

CAPITULO 1.

ANTECEDENTES

1.1. QUE ES LA INSTRUMENTACIÓN

En esta primera parte empezaremos a introducirlos en el tema de la Instrumentación. Ejemplificando que es la instrumentación con una definición corta y precisa sobre ésta por parte del M.I. Oscar Sergio Aguilar Pérez dice así:

“La instrumentación es una combinación de conocimientos teóricos-prácticos que están enfocados al uso de dispositivos y técnicas especiales que nos permiten obtener información cualitativa y cuantitativa de las variables que caracterizan el comportamiento de una estructura, con el fin de evaluar su seguridad, y en su caso tomar acciones preventivas o correctivas, tanto en la etapa constructiva como de operación”.

Basados en esta definición, la instrumentación no es más que el uso de aparatos o instrumentos especializados de medición para obtener información del comportamiento del cuerpo o elemento o estructura en estudio.

Uno de los objetivos básicos de la instrumentación consiste en medir la respuesta del terreno ante determinadas variaciones en las condiciones de su entorno, estas respuestas pueden ser causadas por la ejecución de obras o por fenómenos naturales.

También, entre otros objetivos de la instrumentación también cabe mencionar:

- Conocer el comportamiento de la obra bajo condiciones de cargas normales y extraordinarias.
- Detectar oportunamente riesgos o problemas de la estructura, tanto en su etapa constructiva, como operativa.
- Obtener conocimientos que nos permitan mejorar el diseño de obras futuras.

Capítulo I: Antecedentes

Especialmente en el caso en que la instrumentación tenga como objetivo el control del comportamiento del terreno en el entorno de una obra, ejecutada en superficie o subterránea, tan sólo será realmente útil sí, durante la estructuración del proyecto se ha incluido entre sus resultados, la previsión, por parte de los ingenieros diseñadores de cada área, como el área de geotecnia, estructuras, así como de construcción, la respuesta del terreno ante las agresiones que va a sufrir durante la ejecución del proyecto.

Durante el desarrollo del proyecto se deberá contar con las herramientas de cálculo necesarias y adecuadas para modelar, en la medida de lo posible, lo más real que se pueda la situación, siendo este modelo, alimentado por información precisa obtenida de campo o zona de estudio donde se va a llevar a cabo la obra. Todo esto, para que se pueda estimar una respuesta del terreno en base a las condiciones del terreno y las acciones que en éste se realizarán.

Una vez definido el proceso a seguir en la obra y seleccionadas las magnitudes a controlar se diseñará el correspondiente programa de instrumentación, en el que se indicará el tipo de instrumentación ideal, prestando especial atención al rango de medida, la precisión que será capaz de proporcionar y la frecuencia con la que se deben efectuar las lecturas de seguimiento.

Un sistema de instrumentación se diseña en función del tipo de estructura, tomando en cuenta tanto las condiciones geotécnicas como topográficas del sitio, así como los recursos disponibles.

Para lograr un buen diseño de un programa de instrumentación o auscultación se deberán considerar los siguientes puntos:

1. Definir las condiciones del proyecto:
 - Tipo de proyecto,
 - proyecto de diseño,
 - estratigrafía del subsuelo y sus propiedades físicas y mecánicas,
 - condiciones del agua subterránea,
 - estado de edificaciones aledañas y otras instalaciones,
 - condiciones ambientales y
 - método planeado de construcción y conocimiento de las situaciones de crisis.

2. Predecir mecanismos de control de comportamiento. Se determinarán una o varias hipótesis para mecanismos que puedan controlar los movimientos o el resultado en los cambios en los esfuerzos y presiones de poro.

3. Definir las soluciones requeridas para las preguntas geotécnicas y constructivas planteadas. Cada instrumento en un proyecto debe ser seleccionado para ayudar a dar respuesta a una pregunta específica, esto nos lleva a que si no hay alguna pregunta o duda que se tenga sobre el comportamiento de las estructuras, cuerpos o elementos, entonces no hay razón para usar algún instrumento.

