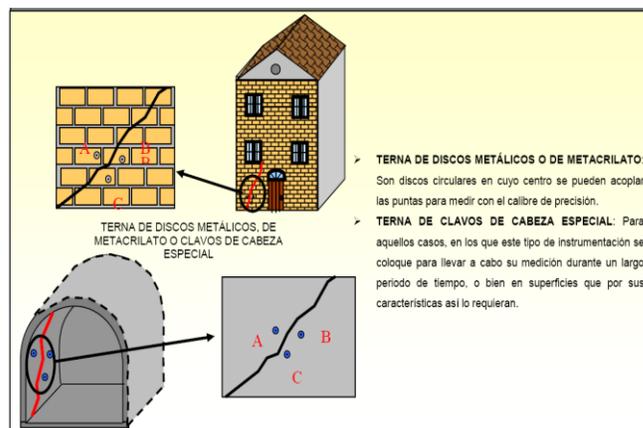


Figura 38. Terna de puntos en una estructura
(Consocio Línea, 2017)

Obtención de datos y mediciones:

La lectura se realiza mediante un calibre digital o un deformómetro midiendo la distancia entre cada par de discos o clavos. Con la lectura de los tres lados del triángulo que forma la terna y mediante el software adecuado, obtendremos las componentes del desplazamiento que nos interesan, que son y se pueden apreciar en la figura 39:

- Desplazamiento total.
- Componente del desplazamiento perpendicular a la fisura.
- Componente del desplazamiento paralelo a la fisura.

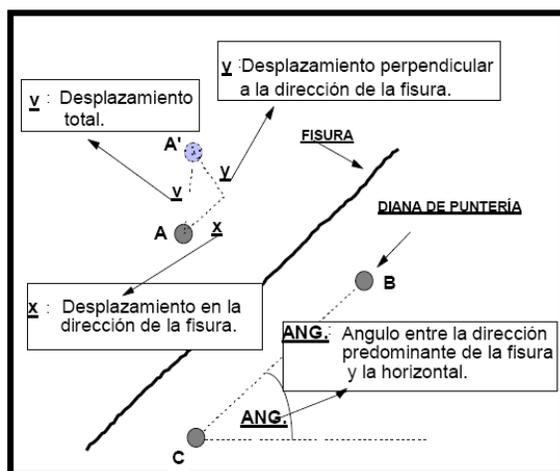


Figura 39. Composición de desplazamientos (Consocio Línea, 2017)

Consideraciones especiales:

- En aquellos casos en los que en los que se deba colocar ternas de clavos de cabeza especial; será necesaria la utilización de un taladro percutor con el que realizamos tres perforaciones con la misma disposición que en el caso anterior y en las que introducimos los clavos anclados a la estructura con adhesivo especial.
- En algunas ocasiones tanto en el caso de los discos como en el de los clavos, la terna puede ser protegida mediante una caja de protección anclada a la superficie que hemos instrumentado.

En la figura 40 y 41, se puede observar un caso real en la obra del Metro de Quito, en donde se observa una fisura (figura 40) y que se colocó 3 clavos formando una terna de puntos. Por otro lado, en la figura 41, se observa la medición realizada mediante un fisurómetro digital.



Figura 40. Clavos para control de fisuras mediante terna de puntos



Figura 41. Medición de fisura mediante fisurómetro

7.3 Análisis de fisuras y juntas con dianas de puntería

Principios de operación:

La ventaja fundamental que presenta este sistema óptico de control de fisuras es que una vez instaladas las dianas de puntería podemos llevar a cabo el seguimiento sin necesidad de tener acceso a las mismas.

Procedimiento de instalación:

La instalación será igual que las dianas de puntería que se empleaban para la medida de convergencias. En la figura 42 se puede observar como es el esquema de un control de fisura con diana de puntería.

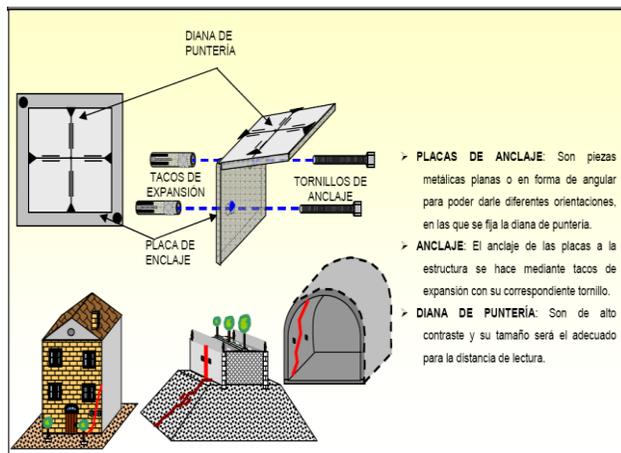


Figura 42. Control de fisuras mediante dianas de puntería (Consocio Línea, 2017)

