

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS.

Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas



**GOBIERNO
FEDERAL**

SEMARNAT



Vivir Mejor

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS.

Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas

Comisión Nacional del Agua

ADVERTENCIA

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, cuyo cuidado editorial estuvo a cargo de la Coordinación General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua.

Título: Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas

ISBN: 978-607-7908-97-5

Autor: Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000
www.conagua.gob.mx

Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines de la Montaña,
C.P 14210, Tlalpan, México, D.F.

Impreso en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.
Queda prohibido el uso para fines distintos al desarrollo social.

CONTENIDO

PRÓLOGO	v
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1.1
1.1 OBSERVACIÓN EN INGENIERÍA	1.1
1.2 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN	1.2
1.3 REGISTRO DE OBSERVACIONES	1.2
1.4 EL MÉTODO OBSERVACIONAL	1.3
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS	2.1
2.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	2.1
2.1.1 TÉRMINOS GENERALES	2.2
2.1.2 TÉRMINOS RELACIONADOS CON INCERTIDUMBRE	2.2
2.1.3 TÉRMINOS ELÉCTRICOS	2.3
2.1.4 TÉRMINOS TOPOGRÁFICOS	2.4
2.1.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	2.5
2.2 TIPOS DE SENSORES O TRANSDUCTORES	2.5
2.3 CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO	2.5
CAPÍTULO 3. ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN	3.1
3.1 ORGANIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN	3.2
3.1.1 EL GRUPO DE TRABAJO	3.2
3.1.2 LA INFORMACIÓN REQUERIDA	3.2
3.1.3 RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL PLAN DE TRABAJO	3.3
3.2 PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO	3.3
3.2.1 IDENTIFICACIÓN Y SATISFACCIÓN DE LAS NECESIDADES DE LA INSTRUMENTACIÓN	3.4
3.2.2 COSTO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA	3.5
3.3 INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN	3.5
3.3.1 PRUEBAS DE PREINSTALACIÓN	3.5
3.4 VERIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO	3.5
3.4.1 VERIFICACIÓN	3.5
3.4.2 MANTENIMIENTO	3.5
3.5 RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS	3.6
3.6 AUTOMATIZACIÓN	3.6
3.6.1 VENTAJAS Y LIMITACIONES	3.6
3.6.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	3.7
3.7 SIMBOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN	3.7
3.8 TENDENCIAS EN LOS SISTEMAS DE IYM	3.7
CAPÍTULO 4. MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES	4.1
4.1 INSTRUMENTACIÓN A BASE DE TESTIGOS SUPERFICIALES	4.1
4.1.1 TIPOS DE MONUMENTOS	4.2

4.1.2 LOCALIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MONUMENTOS	4.3
4.2 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA OBTENER LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES	4.5
4.2.1 EQUIPO	4.5
4.2.2 MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN	4.6
4.2.3 TOMA DE LECTURAS	4.7
4.2.4 CÁLCULO	4.7
4.2.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	4.8
4.3 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA DESPLAZAMIENTOS VERTICALES	4.9
4.3.1 EQUIPO	4.9
4.3.2 MANTENIMIENTO Y VERIFICACIÓN DEL EQUIPO	4.9
4.3.3 TOMA DE LECTURAS	4.9
4.3.4 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	4.10
4.4 UBICACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS BANCOS DE CONTROL	4.10
4.4.1 EQUIPO	4.11
4.4.2 UBICACIÓN DE LOS BANCOS DE CONTROL	4.11
4.4.3 MEDICIÓN DE LOS BANCOS DE CONTROL	4.11
4.4.3.1 NIVELACIÓN DE LOS BN DE LA RED PRIMARIA	4.12
4.5 UTILIZACIÓN DE LA GEODESIA	4.12
4.5.1 RECEPTORES GPS	4.14
4.5.2 LEVANTAMIENTO CON GPS	4.14
4.5.3 RED GEODÉSICA NACIONAL	4.15

CAPÍTULO 5. MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS INTERNOS **5.1**