4. Seleccionar los parámetros de monitoreo. Esto es para definir que parámetros son más importantes para monitorear en el proyecto, por ejemplo: presión de poro, presión total, deformaciones, esfuerzos, temperatura, cargas, etc.

Capítulo I: Antecedentes

5. Estimar magnitudes de los cambios. Estas predicciones son necesarias ya que el rango y la sensibilidad de los instrumentos son elegidos en base a esto. Se estima un valor máximo esperado para seleccionar el rango del instrumento y un valor mínimo para seleccionar la sensibilidad o precisión del instrumento.

6. Diseñar medidas correctivas. Decidir, en ventaja, una solución positiva para problemas que puedan ser descubiertos mediante resultados de observación. Si estos resultados llegaran a requerir acciones correctivas, estas pueden basarse en planes apropiados anticipados a la corrección.

7. Selección de los instrumentos. Se deberán cumplir los puntos anteriores en orden de seguir con la selección. Para este punto, el bajo costo de algunos instrumentos contra otros no debe ser razón de la selección del instrumento sino la confiabilidad y simplicidad del instrumento para hacer el trabajo.

8. Seleccionar los sitios de medición. Estas locaciones se ubicarán mediante la evaluación de las zonas críticas del proyecto basadas en el análisis de las mismas mediante un programa de elementos finitos o estudios y pruebas de campo.

9. Identificar y registrar factores que pudiesen afectar o influir en las mediciones. Las mediciones por si solas no siempre ofrecen soluciones directas. Se tiene que relacionar las causas con las mediciones por lo que se debe llevar una bitácora de obra o registro donde se indiquen posibles factores que puedan provocar cambios en los parámetros de medición.

10. Establecer procedimientos para la confiabilidad de las lecturas. El personal responsable de la instrumentación deberá asegurarse de que los instrumentos utilizados así como las unidades de lectura funciones de manera correcta y confiable.

11. Preparar el presupuesto. Este incluye los costos, siendo cuidadoso en hacer una estimación realista de la duración del proyecto para lo siguiente:

- Planeación del programa de monitoreo,
- diseño detallado de los instrumentos,
- procuración de los instrumentos,
- instalación de los instrumentos,
- mantenimiento y calibración de los instrumentos,
- establecer una agenda o programa de recolección y actualización de datos,
- procesamiento y presentación de datos,
- interpretación y reporte de datos y
- decisión sobre la implementación de medidas en base a los resultados de la interpretación.

12. Preparar un diseño de reporte de instrumentación. Este reporte deberá resumir el resultado de los puntos anteriores.

Capítulo I: Antecedentes

13. Generar las especificaciones de instalación y las procuraciones de los instrumentos. Se tienen que preparar un documento donde se describen los requerimientos del instrumento que incluye la precisión y resolución y el resultado esperado. Se preparará un documento donde se indica el procedimiento paso por paso para la instalación del instrumento usando las instrucciones o manual del fabricante del producto así como las especificaciones de los geotécnicos respecto a la estratigrafía del sitio de instalación.

De los puntos anteriormente expuestos, dada la mutua relación que existe entre la caracterización geotécnica del terreno que ha sufrido o va a sufrir un cambio en sus condiciones de estabilidad y la instrumentación aplicable para efectuar el seguimiento, únicamente si en ambas actuaciones se cuenta con las técnicas adecuadas se obtendrán resultados plenamente válidos.

1.2. TIPOS DE INSTRUMENTACIÓN

Existen varios tipos de instrumentación, para mediciones en campo, en laboratorio, en este caso describiremos los tipos de instrumentación que se usan para monitorear durante la ejecución de la obra o construcción. Con estos se tiene un control sobre los movimientos o desplazamientos que se presentan en el suelo o elementos estructurales durante procesos de excavación y en las construcciones vecinas a la obra, las cuales se ven afectadas por la construcción de la misma.

Los sistemas de instrumentación usados para estos casos, son generalmente clasificados en los siguientes tipos básicos:

- Desplazamiento vertical
- Desplazamiento horizontal
- Medición óptica
- Presión de suelo o total
- Presión de poro y niveles piezométricos
- Esfuerzos y deformaciones.