Obtención de datos y mediciones:

Para llevar a cabo la lectura se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La estación estará ubicada en un lugar donde tenga una buena visual de los puntos a medir.
- Después se estacionará el aparato, se lanzarán visuales a las dianas de puntería y mediante una función específica de la estación total, obtenemos la distancia real entre cada par de dianas.
- Para eliminar errores mecánicos de la medición (errores horizontales, índice vertical) se puede medir cada punto en las dos posiciones del telescopio.
- Si se desea incrementar la fiabilidad de las medidas se pueden analizar estadísticamente los datos, realizando diversas series de medidas.
- Posteriormente, en la siguiente fase de tratamiento de datos, se obtendrán las lecturas relativas comparando las lecturas diarias con la lectura origen del sistema que se tomó en cuanto acabó la instalación (Lectura cero).
- Se obtendrá la representación gráfica de estas lecturas relativas y de la evolución de la Temperatura durante el periodo de seguimiento.

- Si colocamos tres dianas de puntería se podrá realizar la misma descomposición de movimientos que en el método de Terna de Puntos, aprovechando la potencia de éste y la ventaja que ofrece la topografía de no necesitar acceso a las dianas.

Capítulo 8 - Auscultación de la Presión del Agua

El nivel freático es una variable de vital importancia para cualquier obra, pero de manera más especial para las obras subterráneas. Por ello es necesario, la determinación de este mediante medidas de los niveles de agua existentes en el terreno. Es necesario establecer con anterioridad a la ejecución de la obra la afección del túnel a los acuíferos existentes en la zona, siendo lo más adecuado realizar este estudio ya en fase de proyecto para evitar consecuencias. La excavación del túnel supone un drenaje del terreno circundante de manera que se rebaja el nivel freático del mismo y puede originar diversas circunstancias, de las que a continuación se mencionan algunas:

- Agotamiento parcial o total de los acuíferos existentes.
- Variación de las presiones del terreno, afectando a estructuras colindantes o incluso a la propia estructura del túnel a realizarse.
- Arrastre de material procedente del terreno circundante, provocando serios problemas en terrenos arenosos y, sobre todo, en excavaciones ejecutadas entre pantallas.
- Diversas molestias provocadas por la inundación de distintos lugares.

Es por tanto muy importante caracterizar el acuífero, la permeabilidad del terreno, la capacidad de almacenamiento y el nivel del agua. Éste último se mide con piezómetros, que pueden ser de distinta tipología.

8.1 Piezómetro abierto

Principios de operación:

El objeto de la instalación de piezómetros abiertos cercano a la zona de afectación de una obra subterránea es obtener la evolución del nivel freático. Como se muestra en la figura 43, se obtiene un esquema de cuáles son las partes principales de un piezómetro abierto y lo que se debe tomar en cuenta en cada una de sus partes.

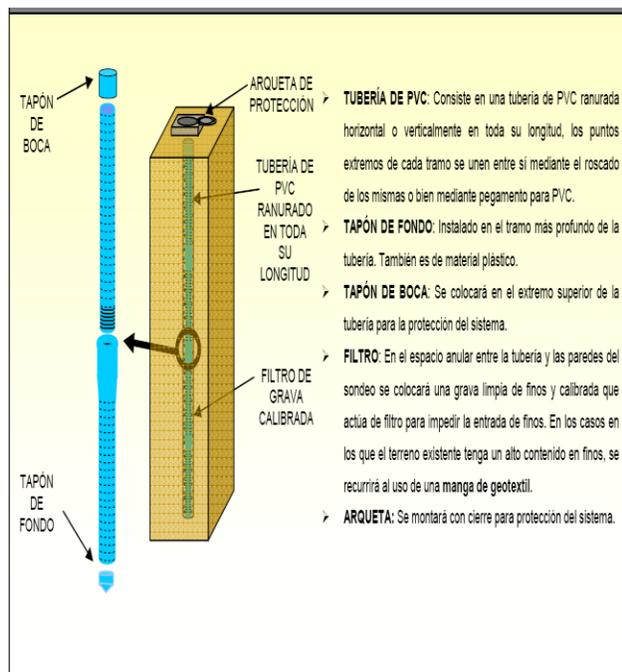


Figura 43. Instalación de piezómetro abierto (Consocio Línea, 2017)

Procedimiento de instalación:

Para un piezómetro abierto, es recomendable seguir los siguientes pasos previos antes de su debida instalación:

- Como trabajo previo se replanteará la posición del piezómetro y se marcará en el terreno.
- Antes de realizar la instalación elegiremos el filtro adecuado en función del terreno que nos vamos a encontrar.
- Además, montaremos tramos de tubería de 6 m que deben acoplarse firmemente entre sí; también se montarán centradores a lo largo de estos tramos de tubería y el geotextil en el tramo si por las características del terreno se recomienda su utilización.

