



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**INSTRUMENTACIÓN PARA LA AUSCULTACIÓN DE TÚNELES EN
SUELOS BLANDOS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. RAÚL HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESINA: M. I. JUAN LUIS UMAÑA ROMERO

MÉXICO, D.F.

MAYO 2013

INSTRUMENTACIÓN PARA LA AUSCULTACIÓN DE TÚNELES EN SUELOS BLANDOS

Director de Tesina: **M. I. Juan Luis Umaña Romero**

Alumno: **Raúl Hernández González**

Mayo de 2013

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	Objetivo y alcances.....	6
2.	PLANEACIÓN DEL PROGRAMA DE MONITOREO.....	7
2.1	Enfoque sistemático para la planificación de programas de monitoreo utilizando instrumentación geotécnica y topográfica.....	7
2.2	Beneficios del uso de instrumentación geotécnica y topográfica.....	13
3.	SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.....	16
3.1	Instrumentación topográfica en superficie.....	17
3.1.1	Nivelaciones superficiales.....	17
3.1.2	Referencias de nivel topográfico en construcciones.....	18
3.1.3	Banco de nivel profundo <i>simple</i>	18
3.2	Instrumentación topografía en el interior del túnel.....	20
3.2.1	Medición de distancias diametrales (Convergencia-Divergencia).....	20
3.3	Instrumentación geotécnica en superficie.....	23
3.3.1	Extensómetro de barra.....	23
3.3.2	Pozo de Observación.....	25
3.3.3	Piezómetro abierto tipo Casa Grande.....	26
3.3.4	Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante.....	27
3.3.5	Inclinómetro.....	29
3.4	Instrumentación Geotécnica en el interior del túnel.....	35
3.4.1	Deformímetros para el concreto.....	38
3.4.2	Deformímetros para el acero.....	41
3.4.3	Celda de Presión.....	43
4.	MONITOREO, PROCESAMIENTO, PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y REPORTE DE LOS DATOS DE LA INSTRUMENTACIÓN.....	50
5.	CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS.....	56
6.	EJEMPLO DEL APROVECHAMIENTO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN EN TÚNEL (TEO).....	63
	APÉNDICE A. EJEMPLO DE FICHA DE INSTALACIÓN.....	77
	CONCLUSIONES.....	80
	LISTA DE FIGURAS.....	81

LISTA DE FOTOS.....	82
LISTA DE TABLAS.....	83
REFERENCIAS	84

1. INTRODUCCIÓN

Túneles en suelos blandos

Debido al crecimiento que han tenido las grandes ciudades del mundo se ha presentado con mayor frecuencia la necesidad de construir túneles en suelos blandos con la finalidad de resolver los problemas de drenaje, suministro de agua y de transporte masivo de pasajeros. Los suelos blandos generalmente están constituidos por materiales finos con altos contenidos de agua o generalmente localizados bajo el nivel freático.

En el diseño y excavación de túneles en suelos blandos existen dos aspectos muy importantes que se deben considerar, los cuales son:

- 1) La estabilidad del frente de excavación.
- 2) Las deformaciones inducidas a corto, mediano y largo plazo.

Analizando el problema de la estabilidad del frente de ataque, se sabe que cuando se excava un túnel se produce una modificación al estado de esfuerzos iniciales. En el frente es de suma importancia realizar un análisis de los esfuerzos en forma tridimensional, transformándose en un análisis bidimensional a medida en que la zona que los produce va quedando atrás. Asimismo con la excavación se producen cambios en la presión de poro del suelo en su entorno, debido a que el túnel representa, en la mayoría de los casos, una zona a presión atmosférica. La adaptación de las presiones del agua, en suelos de permeabilidad relativamente baja a los nuevos estados de esfuerzos no es instantánea, por lo que el tiempo es un elemento importante en el mecanismo de evolución de las presiones de poro. La aplicación de presiones efectivas donde se van disipando las presiones de poro, generan nuevos esfuerzos cortantes y nuevas deformaciones del medio.

Como se mencionó anteriormente, el segundo aspecto importante a considerar en el diseño y construcción de túneles en suelos blandos son las deformaciones del terreno inducidas por el proceso constructivo, de tal manera es necesario reducir éstas a un valor mínimo o permisible con el fin de no dañar construcciones vecinas y tuberías de servicio. Por lo tanto, es esencial mantener sin variación la magnitud de los esfuerzos efectivos de la masa de suelo, para evitar tanto expansiones como asentamientos que afecten a las obras inducidas. No obstante que se cumpla este requisito, es inevitable que se presenten desplazamientos del suelo por la alteración del estado de esfuerzos, tanto en corto, mediano y a largo plazo.

Los desplazamientos que se produzcan en las paredes de los túneles en el suelo blando dependen mucho de la extensión de la zona plástica que torno a éste se forma. La estabilidad del frente tiene gran influencia en las deformaciones del terreno, dicha distancia puede abarcar hasta uno a dos diámetros del túnel, Figura 19, Anexo A.

En la actualidad los escudos para suelos blandos presentan diferentes dispositivos y sistemas de excavación, como son:

1. Escudo de frente abierto con diversos grados de mecanización para la excavación y transporte, a través del escudo, del material excavado, en combinación con la utilización de aire comprimido.
2. Escudo de frente cerrado, con diversos sistemas de estabilización en el frente, los cuales pueden agruparse de la siguiente manera:
 - 2.1. Escudo de lodos de bentonita.
 - 2.2. Escudo con cámara de aire comprimido.
 - 2.3. Escudo de presión de tierra balanceada.

Cada diseño geotécnico es hasta cierto punto hipotético, y cada trabajo de construcción en suelo o roca corre el riesgo de encontrar sorpresas en su estratificación.

Se ha constado que la respuesta del comportamiento de los suelos en el campo es diferente a lo estimado con los cálculos teóricos. Esto es debido tanto a las complejidades del suelo, como al hecho de que con mucha frecuencia el ingeniero cuenta con niveles de información por debajo del ideal conseguible, por limitaciones de tiempo y recursos. Estas dos circunstancias hacen que en los problemas de campo de la geotecnia se trabaje con grados de incertidumbre que suelen excluir toda posición de indiferencia o de excesiva tranquilidad en cuanto al comportamiento de las obras hechas o de las soluciones adoptadas en un caso particular dado.

Por todo ello, se ha desarrollado mucho en los últimos años la tendencia a observar el comportamiento de las obras mediante el implemento de instrumentos, midiendo los aspectos que se consideran esenciales para el control del comportamiento de la obra, durante la construcción y a lo largo de la vida útil. Cuando la instrumentación, se realiza e interpreta bien, no sólo permite establecer el comportamiento de una estructura y la evolución de sus condiciones de estabilidad o de servicio, sino que también permite verificar toda la concepción de su proyecto, así como el cumplimiento, en el caso particular de que se trate, de las teorías de que se haya hecho uso en dicho proyecto; de esta manera, la instrumentación geotécnica y topográfica cumplen un cometido que va mas allá de obtener información sobre la estructura objeto de las mediciones y se convierte en un poderoso medio para verificar el cumplimiento de las concepciones teóricas en la realidad de las obras.

Ibid., p. 5.4.

En los capítulos de este trabajo se desarrollan los siguientes temas:

El capítulo 2 contempla un panorama de los aspectos que se deben involucrar para llevar a cabo un trabajo de instrumentación, desde su planeación hasta su ejecución y conservación.

En el capítulo 3 se describen algunos instrumentos usados para monitoreo en túneles en suelos blandos. Se describen sus características de funcionamiento y algunas recomendaciones para su elección e implemento. Da tal forma que se pueda sacar la mayor ventaja de su uso.

Es conveniente que se conozcan los parámetros que interesa medir en determinado proyecto, previo a su elección que se comprende en el capítulo anterior, y posterior a esto se debe formular un plan para el monitoreo de los instrumentos, contemplando la frecuencia requerida, el procesamiento y presentación de los datos y los canales de información entre los involucrados, entre otros aspectos, que se abarcan en el capítulo 4.

También se deben estudiar la calibración y mantenimiento de los instrumentos y equipos de medición, manejando los tiempos adecuados, el número de instrumentos y unidades de lectura que se dispongan. El poder identificar los aspectos que indiquen la necesidad de una calibración o reparación. Estos factores se describen en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se encuentran los datos del monitoreo de algunos instrumentos utilizados en el Túnel Emisor Oriente, ejemplificando un tipo de registro y graficas con los parámetros de interés.

1.1 Objetivo y alcances.

El presente trabajo tiene por objetivo el presentar un panorama práctico del tema "Instrumentación para túneles en suelos blandos", llevada a cabo en los túneles de la ciudad de México, en el ámbito geotécnico y topográfico, para evaluar la efectividad de las medidas de estabilización llevadas a cabo.

Se darán recomendaciones para la selección, uso y localización de los dispositivos de medición, así como la presentación e interpretación de los registros, con el fin de evaluar el comportamiento del túnel y de las obras inducidas.

2. PLANEACIÓN DEL PROGRAMA DE MONITOREO.

Planear un programa de monitoreo usando instrumentación geotécnica y topográfica es un esfuerzo similar a otros diseños de ingeniería. Un diseño típico de ingeniería comienza con la definición del objetivo y procedimientos a través de pasos lógicos para la preparación de un plan y especificaciones. Similarmente, la tarea de planear un programa de monitoreo debe ser un proceso ingenieril lógico y comprensible que comience con la definición de un objetivo y termine con la planeación de cuantos datos serán empleados.

2.1 Enfoque sistemático para la planificación de programas de monitoreo utilizando instrumentación geotécnica y topográfica.

La planeación del procedimiento puede ser a través de los siguientes pasos, resumidos en la siguiente lista de verificación. Todos los pasos deben, si es posible, estar completados antes de que los trabajos de instrumentación comiencen en campo:

LISTA DE VERIFICACIÓN.

1. Definir las condiciones del proyecto.

- a) Tipo de proyecto.
- b) Plan del proyecto.
- c) Estratigrafía y propiedades de ingeniería.
- d) Condiciones de aguas subterráneas.
- e) Estado de estructuras cercanas.
- f) Condiciones del medio ambiente.
- g) Método de construcción planeado.
- h) Identificación de situaciones de crisis.

2. Definir el propósito de la instrumentación

- a) Beneficios durante el diseño.
 - Definición de las condiciones iniciales del sitio.
 - Pruebas.
 - Determinación de situaciones de crisis.

John D. 1988. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Unite State of America. Wiley., p. 37-38.

- b) Beneficios durante la construcción.
- Seguridad.
 - Método observacional.
 - Control de la construcción.
 - Proveer protección legal.
 - Total de mediciones.
 - Facilitar las relaciones públicas.
 - Mejora de las técnicas.
- c) Verificación de una presentación satisfactoria después de la construcción terminada.
- d) Selección de los parámetros a ser medidos.
- Presión de poro o niveles estáticos.
 - Esfuerzo total en la masa de suelo.
 - Presión total de contacto en las estructuras o roca.
 - Esfuerzo en el macizo rocoso.
 - Deformaciones verticales.
 - Deformaciones horizontales.
 - Inclinación.
 - Deformación en el suelo o en la roca.
 - Cargas o deformaciones en los miembros estructurales.
 - Temperatura.
- e) Predicción de la magnitud de los cambios.
- Predecir los valores máximos, así como el rango de instrumentos.
 - Predecir los valores mínimos, así como la sensibilidad o precisión de los instrumentos.
 - Determinación de los niveles de riesgos.
- f) Idear las acciones de remediación.
- Idear la acción para cada nivel de riesgos, asegurarse que la mano de obra y los materiales estarán disponibles.
 - Determinar quien tendrá la autoridad para iniciar los trabajos de remediación.
 - Asegurar que el canal de comunicación es bueno entre el personal de diseño y el de construcción.
 - Determinar la forma en que todas las partes serán advertidas de las medidas correctivas previstas.

- g) Asignación de tareas para el diseño, construcción, y las fases de operación.
- Asignar la responsabilidad de tareas a la supervisión por el especialista en instrumentación.
 - Plan de enlace y canal de reportes.
 - Planear quien tiene la responsabilidad y autoridad total contractual para la ejecución.
- h) Selección de instrumentos.
- Plan de alta confiabilidad.
 - Máxima sencillez.
 - No permitir que los costos bajos dominen la selección.
 - Máxima duración en el ambiente de instalación.
 - Mínima sensibilidad a las condiciones del clima.
 - Buena presentación del historial de registros.
 - Considerar un transductor, una unidad de lectura, y un sistema de comunicación por separado.
 - La lectura se necesita exacta. Rango de exactitud que se requiere en cada dispositivo.
 - Se puede verificar la calibración después de la instalación?. Verificar la calibración antes y después de la instalación.
 - Discutir o consultar las aplicaciones con el fabricante.
 - Reconocer cualquier limitación en las habilidades o cantidad del personal.
 - Considerar las necesidades de construcción a largo plazo.
 - Asegurar buena conformidad.
 - Asegurar que las interferencias y los accesos difíciles sean los mínimos.
 - Determinar la necesidad de un sistema automatizado de adquisición de datos.
 - Tipo de lectura planeado y los arreglos, de acuerdo con la frecuencia requerida de monitoreo.
 - Plan de la necesidad de repuestos y unidades de reserva de lectura.
 - Evaluar la adecuación de tiempo de espera.
 - Evaluar la adecuación del tiempo disponible para la instalación.
 - Plantear si el instrumento seleccionado logrará el objetivo.
- i) Seleccionar la localización del instrumento.
- Identificar las zonas de principal interés.
 - Seleccionar las secciones primarias a instrumentar.
 - Seleccionar las secciones secundarias a instrumentar.

- Plan de cantidades para estimar la supervivencia menor del 100%.
 - Arreglar el lugar para facilitar la adquisición de datos.
 - Arreglar el lugar para las verificaciones.
 - Evitar agrupación excesiva de instrumentos que limiten el área de cobertura.
- j) Plan de registro de los factores que pueden influir en los datos medidos.
- Detalles de construcción.
 - Avances de construcción.
 - Observación visual de comportamientos esperados e inusuales.
 - Geología y otras condiciones del subsuelo.
 - Factores ambientales.
- k) Procedimientos establecidos para asegurar lecturas correctas.
- Observación visual.
 - Duplicar instrumentos.
 - Respalidar el sistema.
 - Estudio de consistencia.
 - Estudio de repetibilidad.
 - Revisiones periódicas en el lugar.
- l) Enlistar las especificaciones del propósito de cada instrumento.

3. Preparar el presupuesto.

Incluir costos, siendo particularmente cuidadoso de hacer una estimación realista de la duración del proyecto.

- Planear el programa de monitoreo.
- Hacer el diseño a detalle de los instrumentos.
- Adquisición de instrumentos.
- Calibraciones de fábrica.
- Mantenimiento y calibración de instrumentos periódicamente.
- Establecer y actualizar los periodos de monitoreo.
- Recolección de datos.
- Procesamiento y presentación de datos.
- Interpretación y reporte de datos.
- Decisión sobre el implemento de los resultados.

4. Escribir las especificaciones de los instrumentos.

- Asignar al responsable de la adquisición de instrumentos.
- Contrato de construcción.
- Propietario.
- Consultor de diseño.
- Proveedores de instrumentos.
- Especificación del método seleccionado.
- Descripción de las especificaciones, con el modelo y número de serie.
- Presentación de las especificaciones.
- Selección de bases para la determinación del precio.
- Negociación.
- Ofertas.

a) Escribir las especificaciones.

b) Planear las calibraciones de fábrica.

c) Planear las pruebas de aceptación cuando los instrumentos son recibidos por primera vez por parte del usuario, y determinar las responsabilidades.

5. Plan de instalación.

- Preparar paso a paso el procedimiento de instalación antes de las fechas programadas de instalación, incluyendo la lista de materiales y herramientas necesarios.
- Preparar los formatos para el registro de instalación.
- Plan de capacitación del personal.
- Coordinar los planes con el contratista.
- Planeación de los accesos necesarios.
- Planeación de la protección contra daños y vandalismo.

6. Planeación de la calibración y mantenimientos regulares.

a) Planeación de la calibración durante la vida de servicio.

- Unidades de lectura.
- Componentes embebidos.

b) Plan de mantenimiento.

- Unidades de lectura.
- Terminales en campo.
- Componentes embebidos.

7. Plan de recolección de datos, procesamiento, presentación interpretación, reportes, e implementaciones.

a) Plan de recolección de datos.

- Preparación preliminar detallada del proceso de recolección de los datos iniciales y subsecuentes.
- Preparación de los formatos para los datos de campo.
- Plan de capacitación del personal.
- Plan de horarios de la recolección de datos.
- Plan de los accesos necesarios.

b) Plan de procesamiento y presentación de los datos.

- Determinación de la necesidad de implementar un sistema automatizado.
- Preparar a detalle los procesos preliminares para el procesamiento y presentación de datos.
- Preparar las hojas de cálculo.
- Plan del formato de impresión.
- Plan de capacitación del personal.

c) Plan de interpretación.

- Preparar el procesamiento detallado para la interpretación de datos.

d) Plan del reporte de conclusiones.

- Definir los requerimientos del reporte, el contenido y frecuencia.

8. Poner por escrito los acuerdos del contrato para los trabajos de campo para los servicios de instrumentación.

a) Poner por escrito las especificaciones a detalle.

Las sugerencias antes mencionadas se proponen con objeto de lograr una buena planeación, confiabilidad en las mediciones, ahorro de tiempo y recursos, y de poder tener control en cada actividad.

En la tabla 1 se sugiere un ejemplo para instruir a los propietarios respecto a las tareas que se deben asignar para el programa de monitoreo, considerando que la cooperación del constructor no es una garantía.

Tabla 1. Ejemplo de tareas que debe asignar el propietario para el programa de monitoreo.

Tarea	Parte responsable			
	Propietario	Consultor o proyectista	Especialista en instrumentación	Constructor
Plan de programa de monitoreo	✓	✓	✓	
Requisición de instrumentos y calibraciones		✓	✓	
Instalación de instrumentos			✓	✓
Frecuencia de mantenimiento y calibración de instrumentos			✓	✓
Establecimiento y actualización de la frecuencia de monitoreo		✓	✓	
Monitoreo			✓	✓
Procesamiento y presentación de datos			✓	
Interpretación		✓	✓	
Decisión de implementación de resultados	✓	✓		

Con esta propuesta se considera que se asignan tareas específicas a cada participante, para tener un mayor control y trabajar conjuntamente.

2.2 Beneficios del uso de instrumentación geotécnica y topográfica.

Beneficios durante el diseño.

La instrumentación es usada para proporcionar aportaciones, tales como, condiciones del lugar en estudio, detectar problemas potenciales, para facilitar

Ibid., p. 56.

el diseño inicial. En muchas ocasiones se opta por instalar instrumentos previamente al inicio del diseño, con la intención de obtener información como: las variaciones de los niveles piezométricos, los desplazamientos del terreno, etc., que ayuden a involucrar estas condiciones presentadas in situ, para generar un diseño más confiable.

Descripción de las condiciones iniciales del sitio.

La instrumentación siempre juega un rol importante en la descripción de las condiciones del sitio durante las etapas de análisis y diseño del proyecto. Por ejemplo, las presiones de las aguas subterráneas (freáticas) y sus fluctuaciones con frecuencia son determinadas para fines de análisis y diseño. El conocer las condiciones de esfuerzo y deformación en sitio se requiere para el diseño racional del revestimiento del túnel. A menudo se hacen ensayos para definir las condiciones previas a la construcción, para definir elevaciones del terreno y la condición de cualquier estructura que puede verse influenciada por la construcción del túnel.

Determinación de situaciones críticas.

Si existe la posibilidad de que ocurra una situación crítica, por ejemplo en un deslizamiento o derrumbe repentino por la presencia de discontinuidad, sus características deben ser definidas de modo que las medidas correctivas de estabilización se puedan planificar y poner en práctica.

Beneficios durante la construcción del túnel.

La instrumentación se utiliza durante la construcción para garantizar la seguridad, reducir los costos, controlar los procedimientos y horarios de construcción, proporcionar protección legal, proporcionar datos de medición, facilitar las relaciones públicas, y mejorar las técnicas de construcción.

Seguridad.

La seguridad es una consideración esencial en todo proyecto de construcción. Programar la instrumentación puede proporcionar las garantías necesarias, comparando el comportamiento real con los valores estimados en el diseño. Por ejemplo, con frecuencia existe la necesidad de monitorear los efectos de la construcción en las estructuras adyacentes, tal como la medición de la deformación en y alrededor de una excavación del túnel como un medio de garantizar la seguridad del soporte.

Ibid., p. 33.

Control durante la construcción.

Incertidumbres en las propiedades de los materiales encontrados en la exploración y muestreo, los cuales pueden cambiar durante el avance de la obra, que afectan el comportamiento de la obra, afectando los procedimientos y tiempos de construcción. Por lo tanto, el diseñador puede especificar un programa de estabilización para controlar el comportamiento real durante la construcción de manera que los procedimientos o los horarios puedan ser modificados de acuerdo con el comportamiento real.

3. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.

En túneles en suelos blandos las condiciones de estabilidad del frente y paredes así como las deformaciones que se induzcan en la superficie son las condiciones que norman las directrices de diseño y construcción que se elijan, entre otros factores.

Los suelos blandos, en excavaciones subterráneas, muestran una pronta inestabilidad por su pérdida de confinamiento, produciendo deformaciones, tanto expansiones como asentamientos, así como la reducción de la capacidad de carga.

Como generalmente los suelos blandos se localizan bajo el nivel freático, en ocasiones es necesario efectuar una inyección secundaria, a fin de actuar como un sello e impermeabilizante para reducir al mínimo las filtraciones hacia el túnel.