A continuación se explicarán con detalle los tipos básicos de los instrumentos.

Desplazamiento Vertical

Los desplazamientos verticales son monitoreados en muchas situaciones en los proyectos de construcción. Uno de los problemas más comunes en construcción es la localización de la obra en lugares donde el suelo está formado por tierra de granos finos, tales como la arcilla, limos y materiales orgánicos.

En estos suelos, debido a excavación o cargas ocasionadas por los terraplenes tendidos sobre estos tipos de suelo, se tienen problemas de asentamientos ya sea en edificaciones o terrenos vecinos a la excavación y asentamientos en el terraplén debido a que estos suelos están siendo sometidos a cargas a los que no estaban sometidos antes.

Dichos asentamientos causan un mayor gasto para la obra ya que produce gastos de reconstrucción de terraplén, mayor volumen de tierra usado, mala calidad para el manejo en la vía después de la construcción y daños a las construcciones o instalaciones vecinas a la obra.

Capítulo I: Antecedentes

Con estas descripciones de lo que es el desplazamiento vertical, se puede decir, que en general, el monitoreo de los desplazamientos verticales sirven o ayudan al ingeniero a:

- Verificar que la consolidación del suelo está actuando de manera esperada o predicha.
- Predecir y ajustar la elevación final del terraplén.
- Verificar el comportamiento de las cimentaciones.
- Determinar el tiempo y necesidad de aplicar las correcciones necesarias.
- Monitorear el proceso de consolidación en los terraplenes.
- Monitorear el proceso de consolidación de los estratos base.
- En una excavación, monitorear el empuje del suelo del fondo.
- Monitorear el asentamiento o expansión del suelo debido a la extracción de parte del suelo o empujes externos, fuera de la excavación.
- En las cimentaciones, monitorear el desempeño de las estructuras de cimentación bajo las cargas de las estructuras que soporta y así poder prevenir fallas en la superestructura por asentamientos diferenciales.
- En las vías y las camas de las vías, se monitorea el hundimiento de las mismas durante la construcción del túnel y pasos inferiores.

- En las estructuras superficiales, se monitorea la deformación vertical para detectar asentamientos diferenciales o totales en la estructura mientras se llevan a cabo excavaciones u operaciones de bombeo de agua cerca de estas estructuras.
- En pruebas de pilas de cimentación, se monitorea el esfuerzo al que es sometida la estructura y la deformación vertical debajo del suelo de apoyo de la misma.

Desplazamiento Horizontal

El preocuparse por la presencia y la magnitud de los movimientos horizontales ocurre generalmente en los sitios donde se construyen elementos de contención, ya sean, muros milán, muros tablestaca o muros de contención para los taludes de excavación, cortes verticales en roca y cortes en suelos blandos y donde hay deslaves o taludes inestables existen. En estos casos, encontramos que es deseable, aunque más que deseable, necesario, monitorear las deformaciones laterales durante las siguientes situaciones:

- 1.- Durante la construcción. Los desplazamientos horizontales pueden ser monitoreados durante la construcción y después de la construcción, específicamente en los lugares donde el muro se encuentra reteniendo el empuje del suelo y las construcciones vecinas detrás del muro. Esto ayudará a observar el comportamiento de la estructura con el esfuerzo provocado por el peso de la estructura vecina sobre el suelo que retiene el muro, así como simplemente en el corte vertical dependiendo del tipo del suelo en el que se esté trabajando.
- 2.- Asentamientos esperados. Las deformaciones laterales, para estos casos, pueden ser monitoreados si se prevé un gran asentamiento de las estructuras. De ser así, el desplazamiento lateral por falla de los materiales de cimentación ocurre al mismo tiempo que los asentamientos verticales. Este movimiento lateral puede ser perjudicial y afectar a las vías férreas tendidas, estructuras o lugares de almacén, entre otras, que se encuentran en la vecindad de la zona.

Para estos casos, decimos entonces que los desplazamientos horizontales deben ser detectados, guardados, analizados y comparados con los cálculos de la estabilidad de paredes o taludes. Ya que las magnitudes y rangos de desplazamiento son lo más importante de estas mediciones o lecturas. Así como

Capítulo I: Antecedentes

el buen entendimiento por parte del analizador o ingeniero analista, de las áreas de deflexión, donde se lleva a cabo el movimiento lateral.

