



U.M.S.N.H.  
UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Facultad de Ingeniería Civil

---

TESIS DE GRADO  
Para obtener el título de:  
INGENIERO CIVIL

# **INSTRUMENTACIÓN EN TÚNELES CARRETEROS, CASO RAMAL CAMELINAS EN EL LIBRAMIENTO SUR DE LA CIUDAD DE MORELIA.**

Presentada por:

**Daniela Bocanegra Martínez**

Asesor:

**Dr. Jorge Alarcón Ibarra**

Morelia, Michoacán  
Julio de 2016

***“When you can measure it and express it in numbers,  
you know something about it...”***

*Lord Kelvin.*

I

A mi hermana

A mis padres

Quiero agradecer a las personas que me apoyaron para la realización de este trabajo...

A mi asesor, por brindarme la confianza para trabajar en este proyecto, por su apoyo y consejos, gracias por estar siempre pendiente.

A mis queridos gorupitos, Luis, Julio e Imer, que con su alegría hicieron placentero nuestro trabajo y lo convirtieron en “días de scouts”.

||  
\_\_\_\_\_

A Antonio, Iván y Gerardo, por su importante participación y su ayuda, muchísimas gracias.

A Lupita, Juanito y Pedro, por su compañía y su amistad, que sin ustedes no habrían sido los mismos esos días enteros en el laboratorio,

A los ingenieros Edgar y Zamora, por compartir su conocimiento y por todos sus consejos.

A los doctores, Eleazar y Carlos que sin su ayuda esto no hubiera sido posible, gracias también por la confianza para dejarme participar en este proyecto.

A Leo, por todo tu apoyo durante este proceso y a lo largo de toda la carrera, por soportar mis malos momentos y estar presente en los buenos, por aplaudirme y por aconsejarme. Gracias por tu cariño y la incansable sonrisa que siempre me alegrará el día.

A mi hermana, Ti, gracias por dejarme un ejemplo a seguir, por poner altas las expectativas a superar, por tu ayuda y por tu apoyo que sé que siempre tendré.

A mis padres, por ser la base de mis triunfos, gracias por siempre estar a mi lado, por demostrarme siempre su amor y por ayudarme en todo momento. Gracias por comprender los tiempos de ausencia y por inculcarme el amor por mi carrera.



---

## RESUMEN

---

Todo trabajo geotécnico y construcciones relacionadas con suelo y roca contemplan el riesgo de descubrir condiciones inciertas del terreno y su comportamiento. La instrumentación de las obras puede ayudar a reducir dicha incertidumbre por medio de la exploración detallada del terreno y la detección de las condiciones y propiedades de los materiales que se encuentran en la zona analizada. III

El uso de instrumentos de control en la construcción subterránea se ha desarrollado de manera cada vez más responsable en el panorama mundial con el objetivo de monitorear el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo.

El control por instrumentos integra una tendencia actual como parte del diseño, la supervisión y control general de la construcción, efectuando tareas como el monitoreo de la zona para recabar los datos necesarios para el diseño de las excavaciones, confirmar la idoneidad del proyecto, o proporcionar las bases para cambios en el diseño; además, la instrumentación es parte importante en la determinación de parámetros de seguridad de las obras y el control del comportamiento general y reacción del terreno en las obras civiles.

De acuerdo con lo anterior, y partiendo de la escasa experiencia que se tiene en México en el tema de instrumentación, se ha determinado desarrollar un estudio de dispositivos y métodos de control instalados en túneles carreteros, con la finalidad de definir la acción del terreno en un caso real, realizando mediciones en determinados lapsos de tiempo y así precisar las posibles consecuencias u opciones de control en la zona.

El presente caso aborda el estudio del comportamiento de taludes ubicados en zonas que han sido calificadas como riesgosas para la población que habita en sus alrededores. Aunado a esto, la construcción de obras de tal importancia como son dos túneles carreteros, pone en conflicto la viabilidad de la obra; sin embargo, los problemas geológicos y geotécnicos que pudieran amenazar la factibilidad del proyecto pueden evitarse con la correcta exploración del terreno, estableciéndose de esta forma la

caracterización final del movimiento de los taludes en los que se emplazan los portales de salida de los túneles que forman parte del Ramal Camelinas.

Las técnicas que se presentan en este trabajo, permiten tener una comprensión real de los fenómenos ocurridos, y la utilización de los aparatos aquí mencionados constituye un avance en cuanto al proceso que debe seguirse en los estudios geotécnicos, que hasta ahora han formado un vacío en los estudios realizados en México.

**PALABRAS CLAVE:** *Instrumentación, Túnel, Monitoreo, Ramal Camelinas, Estudios geotécnicos.*

---

**ABSTRACT**

---

Every geotechnical work and constructions related with soil and rock involve the risk of discovering uncertain conditions of the terrain and their behavior. The instrumentation on civil works can help to reduce that uncertainty through detailed exploration of the terrain and detection of conditions and properties of the materials found in the area analyzed.

The use of control instruments in underground construction has developed in an increasingly responsible way on a global scope, with the goal of monitoring the behavior of the terrain over time.

Control instruments make up a current trend as part of the design and general supervision and control of construction, fulfilling tasks such as monitoring the area with the objective of collecting necessary data for the design of excavations, confirming the suitability of the project, or providing the basis for design changes; also, instrumentation is an important part in the determination of safety parameters and the control of general behavior and reaction of the ground in civil works.

In accordance with the above, and based on Mexico's limited experience on the issue of instrumentation, it has been determined to develop a study of devices and methods of control systems installed in road tunnels, in order to define the action of the terrain in a real case, taking measurements at certain periods of time and thus clarifying the possible consequences or control options in the zone.

The present case deals with the study of the behavior of slopes located in areas that have been classified as hazardous for the population living in the vicinities. In addition to this, the construction of civil works of such importance as two highway tunnels, puts in conflict the viability of the work; however, geological and geotechnical problems that could threaten the project's feasibility can be avoided with proper exploration of the terrain, thus establishing the final characterization of the movement of the slopes in which the exit portals of the tunnels that form part of Ramal Camelinás are located.



The techniques presented in this work, allow to have a real understanding of the occurred phenomena, and the use of the equipment mentioned here constitutes an advancement in the process to be followed in geotechnical studies, which have so far formed a gap in studies performed in Mexico.

# ÍNDICE GENERAL.

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE GENERAL .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	IX
<hr/>	
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GENERAL .....	3
OBJETIVOS PARTICULARES .....	3
CONTENIDO.....	4
<u>CAPITULO 1</u>	
LA INSTRUMENTACIÓN EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA .....	5
1.1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.2 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN .....	6
1.3 LUGARES ESTRATÉGICOS A INSTRUMENTAR .....	7
1.4 TIPOS DE INSTRUMENTOS .....	7
1.4.1 INSPECCIÓN VISUAL DIRECTA. ....	10
1.4.2 MÉTODOS Y EQUIPOS DE MONITOREO SUPERFICIAL. ....	10
1.4.2.1 EQUIPOS CONVENCIONALES DE TOPOGRAFÍA .....	10
1.4.3 MÉTODOS Y EQUIPOS DE MONITOREO INTERNO .....	15
1.4.3.1 INCLINÓMETROS .....	15
1.4.3.2 CLINÓMETROS.....	23
1.4.3.3 EXTENSÓMETROS.....	25
1.4.3.4 DEFORMÓMETROS.....	29
1.4.3.5 CELDAS DE ASENTAMIENTO.....	32
1.4.4 MEDICIÓN DE PRESIONES.....	33
1.4.4.1 PIEZÓMETRO ABIERTO.....	33
1.4.4.2 PIEZÓMETRO NEUMÁTICO.....	35
1.4.4.3 PIEZÓMETRO ELÉCTRICO.....	36
1.4.4.4 CELDAS DE PRESIÓN.....	37
1.5 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LOS INSTRUMENTOS.....	38
1.5.1 CUERDA VIBRANTE .....	38
1.5.2 SISTEMAS MICRO – ELECTROMECAÑICOS (MEMS).....	39
1.5.3 FIBRA ÓPTICA.....	39

1.5.4 SENSOR PIEZORRESISTIVO. ....	39
<b><u>CAPITULO 2</u></b>	
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO RAMAL CAMELINAS EN EL LIBRAMIENTO SUR DE MORELIA.....	<b>41</b>
2.1 ANTECEDENTES.....	41
2.1.1 Urbanización y Actores Sociales.....	41
2.1.2 Proyectos anteriores.....	43
2.2 PROYECTO RAMAL CAMELINAS .....	44
2.2.1 Justificación del Proyecto.....	47
2.2.2 Localización y Generalidades de la región. ....	47
2.2.2.1 División Territorial. ....	48
2.2.2.2 Orografía.....	48
2.2.2.3 Vías de Comunicación.....	49
2.2.3 Características Generales del Proyecto. ....	50
2.2.4 Situación geológica de la zona de proyecto. ....	52
<b><u>CAPITULO 3</u></b>	
INSTRUMENTACIÓN EN EL PROYECTO RAMAL CAMELINAS EN EL LIBRAMIENTO SUR ..	<b>54</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	54
3.2 ESTUDIO DE LA ZONA. ....	55
3.2.1 Análisis geológico-geotécnico en la zona de proyecto.....	56
3.3 JUSTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO. ....	56
3.4 PLANEACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN .....	57
3.5 TOPOGRAFÍA.....	58
3.5.1 Zona de estudio. ....	59
3.5.2 Procedimientos .....	59
3.6 INCLINÓMETROS .....	62
3.6.1 Ubicación de los inclinómetros. ....	64
3.6.2 Instalación de los inclinómetros.....	65
3.6.3 Recopilación de datos.....	68
3.6.4 Procesamiento de la información.....	70
3.6.5 Resultados de inclinometría en el Ramal Camelinas.....	73
3.7 PIEZÓMETROS.....	95
3.7.1 Ubicación de los piezómetros.....	96
3.7.2 Instalación de los piezómetros. ....	96
3.7.3 Recopilación de datos y proceso del cálculo de presiones. ....	98
3.7.4 Presentación de resultados piezométricos. ....	98
CONCLUSIONES .....	100
REFERENCIAS .....	103

# FIGURAS.

FIGURA 1. VISTA DE COMPONENTES DE INCLINÓMETRO VERTICAL.....	18
FIGURA 2. DIVISIÓN TERRITORIAL DE MICHOACÁN. ....	48
FIGURA 3. LOCALIZACIÓN DE VÍAS DE COMUNICACIÓN CERCANAS A LA ZONA DE ESTUDIO.....	49
FIGURA 4. PLANO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO CON EL TRAZO DEL PROYECTO RAMAL CAMELINAS.....	51
FIGURA 5. UBICACIÓN Y DESGLOSE DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS DE MORELIA. ....	52
FIGURA 6. LOMA DE SANTA MARÍA Y SU ÁREA DE INFLUENCIA. FUENTE: AIRMAP, 2015. ....	53
FIGURA 7. PLANTEAMIENTO DE ORGANIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN. ....	58
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LOS PUNTOS MONITOREADOS. ....	62
FIGURA 9. RANURAS GUÍA PARA LA INSERCIÓN DEL APARATO.....	66
FIGURA 10. CONEXIÓN DE TRAMOS DE TUBERÍA EN LA INSTALACIÓN DE UN INCLINÓMETRO Y DETALLE DE UNIÓN.....	67
FIGURA 11. CONVENCION DE SIGNOS DE UN INCLINÓMETRO. ....	69
FIGURA 12. TOMA DE LECTURAS CON INCLINÓMETRO. ....	70
FIGURA 13. EJEMPLO DE MATRIZ DE LECTURAS. ....	71
FIGURA 14. GRÁFICA TÍPICA DE DEFORMACIONES HORIZONTALES.....	72
FIGURA 15. PERFILES DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL DEL INCLINÓMETRO 1 TÚNEL I.....	75
FIGURA 16. VECTORES DE DEFORMACIÓN. INCLINÓMETRO 1 TÚNEL I.....	76
FIGURA 17. TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO. INCLINÓMETRO 1 TÚNEL I. ....	78
FIGURA 18. PERFILES DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL DEL INCLINÓMETRO 2 TÚNEL I.....	79
FIGURA 19. VECTORES DE DEFORMACIÓN. INCLINÓMETRO 2 TÚNEL I.....	81
FIGURA 20. TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO. INCLINÓMETRO 2 TÚNEL I. ....	83
FIGURA 21. PERFILES DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL DEL INCLINÓMETRO 1 TÚNEL II.....	84
FIGURA 22. VECTORES DE DEFORMACIÓN. INCLINÓMETRO 1 TÚNEL II.....	85
FIGURA 23. TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO. INCLINÓMETRO 1 TÚNEL II. ....	86
FIGURA 24. PERFILES DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL DEL INCLINÓMETRO 2 TÚNEL II.....	88
FIGURA 25. VECTORES DE DEFORMACIÓN. INCLINÓMETRO 2 TÚNEL II.....	88
FIGURA 26. TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO. INCLINÓMETRO 2 TÚNEL II.....	90
FIGURA 27. PERFILES DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL DEL INCLINÓMETRO 3 TÚNEL II.....	91
FIGURA 28. VECTORES DE DEFORMACIÓN. INCLINÓMETRO 3 TÚNEL II.....	93
FIGURA 29. TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO. INCLINÓMETRO 3 TÚNEL II. ....	94
FIGURA 30. A) INSTALACIÓN DE UN PIEZÓMETRO. B) DETALLE DE BULBO PIEZOMÉTRICO.....	97
FIGURA 31. TUBERÍA PIEZOMÉTRICA Y REGISTRO DE PROTECCIÓN. ....	98
FIGURA 32. REGISTRO PIEZOMÉTRICO. PIEZÓMETRO 1 TÚNEL I. ....	99
FIGURA 33. REGISTRO PIEZOMÉTRICO. PIEZÓMETRO 2 TÚNEL I. ....	100
FIGURA 34. REGISTRO PIEZOMÉTRICO. PIEZÓMETRO 1 TÚNEL II. ....	101
FIGURA 35. REGISTRO PIEZOMÉTRICO. PIEZÓMETRO 2 TÚNEL II. ....	102
FIGURA 36. REGISTRO PIEZOMÉTRICO. PIEZÓMETRO 3 TÚNEL II. ....	102

IX

# TABLAS.

TABLA 1. COMPARATIVA DE COORDENADAS (UNIDADES EN M). ....	61
TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DEL INSTRUMENTO. INCLINÓMETRO DIGITAL.....	63
TABLA 3. RESUMEN DE DATOS DE LOS INCLINÓMETROS. ....	67

---

## INTRODUCCIÓN

---

En la planeación y ejecución de proyectos carreteros, es indispensable prever parámetros que, dentro de las posibilidades económicas con las que cuenta el país, permitan proporcionar a los usuarios el más alto nivel de servicio.

La complejidad y la importancia de los problemas de circulación en nuestras vías se ponen en evidencia a través de la atención constante con que se examinan las redes carreteras, es por ello que, mediante amplios estudios se busca alcanzar una solución para los problemas de transporte, proponiendo mejoras en los flujos de circulación y economía de tiempos y distancias.

Por lo anterior, al contemplar el crecimiento poblacional que conlleva mayores demandas de sistemas de comunicación terrestre más eficientes, además de la preocupación de conservar la calidad del medio ambiente, conducen a pensar en opciones menos comunes como son los túneles, formando parte inherente de las soluciones a las dificultades de los caminos.

Desde luego la construcción de un túnel es cuestión de topografía, basándose en la necesidad de atravesar obstáculos para permitir reducir longitudes del trazo en un camino, pero siempre guardando los requerimientos adecuados de pendiente y curvatura.

Pese a las cualidades que aportan los túneles frente a las dificultades de un terreno, éstos son estructuras inciertas y un tanto peligrosas a pesar de las técnicas que se han venido practicando en los últimos años a este respecto.

En este tipo de estructuras, más que en cualquier otra de las vías terrestres, ocurren 1  
imprevistos que causan dificultades sociales y políticas por mal funcionamiento de la estructura debido a la precaria exploración y estudios previos. Lo anterior es, ciertamente porque se suele prescindir de estos últimos casi sistemáticamente.

Con relación a lo antes expuesto es preciso realizar análisis del comportamiento de los túneles para llegar a mejores resultados, teniendo estructuras seguras y funcionales. Para ello la instrumentación de campo permite verificar la concepción del proyecto y proponer soluciones tempranas relacionadas con el efecto de la construcción de las estructuras.

Este trabajo tratará de guiar al lector de una manera sencilla en el procedimiento a seguir para el estudio del comportamiento de taludes en dos túneles carreteros mediante sistemas de instrumentación en campo.

El movimiento de taludes en donde se construirán túneles es un fenómeno que llama la atención por las consecuencias que puede traer consigo su construcción, por lo cual no deben admitirse movimientos que representen un riesgo para su seguro funcionamiento. Partiendo de esta premisa, se han proyectado dos túneles (I y II) que se monitorean teniendo el cuidado de alertar sobre el comportamiento de la obra misma así como cualquier anomalía que pudiera existir en el terreno debido a los procesos constructivos.

---

## OBJETIVOS

---

### OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar una guía que proporcione la orientación e información necesaria para la planeación de un sistema de instrumentación en túneles carreteros.

### OBJETIVOS PARTICULARES.

- \* Definir los diferentes instrumentos que pueden ser utilizados en la medición de parámetros superficiales y del subsuelo útiles para la implementación oportuna de acciones correctivas en túneles carreteros.
- \* Efectuar una exploración de la zona de estudio para establecer la naturaleza general y las propiedades del sitio.
- \* Planeación y ejecución de monitoreo en los portales de salida de los túneles del Ramal Camelinas.
- \* Verificar las condiciones del sitio y observar su comportamiento durante el proceso de construcción de las estructuras dirigido a la toma de decisiones.

---

## CONTENIDO

---

En términos generales, el presente documento está conformado por tres apartados.

En el Capítulo 1 se describen los distintos tipos de aparatos que pueden ser utilizados en la medición de parámetros y aspectos que se consideren esenciales para definir la obra a lo largo de su vida útil. Se mencionan los instrumentos de medición geotécnica utilizados en túneles, los principios básicos de su uso y su forma de operación.

No obstante, los aparatos aquí mencionados pueden ser utilizados en distintos tipos de obras, poniendo atención en el previo análisis del terreno donde se plantea su uso.

El Capítulo 2 aborda de manera introductoria las características del proyecto Ramal Camelinas, la importancia de éste en el contexto regional, sus antecedentes y las generalidades de la obra, analizando los factores que condicionan el comportamiento de la zona de estudio.

En el Capítulo 3 se trata el estudio y proceso de instrumentación en campo de los portales de salida de los túneles localizados en el Ramal Camelinas. Se han de interpretar en esta parte las mediciones realizadas permitiendo establecer el comportamiento de las estructuras y la evolución de sus condiciones de estabilidad.



# Capítulo 1

## LA INSTRUMENTACIÓN EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Los estudios geotécnicos son parte esencial del análisis de todo proyecto para definir su viabilidad. A partir de la instrumentación, es posible determinar las condiciones del terreno y su competencia ante la construcción de una estructura.

El movimiento de un terreno nos indicará la condición de estabilidad del mismo; estos pueden ser, movimientos mínimos que presenta una masa durante su vida operativa y que pueden continuar sin que se produzca una falla, o por el contrario, movimientos precursores de tendencias que llevan a un posible colapso.

Debido a que lo anterior resulta impredecible, programas de comportamiento y monitoreo de movimientos aportan gran valor a la gestión de riesgo en las zonas de estudio. La importancia de la instrumentación en campo recae en la obtención de información acerca del comportamiento de un talud o un deslizamiento a lo largo del tiempo con el fin de determinar los parámetros geotécnicos que definen el mecanismo de falla.

Los movimientos de tierra son comúnmente vistos en minas a cielo abierto, cuyo funcionamiento no se detiene por pendientes en movimiento, siendo éstas cuidadosamente reguladas para advertir del deterioro en las condiciones de estabilidad. Otras vertientes que se

someten a movimientos y que para el caso es aplicable el uso de instrumentos de monitoreo son los deslizamientos de tierra, estructuras de obras hidráulicas, redes de transporte y obras puntuales en entornos urbanos como son túneles, puentes, etc.

Lo anterior, puede ser por causa de movimientos acumulativos, o eventos naturales como es el caso de terremotos, períodos inusuales de precipitación y la actividad humana.

En este capítulo se describen los tipos de instrumentación, sus características, ventajas y desventajas de cada uno y la aplicación de cada uno de ellos, sin embargo es responsabilidad del ingeniero utilizar el sistema que se considere más conveniente para cada proyecto.

## 1.2 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación se atribuye como solución a una serie de situaciones típicas, las cuales son mencionadas a continuación:

- \* Determinación de movimientos laterales y verticales en la masa deslizada.
- \* Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en deslizamientos activos.
- \* Determinación del movimiento con respecto al tiempo de un deslizamiento.
- \* Establecer mecanismos de alarma.
- \* Monitoreo de niveles de agua freática y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- \* Identificación de efectos producidos en una masa de deslizamientos por acciones constructivas como cortes o terraplenes.
- \* Vigilar y evaluar la efectividad de diferentes sistemas de control.
- \* Comunicación entre aparatos medidores y sistemas de alarma.

### 1.3 LUGARES ESTRATÉGICOS A INSTRUMENTAR

De acuerdo con la magnitud y el tipo de obra es que se fijan los lugares en donde se realizará la instrumentación. Regularmente se divide en zonas geotécnicas marcadas, tratando de correlacionar los instrumentos con los perfiles que se tienen del suelo.

Se debe tener especial cuidado cuando la excavación pase por lugares de vital importancia, como pueden ser edificios, puentes, cruces con instalaciones de tipo eléctrico, sanitario o petroquímico, cauces o fallas; siendo estos lugares de relevancia para el monitoreo.

Es relevante también, que la información generada por el monitoreo de instrumentos sea útil para el proyecto, por lo que antes de definir su posicionamiento y elegir el tipo de instrumento a utilizar, se realizan los siguientes pasos:

- \* Revisión del perfil estratigráfico y determinación de las zonas geotécnicas.
- \* Recabar información que pueda ayudar a determinar puntos de interés para la colocación de los instrumentos.
- \* Realizar una inspección de superficie para determinar estructuras o zonas de interés que pudieran presentar algún problema o que signifiquen un riesgo para la construcción de la obra.
- \* Con la información anterior, determinar preliminarmente las zonas a instrumentar.
- \* Visita de campo para comprobar la factibilidad de las instalaciones, monitoreo y seguimiento.
- \* Proponer definitivamente los lugares a instrumentar.
- \* Realizar un plan de trabajo con especificaciones del monitoreo, según el caso.

### 1.4 TIPOS DE INSTRUMENTOS

En el planteamiento de uso de instrumentos de monitoreo se requiere comprender el tipo de movimiento que se está produciendo y el tipo de información que se necesita, esto para la selección adecuada del equipo a utilizar y facilitar el posterior análisis de resultados. Asimismo,

el posible mecanismo de falla está relacionado con el tipo de movimiento, lo cual es muy útil para la determinación de un apropiado procedimiento constructivo o de estabilización.

Para la obtención de parámetros dentro de la instrumentación de túneles buscamos cómo afecta la obra al medio, es decir, cambios en el exterior del túnel; por otro lado nos interesa la revisión de las condiciones de la obra misma (al interior del túnel).

### **Mediciones al exterior del túnel.**

Este tipo de mediciones permiten detectar oportunamente deformaciones inadmisibles, así como el desarrollo de condiciones de inestabilidad.

a) Deformaciones verticales de la superficie del terreno y estructuras vecinas.

Es útil, para este tipo de deformaciones emplear referencias fijas marcadas sobre la superficie del terreno colocados sobre el eje del trazo, en secciones transversales o sobre fachadas de construcciones vecinas.

b) Deformaciones horizontales de la superficie del terreno y estructuras vecinas.

Para estas mediciones se puede sacar ventaja de los mismos testigos superficiales de las secciones transversales, siendo conveniente que se encuentren alineados para definir líneas de colimación.

c) Deformaciones de la masa de suelo.

Es posible obtener modelos tridimensionales del comportamiento del suelo, a través de mediciones de deformación horizontal de los estratos del subsuelo a diferentes profundidades.

8

---

d) Desplomes de estructuras vecinas.

Funcionan como indicador de movimientos en superficie.

e) Presión de agua en el subsuelo.

Es importante llevar a cabo observaciones de los niveles piezométricos en áreas circundantes al túnel; esto para evaluar los cambios que ocurran durante la construcción, sea porque interese evaluar la presión de poro alrededor del túnel y el consecuente hundimiento del

suelo por consolidación, o bien porque se tenga planeado abatir el nivel freático para evitar filtraciones de agua hacia el túnel.

### **Mediciones al interior del túnel. [González Santiago, 2011]**

En esta parte, es de interés conocer aspectos como la reducción de dimensiones de la sección del túnel, distribución de las deformaciones en la masa de suelo debido a la excavación, la altura de la zona de alteración, esfuerzos actuantes sobre el revestimiento.

#### a) Deformaciones del revestimiento del túnel.

Comúnmente se hacen dos tipos de mediciones: la del movimiento vertical absoluto de la sección del túnel y la de los desplazamientos entre dos puntos fijos situados sobre la superficie expuesta del mismo, es decir las convergencias.

#### b) Medición de cargas en el revestimiento.

La obtención de la carga actuante puede ser por medio de tres métodos: de manera indirecta a partir de la medición de deformaciones con aparatos mecánicos o cuerda vibrante, directamente con celdas de carga, o bien mediante celdas de presión instaladas en el interior del revestimiento.

#### c) Medición de deformaciones en el revestimiento definitivo.

Las magnitudes que son generalmente reguladas por aparatos de monitoreo del terreno son:

Magnitudes superficiales, horizontales y verticales al interior del macizo en estudio, grietas y movimientos en bloque de rocas y variación en los niveles freáticos; cada una de las cuales <sup>9</sup> serán interpretadas por los instrumentos que miden los movimientos del terreno y subsuelo y que pueden ser agrupados en tres clases:

- \* Métodos de monitoreo superficial.
- \* Métodos de monitoreo interno.
- \* Métodos de monitoreo sísmico.

### **1.4.1 INSPECCIÓN VISUAL DIRECTA.**

En ella se observan todas las anomalías topográficas que se puedan detectar, así como grietas, signos de rotura o desgarre, las discontinuidades que puedan ser favorables al movimiento, afloramientos de aguas subterráneas, entre otros [Alpízar y Sanz, 2013].

Estas observaciones, ligadas a los mapas geológicos, logran definir un primer esquema del movimiento.

### **1.4.2 MÉTODOS Y EQUIPOS DE MONITOREO SUPERFICIAL.**

En este apartado se describen los métodos más comunes para mediciones de movimientos superficiales.

En general, es más probable que el costo de monitoreo en superficie sea menor que la instalación y mantenimiento de instrumentos de medición en el subsuelo, sin embargo se debe tener igual cuidado para la ubicación de los aparatos superficiales, ya que las mediciones sólo serán bien definidas si se realizan sobre el movimiento en superficie que representa el movimiento global de la pendiente, talud o deslizamiento.

Para este tipo de métodos, es importante considerar también, la accesibilidad al sitio y el tiempo de instalación y manejo de los instrumentos.

Los movimientos superficiales se presentan en cualquier tipo de obra durante e incluso antes de su construcción, caracterizándose por ocurrir en distintas direcciones, las cuales deben ser cuantificadas. Para estos métodos, es indispensable establecer una referencia fija que se encuentre alejada de cualquier posible efecto producido por la misma construcción de la obra y simplemente para tener una base de partida.

#### **1.4.2.1 EQUIPOS CONVENCIONALES DE TOPOGRAFÍA**

Elementos topográficos son el sistema más común de instrumentación. Monitoreo que funciona para la detección tanto de movimientos laterales, como verticales en taludes, utilizando equipos ópticos o electrónicos.

El uso principal de este tipo de control es para obtener la información necesaria que compruebe el comportamiento de la superficie del terreno y detectar cualquier indicio sobre condiciones adversas; de esta forma se podrá hacer una valoración continua de la seguridad.

#### 1.4.2.1.1 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA DESLIZAMIENTOS LATERALES

La presencia de movimientos laterales ocurre generalmente en sitios donde se construyen excavaciones verticales o en terrenos de pendientes inestables; estos casos deben ser detectados, analizados y comparados con cálculos de estabilidad.

Es importante registrar las magnitudes y rangos de movimientos, así como entender el área implicada en el deslizamiento.

Se describirán a continuación los elementos necesarios para la realización de este trabajo:

##### **Teodolito.**

Aunque el uso de ese equipo está siendo sustituido por otros aparatos, es un instrumento diseñado para medir distancias y ángulos (horizontales y verticales).

Según la posición del ocular, los tránsito o teodolitos pueden ser concéntricos o excéntricos.

Actualmente, se fabrican de nonio, micrómetro óptico y electrónico.

##### **Estación Total.**

La estación total es un aparato que incorpora un distanciómetro, un microprocesador y un teodolito electrónico.

Una estación total permite realizar múltiples tareas de medición electrónicas, almacenamiento y transferencia de datos, además de que permite hacer cálculos en tiempo real.

11

Los componentes básicos de una estación total pueden dividirse en tres grupos:

- \* Mecánicos: limbo, ejes, tornillos, nivel y base nivelante.
- \* Ópticos: anteojo y plomada óptica.
- \* Electrónicos: distanciómetro, lectores de limbos, software y memoria.

### **Estadales.**

Son un conjunto de reglas de diferentes tamaños que sirven como apoyo para la medición de distancias con los hilos estadimétricos del equipo y para realizar nivelaciones trigonométricas o geométricas.

Los estadales se fabrican de fibra de vidrio, aluminio, madera, poliuretano e invar; pueden ser graduados cada 0.5 cm, 1 cm o con código de barras.

### **Bastones.**

Los bastones son tubos telescópicos de diferentes longitudes. Su extremo inferior termina en punta y el extremo contrario funciona como adaptador para colocar el prisma con el cual se realizan las mediciones. Portan un nivel para su correcta colocación y están pintados en dos colores (blanco y rojo) cada 25 cm o 50 cm.

### **Prismas.**

Consisten en un conjunto de espejos dispuestos de forma que permiten la incidencia del haz del láser y que éste refleje la señal hacia el equipo (teodolito o estación total); conociendo de esta manera la distancia entre dos puntos.

## **TOMA DE LECTURAS.**

Es necesario para la toma de lecturas, un banco de referencia para control horizontal, testigos superficiales para movimientos horizontales, así como un prisma.

El prisma usado en las mediciones debe ser el adecuado para las características del equipo de medición que se utilice.