Habrá que tomar en cuenta que para la construcción de túneles se deben construir accesos verticales para la entrada y salida de la misma maquinaria, el personal, suministro de materiales y herramientas. Estos accesos llamados comúnmente lumbreras también requieren de un seguimiento de su comportamiento lo mismo que el túnel, desde su diseño y durante su ejecución, y posiblemente durante su vida útil. La instrumentación empleada para estas estructuras es prácticamente la misma que para túneles, con la adición de inclinómetros; los cuales resultan muy útiles en particular para estructuras verticales.

Los aspectos anteriores nos dan una pauta para la elección del tipo de instrumentos que se requieren emplear para medir los parámetros que nos indiquen un análisis y diseño adecuados, y el seguimiento durante la construcción de la obra.

Por lo anterior, la instrumentación que se recomienda para monitorear el comportamiento del túnel es la siguiente:

Instrumentación topografía en superficie.

- Referencias en superficie (bancos superficiales) para la medición de los asentamientos al paso del túnel.
- Referencias en construcciones colindantes al trazo de la línea de proyecto del túnel.

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C., Op. Cit., p. 5.92-5.93.

Instrumentación topografía en el interior del túnel.

- Medición de distancias diametrales (Convergencia-Divergencia).

Instrumentación Geotécnica en superficie.

- Piezómetros tipo casa grande y piezómetros eléctricos.
- Inclínómetros verticales.
- Extensómetros de barra.

Instrumentación Geotécnica en el interior del túnel.

- Strain gage (medidores de deformación y esfuerzo) para el acero y el concreto.
- Celdas de presión de tierra.

3.1 Instrumentación topográfica en superficie.

3.1.1 Nivelaciones superficiales.

El método más obvio y sencillo para conocer los asentamientos es el colocar una serie de puntos estables distribuidos en superficie y nivelarlos periódicamente. En pavimento o concreto puede bastar la colocación de una serie de clavos, para señalar los puntos por nivelar; en superficie de tierra podrá convenir enterrar en el suelo un pequeño dado de concreto, en cuyo centro se haya colocado un tubo u otro indicador que sobresalga ligeramente del terreno. Se deben instalar con anticipación a la excavación del túnel teniendo siempre instaladas las secciones correspondientes a una distancia de 100 metros adelante del frente de la excavación del túnel.

El punto más delicado de las operaciones de la nivelación estriba en la elección del punto de referencia fijo, que no participe para nada en los movimientos del túnel. Muchas veces este punto ha de estar situado a distancias muy grandes de la zona nivelada (por medir), pues es frecuente que las planicies que forman los suelos blandos y compresibles sufran movimientos superficiales de importancia. Los cerros y elevaciones que pueda haber en las cercanías de la obra por medir pueden proporcionar buenos puntos de referencia; otras veces podrán quizá localizarse estructuras inmóviles, por ejemplo, por estar cimentadas sobre pilas que lleguen más abajo de los estratos deformables y estén sobre apoyos realmente firmes.

En otras ocasiones podrá conseguirse la referencia fija hincando un tubo a través de los suelos blandos, hasta apoyarlo en mantos rocosos o firmes; a éste instrumento se le conoce como banco de nivel profundo, el cual se describe más adelante.

Una vez establecida la referencia fija, absolutamente inmóvil, convendrá siempre fijar otra referencia sobre la superficie del terreno natural, en las cercanías de la zona por medir, a una distancia del orden de 100 m de él. Esta segunda referencia, posiblemente móvil, tendrá la doble finalidad de servir como base de nivelación para los puntos situados sobre la superficie y detectar los eventuales movimientos superficiales que tenga la superficie sobre el túnel excavado por causas ajenas a la construcción de éste. Una constante referenciación del banco de nivel móvil respecto al fijo proporcionará los elementos necesarios para realizar la corrección que haya de hacerse en los movimientos verticales de los puntos en la superficie sobre el túnel, a causa de cualquier movimiento que pudiera tener la superficie.

Será preciso emplear técnicas de nivelación de precisión, con aparatos que sean capaces de detectar desniveles alejados a un kilómetro, con errores no mayores de un milímetro, en más o menos.

3.1.2 Referencias de nivel topográfico en construcciones.

Se deben colocar en zonas cercanas a construcciones, estructuras o instalaciones de servicios, ubicadas a distancias hasta de 50 metros del eje del túnel, para observar su comportamiento por efecto de la excavación (tal será el caso de descargas, plantas de bombeo, torres de alta tensión, pilas de puentes, etc.), marcas de pintura de esmalte sobre los elementos estructurales o componentes y/o bancos de nivel, para observar sus movimientos durante la construcción del túnel.

3.1.3 Banco de nivel profundo *simple*.

Permite definir el hundimiento de la superficie con respecto a un cierto estrato, por ejemplo la capa dura o los depósitos profundos. El dispositivo fue desarrollado por TGC para el proyecto de la Catedral, este banco elimina el efecto de pandeo que tienen los bancos tradicionales. Consta de dos tubos concéntricos: un tubo central continuo de acero de 3.2 cm de diámetro colado dentro de una funda conformada por tramos de tubo de aluminio de 7.6 cm de diámetro de 20.5 cm de longitud unidos con bandas de tela de poliéster de 3.5 cm de longitud para darle continuidad y deformabilidad axial; en la figura 1 se muestra este instrumento.

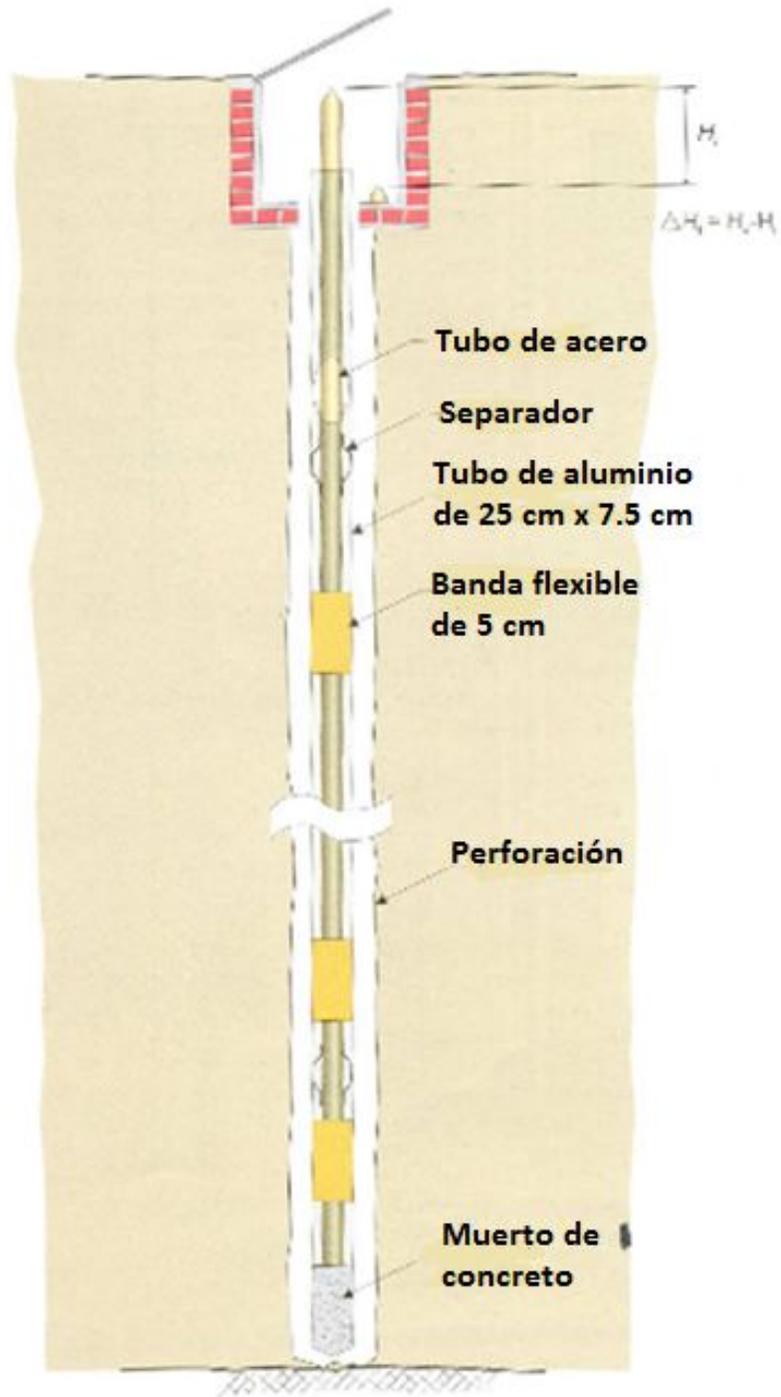


Figura 1. Banco profundo de referencia fija.

Enrique S. V., Efraín O. S., Federico M., Elvira L. P., Febrero de 2005. *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México D.F. TGC Geotecnia s.a., p.153.

3.2 Instrumentación topografía en el interior del túnel.

3.2.1 Medición de distancias diametrales (Convergencia-Divergencia).

La lectura de convergencia formada entre dos puntos de medición entre las paredes del túnel, mide la distancia entre ambos puntos y mediante lecturas consecutivas se obtienen las variaciones de la distancia para determinar el comportamiento del movimiento, sea de convergencia cuando los puntos se acercan, o de divergencia cuando los puntos se alejan. Con el tipo de movimiento observado, las magnitudes medidas y su evolución con el tiempo, será posible observar la estabilidad del revestimiento. Las mediciones se pueden efectuar con un extensómetro de cinta o longímetro, constituido por una cinta de acero (cinta Invar) y un conjunto de micrómetros; para esto se debe verificar que no existirán interferencias para la obtención de las lecturas iniciales. En caso de prever que existirán algunas interferencias, es conveniente el empleo de distanciómetro laser, de los cuales existe gran variedad en el mercado.

Medición con extensómetro de cinta.

Cada punto debe consistir de una pequeña ancla metálica en forma de ángulo, sujeta a la superficie interior del revestimiento de dovelas de concreto mediante clavos metálicos aplicados con herramienta de impacto.

El dispositivo se compone esencialmente de una cinta de acero inoxidable de medida, la cual contiene agujeros que se han perforado a intervalos regulares, esta cinta se puede estirar entre dos puntos situados en lados opuestos de la abertura subterránea. Hay un gancho en el extremo de la cinta y la otra en la parte posterior de la cinta del extensómetro. Un pasador de posicionamiento conectado a las barras de deslizamiento está diseñado para acoplarse a una de las perforaciones en la cinta. El agujero correcto es aquel que permite que la cinta se tense de forma correcta, que se indica por el sistema de luces de colores. El extensómetro de cinta se puede acortar y la cinta tensar, por rotación de un mango de enrollamiento hasta que la luz del indicador señala la tensión correcta.

Covitur Volumen 2. Septiembre de 1988. Manual de diseño Geotécnico. México., p. 67.

En este momento el indicador digital le dará la lectura correcta, figuras 2 y 3 y foto 1.

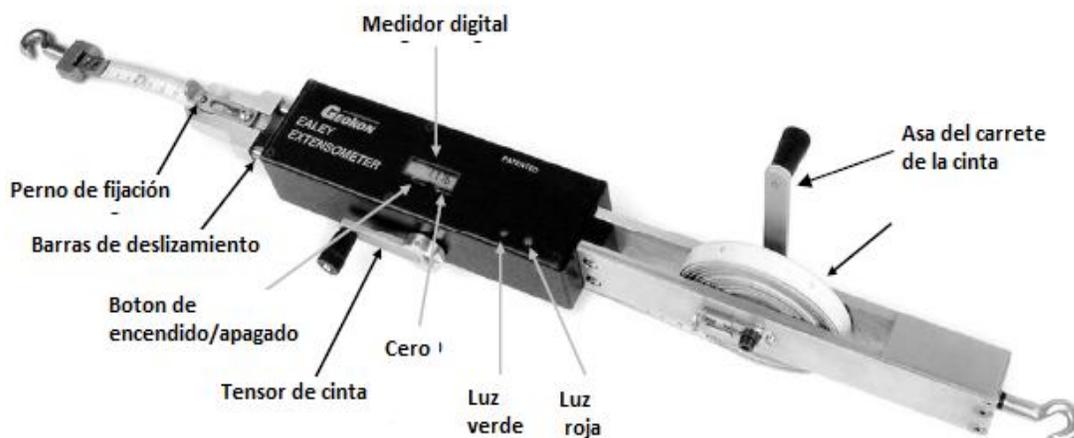


Figura 2. Componentes de un extensómetro de cinta (marca Geokon).

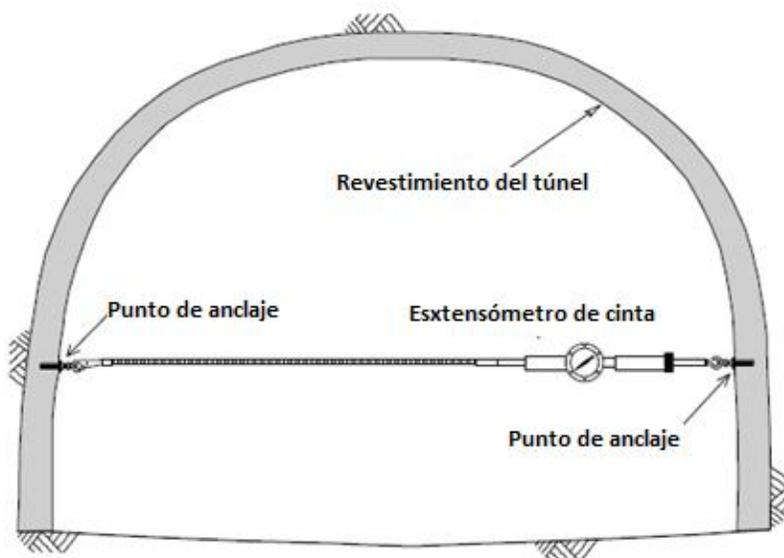


Figura 3. Ejemplo de instalación de referencias para medición de convergencias.

Geokon. (2002-2009). *Instruction Manual. Model 1610. The Geokon Ealey Tape Extensometer*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc., p. 1-2.



Foto 1a. Lectura de convergencia en túnel.

Medición con distanciómetro laser.

Para la toma de lectura con este equipo basta pintar dos marcas (referencias) diametralmente opuestas, para que en una se apoye el instrumento y se emita el rayo láser hacia la otra referencia.

El distanciómetro láser (foto 2a), también conocido como medidor láser, es un instrumento de medición con rayo láser que calcula la distancia desde el aparato hasta el siguiente punto, al que apuntemos con el mismo. Su tecnología resume su manejo en botones digitales muy sencillos de operar, y no requiere de un grado especializado del personal.



Foto 2a. Distanciómetros laser.

Leica Geosystems S.A. de C.V. (n.d). <http://www.leica-geosystems.com>

3.3 Instrumentación geotécnica en superficie.

3.3.1 Extensómetro de barra.

Este instrumento sirve para determina el asentamiento de los estratos a través del tiempo de manera puntual en la zona donde se ubica su ancla.

Está conformado por barras de aluminio de $3/8''$ de diámetro acopladas con un espárrago de $1/4''$. En el extremo superior se coloca la terminal de medición y en el extremo inferior de la barra es colocada el ancla, la cual está constituida por un tramo de varilla corrugada de $3/4''$ con rosca. Una vez que la barra tiene la longitud requerida es protegida con manguera poliflex de $1/2''$, con el fin de que la barra quede libre del contacto con el suelo y solo registre el asentamiento presentado en el sitio de interés donde se colocó el ancla. Después de introducir el extensómetro en el barreno, se cementa el ancla con una lechada agua-cemento y con esto anclar el extensómetro. El barreno es rellenado con agua-cemento-bentonita (figura 4), y por último se coloca un cabezal de medición en el cual se realizan las mediciones con un micrómetro (foto 3a).



Foto 3a. Micrómetro y cabezal.

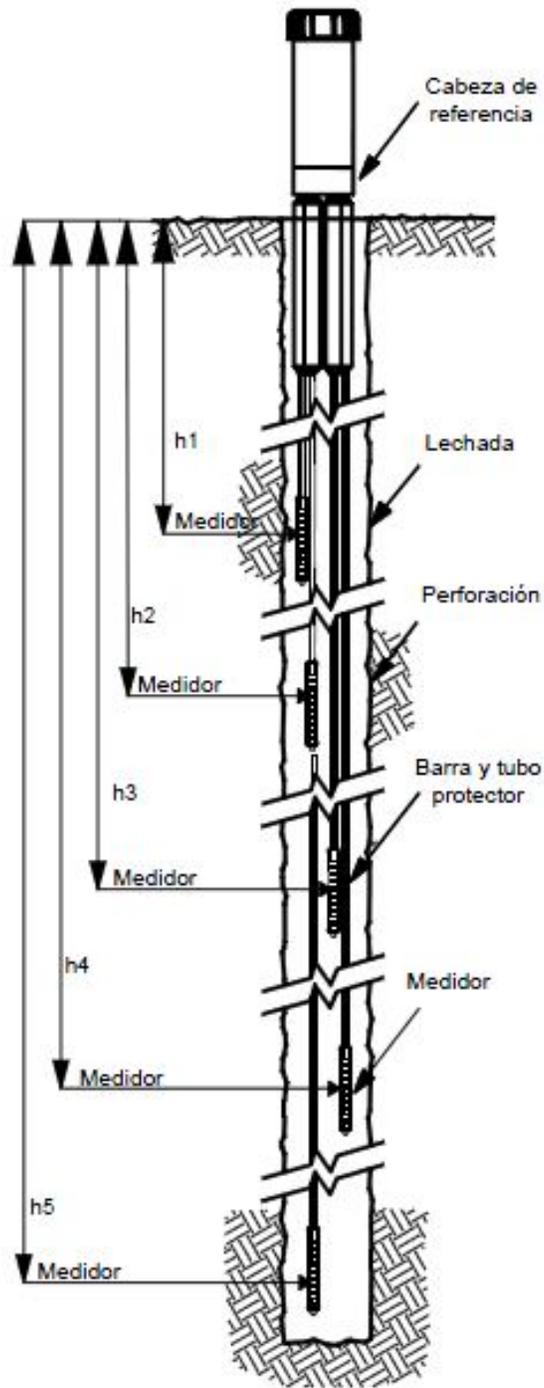


Figura 4. Esquema de extensómetro multipunto.

3.3.2 Pozo de Observación.

Permite conocer el nivel freático (nivel estático) del terreno, y está integrado por una serie de tubos de P.V.C., tipo hidráulico cédula 40, los cuales están unidos mediante una conexión con rosca. El arreglo de tubos está ranurado en su parte inferior y la profundidad del barreno está en función del perfil litológico obtenido previamente durante la exploración o, en su defecto, durante la etapa de perforación del mismo. El tubo se acomoda dentro de la perforación y el espacio anular entre el barreno y el tubo se rellena totalmente con un filtro de grava de $\frac{1}{4}$ " de diámetro (Figura 5).

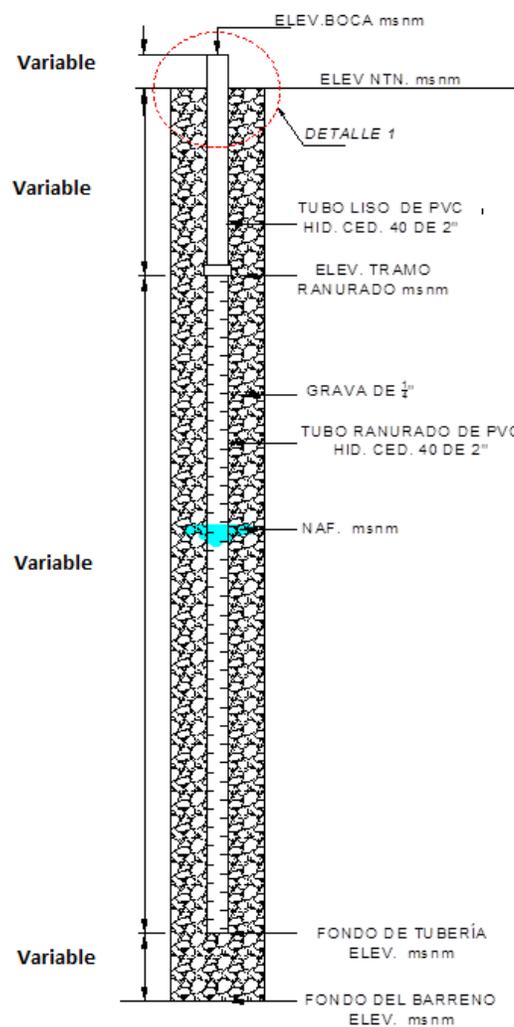


Figura 5. Pozo de observación.

3.3.3 Piezómetro abierto tipo Casa Grande.

Permite conocer la presión del agua dentro de un punto específico del subsuelo, que corresponde a la ubicación del bulbo piezométrico. Está formado básicamente por una serie de tubos de PVC de 1" de diámetro de tipo hidráulico cédula 40, unidos con coples del mismo material, y en su parte inferior lleva un tramo ranurado de 1,0 m de longitud (bulbo), cuya posición dentro del barreno está en función del perfil litológico obtenido durante una exploración previa y/o durante la etapa de perforación (Figura 6). La cámara piezométrica del instrumento está formada con un filtro de grava alrededor del bulbo; seguida de materiales arenosos de transición y finalmente de un tapón de lechada de cemento.