Existe una variedad de aparatos o instrumentos de medición para tomar lecturas o mediciones de los desplazamientos laterales que se desean medir o estudiar. Para la elección de estos instrumentos, a veces es difícil la determinación de cuáles son los más óptimos para cubrir las áreas, volúmenes de corte, rellenos de tierra o roca significantes o de importancia para la obra.

Mediciones Ópticas

Las mediciones ópticas tradicionales representan la más económica y menos compleja forma de instrumentación para el monitoreo de las deformaciones. Los instrumentos ópticos, propios de la topografía para esta forma de medición, pueden ser usados para determinar movimientos laterales y verticales, esto claro, con un cierto rango y precisión en las mediciones.

Este método normalmente usa niveletas u objetivos como puntos de referencia, estos se marcan con ayuda de topografía para la correcta ubicación de los puntos de referencia ya que ellos son los que se encargarán de monitorear con la frecuencia especificada para dicho proyecto o etapa de lecturas de la zona o edificación a monitorear.

La principal desventaja en este método de monitoreo es que la brigada de topografía tiene que ser movilizada de un punto de monitoreo al otro cada vez que se necesitan las lecturas con la frecuencia que ya se había especificado para el proyecto o la zona de monitoreo. Este método puede ser muy eficiente para el monitoreo de desplazamientos notables siempre y cuando la precisión de el que

toma las lecturas sea buena, así como el cumplimiento con la frecuencia de lecturas especificada para el proyecto o zona de monitoreo.

Con los avances en la tecnología se ha optado por usar equipos automatizados o de alta precisión para estos casos como las estaciones totales, que toman lecturas automatizadas y los sistemas GPS o de posicionamiento global, para el monitoreo de los desplazamientos de edificaciones, taludes o grandes masas de suelo.

La ventaja de esto, es que las lecturas pueden ser monitoreadas remotamente desde una oficina que cuente con computadora, sin la necesidad de una brigada de trabajo (equipo de técnicos o auxiliares) que pueda fallar en la toma de lecturas.

Presión de suelos o presión total

Existe instrumentación especial para medir la presión total o la presión del suelo. Como ya se sabe, la presión de tierra no es otra cosa más que los esfuerzos totales o presión total del suelo. Esta incluye la presión del suelo por su peso y la presión de poro o presión hidrostática. Estas mediciones de presión total se pueden clasificar en dos categorías básicas:

- Mediciones dentro de la masa de suelo y
- Mediciones en las paredes o caras de una estructura de contención.

Para poder medir estas presiones ya existen instrumentos especiales para ello, estos son llamados celdas y son, entre las principales, 3 tipos diferentes:

- Celdas de presión total (presión de suelos)
- Celdas de esfuerzos de suelos
- Celdas de presión de suelos (sin presión hidrostática)

Capítulo I: Antecedentes

Las mediciones de la presión total usando las celdas de presión, a veces resultan difíciles de interpretar, se necesita realmente entender todo lo que está afectando en ese momento al suelo para entender las lecturas que arroja el instrumento a la hora de registrar las lecturas. En algunas aplicaciones o casos puede causar incertidumbre en las lecturas debido a los factores que afectan las mediciones del instrumento.

Estos problemas se pueden ver asociados o ser causados por la colocación del instrumento en el punto en estudio. Hay veces que si en la estructura donde va el instrumento, en esta caso, la celda de presión, no se toman las precauciones necesarias y se tiene una mala instalación, a la hora de dejar ahogada o enterrada la celda, esta puede moverse y no quedar alineada con la superficie de contacto, provocando de esta manera una serie de lecturas incongruentes con lo que se esperaba en los cálculos realizados.

Otro problema que puede presentarse a la hora de la instalación del instrumento es que, el suelo sea virgen, esto afecta ya que puede que la instalación modifique las propiedades del suelo causando que este se comporte de manera imprevista y se tengan lecturas que no son congruentes con los cálculos.