5.1 INCLINÓMETROS	5.1
5.1.1 INCLINÓMETRO VERTICAL	5.2
5.1.1.1 TUBERÍA GUÍA	5.3
5.1.1.2 SONDA	5.11
5.1.1.3 CABLE ELÉCTRICO	5.11
5.1.1.4 OPERACIÓN	5.11
5.1.2 INCLINÓMETRO VERTICAL FIJO	5.15
5.1.2.1 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE INCLINÓMETRO FIJO	5.15
5.1.2.2 CÁLCULO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	5.16
5.1.3 INCLINÓMETRO HORIZONTAL	5.16
5.1.3.1 INSTALACIÓN DE TUBERÍA	5.17
5.1.3.2 OPERACIÓN	5.17
5.1.4 INCLINÓMETRO HORIZONTAL FIJO	5.18
5.2 CLINÓMETROS	5.19
5.2.1 DISPOSITIVO METÁLICO DE FIJACIÓN	5.19
5.2.2 TIPOS DE SENSORES	5.19
5.2.2.1 SENSOR	5.19
5.2.2.2 SENSOR	5.22
5.2.2.3	5.23
5.2.2.4 SENSOR	5.23
5.2.3 CABLE ELÉCTRICO	5.24
5.2.4 UNIDAD DE LECTURA	5.23
5.2.5 INSTALACIÓN Y OPERACIÓN	5.23
5.2.6 CÁLCULO	5.23
5.2.7 HOJA DE REGISTRO	5.24
5.2.8 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	5.24

5.3 EXTENSÓMETROS	5.25
5.3.1 EXTENSÓMETROS EXTERNOS	5.25
5.3.1.1 EXTENSÓMETRO EXTERNO DE JUNTAS Y GRIETAS	5.25
5.3.1.2 EXTENSÓMETRO EXTERNO DE CONVERGENCIA	5.29
5.3.2 EXTENSÓMETROS INTERNOS	5.31
5.3.2.1 EXTENSÓMETROS INTERNOS DE PLACAS	5.31
5.3.2.2 EXTENSÓMETROS INTERNOS DE BARRAS	5.34
5.4 DEFORMÓMETROS	5.38
5.4.1 DEFORMÓMETRO MECÁNICO	5.39
5.4.2 DEFORMÓMETROS MAGNÉTICOS	5.41
5.4.2.1 DEFORMÓMETROS CON ANILLOS MAGNÉTICOS (SONDEX)	5.41
5.4.2.2 DEFORMÓMETROS DE PLACAS Y ARAÑAS MAGNÉTICAS	5.41
5.5 CELDAS DE ASENTAMIENTO	5.43
5.5.1 COMPONENTES	5.43
5.5.2 OPERACIÓN	5.434
5.5.3 INSTALACIÓN	5.45
5.5.4 TOMA DE LECTURAS	5.46
5.5.5 CÁLCULO	5.46
5.5.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	5.47
5.6 NUEVOS DESARROLLOS	5.47

CAPÍTULO 6 MEDICIÓN DE PRESIONES **6.1**

6.1 PRESIONES HIDRÁULICAS	6.2
6.1.1 PIEZÓMETRO ABIERTO	6.2
6.1.1.1 DESCRIPCIÓN	6.2
6.1.1.2 INSTALACIÓN	6.5
6.1.1.3 FUNCIONAMIENTO	6.8
6.1.1.4 TOMA DE LECTURAS Y CÁLCULO DE PRESIONES	6.8
6.1.1.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	6.8
6.1.2 PIEZÓMETRO NEUMÁTICO	6.8
6.1.2.1 DESCRIPCIÓN	6.9
6.1.2.2 INSTALACIÓN	6.10
6.1.2.3 PROTECCIÓN DE LAS MANGUERAS	6.10
6.1.2.4 FUNCIONAMIENTO Y VERIFICACIÓN	6.12
6.1.2.5 TOMA DE LECTURAS Y CÁLCULO	6.13
6.1.2.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	6.13
6.1.3 PIEZÓMETRO ELÉCTRICO	6.13
6.1.3.1 TIPOS DE SENSORES	6.14
6.1.3.2 TIPOS DE FILTROS	6.15
6.1.3.3 UNIDAD DE LECTURA	6.15
6.1.3.4 INSTALACIÓN	6.15
6.1.3.5 TOMA DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	6.21
6.2 CELDAS DE PRESIÓN	6.21
6.2.1 DESCRIPCIÓN	6.22
6.2.1.1 CELDAS DE PRESIÓN DE DIAFRAGMA	6.22
6.2.1.2 CELDA DE PRESIÓN HIDRÁULICA	6.22