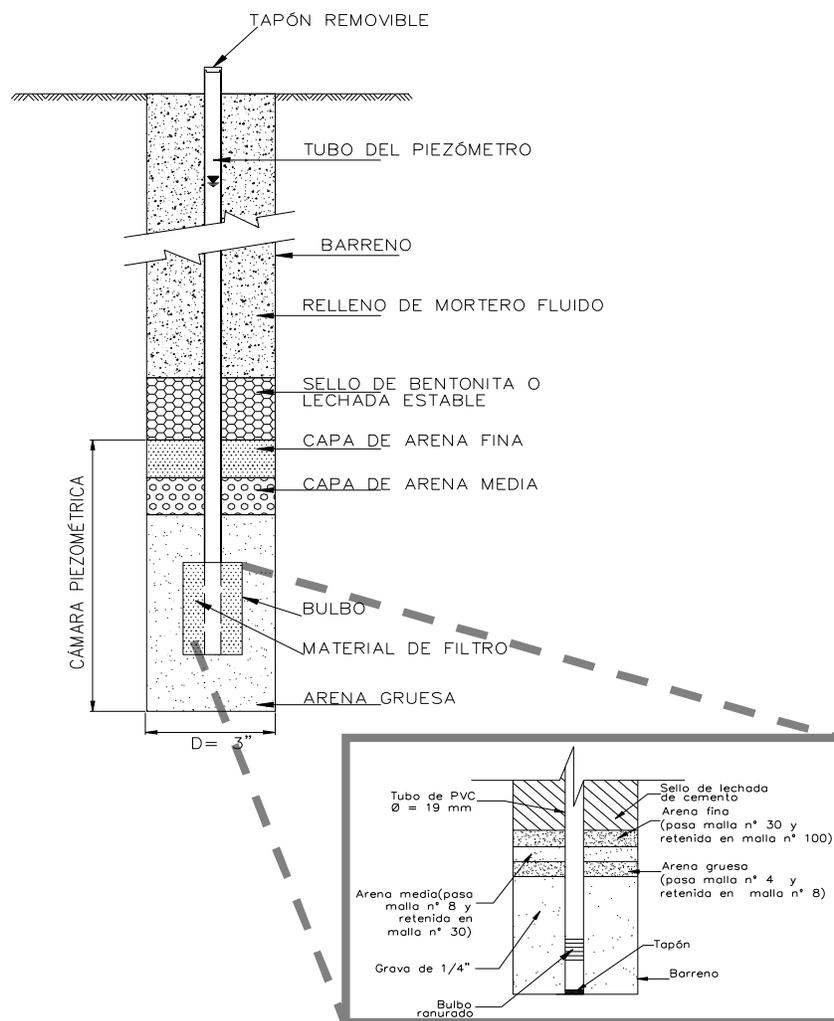


Figura 6. Piezómetro abierto tipo Casa Grande.

Tanto en los pozos de observación (PO) como en los piezómetros abiertos (PZA) la medición del nivel se realiza mediante una sonda piezométrica que consta de un sensor de bronce, cinta conductora graduada en milímetros con longitud de 0 a 150 m, acoplada a un carrete con dispositivo de señal acústica y luminosa (Foto 4a).



Foto 4a. Sonda Piezométrica.

3.3.4 Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante.

Permiten conocer la presión de poro en la arcilla, en el punto donde queda instalado el sensor eléctrico. Está integrado por una celda porosa contenida en un tubo metálico sellado herméticamente y dentro del cual existe un transductor de presión de cuerda vibrante que transforma la presión de agua detectada por la celda porosa en una señal eléctrica, misma que será leída a distancia en una unidad de registro manual.

Principio de funcionamiento del sensor

Está constituido por un cuerpo de acero inoxidable de 19 mm de diámetro por 195 mm de largo, equipado con filtro de acero sintetizado de 50 micrones con baja entrada de aire con un termistor integrado (Foto 5a).



Foto 5a. Sensor eléctrico.

Slope Indicator. 2007. *VW Piezometer*. Mukilteo, Washington, USA, 98275. DGS1.

Su funcionamiento consiste en convertir la presión hidrostática a una señal de frecuencia (Hz), vía un diafragma y un alambre de acero a tensión. Este instrumento está diseñado para que un cambio en la presión del diafragma provoque un cambio en la tensión del alambre. Cuando es excitado por una bobina magnética el alambre vibra con una frecuencia natural, la vibración del alambre en la proximidad de la bobina genera una señal de frecuencia que se transmite a un dispositivo de lectura.

El dispositivo de lectura procesa la señal y despliega una lectura misma que se convierte a unidades de presión, en este caso a kg/cm^2 . La medición es a través de una terminal digital portátil, VW Data Recorder, con la cual también se puede obtener la temperatura registrada con el termistor.

Para realizar la toma de lectura en forma manual de los sensores eléctricos es necesario contar con la unidad Portátil "VW Data Recorder" (Foto 6a). Este equipo es un lector que graba los datos obtenidos con los sensores para posteriormente transferirlos a una computadora.

Las terminales del sensor son conectadas en la parte interior de la unidad de lectura, donde se muestra la configuración de la conexión del instrumento. Una vez conectado el sensor se toma la medición y se almacena en la memoria del VW Data Recorder.

Una parte integral del sistema VW Data Recorder es el programa Recorder Manager, el cual se integra a una base de datos del proyecto. De acuerdo con la ficha de calibración se crea una lista de sensores con sus características técnicas como son; nomenclatura, tipo de sensor y unidad de medida; misma que se transfiere al VW Data Recorder, para posteriormente en campo realizar las mediciones de los instrumentos. Las lecturas obtenidas se almacenan y finalmente se transfieren a la base de datos del proyecto.

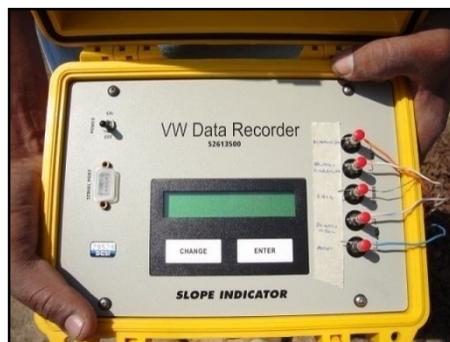


Foto 6a. Lector para instrumentos de cuerda vibrante.

Slope Indicator. 2008. *VW Data Recorder*. Mukilteo, Washington, USA, 98275. DGS1.

3.3.5 Inclinómetro.

Se trata de tubos que tienen ranuras ortogonales en 90° en su interior y que se instalan en el suelo o en el elemento que va a ser medido. La inclinación de los sensores de medición se registra con un servo acelerómetro vertical entre una y otra posición y son transformadas a movimientos transversales. Los cambios en la inclinación entre varios intervalos de medición en cada profundidad, muestran la escala y dirección de los movimientos.

De esta manera se puede determinar la profundidad de la superficie de falla y la dirección y magnitud de los desplazamientos.

Un sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro componentes principales:

- **Un tubo guía** de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación. Este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora. Generalmente, se utilizan diámetros de tubo entre 1.5 y 3.5 pulgadas. Figura 7.
- **Un sensor portátil** montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos servo-acelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento.
- **Un cable de control** que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. Generalmente, el cable está graduado para el control superficial. El cable tiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones; los cables eléctricos se encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene unas marcas para medir profundidades. Estas medidas están relacionadas hasta la mitad de la altura del torpedo. Superficialmente el cable, se maneja con una polea o un carrete para evitar el riesgo de que pueda torcerse al sostenerlo.
- **Un equipo de lectura** en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y en ocasiones, puede guardar y procesar los datos. El equipo de lectura es compacto y está sellado contra la humedad. La unidad también puede realizar chequeos y revalidar la información. En oficina, los datos del inclinómetro se descargan. Foto 7a.

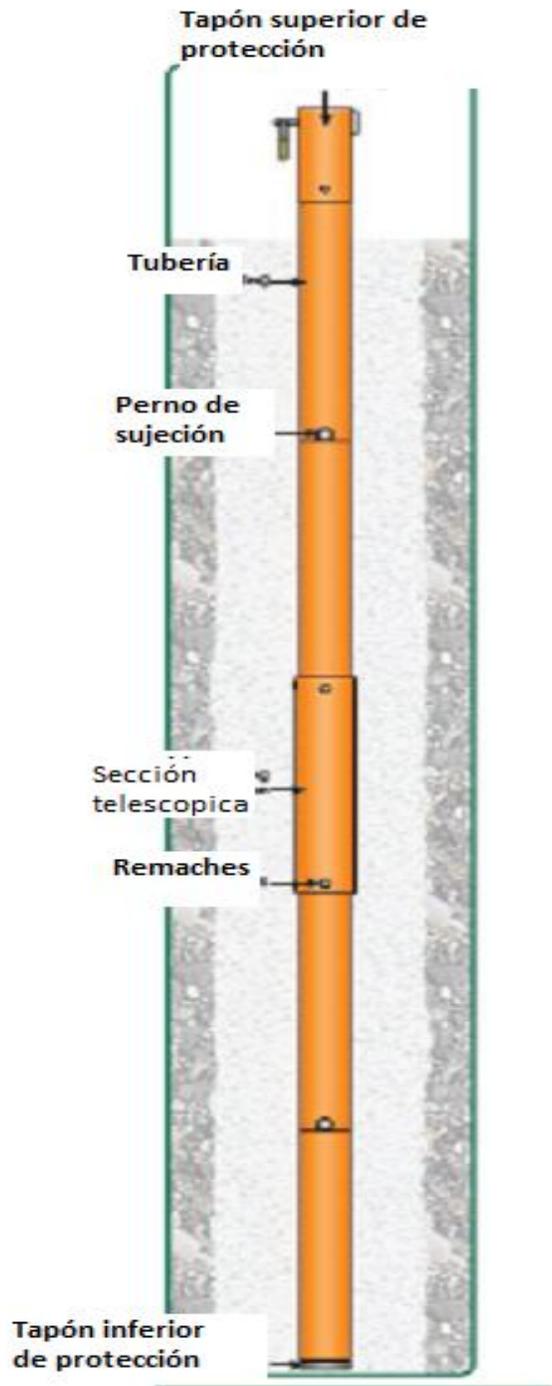


Figura 7. Tubería ABS para inclinómetro.

Anónimo.



Foto 7a. Equipo de medición y Accesorios, para Inclínómetros.

Componentes del sistema.

1. Estuche de protección.
2. Probeta inclinométrica digital (con tapa protectora).
3. Cargador de batería.
4. Brocal de 70 mm de diámetro para soporte de cable.
5. Brocal de 85 mm de diámetro para soporte de cable.
6. PC ultra resistente de campo (Palm).
7. Adaptador de corriente directa para coche para el cargador de la batería de la Palm.
8. Batería adicional.
9. Lubricante de silicón (Para usar en las conexiones).
10. Cable USB para la Palm.
11. Adaptador de corriente alterna para el cargador de baterías.
12. Adaptador de corriente alterna para la Palm.
13. Carrete de alambre con sistema de comunicación inalámbrico, y tapa protectora.
14. Maleta del carrete.

RST Instruments LTD. July 11, 2008. *Digital Inclinometer system Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada.
RST Instruments LTD.

Diámetro de la tubería.

La precisión se puede maximizar con el uso de tubería de diámetro amplio. Para un espesor dado de la rueda y ancho de la ranura, el juego de rotación disminuye a medida que aumenta el diámetro de la tubería, y por lo tanto la rotación de error de azimut disminuye también.

Espiral de la tubería.

Cuando la tubería se instala en perforaciones, la orientación de sus ranuras en profundidad no es necesariamente la misma que en la superficie. La extrusión de una tubería de aluminio puede causar una espiral grande como un 1 grado por 3 m de longitud; desviaciones similares se han observado en tubería de plástico extruido. La exposición de la tubería de plástico a la luz solar antes de la instalación a menudo causa en ella una espiral inicial; por lo que se debe almacenar en la sombra, apoyada adecuadamente para evitar flexión.

La espiral de cada tramo puede ser medida antes de la instalación. Por ejemplo, la tubería puede configurarse en cinco tramos sobre un banco con una plomada en cada extremo. La espiral puede ser estimada en más o menos 1 grado estableciendo un elemento paralelo a la plomada, asegurándose que la tubería no queda retorcida por el acoplamiento de los tramos y observar hacia el extremo opuesto. Algunos fabricantes tienen métodos alternativos para medir la espiral: por ejemplo, la compañía Slope Indicator tiene un método que utiliza un inclinómetro biaxial estándar dentro de la tubería con una alineación casi horizontal. Si es posible, que se puedan seleccionar los tramos de tubería de tal manera que las espirales sucesivas se anulen mutuamente. Si las ranuras guía quedan desalineadas entre los tramos de tubería, se debe corregir la alineación gradualmente, evitando forzarla.

Cuando el inclinómetro es instalado en una preparación (hueco) previa, la orientación de las ranuras guía es mucho más fácil de controlar.

Cuando se hayan presentado problemas para la instalación de la tubería, es recomendable verificar la espiral, ó cuando la profundidad de instalación es superior a 60 m, particularmente cuando es necesario conocer exactamente la dirección de los desplazamientos.

Repetición de lecturas en la misma posición.

La falta de cuidado y tomar lecturas dobles en una misma posición marcadamente reducirán la precisión. El cable no se debe estirar ni torcer, y debe estar graduado permanentemente y con precisión.

John D. Op. Cit., p. 250-268

Intervalo de profundidad entre la posición de lectura.

Una máxima precisión se logra usando el mismo intervalo que el espacio entre ruedas de la probeta del inclinómetro (torpedo). Si el intervalo es mayor que la distancia entre ejes de la probeta y las deformaciones del exterior no están compuestas de curvas suaves o líneas rectas entre los puntos de medición, pueden surgir errores significativos.

Efectos por temperatura.

Si el transductor del acelerómetro es sensible a la temperatura, se puede observar un cambio en la lectura cuando en la tubería del inclinómetro existe agua. Los transductores de potenciómetro, cuerda vibrante y acelerómetros de fuerza balanceada no exhiben efectos mayores. De cualquier forma, en todos los casos es conveniente que una vez que se desciende la sonda en la primera posición, esta se deje 10 minutos para que se estabilice por temperatura, antes de comenzar a tomar lecturas. La mayoría de las unidades de lectura (probeta o sonda) presentan algunas variaciones por temperatura, y para lograr una máxima precisión no se recomienda que se usen en climas extremos. Los errores causados por los cambios de temperatura se incrementan al ir subiendo la sonda.

Manejo de la probeta.

Golpear la sonda puede causar un desplazamiento del punto cero del transductor.

Selección de la tubería para el inclinómetro.

El tipo de la tubería y los coples, junto con el procedimiento de instalación, deben ser seleccionados para asegurar que se ajustan a los movimientos del suelo o roca. La selección de la combinación de tubería y coples depende de la respuesta a las siguientes cuestiones:

1. **¿La tubería estará sujeta a compresión o tensión axial?** Si se espera compresión o tensión aproximada del 1%, se deben usar coples telescopiables. Si adicionalmente se requiere medir asentamientos con el uso de una sonda extensométrica, se deberá adquirir el equipo apropiado y tubería para tal fin.
2. **¿Cuál es la deformación esperada?** Los usuarios algunas veces expresan preocupados que la tubería para el inclinómetro es demasiado rígida para el seguimiento de los desplazamientos en suelos blandos.

Sin embargo algunas evidencias sugieren que la tubería logra moverse en conjunto con el suelo. Por otra parte cuando se instala en suelos blandos, y se presentan deformaciones a distintas profundidades con zonas de cortante es probable que se generen discrepancias en las lecturas, y que las deformaciones en las zonas de cortante sean graduales en comparación con las deformaciones reales. Las deformaciones de corte a distintas profundidades pueden causar tensión en la tubería, y una tensión excesiva puede evitar el paso de la probeta. Si se predicen deformaciones considerables en distintas zonas de cortante, es conveniente usar un diámetro amplio de la tubería y una probeta de diámetro pequeño.

3. **¿Se requiere una máxima precisión?** La precisión se puede maximizar usando tubería de diámetro amplio par el inclinómetro.
4. **¿Cuáles serán las condiciones climáticas durante la instalación?** Cuando la tubería de plástico es expuesta a los rayos solares, la espiral de las ranuras guía se puede incrementar y los tramos de tubería se pueden deformar. El usar tubería de plástico en clima cálido implica que éstas se almacenen bajo la sombra. No se puede usar pegamento solvente para la tubería de plástico en condiciones de clima cálido.
5. **¿Existen limitantes para la aceptación del diámetro de la tubería?** Por ejemplo, el costo de la perforación comúnmente se incrementa con diámetros mayores, o cuando la instalación es en concreto, el aspecto estructural puede condicionar el diámetro de la tubería. Si el diámetro está limitado, no se deben usar coples, ya que estos sobresaldrían más allá del límite.
6. **¿Se requiere para un periodo de vida amplio?** Algunos factores también importantes son la alcalinidad del agua o lechada libre en los materiales empleados durante la instalación, o si existe la posibilidad de un pH mayor a 10, se recomienda el uso de la tubería de plástico. Cuando se usa tubería de aluminio en condiciones con alcalinidad, se deben proteger sus diámetros interior y exterior, lo cual incrementa el costo.
7. **¿Cuál es la profundidad de instalación?** Algunas veces los usuarios prefieren tubería de aluminio para grandes profundidades, ya que temen que la tubería de plástico se dañe por la presión del relleno de confinamiento o por esfuerzo axial. Esta preocupación se puede superar usando procedimientos de instalación adecuados.
8. **¿Qué tipo de relleno para el espacio anular se implementara?** Los coples de plástico son más fácil de sellar contra la intrusión del relleno en comparación del de aluminio, fibra de vidrio o coples de acero. Si se usa un relleno de lechada, se espera un buen sello imperativo.

9. Si se usa un sello granular en la instalación de un clinómetro en perforación, se debe lavar con agua a presión el exterior de la tubería. De lo contrario el relleno puede cerrar por encima del acoplamiento.

3.4 Instrumentación Geotécnica en el interior del túnel.

Transductores de cuerda vibrante.

Los transductores de cuerda vibrante son usados en sensores para piezómetros, celdas de presión de tierras, medidores de nivel líquido para asentamientos, en numerosos medidores de deformación, en celdas de carga, y medidores instalados directamente en superficie y embebidos.

Principio de operación.

Un alambre de acero es sujeto en sus extremos y tensionado hasta que es libre de vibrar en su frecuencia natural. Al igual que la cuerda de un piano, la frecuencia de vibración varía con la tensión del alambre, y por lo tanto con pequeños movimientos relativos entre los dos extremos sujetos. Así el cable puede usarse como medidor de deformación tensándolo en sus extremos, midiendo su frecuencia natural y los cambios relativos de frecuencia en tensión.

El cable es tensado magnéticamente por una bobina eléctrica unida en su punto medio, y con ésta misma o con una segunda bobina se mide la frecuencia de vibración. En la figura 8 se muestra un transductor de cuerda vibrante dispuesto para medir en superficie.

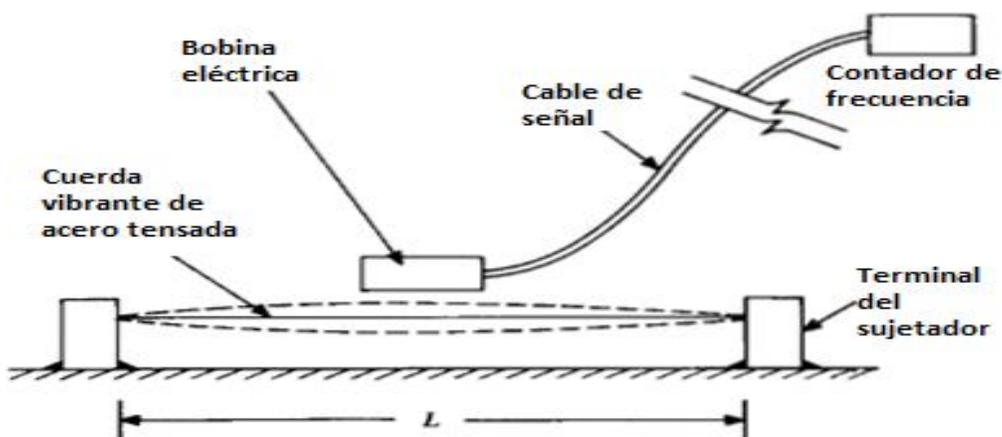


Figura 8. Esquema de medidor de cuerda vibrante.

Métodos de lectura.

Existen dos métodos de tensar el cable y tomar la lectura: método de tensión y lectura, y el método de excitación continua (o autoresonante). Este último permite la lectura de medidores dinámicos de baja frecuencia.

El método de tensar y leer implica la aplicación de uno o más impulsos de tensión a la bobina, creando de ese modo una atracción magnética que hace que el alambre vibre. La bobina funciona como dispositivo receptor captando el voltaje alterno por la vibración en el alambre causada por la tensión, de frecuencia idéntica a la frecuencia natural de la cuerda vibrante.

La señal de voltaje es transmitida a través del cable de señal a un contador (registrador) de frecuencia, el cual es usado para medir el tiempo para un número predeterminado de ciclos de vibración.

El método de excitación continua o autorresonancia implica un procedimiento similar para el inicio de la vibración, pero una segunda bobina es usada para detectar la frecuencia. La señal es alimentada hacia la bobina de conducción de tal forma que se le aplican pulsos continuos de voltaje idénticos a la frecuencia natural del alambre de cuerda vibrante. Así como cambie la frecuencia del alambre, así se conducirá la frecuencia. La frecuencia del alambre puede determinarse, como se explicó anteriormente, con la medición del tiempo para un determinado número de ciclos de vibraciones. Alternativamente, el voltaje pulsante se puede convertir directamente y continuamente, por una frecuencia de convertidor de tensión, en una tensión que es proporcional a la frecuencia de pulso y se puede mostrar en un voltímetro digital o grabador en cinta magnética o un registrador de banda. De esta manera, el transductor puede ser utilizado para la medición de deformaciones dinámicas, siempre que la frecuencia del ciclo sea menor a 100 hertz. También se puede utilizar para el control y sistemas de alarma. De cualquier forma, cuando se usa el método de excitación continua, las lecturas pueden llegar a ser inestables bajo la influencia de frecuencias de radio o interferencia magnética.

