



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Apuntes complementarios de
Fundamentos de
Instrumentación Geotécnica**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Adriana García López

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. Moisés Dávila Serrano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Índice

Introducción	2
Justificación en el uso de instrumentación geotécnica	3
1.1 Clasificación de acuerdo con la variable que miden	4
2 Inclínómetros	4
2.1 Instrumentación geotécnica de una autopista en suelos blandos (Contreras & Santoyo, 2012)	15
3 Piezómetros	20
3.1 Instrumentación en corte Tepapatlaxco de Autopista México-Tuxpan (Pérez D., et al, 2012)	29
4 Extensómetros	34
4.1 Instrumentación en túneles de conducción de río Grijalva, Chiapas (Vargas A., et al, 2012) .	43
5 Medidor de juntas tridireccional	49
6 Referencias topográficas superficiales	51
6.1 Desplazamientos horizontales	52
6.2 Desplazamientos verticales	56
6.3 Instrumentación en la margen izquierda de la Presa la Yesca (Torres B.& Pérez G,2011)	61
Bibliografía/Mesografía	65

Introducción

La instrumentación geotécnica tiene como propósito monitorear y controlar la evolución de movimientos, deformaciones, cargas, presión y niveles de agua, en suelo, subsuelo o roca.

La geotecnia es la aplicación de principios geológicos y de ingeniería para realizar estudios y análisis del comportamiento de suelos y macizos rocosos.

Este material de apoyo tiene como finalidad el compilar lo visto en clase en la asignatura de Geología Aplicada a la Ingeniería Civil sobre el uso de instrumentación geotécnica.

Cabe resaltar que es de suma importancia para el estudiante de ingeniería geológica y geofísica, el conocimiento de instrumentos y herramientas necesarias para la exploración, análisis, caracterización, diseño y monitoreo de macizos rocosos, además de ser un reforzamiento al capítulo 9 de instrumentación geotécnica y proporcionar un enfoque a lo que se realiza en la parte práctica en el estudio de una zona al llevarse a cabo un proyecto.

A continuación, en el presente trabajo se describirá instrumentación geotécnica, así como ejemplos de aplicación.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es apoyar al entendimiento de los fundamentos vistos en los cursos de Geología Aplicada a la Ingeniería Civil de la carrera de Ingeniería Geológica e Ingeniería Geofísica sobre los diferentes dispositivos usados en la geotecnia, para advertir el comportamiento de un macizo rocoso.

Alcances

El alumno podrá reforzar e identificación las características fundamentales de la instrumentación, así como el objetivo de su instalación en el análisis de un macizo rocoso.

Identificar y reconocer tipos de instrumentación y dispositivos adecuados de acuerdo con las cualidades que presenta y a las variables que analiza.

Distinguir las ventajas que presenta el uso de instrumentación geotécnica en obras o proyectos civiles, así como el aporte que tiene para la toma de decisiones.

Justificación en el uso de instrumentación geotécnica

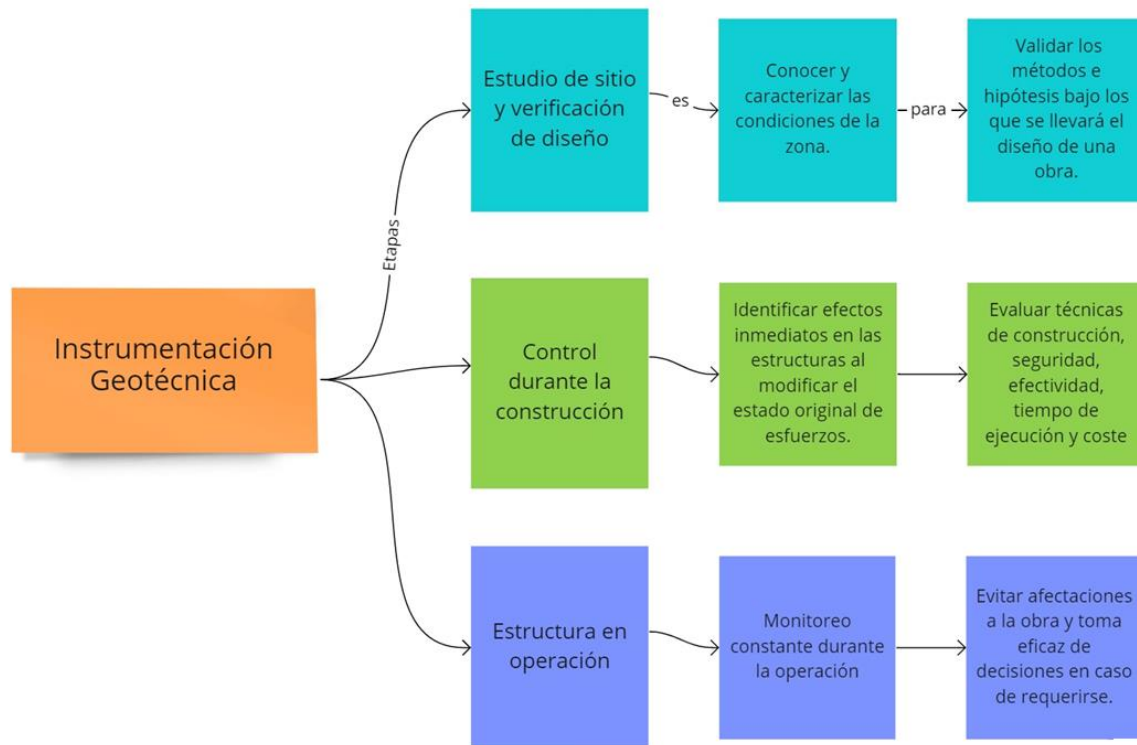


Diagrama 1. Etapas de la Instrumentación Geotécnica en la planificación y desarrollo de un proyecto.

Cabe señalar que la instrumentación geotécnica no es sustituta de un diseño y construcción adecuados, sino una herramienta que permite monitorear y verificar el desempeño antes y durante la operación (Diagrama 1).

El tipo, cantidad y ubicación de la instrumentación depende del diseño del proyecto (Vall González, 2016) por lo que, entre otras cosas, se considera:

- Cantidad apropiada de instrumentación en cada etapa;
- el mantenimiento adecuado y programado;
- Evaluación e interpretación de los datos que se obtienen periódicamente,
- Toma de datos de campo de calidad y representativa
- Documentación sistemática de la información recabada.

1.1 Clasificación de acuerdo con la variable que miden

La instrumentación geotécnica contempla una gran cantidad de instrumentos de distinta clase y con el control en medición de variables que permiten su manejo y adaptación en las respectivas obras y proyectos (Diagrama 2).

La selección de ésta debe adaptarse a la obra para lograr obtener la mejor información sin que su avance.

La instrumentación geotécnica se puede clasificar en función de las variables que determinan (Vall González, 2016).

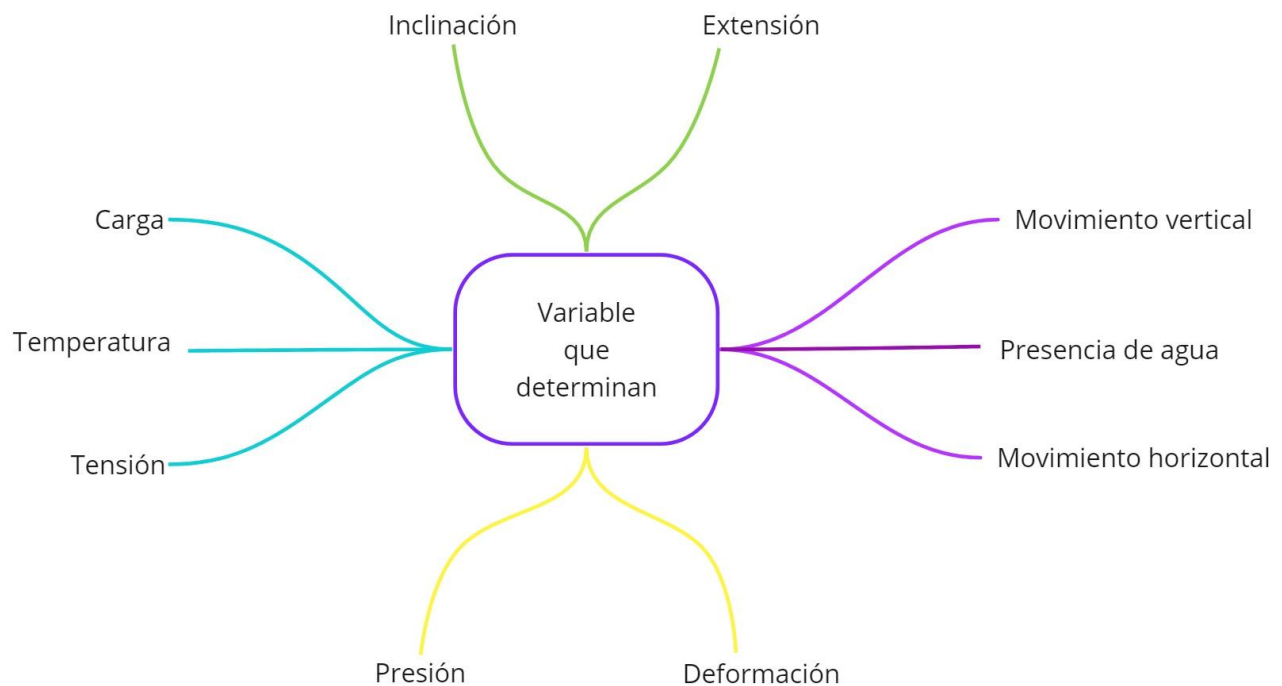


Diagrama 2. Parámetros que se pueden detectar en la instrumentación geotécnica.

2 Inclínómetros

Los Inclínómetros son instrumentos versátiles y prácticos que miden desplazamientos (Diagrama 3) de una tubería inclinométrica introducida en estratos de suelos y/o rocas respecto a un plano horizontal o vertical (UIDV, 2007).

Un inclinómetro es un sensor utilizado para medir la magnitud del ángulo de inclinación o deformación de cualquier estructura. La curvatura se presenta en porcentaje o en grados respecto a la gravedad.

El inclinómetro medirá el cambio de pendiente de un ademe guía colocado dentro de un barreno mediante el paso de una sonda guiada. Se colocan generalmente alineados en secciones longitudinales, transversales, laderas y taludes. En los vertederos, obras de toma, de excedencia y de desvío (CONAGUA,2012).



Diagrama 3. Aplicaciones de los inclinómetros.

Los inclinómetros se clasifican en:

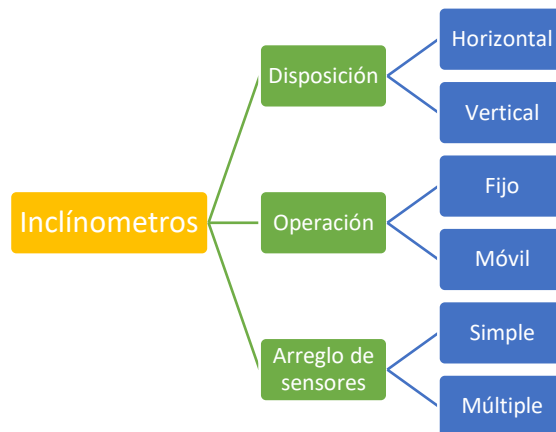


Diagrama 4. Clasificación de los inclinómetros.

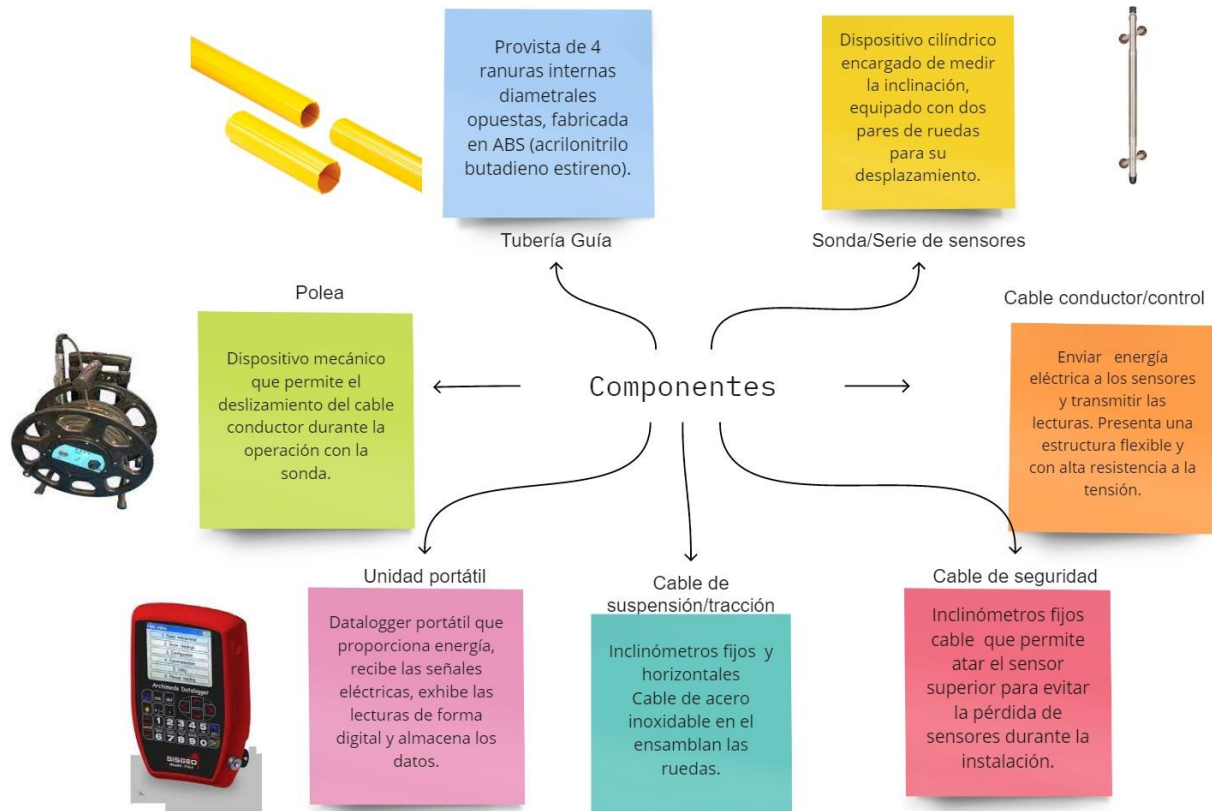


Diagrama 5. Componentes principales de un inclinómetro.

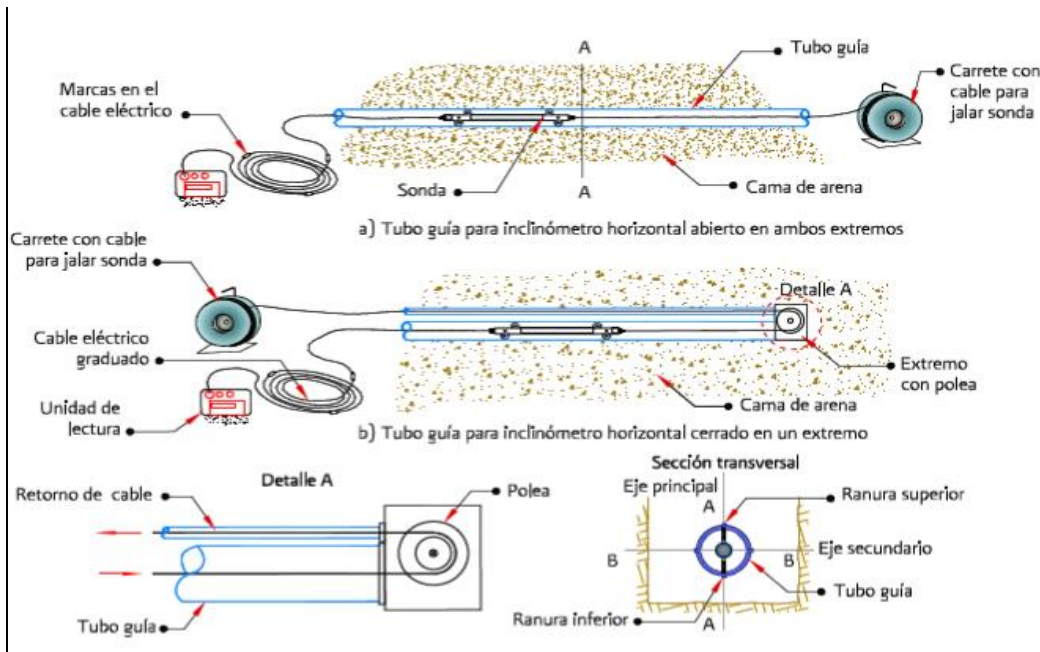


Ilustración 1. Instalación, uso de inclinómetro horizontal y sus componentes.

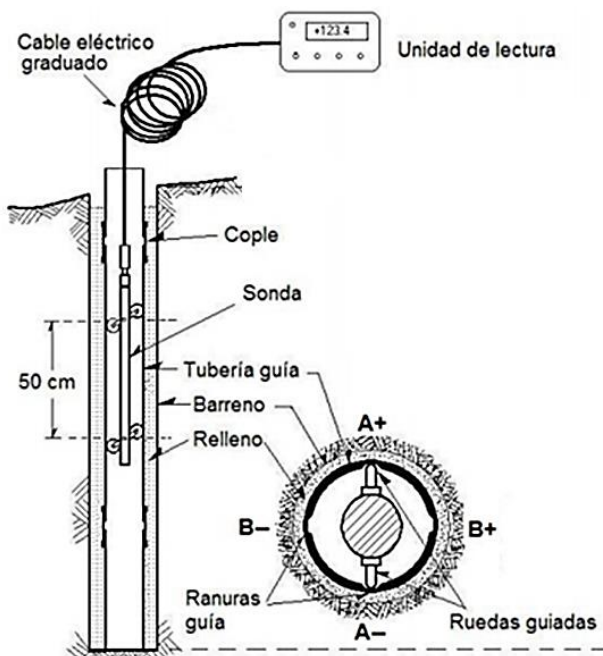


Ilustración 3. A. Tubería guía ABS. B. Introducción de sonda en tubería guía (Gouda Geo-Equipment B.V Inclinometers casing tubes)

Instalación

Para la instalación se requiere localizar físicamente en el terreno, posteriormente se localiza topográficamente el centro de la tubería guía, es necesario disponer por lo menos de dos puntos de control topográfico (Vall González, 2016).

Una vez ubicadas e instaladas las referencias se efectúa la perforación, es recomendable utilizar ademe de lodos bentónicos y emplear una broca que garantice un barreno con diámetro específico, generalmente de 6 pulgadas.



La tubería guía debe revisarse y limpiarse, verificando que no tenga golpes o rebabas en los bordes.

A continuación, se introduce el tubo guía a la perforación, orientando las ruedas guía por las ranuras de acuerdo con la orientación principal como se muestra en la *ilustración 3 y 4*; deberá obtenerse el ángulo que se forma para conservar la orientación de las ranuras y evitar o corregir posibles giros de éstas.

Ilustración 4. Corte transversal en tubería guía. Sonda de inclinómetro y su orientación respecto a los ejes A y B (González V, 2010)

Para lograr un buen empotramiento es necesario rellenar el espacio anular (*ilustración 5*), que es el espacio entre la pared de la perforación con la

tubería guía mediante una mezcla conformada por cemento agua y bentonita, en porciones que van considerando el tipo de suelo que se tiene. (Choquet, Pierre,2020).

Para evitar la flotación de la tubería en ciertas condiciones, se puede colocar peso suficiente en el fondo o bien, anclar la tubería en el extremo inferior.

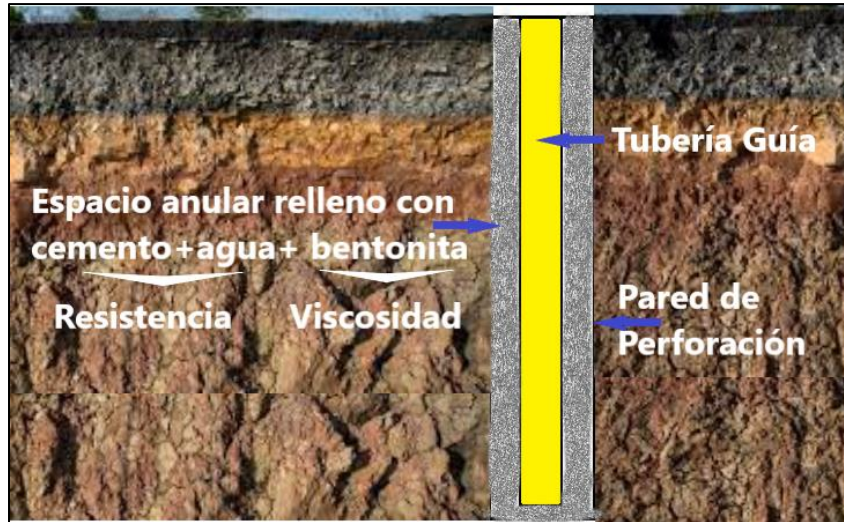


Ilustración 5. Empotramiento de tubería guía

Material	Suelos de medios a duros		Suelos blandos	
	1	40 kg	1	40 kg
Cemento Portland	1	40 kg	1	40 kg
Agua	2.5	100 L	6.6	264 L
Bentonita	0.3	12 kg	0.4	16 kg

Tabla 1. Proporción de la lechada de acuerdo con las características del suelo. Fuente Slope Indicator.

Operación

Para la realización de mediciones se recomienda fijar el incremento de lectura a 50 cm (Soil Instruments Ltd) para evitar variaciones. Es indispensable verificar el equipo completo y colocar la polea con su eje de rotación mediante el ajuste de la abrazadera (Diagrama 6).

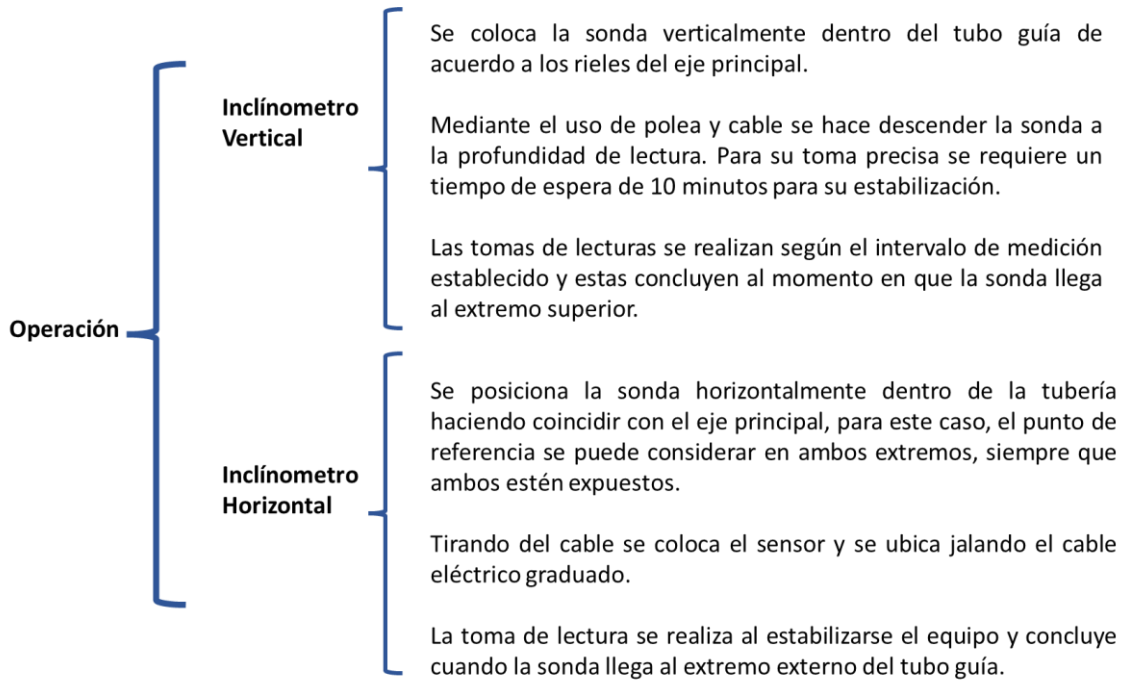


Diagrama 6. Operación de inclinómetros horizontal y vertical.



Ilustración 6. Operación en campo de sonda para inclinómetro vertical.