Para rellenos compactados, tierras armadas y suelos que lleven trabajo de ingeniería, la colocación o instalación del instrumento no será de relevancia o importancia ya que conforme van aumentando los esfuerzos van acercándose a un estado de equilibrio durante el proceso constructivo.

Por lo tanto no se necesita tener un monitoreo de los esfuerzos en el suelo, aunque si así se desea se puede hacer sin ningún problema, solo teniendo en

cuenta que los esfuerzos que se presentan aquí serán mayores y podrán afectar la capacidad de la celda y resultar en la toma de lecturas erróneas.

A parte de los tipos de instrumento de medición llamados celdas, estas se dividen en subtipos, estos subtipos van relacionados con la tecnología de medición, estas celdas pueden ser del tipo:

- Neumática;
- Hidráulica;
- De cuerda vibrante o hilo vibrátil;
- Semiconductor o transductor de presiones y
- De deformímetros.

Presión de Poro y niveles piezométricos.

Para medir la presión de poro, ya sea en roca o en suelo, usamos los transductores de presión de poro, o más comúnmente llamados o denominados piezómetros o sondas piezométricas. Estos instrumentos miden la presión de poro basándose en la columna de agua que se encuentra sobre ellos. Esta columna de agua puede medirse mecánicamente, mediante la inmersión de un sensor que detecta el nivel hidrostático de agua o nivel de agua freática o ya sea por medios electrónicos o sensores electromecánicos con su correspondiente unidad de lectura. A continuación se explica un poco más de los dos tipos de medios para medir la presión de poro:

1. **Sistemas Mecánicos.** Con el método mecánico de monitoreo de presiones de poro, normalmente se ve incluida la instalación de estaciones piezométricas o tubos piezométricos. Este tipo de instalación necesita un sellado de manera

Capítulo I: Antecedentes

que solo responda a la presión del nivel de agua freática alrededor del elemento filtrador y no a las presiones de otras elevaciones.

Estos piezómetros pueden ser instalados en un relleno, sellados y/o con filtro en la perforación y empujados (hincados) o conducidos al lugar donde se desean instalar.

La instalación de los piezómetros y componentes usados es parecida a la de los pozos de observación con la diferencia de que en el piezómetro se usan sellos o filtros.

La superficie de agua en la tubería se estabiliza en la elevación piezométrica y esta elevación es determinada mediante el sondeo con una probeta o sonda, o mediante el uso de sensores electrónicos y *datalogger* o registrador de datos instalado en la tubería para monitorear las variaciones de elevaciones del nivel freático a determinados intervalos de tiempo.

Hay que tener en cuenta que las tuberías no se deben de dejar desprotegidas ya que pueden verse afectadas por vandalismo o por acción natural, contaminación causada por agua de lluvia u obstrucciones debido al arrastre de materiales. Se recomienda siempre dejar estas instalaciones protegidas ya sea por una válvula tapa que permita la libre interacción con la presión atmosférica.

2. Sistemas electrónicos o neumáticos de presión de poro. Estos transductores o piezómetros pueden ser hincados en el suelo o instalados en la tubería. Normalmente se usa un empaque de arena para que el área de lectura no se vea contaminada o afectada por el mismo suelo. Posteriormente el espacio que queda en la perforación, entre el suelo y el instrumento, es rellenado con un grout especial que se mezcla tratando de igualar las características del

suelo para que mantenga el mismo comportamiento y para prevenir las condiciones hidrostáticas del suelo que rodea al instrumento de manera que no afecte a la hora de realizar las lecturas de presión de poro.

El sensor se conecta mediante un cable hasta la superficie ya sea a un registro instalado en el lugar de la perforación y conectándose a un *datalogger* y descargar los datos del registro con una computadora portátil o dejando simplemente la conexión del cable en el registro para posteriormente tomar las lecturas con una unidad de lectura especial para el instrumento. Este tipo de instrumentos son de respuesta más rápida a los cambios en la presión de poro que los instrumentos mecánicos.