Para ambos métodos, la frecuencia se puede presentar directamente en un contador de frecuencia, que requiere del uso de una curva de calibración o tabla para el cálculo de la deformación a partir de los cambios de frecuencia, o la unidad de lectura puede incluir un circuito de linealización, tal que la deformación se muestre directamente.

Principal ventaja de las señales de frecuencia.

La señal de salida contiene la información requerida en forma de una frecuencia en lugar de la magnitud de un voltaje o resistencia, y por lo tanto los efectos indeseables que implican la resistencia del cable de señal, la resistencia de contacto, fuga a tierra, o la longitud del cable de señal son insignificantes. Se aceptan longitudes grandes de cable. La estabilidad de la señal de frecuencia puede demostrarse apropiadamente mediante la inserción de conductores en agua, sin aislar y observando que no existen cambios en la frecuencia medida: de ahí la razón de preferir señal de frecuencia más que señal de resistencia o voltaje para mediciones en campo.

Fuentes de error.

Históricamente, la mayor desventaja de los transductores de cuerda vibrante ha sido la corrosión del alambre, flujo del alambre de cuerda vibrante bajo tensión continua, desprendimiento de los puntos de sujeción, todos los cuales resultan en una reducción en la frecuencia de vibración.

La corrosión puede minimizarse con la selección de los materiales que no estén sujetos a la corrosión galvánica¹, y mediante el secado y sellando herméticamente la cavidad alrededor del alambre.

En el desgaste (flujo) de los alambres de cuerda vibrante bajo tensión permanente, o si ocurre desprendimiento en los puntos de sujeción, ocurre una reducción en la frecuencia que no se relaciona con la deformación, y ocurre un desvío en la lectura inicial. Aunque varios investigadores indican que el desvío en la lectura inicial es mínimo. El hecho de que varias versiones recientes de piezómetros ofrecen una función de verificación en campo y en cualquier momento de la desviación de la lectura inicial (cero) parece apoyar la tesis de que el potencial de la desviación de la lectura inicial (cero) no debe ser ignorado. La desviación de lectura inicial (cero) se puede minimizar aliviando el estrés del alambre de cuerda vibrante, las abrazaderas, y el cuerpo del transductores después de que han sido ensamblados, ya sea mediante el uso de temperatura alta o por ciclos de carga, y la mayoría de los fabricantes insisten en que esto es esencial para la estabilidad a largo plazo.

Ibid.

¹ *Corrosión galvánica.* La corrosión galvánica es un proceso que degrada los metales electroquímicamente. Esta corrosión ocurre cuando dos metales diferentes se ponen en contacto entre sí en presencia de un electrólito, tal como el agua salada, formando una pila galvánica. También puede formarse una celda si el mismo metal se expone a dos concentraciones diferentes de electrólito. El potencial electroquímico resultante desarrolla entonces una corriente eléctrica que disuelve electrolíticamente el material menos noble.

Por otra parte, algunos usuarios reportan excelentes resultados aun cuando esta precaución no fue tomada.

No se debe debilitar el alambre durante la fijación, y para ello se recomienda el uso de cinchos de plástico, que parecen ser el método preferido.

3.4.1 Deformímetros para el concreto.

El modelo Geokon VCE-4200 es diseñado para la medición a largo plazo de las deformaciones en la masa de concreto, en estructuras tales como cimentaciones, pilas, puentes, presas, contenedores, revestimientos de túneles, etc. Figura 9.

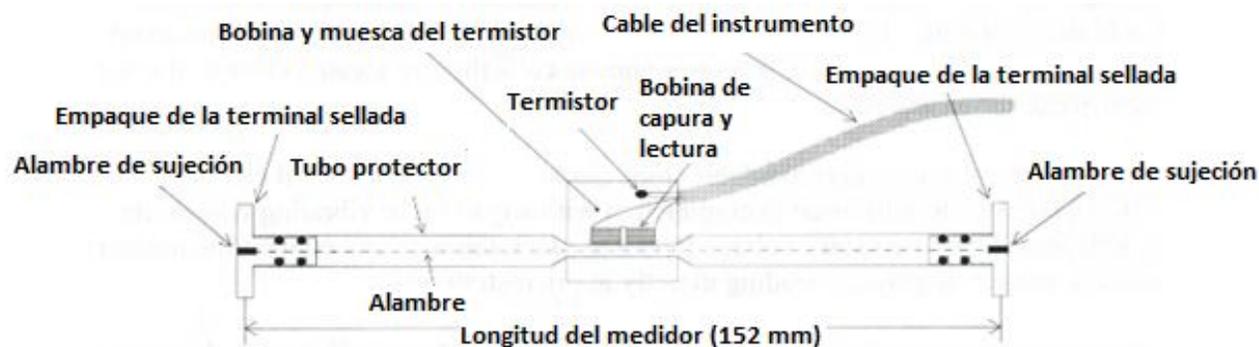


Figura 9. Medidor de cuerda vibrante para concreto.

Las principales formas de colocación de deformímetros embebidos en el concreto es fijándolos paralelos a una varilla de refuerzo o sujetándolos mediante alambres tensionados. Una vez posicionados quedan embebidos en el concreto durante el colado de la estructura.

Las deformaciones son medidas usando un principio de cuerda vibrante: La longitud del alambre de acero es tensionada entre dos terminales que están firmemente en contacto con la masa de concreto. Las deformaciones en el concreto serán causadas por el movimiento relativo entre las terminales.

Geokon. (1986-2010). *Instruction Manual. Models 4200/ 4202/ 4204/ 4210, Vibrating Wire strain Gages*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.

RST Instruments LTD. April 13, 2004. *Vibrating Wire strain gage Model VWSG-S, Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada. RST Instruments LTD.

El cambio en la tensión es medida como un cambio en la frecuencia de resonancia de la vibración del alambre mediante bobinas electromagnéticas que están localizadas cerca del alambre para lograr la excitación y la lectura de salida del medidor de frecuencia.

Sugerencia: *Se debe verificar antes de la adquisición del instrumento que sea o no adecuado para medir cambios dinámicos ó rápidos de deformación.*

Colocación del deformímetro en concreto.

Este tipo de medidores normalmente son colocados en la estructura de concreto en una de las dos siguientes formas: sujetando las unidades (deformímetros) directamente a la estructura o mediante la sujeción en estructuras formadas especialmente para su instalación, ambas antes del colado de las estructuras.

Cuando los deformímetros son instalados directamente en la estructura se debe tener cuidado de no aplicarles fuerzas grandes en las terminales durante la instalación. Estos pueden fijarse con alambre recocado directamente en algún elemento de refuerzo de la estructura, como una varilla o tubo, según sea el caso (figura 10 y foto 8a). Los alambres no deben quedar tan apretados, solo se deben fijar de tal manera que el instrumento no se mueva durante el colado. Adicionalmente se debe verificar que durante el colado el instrumento no se vea afectado por el vibrador para el concreto.

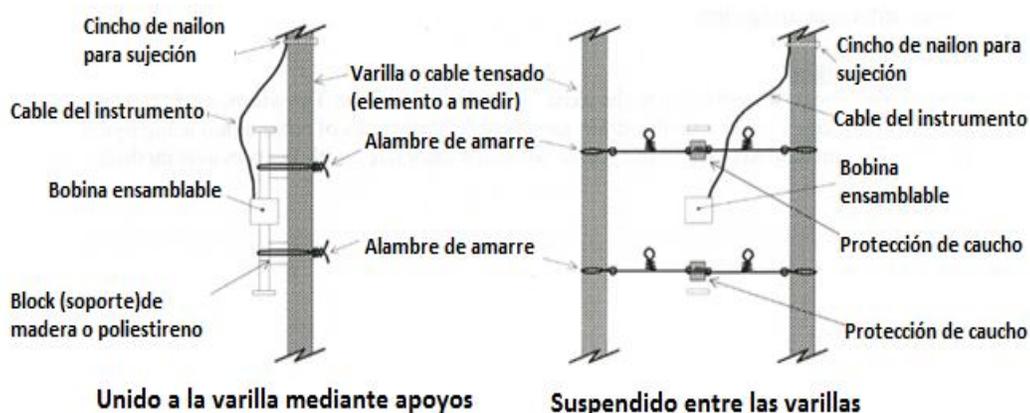


Figura 10. Sujeción de deformímetro a las barras de refuerzo.

Ibid.



Foto 8a. Colocación de deformímetros para monitoreo del concreto en dovela de revestimiento primario en TEO.

Método alternativo de sujeción.

Atar dos tramos cortos de varilla al refuerzo existente usando ataduras de nailon, como se muestra en la figura 11. Este método evita los problemas de resonancia asociados con el método previo.

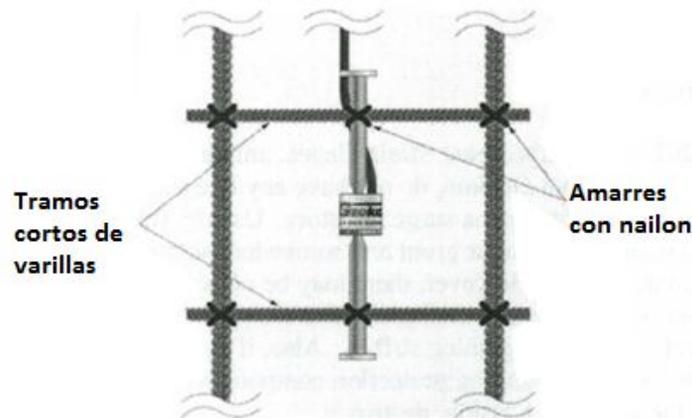


Figura 11. Método alternativo para la sujeción de deformímetros en las barras (varillas).

Protección del cable y del terminado.

El cable del medidor puede protegerse usando conducto flexible, el cual puede suministrar el mismo proveedor.

Ibid.

También están disponibles las cajas de terminales con entradas de cables selladas y cubiertas, permitiendo el almacenaje de varios cables que terminen en un mismo lugar, permitiendo una protección completa de los cables conductores.

3.4.2 Deformímetros para el acero.

Estos deformímetros de cuerda vibrante modelo VK4150 Geokon (figura 12), son diseñados para medir las deformaciones en el acero estructural de miembros tales como puentes, pilas, revestimientos de túneles, edificios, etc. Consisten de un medidor de cuerda vibrante y una bobina ensamblada.

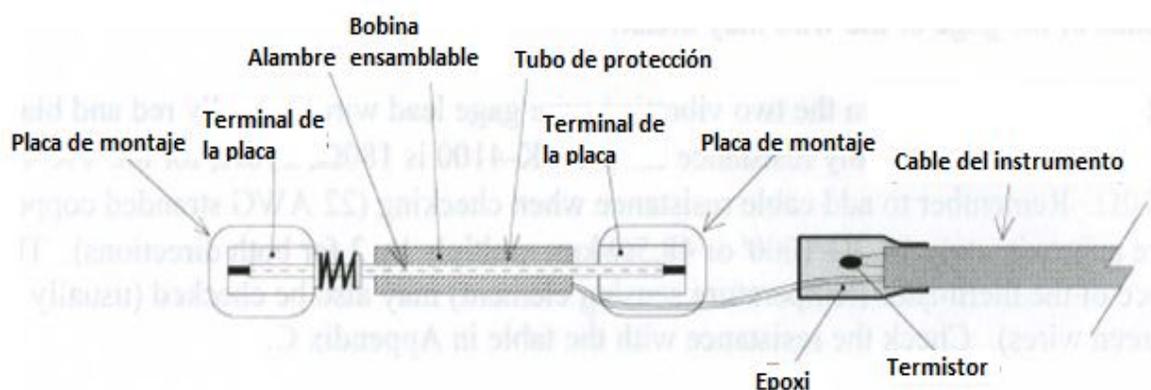


Figura 12. Medidor de cuerda vibrante para el acero.

Colocación del deformímetro en acero

La principal forma de unión es mediante soldadura por puntos (foto 9a), pero también puede ser unido con epóxicos.

Las deformaciones son medidas usando el mismo principio que los deformímetros para concreto; con la diferencia que estos en su instalación van soldados en la superficie del acero que está siendo estudiado.

Ibid.



Foto 9a. Colocación de deformímetro para monitoreo del acero en dovela de revestimiento primario en TEO.

Instalación del deformímetro.

El deformímetro comúnmente es entregado totalmente sellado. Contiene integrada una bobina. Una lectura preliminar se toma con la intención de checar que el instrumento se encuentre dentro del rango especificado. El deformímetro es suministrado con tensión del alambre en un rango medio de medición (i.e 2500 μ strain, ± 200) el cual da un rango aproximado de 1250 microstrain tanto en tensión como en compresión, adecuado para más aplicaciones. Si se requiere leer deformaciones mayores en tensión entonces se configura o ajusta el rango entre 1500 a 2000 microstrain, si se requiere medir deformaciones amplias en compresión se debe configurar la lectura inicial en un rango de 2500 a 3000 microstrains.

Se debe verificar la resistencia entre los dos alambres de cuerda vibrante.

Preparación de la superficie.

La superficie del elemento estructural debe estar plana y limpia, sin oxido, ni rugosidad. También debe estar libre de grasa.

Punto de soldadura de la tira reactiva.

Antes de soldar el deformímetro es necesario verificar que la soldadura y el equipo de soldar funcionan bien y que la energía de soldar es la correcta.

Ibid.

La energía de soldadura, y la extensión para una presión de contacto adecuada, determinan la calidad de la soldadura.

Protección

Se deberán tomar las debidas precauciones para proteger el instrumento de diferentes factores como la corrosión (sea o no de acero inoxidable), de los rayos solares, de la influencia de otros aparatos eléctricos, etc. El proveedor puede especificar algunos otros.

3.4.3 Celda de Presión.

Los medidores de presión total caen en dos categorías básicas: mediciones dentro de la masa de suelo y mediciones en la cara de elementos estructurales.

Los instrumentos son conocidos como celdas de presión de tierras, celdas de esfuerzo del suelo, y celdas de presión del suelo.

Muchas celdas son diseñadas para mediciones estáticas o variaciones lentas del esfuerzo. Cuando las celdas se requieren para sismo o estudios de cargas dinámicas a gran escala, estas deben ser diseñadas para tener una respuesta suficientemente rápida.

Tipos de celdas de presión de tierras embebidas.

Son dos los tipos básicos de celdas de presión de tierras: Celdas de diafragma y celdas hidráulicas (figura 13). El tipo de celdas de presión descritas aquí son las celdas del tipo hidráulico (Foto 10a), que consisten en dos platos circulares de acero soldados uno al otro en su periferia y están separados por un pequeño vacío relleno con fluido hidráulico. La presión del suelo actúa apretando los dos platos juntos generando así la presión en el fluido interno.

Ibid.



Foto 10a. Colocación de celda de presión en dovela de revestimiento primario en TEO.

Teoría de operación.

Las celdas de presión, algunas veces llamadas celdas de presión total o celdas de esfuerzo total son diseñadas para medir esfuerzos en el suelo o la presión del suelo sobre las estructuras. Las celdas no solo responden a presión del suelo sino también a las presiones de aguas subterráneas (freáticas) o a las presiones de poro, por eso el término presión o esfuerzo total. Una medida simultánea de la presión de poro (μ), con el uso de un piezómetro, es necesario para separar el esfuerzo efectivo (σ') del esfuerzo total (σ) definido como el esfuerzo principal de Terzaghi o esfuerzo efectivo donde;

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Ibid.

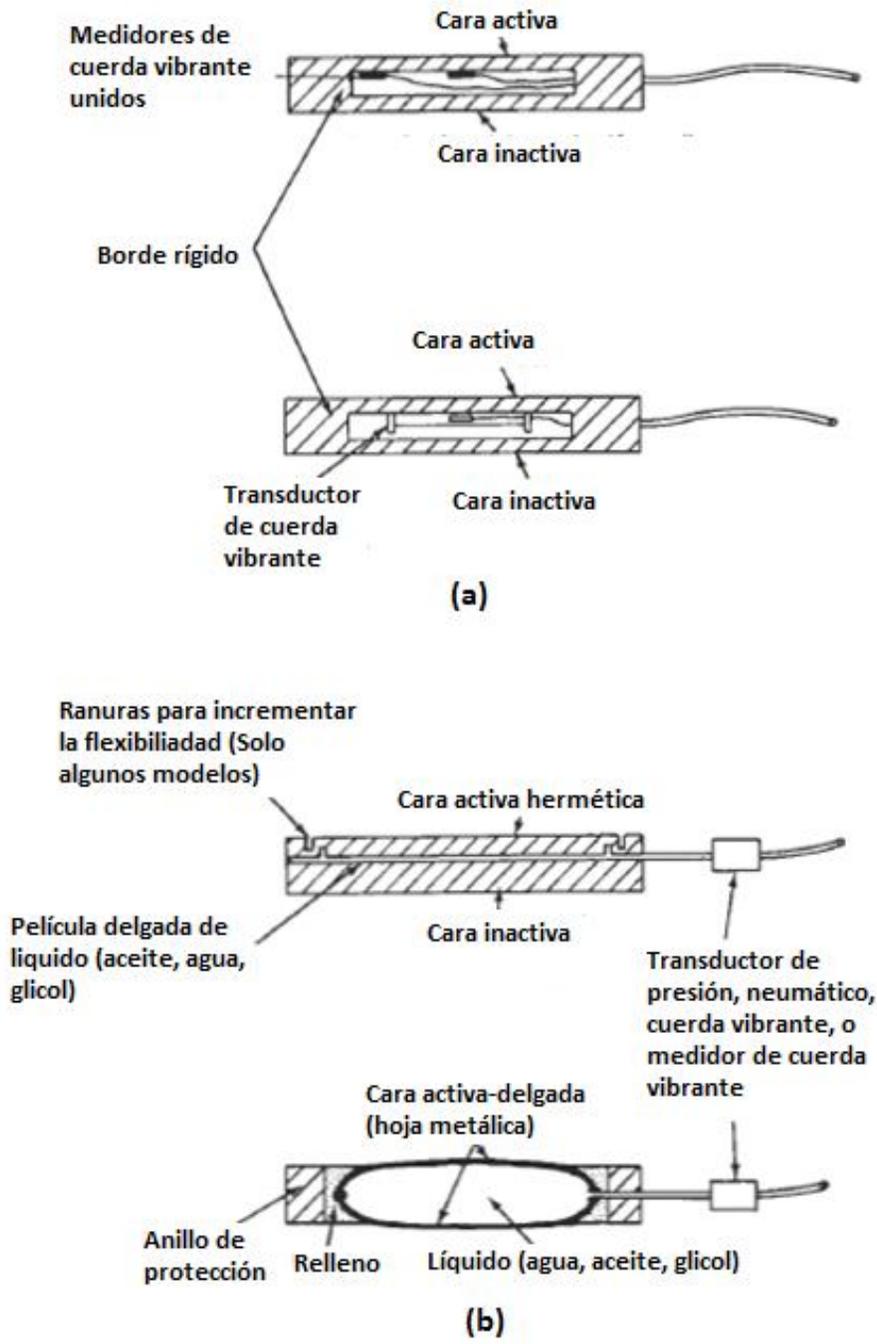


Figura 13. Tipos básicos de celdas de presión de tierras: (a) Celdas de diafragma y (b) Celdas hidráulicas.

ESPECIFICACIONES PARA LOS INSTRUMENTOS.

Los instrumentos deben cumplir con ciertos estándares de funcionalidad, además de que estos también proporcionan un criterio para la elección de instrumentos que mas convengan a determinado proyecto, dependiendo de sus especificaciones, como las que se describen a continuación:

Rango de medición, de frecuencia o de temperatura. Es el conjunto de valores comprendidos entre los límites (Superior e Inferior) que es capaz de medir el instrumento al que nos referimos, dentro de los límites de exactitud que se indican para el mismo. Se indica por los valores Superior e Inferior, antes mencionados.

Error. Se define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero.

El error tiene en general variadas causas. Las que se pueden de alguna manera prever, calcular, eliminar mediante calibraciones y compensaciones, se denominan determinísticos o sistemáticos. Los que no se pueden prever, pues dependen de causas desconocidas, se denominan aleatorios.

Exactitud. Es la capacidad de un instrumento de dar valores de error pequeños.

Si un instrumento está calibrado correctamente los errores aleatorios inevitables harán que los resultados de la medición tengan una cierta dispersión, si el promedio de las mediciones coincide con el valor verdadero el instrumento es exacto.

La estadística (media en este caso) nos podrá acercar al valor verdadero.

La exactitud se puede especificar en porcentaje del valor medido o bien en porcentaje del valor a fondo de escala del instrumento.

En el caso de los instrumentos destinados a procesos industriales en general esa exactitud especificada corresponde a todo el rango de medición del mismo.

Precisión. Cuanto mayor es la precisión menor es la dispersión de los valores de la medición alrededor del valor medido.

Podría suceder que ese valor no fuese exacto pero la dispersión ser chica, en ese caso el instrumento es preciso pero no exacto.

La precisión está asociada a estadísticas como la varianza y el desvío standard.

En la técnica se suele exigir que los valores de variables importantes para la calidad del producto se mantengan dentro de un campo dado por tres desvíos standard en más o en menos del valor especificado, y estos desvíos deben ser pequeños para tener buena precisión.

Repetibilidad. Capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en sucesivas ocasiones bajo exactamente las mismas condiciones.

Un detalle muy importante de esto es que se debe exigir que la medición se debe realizar con la variable en sentido creciente o decreciente pero no en ambos sentidos, pues en ese caso deja de ser Repetibilidad para ser HISTÉRESIS.