La captura de datos se realiza al pasar dos veces la sonda por la tubería para obtener las lecturas de A+ y A-. Al terminar la toma de lecturas para el eje A se debe extraer la sonda y girarla 180° para realizar las lecturas B+ y B- (González V.,2010).

Resultados

Para verificar el procesamiento de las lecturas del inclinómetro, lo más práctico es utilizar el software desarrollado por el fabricante. Esto ofrece una combinación de rapidez y eficiencia además de evitar los errores de transferencia de datos. Los perfiles acumulados de lecturas representan por su polaridad:

Vertical

Positivo (+) para desplazamientos hacia aguas abajo o margen derecha.

Negativo (-) para los ocurridos hacia aguas arriba o hacia margen izquierda.

Horizontal

Extremo lejano de referencia desplazamientos de polaridad:

negativos (-) indican movimiento hacia arriba,

positivos (+) indican movimiento hacia abajo.

Extremo cercano de referencia los desplazamientos de polaridad:

negativos (-) indican movimiento hacia abajo,

positivos (+) indican movimiento hacia arriba.

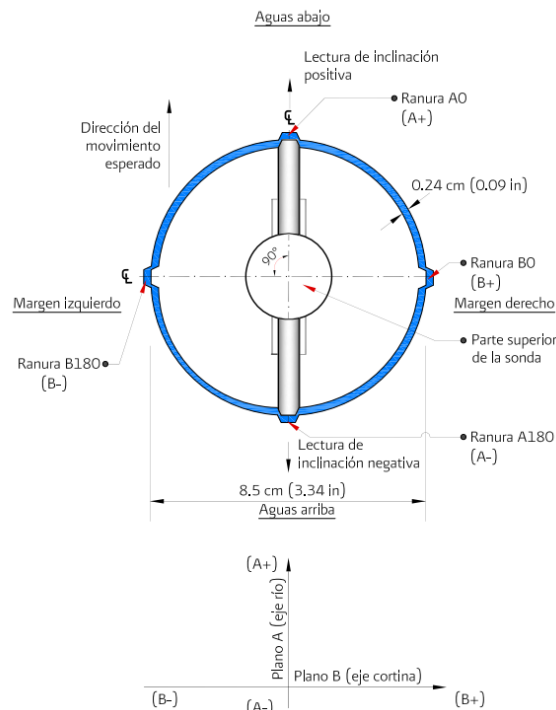
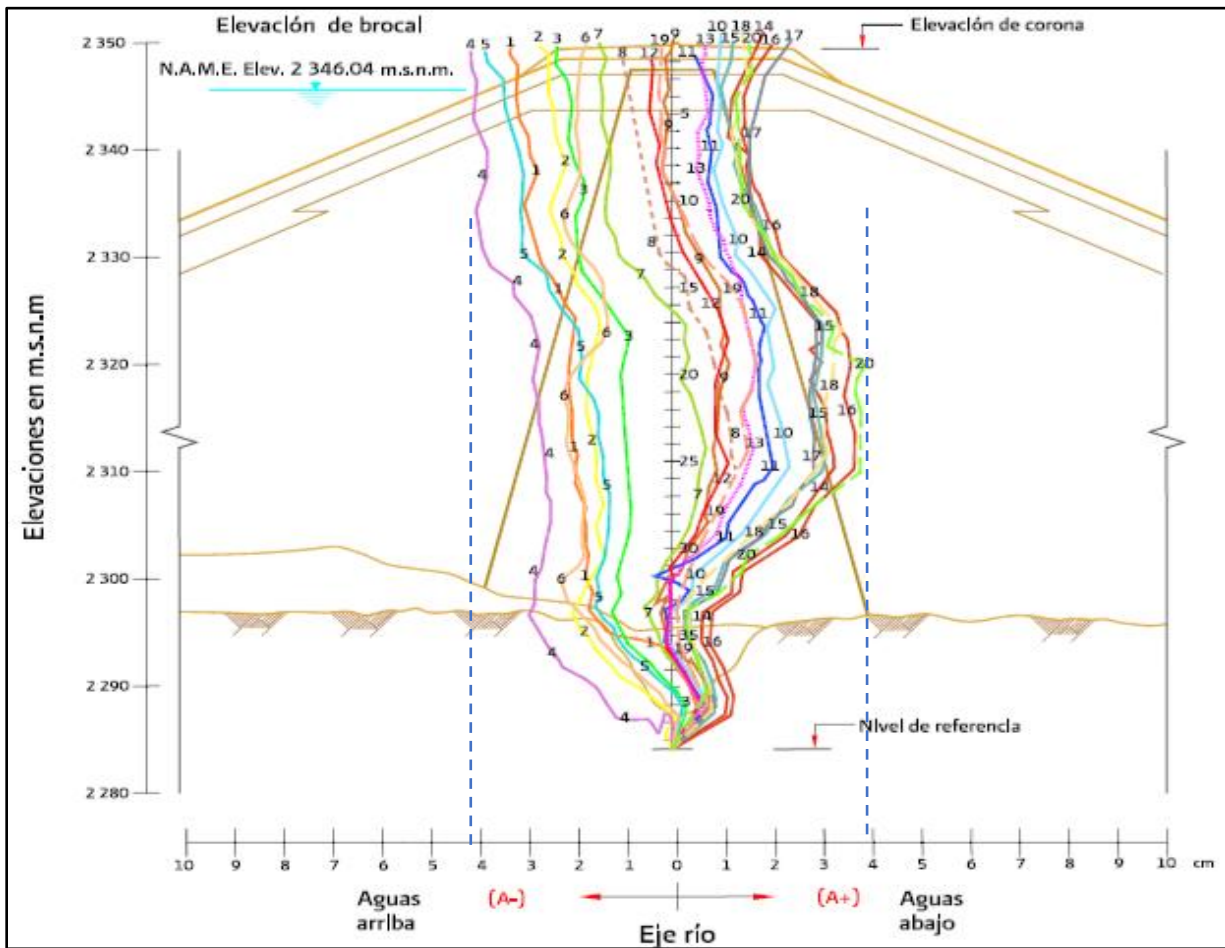


Ilustración 7. Sección transversal de tubería guía para inclinómetro No 2



Inclinómetro vertical No. 2	
Gráfica	Fecha
Inicial	1/Febrero/Año 1
1	23/Marzo/Año 1
2	2/Junio/Año 1
3	14/Oct/Año 1
4	14/Marzo/Año 2
5	8/Junio/Año 2
6	7/Dic/Año 2
7	14/Marzo/Año 3
8	23/Oct/Año 3
9	4/Dic/Año 3
10	1/Febrero/Año 4
11	22/Abril/Año 4
12	18/Junio/Año 4
13	10/Dic/Año 4
14	22/Enero/Año 5
15	27/Febrero/Año 5
16	29/Mayo/Año 5
17	8/Julio/Año 5
18	18/Nov/Año 5
19	10/Dic/Año 5
20	18/Febrero/Año 6

Ilustración 8. Resultados que arroja el inclinómetro 2 en la orientación del Plano A que corresponde con el eje del río instalado sobre corona en cortina de presa, cada línea representa una fecha de lectura como se muestra en la tabla a la derecha.

La instalación del inclinómetro se implementó considerando la dirección en la cual se espera el mayor desplazamiento (ilustración 7) de tal manera que esta sea paralela al Plano A es decir eje de río.

Se observa que las lecturas equivalentes a los primeros 3 años (ilustración 8) muestran una tendencia de desplazamiento aguas arriba posteriormente se observa una estabilización para los años consecuentes y el desplazamiento confluye hacia aguas abajo.

Entre el nivel 2300- 2330 se tiene los mayores desplazamientos, siendo los mayores de 4cm (línea azul discontinua).

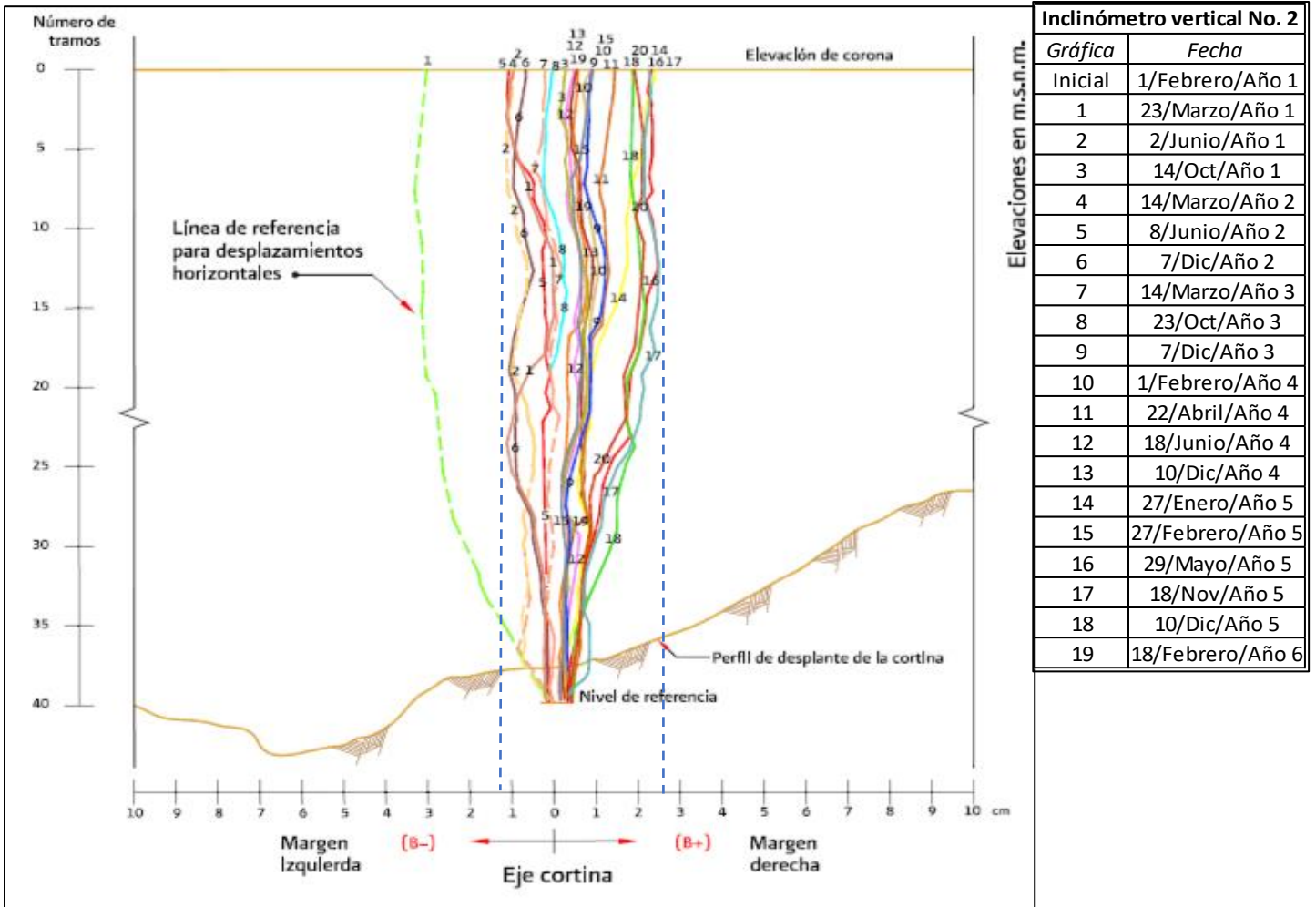


Ilustración 9. Resultado de inclinómetro 2 en corte de eje cortina coincidente con Plano B

El eje B se hizo coincidir con el Plano B, se observa el monitoreo que tuvo desde su instalación, a diferencia de la gráfica anterior los desplazamientos son menores y en su mayoría positivos que son equivalentes a hundimientos en dirección a la margen derecha de la cortina de presa. Los mayores presentan por debajo de los 3cm.

Representación de resultados

Para la presentación de resultados, las deformaciones verticales se les da convencionalmente un signo negativo (-) para asentamientos y positivos (+) para expansiones.

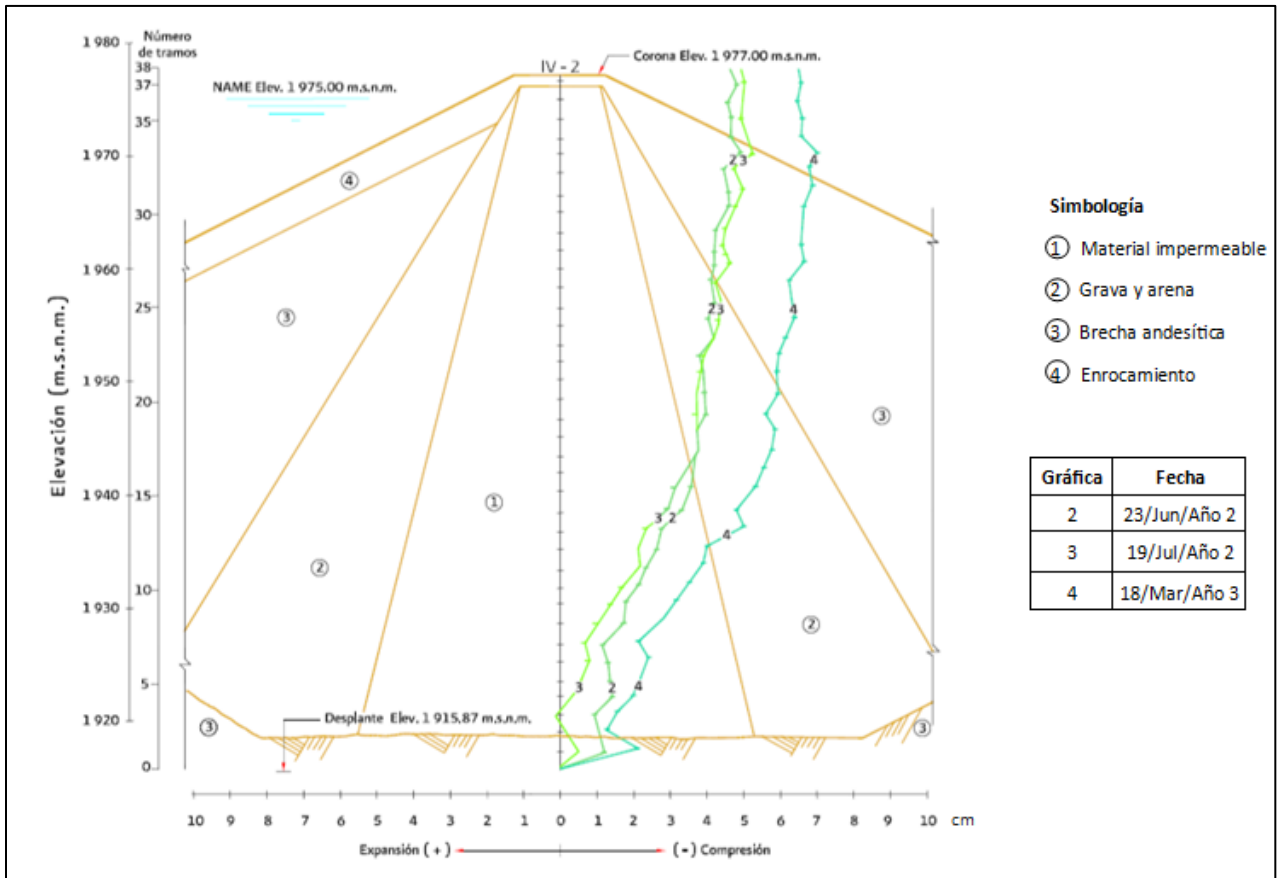


Ilustración 10. Gráfica de resultados, muestra asentamientos obtenidos de Inclinómetro vertical No. 2 Imagen tomada de Manual de Mecánica de suelos (CONAGUA,2012)

Para representar estas deformaciones, es necesario referenciar la tubería con sus correspondientes tramos, elevaciones, fecha, número de gráfica.

En la ilustración 10 se muestra el plano frontal que es paralelo al eje del río donde se registran los resultados que de acuerdo con su polaridad se reconocen como de tipo compresivos, es decir se presentan hundimientos.

Las deformaciones corresponden litológicamente a materiales como grava y arena a la base y brecha andesítica en la parte superior aguas abajo.

2.1 Instrumentación geotécnica de una autopista en suelos blandos (Contreras & Santoyo, 2012)



¿Dónde?

- Tramo que comunica al sur oriente con el norponiente del valle de México autopista Peñón Texcoco

Se presentaron:

- Asentamientos diferenciales (20 a 30 cm/año y en algunas zonas 5 a 7 cm/año.)
- Asentamientos en los terraplenes de acceso a los puentes.
- Agrietamientos del pavimento localizados

Posibles Motivos

- Abatimiento regional por extracción de agua de acuíferos profundos.
- Construcción sobre suelos blandos (arcillosos).

Objetivos de instrumentar

- Monitoreo de asentamientos, hundimientos regionales y condiciones hidráulicas.
- Evaluación de alternativas para aminorar efectos del comportamiento del subsuelo.

Ilustración 11. Ubicación de la autopista.

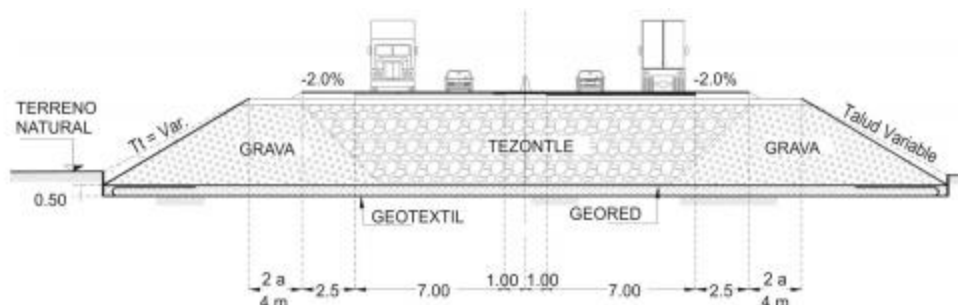


Ilustración 12. Sección de autopista Peñón Texcoco

Geología del sitio

Se ubica en la zona geotécnica conocida como Lago Virgen la cual se caracteriza por grandes espesores de arcillas blandas lacustres.

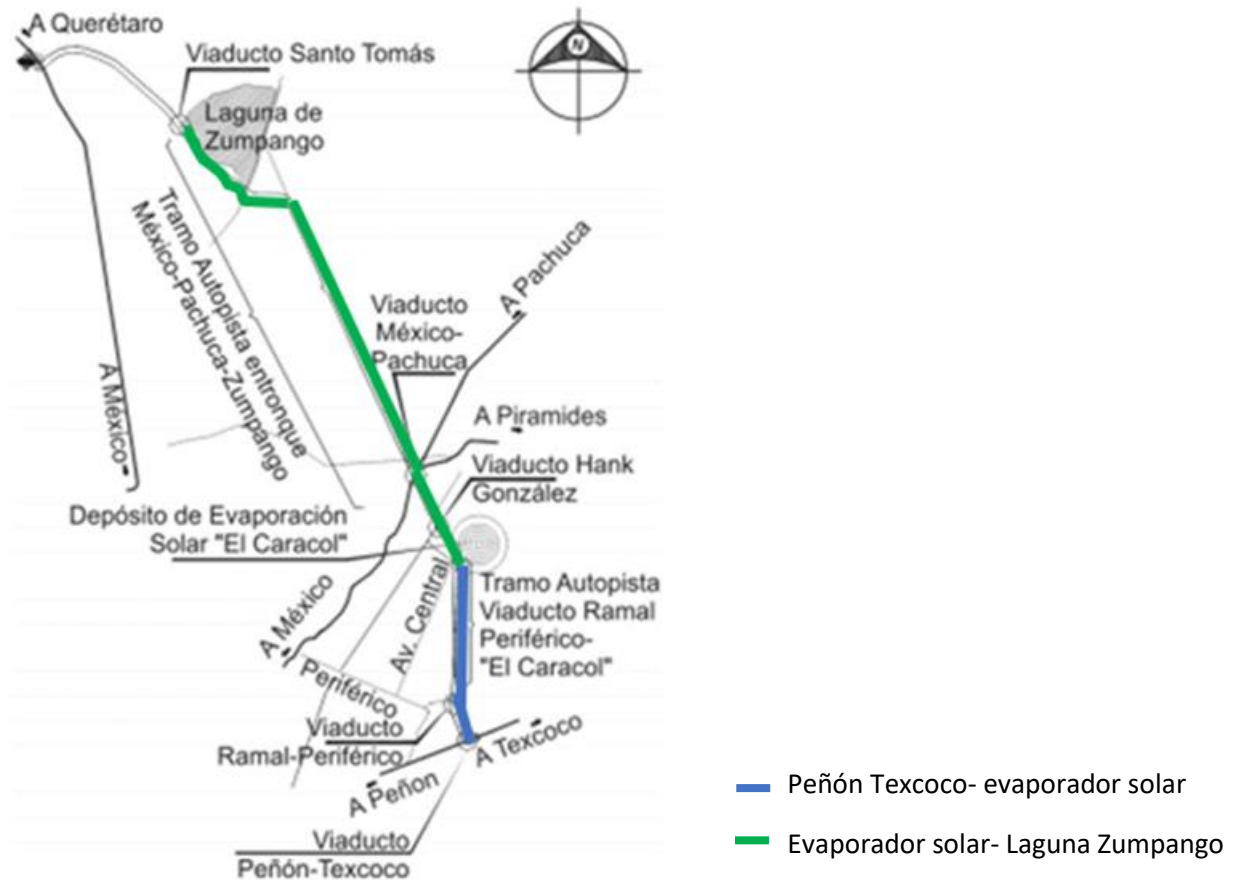


Ilustración 13. Zonas geotécnicas reconocidas.

Peñón Texcoco- evaporador solar: arcillas blandas de origen lacustre sobreyacen a capa endurecida por secado solar.

Evaporador solar y laguna Zumpango: la presencia de arcillas blandas compresibles se reduce dando origen a suelos más duros que presentan características de una zona de transición.

Inclinómetros verticales

Los inclinómetros colocados dieron como resultados desplazamientos horizontales máximos que van de 9 a 12 mm en la superficie, a continuación, se describen los gráficos obtenidos.

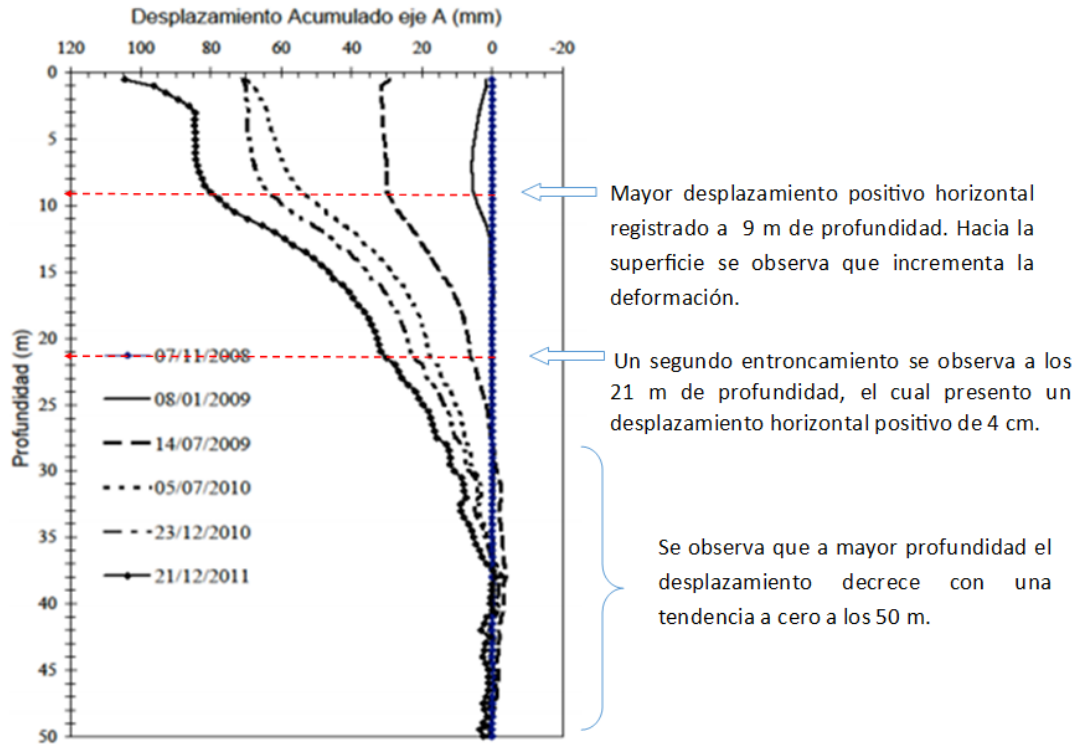


Ilustración 14. Inclinómetro localizado en Viaducto Peñón viejo

El segundo es un inclinómetro cercano a Río de Los Remedios.