Como se observa en la figura 44, se tiene la tubería de PVC en tramos de 6 metros, en donde se utilizará para el revestimiento del sondeo.



Figura 44. Tubería de PVC para revestimiento de sondeo (Consocio Línea, 2017)

Para la instalación se realizará siguiendo los siguientes pasos:

- Ejecución del sondeo:** Se ejecutará el sondeo a la profundidad en la cual quiera alojar la tubería. El diámetro del sondeo debe ser el adecuado para alojar el piezómetro y permitir realizar el correcto relleno con el material filtro.
- Instalación de la tubería:** Se irán introduciendo los tramos de tubería hasta alojarlos a la profundidad adecuada. Si fuera necesario usar geotextil este debe montarse previamente, a no ser que utilicemos manga continua de geotextil, en cuyo caso se irá enfundando la tubería a medida que esta descende.
- Instalación del material filtro:** Una vez instalado el piezómetro se rellenará el espacio en el que queda embebido éste con material filtro adecuado.
- Arqueta:** Se colocará una arqueta con cierre y debidamente protegida.

8.2 Piezómetro de cuerda vibrante

Principios de operación:

El objeto de la instalación de piezómetros de cuerda vibrante es obtener la evolución del nivel freático en un determinado estrato del terreno, a través de la presión que la columna de agua ejerce sobre el sensor. Como se observa en la figura 45, es como debería quedar instalado el piezómetro de cuerda vibrante y a su vez su principio de funcionamiento con cada uno de sus componentes.

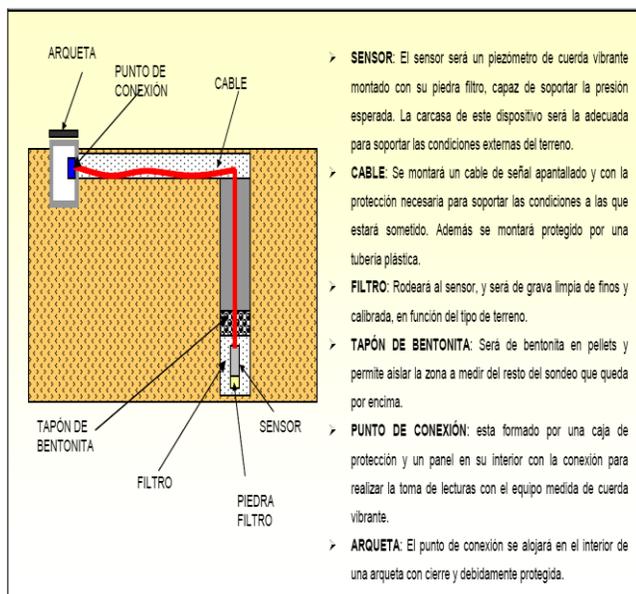


Figura 45. Instalación de piezómetro de cuerda vibrante (Consocio Línea, 2017)

Procedimiento de instalación:

Los elementos que componen este sistema de instrumentación son los siguientes:

Sensor: compuesto por un transductor de presión de cuerda vibrante, con piedra filtro y carcasa de acero inoxidable adecuada a las condiciones del terreno. El rango del transductor se elegirá en función de la presión esperada.

Cable: se montará un cable de señal apantallado y con la protección necesaria.

Tapón obturador: para sellar la entrada de agua al túnel.

Punto de conexión: para alojar los terminales del sensor.

Como trabajo previo se replanteará la posición del piezómetro y se marcará en el terreno. Se debe analizar previamente los siguientes puntos:

- Profundidad del sensor o sensores en el caso de que se monten más de uno en el mismo sondeo.
- Dimensión y situación del tapón de bentonita.
- Tipo de material filtro a utilizar.

En la figura 46 se puede observar un ejemplo de un piezómetro de cuerda vibrante.



Figura 46. Piezómetro de cuerda vibrante (Consocio Línea, 2017)

Para el caso de montar varios sensores en el mismo sondeo, se debe prolongar el tapón hasta la profundidad del segundo sensor y seguir los mismos pasos expuestos en los puntos anteriores para la instalación de este y el filtro.