Con ayuda de una estación total, se miden y consiguen de manera precisa las coordenadas (X, Y, Z) de los monumentos de referencia para el control horizontal, pues estas coordenadas servirán de base para la medición de los movimientos horizontales del talud donde se emplazará el túnel.

Para la toma de lecturas de los testigos superficiales, se coloca el equipo seleccionado sobre un banco de referencia, se centra y se nivela para posteriormente hacer puntería sobre el monumento que sirve de mira de referencia y que se encuentra en otra ladera, haciendo coincidir el hilo vertical del lente con el prisma ubicado en el monumento de referencia, fijando



el movimiento del limbo horizontal de la estación total. A partir de ese monumento y hasta terminar las observaciones, se van tomando las lecturas correspondientes a cada testigo. Para ello se coloca el prisma reflector en el centro de cada testigo (en ocasiones se utilizan pernos de centraje forzoso) y se realizan las mediciones correspondientes para después trabajar en gabinete con los datos obtenidos, los cuales pueden ser ángulos y distancias o bien las coordenadas propias de cada testigo superficial.

## **CÁLCULOS.**

Para conocer la magnitud y dirección de los desplazamientos horizontales en los taludes, con los datos obtenidos en campo, se realizan los cálculos para conocer las coordenadas correspondientes a cada uno de los testigos superficiales observados. Lo anterior referido a la línea base utilizada.

Es importante destacar que se trabaja con promedios de las lecturas observadas.

### **Cálculo con las coordenadas obtenidas.**

A partir de las lecturas realizadas, se obtiene el valor promedio de las coordenadas. El desplazamiento observado se calculará con la siguiente fórmula:

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

Dónde:

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

### **1.4.2.1.2 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA DELIZAMIENTOS VERTICALES**

Para la aplicación de este método son necesarios los siguientes elementos:

**Estadales**, anteriormente descritos.

**Nivel.** También llamado equialtímetro, el nivel óptico está diseñado para medir desniveles entre puntos que se encuentran a diferentes alturas.

Existen distintos tipos de niveles; entre ellos se encuentran: nivel de mano, basculante, fijo, láser, automático y electrónico, siendo estos dos últimos los más usados en la actualidad debido a su precisión.

### **TOMA DE LECTURAS.**

Para la determinación de movimientos verticales, es conveniente colocar un banco de nivel para tener un punto de referencia ubicado en las laderas de la obra y alejado de la influencia de ésta misma en lugares firmes y estables. El número de bancos de nivel depende de las condiciones del campo, éstos, se establecen en sitios convenientes para nivelar a partir de ellos los testigos superficiales de movimiento vertical.

Los testigos superficiales se colocan en los taludes de la obra, ya sea en líneas longitudinales o transversales y la cantidad de testigos depende de las condiciones de campo y de las dimensiones de la obra.

Una vez nivelados los bancos de nivel se procede a nivelar a partir de ellos los testigos para conocer las elevaciones de cada uno; se recomienda efectuar tres nivelaciones de ida y vuelta para llevar un mejor control y asignar la elevación promedio a cada testigo.

Posteriormente, se realizarán nivelaciones periódicas, cuya frecuencia se puede ajustar de acuerdo con la velocidad de los desplazamientos obtenidos. El tipo de nivelación puede ser geométrica o trigonométrica, la primera se realiza con un nivel y estadales, obteniendo la diferencia de niveles entre dos puntos a partir de las visuales horizontales lanzadas hacia las miras ubicadas en los puntos de interés; si se puede obtener el desnivel entre puntos de interés con una sola visual es una nivelación simple y si es necesario la puesta de estaciones intermedias para llegar al punto de interés, es una nivelación compuesta. En la nivelación trigonométrica, se utilizan ángulos verticales para conocer la diferencia de nivel entre dos puntos, con una estación total se miden distancias inclinadas y ángulos verticales. En este tipo

de nivelación, el equipo se coloca sobre uno de los puntos de interés y en el otro punto se coloca la mira (prisma) y se mide el ángulo vertical y la distancia entre ambos puntos y por medio de operaciones trigonométricas se conoce el valor del nivel del punto de interés.

Una vez definido el tipo de nivelación que se va a realizar, se calcula la magnitud de movimientos verticales con la siguiente operación:

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

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

### 1.4.3 MÉTODOS Y EQUIPOS DE MONITOREO INTERNO

Durante la construcción de un terraplén, túnel, cortinas u otro tipo de obras de gran magnitud, ocurren movimientos tanto superficiales como internos, causados por cambios de esfuerzos, presiones de poro o efectos secundarios. De la misma manera, se presentan movimientos posteriores a la construcción, cuya velocidad suele disminuir con el tiempo, habiendo excepciones en situaciones especiales como sismos.

Parte del proceso de diseño, requiere de la determinación del estado de esfuerzos y deformaciones del talud en el cual se desplantará la obra proyectada, basándose en los análisis numéricos y pruebas de laboratorio, los cuales se corroboran mediante la observación. Así, “el propósito de la observación de los movimientos en la masa de suelo es proveer información respecto a la magnitud, velocidad y distribución de los asentamientos, detectar síntomas de falla inminente de un talud o revelar la deformación de una estructura enterrada” [CONAGUA, 2012].

#### 1.4.3.1 INCLINÓMETROS

Son instrumentos de gran versatilidad utilizados para el monitoreo de estabilidad en taludes y terraplenes; sirve para medir desplazamientos verticales y horizontales de una masa

de suelo o roca, miden también el cambio de pendiente en sondeos y rellenos mediante la introducción de una sonda fija o guiada en el interior de una tubería o ademe guía.

Los inclinómetros se colocan generalmente alineados en secciones longitudinales paralelos al portal del túnel que se requiere monitorear.

Los inclinómetros se clasifican en:

- \* Verticales
- \* Verticales fijos
- \* Horizontales
- \* Horizontales fijos

En esta clasificación, los dos últimos se emplean en terraplenes donde se requiere tener acceso por ambos extremos de la tubería guía, sin embargo, para distancias largas o con deformaciones verticales importantes se dificulta la medición por lo que se emplea otro tipo de instrumento, como son las celdas de asentamiento o deformómetros.

#### **1.4.3.1.1 Inclinómetro Vertical.**

Un sistema de inclinómetro vertical mide el cambio de inclinación de una tubería colocada dentro de una perforación en un talud, para enseguida calcular la distribución de movimientos laterales y determinar la profundidad de la superficie de falla y la dirección y magnitud de los desplazamientos.

Este tipo de aparato consta de cinco partes básicas descritas a continuación:

#### **Tubos o ademes guía.**

La tubería se instala de manera permanente dentro de una perforación vertical o se coloca en un terraplén a medida que se construye. El ademe es fabricado de plástico, acero o aluminio, o fibra de vidrio, de los cuales el primero es el más recomendado en la actualidad. El ademe tiene cuatro guías longitudinales para orientar la unidad sensora, lo que permite medir la inclinación en dos planos perpendiculares (A y B).

### **Sonda o torpedo.**

Consiste en una carcasa hermética de acero inoxidable en donde se aloja el dispositivo para medir la inclinación. La sonda se introduce dentro del ademe para medir la inclinación de este último con respecto a la vertical y así detectar cualquier cambio causado por el movimiento del terreno.

Las dimensiones de la carcasa pueden variar según el modelo y la marca del equipo.

Mediante mediciones periódicas se obtiene la magnitud, dirección y velocidad de movimiento del ademe guía.

Los sensores más usados para medir la inclinación con respecto a la vertical son:

- \* Transductor de potenciómetro.
- \* Transductor con *strain gages*.
- \* Transductor con MEMS.
- \* Transductor con servo-acelerómetro.
- \* Transductor de cuerda vibrante.

### **Cable eléctrico.**

El cable permite subir y bajar el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie.

Está fabricado de conductores eléctricos individuales de cobre, aislados entre sí; la cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene marcas para medir profundidades a cada 50 cm.

### **Unidad portátil de lectura y almacenamiento.**

Funciona como proveedor de energía, recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y puede guardar y procesar los datos.

### **Polea.**

Sirve para deslizar el cable eléctrico sin dañarlo durante la operación con el torpedo dentro de la tubería.

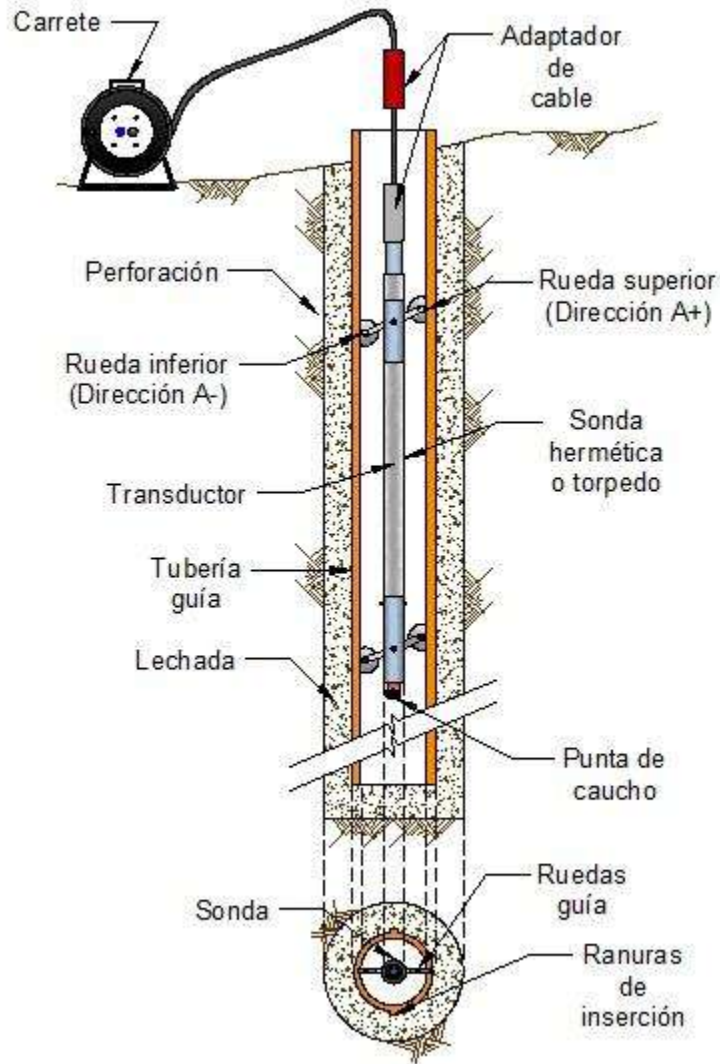


FIGURA 1. Vista de componentes de inclinómetro vertical.

#### 1.4.3.1.2 Inclinómetro vertical fijo.

Los inclinómetros verticales fijos consisten en una serie de sondas colocadas dentro del ademe guía a diferentes profundidades, unidas mediante una barra. Los inclinómetros fijos reducen considerablemente el trabajo de campo, disminuyen los errores y tienen la gran ventaja en la automatización.

Los inclinómetros fijos usan sensores MEMS, uniaxiales o biaxiales; presentan una buena estabilidad a la temperatura, debido a que las sondas y los cables permanecen dentro del tubo guía.

En los inclinómetros fijos las sondas se pueden extraer para efectuar reparaciones, se pueden usar eficientemente en combinación con las sondas móviles para satisfacer necesidades específicas del proyecto de instrumentación.

Un sistema de inclinómetro fijo consta de:

- \* Tubos guía
- \* Un sensor o una serie de n sensores.
- \* Un tubo de conexión.
- \* Un par de ruedas superiores, un par de ruedas inferiores de fondo y un conjunto de ruedas intermedias.
- \* Cable conductor.
- \* Cable de suspensión.
- \* Un cable de seguridad.
- \* Un juego de herrajes metálicos de seguridad.
- \* Unidad portátil de lectura.

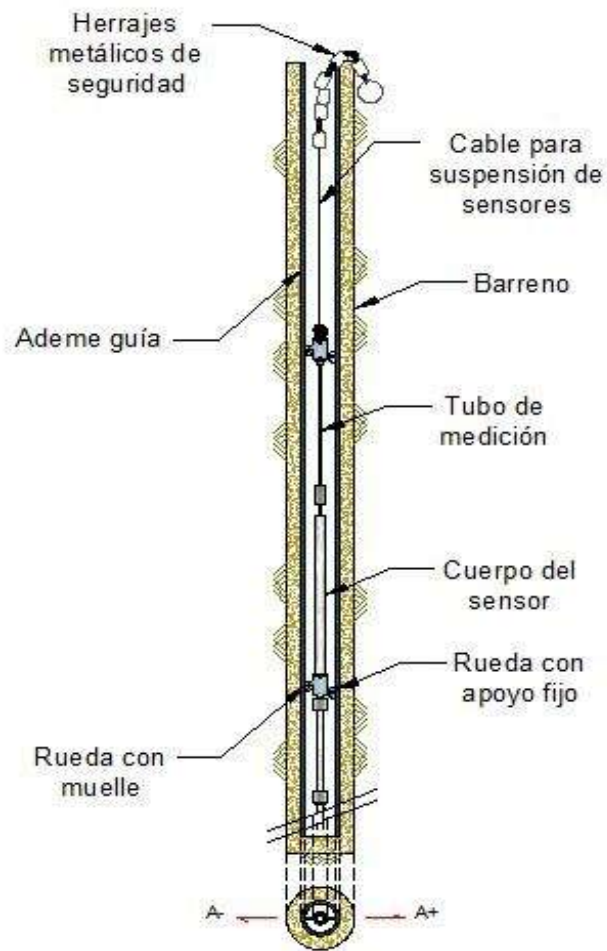


FIGURA. Vista de componentes de inclinómetro vertical fijo.

#### 1.4.3.1.3 Inclinómetro horizontal.

El inclinómetro horizontal consta de partes similares a las del inclinómetro vertical, <sup>20</sup> exceptuando la adición de un cable de tracción, el cual es fabricado de acero inoxidable y se utiliza para cada operación de lectura. Este cable se deja dentro del ademe guía al terminar las lecturas.

La función principal del inclinómetro es medir los cambios de inclinación del ademe guía con respecto a su posición horizontal original. La sonda del inclinómetro obtiene dos conjuntos de datos o lecturas ( $A^+$ ,  $B^+$  y  $A^-$ ,  $B^-$ ), en planos perpendiculares entre sí, uno vertical y el otro



horizontal. El eje A es el eje principal de referencia, se orienta para que registre la componente principal del desplazamiento previsto, en consecuencia el eje B es el eje secundario.

La base de las mediciones subsecuentes son las lecturas iniciales, que constituyen el perfil inicial. A partir del extremo remoto y hacia el extremo opuesto, para cada localización de medición se toman las lecturas A+ y B+, a lo largo del tubo guía, se extrae la sonda y se gira 180° y se toman las lecturas A- y B-, al igual que las mediciones en un inclinómetro vertical.

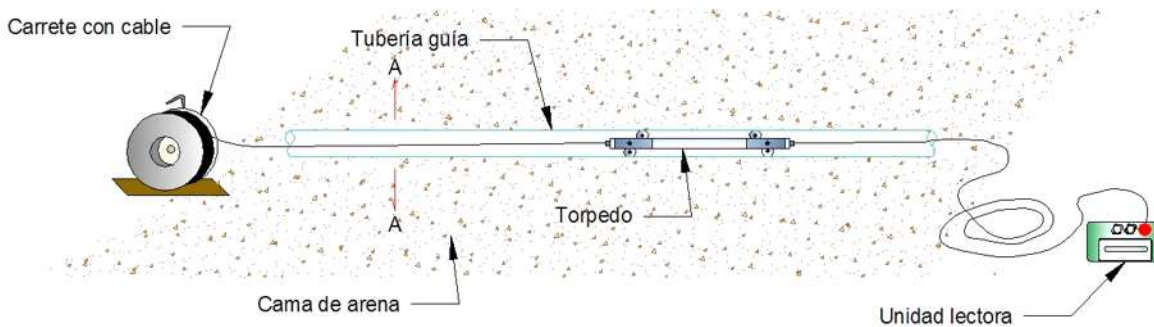
Los asentamientos se calculan mediante comparación de los valores iniciales con los subsecuentes, tal que el asentamiento de cada estación está dado por la expresión:

$$\text{Asentamiento en la estación} \\ \Delta = \sum_1^n (L \text{ Sen } \theta_n)_{\text{actual}} - (L \text{ Sen } \theta_n)_{\text{inicial}}$$

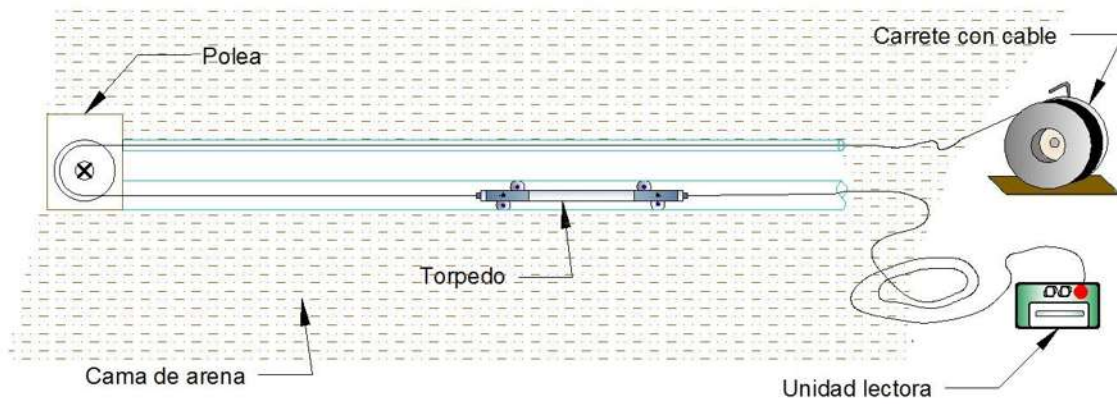
Dónde:

L es la distancia entre los ejes de las ruedas (50 cm) y

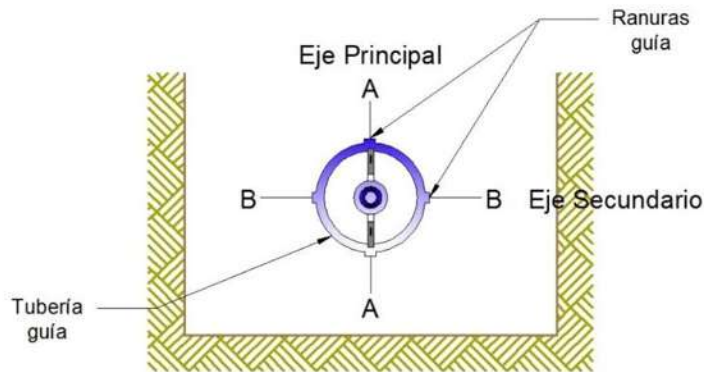
q es el ángulo de inclinación de la sonda con respecto a la horizontal.



a) Inclinómetro horizontal abierto en sus dos extremos.



b) Inclinómetro horizontal cerrado en un extremo.



c) Sección Transversal.

FIGURA. Vista de componentes de inclinómetros horizontales.

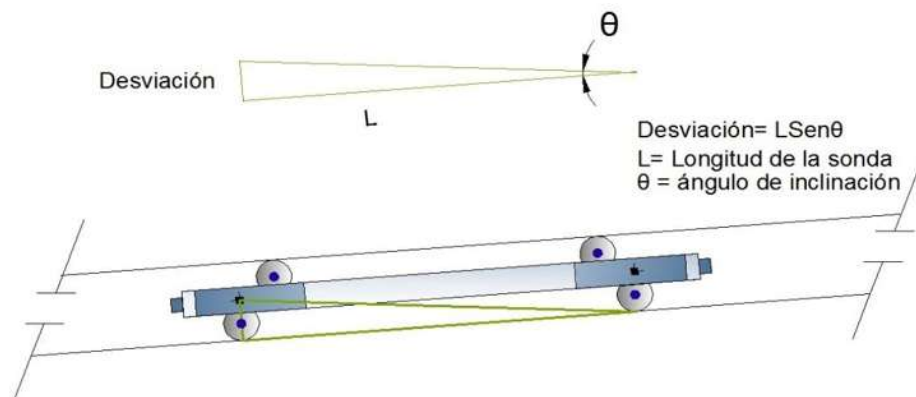


FIGURA. Principio de funcionamiento de torpedo de inclinómetro horizontal.

#### 1.4.3.1.4 Inclinómetro horizontal fijo.

Los inclinómetros horizontales fijos se componen de uno o varios sensores dispuestos en serie en una ubicación definida y colocados en forma horizontal dentro de un tubo guía, alineando las ranuras con respecto a la vertical, que a su vez se instala dentro de una zanja para registrar la inclinación con respecto a la horizontal con objeto de determinar asentamientos o expansiones del suelo circundante.

El mecanismo de las ruedas inferiores de los sensores es fijo y se apoyará en la ranura inferior del tubo guía, mientras que las que deslizan en la ranura superior son móviles.

Las sondas se colocan horizontalmente dentro del tubo guía donde las ruedas fijas se colocan en la ranura inferior (A+), por consiguiente, las móviles estarán en la ranura superior (A-). Sin embargo, el punto de referencia puede considerarse en ambos extremos de la tubería.

La interpretación de los valores es la siguiente:

- a) Extremo lejano de referencia: los desplazamientos negativos indican el movimiento hacia arriba, mientras que los positivos son hacia abajo.
- b) Extremo cercano de referencia: los desplazamientos negativos indican movimiento hacia abajo, mientras que los positivos son hacia arriba.

#### 1.4.3.2 CLINÓMETROS.

El clinómetro (tilmeter) es un equipo mecánico o eléctrico que se diseña para medir con precisión los cambios en la inclinación o rotación de un punto ubicado en tierra o en una estructura. Funciona bajo el principio gravitacional, o sea, que registra los movimientos de inclinación con respecto a un eje vertical. Su aplicación es monitorear la inclinación en muros de retención, en zonas de deslizamiento o de hundimiento o en elementos con movimiento rotacional producto de un movimiento sísmico, incluyendo la condición de que se encuentren sumergidos.

Los clinómetros se fabrican uniaxiales y biaxiales. Los uniaxiales miden la rotación en un plano vertical. Los biaxiales miden la rotación en dos planos verticales ortogonales. Los clinómetros

se instalan sobre miembros estructurales o superficies. El sensor para clinómetros de superficie puede ser de tipo mecánico, electrolítico, de servo-acelerómetro, de cuerda vibrante o MEMS [CONAGUA, 2012].

Los clinómetros también se pueden instalar en barrenos, tanto en cortinas de concreto como en terraplenes.

Su sistema básico consiste en lo siguiente:

- \* Un dispositivo metálico de fijación, donde se monta el sensor, puede ser tan simple como un par de anclas, o una placa metálica que se fija a la estructura o superficie en estudio con tornillos, anclas o pegamento.
- \* Un sensor, que puede ser portátil o fijo.
- \* Cable eléctrico.
- \* Una unidad portátil de lectura con fuente de energía, donde se mide o graba la información del sensor. Esta unidad se puede sustituir por un equipo de grabación automatizada.

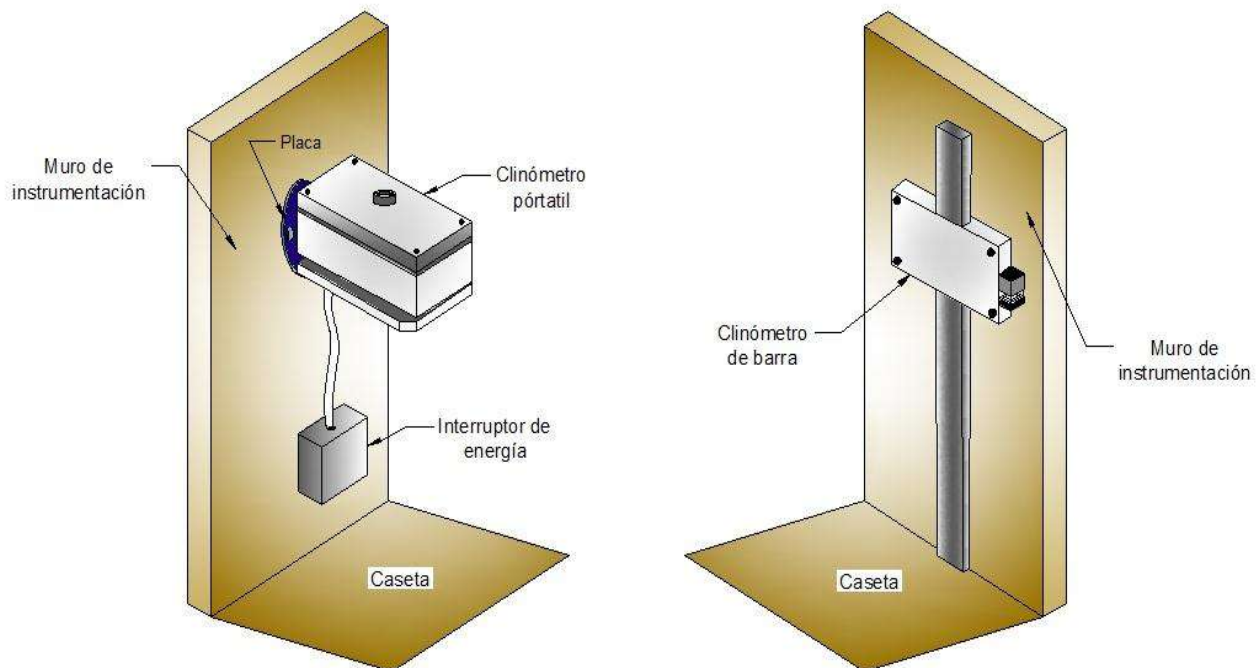


FIGURA. Configuración de clinómetro portátil y clinómetro de barra.

### 1.4.3.3 EXTENSÓMETROS.

Los extensómetros son instrumentos para medir el cambio de distancia entre dos puntos, 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.

Los extensómetros se pueden clasificar en externos e internos. Son externos cuando se instalan sobre una superficie al aire, e internos cuando se instalan en el interior de una masa de suelo o roca. A su vez, tanto los externos como los internos, se pueden subdividir en mecánicos y eléctricos. Los primeros requieren de la lectura directa de datos mediante micrómetros, indicadores de carátula, cintas, etc.; mientras que los segundos están provistos con algún tipo de transductor, como el potenciómetro lineal, el transformador diferencial variable lineal (LVDT), el transformador diferencial de corriente directa (DCDT), el de reluctancia variable (VRT), o el de cuerda vibrante (CV).

#### 1.4.3.3.1 Extensómetro Externos.

##### **Extensómetro externo de juntas y grietas.**

Este equipo se emplea para obtener el cambio de distancia entre dos puntos sobre una superficie rocosa en laderas, juntas constructivas o en estructuras de concreto.

Los componentes del sistema básico de un extensómetro externo son los siguientes:

- \* *Dos puntos de referencia o anclas*, se instalan de manera permanente en el interior de un barreno, los cuales son pernos fabricados de acero (varillas). Se fijan en el interior del barreno mediante un relleno ya sea con lechada, epóxico o taquetes expansivos.
- \* *Los cabezales* presentan un mecanismo articulado.
- \* *El cuerpo* del extensómetro, se instala de manera temporal o permanente, entre los dos puntos de referencia. Se compone por un cable o barra que desliza conforme se presenta el desplazamiento. En el caso de ser eléctrico contiene al transductor.
- \* *Una unidad de lectura*, consiste en un micrómetro o en un dispositivo portátil de lectura.

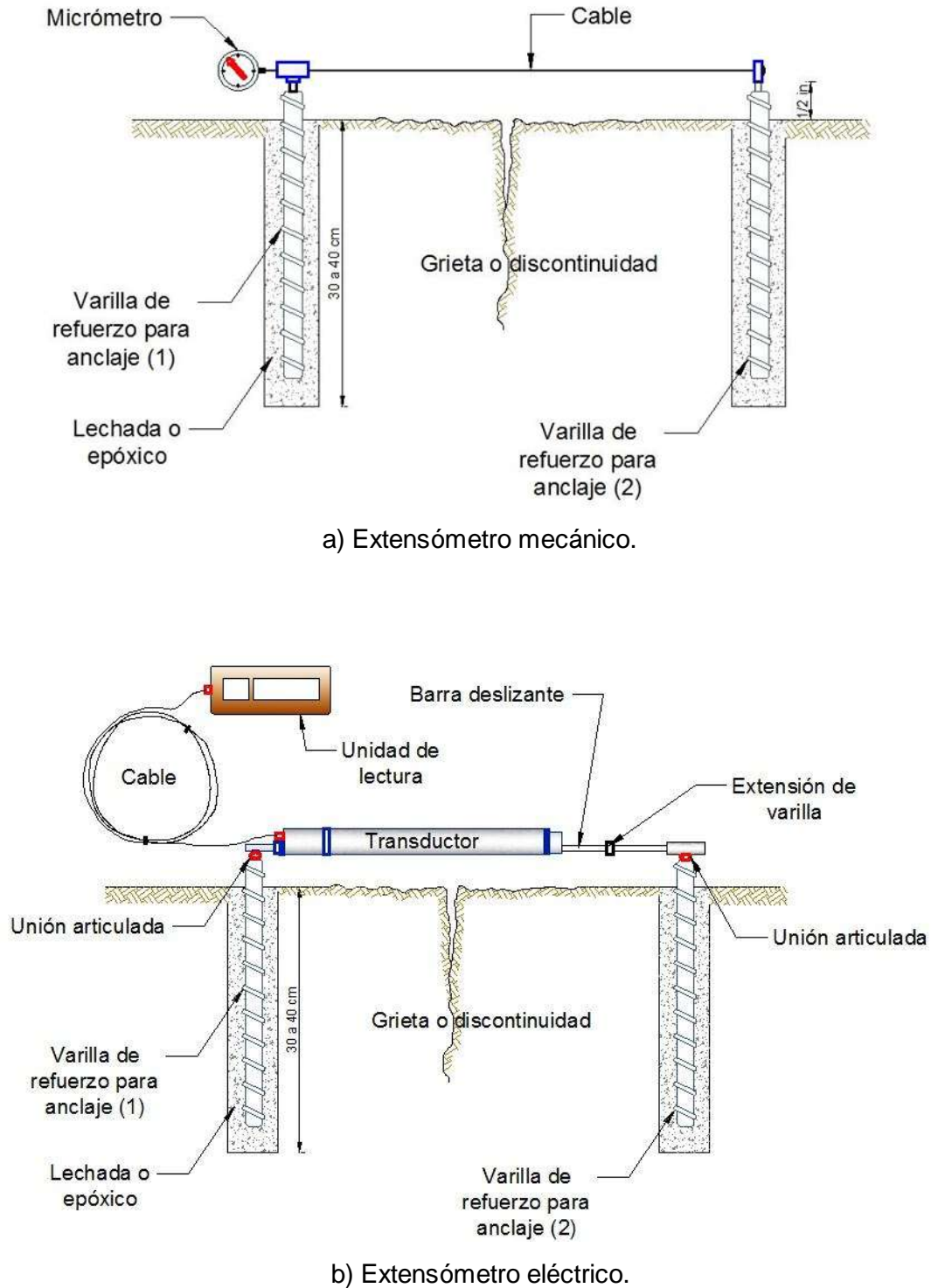


FIGURA. Partes de un extensómetro externo de juntas y grietas.