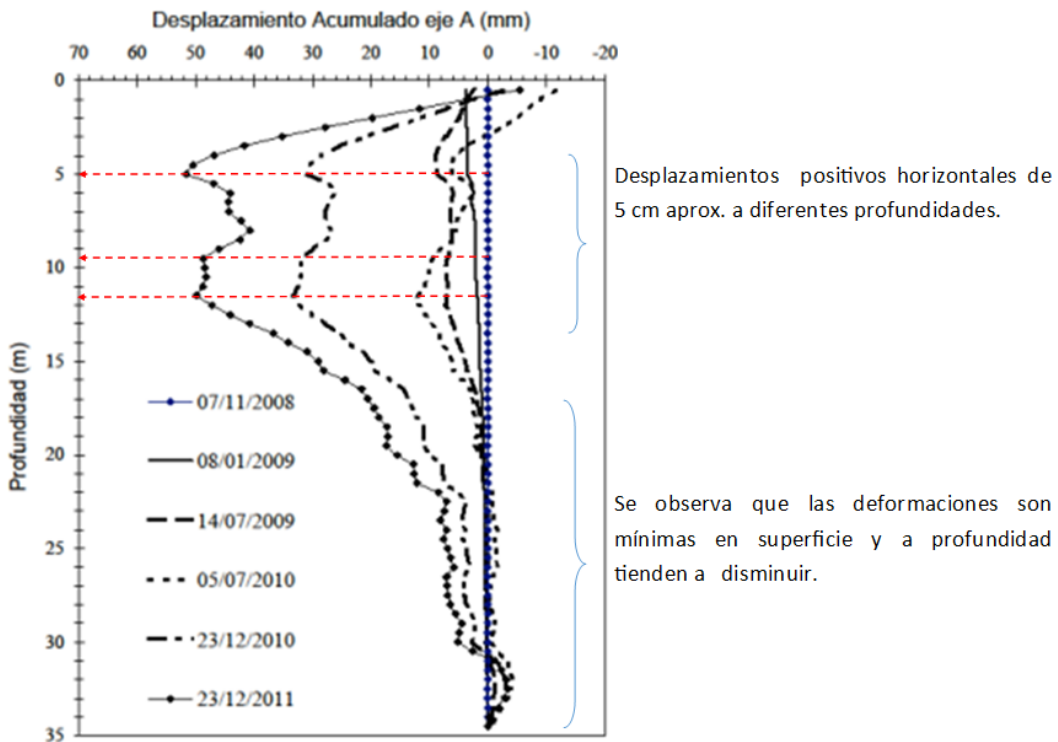
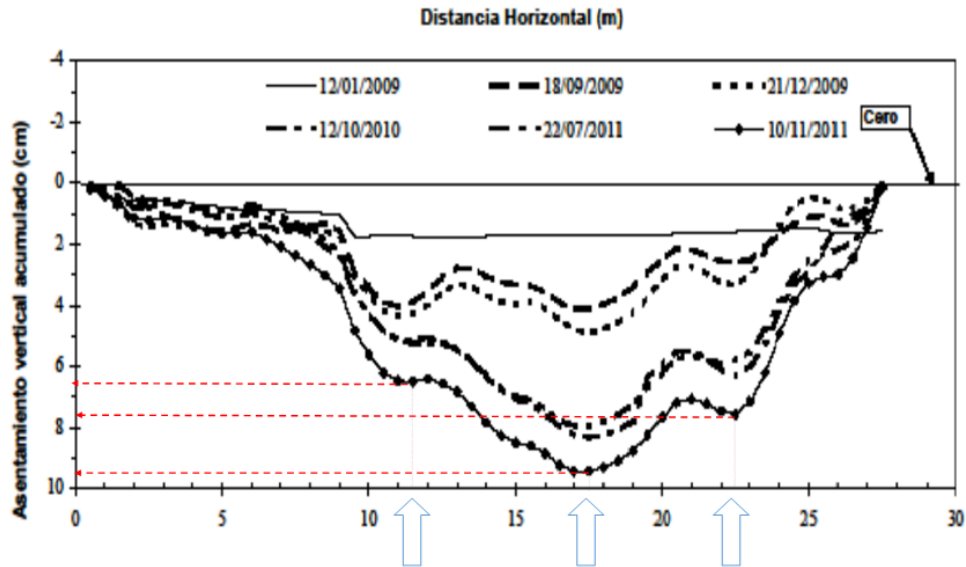


Ilustración 15. Inclinómetro localizado cercano a Río de los Remedios

Inclinómetros horizontales



Se presenta el mayor asentamiento vertical positivo de 9.5 cm a los 17-18 m de longitud. Hacia los extremos, es decir costados de la autopista, se presentan asentamientos menores con una tendencia a cero.

Ilustración 16. Inclinómetro horizontal instalado bajo terraplén de autopista.



Ilustración 16.1 Máquina de perforación horizontal empleada para colocar los inclinómetros horizontales en campo.

Estaciones piezométricas

Se encuentran distribuidas desde el norte del Lago Nabor Carrillo hasta el Evaporador Solar “El Caracol”.

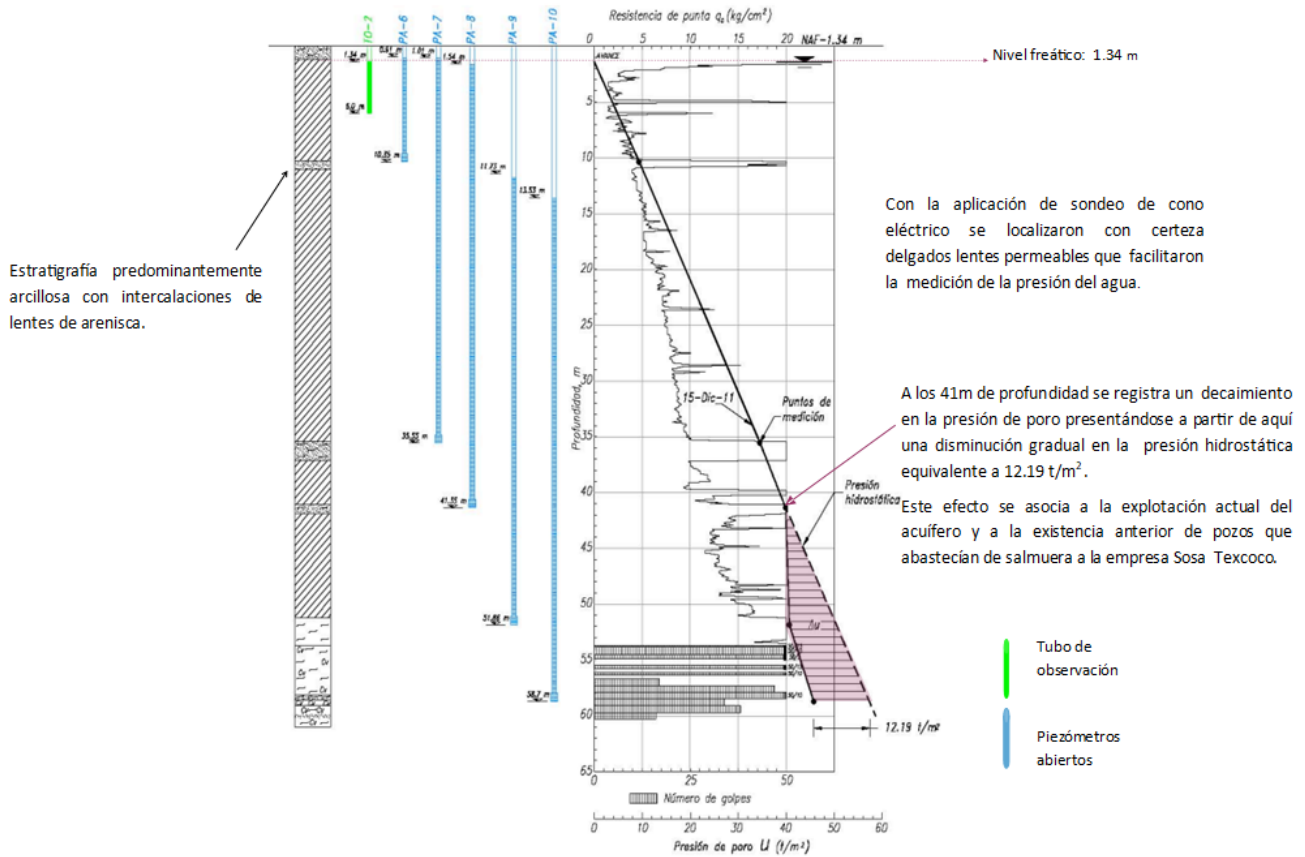


Ilustración 17. Gráficas de monitoreo de piezómetros.

Conclusiones

Se observa que las deformaciones en inclinómetros fueron mínimas en la superficie y estas tienden a crecer a la profundidad, dicha situación se puede asociar a los trabajos de reencarpertamiento por la formación de escalones en superficie.

Los resultados en el inclinómetro horizontal mostraron una mayor tendencia a presentar hundimiento al centro de la autopista.

Las características del suelo la hacen propensa a presentar constantes hundimientos, aunado a esto se presenta una disminución en la presión de poro causado por la sobreexplotación del acuífero.

De acuerdo con el informe la instrumentación aún continúa monitoreando y los resultados han permitido tomar medidas correctivas inmediatas y otras que a largo plazo requerirán de un mayor periodo de observación.

3 Piezómetros

Los piezómetros son instrumentos utilizados empleados para monitorear los niveles de agua en el subsuelo, necesarios en los controles de colocación del material de relleno, la predicción de la estabilidad de los taludes, el monitoreo de infiltración y la verificación de modelos de flujo (A. Hurtado, 2006). El principal uso en geotecnia es para conocer de antemano la presión debida a una columna de agua o presión hidrostática en un macizo rocoso, lo que puede constituir un peligro para las obras interactuantes con éste.

Los piezómetros tienen varias aplicaciones como el monitoreo sistemas de drenaje y presión de poro para determinar el coeficiente de seguridad en presas, rellenos, excavaciones o taludes.

Se pueden clasificar (Diagrama 7) en:

- Abiertos: Casagrande
- Cerrados: Neumático y Eléctricos



Diagrama 7. Tipos de piezómetros

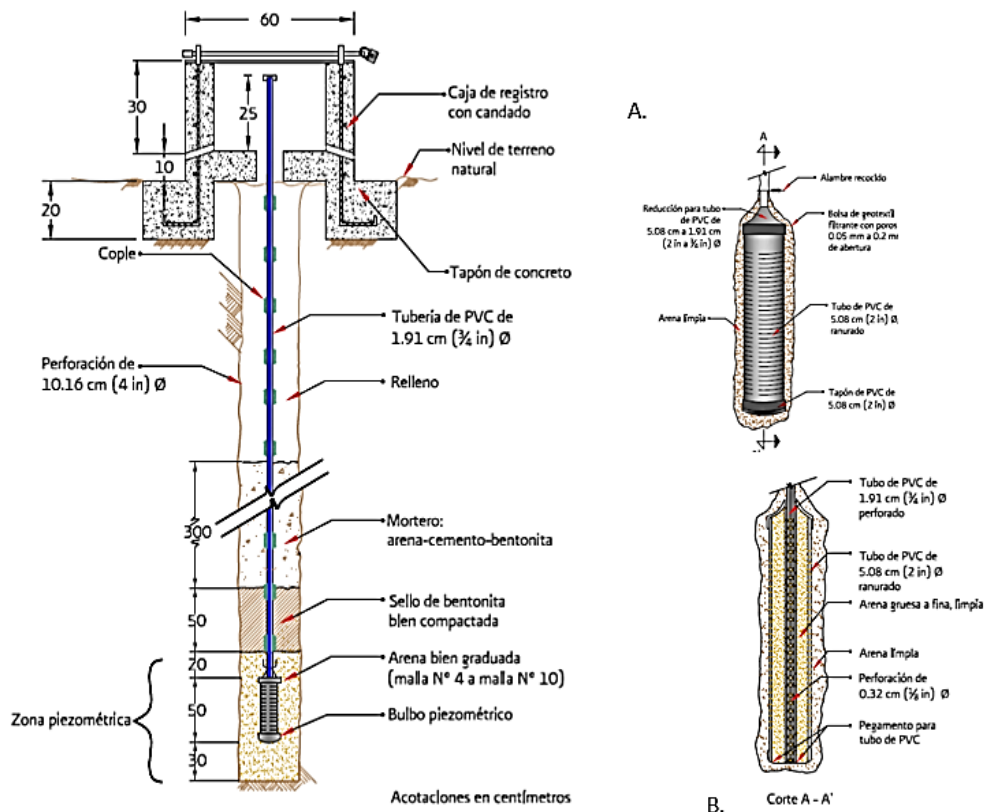


Ilustración 18. Instalación de piezómetro abierto

Instalación

Se requiere localizar topográficamente la posición del brocal con respecto a un banco de nivel.

A continuación, se realiza una perforación de 4", es necesario el uso de ademe metálico recuperable en suelos blandos e inestables. La perforación debe considerar 50 cm por debajo de la profundidad de localización del centro del bulbo piezométrico como se muestra en la ilustración 18.

Se rellena con arena (gruesa-media) bien graduada en un espesor de 30 cm sobre el fondo del barreno; en tanto, el piezómetro se envuelve en arena (gruesa- fina) sostenida por una malla de geotextil filtrante.

Para el descenso se acoplan los tramos de tubería de PVC, cuidando su limpieza interna. Al bajar el bulbo piezométrico a su posición, se debe tener cuidado con los tramos de tubería acoplados. El

bulbo se asienta sobre el relleno de arena y se vierte otra vez arena hasta alcanzar un espesor total de 1 m.

La zona piezométrica se sella con pellets de bentonita hasta alcanzar un espesor de 50 cm. Sobre este sello, se rellena el barreno con mortero arena-cemento bentonita hasta 3 m de espesor.

El tramo final de la tubería hacia la superficie se adapta para protegerse con un brocal. El tramo final de la tubería hacia la superficie se adapta para protegerse con un brocal. (CONAGUA,2012).

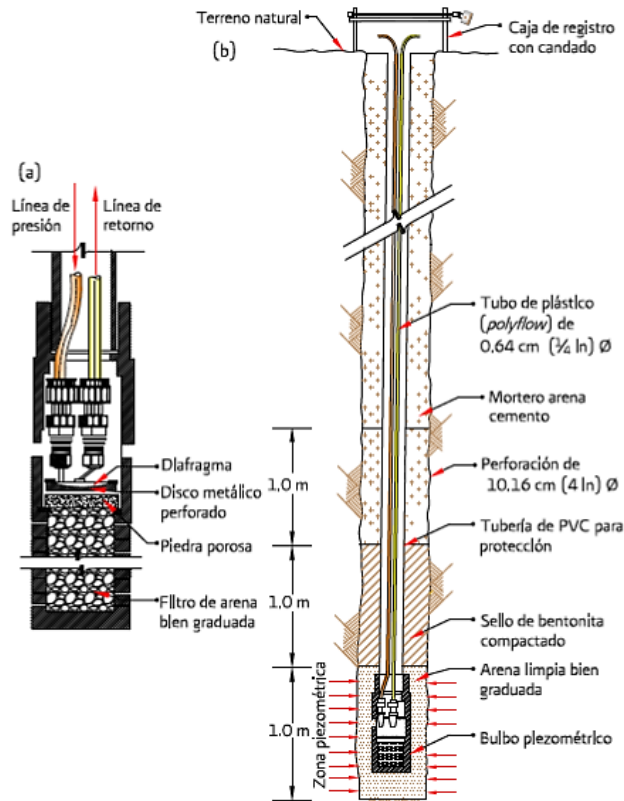


Ilustración 19. Instalación y componentes de bulbo piezométrico de tipo Neumático.

Instalación

Identificado el punto topográfico de instalación, se procede a la perforación vertical de un barreno de 4" de diámetro hasta una profundidad de 60 cm por debajo de la elevación del piezómetro.

En el fondo del barreno se vierte arena bien graduada para formar una capa de 30 cm. Antes de colocar el bulbo piezométrico en su posición, éste se empaqueta en arena limpia bien graduada de gruesa a media, envuelta con una tela de malla de mosquitero.

Antes de conectar las mangueras al bulbo piezométrico debe asegurarse que no presenten fugas, se comprueba agregando agua y aplicando una presión. Se debe considerar suficiente longitud de las mangueras para alcanzar la superficie.

Después de conectar las mangueras y de protegerlas con la tubería de PVC, se coloca sobre la arena previamente vertida; se agrega más gravilla hasta cubrir completamente el bulbo 40 cm sobre la conexión de las mangueras.

Para finalizar, se coloca el sello de pellets de bentonita con un espesor de 50 cm; el barreno se rellena con mortero-arena-cemento hasta 1 m sobre el sello y el resto del barreno se puede rellenar con el material producto de la perforación.

Una vez instalado el piezómetro, se registran los datos de identificación del bulbo.

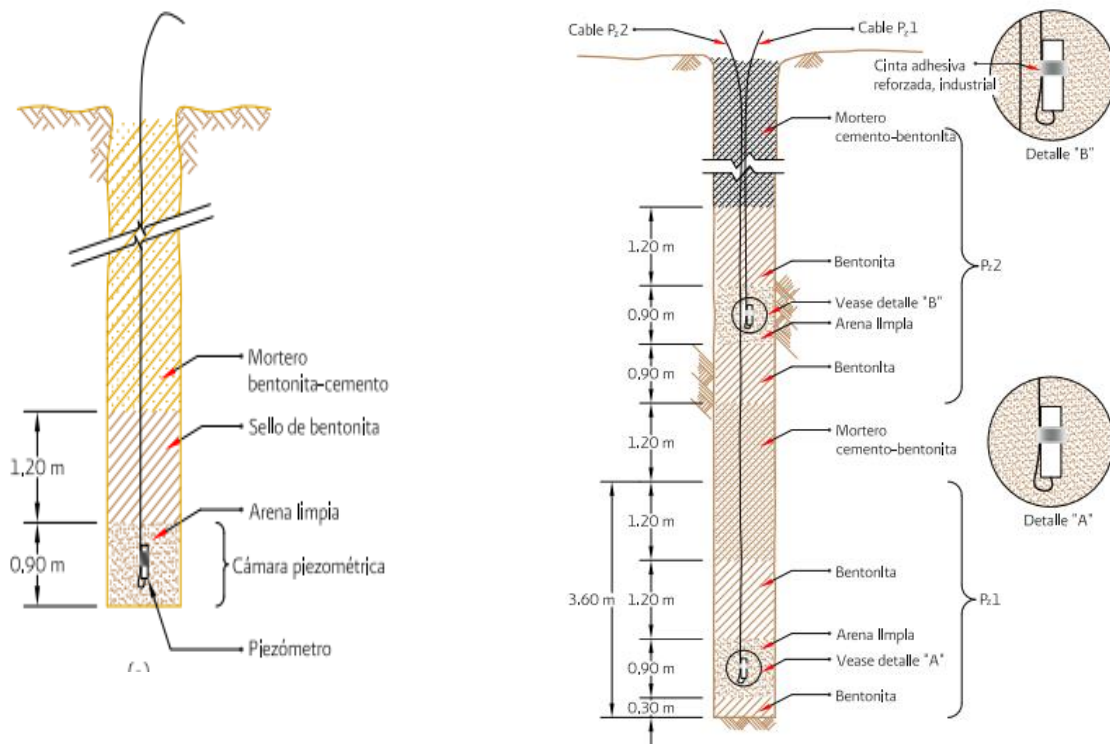


Ilustración 20. Instalación de piezómetros de cuerda vibrante

Instalación

Se tienen dos procedimientos; el primero es la técnica tradicional ya descrita en la instalación de los piezómetros abiertos. El segundo inicia con la perforación de 14 cm de diámetro, en este método se permite el uso de lodos estabilizadores o ademe metálico, para estabilizar las paredes del barreno.

Para inyectar la lechada es necesario el uso de un tubo de PVC de 1". Es necesario saturar el extremo del sensor que contiene el filtro de acuerdo con las instrucciones de cada fabricante.

A continuación, se coloca el sensor y se sujeta al tubo de inyección. Al conectar el cable eléctrico del sensor al tubo de inyección se debe procurar dejar un poco tenso el cable.

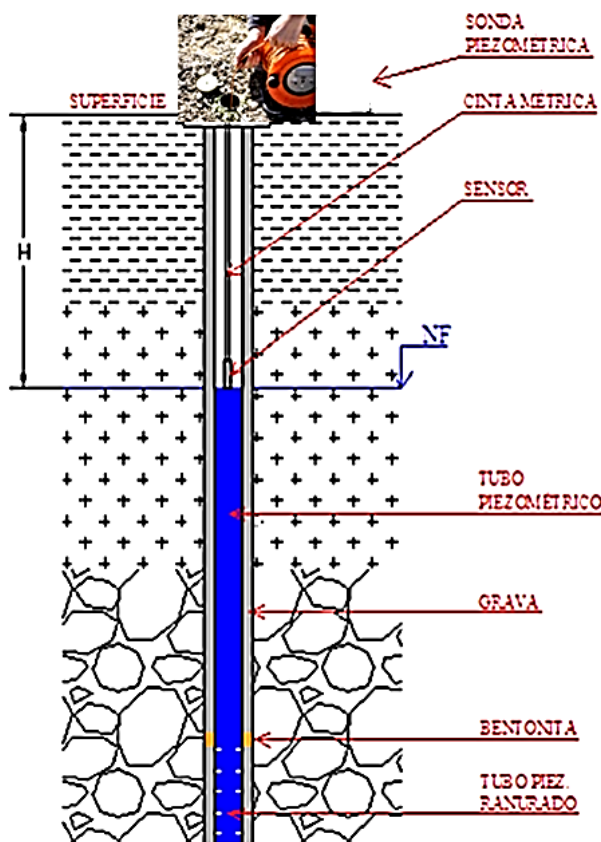
Se introduce y hace descender el tubo inyector con el sensor hasta ubicarse en la profundidad de proyecto. El cable del sensor se conecta al dispositivo de lectura.

Sincrónicamente se inyecta la lechada dentro del barreno y se extrae el ademe metálico (Método Tremie).

Las lecturas del piezómetro realizadas inmediatamente después de la instalación son altas con respecto a la lectura inicial y éstas van disminuyendo conforme el mortero está fraguando. (González S., 2011)

Operación

PIEZÓMETROS ABIERTOS



Se toma la lectura que corresponda en la posición del nivel del brocal; en su defecto, se marca el cable en ese punto y con una cinta métrica se mide la distancia entre este punto y el extremo inferior del cable

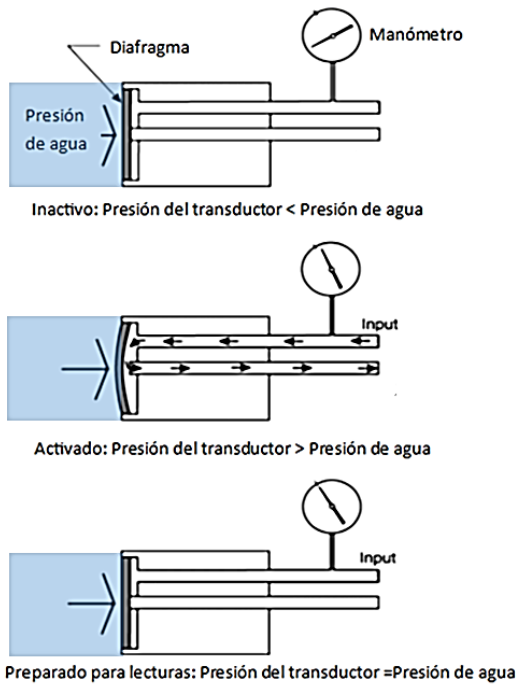
El sensor desciende dentro del tubo del piezómetro y, al encontrar la superficie del agua, el circuito eléctrico se cierra y se acciona el indicador.