Una opción para hacer mediciones de presión de poro es instalar el instrumento electrónico fuera del tubo de inclinómetro o de Sondex. Este medidor es colado en la perforación con un *grout* especial para el tipo de suelo donde se hizo la perforación de manera que se comporte con las mismas características del suelo. Debido al empleo de este método de sellado no es requerido un empaque de arena alrededor del instrumento.

Las pruebas de laboratorio y campo han demostrado que los empaques de arena no son necesarios ya que a través del *grout* como empaque se pueden obtener lecturas de presión de poro confiables.

La ventaja que nos ofrece este método, siendo esta de aspecto constructivo y económico, es que no es necesaria otra perforación independiente para la instalación del piezómetro.

Esfuerzos y deformaciones.

El diseño de elementos estructurales implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural, se pueden evaluar varios ejemplos sencillos para los cuales se registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido sobre el elemento. Estos valores permiten determinar el esfuerzo y la deformación que al graficar originan el denominado *diagrama de esfuerzo y deformación*.

En el aula o en el gabinete, mientras analizamos estos esfuerzos obteniéndolos mediante la aplicación de la Ley de Hooke que nos dice que “la deformación es directamente proporcional al esfuerzo en el tramo elástico del elemento”, en campo o en la realidad, a la hora de construir los materiales presentan un comportamiento un poco distinto al esperado diseñado en gabinete.

Es por eso que la relación suelo-estructura y entre los propios elementos de la estructura es crítica durante todo su proceso de construcción. Para esto se tienen que estudiar o analizar ciertos puntos críticos o elementos estructurales que se cree pueden ser los importantes durante el proceso constructivo de la estructura ya que los esfuerzos y deformaciones que en ellos se presentan serán clave para confirmar lo esperado en el diseño o en su caso, prevenir y solucionar alguna posible falla que pueda tener durante su construcción.

Para este tipo de estudios y mediciones se usan instrumentos especializados que nos ayudan a obtener los datos que necesitamos, esfuerzos y deformaciones. Estos instrumentos pueden ser celdas de carga, deformímetros y medidores de tensión o “*strain gauge*” los cuales son diseñados para instalarse en lugares claves ya sea en el suelo o en la propia estructura para medir los esfuerzos y las cargas que se presentan en el suelo y en los elementos estructurales.

Explicando un poco el funcionamiento de los instrumentos para este tipo de mediciones, en el caso de las celdas de carga esta se deforma debido al esfuerzo aplicado sobre la misma, esta deformación es medida en la celda por *strain gauges* conectados a la misma. La función de esta celda de carga es para conocer los esfuerzos axiales ya que estas solo miden en un solo eje los esfuerzos. Estas celdas son debidamente calibradas en el laboratorio o fábrica con cargas conocidas en una maquina de pruebas universal.

La determinación del rango de cargas del instrumento será crítica y deberá ser evaluado por el especialista en geotecnia del proyecto y este decidirá su nivel de sensibilidad. Ya que este instrumento debe ser capaz de detectar incrementos cambios en el incremento de esfuerzos por lo general la sensibilidad de estos instrumentos es requerida con un rango de 50 a 100 partes del total de la tensión o esfuerzo esperado.

Para entender un poco mejor estos diferentes tipos de mediciones, en lo siguientes capítulos se explicarán los instrumentos a detalle mostrando tanto su funcionamiento, como su instalación y algunas mediciones de los mismos en la estación Mexicaltzingo de la línea 12 del metro.

1.3 BENEFICIOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

La Instrumentación Geotécnica y Estructural ha sido utilizada por los ingenieros de caminos, de obras públicas y de minas para el seguimiento del comportamiento del terreno y de estructuras ejecutadas por el hombre.

Capítulo I: Antecedentes

La instrumentación se puede aplicar en cualquier fase del proyecto: en la fase inicial de proyecto y reconocimiento del terreno, en la fase constructiva y en la fase de operación (durante la vida del proyecto). Todas las fases pueden necesitar un cierto grado de instrumentación.