### Extensómetro externo de convergencia.

Se utiliza para medir el cambio de la distancia entre dos puntos en zonas cerradas, como túneles, excavaciones y galerías.

Dentro de su clasificación se tienen:

\* **Medidor con cinta o cable.**

Consiste en una cinta o cable enrollado en un carrete, que se sujeta mediante ganchos de seguridad a dos anclas con armellas, cuya distancia se desea medir, un mecanismo para ejercer tensión sobre la cinta metálica perforada, y una unidad de lectura.

El cable o cinta se fabrica de acero invar, acero inoxidable o fibra de vidrio y su longitud varía desde 16.5 cm (6.5 in) hasta 60 m; las perforaciones de la cinta se encuentran espaciadas cada 5 cm (2 in) y sirven para tensar la cinta, dicha tensión se puede lograr manualmente o con un motor eléctrico.

\* **Medidor con tubo o barra.**

Se compone de un tubo rígido de material invar, aluminio o acero galvanizado y está compuesto de placas en sus extremos. Utiliza un micrómetro para las lecturas; es empleado en túneles y puede colocarse vertical, horizontal o inclinado.

Su precisión puede verse disminuida por la longitud del tubo o barra empleada y por las deformaciones ocasionadas en los puntos de contacto.

\* **Medidor ultrasónico.**

Consiste en un transductor y un equipo de lectura.

El transductor emite una onda acústica hacia la superficie de interés, el tiempo que tarda en viajar, reflejarse y retornar al equipo se cuantifica para determinar la distancia. El rango óptimo de operaciones entre 30 cm y 11 m, considerando que no se tenga ninguna obstrucción durante la medición.

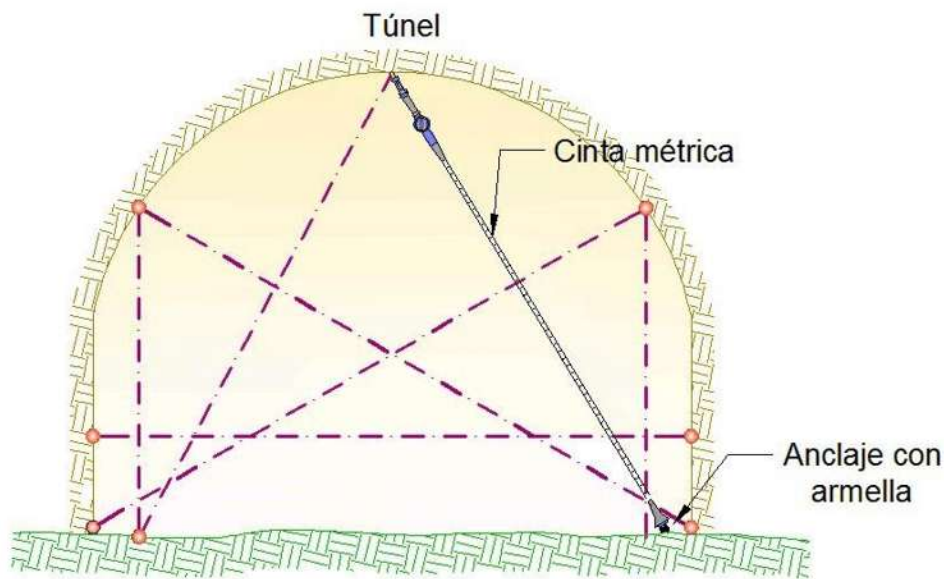


FIGURA. Extensómetro de convergencia.

#### 1.4.3.3.2 Extensómetro Internos.

##### **Extensómetro interno de placas.**

Estos aparatos se colocan en terraplenes para monitorear tanto grietas en una masa de suelo como deformaciones horizontales entre dos puntos.

Su sistema básico consta de:

- \* *Dos placas de referencia* fabricadas de acero (circulares o cuadradas), las cuales son instaladas de forma permanente al interior de una masa de suelo.
- \* *El cuerpo del extensómetro*, que se instala permanentemente entre las dos placas de referencia. El cuerpo contiene al tubo telescópico, varilla de acero y el transductor.
- \* *Unidad de lectura*, es el dispositivo eléctrico con el que se registran las lecturas.

##### **Extensómetro interno de barras.**

Los extensómetros internos de barras se instalan en un barreno de entre 61 mm a 96 mm (2.4 in a 3.8 in) de diámetro, el cual se realiza en suelo o roca donde se tenga presencia de



discontinuidades. La instalación se hace mediante barras ancladas en un extremo y libre en el extremo cabezal donde se tiene un punto de referencia.

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 sistema básico que compone a un extensómetro de barras consta de un ancla, una barra de acero inoxidable, un cabezal de referencia y una unidad de lectura.

#### 1.4.3.4 DEFORMÓMETROS.

Los deformómetros son instrumentos para medir la deformación entre varios puntos de referencia a lo largo de un eje mediante una sonda (provista con algún tipo de transductor), que se desliza dentro de un tubo de acceso. La tubería se coloca en forma vertical dentro de un terraplén o en un cimiento y sirve para evaluar los asentamientos o expansiones.

Hay dos tipos de deformómetros: mecánicos y magnéticos, sin embargo, ambos cuentan con el mismo sistema básico que consta de las siguientes partes:

- \* *Tubo de acceso.* Se instala de manera permanente en una perforación vertical. Se tienen variantes en cuanto a su conformación según el tipo de deformómetro. Pueden tener diferentes diámetros y deben permitir deformaciones del suelo hasta del 2%.
- \* *Carrete con cable eléctrico.* Éste se conecta a la sonda e incluye un voltímetro con un botón de prueba para verificar que la carga de la batería que proporciona energía a la sonda es de 12 volts y otro voltímetro de ajuste para sensibilidad.
- \* *Unidad de medición portátil.* También llamada sonda, en ella se encuentran inmersos los transductores.

##### 1.4.3.4.1 Deformómetro Mecánico.

En el deformómetro mecánico los puntos de medición se identifican mecánicamente con el paso de la sonda de medición; la tubería guía del inclinómetro se utiliza como de acceso, para que deslice la sonda a través de las ranuras, instaladas en forma telescópica. A la tubería

guía se le fija un perfil de acero de manera transversal a cada tramo de tubo. Los perfiles transversales aseguran que los tubos sigan el movimiento del suelo. La sonda consiste en un cilindro metálico con dos aletas retráctiles a los lados, las cuales se mantienen abiertas mientras desciende la sonda y permiten detectar la parte inferior de cada tramo de tubo al atorarse en dicha parte. También se puede usar un gancho ligado a una cinta métrica.

#### **1.4.3.4.2 Deformómetro Magnético.**

##### **Deformómetros con anillos magnéticos.**

Es en realidad un deformómetro eléctrico que consta de una tubería de acceso, tubería de plástico corrugada, una sonda, anillos sensores y una unidad lectora portátil.

La sonda se desliza al centro de la tubería de acceso y detecta los anillos sensores, se hace sonar un timbre hasta que el sonido sea más agudo para tomar la lectura.

La profundidad se mide con una cinta graduada y el asentamiento se calcula mediante la resta de la profundidad medida con respecto a la profundidad inicial.

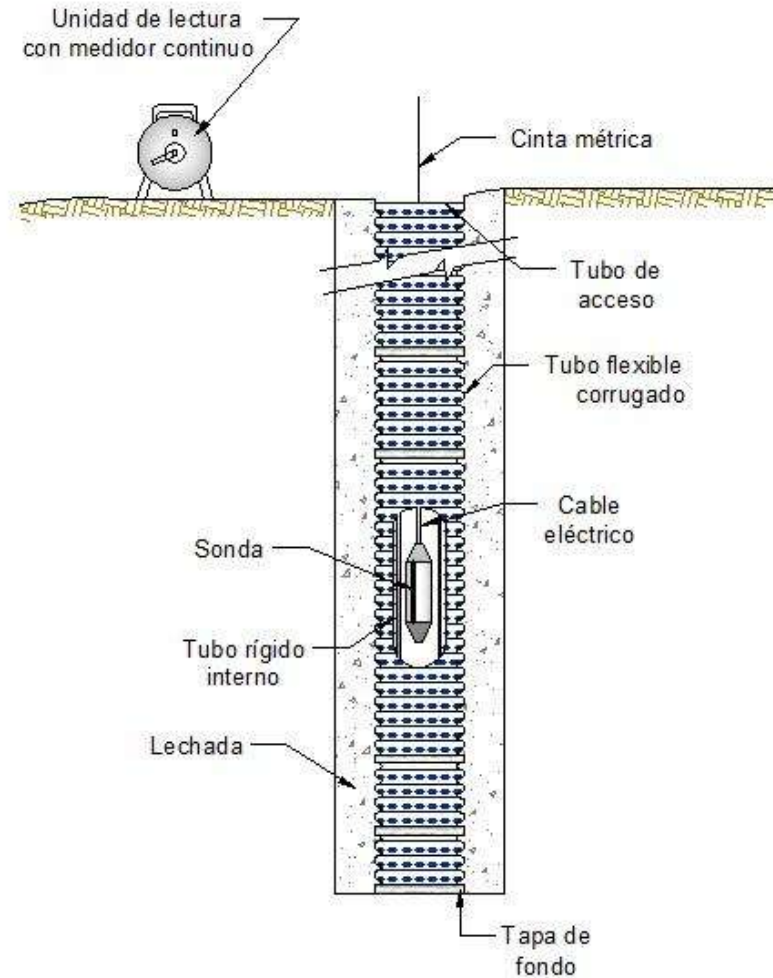


FIGURA. Partes de un deformómetro de anillos magnéticos.

### **Deformómetros de placas y arañas magnéticas.**

Este tipo de aparatos están diseñados para medir asentamientos y expansiones de suelos blandos debido a cargas y descargas producidas por la construcción de terraplenes, rellenos o edificios.

Los deformómetros de arañas, utilizan imanes que se colocan alrededor del tubo de acceso en los puntos donde se desee hacer mediciones.

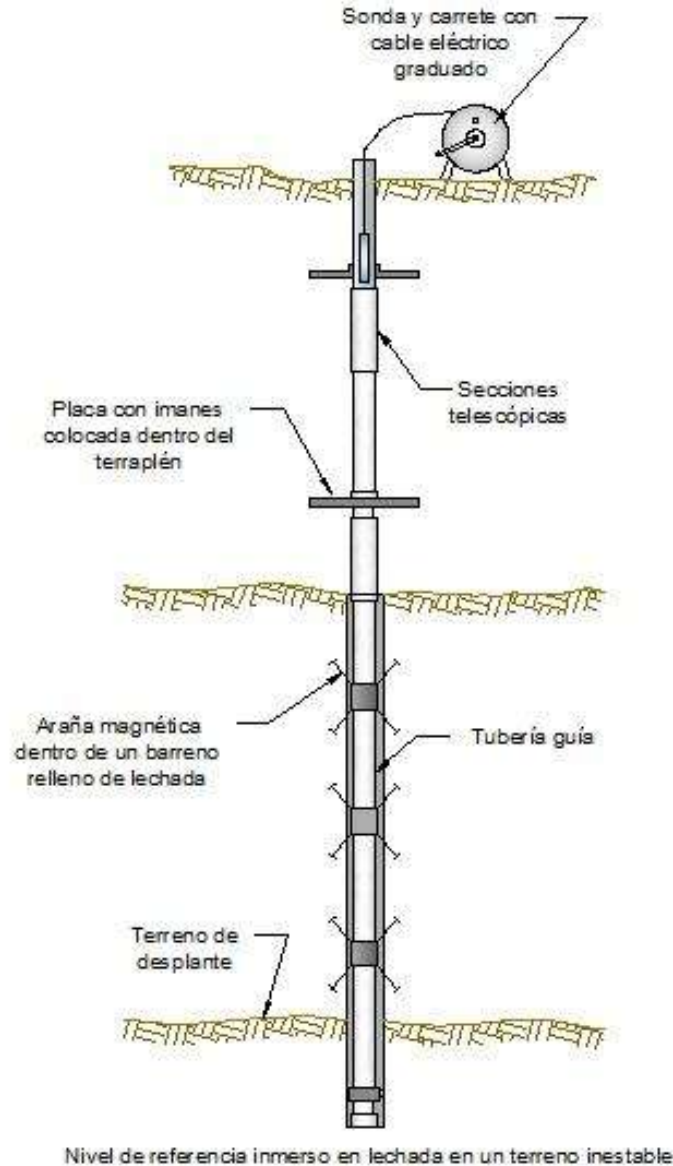


FIGURA. Instalación de un deformómetro con placas y arañas magnéticas.

#### 1.4.3.5 CELDAS DE ASENTAMIENTO.

La celda de asentamiento es un instrumento diseñado para la medición de deformaciones verticales, ya sean asentamientos o expansiones en un punto de interés dentro de un terraplén.

Las celdas de asentamiento consisten en tres componentes principales: un transductor de presión, un conjunto de tubos y cables de conexión, y un depósito de líquido.

Las lecturas con este equipo se realizan desde una caseta que es particularmente útil donde el acceso es difícil. Además, la instalación de este tipo de celdas no interfiere con el proceso de construcción.

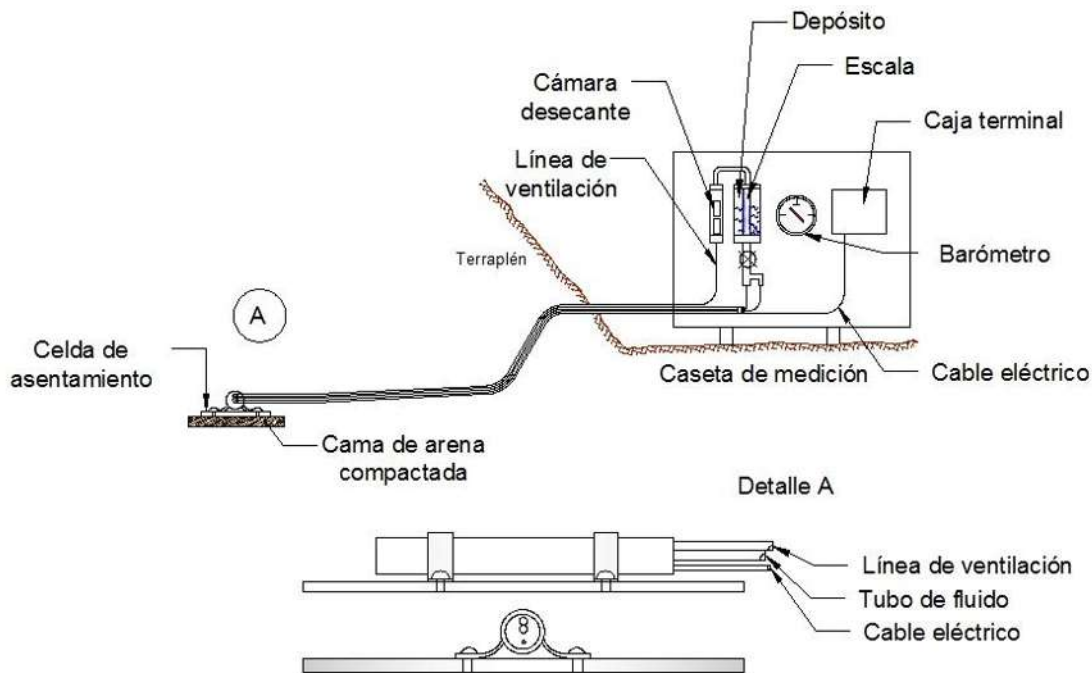


FIGURA. Componentes de una celda de asentamiento.

#### 1.4.4 MEDICIÓN DE PRESIONES.

Conocer el estado de esfuerzos en el interior de una masa de suelo resulta indispensable en el análisis de su estabilidad estructural; imperante para taludes que soportarán estructuras de dimensiones importantes.

##### 1.4.4.1 PIEZÓMETRO ABIERTO.

El piezómetro abierto consiste en un tubo corto con ranuras, llamado bulbo piezométrico que desciende a su posición en el subsuelo a través de una perforación. En el extremo superior del bulbo, se acoplan tubos rectos de menor diámetro hasta llegar a la superficie del terreno. La

elevación de la superficie libre de la columna de agua que sube por la tubería recta por efectos de la presión de poro, se mide desde la superficie del terreno con una sonda eléctrica.

El piezómetro abierto es de respuesta lenta a los cambios de la presión de poro, debido a que se requieren volúmenes importantes de agua para cambiar el nivel en el tubo a la atmósfera, sobre todo cuando se coloca en suelos finos como los limos y las arcillas.

El piezómetro abierto funciona con el principio de los vasos comunicantes. Una celda o bulbo poroso capta el agua del interior del suelo en el punto de interés y la presión que actúa en ese punto la eleva a través de un ducto recto hasta una posición (columna de agua) que equilibra la presión en el bulbo piezométrico; 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.

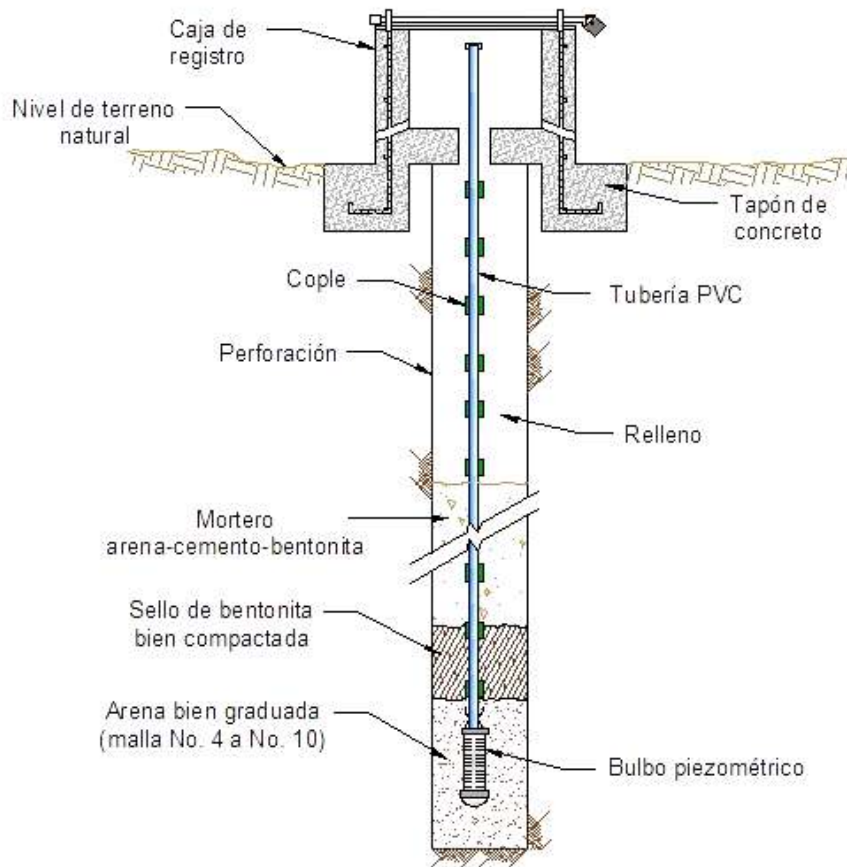


FIGURA. Instalación de piezómetro abierto tipo Casagrande.

#### **1.4.4.2 PIEZÓMETRO NEUMÁTICO.**

Los piezómetros neumáticos se utilizan para medir variaciones de la presión de poro que se presentan en una masa de suelo. Este tipo de aparato es muy útil cuando se instala en suelos de baja permeabilidad, puesto que son de respuesta rápida con pequeños volúmenes de agua desplazados en el interior de la celda piezométrica.

Este tipo de piezómetro permite medir la distribución de presiones de poro a lo largo de una vertical, si se coloca una serie de estos piezómetros a diferentes elevaciones; de igual manera puede conocerse la distribución de presiones a lo largo de una horizontal si se coloca una serie de piezómetros distribuidos a una misma elevación [CONAGUA, 2012].

El piezómetro neumático consta principalmente de tres partes: un cilindro metálico que contiene un diafragma y una piedra porosa, dos mangueras de aire y un dispositivo de medición para inyectar aire a presión.

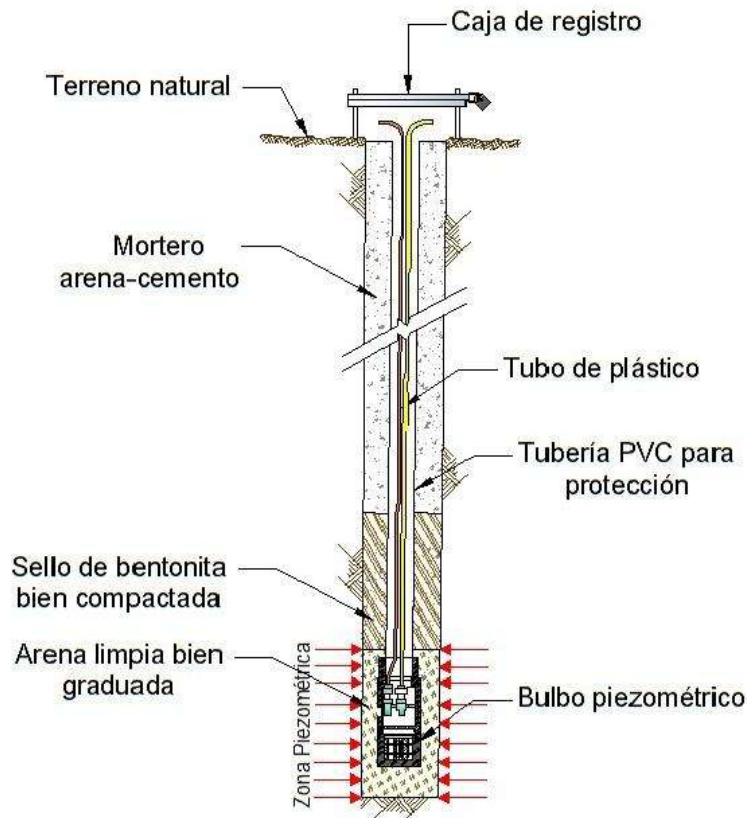


FIGURA. Instalación y sellado de piezómetro neumático.

#### 1.4.4.3 PIEZÓMETRO ELÉCTRICO.

El funcionamiento de un piezómetro eléctrico se basa en un diafragma que se flexiona bajo la acción de la presión de poro que actúa en uno de sus lados después de pasar por una piedra porosa. Por medio de diversos sensores o transductores se mide la deflexión que es proporcional a la presión aplicada; los sensores convierten la presión de agua en una señal eléctrica que se transmite mediante un cable hasta el sitio de medición.

36

Las principales tecnologías empleadas en la fabricación de estos instrumentos consisten en sensores piezorresistivos y de cuerda vibrante. Recientemente, se han desarrollado sensores de fibra óptica.



#### **1.4.4.4 CELDAS DE PRESIÓN.**

La medición de esfuerzos totales en la masa de suelo, debida a los procesos de construcción o excavación, es una necesidad de gran importancia para la ingeniería.

La medición de los esfuerzos totales en la masa de suelo, es necesaria para calcular los esfuerzos efectivos y como consecuencia conocer la resistencia al esfuerzo cortante en el punto de medición.

La medición de los esfuerzos totales es difícil, ya que la precisión de los valores medidos depende de las características de los instrumentos, del método de instalación y de las propiedades de los materiales donde se colocan.

Las celdas de presión constan de cuatro partes: unidad de lectura, cápsula plana llena de líquido, un sensor y un cable eléctrico.

Estos dispositivos pueden ser divididos en dos tipos de acuerdo a su aplicación: celdas de presión en suelos y celdas de contacto, las primeras se instalan en el interior de una masa de suelo o relleno, mientras que las segundas se emplean para medir presiones de tierra que actúan sobre estructuras enterradas.

En el caso de las celdas de presión en suelos se tienen dos tipos: de diafragma e hidráulicas.

##### **1.4.4.4.1 Celdas de presión de diafragma.**

Están formadas por una membrana circular rígida apoyada sobre un anillo perimetral, la membrana se deforma a causa de la presión externa y la deformación se manifiesta mediante un transductor de resistencia eléctrica adherido a la cara interna de la membrana, o bien por un transductor de cuerda vibrante, la cual es soportada por postes adheridos también al interior de la membrana.

##### **1.4.4.4.2 Celdas de presión de hidráulica.**

Este tipo de celdas es de alta sensibilidad. Consiste en una cápsula plana formada por dos placas de acero unidas en la periferia; la cavidad interna se llena con un fluido no compresible y se conecta a un transductor mediante un tramo de tubo de acero inoxidable.

En los procedimientos de instalación se consideran las celdas de manera individual o en grupo. Cuando se trata de celdas individuales generalmente se colocan en posición horizontal para medir los esfuerzos verticales; cuando es de interés medir las presiones en diferentes direcciones en una zona determinada del relleno, se instala un grupo de celdas con una distribución específica y a una misma elevación en posición horizontal (esfuerzos verticales), vertical (esfuerzos horizontales) y en posición inclinada, respecto a la horizontal.

## **1.5 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LOS INSTRUMENTOS.**

Es importante mencionar la evolución que han tenido los equipos de instrumentación descritos anteriormente en relación al tipo de sensor o transductor que utilizan, ya que juegan un papel relevante en la elección del aparato que determinará los parámetros deseados para lograr los objetivos del trabajo de monitoreo.

### **1.5.1 CUERDA VIBRANTE**

Estos equipos están basados en el principio de “resonancia”. Consisten de una cuerda vibrante que sometida a una frecuencia de vibración determinada, responderá cuando el sistema entre en resonancia. La elongación de la cuerda variará dependiendo de la presión externa a la que está siendo sometido el sistema.

Los sensores de cuerda vibrante están basados en la Teoría de cuerdas, tal como las cuerdas de un violín, las de la teoría de cuerdas presentan ciertas figuras de vibración, o frecuencias resonantes cuyas longitudes de onda se adaptan de forma precisa en ambos extremos. Pero así como las diferentes frecuencias resonantes de un violín dan origen a diferentes notas musicales, las diferentes oscilaciones de una cuerda dan lugar a diferentes masas y cargas de fuerza, que son interpretadas como partículas fundamentales. En grandes líneas, cuanto menor

es la longitud de onda de la oscilación, mayor es la masa de la partícula correspondiente [González Santiago, 2011].

### **1.5.2 SISTEMAS MICRO – ELECTROMECAÑICOS (MEMS)**

Son dispositivos microscópicos diseñados para interactuar dentro de un ambiente controlado.

Este tipo de transductor, también llamado microsistema, están reemplazando a los dispositivos actuales tradicionales en muchas aplicaciones, siendo que ofrecen un menor consumo de potencia, alto desempeño, peso reducido y menor costo.

Dentro de los microsistemas hay seis categorías: Sensores, actuadores, MEMS RF, MEMS ópticos, MEMS para microfluidos y Bio MEMS.

### **1.5.3 FIBRA ÓPTICA.**

Su utilización como sensor de medida de deformaciones puede ser muy amplia, pudiéndose emplear siempre que su rango precisión y resolución sean compatibles con el problema planteado. En particular, en todo tipo de medida de deformaciones estructurales en concreto, problemas de fisuración, etc. en puentes u obras de fábrica, presas, edificios, etc.; así como en medios rocosos sujetos a estabilización mediante anclajes, inyecciones o cualquier otra forma de mejora.

Desde el punto de vista de puesta en obra son realmente ventajosos por su menor peso, tamaño y complejidad de instalación; su resistencia a vibraciones o a condiciones duras de puesta en obra, los hacen igualmente atractivos para determinadas aplicaciones [González Santiago, 2011].

### **1.5.4 SENSOR PIEZORRESISTIVO.**

Contiene un diafragma delgado de cerámica con resistores (strain gauges). Al deformarse el diafragma con la presión del agua, se modifica la resistencia de los sensores en forma directamente proporcional a la presión aplicada. De manera electrónica, se convierte esta señal de salida en una señal de corriente eléctrica en un rango de 4 mA a 20 mA (miliamperes).

La respuesta del sensor piezorresistivo a cambios de presión es muy rápida, ya que no requiere cambios volumétricos importantes, y muestra una gran precisión, aún para rangos de presión pequeños. Se puede usar para efectuar mediciones dinámicas y conectarse a un sistema automático de captura de datos.

Este tipo de sensor tiene menor estabilidad con el paso del tiempo, por lo que se recomienda su uso cuando el objetivo de la medición es a corto plazo, por ejemplo, durante la etapa de construcción de una obra. Además, presenta pérdidas en la señal eléctrica conforme aumenta la longitud del cable, por tanto, debe calibrarse en fábrica el sistema completo (sensor-cable) [CONAGUA, 2012].

# Capítulo 2

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO RAMAL CAMELINAS EN EL LIBRAMIENTO SUR DE MORELIA

### 2.1 ANTECEDENTES

#### 2.1.1 Urbanización y Actores Sociales.

Las nuevas tendencias de urbanización que se presentaron en México desde finales de los años setenta condujeron a la concentración de población en las ciudades, aumento en la demanda de empleo, suelo, vivienda y servicios urbanos. En particular, la Ciudad de Morelia comenzó a experimentar un crecimiento demográfico indiscriminado, destacándose los asentamientos en la zona sur de la localidad, donde se inició la construcción de fraccionamientos considerados residenciales; las actividades económicas de la ciudad tendieron hacia el sector terciario, situación que resultó en un crecimiento poblacional superior al promedio urbano del país y de las grandes ciudades.

41

---

En Morelia, se presentó un bajo dinamismo económico, pero con una presencia importante del sector terciario, lo cual complicó el proceso de urbanización trayendo con esto una deficiente prestación de servicios, vulnerabilidad ante desastres naturales y problemas ambientales, entre ellos la contaminación.

La traza original de la ciudad se abandonó totalmente y se refuerza la tendencia de un proceso de urbanización sin integración vial [Vargas Uribe, 2014].