La altura de la columna desde la elevación del bulbo piezométrico hasta el nivel del agua en la tubería es la medida de la presión de poro en ese punto.

Un bulbo poroso capta el agua del interior del suelo en el punto de interés y la presión actuante la eleva a través de una columna de agua que equilibra la presión en el bulbo piezométrico.

Ilustración 21. Medición y Operación de piezómetro abierto. Estudio sobre la instrumentación empleada en obras de metro. (Poza S., 2010)

PIEZÓMETROS CERRADOS



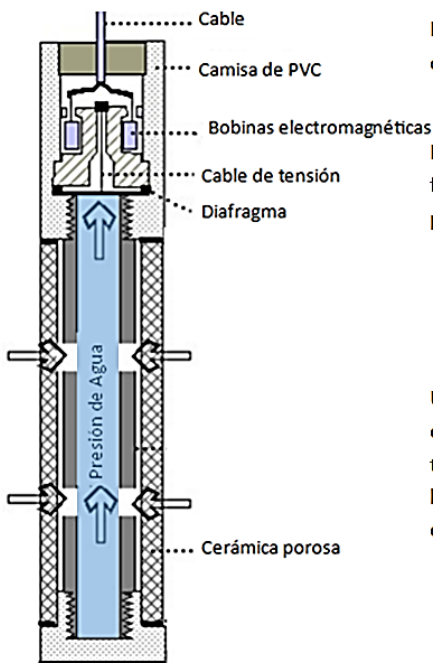
La manguera de inyección se conecta a la fuente de gas presurizado y al regulador de presión; la manguera de retorno se conecta al manómetro de medición de presión.

Se generan las condiciones para generar el flujo del gas hasta que la presión del gas iguala a la presión de poro y se cierra el diafragma.

La presión que queda atrapada en la manguera de retorno equilibra la presión de poro y se mide con el manómetro.

En el caso de no existir presión de poro, el valor indicado por el manómetro es cero. Dicha operación se repite al menos tres veces (Beltrán & Vintimilla, 2014).

Ilustración 22. Proceso de funcionamiento en piezómetros neumáticos. *erosión.com*



La señal que se transmite por el cable no se distorsiona con la longitud de éste.

La frecuencia de vibración de la cuerda varía en función de su tensión y ésta varía en función de la presión de agua (Beltrán & Vintimilla, 2014).

Un cambio en la presión de poro induce una deflexión del diafragma y, en consecuencia, un cambio en la tensión de la cuerda. La tensión en la cuerda se mide haciéndola vibrar para conocer su frecuencia natural de vibración.

Ilustración 23. Funcionamiento de piezómetro de tipo cuerda vibrante. *erosión.com*

del embalse de la presa, movimientos y las variaciones de los niveles del agua en los piezómetros; cada curva corresponde a la historia de presiones medidas de un piezómetro específico.

Se presentan en forma gráfica en el eje vertical de la gráfica se indican los valores de las lecturas, y en el eje horizontal, se indican los tiempos correspondientes a las lecturas. En el caso de representar las historias de las lecturas de varios piezómetros, es conveniente usar símbolos distintos para identificarlos.

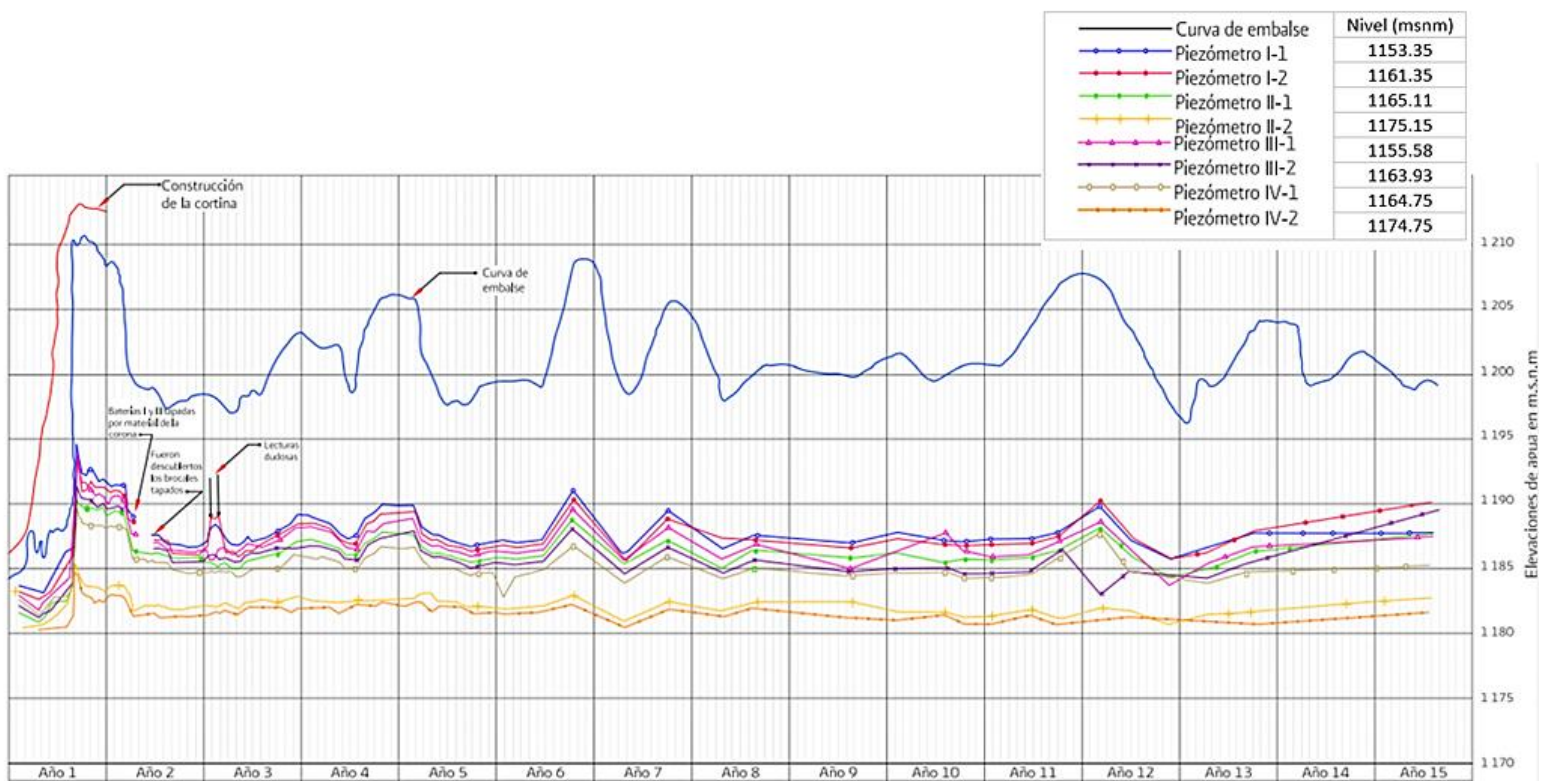


Ilustración 25. Gráficas de evolución de piezómetros abiertos en cortina de presa. Se presentan los valores obtenidos de ocho piezómetros instalados a lo largo de la cortina de presa.

Se observa similitud entre las elevaciones de las lecturas obtenidas al igual se tiene una correspondencia equidistante con la curva de embalse obtenida topográficamente.

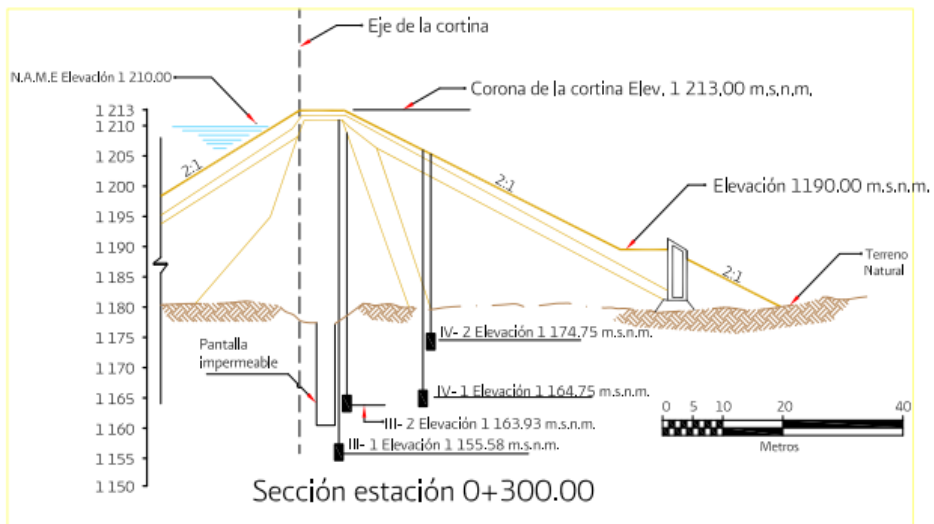
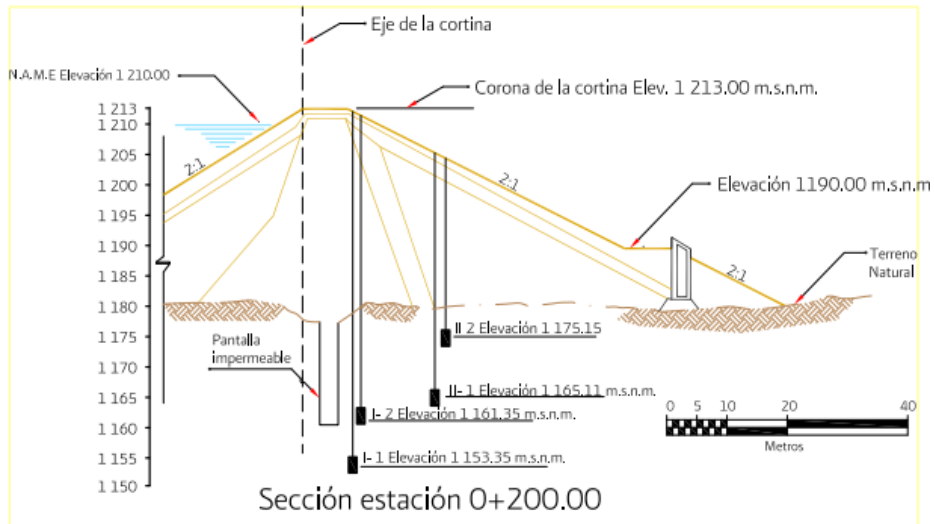


Ilustración 25.1. Ubicación de piezómetros, sección de estación. Tomado de Manual de Mecánica de suelos. (CONAGUA, 2012)

3.1 Instrumentación en corte Tepapatlaxco de Autopista México-Tuxpan (Pérez D., et al, 2012)

¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> • Corte Tepapatlaxco tramo que corresponde al subtramo 5 comprendido entre los km 860+660 y 861+100 del flanco Tuxpan.
Se presentaron:	<ul style="list-style-type: none"> • Desprendimientos y caídas de bloques de coluvión. • Fenómenos de reptación y de deslizamientos superficiales.
Posibles Motivos	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltración desfavorable • Grieta de Tensión • Propiedades geomecánicas
Objetivos de instrumentar	<ul style="list-style-type: none"> • Registro y monitoreo de desplazamientos (inestabilidad). • Toma de decisiones para mitigar los efectos de inestabilidad en el talud.

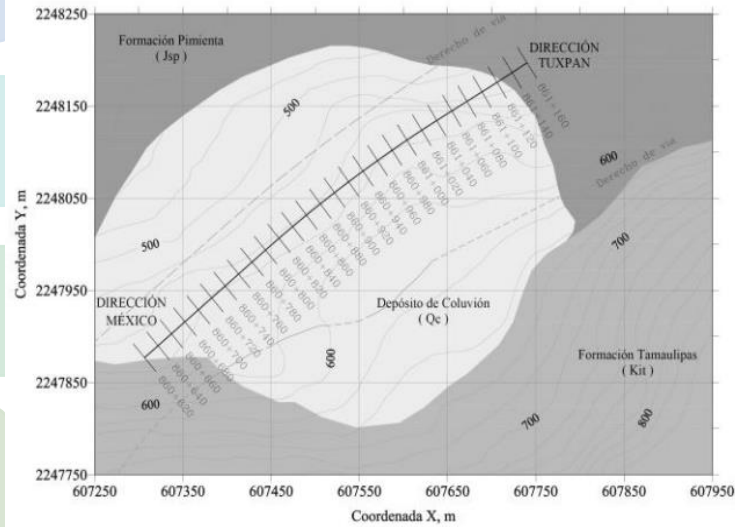


Ilustración 26. Mapa de sitio de corte Tepapatlaxco, se observa una protuberancia significativa, la cual se atribuye a un depósito coluvial, de ladera

Geología

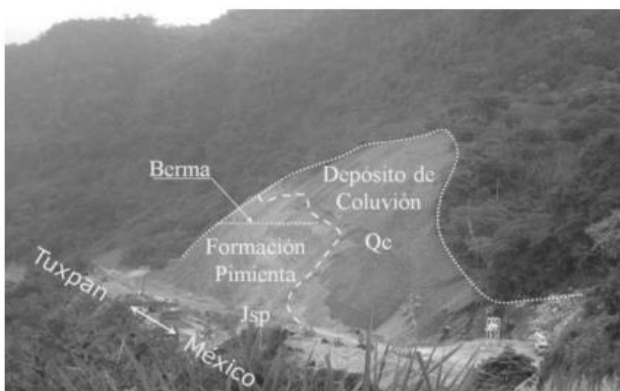


Ilustración 27. Corte Tepapatlaxco y Geología.

El corte en cuestión se ha excavado entre las elevaciones 540 y 610 msnm, sobre el corte afloran rocas sedimentarias calizas de la formación Pimienta (Jsp), cubiertas parcialmente por depósitos de ladera coluviales (Qc), formados en su mayor parte por el transporte y depósito de materiales provenientes de las rocas calizas sedimentarias de la formación Tamaulipas (Kit).

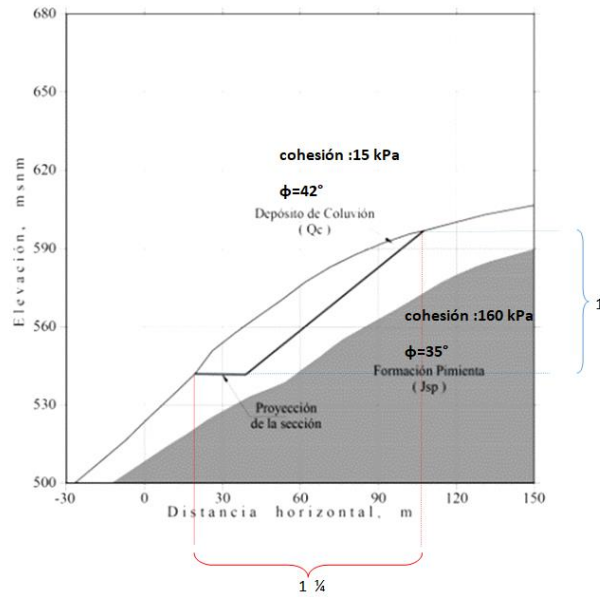


Ilustración 28. Proporciones de Talud, cohesión y ángulos de fricción que presenta cada tipo de macizo rocoso.

El espesor real de la masa coluvial se intentó obtener mediante perforaciones, en donde ninguno de los intentos logró avanzar lo suficiente para encontrar la profundidad del nivel de roca sana (formación Pimienta), porque las perforaciones se cerraban continuamente.

Instrumentación geotécnica

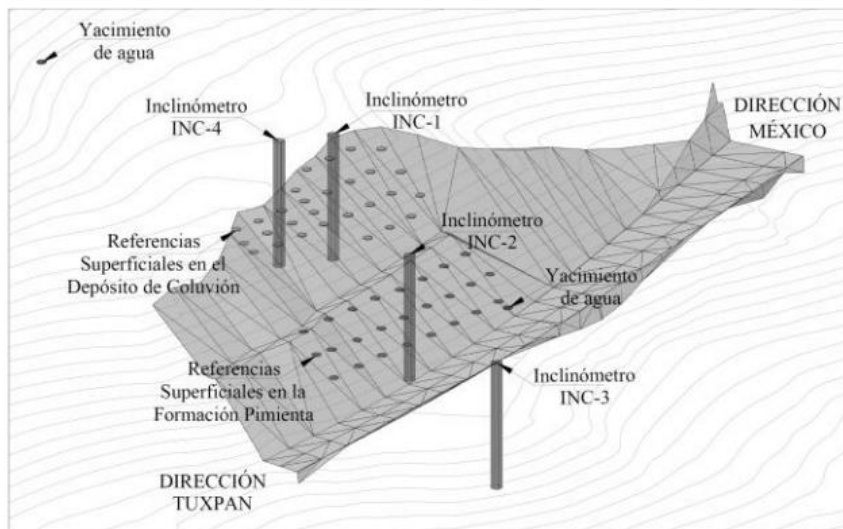
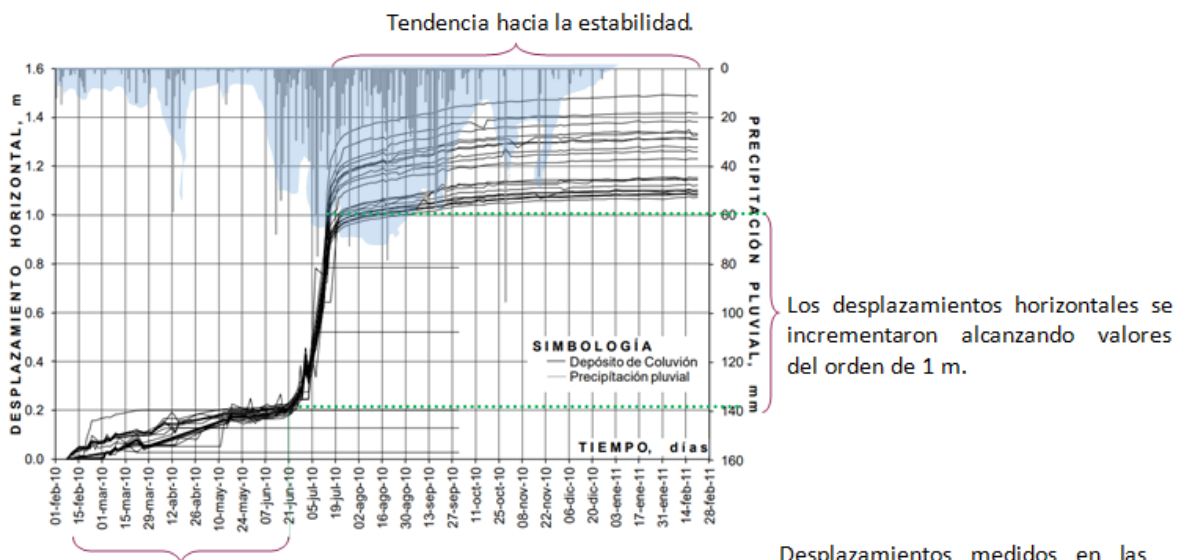


Ilustración 28. Modelo en 3D de la ubicación de la instrumentación en el corte Tepapatlaxco.

Referencias superficiales.

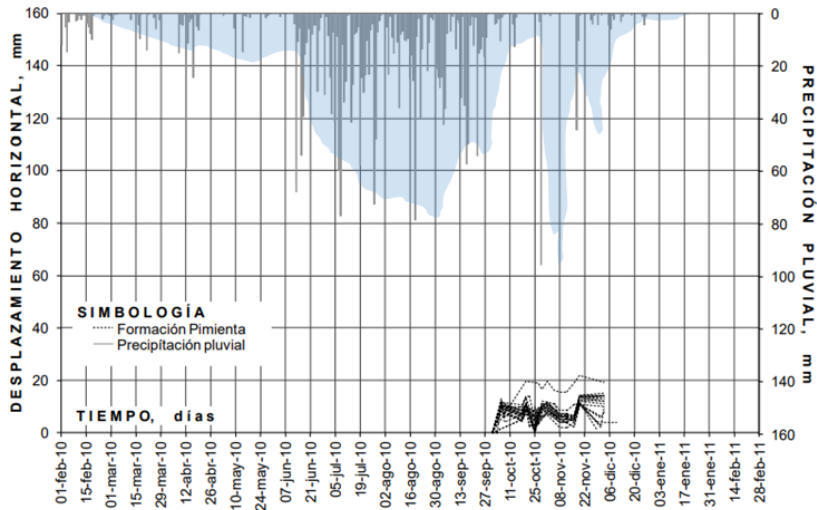
En la siguiente gráfica se presenta la variación de los desplazamientos horizontales medidos en el depósito de coluvión Y Formación Pimienta y la precipitación pluvial, a través del tiempo.



Durante la etapa de excavación del corte, se presentaron desplazamientos en el depósito de coluvión, asociables a la relevación de esfuerzos en el macizo rocoso, por la apertura del corte.

Desplazamientos medidos en las direcciones X y Y hacia el noroeste, es decir hacia la carretera.

Ilustración 29. Gráfica de datos obtenidos en referencias superficiales en depósito de coluvión.

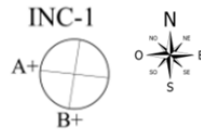
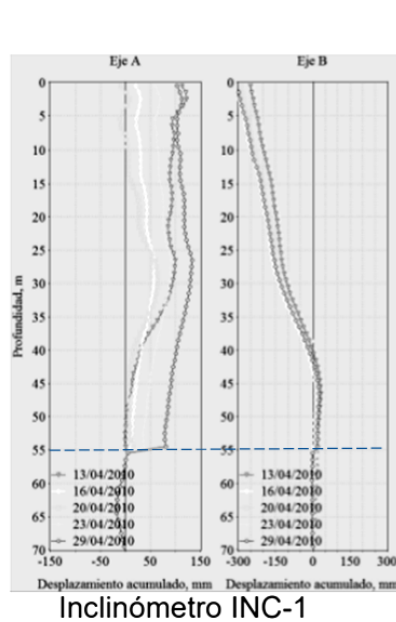


Se observa la variación de los desplazamientos horizontales registrados en la formación Pimienta, los cuales son prácticamente despreciables.

Ilustración 30. Gráfica de datos obtenidos en referencias superficiales en Formación Pimienta.

Inclinómetros

Inclinómetro INC-1 se instaló sobre la superficie de depósito de coluvión y llegó a 70 m de profundidad.

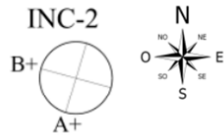
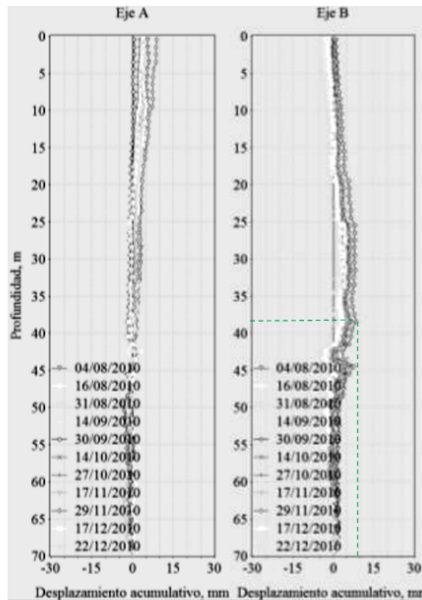


Se observa que el desplazamiento acumulado es mayor hacia la superficie, es decir donde se presenta el depósito de Coluvión y disminuye posterior al contacto con la Formación Pimienta

A 55 m de profundidad se localizo la zona de deslizamiento que coincide con el contacto entre el depósito de coluvión y la formación Pimienta.

Ilustración 31. Gráfica de datos obtenidos en Inclinómetro 1 sobre corte.