Durante la primera fase, es necesario determinar cuáles son los posibles problemas para definir las mediciones que puedan ser necesarias. Durante la fase constructiva, la comprobación de los supuestos asumidos y la modificación de los modelos usados, en caso necesario, es llevada a cabo. Finalmente, durante la tercera fase, se hace un seguimiento del comportamiento de la estructura a largo plazo.

De esta manera podemos entender mejor lo que la instrumentación significa y su importancia durante el proceso de construcción. En las grandes obras, o pequeñas obras, que tengan un riesgo probable durante la construcción se utilizan sistemas de auscultación o monitoreo por razones de importancia tanto para el cliente como para el constructor o contratista, ya que estos sistemas ayudarían a prevenir pérdidas económicas y de tiempo para el constructor. Por lo anterior, se ocupa la instrumentación por las siguientes razones:

- Investigaciones de sitio: para caracterizar las condiciones iniciales del lugar, las condiciones más usuales son; presión de poro, estabilidad de taludes y permeabilidad del suelo.
- Verificación de diseño: los instrumentos son usados para verificar que el comportamiento y las predicciones hechas vayan conforme a lo esperado. Los datos que se obtengan de la fase inicial del proyecto pueden revelar la necesidad o la oportunidad de hacer la modificación del proyecto para las siguientes fases.

- Control de la construcción: Los instrumentos son usados para monitorear los efectos de la construcción. Los datos que arroje la instrumentación pueden ayudar al ingeniero constructor a determinar que tan rápido se puede proceder con la construcción sin que esta tenga riesgo de falla.
- Control de calidad: Puede usarse para reforzar la calidad de la mano de obra en el proyecto y para documentar que el trabajo se ha realizado conforme a las especificaciones.
- Protección legal: Los datos de la instrumentación pueden ser evidencia o respaldo para una defensa legal en caso de que los dueños de las construcciones aledañas a la obra presenten quejas o demandas por daños a sus propiedades ocasionados por la construcción.
- Desempeño: Los instrumentos son usados para monitorear el desempeño interno de la estructura. Por ejemplo, el monitorear las goteras y presión de poro en las puede comprobar el desempeño presas, así como también, el monitoreo del movimiento en taludes y muros garantizará el desempeño de los mismos.
- Avance en el Estado-de-Arte: Algunas mediciones de campo, con fines de investigación, han hecho que muchas teorías sean puestas a prueba en la realidad y la instrumentación ha ayudado a que estas se puedan corroborar con la medición continua y en tiempo real de lo que sucede en el objeto en estudio. Dando lugar al mejoramiento, comprobación y rectificación de las teorías o hipótesis de la construcción y la mecánica de suelos.

Beneficios después de la construcción

Los ingenieros tenemos la obligación de construir estructuras seguras, sobre todo si estas implican, en caso de accidente, la pérdida de vidas humanas. El

Capítulo I: Antecedentes

desempeñar un monitoreo durante la vida de una estructura mediante métodos de observación e instrumentación puede ser una excelente forma de asegurar la seguridad de la estructura a largo plazo.

Algunos ejemplos que se pueden mencionar para monitoreo a corto y largo plazo en nuestro caso particular son:

- El monitoreo de las fuerzas de empuje del suelo sobre los muros milán mediante inclinómetros en suelo y en muro.
- Las celdas de presión en la losa de fondo de las estaciones para la medición de las cargas de la estructura hacia el suelo con el fin de monitorear los límites de carga del subsuelo.
- Los piezómetros en la losa de fondo de las estaciones para corroborar las mediciones de las cargas de las celdas de presión así como ver la variación de los niveles freáticos en la estación.
- Las celdas de presión en los anillos del túnel hecho con escudo para monitorear la carga del suelo hacia el anillo.
- Los extensómetros magnéticos y de barras en el túnel y cruces con zonas críticas para tener un control del hundimiento regional de la zona.
- Los deformímetros de acero y concreto ahogados en las dovelas de los anillos instrumentados para monitorear los esfuerzos que actúan en ellas y tener un control del comportamiento del anillo.
- Los *tilt meters* o clinómetros en edificios importantes que están en trazo de la Línea 12, para tener un monitoreo continuo de los cambios en su inclinación debido al paso del escudo y durante la operación de la Línea 12