Como otros parámetros de especificación de los instrumentos se acostumbra a especificar la repetibilidad como un valor porcentual de la medición o bien del fondo de escala del instrumento.

Histéresis. El amortiguamiento mas el rozamientos hace que haya un consumo de energía en la carga y descarga de los instrumentos.

Es debido a eso que la curva de calibración ascendente no coincida con la descendente y eso es llamado Histéresis.

Baja Histéresis es la capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en ocasiones consecutivas bajo las mismas condiciones generales pero una vez con la medición de la variable en un sentido (por ejemplo creciente) y en la siguiente con la variable en sentido contrario (por ejemplo decreciente).

Como otros parámetros de especificación de los instrumentos se acostumbra a especificar la histéresis como un valor porcentual de la medición o bien del fondo de escala del instrumento.

Sensibilidad. Es la variación en la salida del instrumento por unidad de variación de la variable del proceso (entrada), en definitiva se puede decir que es la ganancia del instrumento.

El ideal es que la misma se mantenga constante. En general los elementos primarios presentan derivas de la sensibilidad con otras variables, fundamentalmente la temperatura, por lo que el acondicionamiento de señal que realiza el instrumento se debe encargar de compensar esas derivas.

Ibid.

En muchos instrumentos industriales se mide también la temperatura para realizar esta compensación.

Error de sensibilidad. Como venimos mencionando la temperatura en general produce una deriva o variación de la sensibilidad del elemento primario. En gran medida esta deriva es compensada por el sistema electrónico de acondicionamiento de señales del instrumento.

Los distintos primarios tienen una salida variable según la temperatura. En general esta característica se especifica mediante los denominados coeficientes de temperatura.

Error de cero (sesgo). Aun cuando el valor de la variable del proceso esté en el mínimo del rango, donde la salida del instrumento debe ser el valor asociado al cero del rango, el instrumento marca a su salida un valor distinto de cero.

Ese valor es el error de cero. En general existen en los instrumentos sistemas para anular, o compensar el error de cero, estos sistemas pueden ser ajustes mediante movimientos en el instrumento o bien por software.

Linealidad. En control clásico la linealidad se toma como un requisito puesto que toda la teoría se basa en ese tipo de dinámica de sistemas (ecuaciones diferenciales lineales).

Si bien esto ha sido superado, la falta de la linealidad siempre representa complicaciones por lo que: la linealidad de los instrumentos de medición y control siempre es una característica buscada.

Si el proceso es lento respecto de la dinámica del instrumento se puede pensar que el mismo se establece en el valor de la medición a una velocidad mucho mayor que los cambios que puede efectuar la variable medida.

En estas condiciones se puede considerar que el instrumento tiene una alinealidad estática es decir no se tiene en cuenta su dinámica.

Así se puede tener una curva de calibración levantada en condiciones estáticas y usarla para compensar las alinealidades del instrumento.

En la práctica las compensaciones del sistema de acondicionamiento de señales llega a eliminar en gran medida los errores por alinealidad, pero en una cierta persisten, y se suelen expresar en valor porcentual de la máxima desviación respecto de la salida lineal en todo el rango del instrumento respecto del valor del fondo de escala del mismo.

Ibid.

Respuesta dinámica. Los diagramas de la respuesta del instrumento a frecuencias de entrada variables recorriendo todo el espectro presentados en forma logarítmica (Diagramas de Bode) dan una idea acabada de la capacidad del instrumento a responder con una magnitud de salida razonable (ganancia constante) y sin un retraso de fase notable.

Tengamos en cuenta que el retraso de fase tiende a inestabilizar los lazos de control.

Al rango de frecuencias donde se cumplen las condiciones arriba mencionadas se lo denomina "Ancho de banda".

Evidentemente si las señales a medir son de frecuencias muy bajas no interesará la característica de la respuesta dinámica del instrumento.

En procesos donde las constantes de tiempo de las transferencias son grandes respecto de las de los instrumentos habituales no hace falta preocuparse por la respuesta dinámica de los mismos.

En control de servomecanismos, ciencia espacial, robótica etc. comienza a aparecer la importancia de estas características.

Estabilidad. La estabilidad de la exactitud calibrada se especifica como una garantía de funcionamiento, e influye en el precio, por ejemplo 1% OR por 5 años o 10 años.

Es interesante destacar a que se refiere el 1% del que se habla. En general se refiere a la exactitud a lo largo de todo el rango del instrumento (Accuracy) y se puede especificar como ya mencionamos respecto del valor medido (OR of reading) o bien del fondo de escala del instrumento (OFS of full scale).

Ibid.

4. MONITOREO, PROCESAMIENTO, PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y REPORTE DE LOS DATOS DE LA INSTRUMENTACIÓN.

Colecta de los datos de la instrumentación.

Durante la etapa de planeación se debe determinar al personal encargado de coleccionar los datos de la instrumentación. Es recomendable que el monitoreo se haga directamente por el propietario del proyecto o por el especialista que éste designe. El contratista puede ser responsable de brindar apoyo, como proporcionar los accesos a la ubicación de los instrumentos, y algunas ocasiones es responsable de realizar inspecciones visuales de los trabajos asociados con la instrumentación.

Rol de un sistema automatizado de adquisición de datos.

Hasta hace pocos años, casi todos los datos se adquirían manualmente: (el camino más largo). La llegada del sistema automatizado ha cambiado el estado de la práctica, para bien o para mal, y el usuario debe estar enterado de las ventajas y limitación. Los sistemas automatizados no reemplazan el juicio del ingeniero. En la tabla 2 se dan las ventajas y desventajas de un sistema automatizado de adquisición de datos.

Tabla 2. Ventajas y limitaciones de un sistema automatizado de adquisición de datos

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Reduce los costos de personal para toma de lecturas y análisis de datos.	<ul style="list-style-type: none">• Sustituye información observada por un elemento de hardware (existe la posibilidad de que las observaciones visuales de otros factores que influyen en los datos de medición no se hagan).
<ul style="list-style-type: none">• Mayor frecuencia de lecturas.	<ul style="list-style-type: none">• Existe la posibilidad de generar un exceso de información, y olvidar el objetivo primordial, y por lo tanto no tomar las medidas oportunas en respuesta a los datos.
<ul style="list-style-type: none">• Recupera información de lugares remotos e inaccesibles.	<ul style="list-style-type: none">• También existe la posibilidad de una aceptación ciega de los datos, que puede o no ser correcta
<ul style="list-style-type: none">• Transmisión instantánea de los datos, a largas distancias con el uso de telemetría.	<ul style="list-style-type: none">• Costo inicial alto y con frecuencia los costos de mantenimiento también los son.

<ul style="list-style-type: none"> Incrementa la sensibilidad y precisión de las lecturas. 	<ul style="list-style-type: none"> Actualmente, a menudo requiere algunos componentes bajo diseño, por lo que carecen de pruebas estadísticas.
<ul style="list-style-type: none"> Incrementa la flexibilidad en la selección de los datos requeridos. 	<ul style="list-style-type: none"> Complejidad, que requiere un período de depuración inicial.
<ul style="list-style-type: none"> Medición de fluctuaciones rápidas, pulsaciones y vibraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesita chequeos regulares por personal especializado.
<ul style="list-style-type: none"> Se minimizan los errores, además se pueden identificar inmediatamente. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesita un suministro eléctrico confiable y continuo.
<ul style="list-style-type: none"> El almacenamiento electrónico de datos está en un formato adecuado para su análisis directo por computadora, e impresión. 	<ul style="list-style-type: none"> Susceptibilidad a dañarse por las condiciones del clima y actividades de la construcción.

Procedimiento por escrito del monitoreo.

El procedimiento escrito a detalle debe estar basado en la información proporcionada en los manuales del fabricante, en las condiciones específicas del sitio y se deben incluir los elementos de la siguiente lista:

- Coordinación entre los involucrados para definir las necesidades y accesos, y otros trabajos relacionados.
- Procedimiento paso a paso para la configuración y activación del equipo.
- Procedimiento paso a paso para la toma de lecturas, con ilustraciones apropiadas, incluyendo una lista del equipo y herramientas requeridos durante el monitoreo y las precauciones pertinentes del personal y equipos. Es altamente recomendable realizar todas las lecturas de un proyecto particular con el mismo personal. Se debe evitar en la medida de lo posible el cambio o sustitución de las unidades de lectura, ya que las lecturas con frecuencia dependen de un transductor y una unidad de lectura en particular.
- Procedimientos especiales para tomar las lecturas iniciales.
- Guía de la frecuencia de monitoreo.
- Todas las instrucciones requeridas para la lectura de dos o más instrumentos al mismo tiempo, de modo que los datos pueden ser correlacionados sobre un tiempo común.
- Archivo de registro de datos.
- Ejemplo completo del archivo de registro de datos.
- Procedimiento para comparar la última lectura con la anterior, de manera que cualquier cambio significativo se pueda identificar inmediatamente.

John D. Op. Cit., p.367-374.

- Si la colección de datos se hace mediante un sistema automatizado, se debe programar en el sistema un paso de comparación. Cuando se usa la colección manual de los datos y para ello una hoja de registro, se deben llevar a campo los datos de la lectura anterior para comparar con los nuevos.
- Procedimiento para alertar a los ingenieros expertos en geotecnia cuando existan cambios en la magnitud de los datos que excedan los valores predeterminados, a la vez que se avisara al propietario del proyecto, el consultor o al constructor de cualquier situación que requiera atención.
- Procedimiento para registrar todos los factores que pudieran tener influencia en los datos medidos, incluyendo los avances y detalles de construcción, geología y otras condiciones del suelo, y factores ambientales, como la temperatura, lluvia, nieve, sol, y sombra.
- Procedimiento para realizar las inspecciones visuales del comportamiento de obra y correlacionarlo con los datos de instrumentación.
- Procedimiento para inspeccionar daños, daños potenciales, y deterioros o mal funcionamiento de los instrumentos, y para iniciar acciones preventivas o para reparar o reemplazar instrumentos.
- Procedimiento para calibrar y dar mantenimiento a las unidades de lectura, terminales de campo y componentes embebidos, durante su vida de servicio.
- Procedimiento para la comunicación entre el personal responsable de la colección de datos, presentación e interpretación.

PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE INSTRUMENTACIÓN.

El principal objetivo del procesamiento y presentación es hacer una valoración rápida de los datos con la intención de detectar cambios que ameriten acciones inmediatas.

El segundo objetivo es resumir y presentar la información conforme a sus tendencias y comparar los datos adquiridos en el monitoreo con el comportamiento predicho, de manera que se inicien las acciones necesarias, si fuera el caso.

Durante la etapa de planeación, antes del inicio de los trabajos de instalación, se debe determinar al responsable del procesamiento y presentación de los datos de la instrumentación, que de preferencia deberá ser bajo el control directo del propietario o por el especialista que éste designe.

Ibid.

Las cualidades con las que se requiere el personal con frecuencia son subestimadas, esto resulta en un procesamiento inadecuado de la información y en fallas en la toma de acciones. El tiempo requerido para el procesamiento y presentación de datos es similar al tiempo de monitoreo, e incluso puede sobrepasarlo.

Competencias profesionales del personal.

El procesamiento y la presentación deben ser bajo la supervisión de un ingeniero geotecnista con la experiencia suficiente, del cual se recomienda también sea el encargado del monitoreo. El ingeniero encargado de procesar la información podrá ser asistido por otros ingenieros o técnicos, pero solamente por aquellos con habilidades en geotecnia y en computo. El procesamiento y la presentación requieren un juicio significativo y no deben delegarse a personal inexperto.

Rol del procesamiento y presentación automatizados de datos.

La ventaja del procesamiento e impresión automatizados ha hecho un enorme incremento en la eficiencia del procesamiento y presentación de datos. A pesar de sus ventajas obvias también tiene sus limitaciones. El sistema automatizado no reemplaza el juicio del ingeniero.

Ventajas del procesamiento y presentación de datos automatizados.

- Las computadoras con programas actualmente disponibles proporcionan un procesamiento rápido y preciso de las lecturas.
- Una vez que los datos son almacenados en un formato que sea legible por la computadora, es una tarea relativamente sencilla para reprocesar lotes de datos en caso de cambios en los valores del monitoreo o de cálculo que se requieran.
- Las computadoras pueden ser usadas para generar tablas- resumen o de resultados para su uso directo en los reportes. Así, se evitan excesos en el costo y tiempo procesando y corrigiendo las tablas de datos a mano.
- Con la computadora se pueden generar representaciones graficas de curvas u otras formas automáticamente. Se requiere de un mínimo esfuerzo, por ejemplo para cambiar la escala o para volver a imprimir un reporte. Esto con frecuencia es necesario para el reporte de los datos obtenidos en proyectos de instrumentación, en particular cuando se extienden por periodos largos.

- Las computadoras o procesadores se pueden usar para escalar la señal o para realizar cálculos sobre los datos de entrada en tiempo real si el acceso inmediato a ellos es un requisito.

Desventajas del procesamiento y presentación de datos automatizados.

- “Sustitución” del conocimiento de un ingeniero por un elemento de hardware. Existe la posibilidad que los criterios de ingeniería pasen a segundo término, y que no se hagan las correlaciones con las observaciones visuales y con los factores que influyen en los datos medidos.
- Los programas de cómputo deben ser probados a fondo antes de ser aceptados. Siempre que sea posible, se deben integrar auto-revisiones en los programas informáticos.

Procesamiento por escrito del procesamiento y presentación de datos.

El ingeniero geotecnista responsable del procesamiento de datos y la presentación debe finalizar el proyecto de procedimiento dejándolo por escrito durante la fase de planificación. El procedimiento detallado por escrito debe basarse en la información de los manuales del fabricante y en las condiciones específicas del sitio y debe incluir lo siguiente:

- Lista de información que debe proporcionar el personal encargado del monitoreo, incluyendo lecturas iniciales, registro de datos de campo, información de lecturas corregidas, información acerca de los factores que pudieran influir las lecturas, y observaciones visuales del comportamiento de la obra.
- Calibración de fábrica, resultados de las pruebas de aceptación, procedimiento de actualización de los datos de calibración de acuerdo con la calibración realizada durante la vida de servicio.
- El uso de un procedimiento automatizado de datos.
- Procedimiento para la proyección de datos.
- Hojas de cálculo.
- Procedimiento de cálculo paso a paso.
- Ejemplo de cálculos.
- Métodos de impresión de datos.

Ibid.

- Procedimiento utilizado para informar al propietario, el consultor de diseño, o el contratista de la construcción de cualquier situación que requiera atención.
- Procedimiento para la comunicación con el personal responsable de la interpretación de los datos.

Ibid.

5. CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS.

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS.

La calibración consiste en la aplicación de presiones conocidas, cargas, desplazamientos, o temperaturas para un instrumento, bajo condiciones ambientales controladas, y la medición de su respuesta.

Las calibraciones de instrumentos por lo general se requieren en cualquiera de las siguientes tres etapas: antes del envío de los instrumentos a el usuario (calibración de fábrica), cuando los instrumentos son recibidos por el usuario (pruebas de Aceptación), y durante la vida de servicio (en fabrica o taller especializado).

Calibración en fábrica.

Los instrumentos deben ser calibrados en la fábrica antes de ser enviados al usuario. La experiencia indica que las calibraciones de fábrica con frecuencia son mínimas y tal vez incompletas e insuficientes. La responsabilidad de esta falta en ocasiones no es con el fabricante sino de los usuarios, quienes optan por las ofertas.

El usuario debería optar por participar en las calibraciones de fábrica. Esto se recomienda ampliamente cuando se adquieren instrumentos de innovación, cuando los requerimientos de calibración difieren de los procedimientos estándar del fabricante, o cuando los usuarios tienen incredulidad.

Pruebas de aceptación.

Los instrumentos reciben el ajetreo del transporte durante su traslado de fábrica a la entrega con el usuario, por lo que se debe verificar su correcto funcionamiento antes de ser instalados. Dichos controles se llaman "Pruebas de aceptación".

El manual de instrucciones debe incluir un procedimiento paso a paso de la prueba de aceptación. Cuando sea posible, las pruebas de aceptación deben incluir un historial de la calibración hecha en fábrica, para checar dos o tres tomas, que estén dentro del rango, con transductores y unidad de lectura, para varias temperaturas, anticipando las condiciones de campo durante su vida de servicio.

Las pruebas con temperaturas extremas son importantes y pueden revelar malos funcionamientos.

Cuando no es posible realizar pruebas exhaustivas (detalladas) de aceptación, se deben realizar pruebas simples para verificar que el instrumento trabaja correctamente. Estas son conocidas como pruebas de funcionamiento. El transductor debe ser conectado a la unidad de lectura y se pueden inducir los siguientes efectos al instrumento o transductor: inclinarlo, presionarlo, empujarlo, apretarlo para inducirle cambios de magnitud, verificando que sean coherentes con la calibración suministrada. Debiendo checar varias veces cada conector eléctrico y el cable de cada conector debe ser doblado inmediatamente con cuidado para revelar cualquier mal funcionamiento. Las lecturas deben ser parecidas a las que proporciona el fabricante. Todos los transductores eléctricos destinados a ser enterrados se deben sumergir en agua durante un periodo largo para comprobar su impermeabilización. Los piezómetros deben checarsse en agua a una profundidad conocida; y de los inclinómetros se puede checar su funcionamiento en laboratorio usando una sección de tubería de inclinómetro colocándola en una inclinación constante conocida.

Cualquier instrumento que falle en las pruebas de funcionamiento o presente desperfectos se debe regresar al proveedor para su sustitución o reparo, con una descripción de las características de la (s) falla (s). Adicionalmente a la verificación de la calibración y detección de instrumentos dañados, estas pruebas y verificaciones proporcionan una oportunidad para que el usuario aprenda cómo opera el instrumento correctamente.

Se debe tomar en cuenta que el seguro de tránsito a menudo requiere un aviso de avería en un plazo relativamente corto después de la entrega, las pruebas de aceptación y las comprobaciones de funcionamiento deben hacerse antes de que dicho seguro expire. El solicitar los instrumentos con el tiempo suficiente de anticipación permite realizar las pruebas adecuadas y a su vez permite realizar cualquier reparación necesaria o reemplazo de los instrumentos defectuosos.

Calibración durante su vida de servicio.

La calibración o verificación de las unidades de lectura es necesaria durante su vida de servicio. Para los componentes que quedaran embebidos se requiere que tengan características tales que permitan realizar las calibraciones o verificaciones de funcionamiento.

Ibid.

Estas calibraciones usualmente se realizan por personal responsable del monitoreo y deben ser supervisadas directamente por el propietario o el especialista que éste designe.

Ciertos instrumentos como los inclinómetros pueden ser verificados en alguna empresa que se dedique a calibrar instrumentos, pero deben darse al fabricante si se requiere de una calibración, un ajuste o reparación completos.

Cuando las unidades de lectura se instalan en una caseta o estación automatizada también requieren ser verificadas o calibradas. La calibración se puede realizar en la caseta con un equipo adecuado o enviando cada unidad de lectura al laboratorio. Es recomendable que se coloque una etiqueta de goma en cada instrumento o equipo de medición debiendo indicar la fecha de la última calibración y la próxima.

Cuando los instrumentos son usados para monitoreo a largo plazo, los procedimientos para calibrarlos durante su vida de servicio se deben incluir en el manual de operación y mantenimiento.

Mantenimiento de los instrumentos.

Se requiere de un mantenimiento regular durante la vida de servicio y usualmente es realizado por el personal encargado de la toma de lecturas y debe ser bajo control directo del propietario o por el especialista designado por éste. El personal responsable de la colección de datos debe siempre estar atento de posibles daños, deterioros o malfuncionamiento, y si es posible se pueden iniciar las reparaciones necesarias. Los requisitos detallados de mantenimiento varían para cada instrumento y deberán ser especificados en el manual de instrucciones del fabricante. El manual debe incluir una guía de solución de problemas, limpieza, secado, lubricación, instrucción de desmontaje, y la frecuencia de mantenimiento recomendada. Si se requieren pilas o baterías, el manual debe contener las instrucciones de mantenimiento y recarga. Además se deben solicitar piezas de repuesto fáciles de remplazar, el fabricante también debe instruir al cliente en este tema. También es aconsejable contar con una unidad de lectura en stock para sustituir la unidad inicial. Una alternativa que ofrecen fabricantes es la renta o arrendamiento de unidades de lectura. El personal de mantenimiento se debe asegurar que las piezas de repuesto y unidades de lectura estén a la mano.

Las siguientes recomendaciones indican los factores que se deben considerar cuando se planean los detalles de mantenimiento:

Ibid.

Unidades de lectura

Estas se deben mantener limpias y secas, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Se debe poner especial atención a las conexiones, incluyendo los empaques. Si las conexiones eléctricas son de chapa de oro, estas se deben mantener limpias para evitar el desgaste de la chapa y la corrosión del material subyacente. Si la unidad de lectura está equipada con un indicador de humedad, se debe secar siempre que se indique. Y si no está equipada con dicho indicador, se debe secar apropiadamente. Las indicaciones de lubricación se deben seguir, ya que algunas unidades de lectura requieren de una lubricación periódica, mientras que otras no deben ser lubricadas.

Las tapas y tapones también son importantes, y se les debe dar mantenimiento. Si el fabricante no proporciona estos aditamentos para las conexiones, el usuario debe suministrarlas. De preferencia las tapas y tapones deben ser anclados a la unidad de lectura, para evitar olvidarlas.

Las baterías se deben cuidar y darles mantenimiento adecuado. Su tiempo de recarga depende del material que estén echas; pueden dañarse por un uso incorrecto.

Terminales en campo.