Ante tal panorama, se buscó orientar el crecimiento de las ciudades a través de políticas de planeación urbana y ambiental. Durante las décadas de los años setenta y ochenta hubo un impulso a la planeación urbana, intentando evitar la expansión desordenada, sin embargo, el crecimiento demográfico de Morelia se caracterizó por el surgimiento de numerosos asentamientos irregulares (tanto de tipo residencial como medio y bajo) y colonias populares, a costa de la afectación de tierras ejidales y pequeñas propiedades, la mayor parte agrícolas. Lo anterior condujo a que localidades como Tenencia Morelos, Jesús del Monte, Santiaguito y Santa María de Guido fueran absorbidas por la mancha urbana.

Ya en el proceso de urbanización, se implementaron políticas urbano-ambientales que buscaron revertir los problemas ya existentes en las grandes ciudades, así, la Secretaría de Urbanismo del gobierno del estado de Michoacán elaboró el primer plan de desarrollo urbano para la ciudad con un horizonte de 20 años, cuyos criterios de planeación incluyeron la creación de reservas urbanas patrimoniales y zonas de reserva y preservación ecológica (áreas estratégicas de protección para evitar el deterioro ambiental).

El Estado en su marco legal estableció decretos de protección de las zonas de reserva y preservación ecológica, entre las cuales se encuentra la Loma de Santa María, debido a su importancia en la recarga de acuíferos, regulación climática, control de inundaciones y riesgos geológicos.

Posteriormente, las políticas de regulación urbana y ambiental se modificaron, junto con los planes de desarrollo urbano, con el fin de estimular el crecimiento de la ciudad. En los años noventa, se establecieron cambios en el uso de suelo y se destinaron recursos públicos para la dotación de servicios y equipamiento urbano como vialidades y agua potable en los nuevos desarrollos y asentamientos principalmente al sur de la Ciudad.

Bajo este contexto, surgieron conflictos asociados a la urbanización, creando tensiones entre iniciativas ciudadanas en defensa de la preservación ecológica y el Gobierno.

### 2.1.2 Proyectos anteriores.

En 2005 surgió la propuesta del proyecto vial denominado “*Megapunte y Megatúnel*”, ubicado sobre la zona de la loma de Santa María.

La obra constaba de una vialidad de 3.5 kilómetros que conectaría la parte sureste de la avenida Camelinas con la Tenencia de Jesús del Monte y que incluía un puente de grandes dimensiones.

Sin embargo, el Gobernador Lázaro Cárdenas Batel decidió cancelarlo, esperando obtener una propuesta alterna por parte de los académicos (UNAM y UMSNH), toda vez que se tenía el rechazo de los grupos ecologistas, los argumentos en contra se debían a que el proyecto se consideraba inviable ecológicamente –porque violaba decretos de protección en la zona–, económicamente –era muy costoso y pagado en su mayoría con el erario público–, y socialmente –sólo beneficiaría a un reducido sector de la población con amplios recursos– [Sánchez Sepúlveda, Urquijo Torres, 2010].

En junio de 2006, los académicos de las dos Universidades presentaron un proyecto conjunto; se sostuvo una reunión con funcionarios de la SCOP y el Gobernador del Estado, y se aprobó el “*Proyecto Vial Sur Morelia*” el cual implicaba, un túnel de dos carriles y la pavimentación de un tramo de camino que desembocaría en la vieja carretera a Pátzcuaro [La jornada de Michoacán, 1 de febrero de 2007].

Para el 22 de enero de 2007 el Fideicomiso de Inversiones en Proyectos Estratégicos (FIPE) del Ayuntamiento de Morelia presentaba el proyecto de construcción de la “*Vialidad Panorámica Ecológica y Túnel Vial*”, donde se conectarían la zona de Jesús de Monte con la avenida Camelinas.

No obstante, continuaron las manifestaciones por parte de distintos grupos sociales, argumentando que se atentaba contra los decretos de protección de la loma de Santa María y que la construcción de cualquier vialidad involucraba factores de riesgo geológico.

43

Años después, en 2011, surge una nueva propuesta, aprobada por la SEMARNAT. Este proyecto, forma parte integral de una estrategia conjunta entre el Gobierno del Estado y la Federación, a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para ejecutar una serie de proyectos que conformarán en el corto plazo el “*Libramiento Sur de la Ciudad de Morelia*”.

El Proyecto Ramal Camelinas (que forma parte del Libramiento Sur de Morelia) ya en proceso, implica la delimitación de la zona natural protegida y pese a la oposición de los colonos, se plantea un proyecto que favorecerá la comunicación de la ciudad con la zona sur y cuya ejecución se realiza bajo las observaciones hechas por las universidades ya mencionadas y bajo la información de estudios geotécnicos y geológicos realizados por las mismas.

## **2.2 PROYECTO RAMAL CAMELINAS**

Con el propósito de establecer una perspectiva general de los métodos de instrumentación utilizados en obras carreteras en México y hacer una valoración de su importancia, se ha elegido un proyecto real que conjunta aspectos y características que le otorgan cierto nivel de impacto social, importancia técnica y económica, siendo un caso representativo de los trabajos que en este tema se efectúan en el Estado y en nuestro país.

El proyecto seleccionado se conoce como “Libramiento Sur de la Ciudad de Morelia, Tramo Ramal Camelinas”, el cual consiste en crear comunicación entre la Ciudad de Morelia y los recientes asentamientos de localidades aledañas tales como Santa María, Altozano, San José del Cerrito y Jesús del Monte, en vista del acelerado desarrollo de estas últimas y la capacidad superada de las vías de comunicación de la zona, resultando ya insuficientes. El proyecto está formado por tres estructuras principales; dos túneles y un viaducto, de los cuales, a razón del tema de este trabajo, únicamente se analizarán los portales de salida de los túneles del Ramal Camelinas.

### **I M A G E N (AIRM A P)**

La zona sur de la Ciudad de Morelia muestra una creciente expansión y desarrollo en su mancha urbana, razón por la cual el Proyecto Ramal Camelinas se puso en marcha como solución a problemas de accesibilidad y comunicación vial.



Las consecuencias de la crisis económica que han venido afectando a México y Michoacán, se hacen evidentes en los procesos de urbanización de los centros de población, a través de un crecimiento urbano desordenado y disperso, carente de infraestructura, equipamiento y servicios urbanos y sociales, cuyas carencias han contribuido a elevar la problemática a situaciones urbanas [Schteingart, 1989].

Particularmente, el área de análisis de este trabajo, ha venido presentando asentamientos humanos irregulares dispersos y carentes de continuidad vial, faltos de infraestructura, definida por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) como el conjunto de obras que constituyen los soportes del funcionamiento de las ciudades y que hacen posible el uso del suelo tales como: accesibilidad, saneamiento, encausamiento, distribución de aguas y energía, comunicaciones, etc.; cuyos componentes son esenciales para la mejora de las condiciones de vida de los habitantes y usuarios.

En la actualidad, Casa de Gobierno, La Paloma y el Parque Juárez son los accesos a la parte sur de la Ciudad de Morelia, los cuales han sido rebasados en cuanto a capacidad y nivel de servicio. El Ramal Camelinas se construye como alternativa adicional para el ingreso a la Ciudad, ayudando a desahogar también el tránsito que no tiene como destino el ingreso al centro de Morelia, reduciendo además el número de vehículos que hacen uso de las vialidades anteriormente mencionadas.

Adicionalmente, el tramo Ramal Camelinas en su carácter de libramiento tendrá la posibilidad de evadir la entrada de vehículos pesados a la Ciudad.

Con el proyecto en marcha, se pretende mejorar el nivel de servicio de los usuarios, permitiéndoles desplazarse de una manera funcional y fluida, reduciendo tiempos de traslado y espera, así como la contaminación ambiental y acústica producida por los mismos vehículos en el tráfico.

El caso analizado en este trabajo ha sido elegido con el fin de mostrar la necesidad de realizar estudios geotécnicos de instrumentación de manera formal para tener pleno conocimiento del terreno de sustentación de la obra, detectar problemáticas en caso de estar presentes y tomar en cuenta estos aspectos en el proceso de diseño. El proyecto aquí estudiado, es un caso excepcional desde el punto de vista regional, que hace

indispensable el monitoreo de la zona debido a las exigencias que la situación y complejidad demandan.

Otra de las razones para evidenciar la importancia de tomar en cuenta los estudios geotécnicos en la construcción de infraestructura carretera es la desafortunada cantidad de experiencias que se tienen de taludes y estructuras que han fallado, obstaculizando parcial o totalmente la vialidad y obligando a tomar medidas de conservación que resultan sumamente costosas; además, se han presentado casos cuyos deslizamientos han sepultado comunidades contiguas a estas vías de comunicación, siendo un riesgo inminente para los usuarios.

Sin embargo, estos inconvenientes pueden minimizarse en la medida que se vaya conociendo la problemática singular del terreno.

“Para cualquier proyecto de infraestructura es vital un conocimiento del terreno que ha de interactuar con la obra, pues se trata del sostén que soporta la estructura misma y cualquier tipo de falla que se presente en el terreno, supone un daño irremediable también a la construcción”. Por lo anterior, es indispensable la elección del sitio adecuado en el que sean toleradas las sollicitaciones que la obra genera desde su construcción y durante el tiempo de su operación.

En el caso de túneles carreteros, la estabilidad de las laderas representa un punto de partida para el diseño de las excavaciones, ya que un talud excavado alcanzará una estabilidad sólo si la ladera donde se construye es estable de origen [Hurtado, 2010]. Es por ello que los estudios geotécnicos se vuelven una herramienta imprescindible en todo proyecto, pues son el único medio que respalda técnicamente la exploración del terreno y aporta los datos necesarios para una valoración ingenieril que permita dimensionar los elementos que conforman un proyecto.

Al término del trabajo de instrumentación del caso Ramal Camelinas, se pretende hacer el diagnóstico adecuado de la zona, además de tener un punto de partida de la utilización de aparatos de monitoreo en las obras realizadas en el Estado y en el País, procurando suprimir las prácticas inadecuadas que omiten el estudio del terreno previo a la construcción.

### 2.2.1 Justificación del Proyecto.

Con el fin de conformar una estructura vial que conecte y fortalezca la red de caminos de la Ciudad de Morelia, en 2015 se presenta el proyecto para resolver la problemática que acoge el sur de la ciudad.

El proyecto requiere la construcción de una vialidad en una zona que crea polémica desde el punto de vista geológico, debido a que el trazo atraviesa la falla geológica conocida en la región como “Falla de la Paloma”, que forma parte del sistema Morelia-Acambay.

### 2.2.2 Localización y Generalidades de la región.

El trazo del proyecto se ubica en su totalidad en la región centro-norte del Estado de Michoacán, en el municipio de Morelia que es la capital del Estado.

La zona del proyecto se localiza en la parte sureste del municipio, incidiendo sobre la zona urbana de esta porción de la ciudad.

Se puede acceder al sitio tomando la autopista México-Guadalajara vía corta, en el tramo Maravatío-Zapotlanejo, desviándose en el entronque en dirección a la ciudad de Morelia con una distancia aproximada de recorrido en línea recta de 21 km; a partir de este sitio se toma la avenida Camelinas con dirección al Club Campeste de Morelia ubicado aproximadamente a una distancia de 3.5 km y desde este punto el recorrido a pie se realiza por caminos de terracería y veredas para llegar a las zonas donde se ubica el eje de trazo de los túneles carreteros [CONSULTEC, 2015].

#### I M A G E N (LOCALIZACIÓN)

Fig. Detalle de la zona de estudio y plano de localización del proyecto.

Fig. Distribución del proyecto.

El cadenamiento inicial del Ramal Camelinas se considera como 0+200, comienza en su entronque con la avenida Circuito Montaña Monarca (a un costado del centro comercial

“Paseo Altozano”), y termina en el cadenamamiento 4+463 en la avenida Baltazar Echave localizada en la colonia Ejidal Ocolusen.

### I M A G E N (LOCALIZACIÓN)

Fig. Localización del inicio del cadenamamiento en Circuito Montaña Monarca.

Fig. Localización cadenamamiento final en Av. Baltazar Echave.

Fig. Referencias fotográficas del trazo. (x4 tramos)

#### 2.2.2.1 División Territorial.

El estado de Michoacán de Ocampo se ubica en el centro-oeste del territorio mexicano. Limita al norte con los estados de Guanajuato y Querétaro, al este con el Estado de México, al sur con Guerrero al suroeste con el Océano Pacífico y el noroeste con Colima y Jalisco.



FIGURA 2. División territorial de Michoacán.

Michoacán tiene una extensión de 58 599 km<sup>2</sup>, representa 3.0% de la superficie del país. Su capital, Morelia, se ubica entre los paralelos 19°52' y 19°26' de latitud norte; los meridianos 101°02' y 101°31' de longitud oeste; con una altitud entre 1 500 y 3 000 m.

#### 2.2.2.2 Orografía.

La orografía del Estado es una de las más accidentadas de México y contiene numerosos volcanes que forman parte del Eje Volcánico Transversal y de la Sierra Madre del Sur.

Morelia, municipio donde se ubica el proyecto se encuentra sobre un sistema de topoformas constituido por: Sierra volcánica con estrato volcanes (22.14%), Escudo volcanes (20.06%), Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados con llanura (16.58%), Llanura aluvial (14.60%), Meseta basáltica con lomerío y malpaís (11.12%), Sierra con laderas de escarpa de falla (5.98%), Lomerío de basalto (4.00%), Sierra volcánica de laderas tendidas (3.49%) y Valle ramificado con lomerío (1.59%).

### 2.2.2.3 Vías de Comunicación.

En su porción oriental entran dos caminos provenientes de la ciudad de México, el federal número 15 y el 120. El primero llega a Toluca y de ahí se adentra en territorio michoacano, en donde pasa por Zitácuaro y Ciudad Hidalgo y arriba a la capital estatal Morelia. El segundo entra al estado por Zinápcuaro, se dirige hacia el suroeste hasta converger con la No. 37 y en su recorrido une las poblaciones de Morelia, Pátzcuaro, Villa Escalante, Ario de Rosales y La Huacana.

El eje No. 37 recorre a la entidad de norte a sur y atraviesa las dos grandes provincias fisiográficas que la conforman Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Toca ciudades asentadas en las mismas, como La Piedad Cabadas, Purépero, Uruapan, Nueva Italia, Arteaga y Playa Azul [CONSULTEC, 2015].



FIGURA 3. Localización de vías de comunicación cercanas a la zona de estudio.

### 2.2.2.4 Clima.

En Michoacán se tiene una precipitación media anual de 806 mm, con una temperatura promedio anual es de 22.2 °C.

La zona tiene un relieve muy accidentado, siendo los climas característicos del municipio: Templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (74.67%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (23.98%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.65%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.39%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (0.31%)

#### **2.2.2.5 Geología.**

La composición geológica de la Ciudad de Morelia es identificada por las siguientes rocas: Ígnea extrusiva: basalto (50.04%), andesita-brecha volcánica intermedia (14.61%), toba ácida (10.55%), dacita-brecha volcánica ácida (6.06%), dacita (1.14%), brecha volcánica básica (0.77%), volcanoclástico (0.41%), riolita (0.38%), andesita (0.24%), toba básica (0.18%) y toba intermedia-brecha volcánica intermedia (0.13%); Sedimentaria: conglomerado (0.29%); Suelo: aluvial (5.16%) y lacustre (0.22%)

#### **2.2.2.6 Hidrografía.**

El estado de Michoacán cuenta con 228 km de costas. Los principales lagos del estado son: el lago Cuitzeo, el lago de Pátzcuaro, el lago de Zirahuén, una parte del lago de Chapala, y la Presa Infiernillo.

De acuerdo con información geográfica del municipio de Morelia, las corrientes de agua presentes a sus alrededores son: Perennes: Grande de Morelia, Grande, Tupátaro, El Tejocote y Los Sauces; Intermitentes: Chiquito, Santa Inés, Los Huiramos, El Tecolote, Los Pirules, San José, El Guayabito, Loma Larga, La Higuera, Jaripeo, La Joya, La Tinaja y San Andrés.

#### **2.2.3 Características Generales del Proyecto.**

La obra Ramal Camelinas se localiza en una zona de complejidad topográfica y geotécnica, cuyos trabajos son realizados en terreno escarpado y de grandes pendientes.

El proyecto contempla una vialidad pública que considera los siguientes elementos:

- \* Túnel I (ubicado en el km 1+371 a 1+819).
- \* Corte I (ubicado en el km 2+060 al 2+340).
- \* Viaducto (ubicado en el km 2+378 al 2+531).
- \* Corte II (ubicado en el km 2+920 al 3+380).
- \* El Túnel II (ubicado en el km 3+471 al 4+204).

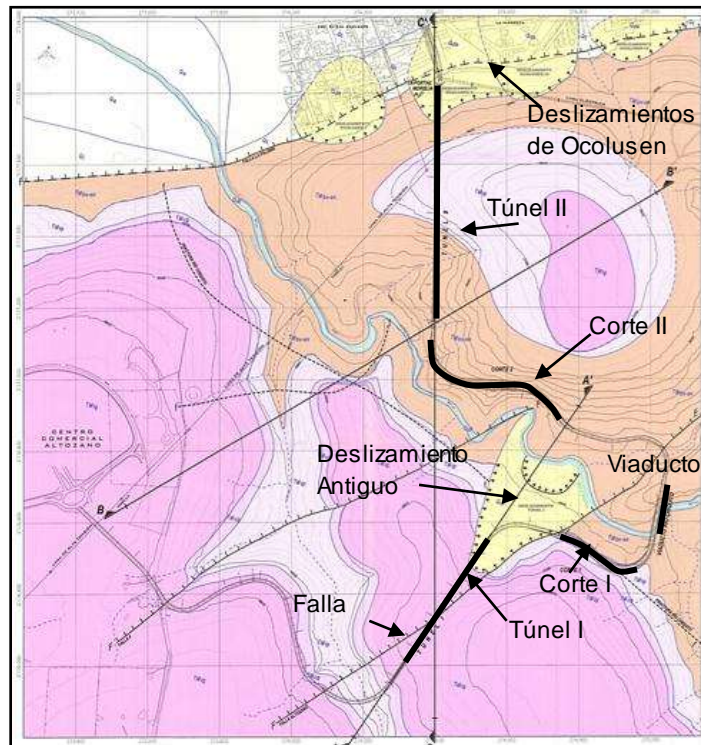


FIGURA 4. Plano Geológico-Geotécnico con el trazo del proyecto Ramal Camelinas.

FUENTE: Chávez Negrete et.al.

Características geométricas de la vialidad [Proyecto geométrico, CONSULTEC 2015]:

- \* Ancho de corona: 12 m.
- \* Tres carriles de 3.50 m.
- \* Pavimento de concreto hidráulico.

## 2.2.4 Situación geológica de la zona de proyecto.

Como se ha explicado anteriormente, la ciudad de Morelia ha venido presentando un crecimiento indiscriminado hacia la parte baja de la Loma de Santa María, cuya área de influencia forma parte del proyecto Ramal Camelinas. En este cuerpo se han encontrado volúmenes de tierra inestables (SEDUE, Campestre y cuerpos de menor tamaño en Ocolusen), los cuales son ubicados en el escarpe de la falla La Paloma. Esta última de tipo normal con desniveles de más de 200 m, extendiéndose en dirección E-W.

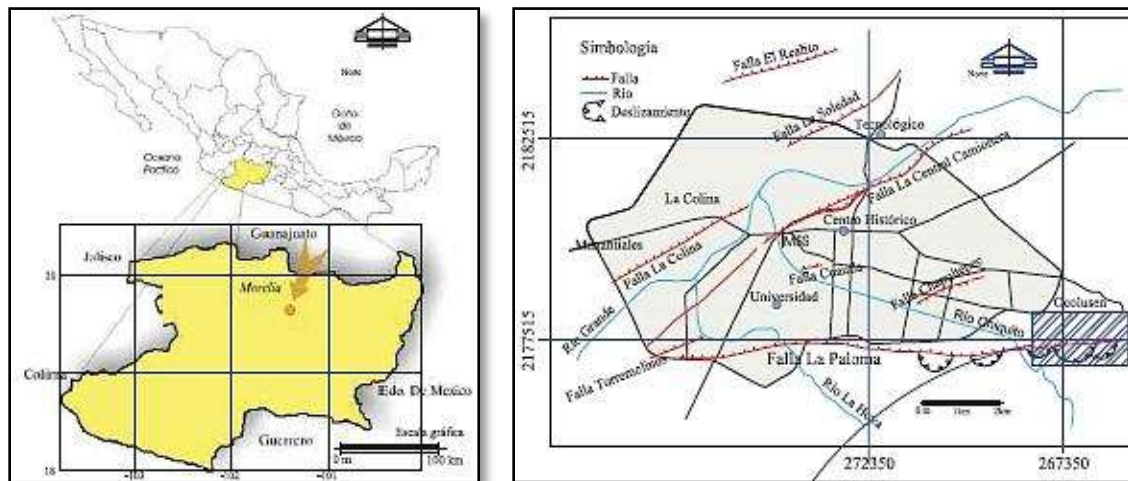


FIGURA 5. Ubicación y desglose de las fallas geológicas de Morelia.

FUENTE: Estudio geotécnico asociado a procesos de remoción en masa del parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia.

Los deslizamientos y la variada tipología de movimientos detectados a lo largo de la falla han corroborado la actividad del fenómeno, sin embargo la construcción de un camino en esta zona implica responsabilizarse de la estabilidad de las masas de tierra que pueden afectar a la vía o que son afectadas por ella.





*FIGURA 6. Loma de Santa María y su área de influencia. FUENTE: AIRMAP, 2015.*

La construcción de una vialidad sobre materiales sensibles al deslizamiento a que fueron sometidos, podría implicar una reactivación del movimiento si se hacen modificaciones geométricas del macizo rocoso en esta parte, sin tomar en cuenta las condiciones de equilibrio bajo las cuales se encuentra sujeto [Hurtado, 2010].

Es por ello que, tratándose de taludes y en cuya definición se asocia al concepto de “riesgo calculado”, en este trabajo se analizan los parámetros de desplazamiento de los portales de los túneles ubicados en las “zonas de riesgo” para disipar las incertidumbres que existen y seguir un control adecuado durante la construcción.

# Capítulo 3

## INSTRUMENTACIÓN EN EL PROYECTO RAMAL CAMELINAS EN EL LIBRAMIENTO SUR

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El movimiento de taludes es uno de los fenómenos más controversiales en la construcción de infraestructura carretera por la complejidad que involucra su análisis y las consecuencias que trae consigo.

Antes de la construcción de un túnel es necesario tener en consideración los rasgos geológicos del sitio en evaluación. Esto quiere decir analizar la litología y estratigrafía, las discontinuidades (estratificación, fracturas y fallas), el estado de alteración de las rocas, los problemas relacionados con el agua, la influencia de alteración de las rocas, la influencia de los factores de geodinámica externa y de los esfuerzos internos [Hernández Michaca, Pisanty Levy, Sánchez Granados et al., 2000]; la tarea de esta investigación es analizar principalmente estos últimos.

54

---

En el presente capítulo se ha realizado la investigación de los parámetros básicos que pueden afectar la estabilidad de los taludes de interés, cuyas características nos permitirán dar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible.

El proyecto Ramal Camelinas, contempla un sistema de instrumentación al cual se da seguimiento desde antes de la construcción de los túneles, con objeto de detectar a

tiempo posibles situaciones de riesgo durante la excavación y en su caso hacer las modificaciones necesarias en el diseño y conocer las causas determinantes de los posibles futuros deslizamientos.

La SCT ha dado mucha importancia a la instrumentación de los túneles, el objetivo es observar el comportamiento del medio en el que se excavan, así como verificar la validez de los análisis.

A partir de ahora se tratarán con mayor énfasis las zonas de los portales de salida de los dos túneles que conforman el proyecto Ramal Camelinas, debido a que son las áreas instrumentadas, por razones que serán expuestas más adelante.

### **3.2 ESTUDIO DE LA ZONA.**

Antes de conocer los requerimientos por los cuales la zona de estudio debe o no ser instrumentada, se debe hacer el reconocimiento de la misma para localizar zonas críticas y aquellas que requieren el cuidado de ser monitoreadas.

Para determinar la estabilidad de los taludes sobre los cuales se desplantarán los portales de salida de los túneles, se realizó un estudio que incluyó las siguientes etapas:

1. Reconocimiento del sitio.
2. Análisis de la información existente.
3. Estudio de los rasgos superficiales del lugar que permitieran la caracterización topográfica y geotécnica.
4. Investigación de campo que incluyó: sondeos exploratorios, recopilación de muestras y ensayos in situ para cuantificar los parámetros del suelo y roca.
5. Investigación de laboratorio.
6. Análisis de la información obtenida.
7. Instrumentación.

### **3.2.1 Análisis geológico-geotécnico en la zona de proyecto.**

El propósito de documentar las características del terreno, es presentar los detalles de las condiciones del material sobre el cual se proyectan los túneles, además de entender las causas y procesos de los deslizamientos.

**La Ciudad de Morelia se encuentra localizada en una zona donde se presentan rocas volcánicas y sedimentarias** de dos provincias geológicas importantes: las secuencias volcánicas de la Sierra de Mil Cumbres relacionada a la Sierra Madre Occidental, y vulcanismo y tectonismo del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) [Ferrari et al., 1994].

El escarpe de la falla La paloma es parte de los elementos geomorfológicos principales de la Ciudad de Morelia, situada en la parte Sur de ésta. Mucho se ha comentado acerca de la diversidad de materiales que conforman la zona Sur, donde se planea construir la vialidad y cuya pluralidad involucra cierta inestabilidad y una variada tipología de movimientos que han sido resultado de diferentes fenómenos, tanto naturales como antrópicos.

### **3.3 JUSTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO.**

En los túneles, los estados iniciales de incertidumbre justifican la necesidad de realizar monitoreo; la idea de instrumentar esta obra va encaminado a la observación del comportamiento de la misma, midiendo aspectos que se consideran esenciales para definirla a lo largo de su vida útil. Estas observaciones serán interpretadas de manera que se tenga claro el comportamiento de las estructuras y la evolución de sus condiciones de estabilidad, además de verificar la concepción de su proyecto.

De esta manera, los prototipos de monitoreo cumplen el cometido que va más allá de obtener información sobre las mediciones, convirtiéndolo en un medio valioso para

verificar las concepciones teóricas en la realidad de la obra, considerando la posibilidad de surgimiento de nuevas teorías o métodos constructivos al analizar la información adquirida.

Procedimiento constructivo La excavación de los túneles modificó el estado tensional del suelo e indujo un movimiento hacia el interior de la cavidad excavada, por lo que surgió la necesidad de limitar las deformaciones para impedir el deterioro del material y sus consecuencias en la superficie hasta completar el soporte del túnel. Se adoptó el método de excavación y soporte Nuevo Método de Excavación Austriaco (NATM, por sus siglas en inglés), que consiste en dos fases de excavación: media sección superior y media sección inferior o banqueo. La primera fase se ejecutó en toda la longitud del túnel y solamente después se inició la segunda. El trabajo se lleva a cabo de esta manera con el propósito de lograr una mejor estabilidad del túnel y una mejor optimización de actividades dentro de la galería.

### **3.4 PLANEACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN**

Es importante para la organización del sistema de monitoreo, tener claros los objetivos que se habrán de cumplir con la instrumentación, para así llegar al entendimiento claro del comportamiento de la obra civil que se analiza, permitiendo tomar decisiones y dar soluciones con juicio.

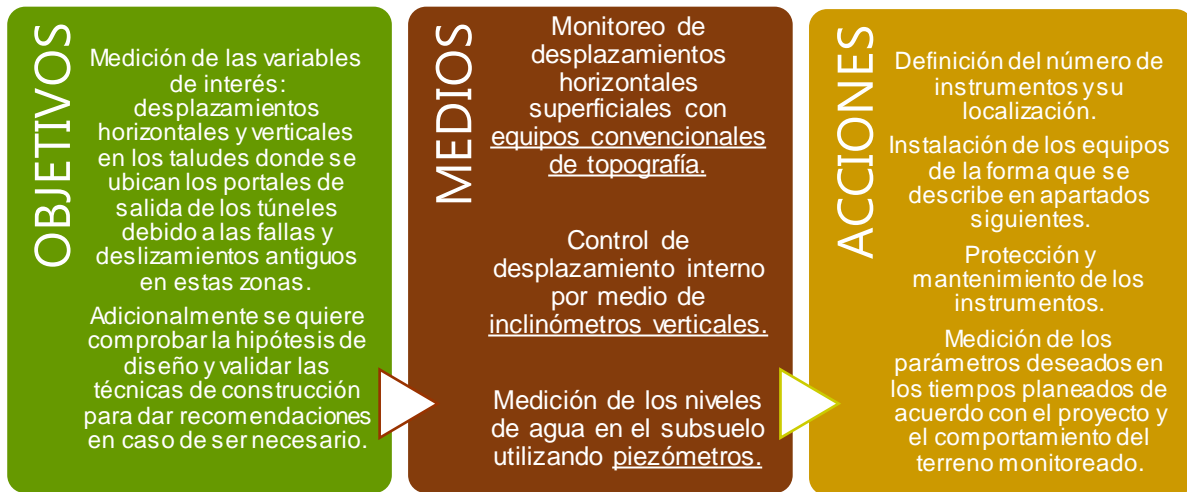


FIGURA 7. Planteamiento de organización de los sistemas de instrumentación.

En el estudio particular del Ramal Camelinas, se tiene como propósito principal, la determinación de variables específicas. Para este fin, se seleccionaron los parámetros que habrían de ser monitoreados como son los movimientos internos y externos, y la influencia del cambio piezométrico en los taludes, para lo cual se localizaron las zonas críticas del proyecto.

De acuerdo con las necesidades requeridas para el control de la construcción de los túneles y a partir de los antecedentes de la zona, se estimaron valores de desplazamientos para así, elegir los instrumentos que podían ser utilizados; basados en la precisión y sensibilidad, además de asegurar que la instalación de dichos instrumentos no pusiera en riesgo la obra. Otra consideración para la elección de los equipos, sin duda fue que su relación costo-beneficio es significativamente favorable en función de la restricción del monto de la inversión disponible.

### 3.5 TOPOGRAFÍA

Se ha expuesto ya la controversial situación que atraviesa el Proyecto Ramal Camelinas por la apremiante preocupación que se tiene al encontrarse en una zona

urbana, por lo cual, se determinó la utilización de un sistema de instrumentación superficial para conocer los probables movimientos que se manifiestan en la masa sobre la cual está proyectado el portal de salida del Túnel II.

Este apartado se refiere a la obtención, manejo y proceso de información geodésica-geográfica mediante la utilización de equipos convencionales para el monitoreo topográfico en el período del 16 de mayo al 25 de julio de 2015 con el propósito de identificar los desplazamientos horizontales y verticales en la zona anteriormente mencionada.