- Relleno:** Una vez el tapón este correctamente ejecutado se procederá a rellenar el resto del espacio del sondeo con material granular o inyección de lechada.
- Extendido del cable:** Terminado el relleno, se comprobará el correcto funcionamiento del sensor y posteriormente se extenderá el cable bien protegido en su tubería y en una zanja adecuada, hasta la arqueta.
- Montaje del punto de conexión:** Extendido el cable hasta la arqueta se conectará al punto de conexión que se alojará dentro de la misma.
- Arqueta:** Se colocará una arqueta con cierre y debidamente protegida.

Obtención de datos y mediciones:

Se instalará en el hastial del túnel u obra subterránea, en perforaciones de 1,5 metros de longitud y diámetro adecuado para introducir el sensor. Se suele instalar manualmente para no interferir con los trabajos de excavación. Es muy importante tapar adecuadamente la boca del taladro, con un sellador efectuado para evitar afluencia de agua al túnel y pérdida de presión en las lecturas. Se deben ubicar en secciones donde puedan producirse variaciones importantes en las presiones intersticiales con motivo de la excavación. Esto suele coincidir con zonas de fallas o formaciones permeables.

Para la obtención de datos se deber tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- a) En el caso de que tengamos varios dispositivos cercanos, podemos realizar el cableado correspondiente hasta el punto de medida, en el que podremos instalar una caja de centralización.
- b) En aquellos casos en los que se necesite una toma continua de datos programada cada cierto intervalo de tiempo, podemos realizar el cableado correspondiente hasta el punto de medida y colocar en este un armario de protección con un sistema automático de adquisición de datos.
- c) La toma de datos en este punto puede ser de forma manual volcando en un portátil los datos guardados por el sistema o de forma automática desde un ordenador conectado al sistema por vía internet.
- d) También es posible instalar el piezómetro de cuerda vibrante, con un taladro adecuado desde el interior del túnel en las paredes de este.
- e) La ventaja clara de esta ubicación es que permite evaluar las presiones intersticiales presentes en el exterior del túnel, siendo las que el agua ejerce realmente sobre el sostenimiento y/o revestimiento y compararlas con las estimadas en proyecto.

Este tipo de disposición sigue esquema que se presenta en la figura 47:

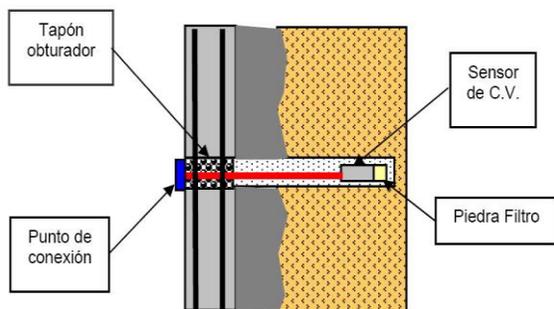


Figura 47. Esquema piezómetro de cuerda vibrante (Consocio Línea 1, 2017)

Capítulo 9 – Referencias

- Metro de Quito - El Metro es una realidad. (2018). Retrieved from <http://www.metrodequito.gob.ec/>
- Geocisa | Instrumentación Geotécnica. (2014). Retrieved from http://www.geocisa.com/?page_id=1306
- Sola, & Del Saz. (2007). "CURSO DE GEOTECNIA PARA INFRAESTRUCTURAS. MADRID.
- Hernández, J. (2000). Apuntes de geotécnica. Universidad de Granada
- Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on. (2008). Retrieved from <https://studylib.net/doc/8110417/use-of-inclinometers-for-geotechnical-instrumentation-on>
- EGV consultores, & Ecuator. (2015). WebGeom - Metro de Quito. Retrieved from <http://metrouio.ecuador.com/>
- Presentación Guía Técnica: Instrumentación y Auscultación en el Proyecto y Construcción de Túneles Urbanos - AETOS. (2014). Retrieved from <http://www.aetos.es/guia-tecnica-instrumentacion-y-auscultacion-en-el-proyecto-y-construccion-de-tuneles-urbanos/>
- gall, v., burn, v., & john, r. (2018). Real-Time Monitoring for Very Shallow Tunneling in Urban Settings. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/268382947_Real-Time_Monitoring_for_Very_Shallow_Tunneling_in_Urban_Settings
- Geotechnical Monitoring in Convencional Tunneling. (2014). Retrieved from http://www.ytmk.org.tr/files/files/OeGG_Monitoring_Handbook.pdf