Inclinómetro INC-2



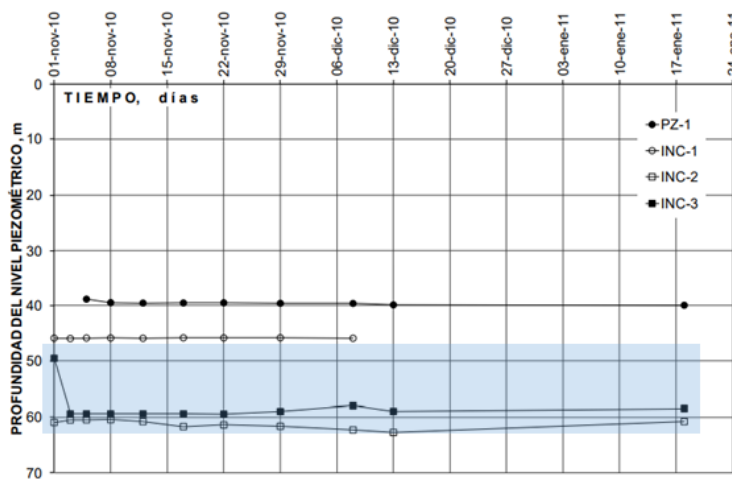
Se colocó en la berma intermedia del corte, la cual se encuentra sobre la Formación Pimienta, se observa una mayor estabilidad representada por los mínimos desplazamientos registrados.

Los desplazamientos horizontales medidos en este inclinómetro fueron menores a 0.01 m y fueron ubicados entre los 25 –38 m de profundidad.

Inclinómetro INC-2

Ilustración 32. Datos de inclinómetro 2 instalado sobre corte.

Piezómetros



La profundidad del nivel piezométrico, se ubica casi en la frontera entre el depósito de coluvión y la formación Pimienta.

Esto sugiere que la superficie de deslizamiento se encuentra saturada.

Ilustración 33. Comparación de nivel piezométrico respecto a inclinómetros instalados.

Conclusiones

Al ubicarse el nivel piezométrico en los límites del depósito de coluvión con la Formación pimienta se considera un factor detonante de los desplazamientos y esto aumenta más en temporadas de lluvia por la recarga de agua.

Una manera de mitigar el desplazamiento fue la colocación de drenes entre el contacto de ambos macizos rocosos.

La instrumentación ha permitido monitorear de manera más clara y eficiente los desplazamientos que se tienen sobre el corte y los análisis previos sobre las dimensiones del talud permitieron inferir que el corte en cuestión era estable, esto respaldado por sus factores de seguridad.

El corte logro estabilizarse, de acuerdo con la evolución de un deslizamiento y predicción teórica de la rotura en un corte, llego a la etapa de estabilización parcial antes de fallar totalmente.

4 Extensómetros

Los extensómetros son instrumentos para medir el movimiento relativo comparando la distancia entre dos puntos de una forma manual o automática, cuya separación inicial se conoce. Se colocan de manera externa o interna en todo tipo de estructura para determinar la magnitud de las deformaciones lineales, ya sean horizontales, verticales o con cualquier ángulo que se necesite. Generalmente, se instalan a través del escarpe principal o a través de las grietas (Gómez & Quintanilla, 2016).

Los extensómetros se pueden clasificar en:



Diagrama 8. Clasificación de extensómetros.



Diagrama 9. Aplicaciones de los extensómetros.

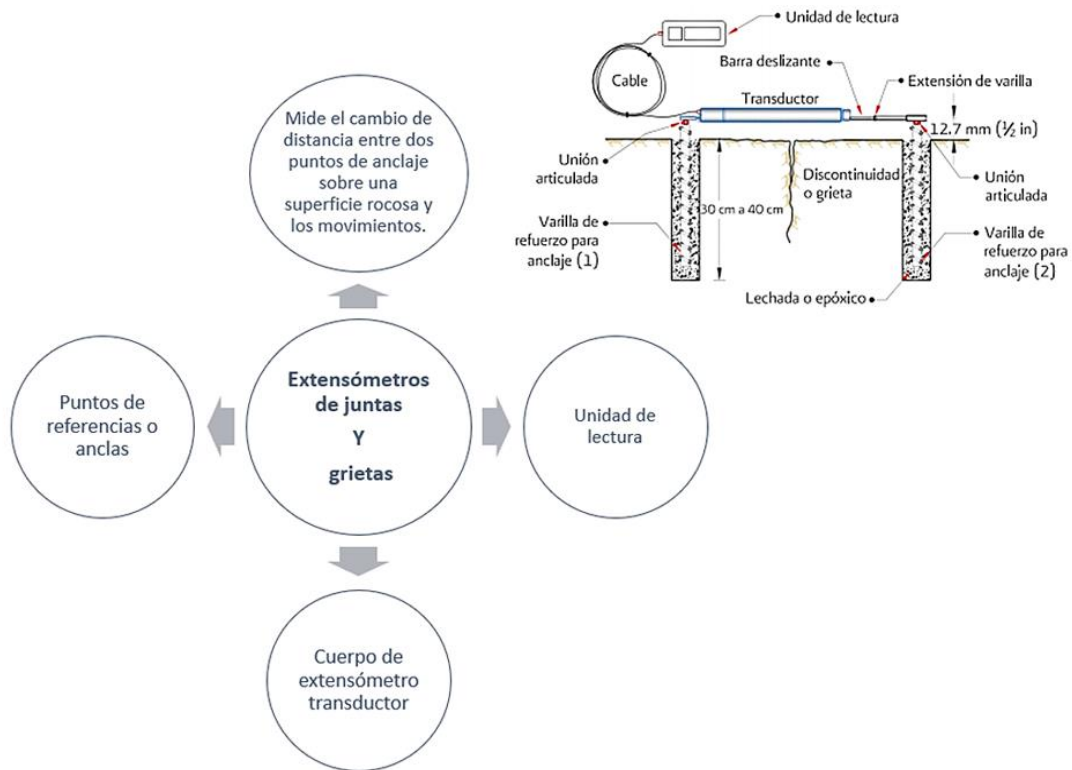


Ilustración 34. Componentes de Extensómetros de juntas y grietas e instalación.

Instalación

Ubicar el sitio de observación y fijar las dos anclas dentro del terreno. En suelo las anclas deberán empotrarse alrededor de 40 cm; y en roca de cuando menos 30 cm donde se introducirán las anclas. Posteriormente rellenar el hueco con lechada o con algún tipo de epóxico resistente. Las anclas deben sobresalir de la superficie cuando menos 12.7 mm para colocar el instrumento de medición.

A continuación, se instala el cuerpo del extensómetro de manera que una a las dos anclas y se realiza una primera lectura y verificación de la medida con otro tipo de equipo (cinta, calibrador, etc).

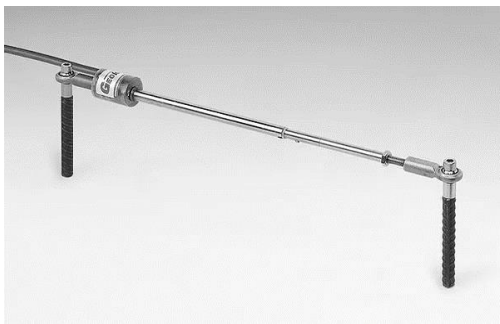


Ilustración 35. A. Extensómetro de cuerda vibrante eléctrica. Tomado de Geokon.com B. Supervisión de un talud rocoso durante la excavación con explosivos del Túnel de La Roche (Suiza) con extensómetro superficial (SOLOEXPERTS,2016)

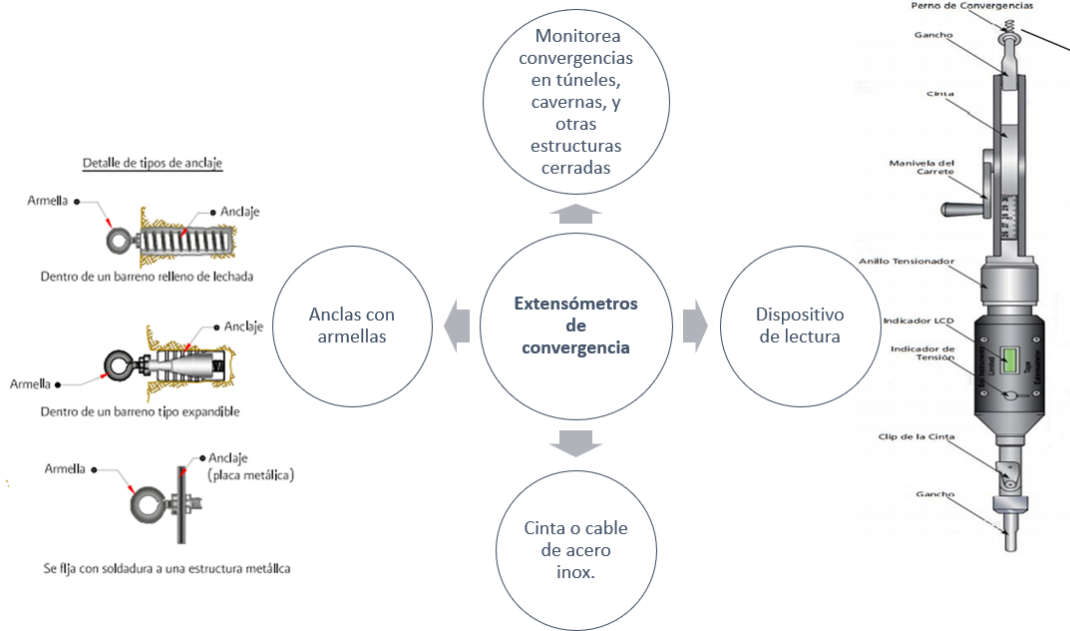


Ilustración 36. Componentes de extensómetro de convergencia e instalación.

Instalación

Se establecen los dos puntos de referencia a continuación, se perfora con taladro a una profundidad de 1.27 cm más la longitud del ancla.

Se colocan las anclas dentro de la perforación y se inyecta la lechada o resina. Con ayuda del carrete se desenrolla la cinta del extensómetro con la longitud necesaria para alcanzar los dos puntos de referencia.

Se sujeta el extensómetro con los ganchos de seguridad a las armellas, es necesario tensar la cinta de manera estándar alineando las dos marcas de control.

Se hace registro de la distancia mediante la unidad de lectura y se verifica que la lectura sea estable. (SISGEO, 2016)

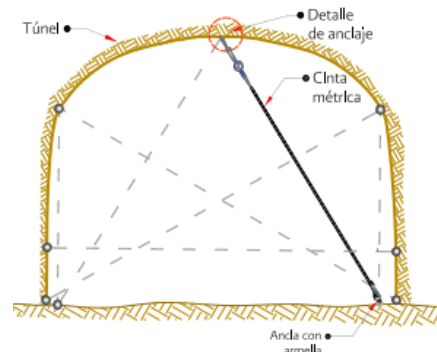


Ilustración 37. Mediciones con cinta de convergencia en túnel (Vall González, 2016)

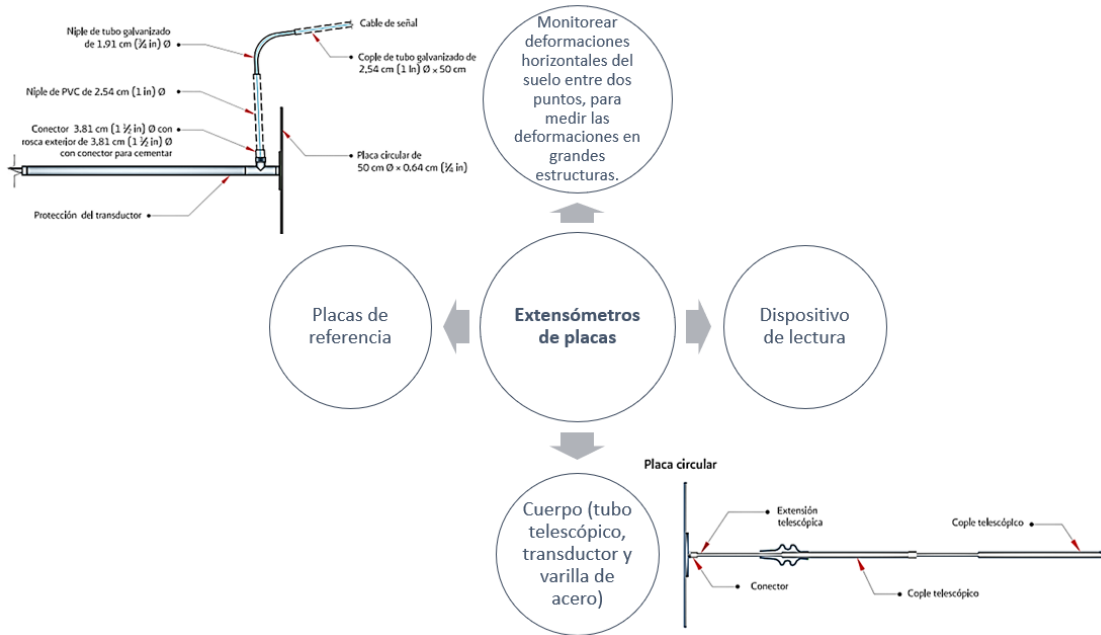


Ilustración 38. Extensómetro de placas y sus componentes.

Instalación

Se localiza topográficamente el sitio y se zanja de profundidad suficiente para alojar las placas de referencia. Se debe apoyar bien la tubería de protección de la varilla del extensómetro, para lo cual se extiende una delgada capa de arena compactada en el fondo de la excavación. La placa externa se une con la varilla y se va introduciendo en los tubos de protección telescópica, situando la varilla en la posición de proyecto se embebe la placa de acero en la cavidad, rellenándola de concreto para lograr anclar media placa.

Se procede a dejar el extensómetro en la posición adecuada, es decir, dando espacio suficiente para medir acortamientos o alargamientos. (SISGEO.COM)

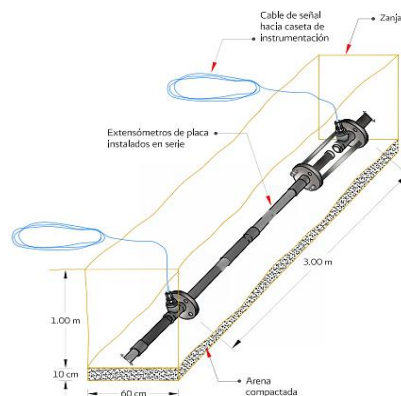


Ilustración 39. Extensómetro interno de placa, proceso de instalación en zanjas. Tomado de SISGEO.COM

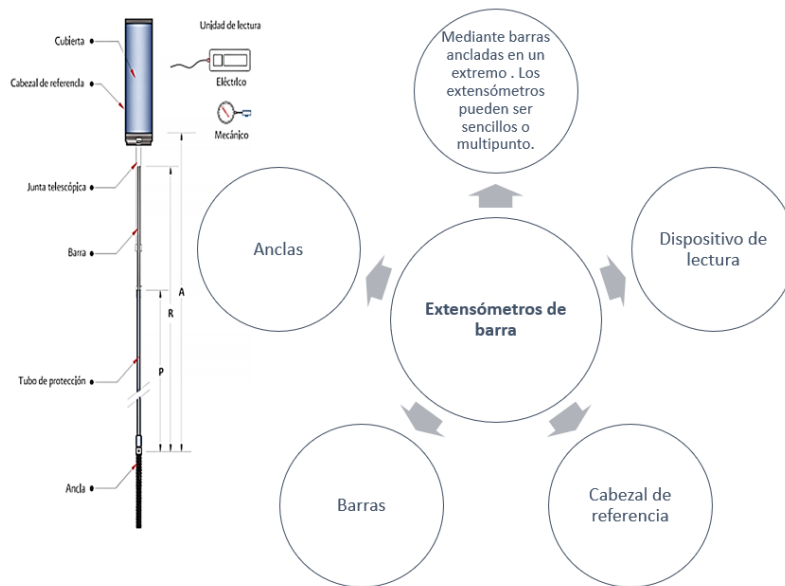


Ilustración 40. Extensómetros de barra y componentes.

Instalación

El extensómetro de barras se instala en barrenos entre 61 mm a 96 mm de diámetro, comprobando que pasen todos los componentes del extensómetro.

En cada barreno se pueden colocar de una a ocho barras, la dificultad de instalación crece al aumentar el número de anclas en un mismo barreno. Cada barra se fija al barreno en su extremo inferior mediante un ancla.

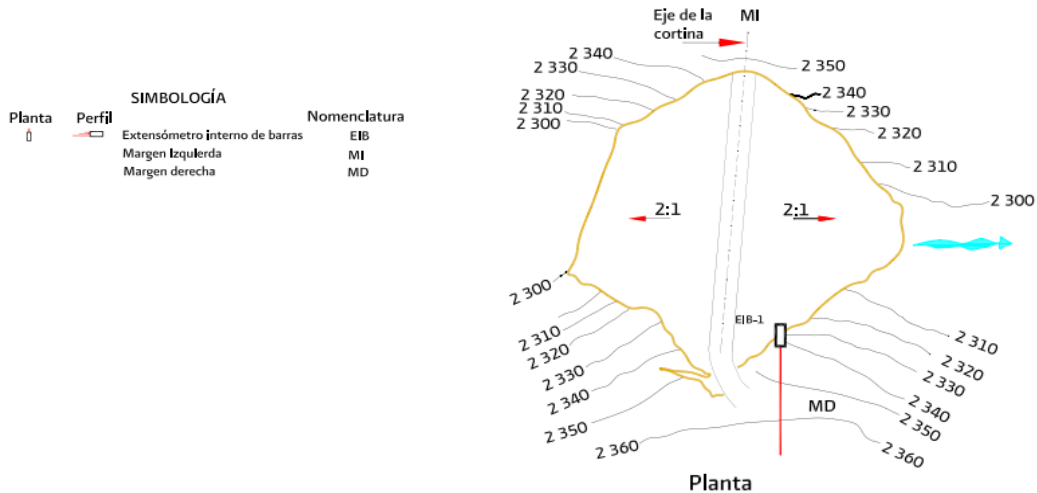
El otro extremo de la barra se fija al cabezal de referencia, el cual a su vez se fija firmemente a la boca del barreno. El criterio para la selección del anclaje se basa en que resista la aplicación de una carga de 100 kg. (Vall Gonzalez,2016)



Ilustración 41. A. Extensómetro de barras interno de punto múltiple. Tomado de GEOKON.COM B. Toma de lecturas en un extensómetro de barras con un micrómetro. Tomado de Instituto de Investigaciones: idia.unsj.edu.ar

Representación de resultados

Los resultados obtenidos se deben dibujar a una escala que permita observar con claridad los movimientos; asimismo, es necesario que las deformaciones se grafiquen contra el tiempo, y se indique la elevación y el avance de la construcción; datos que son necesarios para correlacionar los movimientos. Las extensiones se representan con signo positivo (+) y las compresiones con signo negativo (-), las cuales se indican sobre el eje vertical.



Croquis de localización

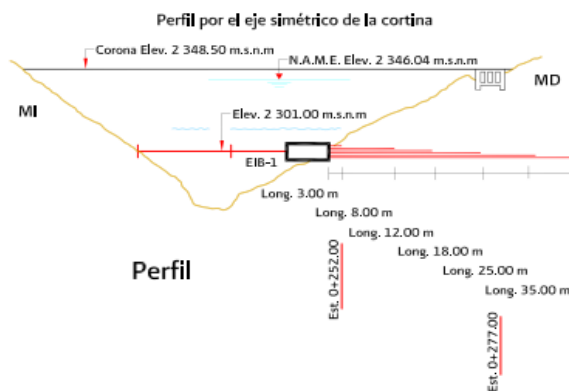


Ilustración 43. Croquis de localización en perfil y planta de extensómetro interno de barras múltiple EIB. Tomado de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

El extensómetro fue instalado en el margen derecho del río en dirección aguas abajo, al ser de tipo múltiple, presento mediciones a distintas longitudes, (6 barras instaladas) como se muestra en la imagen de perfil.

Registro de lecturas del Extensómetro Interno de Barras-1 (EIB-1)

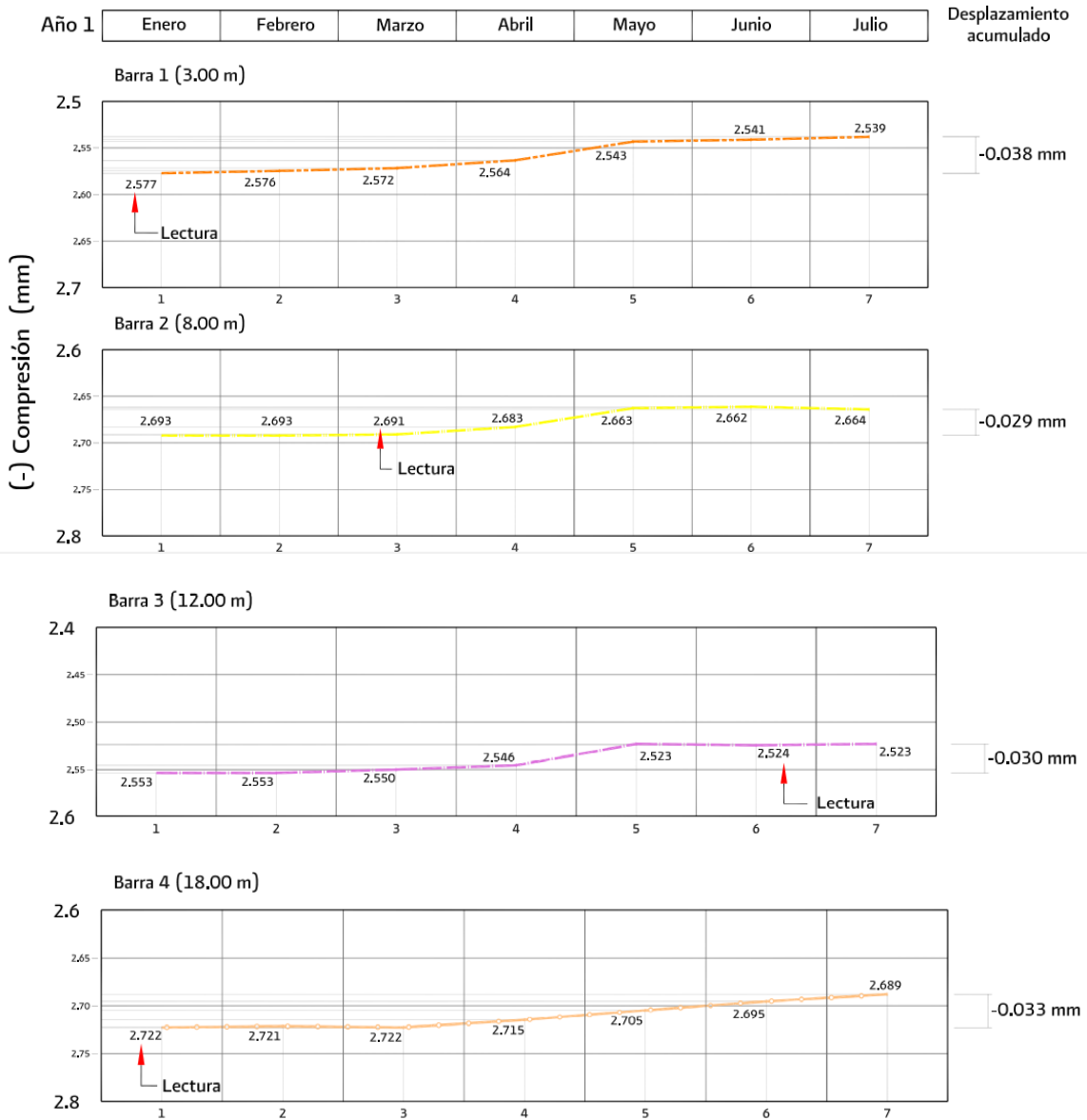


Ilustración 44. Gráficas obtenidas de las tomas de lecturas realizadas en IB1 se muestran desplazamientos acumulado durante siete meses en 4 de las 6 barras instaladas. Tomado de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

En las dos primeras gráficas que corresponden a barras más superficiales (3m y 8m) se observaron cambios al tercer mes, aunque mínimos y tendieron a aumentar hacia los siguientes meses, para el mes de junio presentan tendencia a la estabilidad. En las dos últimas gráficas correspondientes a barras de 12m y 18m los desplazamientos se percibieron al cuarto mes aproximadamente. La barra de 12m presento una mayor estabilidad a partir del mes de junio, mientras que la barra de 18m aun no muestra una notoria tendencia a estabilizarse. En general se puede observar que los desplazamientos son mínimos.