### **3.5.1 Zona de estudio.**

El análisis topográfico se realizó en la zona oriente de la ciudad de Morelia, entre las coordenadas:

NORTE: desde 2177775.901, hasta 2177854.712

ESTE: desde 274363.722, hasta 274462.972

Utilizando la proyección cartográfica UNIVERSA TRANSVERSE DE MERCATOR.

ELIPSOIDE: WGS 84

DATUM: WGS84

ZONA: 14 NORTE

### **3.5.2 Procedimientos**

Para la ejecución del monitoreo superficial se determinó utilizar la técnica <sup>59</sup> propuesta por Terstepanian (1980) con la intención de obtener registros de movimientos en el área de interés específica para la caracterización general de la masa.

El procedimiento se conoce como Polígono de Terstepanian y consiste en establecer en un sitio al menos dos bases inamovibles y ubicar en el área de análisis los puntos que se han de monitorear.

En este caso, se fijaron nueve bases de monitoreo en la zona de posible movimiento y dos bases fijas ubicadas en la losa de azotea de un edificio frente a la zona de estudio, las cuales funcionan como bases de control.

Para lo anterior, se establecieron las dos bases fijas en la parte cumbral del edificio de la Universidad UNID (adyacente al área de estudio) con pintura alquidámica y “dando valores geodésicos con un navegador de precisión métrica de la marca Gamin, modelo extrexlegend y un navegador Magellan modelo eXplorist 500, a modo de confirmación, ambos con lecturas continuas de al menos 10 minutos, cobertura satelital de al menos 6 satélites (GDOP)”.

Se estableció la base fija **A1** como punto de partida, obteniendo los siguientes datos:

Coordenada ESTE 274, 413.000  
Coordenada NORTE 2,177,963.000  
Elevación Ortométrica 1,951.00

Ya ubicada la primera base, se orientó ésta a un punto fijo al norte magnético para obtener los datos de la estación **A2**:

Coordenada ESTE 274,423.840  
Coordenada NORTE 2,177,968.036  
Elevación Ortométrica 1,950.954

La ubicación de los 9 puntos de monitoreo se hizo sobre el talud que se pretende analizar y debido a la morfología del terreno se colocaron estos puntos estratégicamente asentando estacas de aproximadamente 50 cm distribuidas en toda la masa con el fin de visarlos relativamente fácil. Con lo anterior se dio inicio a la toma de lecturas.

60

Las mediciones se realizaron primero desde la base A1 y enseguida desde la base A2, obteniendo los resultados que se muestran a continuación:



**TABLA 1. Comparativa de coordenadas (unidades en m).**

ID	MEDICIÓN 16/05/2015			MEDICIÓN 13/06/2015			MEDICIÓN 11/07/2015			MEDICIÓN 25/07/2015		
	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	ALTURA	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	ALTURA	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	ALTURA	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	ALTURA
PCC1	274406.647	2177834.826	1978.01	274406.661	2177834.831	1978.01	274406.663	2177834.838	1978.01	274406.655	2177834.839	1977.98
PCC2	274460.998	2177837.550	1983.42	274461.018	2177837.534	1983.43	274461.003	2177837.561	1983.41	274460.998	2177837.565	1983.37
PCC3	274373.169	2177819.714	1979.50	274373.185	2177819.711	1979.50	274373.183	2177819.712	1979.49	274373.168	2177819.711	1979.46
PCC4	274445.998	2177805.718	1992.34	274446.000	2177805.718	1992.34	274445.998	2177805.712	1992.33	274446.002	2177805.714	1992.31
PCC5	274450.732	2177779.598	2001.02	274450.741	2177779.594	2001.01	274450.748	2177779.603	2001.02	274450.744	2177779.602	2000.99
PCC6	274408.987	2177778.349	1998.60	274408.981	2177778.360	1998.60	274408.992	2177778.359	1998.60	274408.985	2177778.363	1998.57
PCC7	274367.438	2177780.805	1994.48	274367.444	2177780.804	1994.49	274367.456	2177780.806	1994.49	274367.447	2177780.811	1994.46
PCC8	274387.323	2177797.622	1991.86	274387.333	2177797.613	1991.86	274387.332	2177797.627	1991.86	274387.323	2177797.622	1991.83
PCC9							274389.574	2177847.392	1972.63	274389.567	2177847.404	1972.59

En esta tabla se identifican las fechas de cada lectura, relacionadas con las coordenadas obtenidas, de aquí se puede comparar el movimiento de cada uno de los puntos, al observar el registro último contra el anterior.

En la siguiente figura se presenta la distribución espacial de los vértices de la zona.

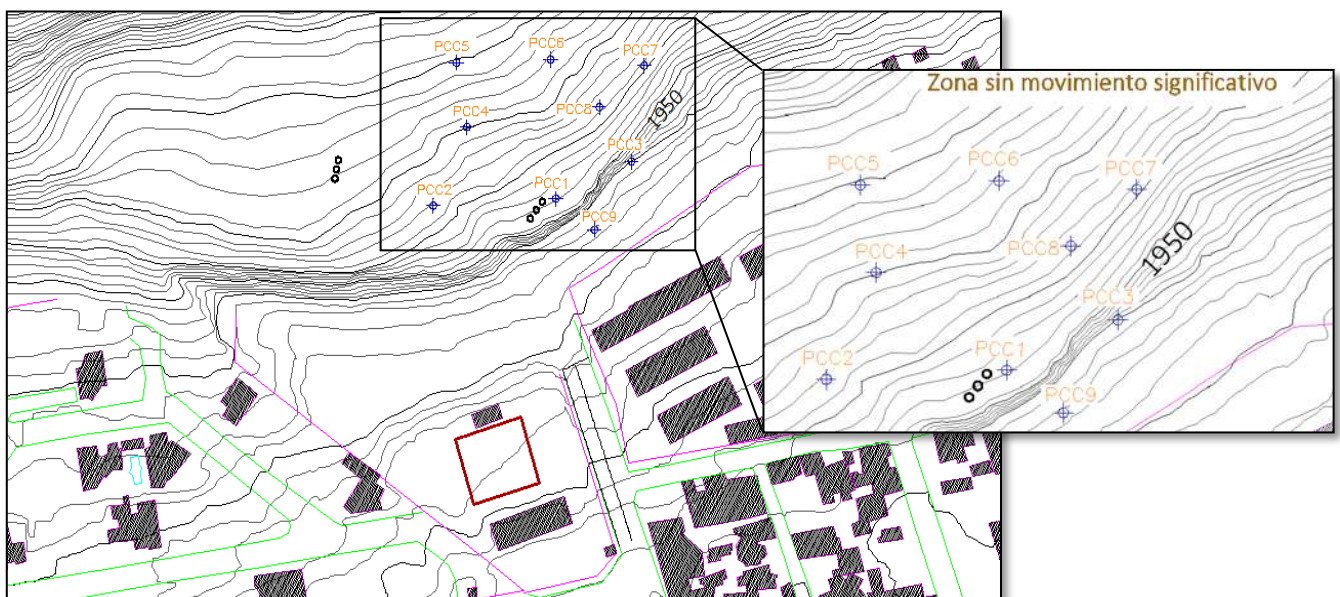


FIGURA 8. Distribución en planta de los puntos monitoreados.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A partir de los nueve vértices establecidos en la ladera y en base a las coordenadas registradas, no es posible asegurar la existencia de un movimiento aparente en dichos puntos, ya que los diferenciales de coordenadas que se aprecian no muestran un patrón definido de dirección del desplazamiento.

### **3.6 INCLINÓMETROS**

Se explicó en el capítulo 2 de manera general la aplicación y partes que conforman este equipo, a continuación se ahondará en el tema.

La selección del inclinómetro se basó en la aplicación que tiene dentro del proyecto, ya que funciona para tener control de los movimientos de tierra que pueden ocurrir durante la construcción de los túneles, detectar fallas potenciales en el enfoque de la obra y servir como sistema de alerta para el desplazamiento potencial del terreno.

El impacto de las excavaciones que son analizadas mediante series de registros con este tipo de instrumentación recae en la determinación de posibles deformaciones laterales significativas que puedan afectar estructuras cercanas, servicios públicos y otras instalaciones próximas.

Este aparato es operado manualmente y es útil para la medición del cambio de inclinación de un tubo guía colocado en una perforación dentro del talud que se analiza. Ofrece información precisa que permitirá identificar si la masa está en movimiento y en su caso mostrar un esquema general de la ubicación en la zona de potencial inestabilidad.

62

En el proyecto se determinó colocar cinco inclinómetros verticales distribuidos en los dos túneles, para cuya instalación fue necesario realizar sondeos en el terreno, los cuales, además fueron aprovechados para la determinación de las características geotécnicas y geológicas de la zona.

El inclinómetro utilizado en este trabajo (marca GEOKON), consta de una tubería guía rígida de plástico tipo ABS (acrylonitrile/ butadiene/ styrene) cuya longitud de secciones es de 1.5 m y con un diámetro de 70 mm; dentro de ella se introduce un torpedo en el que se alojan 2 dispositivos tipo MEMS (Micro Electro Mechanical Sensor) para detectar los desplazamientos horizontales que afectan la verticalidad inicial de la carcasa guía y registrar la inclinación en intervalos de 50 cm de manera que se puedan desarrollar perfiles que faciliten la comprensión del fenómeno que ocurre en el terreno.

TABLA 2. Caracterización del instrumento. Inclinómetro digital.

UNIDAD	MODELO	CARACTERÍSTICAS
Tubería rígida de plástico ABS y tubería metálica.		<p>Sección principal con longitud de 1.5 m y diámetro de 7 cm.</p> <p>Ademe con cuatro ranuras longitudinales para guiar la sonda, fabricada de plástico ABS resistente a la corrosión, soporta una temperatura máxima de 80° C y es flexible para soportar la presión del terreno.</p> <p>Tubería de acero galvanizado con diámetro de 9.27 cm, ranurada para inserción del aparato.</p>
Cable eléctrico graduado.		<p>Cable eléctrico con envoltura de poliuretano, resistente a la abrasión.</p> <p>El cable tiene una longitud de 70 m, con divisiones a cada medio metro para la toma de lecturas, colocado en un carrete para su almacenaje.</p>

<p>Unidad lectora.</p>		<p>Es portátil, de uso rudo y fácil de operar, empleado para sondas de inclinómetros y sirve para almacenar y analizar datos. Está fabricada en aluminio con auto iluminación y pantalla de 15 filas por 20 columnas. Emplea una batería recargable de 12 volts a 7 amperes.</p>
<p>Sonda.</p>		<p>Unidad medidora hermética de acero inoxidable en donde se aloja el sensor para medir la inclinación, La sonda se une al cable mediante un conector. Se utiliza dentro del ademe y es guiada por dos conjuntos de ruedas guía que se introducen en las ranuras de la tubería.</p>
<p>Sensor MEMS</p>	<p>Dispositivos diseñados para medir cambios e interactuar en el ambiente. Incluye sensores de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos. Tiene tamaño y peso reducidos, bajo consumo de energía, alta precisión y biocompatibilidad, es un sensor funcional aplicado en el acelerómetro del aparato.</p>	

En la tabla anterior se muestran los elementos técnicos por los cuales se eligió este equipo para el proyecto, aunado a las razones que se expusieron con anterioridad.

### 3.6.1 Ubicación de los inclinómetros.

Los inclinómetros se localizan en los portales de salida de los dos túneles proyectados con el propósito de conocer los posibles movimientos en profundidad del terreno en zonas consideradas críticas, es decir, las zonas donde se prevén deformaciones que requieren ser monitoreadas antes, durante y después de la construcción de la obra debido a su ubicación en terrenos donde se presentaron deslizamientos antiguos.

La elección de los puntos a instrumentar se basa además, en condiciones de pendiente y la importancia de las instalaciones cercanas. El monitoreo se hace para verificar el rendimiento e identificar si las condiciones inestables se están desarrollando.

### **3.6.2 Instalación de los inclinómetros.**

Los métodos de instalación realizados dependieron principalmente de los parámetros a monitorear, las condiciones del sitio y los instrumentos seleccionados.

De acuerdo con el tipo de suelo encontrado en los sitios seleccionados para la instalación de los instrumentos y localizados los puntos a monitorear, se determinó el tipo de tubería a utilizar: tubería guía de plástico tipo ABS para todos los inclinómetros excepto para el primer aparato del portal de salida del Túnel II, en el cual se usó tubería metálica de acero con diámetro de 9.27 cm.

Para la instalación de la tubería, previamente se hicieron perforaciones de diferentes profundidades para cada uno de los inclinómetros. Se garantizó que el diámetro de la perforación fuese suficientemente grande para permitir la inserción del ademe guía y para asegurar el correcto acomodo de la lechada de relleno alrededor de la tubería para servir como apoyo de la misma; además se debió cerciorar la verticalidad del sondeo para introducir la tubería guía cuyo extremo inferior (primer tramo) fue sellado para servir como tope a la sonda que se introduce posteriormente para hacer las lecturas.

Enseguida, se introdujo la carcasa o tubería guía dentro del pozo la cual debió orientarse con un par de ranuras en la dirección esperada del movimiento de tierra (plano A-A'), quedando en posición perpendicular las dos ranuras restantes (plano B-B').

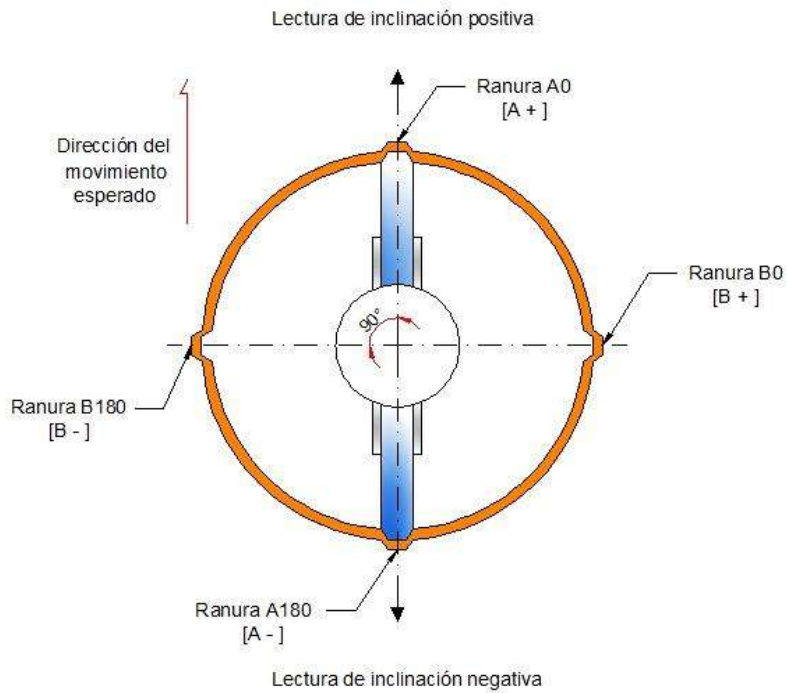


FIGURA 9. Ranuras guía para la inserción del aparato.

Habiendo orientado la tubería se comienzan a ensamblar los tramos de ésta enlazando las pestañas de la tubería y reforzando con cinta plateada para asegurar el sellado de la carcasa y evitar la introducción de la lechada. Con excepción del inclinómetro 1 ubicado en el portal del Túnel II, la tubería guía se introdujo en un ademe para evitar el colapso de las perforaciones.



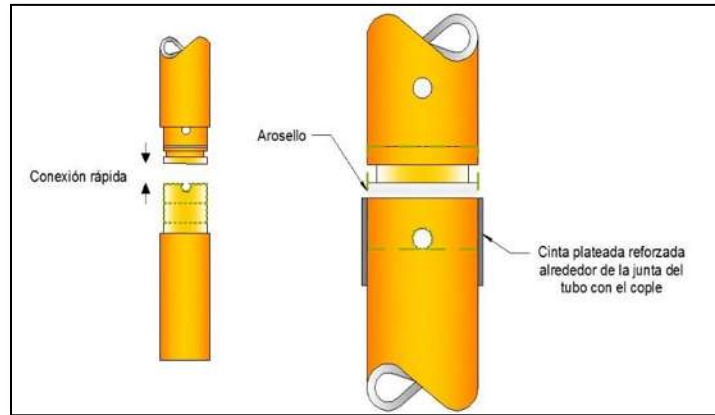


FIGURA 10. Conexión de tramos de tubería en la instalación de un inclinómetro y detalle de unión.

TABLA 3. Resumen de datos de los inclinómetros.

ID INCLINÓMETRO	EQUIPO DE PERFORACIÓN	BROCA PARA PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE TUBERÍA GUÍA	ORIENTACIÓN	RECUPERACIÓN *
IN1 TI	Acker	Diamante HQ (9.67 cm)	39	ABS	52° NE	Sin recuperación
IN2 TI	Acker	Diamante HQ (9.67 cm)	35	ABS	27° NE	Sin recuperación
IN1 TII	Longyear	Tricónica 4.5"	25.5	Aluminio	333° NW	SPT; Arcilla inorgánica, grava arcillosa, limo inorgánico y arcilla.
IN2 TII	Longyear	Tricónica 4.5" (suelos duros) / HQ (roca)	47	ABS	344° NW	SPT y sondeo mixto; Andesita muy alterada.
IN3 TII	Longyear	Tricónica 4.5" (suelos duros) / HQ (roca)	50.5	ABS	344° NW	SPT; Arcilla superficial, andesita mezclada con arcilla y alternancia de brecha andesítica y andesita.

\* Descripción de estratos en orden descendente.

Por último, se colocó lechada de relleno alrededor de la tubería para asegurar su confinamiento al rellenar los espacios entre el suelo y el tubo. Esta mezcla, denominada lodo fraguante se fabricó con cemento sin arena o grava para garantizar que todos los

espacios fueran ocupados sin presentar vacíos y para mejorar la plasticidad de la lechada se adicionó bentonita.

El mortero cemento-bentonita se prepara de tal manera que se consigan características de resistencia y deformación aproximadas al suelo circundante, para lo cual, se debe controlar el contenido de cemento.

En la preparación del mortero, se mezcló primero el cemento con el agua y después se agregó la bentonita, cuyas cantidades están determinadas en el proporcionamiento que se muestra a continuación.

### **3.6.3 Recopilación de datos.**

Como se mencionó anteriormente, las lecturas realizadas con inclinómetro, se hacen a través de una sonda magnética que consta de dos acelerómetros MEMS y una unidad de mediciones portable que se comunica vía bluetooth con los sensores del torpedo.

La lectura inicial se utiliza como referencia para las lecturas siguientes. Para comenzar las mediciones, se eligen los ejes en los cuales se harán las lecturas, de acuerdo con la dirección del deslizamiento. La siguiente figura muestra la convención de signos utilizada y la manera en la que se coloca el torpedo.



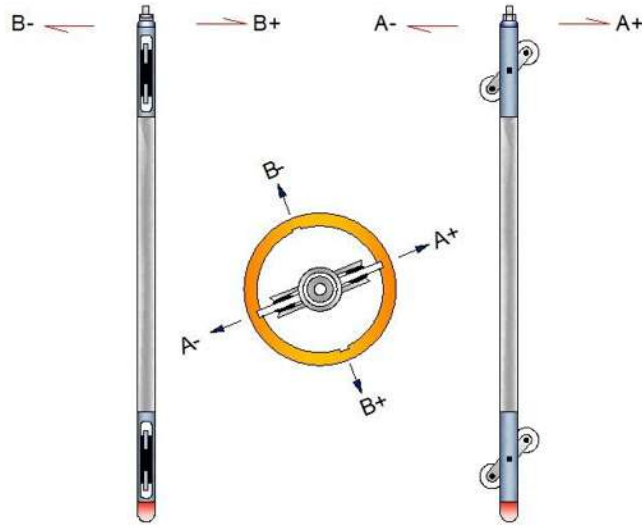


FIGURA 11. Convención de signos de un inclinómetro.

Elegida la posición del aparato, se conecta el torpedo al cable eléctrico que transmite la señal, el cual está graduado a cada 50 cm. A continuación se introduce la sonda en la tubería guía instalada y se hace bajar hasta la profundidad deseada.

Una vez que el torpedo se encuentra en la profundidad que se pretende medir, preferentemente en el fondo de la tubería, se coloca el adaptador de carcasa en la parte superior del tubo para atornillar el cable e impedir su movimiento mientras se toma la lectura al observar cierta estabilización en la pantalla. Subsecuentemente, se toman las mediciones cada 0.5 m hasta realizar un barrido de toda la tubería.

Al término de las lecturas en el eje principal, se gira el torpedo 180°, se profundiza hasta el fondo de la perforación y se obtienen las lecturas de la misma manera, consiguiendo los datos en las direcciones A y B.

Es importante mencionar que las mediciones en un mismo sitio deben realizarse prioritariamente con el mismo equipo de medición y el mismo operador, para minimizar los errores de manejo.



FIGURA 12. Toma de lecturas con inclinómetro.

Es indispensable tener en cuenta algunas recomendaciones durante el proceso de medición, como son:

Nunca debe conectarse el torpedo al cable en presencia de lluvia o humedad excesiva.

El cable debe transportarse de tal forma que no se doble.

Se debe cuidar que el torpedo no se golpee con las superficies de la tubería o contra cualquier superficie para evitar el daño de los sensores. En caso de que esto ocurriese, hay que comprobar el buen funcionamiento haciendo mediciones de revisión.

El torpedo debe limpiarse, secarse y aceitarse para su buen mantenimiento.

### 3.6.4 Procesamiento de la información.

Al concluir con las mediciones, la información registrada en la unidad lectora es descargada en un ordenador para procesar los datos.

```

***
GK 604M(v1.3.0.5.07/15);2.0;FORMAT II
PROJECT :Tunel 1
HOLE NO. :Incl 1
DATE :7/30/15
TIME :12:20:10
PROBE NO.:Portal tunel 1
FILE NAME: Incl 1_001.gkn
#READINGS:77
FLEVEL, A+, A-, B+, B-
39.0, -260, 283, -288, 307
38.5, -254, 271, -301, 320
38.0, -139, 159, -241, 256
37.5, -162, 177, -340, 364
37.0, -263, 281, -505, 520
36.5, -246, 264, -540, 560
36.0, -232, 249, -506, 523
35.5, -254, 274, -463, 480
35.0, -281, 294, -430, 453
34.5, -278, 298, -429, 451
34.0, -304, 319, -410, 430
33.5, -285, 303, -427, 447
33.0, -231, 248, -474, 501
32.5, -230, 246, -475, 495
32.0, -219, 237, -465, 491
31.5, -222, 238, -458, 485
31.0, -223, 239, -447, 467
30.5, -225, 243, -423, 445
30.0, -208, 226, -434, 464
29.5, -192, 207, -460, 482
29.0, -160, 176, -485, 514
28.5, -145, 163, -505, 525
28.0, -137, 150, -535, 564
27.5, -138, 153, -535, 555
27.0, -147, 164, -537, 559
26.5, -168, 187, -500, 519
    
```

Report: A-Axis Digits and Prich in centimeters (Bottom Up)

Project Name: Tunel 1  
Hole Name: Incl 1  
Top Elevation: 2104.0  
Azimuth Angle: 52.0

File Name: incl\_1\_001.gkn  
Reading Date: 7/30/15  
Reading Time: 12:20:10  
Probe Name: Portal tunel 1

Elev [m]	A+ [dig]	A- [dig]	Sum [dig]	Dif [dig]	Dif/2 [dig]	Defl (cm)	Level [m]
2103	-300	318	18	-618	-309	-45.85	1
2102.5	-311	326	15	-637	-318	-45.67	1.5
2102	-325	354	19	-689	-344	-44.28	2
2101.5	-309	325	16	-634	-317	-41.47	2.5
2101	-253	271	18	-524	-262	-42.62	3
2100.5	-211	226	15	-437	-218	-41.97	3.5
2100	-203	222	19	-425	-212	-41.42	4
2099.5	-225	235	10	-460	-230	-43.89	4.5
2099	-259	279	20	-538	-269	-43.32	5
2098.5	-278	291	13	-569	-284	-39.64	5.5
2098	-296	315	16	-614	-307	-34.93	6
2097.5	-303	316	13	-610	-309	-34.17	6.5
2097	-282	292	10	-574	-287	-37.39	7

FIGURA 13. Ejemplo de matriz de lecturas.

Hay dos maneras de manejar los datos, la primera, mediante un software proporcionado por el fabricante del instrumento y la segunda, realizar el procesamiento mediante operaciones y gráficas auxiliadas con una hoja de cálculo; ambas maneras tienen el objetivo de obtener gráficas con desplazamientos horizontales del terreno en estudio.

Con el objetivo de razonar paso a paso los cálculos y gráficos que se obtienen con el software, se presenta a continuación el procesamiento de los datos a través de hojas de cálculo.

Para iniciar los cálculos, se debe conocer el ángulo de desviación de las ranuras de la tubería guía del inclinómetro, con respecto al trazo perpendicular al túnel o el azimut de las mismas ranuras, según la orientación respecto a la cual se pretende hacer referencia de los desplazamientos. Este efecto se atribuye al proceso de inyección de la tubería, para corregir las desviaciones.

En las hojas de cálculo se consideran estos ángulos, los cuales son medidos en campo.

En la práctica, es recomendable realizar varias lecturas “cero” con el fin de verificar que el funcionamiento sea correcto. Las lecturas subsecuentes serán entonces siempre referidas a ésta, tomando como supuesto que no existen deformaciones horizontales y que a partir de este momento comienza el monitoreo.

Enseguida se obtienen cuatro lecturas relativas a las dos direcciones de movimiento, producto de los dos barridos realizados con el torpedo. A continuación se hace la denominada “diferencia actual de lecturas”, es decir, se restan los valores que corresponden a cada eje ([A+] -[A-] y [B+]-[B-]), cuya diferencia es posteriormente referenciada a la lectura inicial (cero), esto es: resta de la diferencia actual de lecturas con respecto a la lectura de referencia; con lo cual se obtiene una corrección por eje. El siguiente paso es la obtención de las deflexiones a distintas profundidades, para lo cual se multiplica la corrección anterior por 0.5 que corresponde a la longitud de medición.

Ya con las deflexiones calculadas, se realiza el acumulado de estas para continuar con la corrección angular (si es requerido referir el desplazamiento a partir del Norte o del eje del túnel) y de esta forma obtener la deflexión acumulada corregida.

Con las deducciones anteriores, es posible graficar las deflexiones contra la profundidad en ambos ejes de cada inclinómetro, como se muestra en la *FIGURA 14*

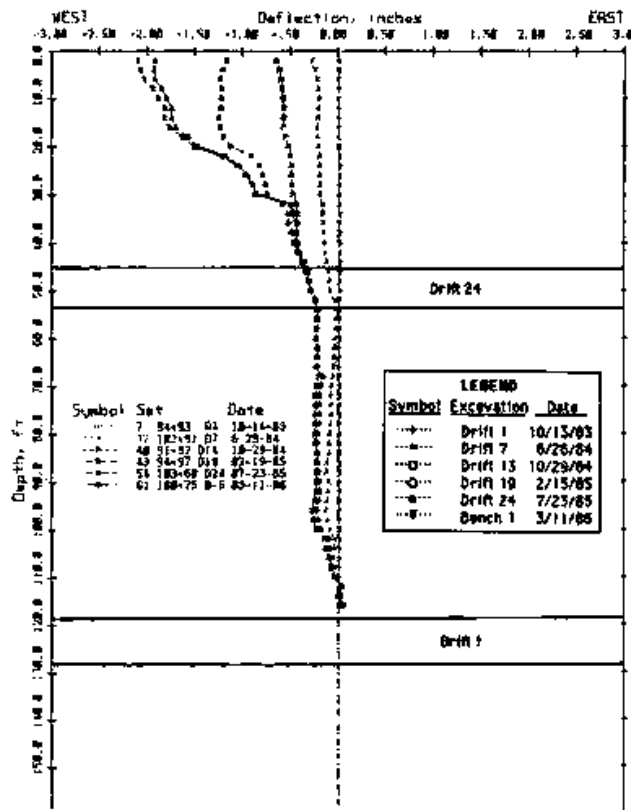


FIGURA 14. Gráfica típica de deformaciones horizontales.

Cortesía de Shannon & Wilson, Inc., Seattle, WA.

### 3.6.5 Resultados de inclinometría en el Ramal Camelinas.

En el presente apartado se muestran las gráficas de los datos obtenidos en campo en relación con las deflexiones horizontales de los taludes que forman los portales de salida de los túneles I y II del proyecto Ramal Camelinas.

Para una comprensión completa de los registros de inclinometría, se han decidido hacer tres tipos de gráficos para cada uno de los instrumentos instalados.

En primer lugar se mostrará la evolución del movimiento correspondiente al lapso de agosto 2015 a junio de 2016, en donde, tras la toma de una lectura de referencia y las posteriores con periodicidad de aproximadamente un mes entre cada una de las mediciones, se hace la comparación de dichas lecturas de seguimiento con la lectura inicial, lo cual permite el control de los desplazamientos horizontales que se hayan producido y que serán analizados más adelante.

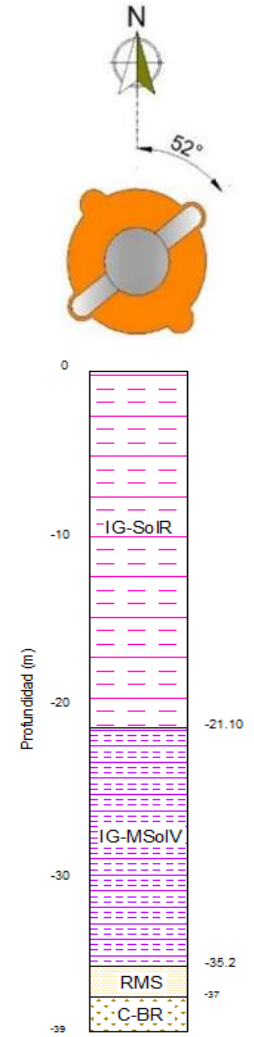
Partiendo del punto más profundo de la tubería, se acumulan los desplazamientos hasta llegar a la superficie para obtener el desplazamiento horizontal acumulado hasta la cabeza del inclinómetro; en este tipo de imágenes, se presentan además, los perfiles estratigráficos empatados con las gráficas para su posterior interpretación y la orientación de la tubería en su instalación con respecto al Norte.

En el segundo tipo de esquemas se pretende representar los valores de las componentes (desplazamiento en el eje A y B) y magnitudes de los vectores de desplazamiento, enfocados a las profundidades donde se detectó en primera instancia la mayor deflexión, por lo que se hace este estudio más específico en lo que puede llamarse superficie de falla.

73

Por último, se exponen figuras en planta de la trayectoria de desplazamiento en cada inclinómetro. En ellas se graficó la magnitud y dirección de los vectores de desplazamiento para conocer la orientación real de movimiento.