Se debe checar regularmente que las terminales en campo se encuentren secas, limpias y funcionando, que las tapas y tapones de protección estén en su lugar y que los números y nombres de identificación de los instrumentos sean claros y visibles. También se debe verificar que el acceso a las terminales y las casetas son íntegras. La inspección debe incluir los lugares donde se encuentran componentes embebidos.

Componentes embebidos.

Varios componentes embebidos normalmente inaccesibles requieren mantenimiento. Por nombrar uno, los piezómetros abiertos (tipo Casa grande) ocasionalmente necesitan un lavado para remover las burbujas de aire atrapado. O los piezómetros neumáticos pueden requerir de lavado con gas seco para retirar la humedad. Las tuberías de extensómetros e inclinómetros pueden necesitar lavarse para quitar la acumulación de materia (polvo, sedimentos).

Ibid.

Calibración y verificaciones en inclinómetros.

Prueba de funcionamiento de inclinómetro de tubería vertical.

Previo al inicio de los trabajos para el proyecto se puede instalar un tramo corto de tubería en un lugar estable y accesible localizado en un lugar con temperatura constante. Por ejemplo un lugar ideal, sería en el sótano sin calefacción de un edificio. Si no es conveniente perforar, la tubería puede quedar embebida en un tambo de 200 litros relleno con concreto y apoyado en una base firme, también de concreto o roca. La tubería debe ser de longitud estándar de 1.2 metros, instalado de manera que un par de ranuras guía queden totalmente verticales y el otro par quede con una inclinación de 10 a 15 grados, respecto a la vertical.

Después de la estabilización por temperatura se tomaran lecturas en las cuatro direcciones, y colocando la probeta dentro de la tubería en la posición estándar para cada lectura. Estas ocho lecturas proporcionan una verificación de la inclinación, escala, y el sesgo de origen (cero), errores y proporciona datos para corregir un error sistemático si fuera necesario. Mas detalles de procedimientos están disponibles por algunos fabricantes de inclinómetros.

Prueba de funcionamiento en la parte inferior de un inclinómetro con tubería vertical.

Cuando el inclinómetro se instala a gran profundidad, el tramo de longitud inferior que queda empotrado como punto inamovible (entre 6 a 9 metros), el cual se empotra en el estrato resistente, se puede usar como referencia para realizar las verificaciones de funcionamiento.

Banco de prueba.

Un banco de prueba es proporcionado por algunos fabricantes para checar el buen funcionamiento del instrumento.

Mantenimiento.

La probeta del inclinómetro, los accesorios de las ruedas, cojinetes² de fijación se deben revisar frecuentemente y reemplazar cuando sea necesario. Después de cada lectura se deben limpiar las guías de las ruedas y aceitar. Para instalaciones a largo plazo es particularmente importante reducir el uso de las ranuras guía de la tubería. Y se debe mantener limpia, ya que si en ella entran materiales estos se deben enviar al fondo de la tubería.

John D. Op. Cit., p.263-266.

En algunas ocasiones se usa un lavado a presión con agua y un cepillo de cerdas suaves ayuda a remover los residuos.

Verificación en campo.

Antes del monitoreo en cada ocasión, se debe realizar una verificación en campo para asegurarse que el inclinómetro funciona correctamente, usando alguno de los métodos antes descritos.

Si el usuario considera que los métodos anteriores parecen muy conservadores e innecesarios, puede como mínimo implementar los siguientes procedimientos simples:

1. Descender la probeta a una profundidad aproximada de 6 metros por debajo del nivel de aguas freáticas (si estas existen).
2. Esperar la estabilización por temperatura (usualmente 10 minutos).
3. Tomar lecturas repetidas veces.
4. Extraer la probeta, girarla 180 grados y volver a descenderla al mismo punto.
5. Repetir los paso 2 y 3.
6. Revisar la estabilidad de la suma de verificación (check-sums).

Usando estos procedimientos, cualquier anomalía en la suma de verificación se puede detectar antes del monitoreo definitivo. Una adecuada estabilización en la suma de verificación durante la lectura en cada intervalo es esencial para una buena precisión.

Métodos de medición.

La probeta se debe descender hasta el fondo de la tubería. La lectura en una de las ranuras ortogonales se realiza ascendiendo la sonda en cada intervalo de profundidad almacenando los datos de profundidad e inclinación. Una precisión máxima se logra con el implemento de intervalos iguales a la separación de las ruedas de la probeta.

En un inclinómetro de tubería vertical se acostumbra tomar una lectura en cada una de las orientaciones, girando la probeta a 90 y 180 grados. Las lecturas opuestas en un mismo eje deben ser idénticas pero de signo contrario, de tal forma que la diferencia entre ellas sea cercana a cero. Esto se puede checar con la suma de verificación en campo.

² Un cojinete en ingeniería es la pieza o conjunto de ellas sobre las que se soporta y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina. De acuerdo con el tipo de contacto que exista entre las piezas (deslizamiento o rodadura), el cojinete puede ser un cojinete de deslizamiento o uno de rodamiento respectivamente.

Ibid.

Lectura inicial.

Cuando se va a tomar la lectura inicial se debe establecer la orientación de la probeta, la cual será la misma para todas las lecturas subsecuentes. Cuando se tomen lecturas en las dos direcciones ortogonales, una práctica aceptable generalmente es orientar la lectura principal en el eje "A" positivo hacia el plano de interés.

Procesamiento de los datos.

Algunos fabricantes de inclinómetros indican la magnitud de la variación en la suma de verificación (chek-sums). Por ejemplo la compañía Slope Indicator para sus inclinómetros indica que la suma de verificación se mantiene entre ± 10 a 20 unidades de la media de todos los datos. Desviaciones estándar típicas para el eje A son 1 a 10 y por lo general son del doble para el eje B. En general desviaciones estándar mayores que 10- 20 unidades indican problemas de irregularidades con la tubería, los instrumentos o las técnicas del operador.

Después de la revisión de la suma de verificación, el proceso de los datos consisten en tres pasos: las diferencias en las lecturas en 0 y 180 grados, "la diferencia" entre lecturas subsecuentes, "desplazamientos acumulados".

El procesamiento manual de los datos es tedioso y consume tiempo, por lo que una calculadora programable puede ser usada. Ya que los cálculos son basados en un proceso acumulativo (repetitivo); se requiere de un mínimo error para producir un resultado equivocado. Por consiguiente, el procesamiento manual es practicable solo cuando se trata de una cantidad pequeña de intervalos de medición y cuando la frecuencia de medición es espaciada. Algunos fabricantes proporcionan un software para el manejo de los datos; con lo cual se reducen los tiempos de procesamiento, el tiempo de impresión de los resultados y se disminuyen los errores; también cuentan con una rutina de detección de errores que realizan una evaluación estadística en la suma de verificación del valor medio y proporcionan un método de almacenaje que a su vez sirve para detectar errores junto con una evaluación de los mismos. Su utilización es altamente recomendable.

Ibid.

6. EJEMPLO DEL APROVECHAMIENTO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN EN TÚNEL (TEO).

Descripción del sitio y del proyecto.

El proyecto comprende la construcción del Túnel Emisor Oriente y sus obras complementarias. Estos trabajos incluyen la construcción de lumbreras intermedias, con diámetros de 12 metros y 16 metros; formado por dos revestimientos, el primario a base de dovelas de 0.35 m y 0.40 m de espesor y 1.5 metros de ancho, 7.70 m de diámetro interior y 8.40 metros de diámetro exterior, una longitud de túnel de 61,700 metros desde L-0 al portal de salida y la realización de excavaciones con escudos de frente presurizable del tipo EPB, de 8.70 m de diámetro exterior. Los trabajos incluyen la construcción del revestimiento definitivo a base de concreto armado y espesor de 0.35 m de espesor, de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, quedando un diámetro terminado de 7.00 metros.

El trazo del TEO inicia en la lumbrera denominada L-0, ubicada en el cruce de anillo Periférico y Av. Gran Canal en los límites de la Delegación Gustavo A. Madero (D.F.) y el municipio de Ecatepec (Estado de México) (figura 14), esta lumbrera es de 16 m de diámetro y en ella se bajó y ensambló el equipo excavador No.1, del tipo EPB, el cual fue utilizado para la excavación del túnel de la lumbrera L0 a la lumbrera L5 con una longitud de 10.100 Kilómetros, del cadenamamiento 0+000.000 al 10+100.000, asimismo, se construyeron 4 lumbreras intermedias, tres de 12 metros y una de 16 metros de diámetro.

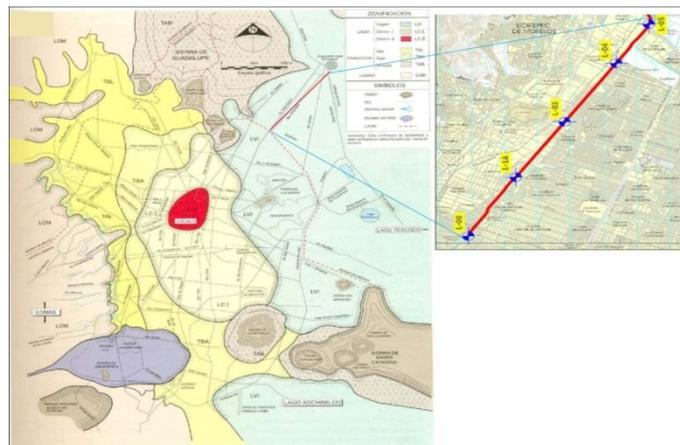


Figura 14. Ubicación de tramo 1 de túnel. Conforme a la zonificación geotécnica de la cuenca del valle de México se localiza en la zona III (Lago).

Características del suelo

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenidos diversos de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales, el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

A continuación se presenta un sondeo del sitio:

SM-1 CAD: 0+000.000

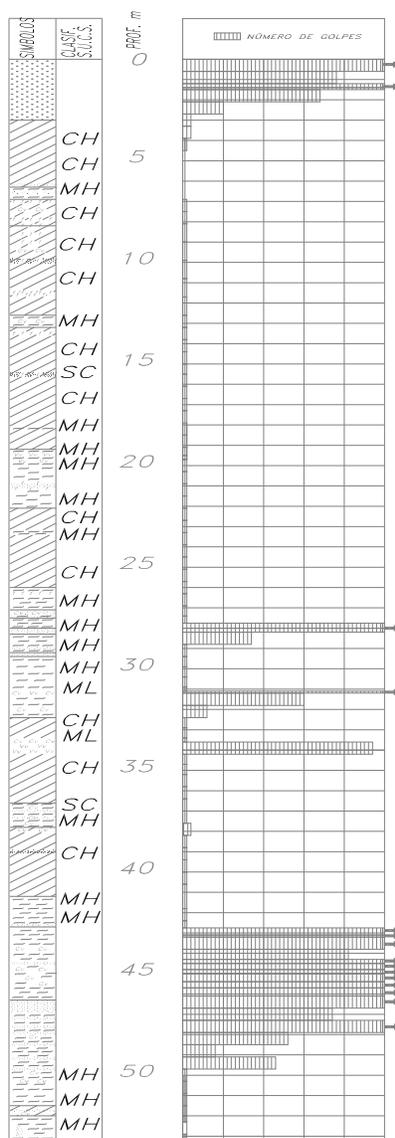


Figura 15. Sondeo Mixto en cadenamiento 0+000.00.

- A. Costra superficial.** De 0.0 m a 3.0 m existe un relleno heterogéneo de arcilla, arena, gravas y basura en general; su número de golpes en prueba de penetración estándar varío entre 2 y 63.
- B. Arcillas y limos de alta plasticidad.** De 3.0 m a 26.4 m. El subsuelo se caracteriza porque existen intercalaciones de arcilla (CH) café olivo y café rojizo con limos (MH) y múltiples lentes de microfósiles, arena fina (SC), ceniza y vidrio volcánicos; el contenido promedio de agua es del orden de 300%; debido a la consistencia tan blanda del material, en esta longitud todas las muestras se obtuvieron con tubo de pared delgada.
- B1. Arcilla y limo de alta plasticidad.** Subestrato de 6.9 m de espesor, de 3.0 a 9.9 m de profundidad, intercalaciones de arcilla (CH) café olivo y café rojizo con limos (MH); el contenido de agua promedio de 350%, peso volumétrico de 12.0 KN/m³ y cohesión de 28 Kpa en promedio.
- B2. Arcilla de alta plasticidad.** Subestrato de 4.0 m de espesor, de 9.90 a 13.90 m de profundidad, arcilla (CH) café olivo y café rojizo con intercalaciones de limos (MH); un contenido de agua que va de 200 a 400%, peso volumétrico del orden de 11.73 KN/m³ y cohesión de 23 KPa.
- B3. Arcilla y limos de alta plasticidad con lentes de arena fina.** Subestrato de 7.80 m de espesor, de 13.90 a 21.70 m de profundidad, arcilla (CH) y limos (MH), con microfósiles, lentes de arena fina, ceniza y vidrio volcánico; contenido de agua 280% en promedio, peso volumétrico del orden de 12.0 KN/m³ y cohesión de 33 KPa.
- B4. Arcilla de alta plasticidad.** Subestrato de 4.7 m de espesor, de 21.7 a 26.4 m de profundidad, arcilla (CH) café olivo y café rojizo con intercalaciones de limos (MH); el contenido de agua promedio es de 350%, peso volumétrico de 11.5 KN/m³ y cohesión de 44 KPa en promedio.
- C. Limo de alta plasticidad.** De 26.4 m a 28.5 m. Se encuentran intercalaciones de limo duro (MH) café olivo y gris olivo con arena fina y media, con lentes de ceniza volcánica; su contenido de agua varío entre 25% y 130%; su número de golpes entre 17 y 50.
- D. Arcilla y limo de lata plasticidad.** De 28.5 m a 42.4 m. existen intercalaciones de arcilla (CH) y limo (MH) café olivo y gris olivo de consistencia blanda, con lentes de arena fina, ceniza y vidrio volcánicos; su contenido de agua varío entre 27% y 362%; en esta unidad estratigráfica se registraron números de golpes entre 2 y 50.

D1. Limo de alta plasticidad. Substrato de 2.40 m de espesor, de 28.50 m a 30.90 m de profundidad, intercalaciones de arena fina y media; el contenido de agua promedio de 300%, peso volumétrico de 11.56 KN/m³ y cohesión de 171 KPa.

D2. Arcilla de alta plasticidad. Substrato de 5.60 m de espesor, de 30.90 a 36.50 m de profundidad, arcilla (CH) café olivo y café rojizo con intercalaciones de ceniza y vidrio volcánico; un contenido de agua promedio de 200%, peso volumétrico del orden de 12.2 KN/m³ y cohesión de 80 KPa.

D3. Arcilla y limo de alta plasticidad con lentes de arena fina. Substrato de 5.90 m de espesor, de 36.50 a 42.40 m de profundidad, arcilla (CH) y limos (MH), con microfósiles, lentes de arena fina, ceniza y vidrio volcánico; contenido de agua 180% en promedio, peso volumétrico del orden de 12.50 KN/m³ y cohesión de 100 KPa.

E. Intercalaciones de limos con lentes de arena. De 42.40 m a 67.0 m. Se caracteriza por las intercalaciones de limos (MH y ML) café olivo, gris olivo, café claro y gris claro con lentes de arena fina, media y poco gruesa (SM); con ceniza y vidrio volcánicos; se detecto la presencia de materia orgánica, microfósiles y conchillas. El contenido de agua de esta unidad varió entre 17% y 286%; su número de golpes, entre 1 y 98.

F. Limos endurecidos con lentes de arena. De 67.0 m a 100.3 m. Se encuentran intercalaciones de limos endurecidos (MH y ML) café olivo, gris olivo, café claro y gris claro con arena fina, media y poca gruesa (SM), cuyo contenido de agua varió entre 12% y 138%; su número de golpes entre 1 y 99.

A continuación se describen algunos beneficios que se obtuvieron del sistema de la instrumentación en el Túnel Emisor Oriente, en su tramo I; se incorporan gráficas del monitoreo de algunos instrumentos de medición, indicando su respuesta a través del tiempo y se dan algunas sugerencia de su interpretación y en su caso las acciones de remediación para conservar la estabilidad del túnel y de las obras inducidas.

XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. 2010. Santiago de Querétaro. Querétaro. Geoingeniería XXI: *retos y oportunidades del nuevo siglo. Volumen 1.* Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.

XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. 2010. Acapulco Guerrero. *Volumen 2.* Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.

Restricción para el túnel

Material o elemento estructural	Tolerancia o especificación
Concreto para dovelas	350 kg/cm ²
Acero para dovelas	4200 kg/cm ²
Revestimiento primario a base de dovelas	Convergencia-divergencia 39 mm

INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA.

Topografía en superficie (nivelaciones en trazo del túnel).

Como ejemplo en las siguientes graficas (figuras 16 a 19) se ilustra el aumento de los asentamientos conforme al avance de la maquina tuneladora (cad. 0+900); se incorporan tres gráficas transversales al trazo del túnel y una en sentido longitudinal:

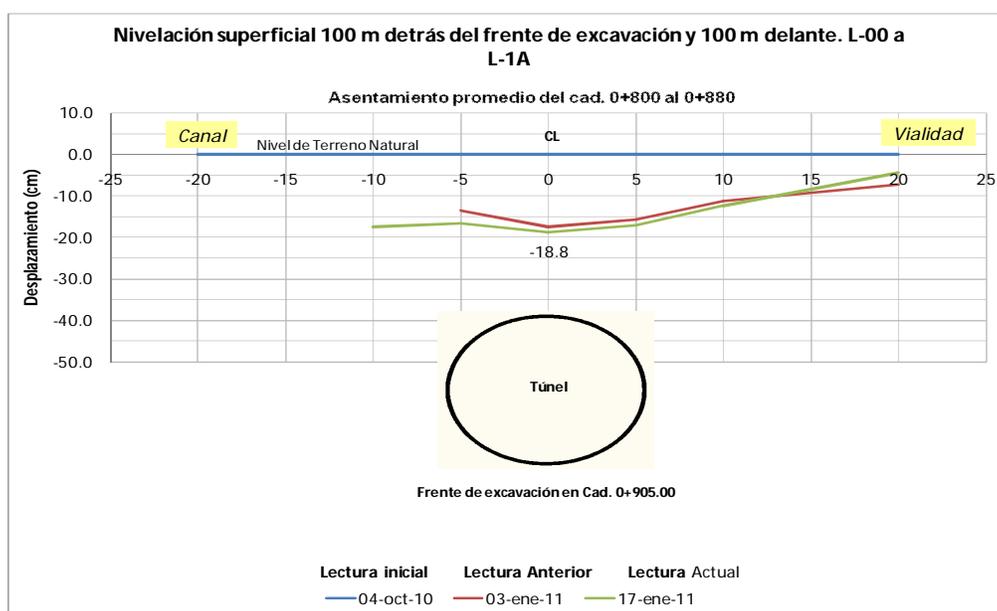


Figura 16. Gráfica secciones de nivelación en el trazo del túnel.

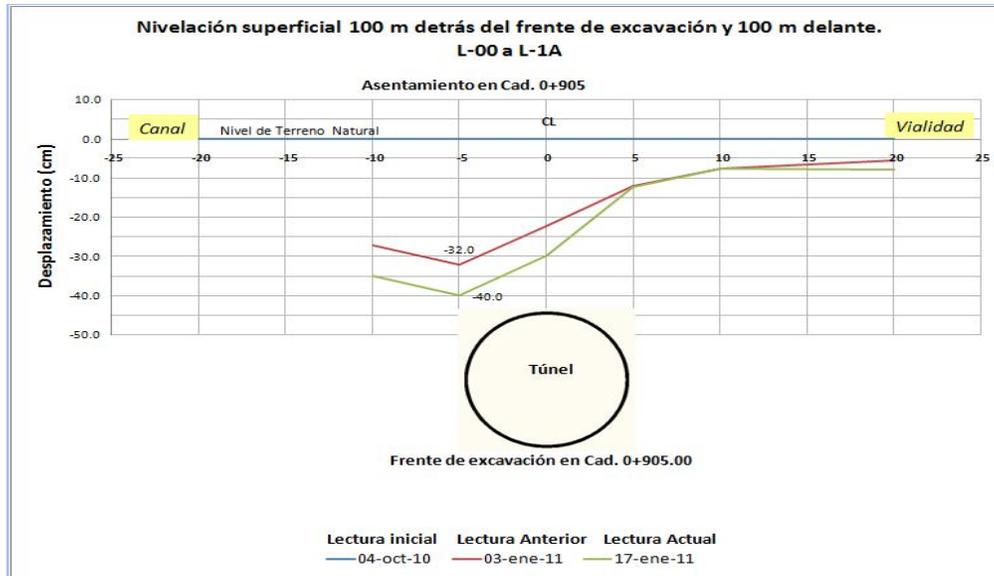


Figura 17. Gráfica secciones de nivelación en el trazo del túnel.



Figura 18. Gráfica secciones de nivelación en el trazo del túnel.

En las figuras 16 a 19 se ilustra el aumento gradual de los asentamientos al paso de la tuneladora, monitoreando 100 m detrás del frente de excavación, en el frente de excavación y 100 m delante de él. Se observa que cuando la tuneladora se encuentra 100 metros antes del punto monitoreado los asentamientos son mínimos del orden de 2.5 a 5 cm; cuando el frente de excavación se encuentra en el punto leído llega a su asentamiento relativamente máximo; y al alejarse la tuneladora, continúan los incrementos mínima y gradualmente.