4.1 Instrumentación en túneles de conducción de río Grijalva, Chiapas (Vargas A., et al, 2012)

¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> • Presa Peñitas a la altura del poblado Juan del Grijalva en Chiapas
Se presentaron:	<ul style="list-style-type: none"> • Deslizamiento de tierras aguas arriba. • Desprendimiento en frentes de excavación.
Posibles Motivos	<ul style="list-style-type: none"> • Rocas blandas limolitas con rápida alteración • Cambios de humedad • Sistemas de discontinuidades, fracturas y fallas verticales • Presencia de flujo de agua y filtraciones.
Objetivos de instrumentar	<ul style="list-style-type: none"> • Prevenir el riesgo por inestabilidad de la excavación. • Indicar la necesidad de tratamientos adicionales. • Facilitar las adecuaciones al proyecto.

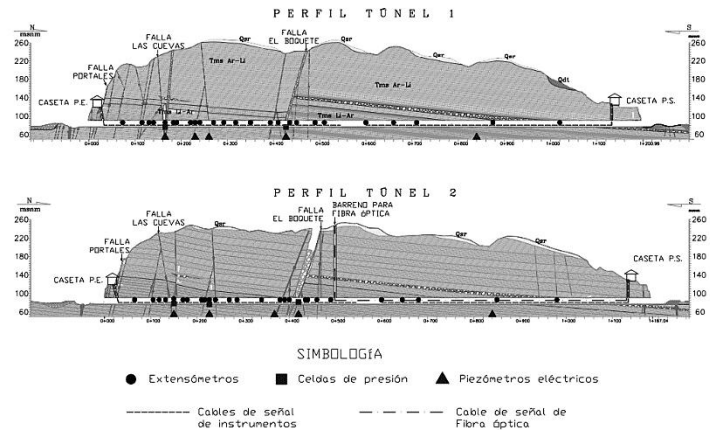


Ilustración 45. Perfiles de túneles de conducción de río Grijalva con principales sistemas de fallas.

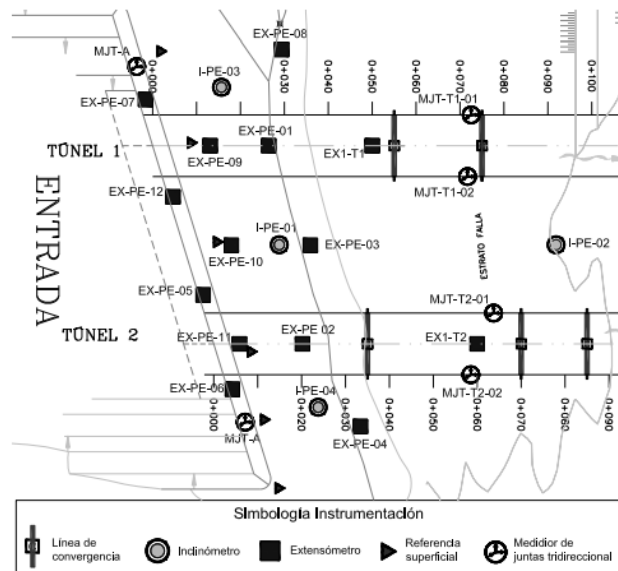


Ilustración 46. Localización en planta de los instrumentos en portales de entrada. Tomada de Diseño, instalación y puesta en servicio de la instrumentación de los túneles de conducción del río Grijalva, Chiapas. SMIG

Geología: La obra se realizó en limolitas, los taludes y bermas se encontraron afectados por fallas verticales y por el denominado Estrato Falla.

En el pilar central entre los dos túneles se instaló el inclinómetro I-PE 1 el cual cruza el contacto geológico Estrato Falla a la elevación 90.50 m.

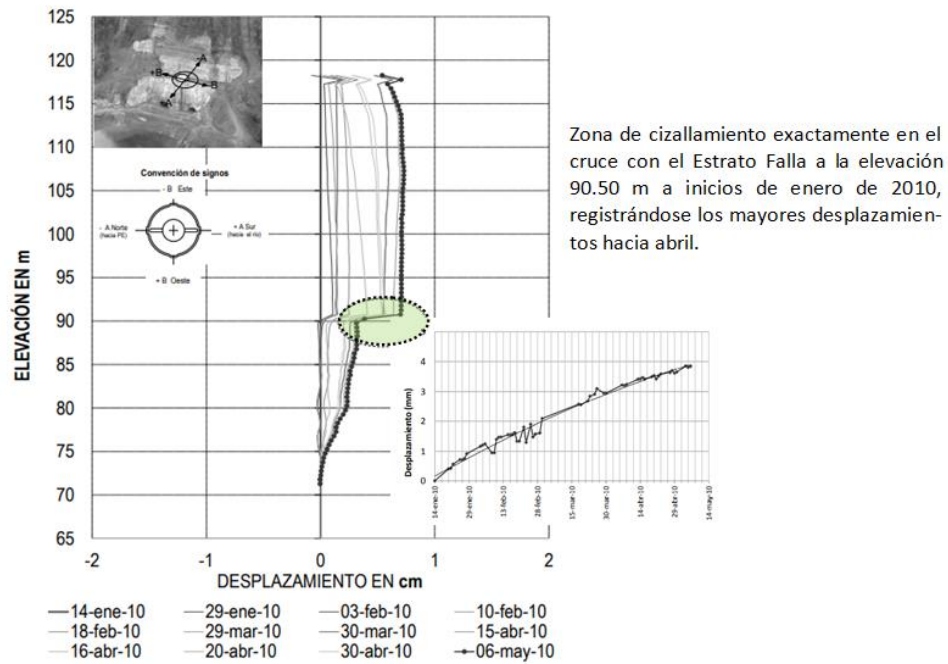
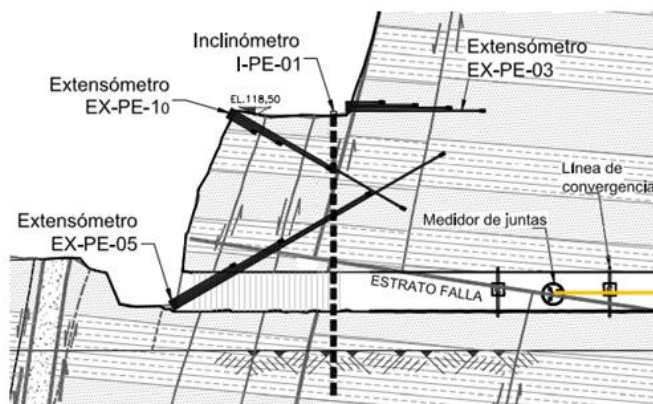


Ilustración 47. Gráfica de lecturas registrada en inclinómetro I-PE-1



El cizallamiento registrado se asocia a una deformación por la redistribución de esfuerzos y por el cambio de humedad provocado por la excavación del portal del túnel, y la perforación para el drenaje y anclaje.

Ilustración 48. Corte transversal de túnel, muestra instrumentación instalada para monitoreo de estructuras de falla.

Instrumentación en portal de salida

Geología: la excavación de ambos túneles y los cortes en bermas fueron realizados totalmente en areniscas, por lo que presentaron un comportamiento estable.

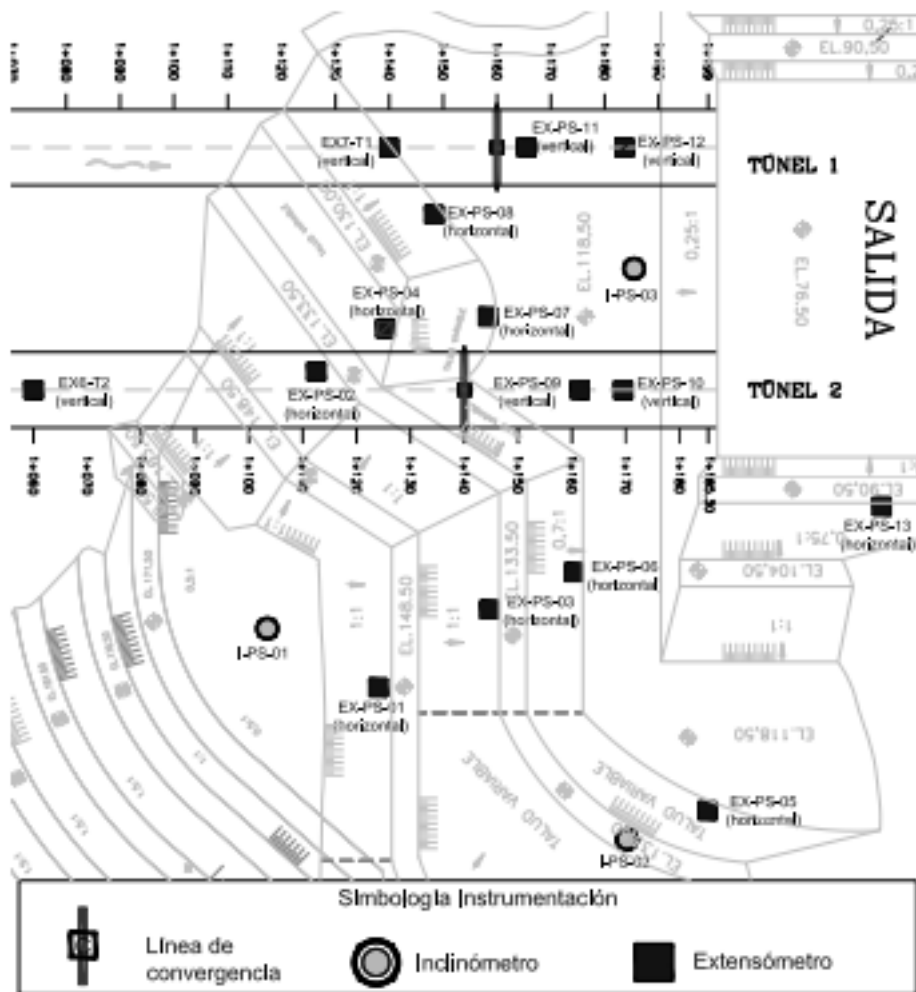
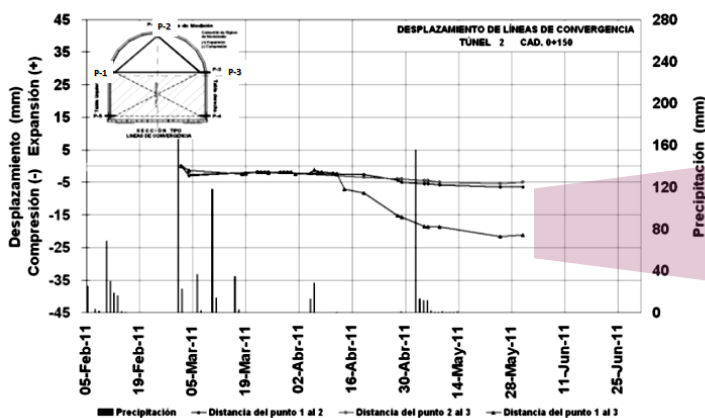


Ilustración 49. Localización de Instrumentación en portales de salida. Tomada de Diseño, instalación y puesta en servicio de la instrumentación de los túneles de conducción del río Grijalva, Chiapas. (SMIG).

Instrumentación en interior de túnel

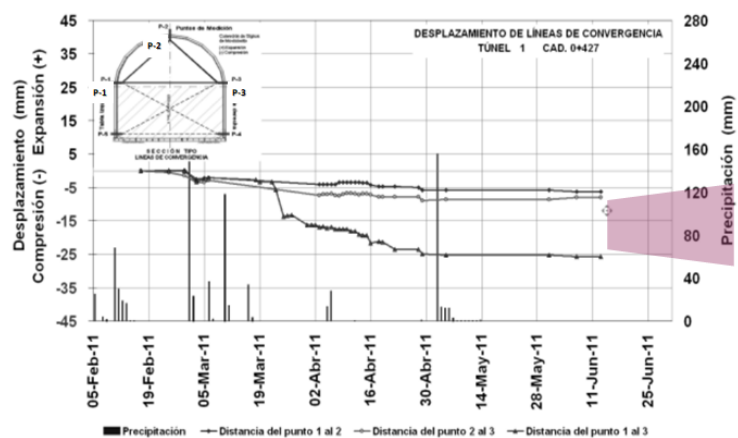
Geología: se excavaron en la secuencia sedimentaria de areniscas superiores bien cementadas en estratos de espesor variable con buzamiento de 10° hacia el norte. Subyaciendo las areniscas se presentan unas limolitas silíceas intercaladas en niveles de arenisca con un buzamiento semejante. Se presentan Falla Las Cuevas y Falla El Boquete.



Los desplazamientos indican que la relajación de la roca en los puntos de medición tendió a estabilizarse, una vez que pasó el frente de excavación y se efectuaron los tratamientos especificados.

De acuerdo con las tres líneas de medición, mostramos mayor variabilidad la que va del P1-P3 con valores negativos de compresión, los cuales se pueden asociar a un reacondicionamiento de esfuerzos que tienden a la estabilización.

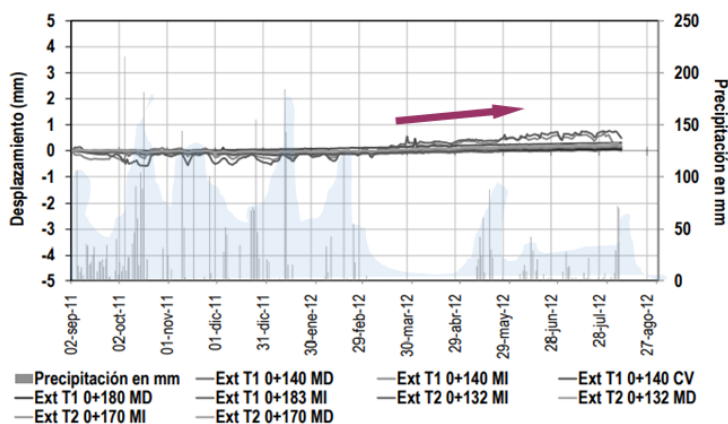
Ilustración 50. Gráfica de datos registrados en extensómetros de convergencia en interior de túnel 2.



Las líneas de convergencia mostraron incrementos en el sentido horizontal a finales de marzo y tendieron a la estabilidad a mediados de mayo.

Ilustración 51. Gráfica de datos registrados en extensómetros de convergencia en interior de túnel 1.

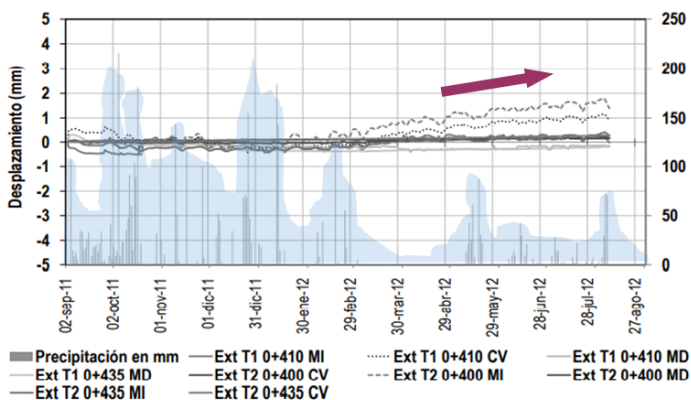
Etapa de operación



Los extensómetros instalados lateralmente a la zona de falla Las Cuevas indican movimientos con una ligera tendencia a la extensión.

Aunque se aprecian desplazamientos mínimos, son indicativos de la presencia de las discontinuidades al permitir la influencia de la precipitación con movimientos en la respuesta del sistema roca revestimiento.

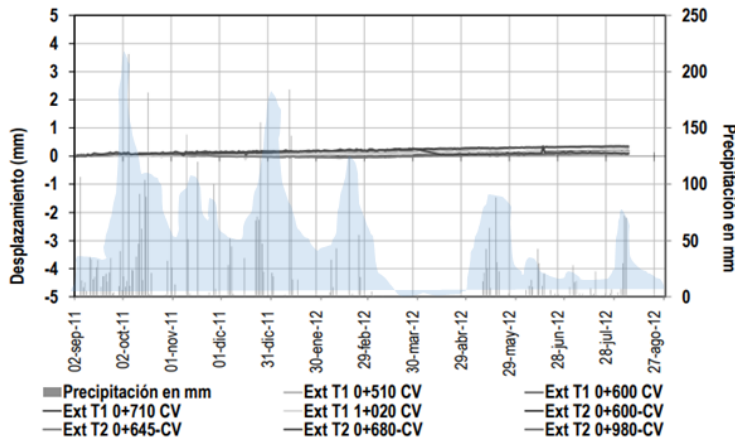
Ilustración 52. Gráfica de comparación de datos registrados en extensómetros y la precipitación durante 13 meses En zona de influencia de la falla Las cuevas.



Con relación a las mediciones de los extensómetros instalados en esta zona, solamente dos presentan movimientos con tendencia de extensión, los demás muestran una tendencia de estabilidad.

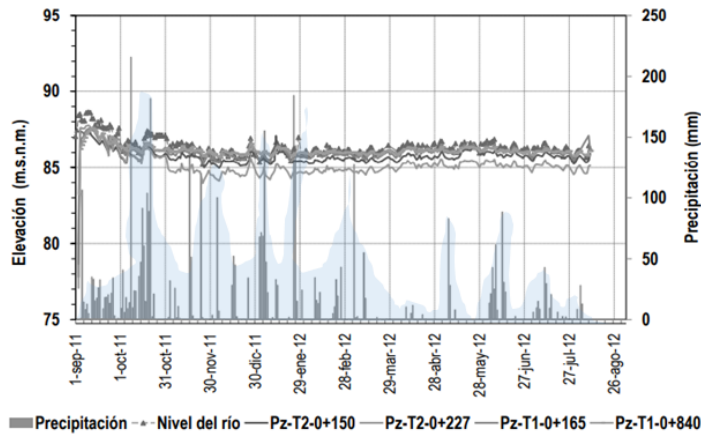
El comportamiento es similar al de los extensómetros instalados en la zona de la falla Las Cuevas, ya que al parecer responden a la precipitación.

Ilustración 53. Gráfica de comparación de datos registrados en extensómetros y la precipitación durante 13 meses entre los cadenamientos 0+410 al 0+490 del túnel 1, y 0+390 al 0+440 del túnel 2.



En la zona con predominio de areniscas se observa un comportamiento más estable en las mediciones de extensómetros, en comparación con los extensómetros instalados en zona de fallas geológicas.

Ilustración 54. Extensómetros eléctricos en zona de areniscas de ambos túneles.



Los datos registrados en piezómetros responden al nivel del agua dentro de los túneles, que se establece como el nivel freático, pues el agua de precipitación que viaja por las diaclasas se incorpora a este nivel y por la ubicación de los piezómetros no detectan este escurrimiento.

Ilustración 55. Piezómetros eléctricos en interior de túneles.

Conclusiones

El comportamiento derivado de las mediciones de la instrumentación de los túneles es de estabilidad.

Las mediciones registradas en extensómetros eléctricos pueden asociarse a que la roca se relajó por la propia excavación de los túneles, particularmente en las limolitas y en la zona de fallas geológicas debido a la influencia que tiene el agua que se infiltra de la lluvia.

Los valores de desplazamientos y esfuerzos no complican la estabilidad de los túneles; por lo cual se continuará con las mediciones de la instrumentación para determinar si se ha alcanzado un equilibrio en la masa de roca.

5 Medidor de juntas tridireccional

El medidor de juntas tridireccional se utiliza para medir la evolución del movimiento relativo de dos caras de una discontinuidad. Permite controlar con precisión el movimiento en tres dimensiones de juntas de dilatación, grietas, diaclasas o cualquier otro elemento de separación que admita su uso (INESGE).

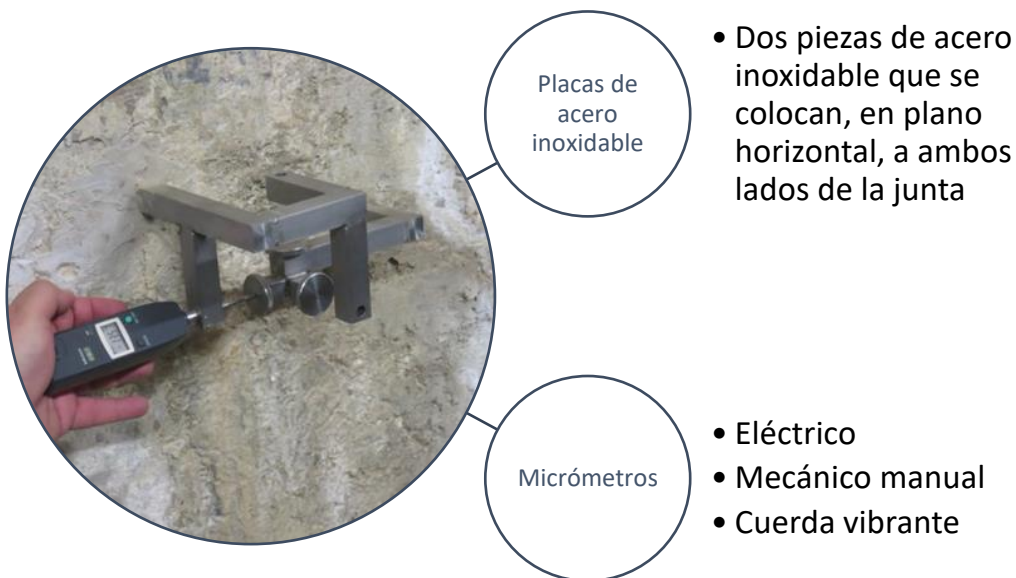


Ilustración 56. Toma de lecturas con micrómetro en medidor de juntas tridireccional en una presa. Tomado de geotechtips.com

Instalación

Se instalan fácilmente por inyección de lechada, pernos o anclas. Cada medidor se ancla con resina a la estructura asegurando que quede firme y en su posición definitiva de lectura.

Operación

Con las lecturas que proporciona el reloj comparador o micrómetro, se conoce la separación entre los bloques, el deslizamiento y el vuelco de uno de ellos respecto al otro. (Auscultación y Taller de Ingeniería S.A.)

Representación de datos obtenidos

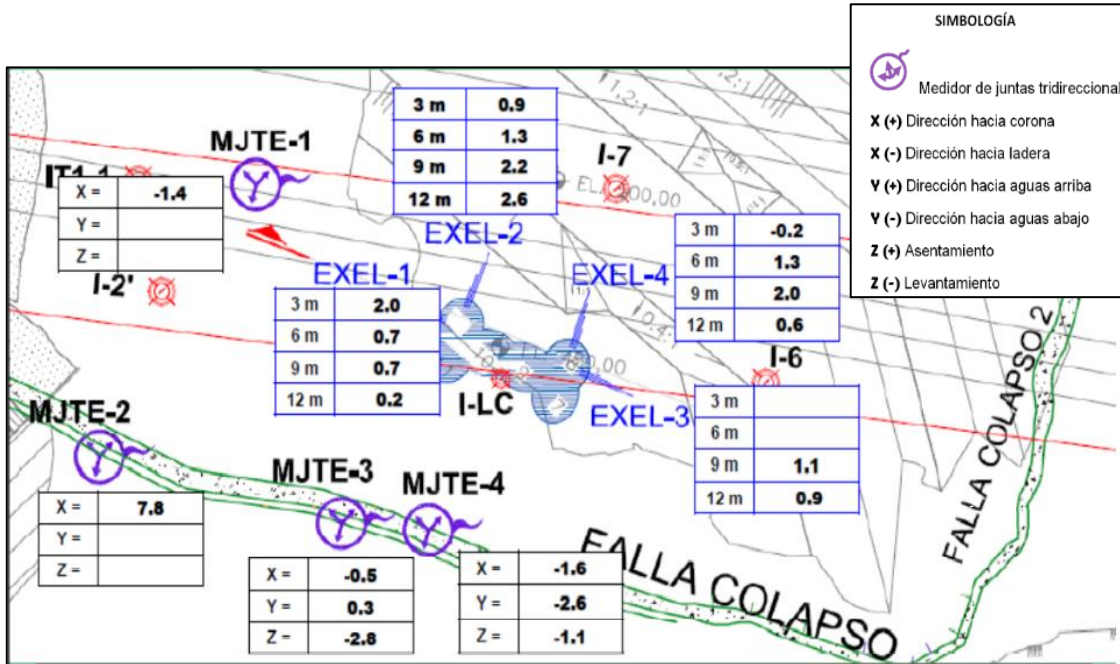


Ilustración 57. Ubicación de medidores de junta tridireccional en Proyecto la Yesca. Tomado de Presentación del Curso de GAIC FI UNAM. Capítulo de Instrumentación Geotécnica 2020.