Se destaca con una flecha el último vector, es decir, la última medición que es igual al desplazamiento acumulado total y con línea punteada se enumeran las lecturas precedentes.



TÚNEL I.  
Inclinómetro 1  
Profundidad: 39 m

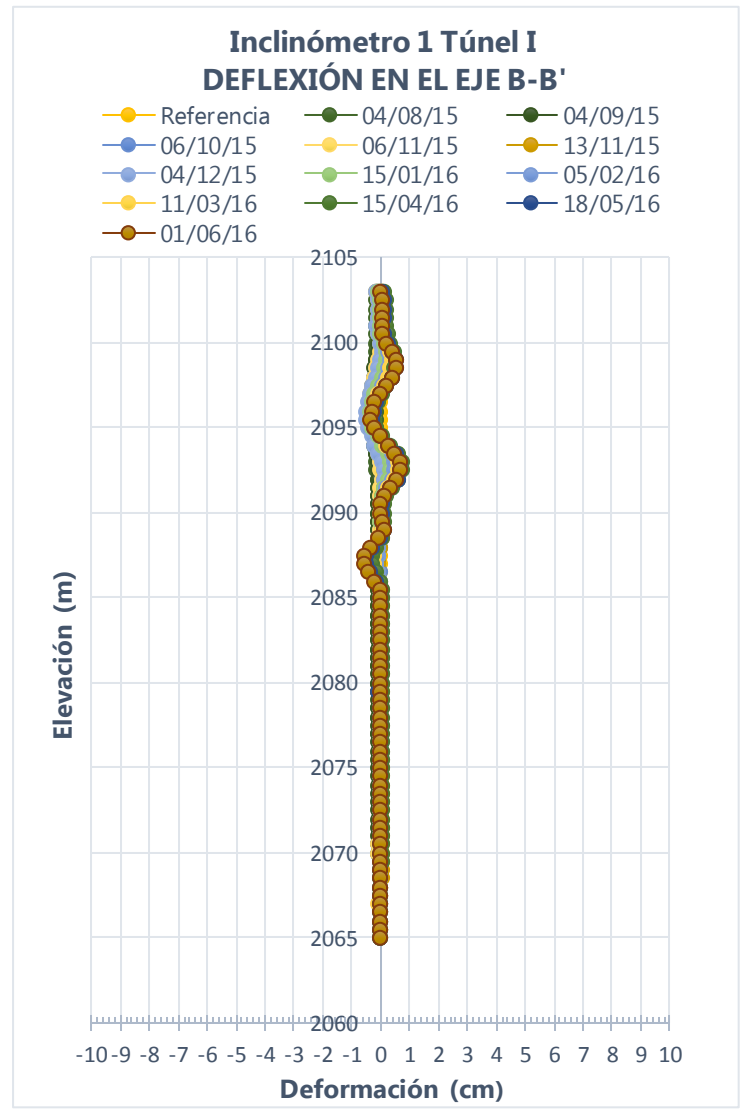
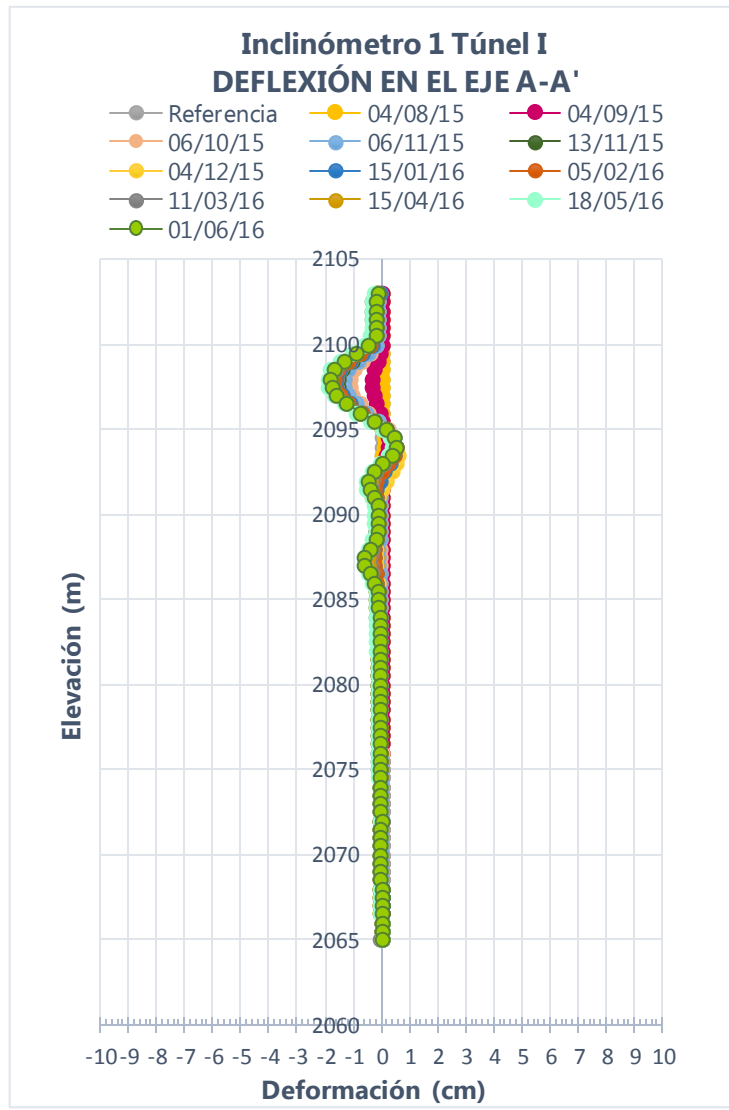


FIGURA 15. Perfiles de deformación horizontal del Inclinómetro 1 Túnel I.

## VECTORES DE DEFORMACIÓN INCLINÓMETRO 1 TÚNEL I

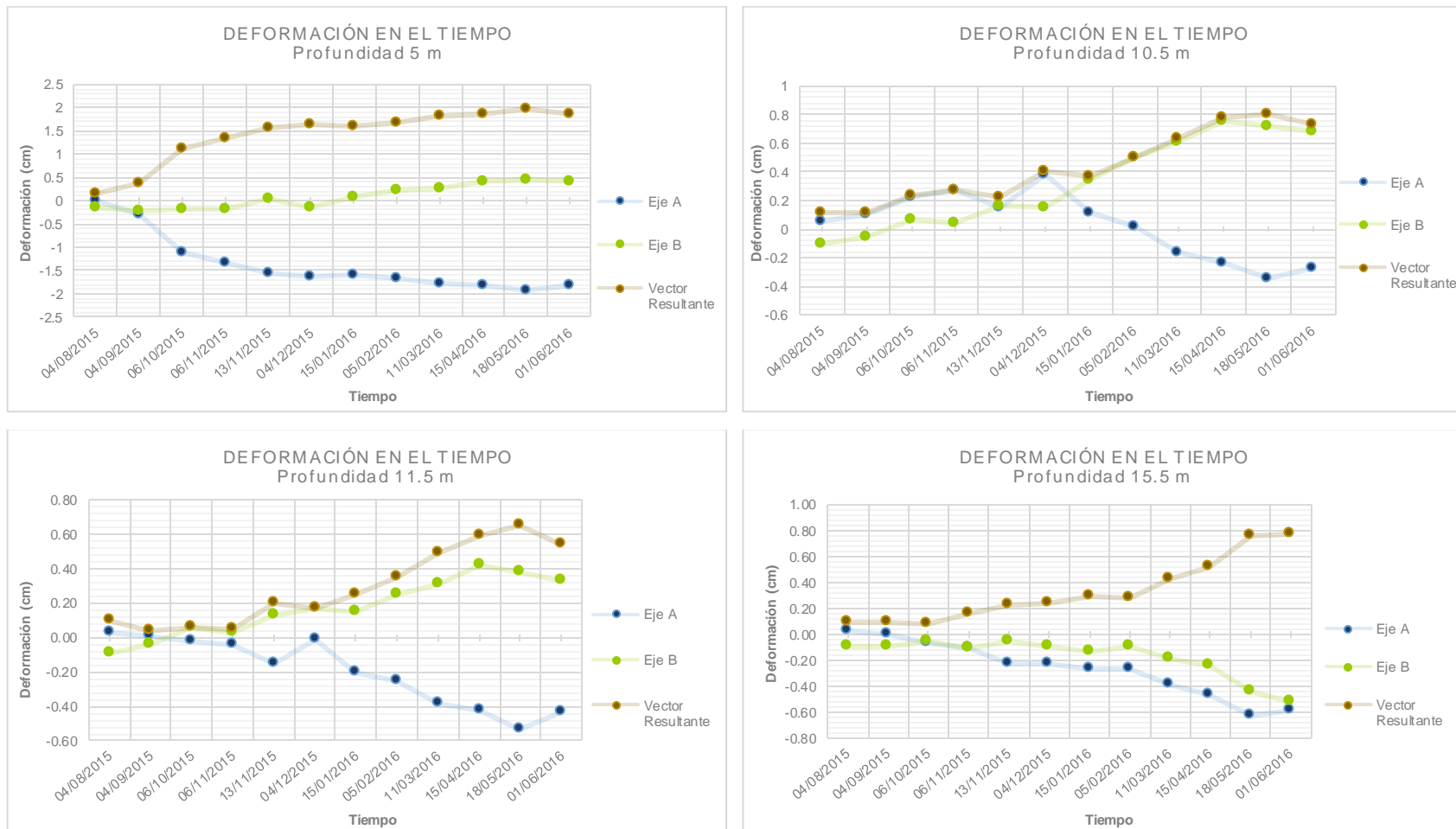
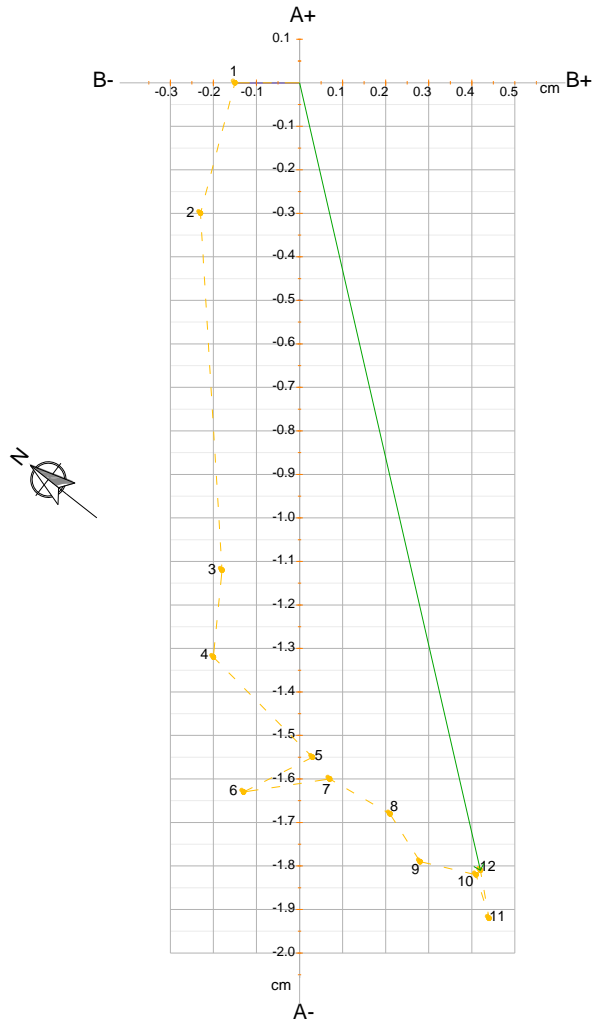


FIGURA 16. Vectores de deformación. Inclínómetro 1 Túnel I.

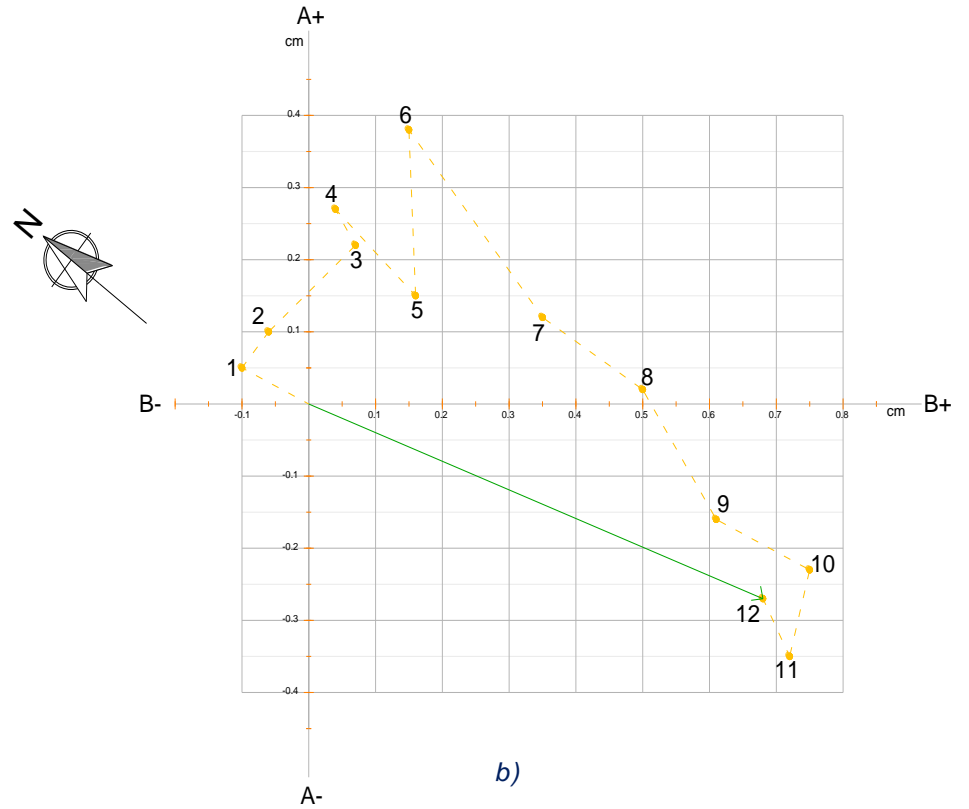


Inclinómetro 1 Túnel I Profundidad: 5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



a)

Inclinómetro 1 Túnel I Profundidad: 10.5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



b)

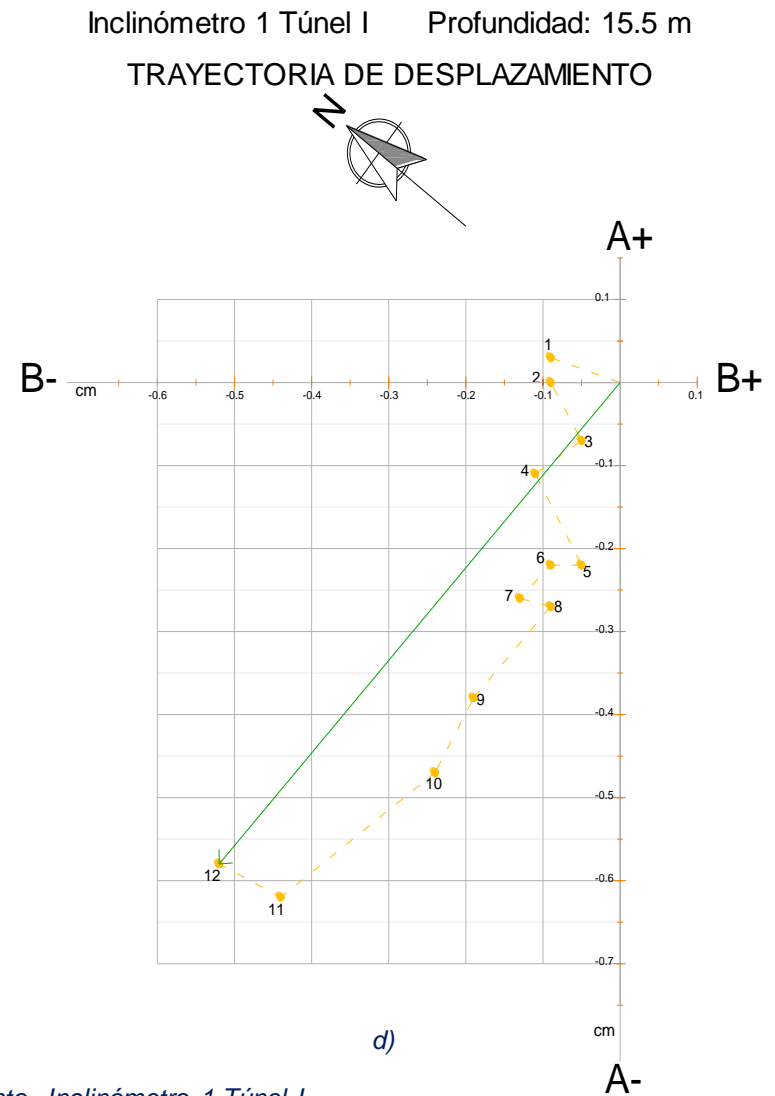
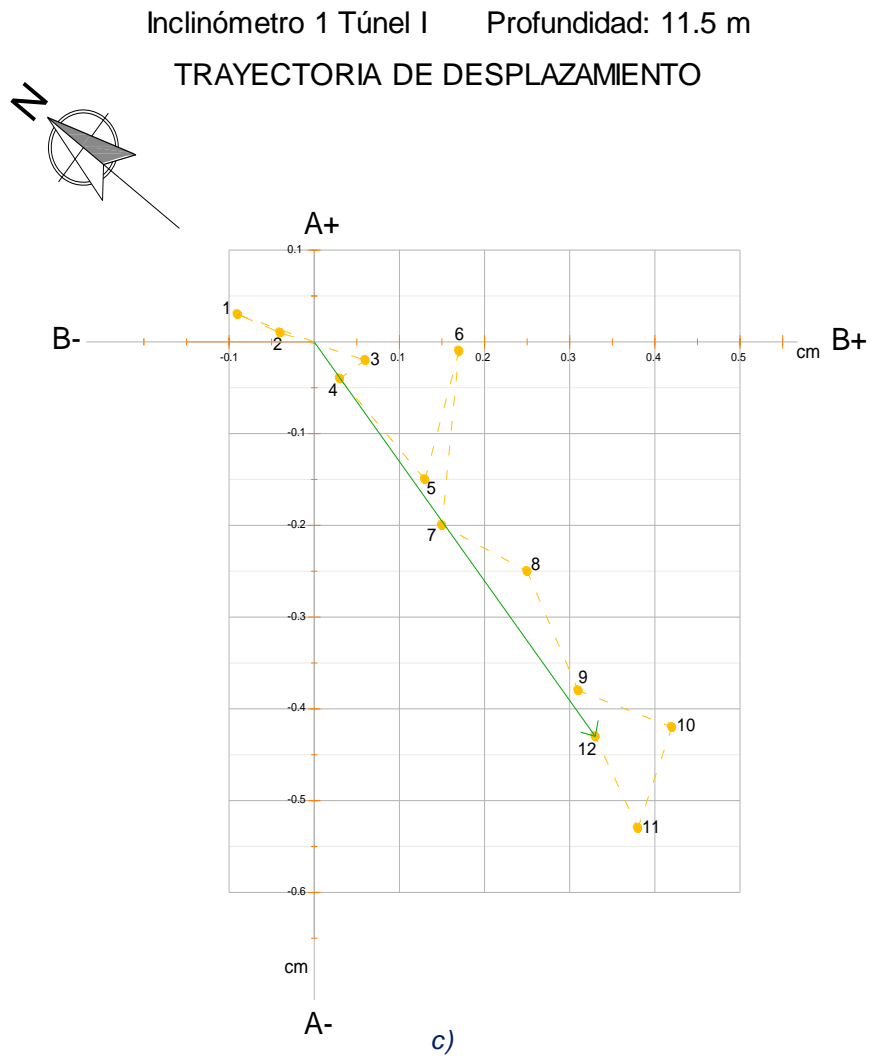


FIGURA 17. Trayectoria de desplazamiento. Inclinómetro 1 Túnel I.

a) Prof.: 5m, b) Prof.: 10.5 m, c) Prof.: 11.5 m, d) Prof.:15.5m.

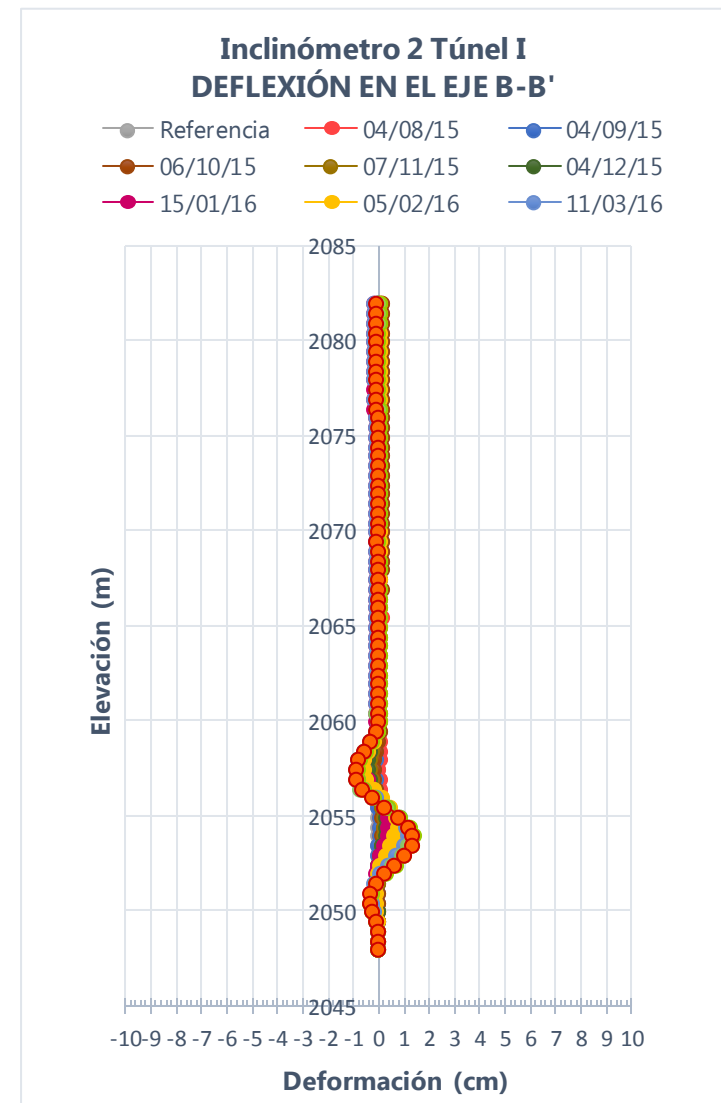
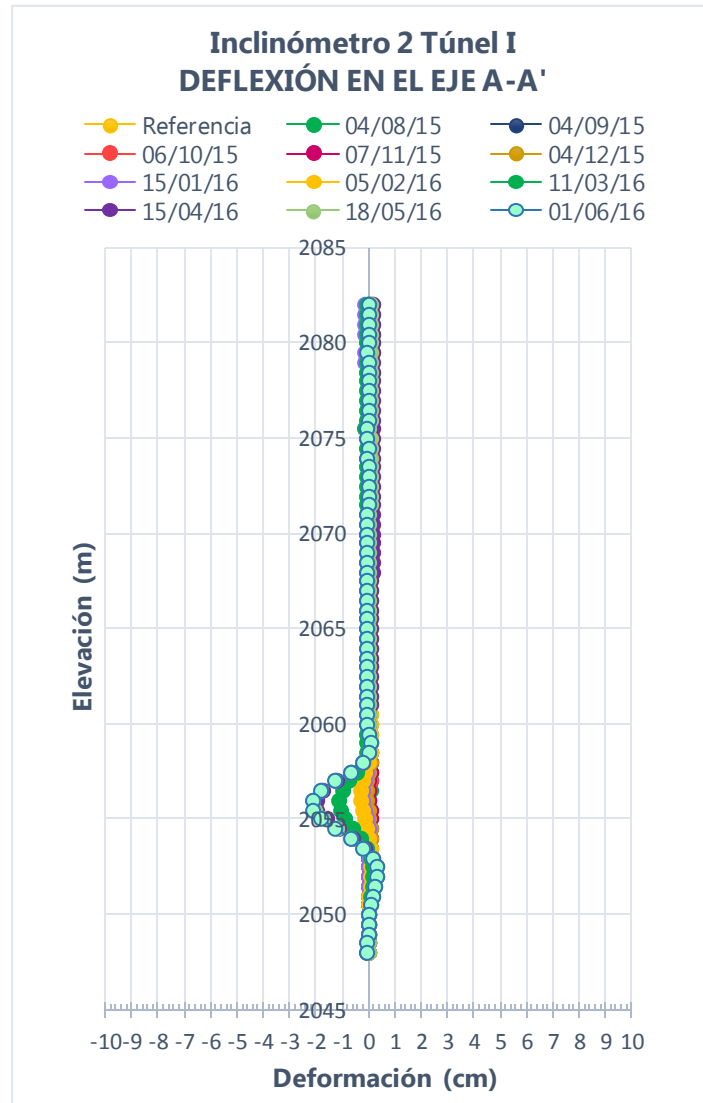
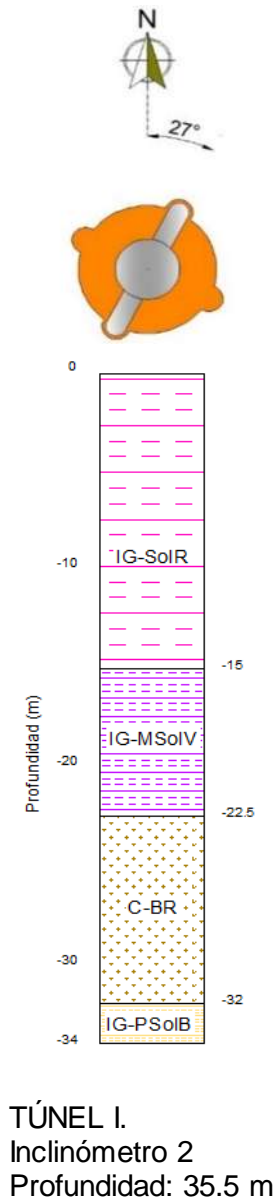
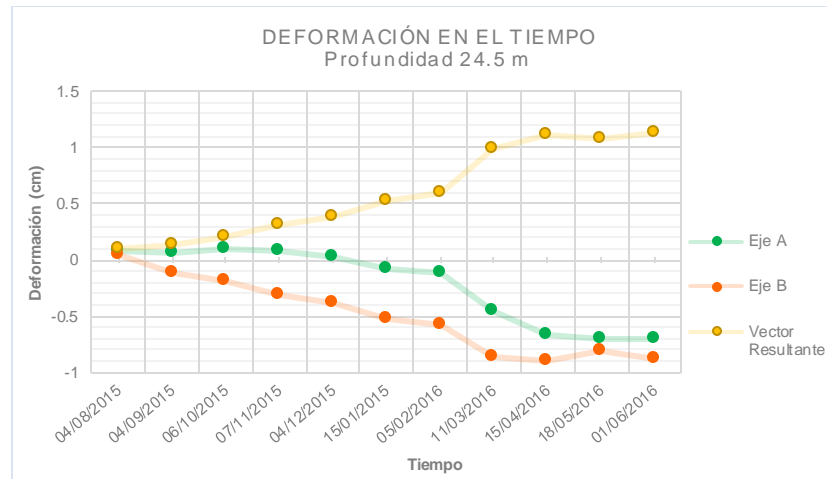


FIGURA 18. Perfiles de deformación horizontal del Inclinómetro 2 Túnel I.

## VECTORES DE DEFORMACIÓN INCLINÓMETRO 2 TÚNEL I



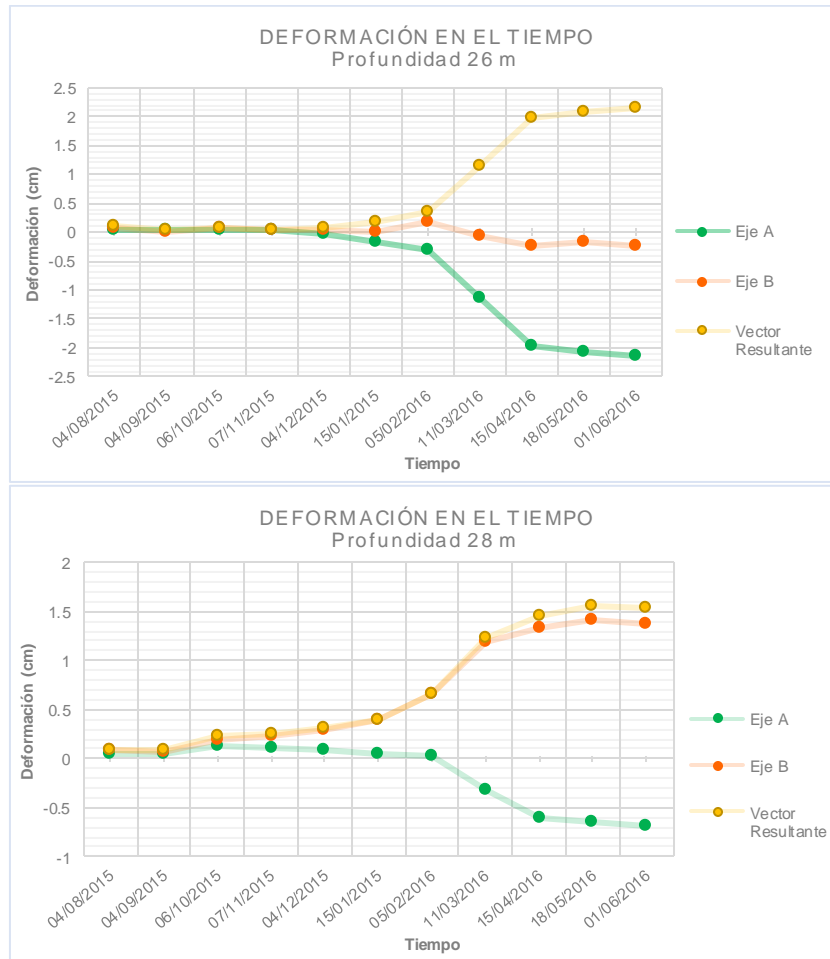
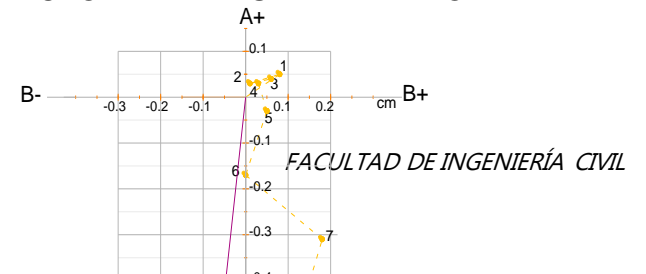
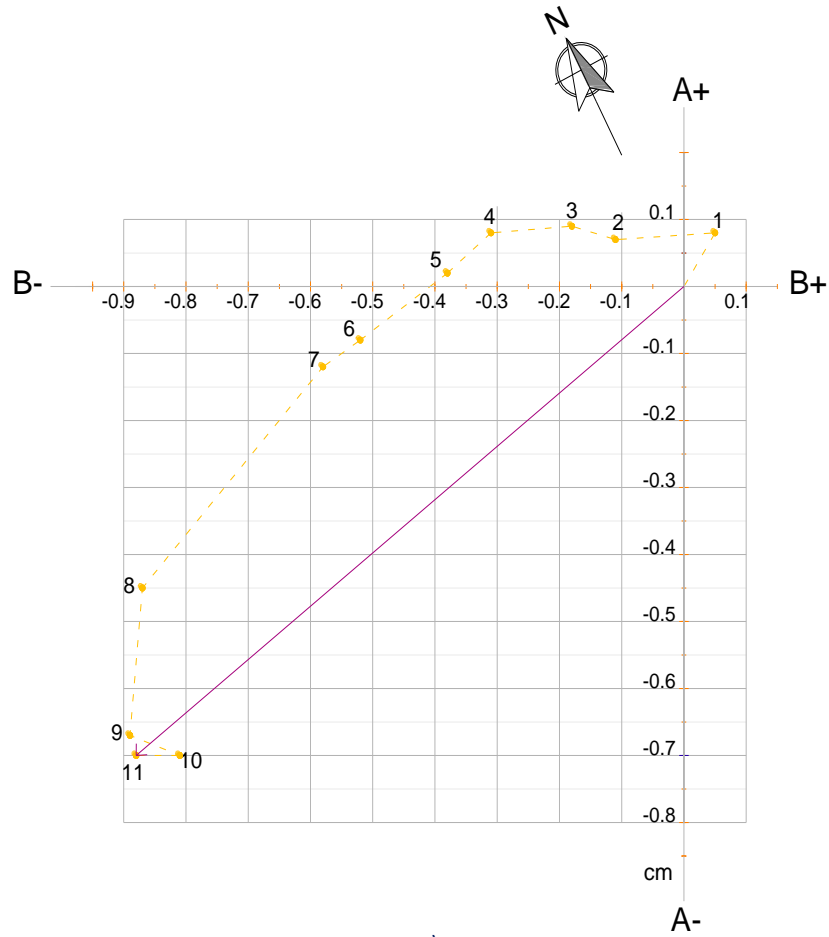


FIGURA 19. Vectores de deformación. Inclinómetro 2 Túnel I.