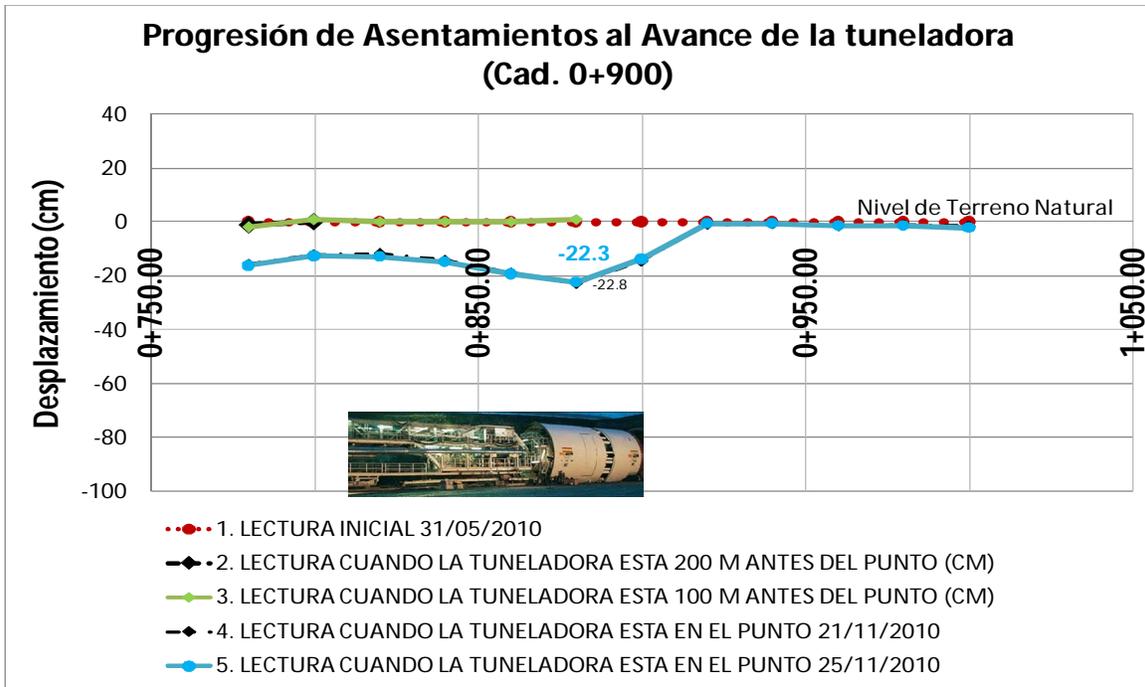


Figura 19. Grafica de progresión de asentamientos en superficie al paso de la tuneladora.

En ambos periodos ejemplificados nos referimos a la progresión de los movimientos verticales (asentamientos) que se van generando conforme avanza la tuneladora.

Topografía en el túnel (convergencias-divergencias).

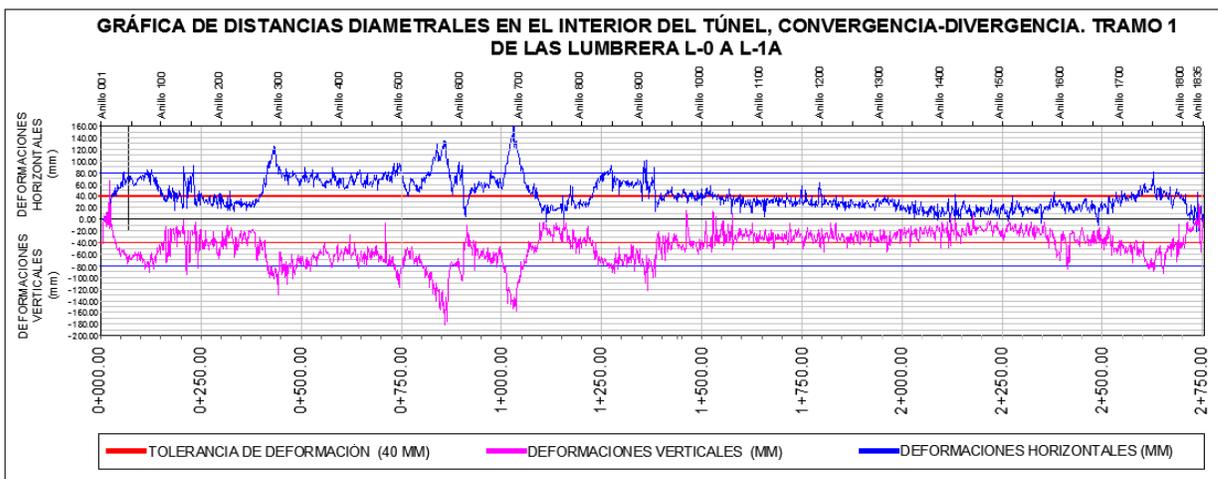


Figura 20. Gráfica de convergencias en túnel.

En la grafica anterior mediante el monitoreo de convergencias-divergencias en el túnel del cadenamiento 0+400.00 al 1+500.00 las deformaciones llegan a superar hasta por dos veces la tolerancia especificada de 39 mm. Lo cual se pudo deber a: 1) Anillos sin acoplamiento adecuado, diferentes velocidades de avance, variaciones de presiones en el frente de excavación, variaciones en el volumen de inyección de contacto, variaciones en las condiciones estratigráficas, etc.

Instrumentación geotécnica.

Piezometría.

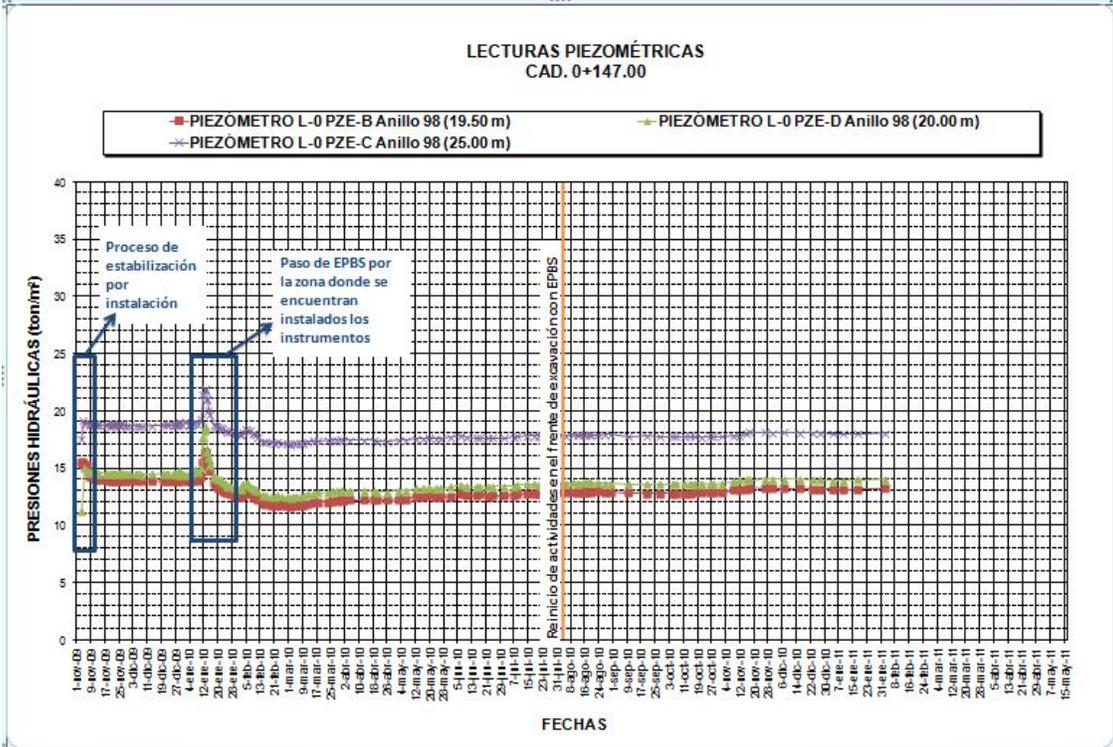


Figura 21. Piezometría en trazo del túnel, cad. 0+147.00.

En la grafica de piezometría se lleva un registro de la presión de poro contra el tiempo. En este caso se tienen datos de una estación piezométrica compuesta de tres piezómetros instalados en las profundidades cercanas a la clave del túnel y en la rasante hidráulica, que son los puntos de interés.

Instrumentos en el revestimiento primario (dovelas).

LECTURAS DE MEDICIÓN DE LOS DEFORMÍMETROS PARA CONCRETO TRAMO 1									
ANILLO INSTRUMENTADO, N° 17 EN TÚNEL CAD. 0+030.00									
Deformímetro de concreto	DEFC-T1-A17-A1-01	B=	0.97	Factor Nominal de Lote					
Marca: RST	MODELO 4200		3.304	Factor Teórico de Operación (Ver Manual de Instrumento)					
Fecha de instalación en el túnel:	26-nov-09	C1=	12.2	$\mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ (Coeficiente de expansión del acero)					
Ubicación:	Lecho Inferior	C2=	10.00	$\mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ (Coeficiente de expansión del concreto)					
Dovela:	A1	Lw=	149.23	mm (Longitud de la cuerda)					
Consola de toma de lecturas:	Marca RST Mod. VW2106	Fc=	350	kg/cm ² (Resistencia del concreto a 28 días "Poyecto")					
Canal de medición:	D (450-1200 Hz)	Módulo Elástico=	266,000	kg/cm ²					
$\mu_{\text{Corrected}} = 3.304(R_1 - R_0) * B$ $\mu_{\text{Thermal corrected}} = +(T_1 - T_0)(C_1 - C_2)$ $\mu_{\text{True}} = 3.304(R_1 - R_0) * B + (T_1 - T_0)(C_1 - C_2)$ $\Delta L = \mu_{\text{True}} * L_w * 10^{-6}$									
21.60		Temperatura después de instalar el anillo							
1,196.00		Lectura después de instalar el anillo							
No.	Fecha	LECTURA		AJUSTE LINEAL				Esfuerzo Después de Instalación en Túnel (Kg/cm ²)	OBSERVACIONES
		$L_w - R^2 * 10^{-6}$	T (° c)	Strain apparent ($\mu\epsilon$)	Corrección de Temperatura	$\mu\epsilon$ load	ΔL (mm)		
1	06/11/2009 17:10	1,203.80	31.70	0.00	0.00	0.00000	0.00	Primera lectura del instrumento	
2	26/11/2009 00:00	1,196.00	21.60	-25.00	-22.22	-47.22	-0.00705	12.56	Letras antes de instalación en túnel
3	10/12/2009 00:00	1,200.10	20.70	-11.86	-24.20	-36.06	-0.00538	9.59	
4	11/12/2009 00:00	1,200.60	20.70	-10.26	-24.20	-34.46	-0.00514	9.17	
5	12/12/2009 00:00	1,200.60	20.60	-10.26	-24.42	-34.68	-0.00517	9.22	
6	14/12/2009 00:00	1,201.60	20.50	-7.05	-24.64	-31.69	-0.00473	8.43	
7	15/12/2009 00:00	1,203.50	20.50	-0.96	-24.64	-25.60	-0.00382	6.81	1.62
8	23/12/2009 00:00	1,192.80	22.30	-35.25	-20.68	-55.93	-0.00835	14.88	6.45
54	09/02/2011 00:00	1,184.30	18.40	-62.50	-29.26	-91.76	-0.01369	24.41	15.98
55	23/02/2011 00:00	1,183.80	20.40	-64.10	-24.86	-88.96	-0.01328	23.66	15.23

Figura 22. Registro de lecturas de deformación y esfuerzo en deformímetro para el concreto del Anillo Instrumentado no.17 en túnel.

El formato anterior ejemplifica los aspectos considerados para cualquier tipo de instrumento, tales como los datos de identificación del instrumento, el modelo, número de serie, etc; y sus factores de calibración. Los datos del monitoreo que interesan son la fecha de lectura, la lectura del instrumento, la temperatura, con lo cuales se obtiene la deformación y el esfuerzo en el elemento. Como complemento es importante tener un croquis de la ubicación del instrumento y un apartado de observaciones para tomar nota de los eventos o el estado de la obra en cada fecha de lectura, ya que estos elementos ayudaran a la interpretación.

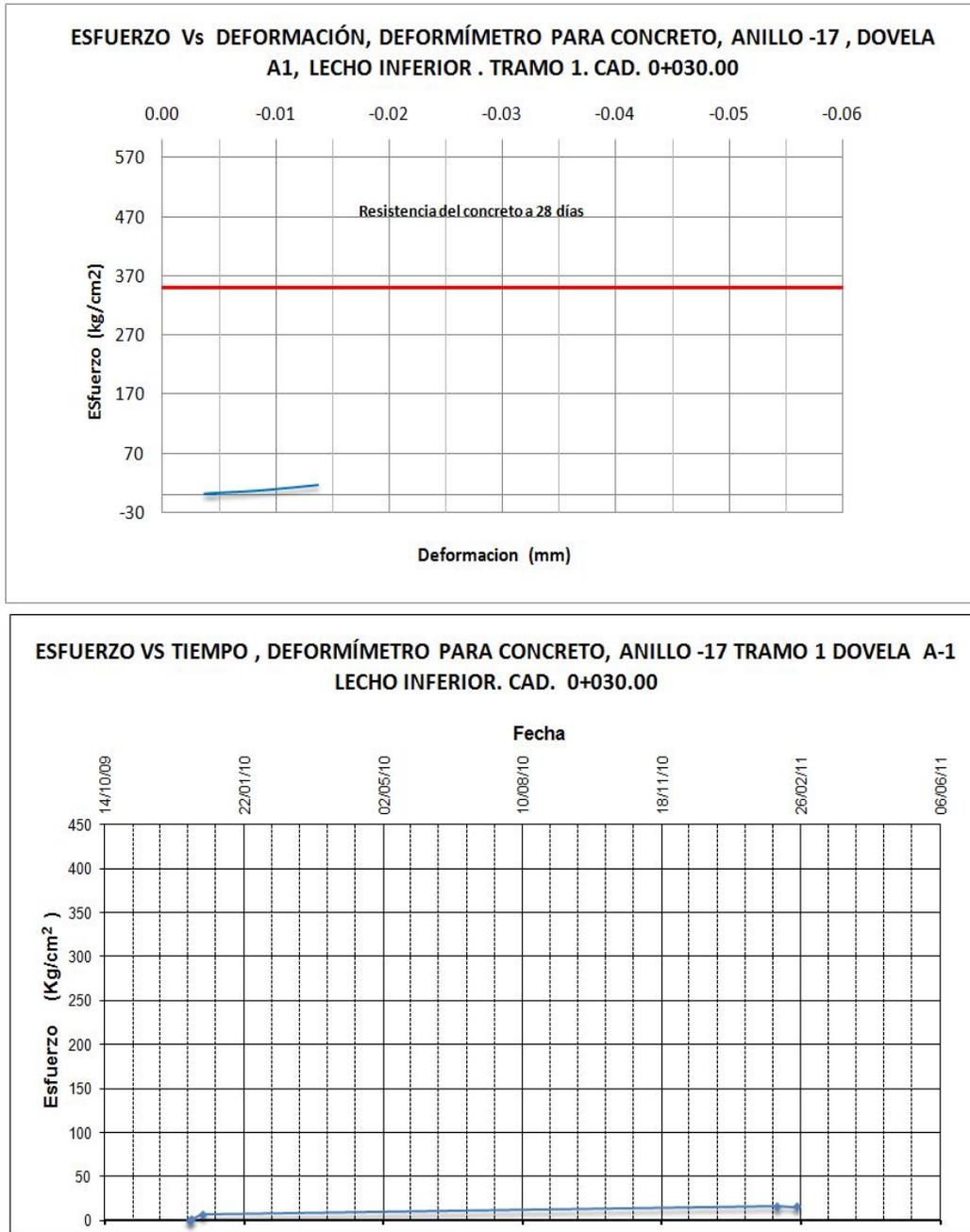


Figura 23. Graficas de esfuerzo vs Deformación y Esfuerzo vs tiempo de deformímetro en el concreto del Anillo Instrumentado no.17 en túnel.

Para la interpretación es necesario contar con graficas que ayuden a agilizar una interpretación de primera mano. En este caso se tiene una gráfica de esfuerzo contra deformación y una gráfica de la variación de los esfuerzos en el tiempo.

En las dos gráficas anteriores del esfuerzo vs la deformación y del esfuerzo vs tiempo, los valores registrados son muy bajos. Esto se debe al rango de medición del instrumento, el cual es de 450 a 1200 hertz; como se puede observar en el registro de las lecturas, se tienen valores del orden de 1180 a 1200 Hertz, lo que significa que el rango de medición del instrumento estaba cercano a su límite. Esto se debe a una descalibración originada durante la instalación, principalmente por una sujeción demasiado exigente.

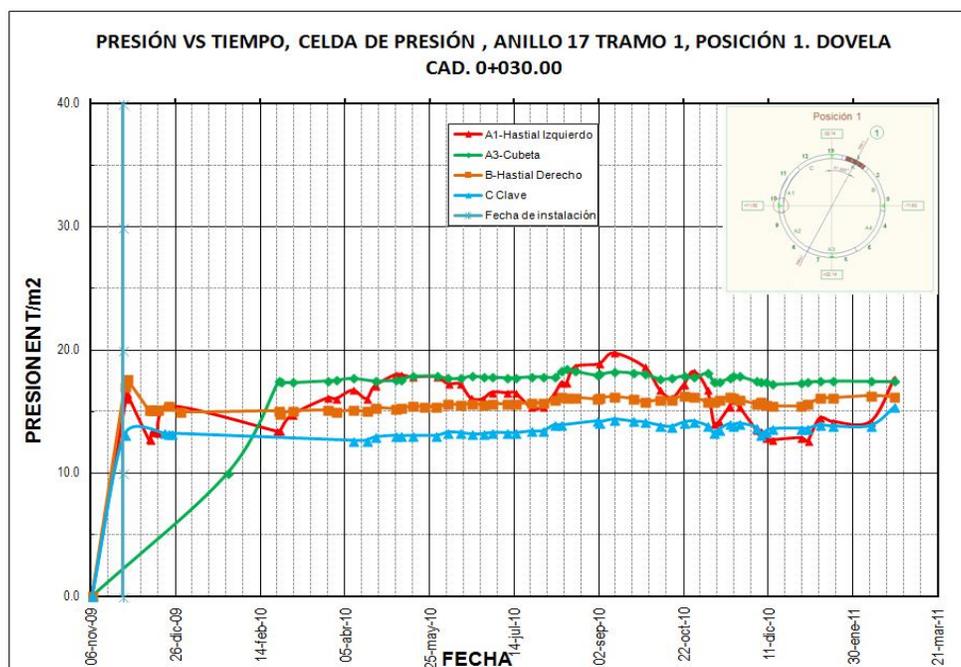


Figura 24. Gráfica de presión vs tiempo de la celda de presión para el anillo instrumentado no. 17 en túnel.

En ésta gráfica se compilaron las cuatro celdas de presión instaladas en el anillo no. 17 para el registro de las presiones radiales, en las direcciones de la clave del túnel, cubeta y sus hastiales derecho e izquierdo.

Interpretación.

En la interpretación se tomaron en cuenta tres parámetros importantes de construcción del túnel: 1) las presiones del frente de excavación; 2) El volumen de la inyección de contacto, entre las dovelas y el terreno circundante a la excavación; y 3) Las presiones de inyección de contacto. Por otra parte se consideraron los parámetros del suelo, perfil estratigráfico, la presión de poro, resistencia c_u .

Con la instrumentación empleada se pudo registrar que los asentamientos en los suelos blandos comienzan a presentarse en una distancia aproximada de 100 m delante del frente de excavación y son progresivos hasta un asentamiento máximo promedio de 45 cm; tomando en cuenta dos factores muy importantes, esto tiene relación con la resistencia al corte del suelo y con la altura de cobertura sobre el túnel, que en este tramo la resistencia al corte del suelo es de 2.0 kg/cm^2 y una altura mínima de 18 m y máxima de 21.5 m.

Mediante la toma de lecturas de distancias diametrales en horizontal y vertical con el distanciómetro laser se observaron dos factores: 1) la geometría inicial del túnel (como quedó colocado cada anillo); y 2) las deformaciones progresivas. Se registró que el túnel tendió a converger en la dirección vertical y a divergir en la dirección horizontal, siguiendo un patrón de comportamiento lógico debido a la dirección de las cargas. En algunos anillos de dovelas se excedió la tolerancia de deformación especificada de 39 mm, con velocidad promedio de deformación igual a 4.5 mm/semana.

Por otra parte la piezometría registró variaciones del orden de 3 ton/m^2 y una pronta estabilización; como se mencionó anteriormente, esto debido a los métodos de excavación y construcción utilizados, con los que se ha buscado minimizar la alteración de la presión de poro y así evitar cambios significativos en los esfuerzos efectivos del suelo.

Respecto a las graficas de deformímetros para medir las deformaciones y los esfuerzos en el acero y el concreto del túnel y las celdas de presión, se toman lecturas a partir de la fabricación de las dovelas donde son instalados los instrumentos, y poder registrar los cambios en las lecturas una vez que las dovelas son instaladas en el túnel, de tal manera que se identifiquen claramente las causas de cambios en sus valores. Respecto a los deformímetros para el acero se omitió su incorporación en éste trabajo debido a que no se tuvo acceso a dicha información; y de los deformímetros para el concreto, como se comenta al pie de la gráfica de los mismos, no se pudieron correlacionar sus valores con los eventos de la obra, tomando en cuenta que sus rangos de medición estaban descalibrados al ser instalado el anillo en el túnel.

Finalmente del monitoreo de las celdas de presión se obtuvieron esfuerzos totales al nivel de la clave del túnel, cubeta y hastiales derecho e izquierdo. Las presiones registradas fueron del orden de 15 a 19 ton/m^2 , que con forme a la memoria de cálculo se encuentran dentro de las tolerancias marcas.

Problemática detectada mediante la instrumentación.