Ilustración 58. Tipos de medidores de juntas tridireccional. (Izq.) Tomado de Auscultación y Taller de Ingeniería S.A (Der.) Presentación Instrumentación Geotécnica 2020, Asignatura Geología Aplicada a la Ingeniería Civil.

6 Referencias topográficas superficiales

Durante la construcción y vida de una obra civil, se presentan movimientos superficiales, que a su vez son la expresión de lo que ocurre en el interior de sus estructuras. Los movimientos superficiales pueden ocurrir en cualquier dirección, por tanto, las mediciones correspondientes deben cuantificar la diversidad de tales movimientos.

Tipos de monumentos

Testigos superficiales

- Monumentos que permiten detectar movimientos tanto horizontales como verticales a los que está sujeta la obra.
- Testigo superficial de movimientos horizontales (TSMH)
- Testigo superficial de movimientos verticales (TSMV).

Bancos de referencia

- Son monumentos que se utilizan como puntos de control para realizar las mediciones hacia los testigos superficiales.
- Banco de referencia para control horizontal (BRCH)
- Banco de referencia para control vertical / bancos de nivel (BN).

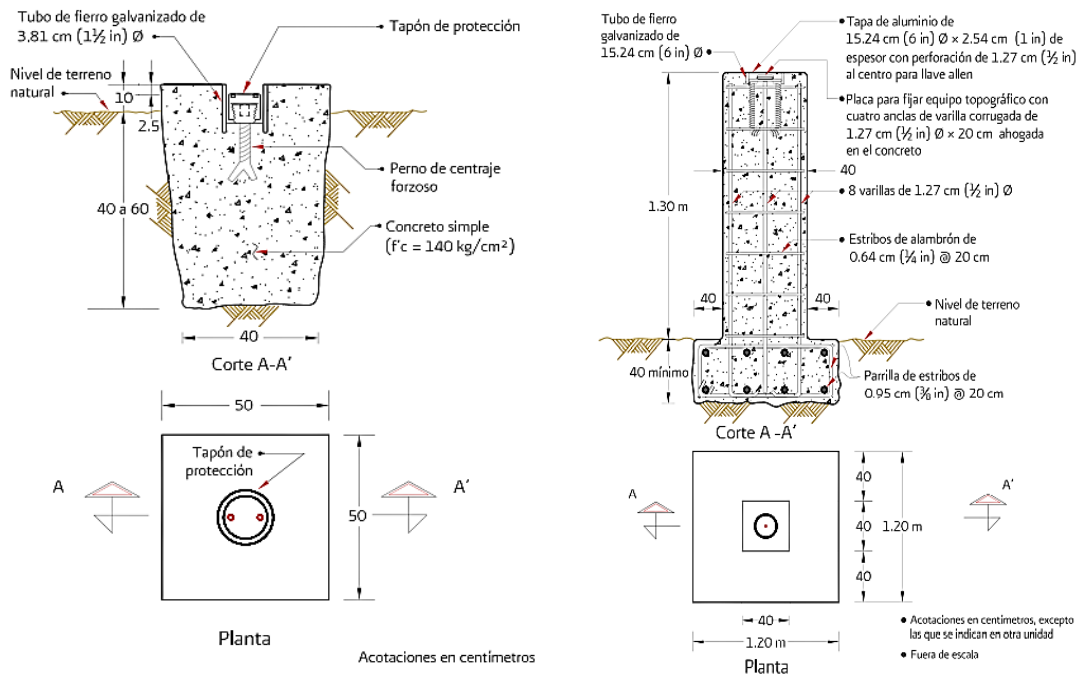


Ilustración 59. Testigos superficiales y Banco de nivel. Tomado de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA, 2012)

6.1 Desplazamientos horizontales

Método topográfico para obtener desplazamientos horizontales.

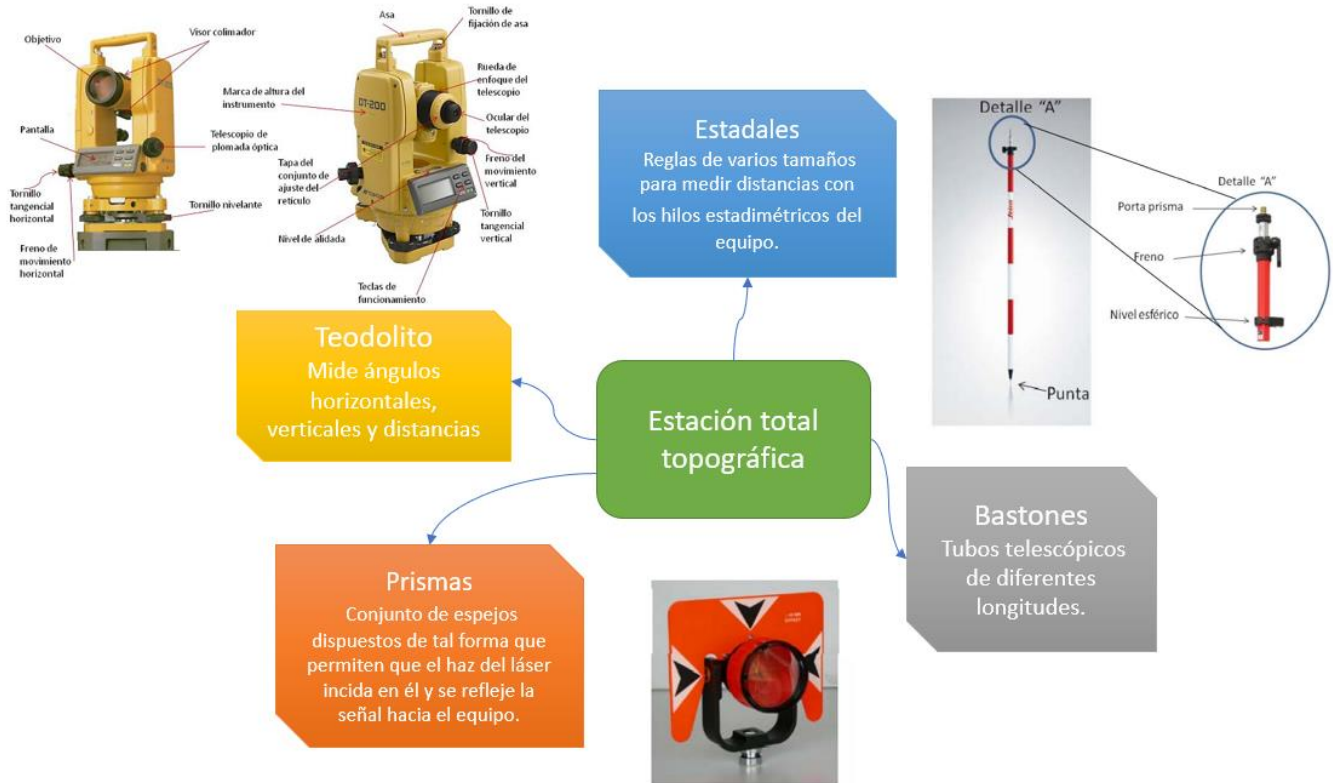


Diagrama 10. Componentes de estación topográfica.

Instalación

Se utiliza el banco de referencia para control horizontal (BRCH), los testigos superficiales para movimientos horizontales (TSMH).

El prisma utilizado para las mediciones se monta con un adaptador al tornillo de centraje forzoso de los testigos superficiales.

Con la ayuda de una estación total, se miden y obtienen de manera precisa las coordenadas (X, Y, Z) de los monumentos de referencia para el control horizontal, ya que estas coordenadas servirán de base para la medición de los movimientos horizontales.

Toma de lecturas

El equipo seleccionado se coloca en un BRCH se centra y se nivela, a continuación, se hace puntería sobre el monumento que sirve de mira de referencia (ubicada en otra posición) haciendo coincidir el hilo vertical del lente con el prisma, fijando el movimiento horizontal del limbo de la estación total. Desde ese monumento y hasta terminar las observaciones, se van tomando las lecturas correspondientes para cada testigo (TSMH)

Para ello, se coloca el prisma reflector en el perno de centrado forzoso y se realizan las mediciones correspondientes, tomando varias lecturas en cada testigo, para posteriormente trabajar en gabinete con los promedios de las lecturas.

Los datos obtenidos son ángulos y distancias, ya sea inclinadas o reducidas al horizonte (distancias horizontales), o también pueden ser coordenadas (X, Y, Z) correspondientes a cada testigo superficial.

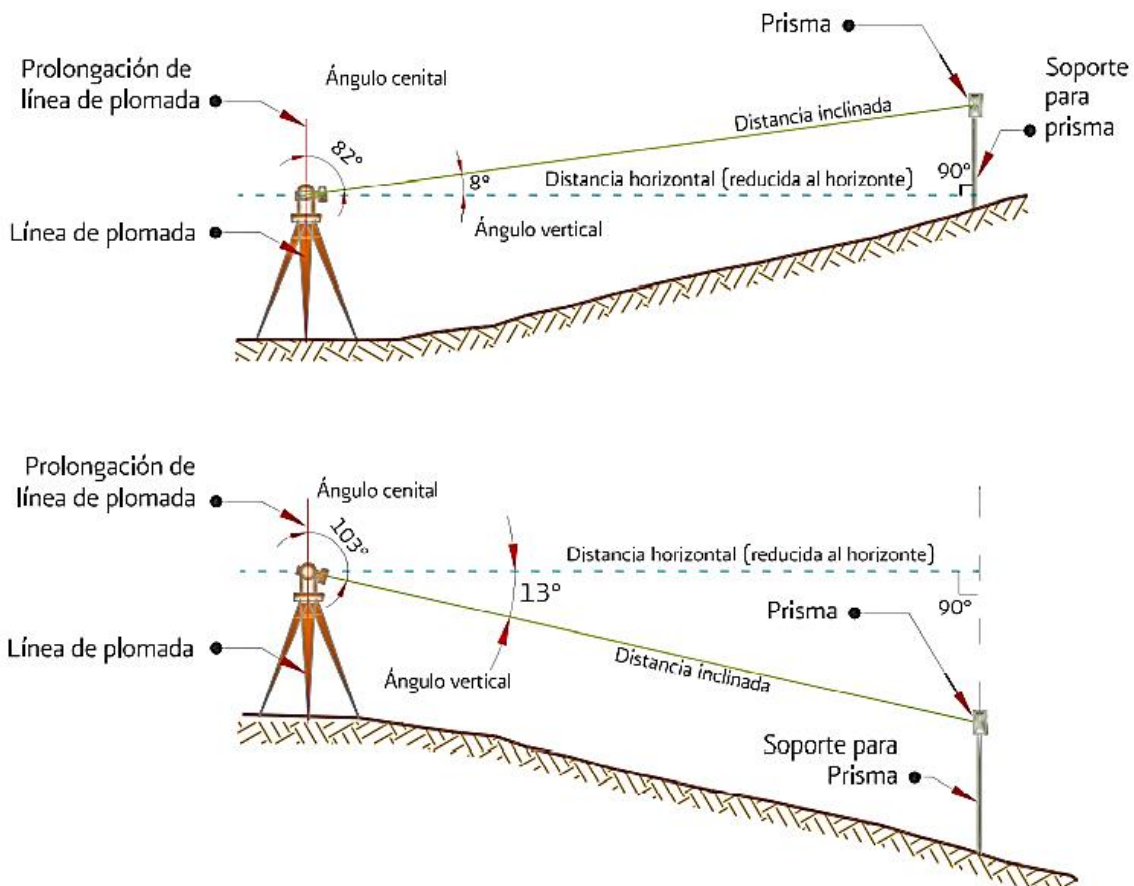


Ilustración 60. Toma de lecturas de desplazamientos horizontales. Tomado de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA, 2012).

Cálculo de resultados

Desplazamientos

Se obtiene el valor promedio de las coordenadas y se calcula el desplazamiento con la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

D = Distancia entre dos puntos

X1 = Valor de la coordenada X del punto 1

Y1 = Valor de la coordenada Y del punto 1

X2 = Valor de la coordenada X del punto 2

Y2 = Valor de la coordenada Y del punto 2

Representación de resultados

La localización de los testigos se dibuja a una escala conveniente sobre el eje horizontal; en el eje vertical, se muestra el rango de medición. Es útil adicionar una planta con la localización de la línea o líneas de testigos, así como la tabla de las fechas de cada lectura, relacionadas con un número progresivo que se asigna a cada curva o gráfica.

Distancias

Deben ser las distancias horizontales (distancias reducidas al horizonte); de lo contrario, deben calcularse utilizando las distancias inclinadas y los ángulos cenitales o verticales.

Ángulos

A partir de las distancias horizontales, se calculan los ángulos del triángulo oblicuángulo formado por la línea base y el testigo observado.

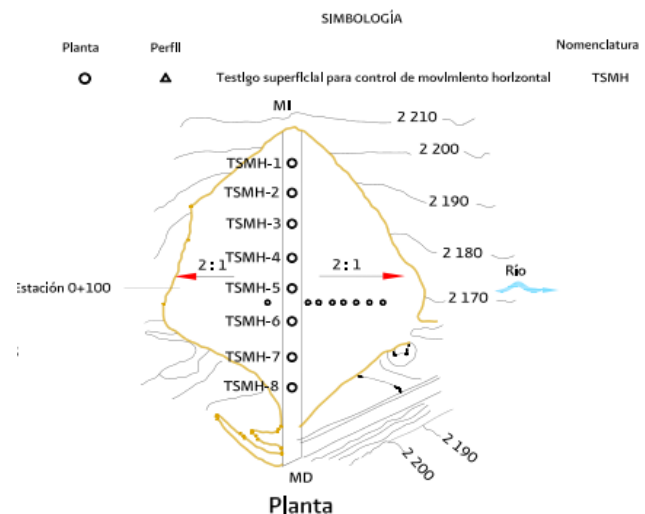
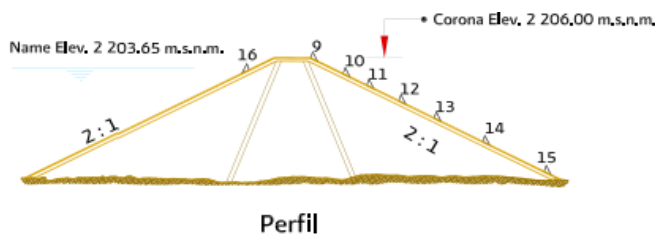


Ilustración 61. Representación de desplazamientos horizontales en testigos superficiales sobre corona de presa. Tomado de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

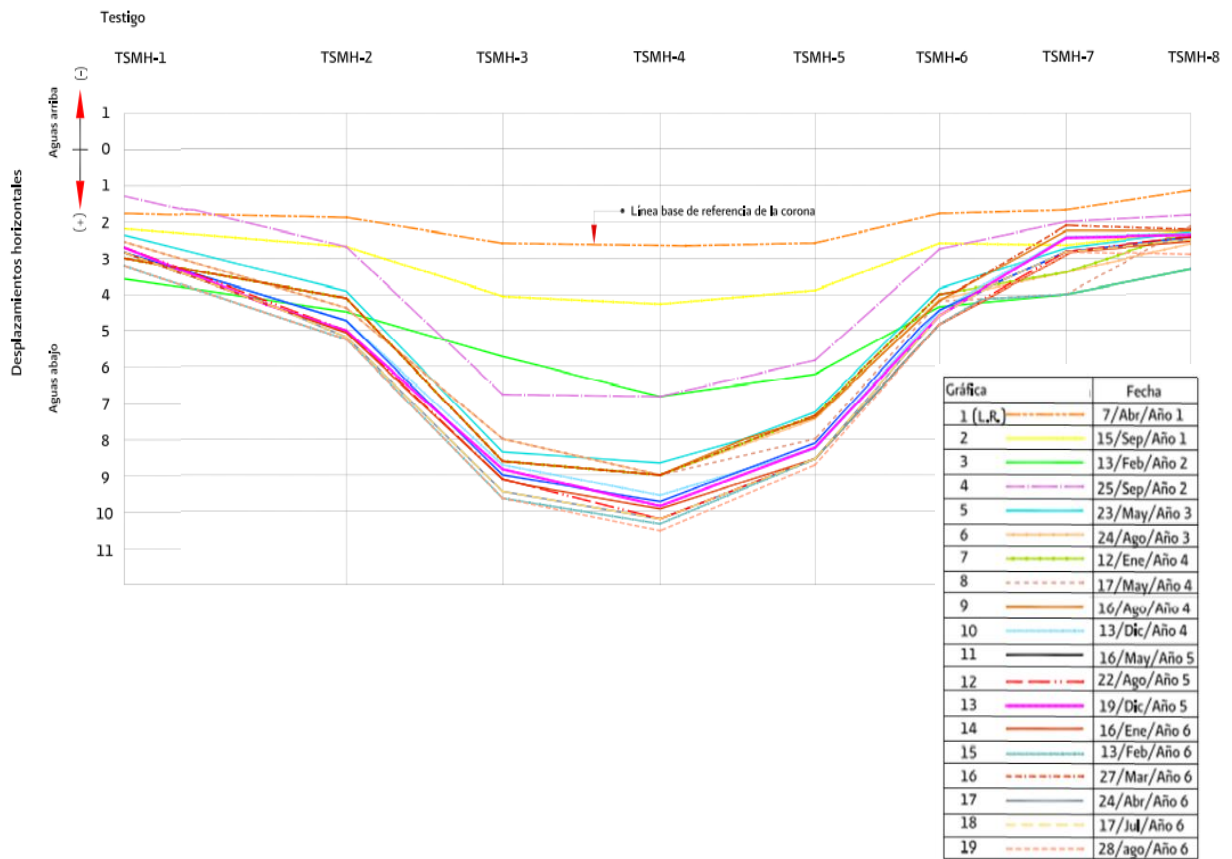


Ilustración 62. Gráfica de representación de resultados en Testigos superficiales. En línea naranja se observa la línea de referencia de la corona de la presa, las líneas inferiores registran los datos obtenidos durante seis años de monitoreo. Se observa que los mayores desplazamientos horizontales se registraron en los primeros tres años teniéndose los más significativos en los testigos ubicados en la parte media de la corona (ver ilustración 72) TSMH-3, TSMH-4, TSMH-5.

6.2 Desplazamientos verticales

Método topográfico para obtener desplazamientos verticales

Nivel o equialtímetro

Mide desniveles entre puntos que se encuentran a diferentes alturas; también se utiliza para pasar cotas de puntos conocidos hacia puntos desconocidos.

Algunos tipos de niveles son : de mano, automático, láser y electrónico.

Actualmente, los de mayor demanda son los automáticos y electrónicos, por su precisión.

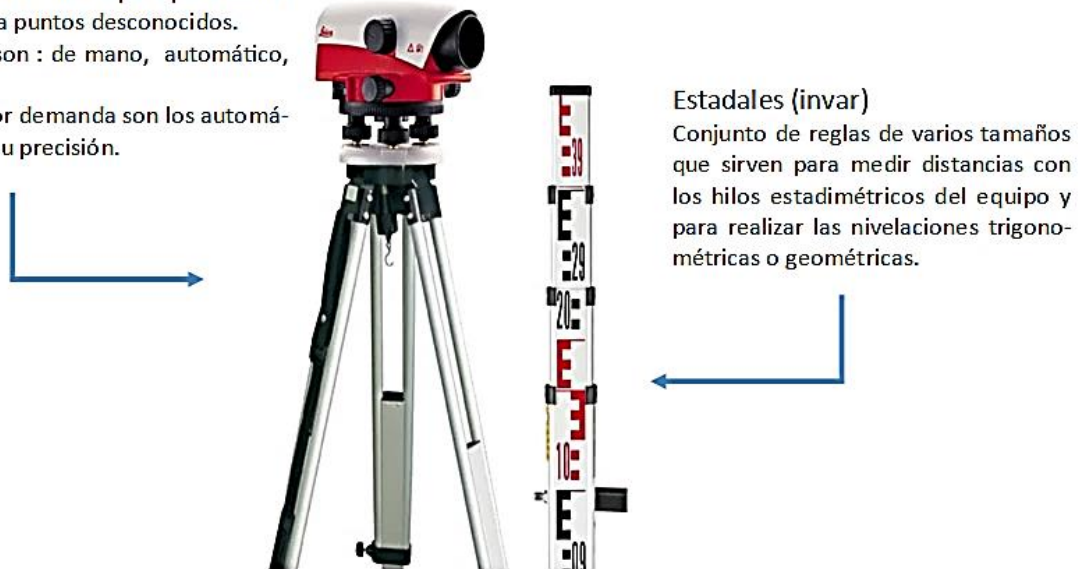


Ilustración 63. Partes de nivel óptico y estadal. Tomada de geotop.com.pe

Instalación

Los niveles ópticos se usan siempre sobre un trípode, por lo tanto, cuando se coloca el instrumento, es importante asegurar que la rosca del trípode coincida con el elemento de fijación a trípodes que posee el aparato.

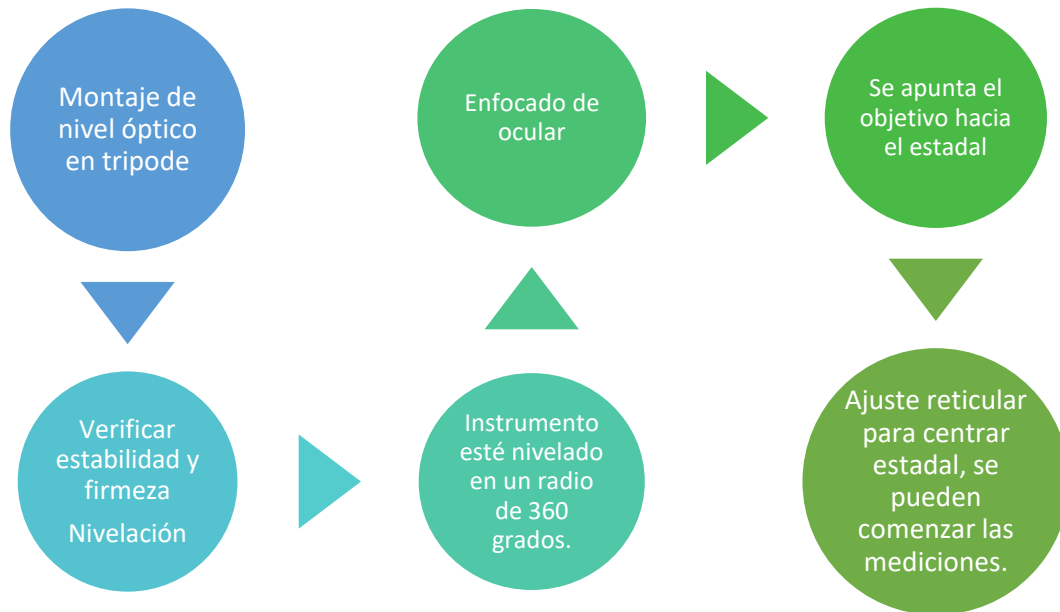


Diagrama 11 Instalación de trípode para nivel.