Inclinómetro 2 Túnel I Profundidad: 24.5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO

Inclinómetro 2 Túnel I Profundidad: 26 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO





a)

b)

Inclinómetro 2 Túnel I Profundidad: 28 m

TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



c)

FIGURA 20. Trayectoria de desplazamiento. Inclínómetro 2 Túnel I.

a) Prof.: 24.5m, b) Prof.: 26 m, c) Prof.: 28 m.

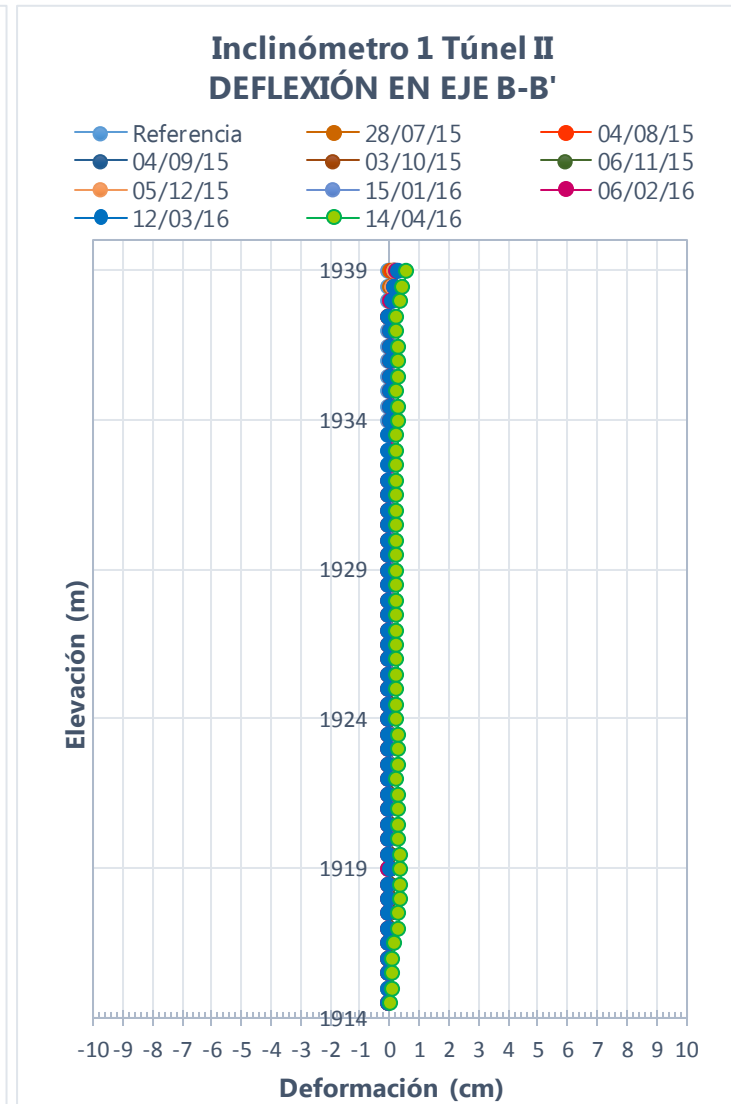
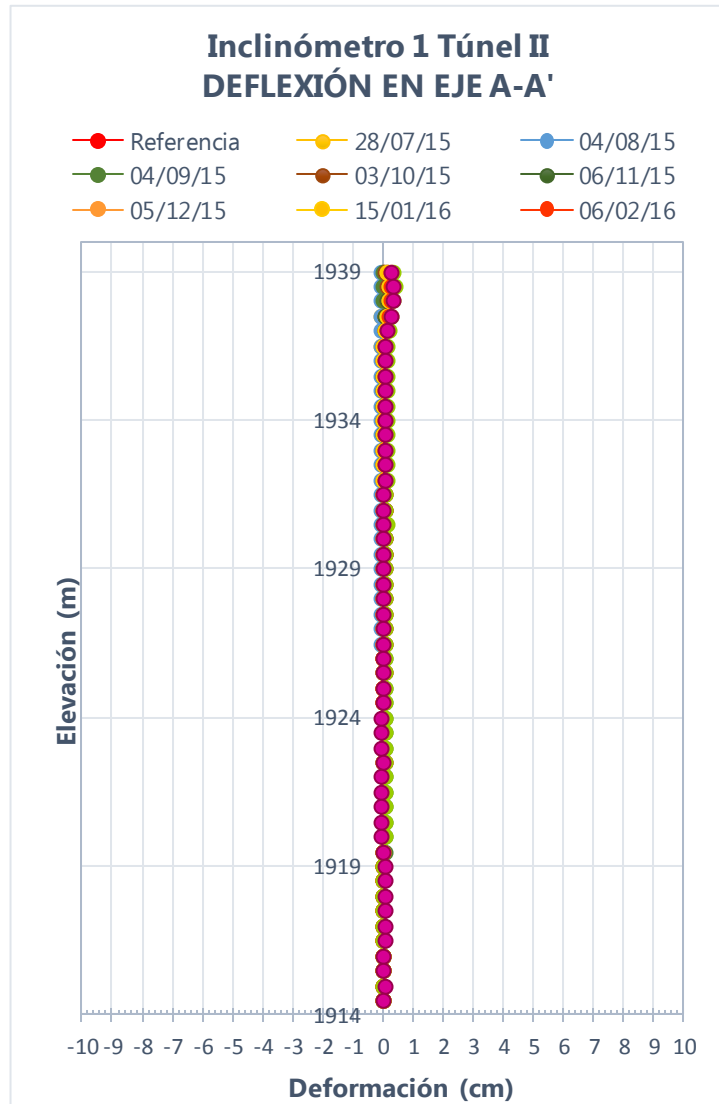
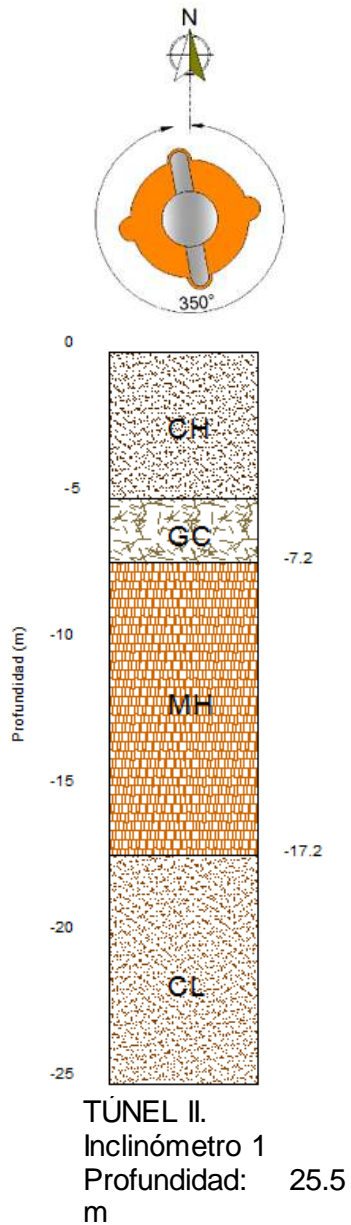


FIGURA 21. Perfiles de deformación horizontal del Inclinómetro 1 Túnel II.



VECTORES DE DEFORMACIÓN  
INCLINÓMETRO 1 TÚNEL II



FIGURA 22. Vectores de deformación. Inclínómetro 1 Túnel II.

Inclinómetro 1 Túnel II Profundidad: 0.5 m

TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO

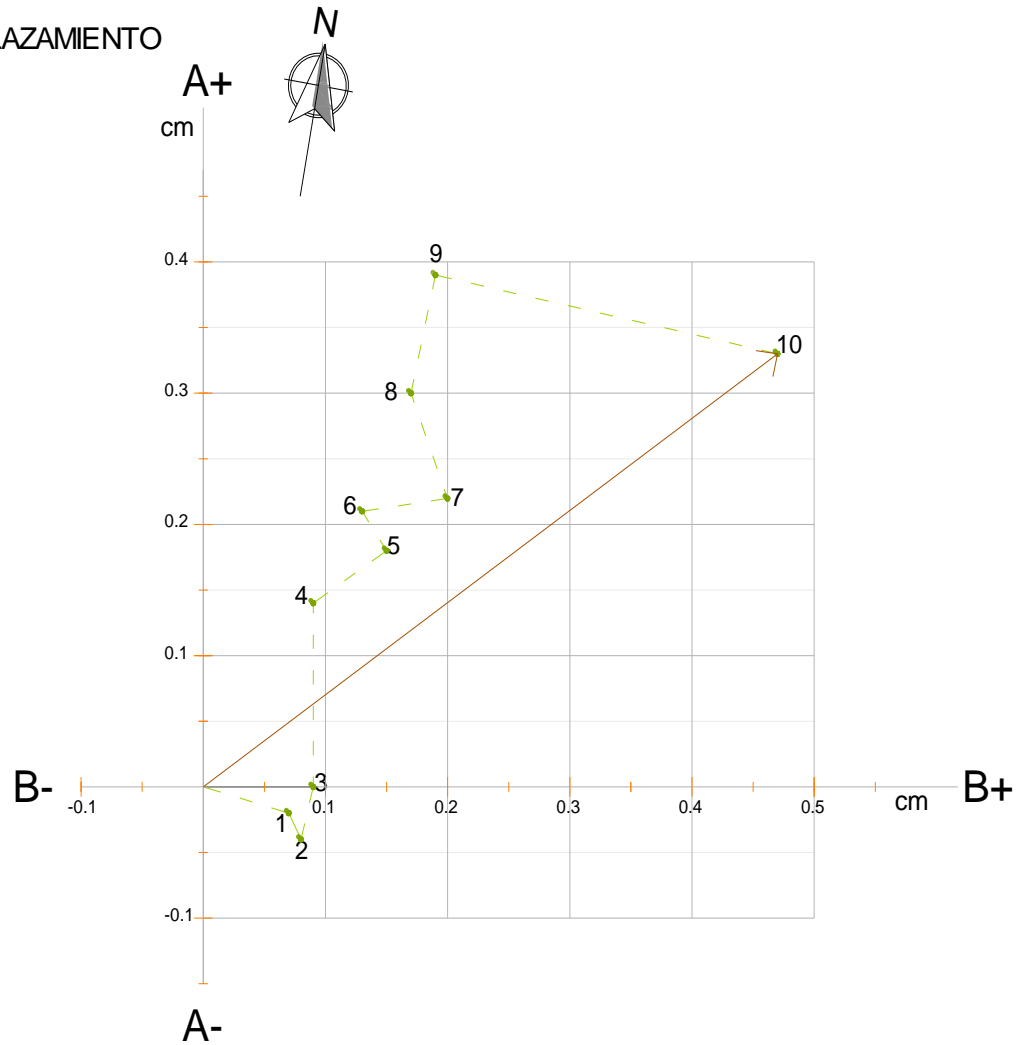
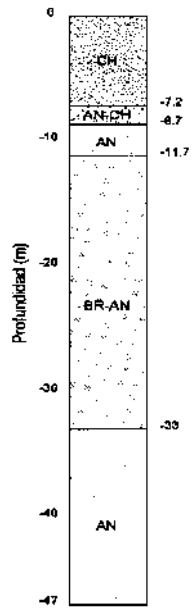
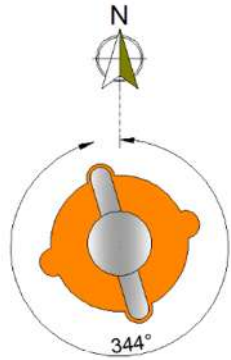


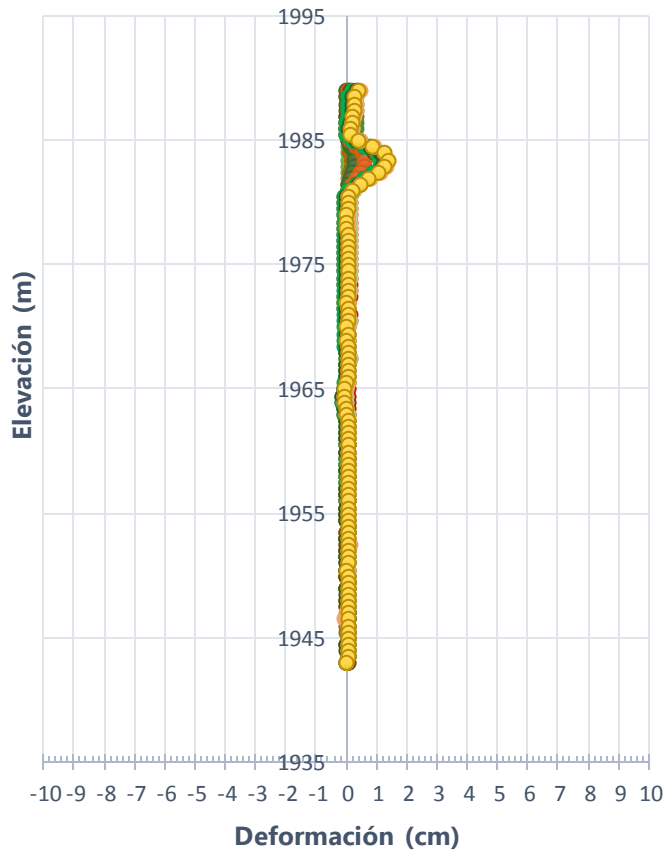
FIGURA 23. Trayectoria de desplazamiento. Inclinómetro 1 Túnel II.



TÚNEL II.  
Inclinómetro 2  
Profundidad: 47  
m

### Inclinómetro 2 Túnel II DEFLEXIÓN EN EL EJE A-A'

- |              |            |            |
|--------------|------------|------------|
| ● Referencia | ● 05/08/15 | ● 07/09/15 |
| ● 03/10/15   | ● 07/11/15 | ● 05/12/15 |
| ● 15/01/16   | ● 06/02/16 | ● 12/03/16 |
| ● 14/04/16   | ● 17/05/16 | ● 31/05/16 |



### Inclinómetro 2 Túnel II DEFLEXIÓN EN EL EJE B-B'

- |              |            |            |
|--------------|------------|------------|
| ● Referencia | ● 05/08/15 | ● 07/09/15 |
| ● 03/10/15   | ● 07/11/15 | ● 05/12/15 |
| ● 15/01/16   | ● 06/02/16 | ● 12/03/16 |

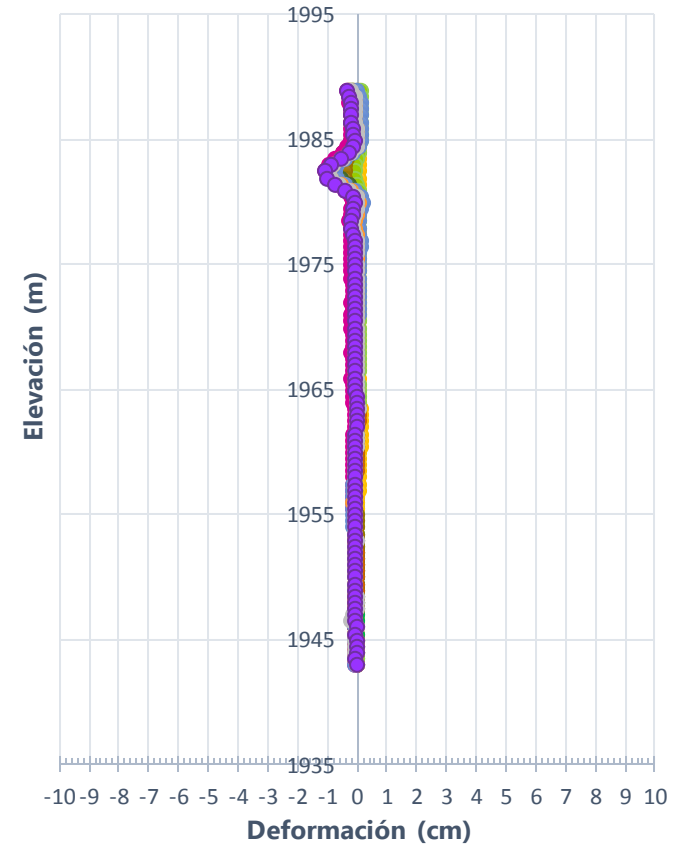


FIGURA 24. Perfiles de deformación horizontal del Inclinómetro 2 Túnel II.

VECTORES DE DEFORMACIÓN  
INCLINÓMETRO 2 TÚNEL II

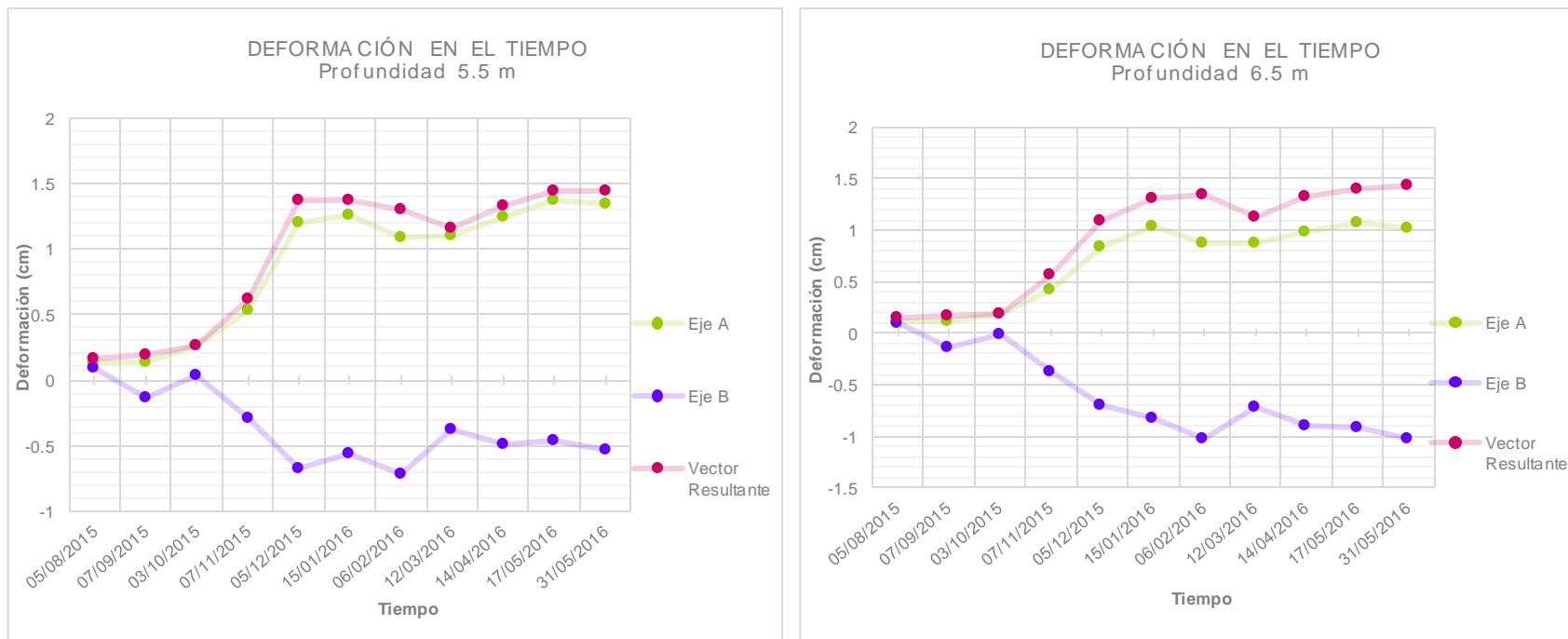
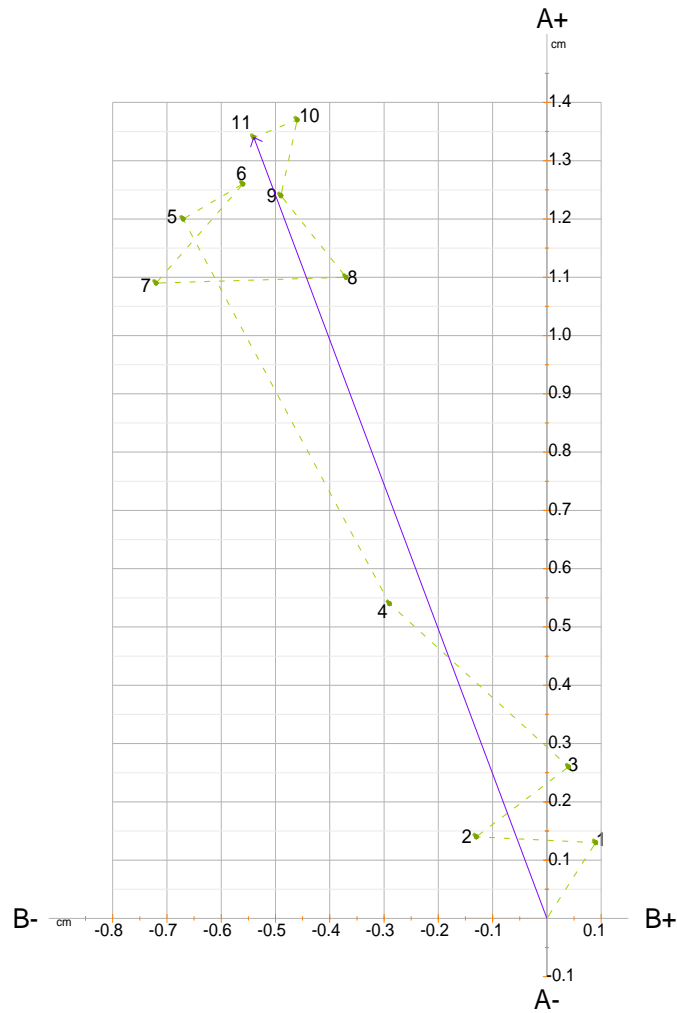
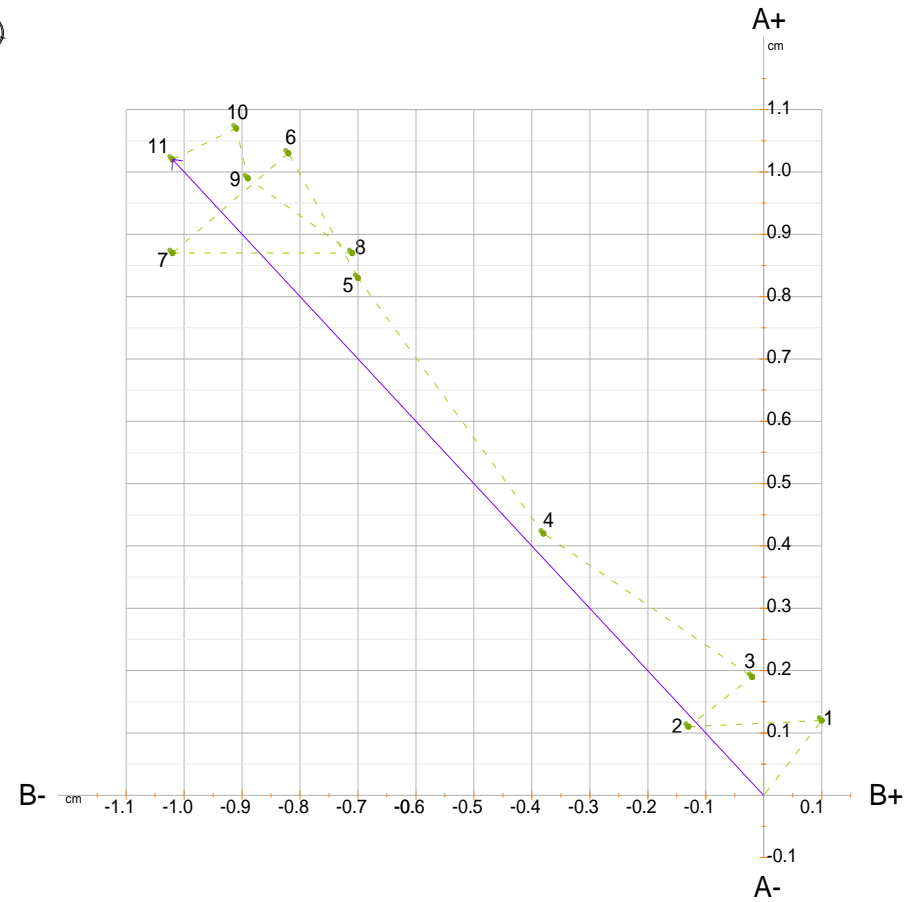


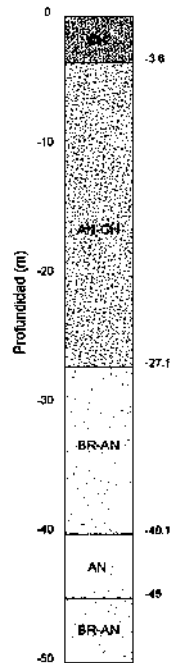
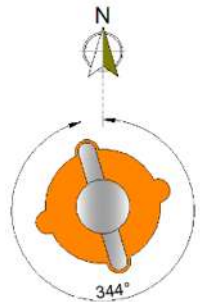
FIGURA 25. Vectores de deformación. Inclinómetro 2 Túnel II.

Inclinómetro 2 Túnel II Profundidad: 5.5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



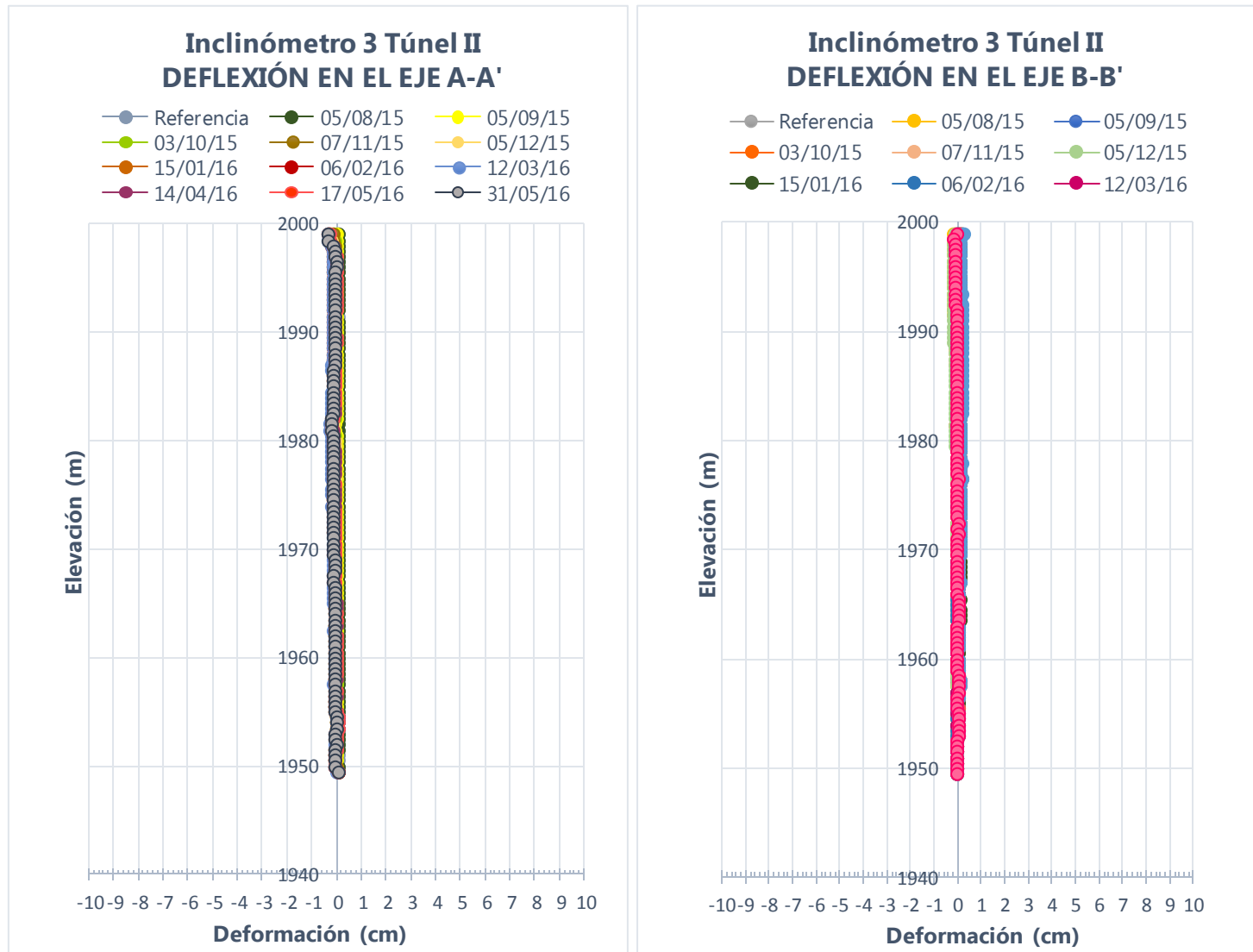
Inclinómetro 2 Túnel II Profundidad: 6.5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO





TÚNEL II.  
Inclinómetro 3

FIGURA 26. Trayectoria de desplazamiento. Inclinómetro 2 Túnel II.