En algunos anillos de dovelas, se superó la tolerancia especificada para las deformaciones del túnel (convergencias-divergencias), con el consecuente agrietamiento de algunas dovelas.

Remediación.

La alternativa de remediación que se optó fue realizar un mejoramiento del suelo circundante a la sección del túnel deformada, mediante re-inyecciones y en los casos más críticos se efectuó una segunda reinyección de lechada de cemento-agua complementando la inyección primaria de contacto del área anular que queda entre el revestimiento y el suelo.

Para dar seguimiento al comportamiento del túnel ante la reinyección aplicada, se continuaron los monitoreos de las convergencias observando que los resultados fueron favorables, se anexan graficas del comportamiento de dos de los anillos con mayor deformación. Figuras 25 y 26.

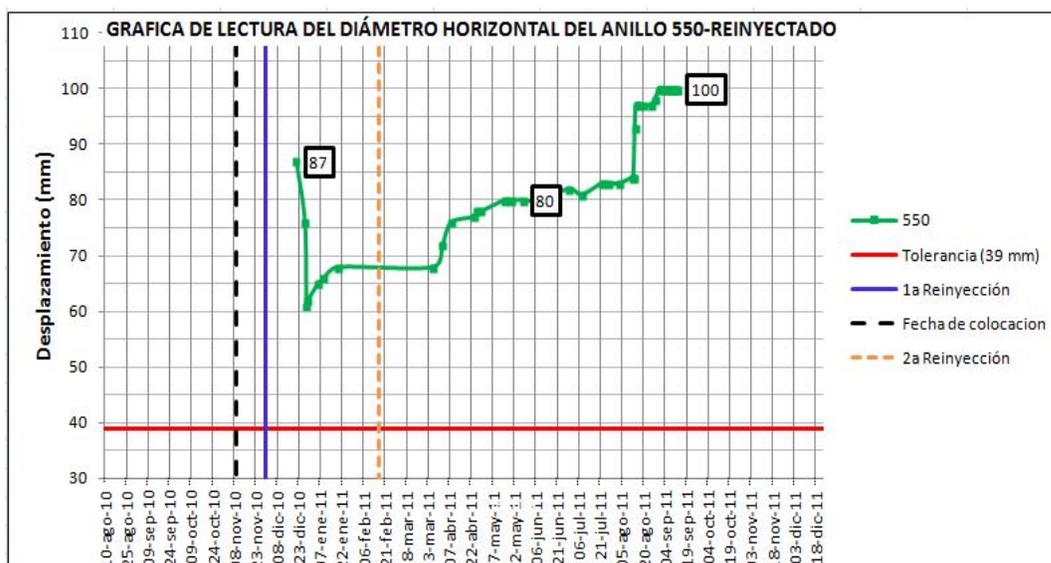


Figura 25. Gráfica de monitoreo de distancia diametral horizontal del Anillo no. 550, reinyectado.

Este anillo aun después de la primera reinyección continuó con incrementos de deformación, por lo que se reinyecto por segunda ocasión, observándose que progresaban sus deformaciones. Debido a que las dos reinyecciones generaron el taponamiento de las válvulas de inyección, se procedió a reinyectar los anillos contiguos.

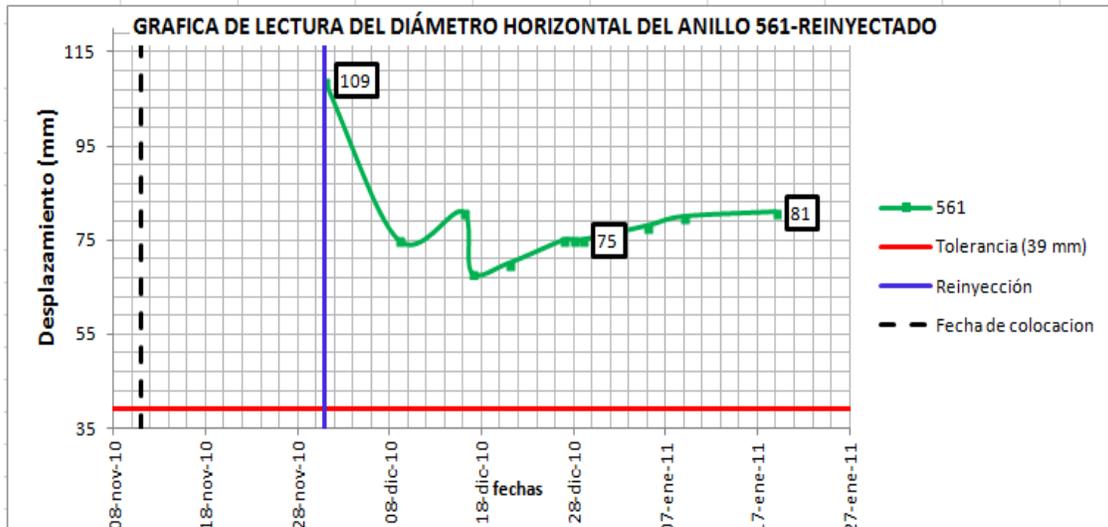


Figura 26. Gráfica de monitoreo de distancia diametral horizontal del Anillo no. 561, reinyectado.

Para este anillo aparentemente bastó con una reinyección, sin embargo los anillos adyacentes a él también se reinyectaron.

Estos dos anillos ejemplifican la solución aplicada en la sección de un mayor número de anillos con deformación mayor a la tolerancia especificada. Con el monitoreo constante de los instrumentos de los diferentes parámetros se recopilaban datos importantes y se identificaron las causas que dieron origen a las alteraciones de la estructura. Es importante destacar que conforme a las etapas constructivas se fue ajustando la periodicidad de monitoreo de los instrumentos; de la revisión a detalle del historial lecturas del total de instrumentos instalados, predominó la frecuencia del monitoreo de las convergencias en el túnel debido a su facilidad y confiabilidad. Con esto se tuvo la pauta para tomar como remediación las reinyecciones del suelo circundante al túnel, hasta conseguir la estabilización de la estructura.

APÉNDICE A. EJEMPLO DE FICHA DE INSTALACIÓN.

La elaboración de la ficha de cada instrumento es inherente a su instalación. La ficha de instalación es el documento que contiene todos los detalles de cómo quedo instalado el instrumento, y es indispensable para facilitar el trabajo posterior de análisis e interpretación de los resultados de las mediciones.

DEBE CONTENER:

Información del instrumento: marca, modelo, no. de serie, diagramas de interconexión, dimensiones, calibración, pruebas de funcionamiento, mediciones antes, durante y después de instalar, así como las mediciones base o iniciales.

Información del personal técnico que intervino en la instalación y en las mediciones iniciales.

Información topográfica; planos de ubicación, coordenadas, cotas, desniveles, puntos de referencia externos, cadenamientos, croquis con detalles de la localización respecto a las estructuras o sitios en estudio.

Información geotécnica o geológica como son: estratigrafía, diámetros y dimensiones de sondeos, localización del nivel del agua subterránea, materiales y volúmenes de lechadas o rellenos utilizados en la instalación en barrenos.

El siguiente ejemplo ilustra el nivel de detalle que requiere preparar la ficha de instalación de un instrumento.

El ejemplo elegido es la instalación de un inclinómetro vertical en una perforación en arcillas blandas con intercalaciones de arcillas arenosas. Se predijeron compresiones verticales substanciales donde se instaló el instrumento. Por lo que se implementaron tuberías telescópicas. Ya que se esperaban algunas deformaciones laterales antes de las compresiones verticales. Durante la perforación se detectó que las paredes del barreno no se estabilizaban únicamente con el mismo recorte de suelo combinado con agua, por lo que se requirió de tubería para ademar. La perforación es menor 30 metros; por lo que se previó la flotación de la tubería debido al tapón inferior de protección, lastrando con concreto la tubería con peso en el extremo inferior del inclinómetro

Nombre del proyecto _____

No. De inclinómetro _____

Coordenadas de proyecto N _____ E _____

Coordenadas reales N _____ E _____

Fecha de inicio _____ Hora _____ Fecha de termino _____ Hora _____

Contratista _____

Perforista _____

Representante de la propietaria (o) _____

Equipo de perforación _____ Diámetro de la broca _____

Nivel de Terreno Natural _____ (m) Diámetro del barreno _____

Orientación de las ranuras (proyecto) _____

Elevación inferior de la tubería (A) (proyecto) _____ (m)

Elevación superior de la tubería (B) (proyecto) _____ (m)

Longitud total de inclinómetro (B-A) (proyecto) _____ (m)

Longitud de la sección inferior de tubería (C) _____ (m)

Número de secciones estándar de tubería (B-A-C)/longitud de sección + sección del cople = _____

Longitud total del inclinómetro (real) (C+D) _____ (m)

Profundidad de la perforación (proyecto) _____ (m)

Profundidad a la parte superior de la arcilla _____ (m)

Profundidad a la parte inferior de la arcilla _____ (m)

Profundidad real de la perforación _____ (m)

Volumen de lechada (calculado) _____ (m³)

Prueba de trayectoria correcta de las ranuras: Si/No

Longitud de la tubería de inyección (E) _____ (m)

Mezcla de lechada usada _____

Volumen real de lechada para rellenar el área anular _____ (m³)

Elevación real de la tubería en superficie antes de recortarla (B') _____ (m)

Elevación real de tubería en el fondo (A') _____ (m)

Pruebas de la trayectoria de las ranuras correctas _____ Si/No

Longitud de tubería recortada en su extremo superior _____ (m)

Elevación real del inclinómetro en superficie después de recortarlo _____ (m)

Orientación real de las ranuras en su extremo superior _____

Necesidad de revisar la espiral de las ranuras: Si/No

Prueba de aceptación satisfactoria: Si /No

Componentes usados durante la prueba de aceptación (Identificar numero de probetas, unidades de lectura, cable, etc.)

Notas: Acerca de la perforación, instalación de la tubería, lechada, problemas encontrados, retrasos, Características inusuales de la instalación, o cualquier otro evento que pudiera variar el comportamiento de la tubería del inclinómetro.

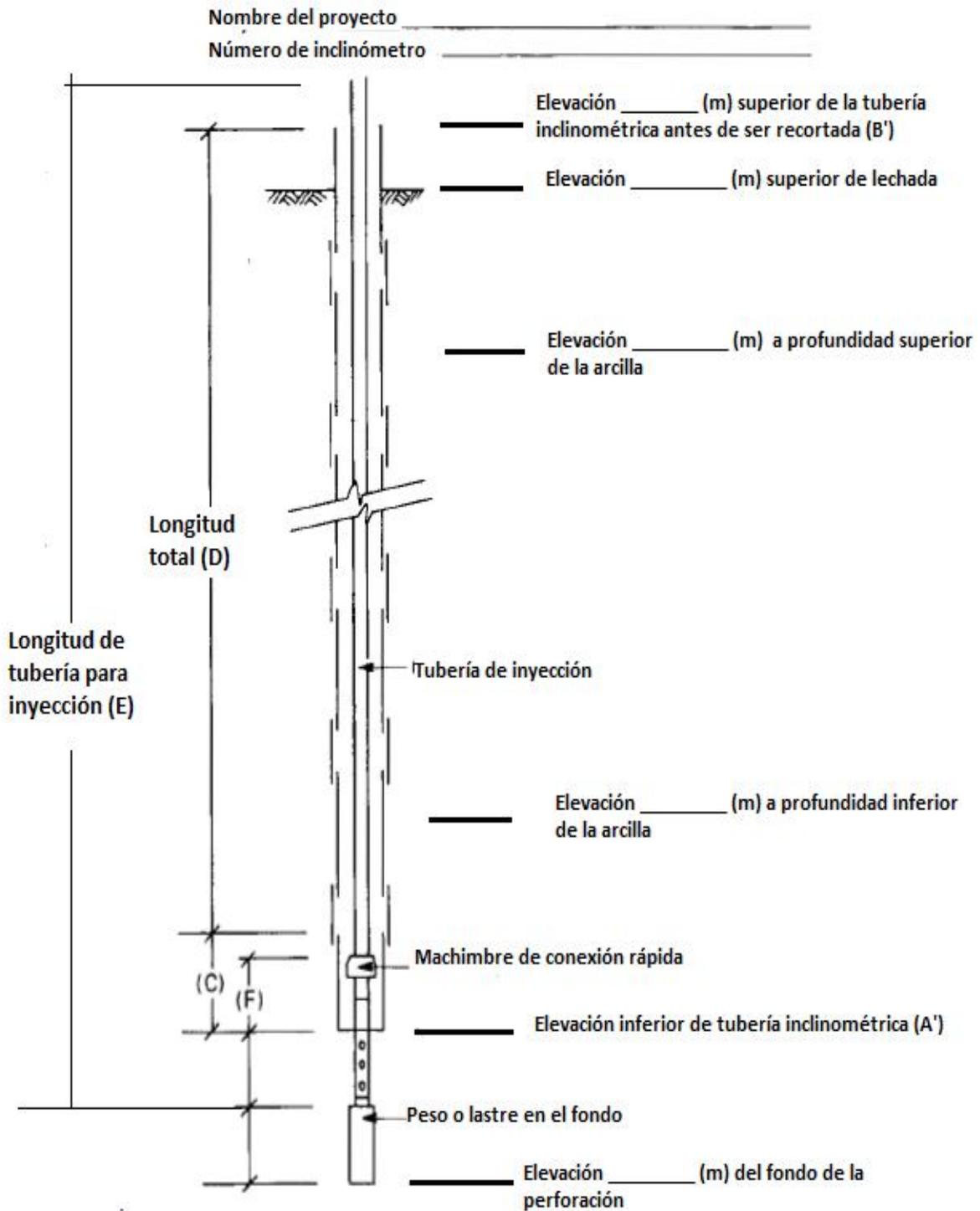


Figura 27. Esquema de instalación de instrumento (Inclinómetro).

Ibid.

CONCLUSIONES

El implemento de la instrumentación en el tramo I del Túnel Emisor Oriente ha aportado información sumamente importante para la detección de variaciones en el comportamiento del túnel y las estructuras en la vecindad y vialidades, comprobando que los parámetros medidos estuvieran dentro de los rangos especificados, y cuando estos se rebasaron se pudieron tomar las medidas de remediación oportunamente. La variedad de instrumentos que se implementaron, desde los más comunes como la topografía convencional hasta elementos de tecnología más reciente tales como los instrumentos de cuerda vibrante, permitieron conocer la magnitud de los asentamientos en superficie, desplazamientos horizontales, esfuerzos y deformaciones.

Estos trabajos se llevaron a cabo de forma manual, a través de lo cual, también se pudieron realizar observaciones visuales que sirvieron de buena forma para complementar los criterios de aceptación de la instalación, monitoreo, procesamiento, presentación e interpretación de los datos obtenidos. Por otra parte referente a los métodos automatizados, los cuales se comentan brevemente, cabe resaltar, que sus ventajas tecnológicas en cuanto a resolución, precisión y presentación se cubren satisfactoriamente; sin embargo para su mayor aprovechamiento se requiere del implemento de sistemas adicionales sofisticados que incluyen unidades de captación y transformación de los datos, cableado especial, lo cual incrementa los costos significativamente respecto al método manual. Por lo que antes de elegir alguno de los dos sistemas de instrumentación es importante evaluar los alcances del proyecto que se pretenda instrumentar, analizar si se requieren datos en tiempo real y de lugares de acceso limitado o basta con información en menor frecuencia de monitoreo, distinguir claramente si en verdad un sistema en comparación del otro tendría ventajas significativas; por consiguiente, la confiabilidad del proceso de medición no está regido por la exactitud de los instrumentos, si no por el cumplimiento de los requerimientos de nuestra obra.

Ya que el monitoreo no sólo se debe realizar en las etapas previas y durante la construcción, sino también se debe seguir midiendo la respuesta de obra durante su operación, para dar seguimiento a su seguridad y funcionalidad, es indispensable la elaboración de un archivo con la ficha de instalación de cada instrumento, sus calibraciones y las de los equipos de medición.

Por último, gran parte del aprovechamiento de uno u otro sistema de instrumentación radica en elegir al personal indicado o proporcionar la capacitación respectiva al personal elegido para llevar a cabo las tareas de instrumentación. Y realizar una constante revisión y retroalimentación de las tareas de cada participante.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Banco profundo de referencia fija.

Figura 2. Componentes de un extensómetro de cinta (marca Geokon).

Figura 3. Ejemplo de instalación de referencias para medición de convergencias.

Figura 4. Esquema de extensómetro multipunto.

Figura 5. Pozo de observación.

Figura 6. Piezómetro abierto tipo Casa Grande.

Figura 7. Tubería ABS para inclinómetro.

Figura 8. Esquema de medidor de cuerda vibrante.

Figura 9. Medidor de cuerda vibrante para concreto.

Figura 10. Sujeción de deformímetro a las barras de refuerzo.

Figura 11. Método alternativo para la sujeción de deformímetros en las barras (varillas).

Figura 12. Medidor de cuerda vibrante para el acero.

Figura 13. Tipos básicos de celdas de presión de tierras: (a) Celdas de diafragma y (b) Celdas hidráulicas.

Figura 14. Ubicación de tramo 1 de túnel. Conforme a la zonificación geotécnica de la cuenca del valle de México se localiza en la zona III (Lago).

Figura 15. Sondeo Mixto en cadenamiento 0+000.00.

Figuras 16, 17 y 18. Gráfica secciones de nivelación en el trazo del túnel.

Figura 19. Gráfica de progresión de asentamientos en superficie al paso de la tuneladora.

Figura 20. Gráfica de convergencias en túnel.

Figura 21. Piezometría en trazo del túnel, cad. 0+147.00.

Figura 22. Registro de lecturas de deformación y esfuerzo en deformímetro para el concreto del Anillo Instrumentado no.17 en túnel.

Figura 23. Gráficas de esfuerzo vs Deformación y Esfuerzo vs tiempo de deformímetro en el concreto del Anillo Instrumentado no.17 en túnel.

Figura 24. Gráfica de presión vs tiempo de la celda de presión para el anillo instrumentado no. 17 en túnel.

Figura 25. Gráfica de monitoreo de distancia diametral horizontal del Anillo no. 550, reinyectado.

Figura 26. Gráfica de monitoreo de distancia diametral horizontal del Anillo no. 561, reinyectado.

Figura 27. Esquema de instalación de instrumento (Inclinómetro).

LISTA DE FOTOS

Foto 1a. Lectura de convergencia en túnel

Foto 2a. Distanciómetros laser

Foto 3a. Micrómetro y cabezal.

Foto 4a. Sonda Piezométrica.

Foto 5a. Sensor eléctrico.

Foto 6a. Lector para instrumentos de cuerda vibrante.

Foto 7a. Equipo de medición y Accesorios, para Inclinómetros.

Foto 8a. Colocación de deformímetros para monitoreo del concreto en dovela de revestimiento primario en TEO.

Foto 9a. Colocación de deformímetro para monitoreo del acero en dovela de revestimiento primario en TEO.

Foto 10a. Colocación de celda de presión en dovela de revestimiento primario en TEO.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de tareas que debe asignar el propietario para el programa de monitoreo

Tabla 2. Ventajas y limitación de un sistema automatizado de adquisición de datos

REFERENCIAS

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. Julio de 1987. *Curso Victor Hardy "Túneles y excavaciones subterráneas"*. México D.F. CAVM.

Covitur *Volumen 1*. Agosto de 1987. *Manual de diseño Geotécnico*. México.

Covitur *Volumen 2*. Septiembre de 1988. *Manual de diseño Geotécnico*. México.

Enrique S. V., Efraín O. S., Federico M., Elvira L. P., Febrero de 2005. *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México D.F. TGC Geotecnia s.a.

Geokon. (2002-2009). *Instruction Manual. Model 1610. The Geokon Ealey Tape Extensometer*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.

Geokon. (1983-2009). *Instruction Manual. Models VK-4100/4150, Vibrating Wire Strain Gage*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.

Geokon. (1986-2010). *Instruction Manual. Models 4200/ 4202/ 4204/ 4210, Vibrating Wire strain Gages*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.

Geokon. (1984- 2010). *Instruction Manual, Models 4800, 4810, 4815, 4820 and 4830 VW Earth Pressure Cells*. 48 Spencer Street Lebanon, NH 03766, USA. Geokon, Inc.

ICOLD Boletín 60. 1988. *Dam Monitoring. General Consideration*. Paris. ICOLD-CIGB.

John D. 1988. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Unite State of America. Wiley.

Leica Geosystems S.A. de C.V. (n.d). <http://www.leica-geosystems.com>

RST Instruments LTD. October 13, 2004. *Total Earth Pressure Cell Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada. RST Instruments LTD.

RST Instruments LTD. *Vibrating Wire Strain Gage Model VK-4100/4150, Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada. RST Instruments LTD.

RST Instruments LTD. April 13, 2004. *Vibrating Wire Strain Gage Model VWSG-S, Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada. RST Instruments LTD.

RST Instruments LTD. July 11, 2008. *Digital Inclinometer System Instruction Manual*. Coquitlam, B.C Canada. RST Instruments LTD.

US Army Corps of Engineers . June 2002. *Geodetic and Control Surveying*. Washington. US Army Corps of Engineers.

Síntesis Prof. Ing. Eduardo Néstor Álvarez
<http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lscm/SITIOCON.htm>

Slope Indicator. 2007. *VW Piezometer*. Mukilteo, Washington, USA, 98275. DGSi.

Slope Indicator. 2008. *VW Data Recorder*. Mukilteo, Washington, USA, 98275. DGSi.

Slope Indicator. 2006. VW data Recorder.

XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. 2010. Santiago de Querétaro. Querétaro. *Geoingeniería XXI: Retos y Oportunidades del Nuevo Siglo. Volumen 1*. Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.

XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. 2010. Acapulco Guerrero. *Volumen 2*. Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.