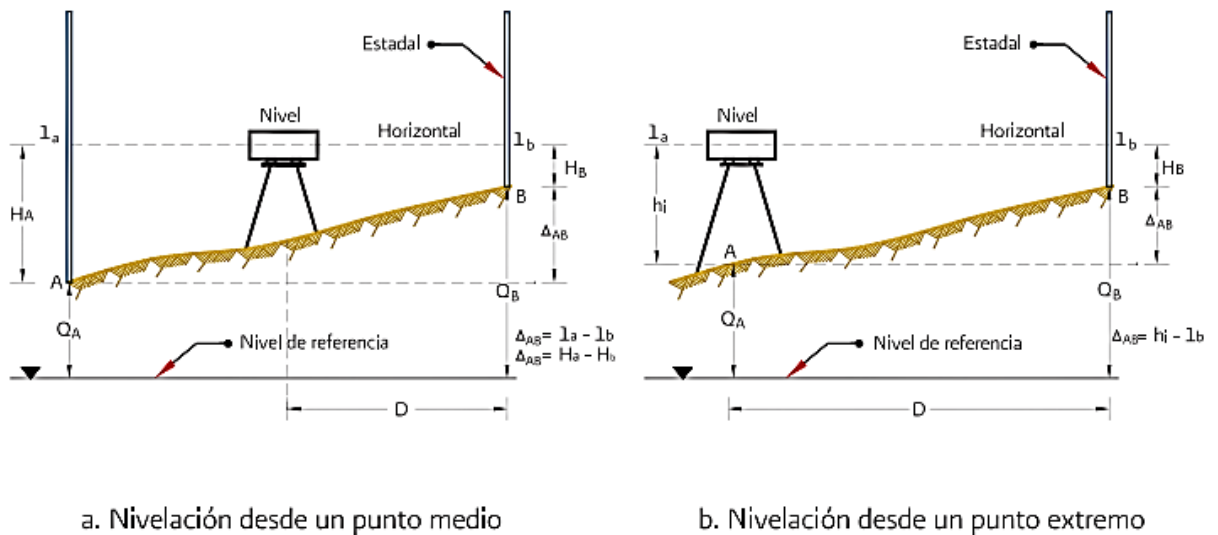


Ilustración 64. Nivelación geométrica para obtener desplazamientos verticales. Tomada de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

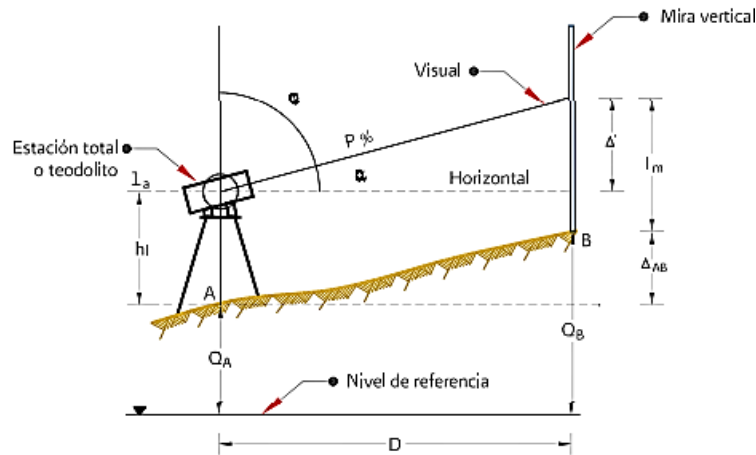
Toma de lecturas

Para la determinación de los movimientos verticales que se presentan, es necesario tener un punto de referencia, en este caso un banco de nivel.

El número de los Bancos de nivel depende de las condiciones de campo. La periodicidad de las nivelaciones se podrá ajustar de acuerdo con la velocidad de los desplazamientos obtenidos.

El tipo de nivelación que se realiza puede ser tanto geométrica o trigonométrica:

- En la nivelación geométrica las distancias entre los testigos son relativamente cortas; se realiza con un nivel y estadales de preferencia invar periódicas.
- En la nivelación trigonométrica, se usan ángulos verticales para conocer la diferencia de nivel entre dos puntos.



$$\begin{aligned} h_1 + \Delta' &= \Delta_{AB} + l_m \\ \Delta' &= D \tan \alpha \end{aligned}$$

$$\Delta_{AB} = D \tan \alpha + h_1 - l_m$$

$$\Delta_{AB} = D \cot \varphi + h_1 - l_m$$

$$\Delta_{AB} = \frac{P \times D}{100} + h_1 - l_m$$

En donde:

- Δ_{AB} = desnivel entre A y B
- D = distancia horizontal
- α = ángulo vertical de elevación
- φ = ángulo cenital
- P = inclinación de la visual en %
- h_1 = altura del instrumento
- h_2 = altura de la señal (lectura en mira) l_m

Ilustración 65. Toma de datos para nivelación trigonométrica. Tomada de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

Resultados

Una vez definido el tipo de nivelación por realizar, las lecturas obtenidas se anotan, para calcular la magnitud de los movimientos verticales se efectúa la siguiente operación:

$$\text{Desplazamiento vertical} = \text{Elevación actual} - \text{Elevación inicial.}$$

Si la deformación resulta con signo positivo (+), los movimientos corresponden a expansión; si es con signo negativo (-), representan asentamientos o compresiones.

Estación		Punto VISADO	Asentamientos				Desplazamientos horizontales					
No.	Coordenadas		Elevación actual	Elevación inicial	Asentamientos	Coordenadas iniciales		Coordenadas actuales		Desplazamiento observado	Dirección del desplazamiento	
	(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7) = (5) - (6)	X	Y	X	Y
	X	Y	km	m.s.n.m.	m.s.n.m.	cm	X	Y	X	Y	cm	
BN-RS1	100	15	1	2206.139	2206.087	0.052						
	100	50	2	2206.327	2206.203	0.124						
	100	75	3	2206.437	2206.268	0.169						
	100	100	4	2206.307	2206.143	0.164						
	100	125	5	2206.192	2206.060	0.132						
	100	150	6	2206.077	2205.999	0.078						
	100	170	7	2206.998	2206.950	0.048						
	100	190	8	2206.063	2206.048	0.015						
	200	15	9	2206.055	2205.890	0.165						
	200	50	10	2200.893	2200.757	0.136						
	200	75	11	2195.872	2195.728	0.144						
	200	100	12	2190.979	2190.857	0.122						
	200	125	13	2186.282	2186.205	0.077						
	200	150	14	2181.290	2181.254	0.036						
	200	170	15	2175.746	2175.730	0.016						
	200	190	16	2206.207	2206.041	0.166						

Notas: (-) Asentamientos
 (+) Expansiones

Observaciones:

Ilustración 66. Tabla de registro de asentamientos verticales en testigos superficiales. Tomada de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012)

Representación de resultados

Una forma de presentar los resultados es elaborar una gráfica con la separación entre testigos en el eje horizontal y los movimientos verticales en el eje vertical. Otra forma de presentación consiste en dibujar una gráfica con los movimientos verticales de los testigos en el eje vertical con el tiempo, representado en el eje horizontal. También se presenta esta gráfica en papel semilogarítmico, con los asentamientos en la escala natural y el tiempo en la escala logarítmica. Esta gráfica por su similitud con las curvas de los ensayos de consolidación es muy aceptada, ya que es el mismo fenómeno sólo que a escala natural.

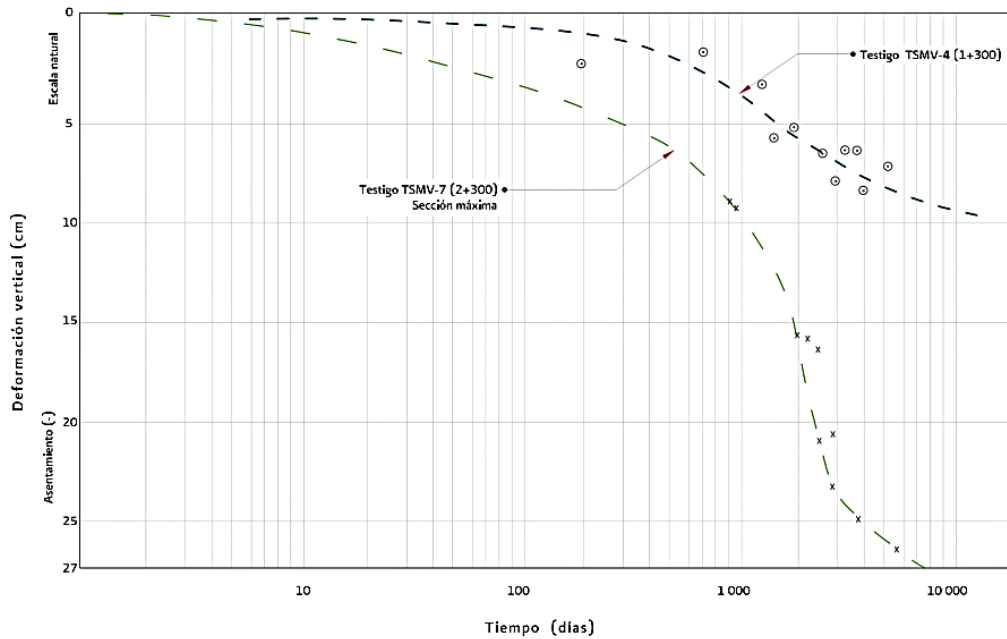


Ilustración 69. Ejemplo de gráfica logarítmica para representación de deformación vertical en testigos superficiales. Tomada de Manual de mecánica de suelos. (CONAGUA,2012).

6.3 Instrumentación en la margen izquierda de la Presa la Yesca (Torres B.& Pérez G,2011)

¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> • Sobre el río Santiago, aguas arriba de la presa El Cajón
Se presentaron:	<ul style="list-style-type: none"> • Indicios de movimiento de la ladera a través de plano de falla de margen izquierda. • Agrietamiento de concreto lanzado.
Posibles Motivos	Fallas geológicas Condiciones del macizo rocoso (alteraciones, materiales arcillosos, discontinuidades, brechado)
Objetivos de instrumentar	<ul style="list-style-type: none"> • Conocer la velocidad, dirección de los desplazamientos y delimitar la zona de movimiento en superficie y profundidad. • Determinar la efectividad de las medidas de estabilización.

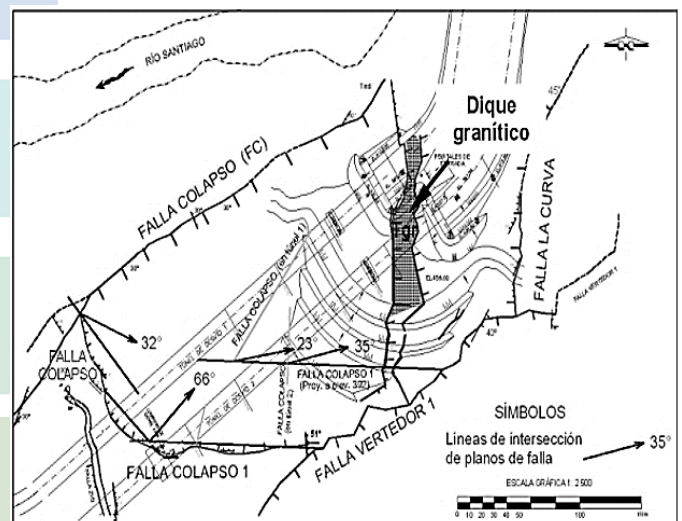


Ilustración 70. Principales fallas que delimitan el bloque inestable en margen izquierda.

Geología

Las fallas geológicas en la margen izquierda se denominaron: Colapso. Colapso 1, Colapso 2, Vertedor 1 y La Curva; debido al espesor de arcilla y roca brechada y alterada se interpretaron como zonas de debilidad de la masa rocosa donde podía ocurrir el deslizamiento.

Falla Colapso: Material arcillo-arenoso de color rojizo de 1- 1,2 m de espesor, cubiertos por roca cizallada en una franja de 6 m de espesor.

Falla Colapso 1: Brecha de falla, material de roca muy fragmentada y oxidada de hasta 10 m de espesor.

Falla Colapso 2: Material arcillo-arenoso de color pardo de 1,5-2 m de espesor, cubierta por brecha de falla de 2-3 m de espesor.

Dique granítico: Roca fracturada con espesor de 4-15 m Con material arcillo-arenoso en la parte baja del dique de 10 a 20 cm y 0,3 a 1 m de brecha de falla.

Instrumentación Geotécnica

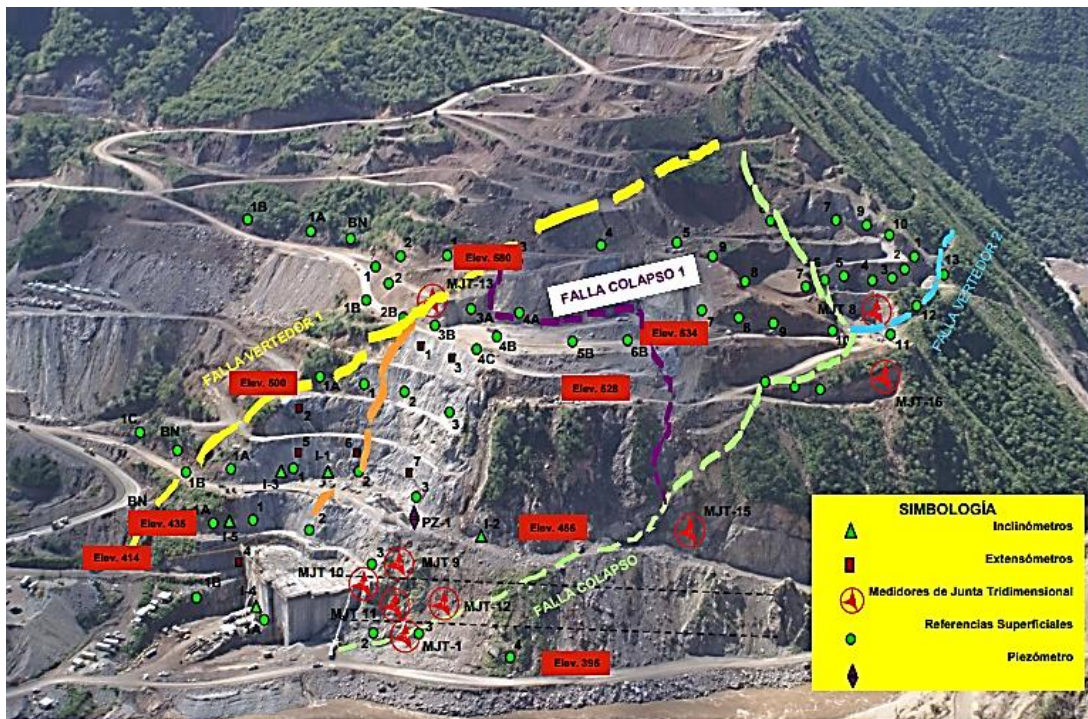
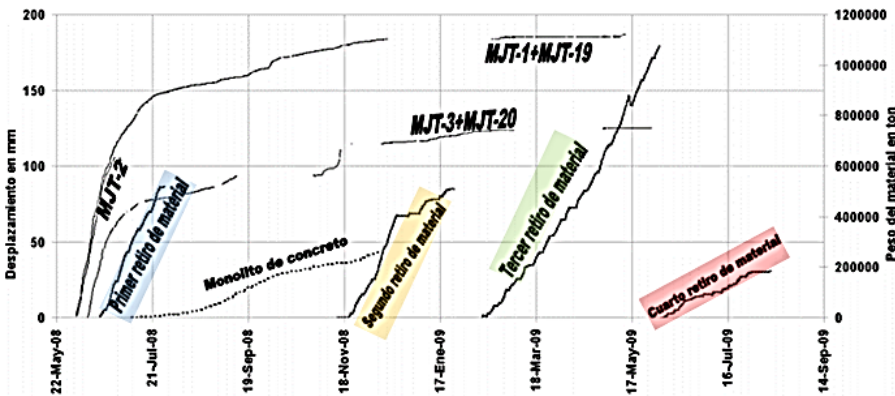


Ilustración 71. Arreglo general de la instrumentación geotécnica empleada. Infraestructura hidroeléctrica. (Marengo M., 2009)

Medidores de Juntas Tridireccional

Los medidores MJT-1, MJT-2 y MJT-3 fueron los que registraron las mayores velocidades de desplazamiento, con dirección hacia aguas arriba del cauce casi paralela a los túneles de desvío.



Los valores obtenidos en los medidores de juntas fueron reduciéndose considerablemente como resultado del primer retiro de material y con la construcción del monolito de concreto al pie de la cuña de disminuyo la velocidad de desplazamiento de la Falla colapso.

Ya con el segundo retiro de material la velocidad se aminoró.

El medidor MJT-3 instalado en el túnel 1 mostró tendencia de desplazamiento y posterior a los trabajos de estabilización la velocidad disminuyó considerablemente.

Ilustración 72. Registros de desplazamientos en los medidores de juntas instalados

Referencias superficiales

Colocadas a diferentes elevaciones, registraron los mayores desplazamientos entre las elevaciones 395 y 535 m, zonas delimitado por las fallas Colapso, Colapso 1 y Vertedor 1. Con el retiro de material entre las elevaciones 550 y 510 m, la velocidad de desplazamiento disminuyó, ya para el último retiro los desplazamientos ya no son significativos.

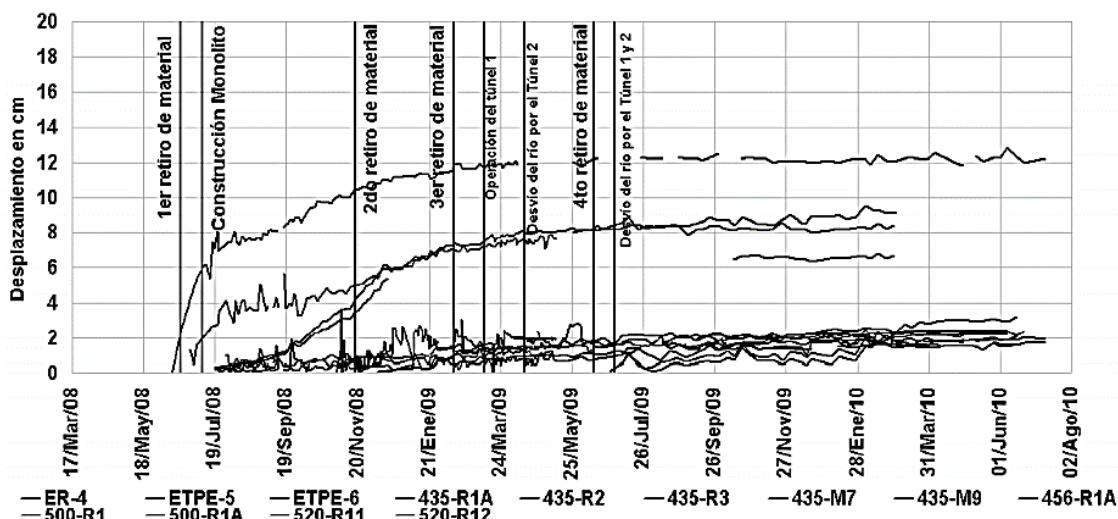
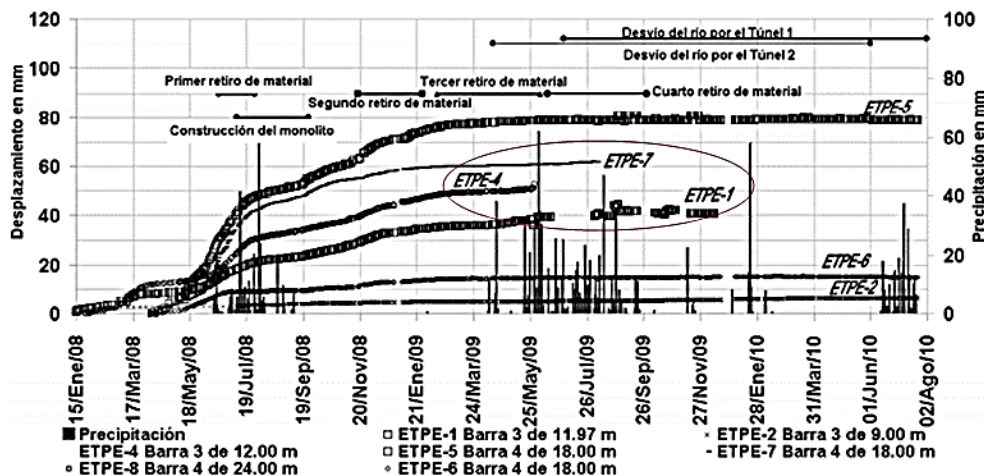


Ilustración 73. Desplazamientos en las referencias topográficas.

Extensómetros de barra



El extensómetro ETPE-5 alcanzó el mayor desplazamiento con 8 cm/mes para marzo de 2009 alcanzando su estabilidad con el tercer y cuarto retiro de material.

Se instalaron siete extensómetros de los cuales el ETPE-2 y ETPE-6 mostraron un desplazamiento menor a 0.2 cm/mes.

ETPE-1, ETPE-4, ETPE-7 mostraban un incremento en el desplazamiento hasta enero de 2009 y fueron tendiendo a un comportamiento estable con el tercer retiro de material.

Ilustración 74. Desplazamiento de los extensómetros instalados en los cortes del portal de entrada de los túneles de desvío.

Conclusiones

La instrumentación instalada cumplió con el objetivo de delimitar la zona de movimiento proporcionando información para conocer la velocidad y dirección del movimiento.

La información obtenida permitió verificar la efectividad de las medidas de estabilización, para la oportuna toma de decisiones respecto a la seguridad y continuidad de la obra.

Se observó que las velocidades de desplazamiento disminuyeron considerablemente desde el primer retiro de material y con el incremento de peso al pie del portal con la construcción de un monolito de concreto.

Los resultados dieron lugar a adaptaciones importantes al proyecto, como lo fue el giro de 14° del eje de la cortina.

Bibliografía/Mesografía

1. Acuña Borbón G. (2019) Instrumentación para producir información geotécnica en proyectos de construcción de túneles viales. Trabajo de Investigación. Universidad Católica de Colombia.
2. Beltrán Tenorio, Vintimilla Sánchez J. (2014) Estudio de la Instrumentación a utilizar en las presas de tierra del proyecto Pacalori. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca.
3. Cabrera Trujillo, Sanabria Pérez J. (2015) Tesis de Licenciatura Instrumentación Geotécnica para monitorear el nivel freático y calidad del agua con sensores eléctricos en piezómetros de tubo abierto. Facultad de Ingeniería. Universidad Ricardo Palma.
4. Choquet, Pierre. (2020). Instalación de piezómetros múltiples con inyección de grout en el Valle de México.
5. Vall González G. (2016). Instrumentación y monitorización geotécnica. Trabajo de grado instrumentación geotécnica. Ingeniería y Materiales Técnicos Industriales S.A.
6. Garzón Correa J. (2018) Instrumentación Geotécnica. Aplicación y soporte para la toma de decisiones en ingeniería. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás.
7. González S. (2011) Proceso de Instrumentación Geotécnica para túneles construidos en suelos blandos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.

8. Hernández Domínguez J. (2017) Instrumentación Geotécnica aplicada en las lumbreras L-18, L-19 y L-20 del TEO. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
9. Manual de mecánica de suelos. (2012). Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Consultado en: <http://www.conagua.gob.mx/>
10. Marengo Mogollón H. (2009) Infraestructura Hidroeléctrica. Comisión Federal de electricidad (CFE).
11. Pérez, Macedo, Martínez & Schmitter J. (2012) Estabilidad del corte Tepapatlaxco, en el tramo Nuevo Necaxa-Ávila Camacho, de la Autopista México-Tuxpan. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, SMIG A.C.
12. Poza Fernández S. (2010) Estudio sobre la instrumentación empleada en obras de metro. Caso de la línea 9 del metro de Barcelona. Tesis de Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Universidad Politécnica de Cataluña.
13. SISGEO. Catalogo_ESP-REV-Instrumentación Geotécnica. Obtenido de: www.sisgeo.com
14. Suárez Díaz J. Instrumentación y monitoreo de deslizamientos. Consultado en erosion.com.co
15. Torres Bonilla & Pérez García G. (2011). Resultados del sistema de instrumentación geotécnica de la zona inestable en la margen izquierda de la presa La Yesca. Comisión Federal de Electricidad-GEIC. Obtenido de <http://geoserver.ing.puc.cl/>

16. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (1991). "Boletín de Mecánica de Suelos, datos del valle de México", periodo 1983-1986.
17. Geokon Inc. <http://www.geokon.com>
18. González V. (2010). Aspectos relevantes para la instalación y medición de inclinómetros. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica
19. González, L., et al (2004) "Ingeniería geológica". Editorial Pearson Prentice Hall, Ribera del Loira 28. Madrid, España.
20. INGETEC (2009a) "Plano: Geología general, abscisa 859+000–867+000", México-Tuxpan, Tramo Nuevo Necaxa-Ávila Camacho, clave TR-GSP-PLNX-T1-PG-002.
21. INGETEC (2009b) "Proyecto carretero Nuevo Necaxa-Tehuacán, Tramo 1. Diseño geotécnico vial km 857+000-km 867+000", Revisión 0, Volumen 1
22. Jaime Suárez (2009) Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Volumen 1
23. RST instruments <http://www.rstinstruments.com>
24. RST Instruments.
25. SISGEO Manuales [sisgeo.com](http://www.sisgeo.com)
26. Slope Indicator Co. <http://www.slopeindicator.com>

27. Vargas, Barrón & Macedo G. (2012). Diseño, instalación y puesta en servicio de la instrumentación de los túneles de conducción del río Grijalva, Chiapas. XVII Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, SMIG A.C.