Profundidad: 50.5 m

*FIGURA 27. Perfiles de deformación horizontal del Inclinómetro 3 Túnel II.*

VECTORES DE DEFORMACIÓN  
INCLINÓMETRO 3 TÚNEL II





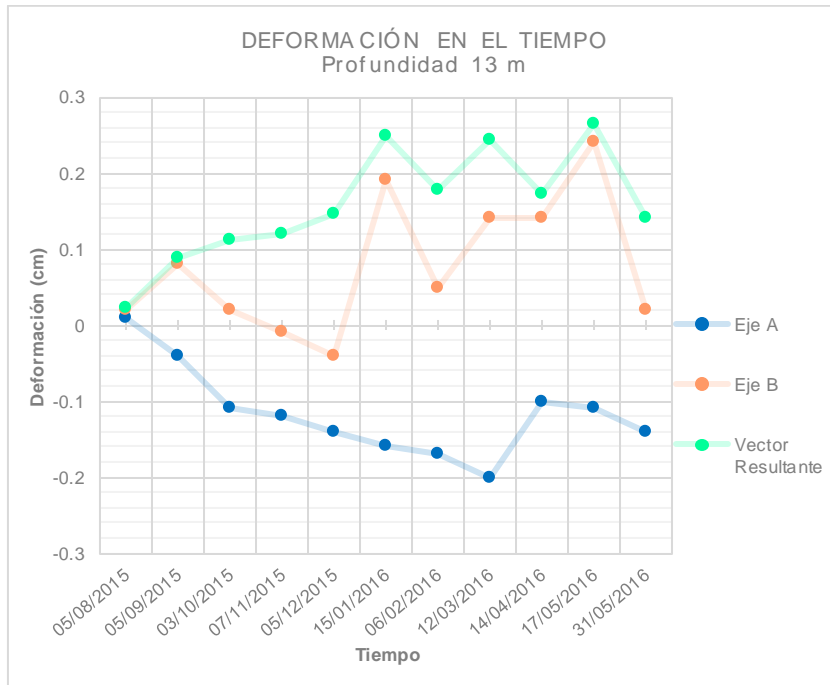
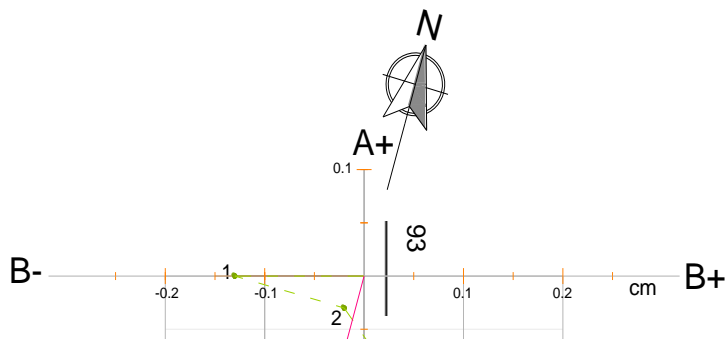
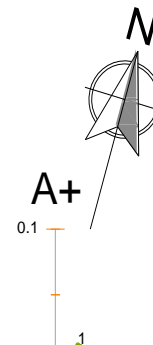


FIGURA 28. Vectores de deformación. Inclínometro 3 Túnel II.

Inclínometro 3 Túnel II Profundidad: 0.5 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



Inclínometro 3 Túnel II Profundidad: 13 m  
TRAYECTORIA DE DESPLAZAMIENTO



*FIGURA 29. Trayectoria de desplazamiento. Inclínómetro 3 Túnel II.*

### 3.7 PIEZÓMETROS

De forma introductoria se ha explicado el funcionamiento y características esenciales de estos equipos en el capítulo anterior. En esta parte, se dará detalle de los piezómetros utilizados en el proceso de instrumentación y monitoreo de los túneles.

Se eligió el uso de piezómetros abiertos debido a su aplicación durante el proceso constructivo de la obra.

Los piezómetros son aparatos que nos indicarán problemas relacionados con el flujo de agua.

Estos dispositivos son útiles para conocer las condiciones hidráulicas iniciales (previo a la construcción), además de funcionar en la determinación del patrón de flujo de agua, esto es, la magnitud y distribución de la presión de poro y sus cambios con el tiempo. Adicionalmente, los valores piezométricos pueden ser comparados con valores de deformación obtenidos de la medición con inclinómetros para identificar si determinado movimiento tiene relación con los niveles de agua en el subsuelo.

El piezómetro abierto, también conocido como piezómetro Casagrande consiste en un cilindro poroso que se encuentra conectado a tubos rectos de menor diámetro hasta alcanzar la superficie. La elevación de la superficie libre de la columna de agua que sube por la tubería recta por efectos de la presión de poro, se mide desde la superficie del terreno con una sonda eléctrica [CONAGUA, 2012].

En el proyecto se estableció la instalación y uso de cinco piezómetros de cabeza abierta, de tubería PVC de profundidades variables, localizados en los portales de salida de los túneles.

Las ventajas que nos darán los piezómetros en su aplicación para este proyecto son: durabilidad y permanencia, son fáciles de mantener, el sistema de medición es portátil, permiten muestrear el agua freática y principalmente medir la permeabilidad del suelo.

### 3.7.1 Ubicación de los piezómetros.

Los piezómetros se localizan en los portales de salida de los dos túneles proyectados con el fin de identificar la variación de los niveles freáticos durante la construcción de la obra y verificar la participación de éstos en los posibles movimientos de los taludes analizados.

### 3.7.2 Instalación de los piezómetros.

Los piezómetros se establecieron en función de las condiciones de los materiales que atraviesan los barrenos. En el caso que se estudia, los aparatos fueron instalados en laderas, en donde, para cada uno se descendió el bulbo piezométrico a su posición en el subsuelo, sellando la perforación para formar una zona piezométrica que garantiza la medición de la presión de poro en la profundidad de instalación del tubo perforado o bulbo.

Se determinó el uso de tubería PVC de 1" de diámetro, cuidando la verticalidad de su inserción en el pozo con el equipo adecuado de perforación para cada caso.

Las perforaciones se efectuaron hasta una profundidad de 50 cm por debajo de la localización del tubo perforado y previo al descenso de este último, se vertió 30 cm arena negra gruesa sobre el fondo del barreno, mientras que el piezómetro se cubre por una malla geotextil filtrante.

Para el descenso de la tubería PVC, se acoplan los tramos colocando cinta plateada para cuidar su limpieza interna. En la *FIGURA 30* se muestra la instalación de un piezómetro en su sitio y los componentes de sellado de la perforación.



FIGURA 30. a) Instalación de un piezómetro. b) Detalle de bulbo piezométrico.

En el proceso de inserción del bulbo piezométrico, se tuvo el cuidado de no fracturar la tubería durante la manipulación, hasta asentar el bulbo en el colchón de arena previamente vertido. Una vez colocada la totalidad de la tubería en la perforación, se colocó arena gruesa (retenida en la malla No. 10) hasta alcanzar 5 m de altura desde el fondo de la perforación.

Posteriormente, se agregó un metro de esferas de bentonita sobre el empaque de arena y sobre este sello se rellenó la perforación con arena fina (pasa la malla No. 10) hasta la superficie para terminar el sellado de zona piezométrica.

Por último, el tramo final de la tubería se cubre con un tapón y es protegido con un cajón de concreto con tapa metálica como se muestra en la FIGURA 31.



FIGURA 31. Tubería piezométrica y registro de protección.

### 3.7.3 Recopilación de datos y proceso del cálculo de presiones.

La variación de las presiones de poro se obtiene con la medición de las distancias de la superficie libre del agua en el ducto, respecto al nivel de elevación del brocal del tubo de PVC del piezómetro; con esta distancia y el nivel de elevación del bulbo piezométrico, se obtiene la longitud de la columna de agua que interesa.

En este estudio, se utilizó una sonda eléctrica que está formada por un cable de dos conductores eléctricos con una barra cilíndrica de acero inoxidable en su extremo inferior. El extremo superior del cable se conecta a una batería y a un indicador de alarma; la punta se baja dentro del tubo del piezómetro y, al encontrar la superficie del agua, el circuito eléctrico se cierra y se acciona el indicador para así, tomar la lectura que corresponda en la posición del nivel del brocal.

En el formato de registro de lecturas deberá presentarse el cálculo de la carga de agua y la presión de poro correspondiente. Se registra la identificación del piezómetro, sus coordenadas de localización, características del instrumento, lecturas de la sonda, cálculo de la elevación del nivel de agua en el piezómetro, columna de agua y presión de poro.

98

### 3.7.4 Presentación de resultados piezométricos.

Las siguientes gráficas muestran las lecturas de los piezómetros instalados en los portales de los túneles del proyecto y su variación con el tiempo.

En el eje vertical se indica la elevación de los niveles de agua, y en el eje horizontal, el tiempo. Cada curva corresponde a la historia de presiones medidas de un piezómetro específico, ahí señalado.

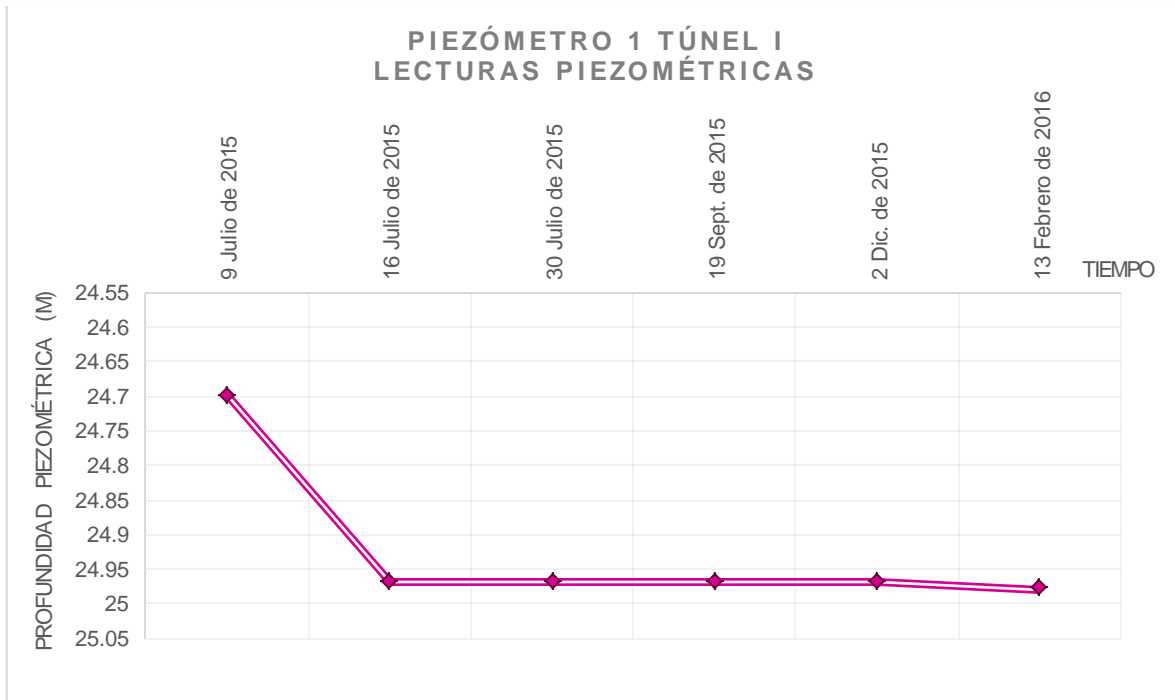


FIGURA 32. Registro piezométrico. Piezómetro 1 Túnel I.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS - Piezómetro 1 túnel I.

Se muestran en la *FIGURA 32* seis registros correspondientes a diferentes periodos en los cuales es posible percibir un decremento en el nivel freático después de la primera lectura, normalizándose el flujo en las mediciones siguientes.

A pesar de haber atravesado meses de lluvia, el nivel de agua en el subsuelo no ha incrementado.

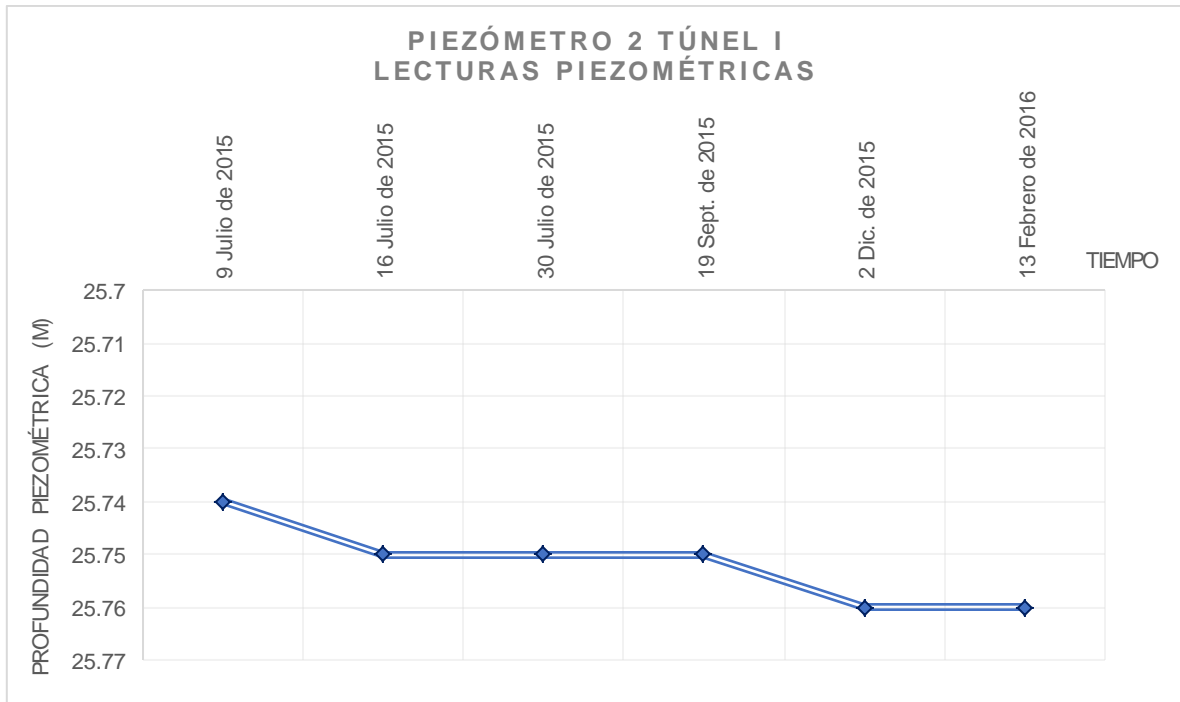


FIGURA 33. Registro piezométrico. Piezómetro 2 Túnel I.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS - Piezómetro 2 túnel I.

Para la gráfica anterior, no se muestran variaciones significativas en el nivel freático. Se tienen únicamente dos disminuciones, siendo la primera la que llama más la atención por ser lecturas en el mismo mes pero manteniéndose uniforme después de ésta y volviendo a descender pasando los meses húmedos.



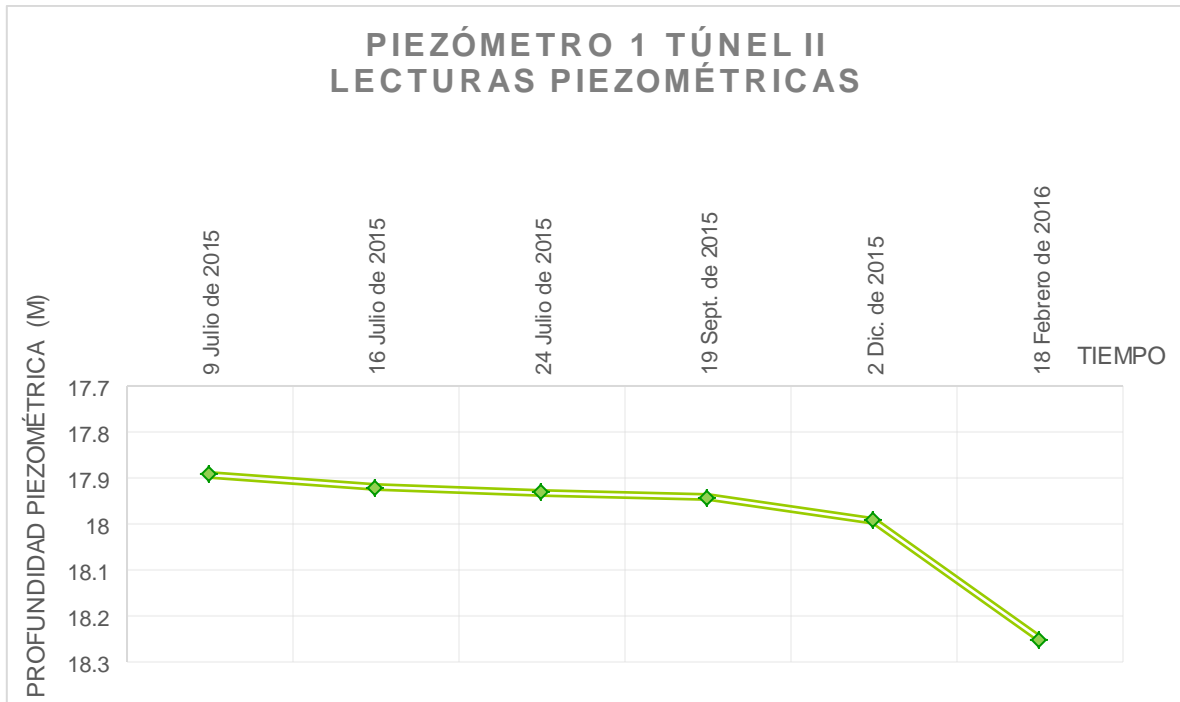


FIGURA 34. Registro piezométrico. Piezómetro 1 Túnel II.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS - Piezómetro 1 túnel II.

En la FIGURA 34 se aprecia cómo el nivel de agua baja poco a poco, decreciendo de manera más notoria en las últimas lecturas.

Se observa que a pesar de atravesar el periodo de lluvias los niveles no incrementaron.

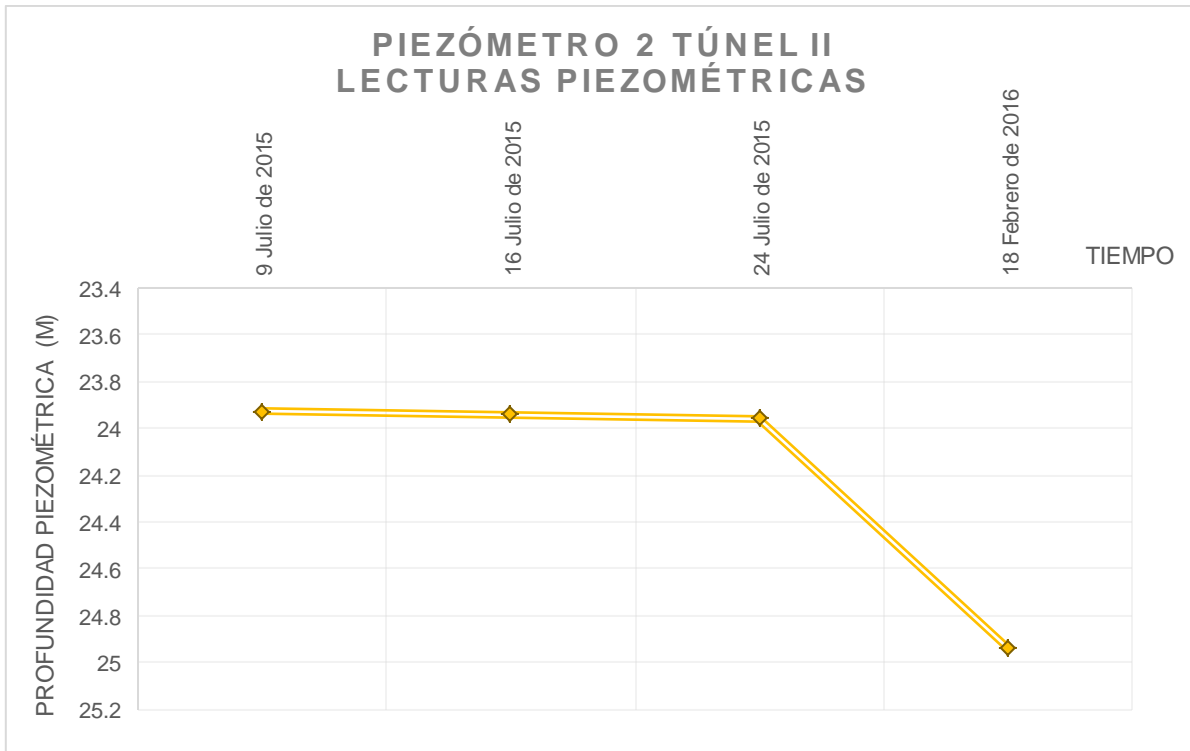


FIGURA 35. Registro piezométrico. Piezómetro 2 Túnel II.

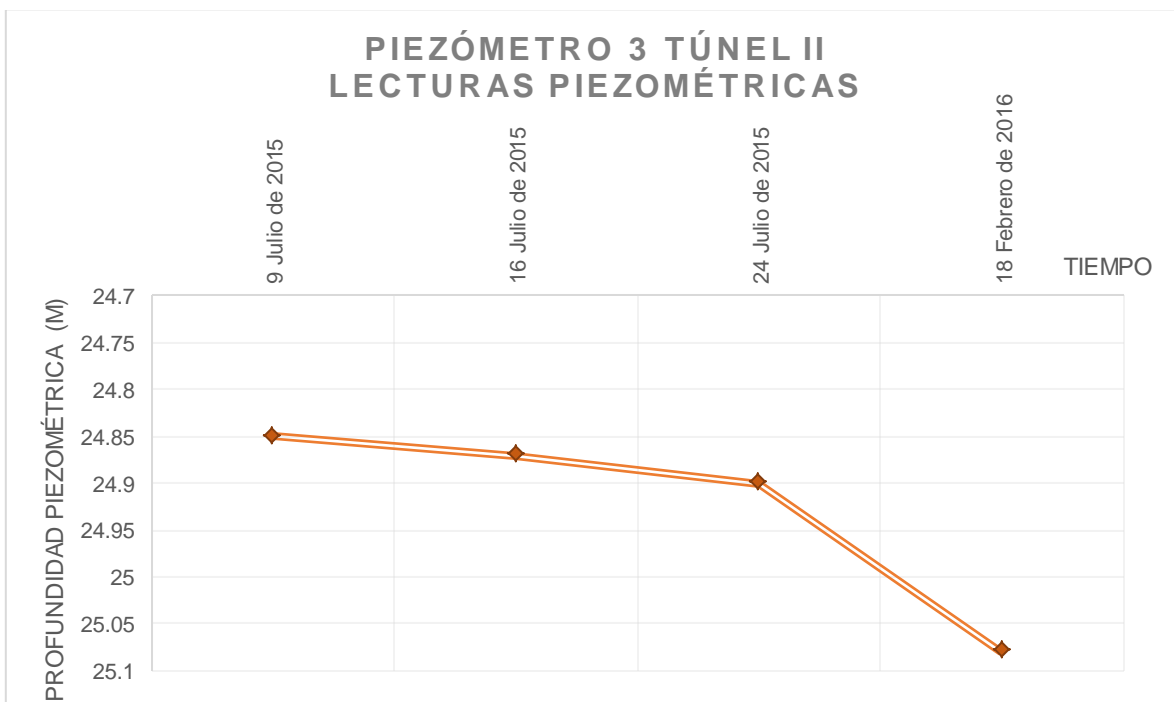


FIGURA 36. Registro piezométrico. Piezómetro 3 Túnel II.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS - Piezómetro 2 y 3 túnel II.

Debido a la dificultad de acceso que se tuvo para las mediciones en los piezómetros 2 y 3, se hicieron únicamente cuatro lecturas, para el mes de julio de 2015 y febrero de 2016.

En ellas se muestra un flujo constante seguido de un drástico decremento en los niveles, el cual probablemente sea causado por la evaporación ocurrida en los meses secos.

# CONCLUSIONES.

Para concluir este trabajo de investigación, se llegaron a las siguientes conclusiones:

## RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS.

De acuerdo con los resultados de topografía obtenidos, se puede decir que aparentemente existen diferencias mínimas entre las coordenadas tomadas para los vértices colocados en el campo, sin embargo, dichas variaciones no llegaron a presentar un patrón definido.

Existen factores involucrados en el proceso de medición que pueden afectar en milímetros los datos en el momento de registrar las lecturas, esto puede ser desviaciones por procedimiento de aplomado de prismas y balizas, así como el cambio de operador de una medición a otra.

A partir del análisis de los resultados, se considera adecuada la construcción sobre la zona, manteniendo precauciones en caso de detectar una condición extrema de movimientos lentos.

Es difícil determinar un movimiento claro de la masa de suelo con las mediciones que se realizaron en la zona del portal del salida del túnel II del Ramal Camelinas, por lo que se recomienda continuar con el monitoreo a fin de alcanzar conclusiones más específicas a este respecto.

---

104

En relación a la información recabada de inclinómetros, se afirma que este tipo de instrumentación es de gran utilidad como indicador de deformaciones en el terreno, cuya precisión otorga credibilidad a los resultados.

El éxito del estudio recae principalmente en la planeación adecuada de la ubicación de las perforaciones y de las mediciones que se realicen, tanto en número como en tiempo.

En sí mismo el monitoreo de inclinómetros no es suficiente para definir el movimiento general de un talud en el que se ve implicado el portal de un túnel, pero a pesar de ello, es un elemento importante para detectar deformaciones.

En el control que se llevó a cabo durante los últimos ocho meses, se logró detectar que el movimiento más grande fue de 2.13 cm en el portal de salida del túnel I y de 1.37 cm para el portal de salida del túnel II.

A pesar de parecer valores alarmantes para el tiempo de estudio, las deflexiones han sido puntuales, en profundidades específicas, lo que hace suponer que los deslizamientos tienen pocas probabilidades de presentar un movimiento en masa a gran escala.

Sumado a lo anterior, los estudios revelaron que el material con mayor injerencia en el movimiento son estratos de ignimbrita. La razón de esta tendencia puede ser la rotación de un bloque, ya que se presenta en una profundidad específica y no a lo largo de toda la perforación, esto para el inclinómetro 1 del túnel I; en tanto los aparatos restantes señalan movimiento en estratos arcillosos, material que se sabe con antelación que no es resistente, sin embargo, las deformaciones presentadas en este material son casi todas superficiales y pueden estar siendo afectadas por el movimiento de maquinaria y trabajos realizados en la zona.

Por último, los niveles piezométricos se han mantenido estables con una baja en épocas de estiaje.

En los piezómetros ubicados en el túnel I, se muestran niveles elevados de presencia de agua que puede deberse al líquido utilizado para realizar las perforaciones, lo cual no significa que las primeras mediciones se refieren a nivel de aguas subterráneas.

Es importante el continuo monitoreo de las zonas de los portales de los túneles, con el fin de detectar los posibles movimientos del suelo durante la construcción de las estructuras proyectadas.

La interpretación de los datos de instrumentación y monitoreo debe ser realista tomando en cuenta los estudios previos de geotecnia y topografía del sitio estudiado, de lo contrario se puede llegar a conclusiones optimistas que tienen un nivel muy alto de riesgo.

### MEDIDAS PREVENTIVAS.

La instrumentación, es una herramienta para el entendimiento de los fenómenos físicos que ocurren en la obra. Para ello, es trabajo del ingeniero tomar los parámetros obtenidos del monitoreo para retroalimentación del proyecto; adoptar nuevos procedimientos constructivos es una opción de solución para cubrir anomalías en la obra en caso de que posteriormente se detecte información que rebase los límites permitidos de presiones y desplazamientos.

El costo que supone la implementación de un sistema de monitoreo es ínfimo, en comparación con el ahorro económico que la Administración encargada puede obtener, al emplear soluciones correctivas o modificaciones de los procesos constructivos, disponiendo de información detallada que permita asegurar el éxito de dicha corrección.

### FUTURO DE LA INSTRUMENTACIÓN.

El uso de aparatos de control se ha hecho cada vez más común en el ámbito de la ingeniería, sin embargo, su total consideración dentro del trabajo geotécnico se logrará con la labor conjunta de profesionistas comprometidos y conscientes del valor y la importancia de instrumentar una obra.

El desafío es utilizar la instrumentación en obras de todo tipo, no solo en túneles, construcciones que requieran control con precisión y confianza plena, por lo que hay que valerse de la unión de conocimiento multidisciplinario para su correcta aplicación y total aprovechamiento de los recursos tecnológicos que nos ofrece la instrumentación en obras de infraestructura.

# REFERENCIAS.

- Agua, C. N. (Julio de 2012). *Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y monitoreo del comportamiento de obras hidráulicas*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Alfonso Rico Rodríguez, H. d. (1999). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres* (Vol. 1). México, D.F.: LIMUSA.
- Alfonso Rico Rodríguez, H. d. (2003). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres* (Vol. 2). México, D.F.: LIMUSA.
- Beltrán, A. H. (Febrero de 2010). Estudios geotécnicos para taludes carreteros en zonas de riesgo. Morelia, Michoacán, México.
- Duncan C. Wyllie, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering*. New York: Spon Press.
- Dunncliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York: Wiley Interscience.
- George Machan, V. G. (Octubre, 2008). *Use of Inclometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Lee W. Abramson, T. S. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: Wiley Interscience.
- Sociedad Mexicana de Suelos, A.C. (1988). *XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos* (Vol. 2). México, D.F.: Sociedad Mexicana de Suelos, A.C.
- Suarez, J. (s.f.). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*.