6.2.2 TIPOS DE SENSORES	6.23
6.2.2.1 TRANSDUCTOR DE RESISTENCIA ELÉCTRICA	6.26
6.2.2.2 TRANSDUCTOR DE CUERDA VIBRANTE	6.26
6.2.2.3 TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO	6.26
6.2.2.4 TRANSDUCTOR DE FIBRA ÓPTICA	6.26
6.2.3 INSTALACIÓN	6.26
6.2.3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS	6.26
6.2.3.2 INSTALACIÓN DE CELDAS INDIVIDUALES	6.27
6.2.3.3 INSTALACIÓN DE UN GRUPO DE CELDAS	6.27
6.2.3.4 PROTECCIÓN DE CABLES	6.28
6.2.3.5 TOMA DE LECTURAS	6.29

REFERENCIAS

ANEXO A

PRÓLOGO

El objetivo del presente manual es proveer una herramienta básica y didáctica, de uso ágil para los profesionales que en su práctica enfrentan problemas relacionados con la instrumentación y el monitoreo de obras hidráulicas.

Los avances en el diseño de presas de tierra y enrocamiento, tanto en los métodos de análisis y diseño como en los procedimientos de construcción, tienen sus raíces en los datos aportados por la instrumentación instalada en las obras a escala real. A partir de los datos se logra entender la relación causa-efecto en un contexto específico.

Asimismo, el desarrollo reciente de la tecnología de los sensores, la tecnología de la información y el análisis numérico permiten el desarrollo de un ciclo automatizado de medición y predicción con base en el comportamiento observado. El ciclo consiste en un modelo predictivo, los datos del monitoreo de las obras y las técnicas de análisis inverso.

Uno de los retos que se enfrentaron para realizar el presente manual fue sintetizar la creciente información disponible sobre la instrumentación y su aplicación, sin perder claridad y completez. Además, se realizó un esfuerzo por contribuir con el ordenamiento del tema. Se

consideró conveniente incluir la traducción en inglés de cada término (al citarse por primera vez en el texto) para facilitar al usuario la lectura y comprensión de la literatura especializada, así como de los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo.

Los instrumentos que se describen en este manual corresponden a desarrollos tecnológicos actuales; para los instrumentos que se sigan utilizando por la CONAGUA y que no se encuentren aquí explicados, se recomienda consultar el manual anterior. Tampoco se incluyen los procedimientos de colocación de instrumentación en el interior de la cortina, posterior a la construcción.

El presente manual está estructurado en seis capítulos, referencias bibliográficas y un anexo.

El capítulo 1 está dedicado a la observación en ingeniería, la piedra angular del ciclo, ya que todo método de análisis debe ser validado mediante su confrontación con observaciones a escala natural.

El capítulo 2 concentra la definición de los conceptos básicos y términos empleados en el manual con objeto de facilitar la consulta de los temas.

El capítulo 3 explica la planeación de un sistema de instrumentación y monitoreo de obras hidráulicas. Se destaca la fortaleza del grupo de trabajo para efectuar

dicha planeación, ya que el éxito está en la combinación de conocimiento, experiencia, predicción y juicio en ingeniería.

El capítulo 4 está dedicado a la medición de movimientos superficiales, en tanto que el capítulo 5 a la medición de movimientos internos. Finalmente, en el capítulo 6 se explica la medición de presiones.

Se incluyen las referencias bibliográficas y un anexo que contiene las formas para la captura y procesamiento de datos.

Conviene mencionar que durante la elaboración del presente manual se consultaron varias fuentes de información, entre las que merecen una mención especial son: *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field performance*, de Dunicliff (1988); *Foundation Intrumentation* de Hanna (1998), y los manuales de operación y de instrucciones de los fabricantes de equipo.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El propósito de este manual es brindar una orientación a los ingenieros responsables de la instrumentación, el monitoreo y el análisis del comportamiento de las obras hidráulicas. Cada sistema de instrumentación es único, por tanto, se hace énfasis en el uso de juicio en ingeniería para aplicar con éxito las recomendaciones que aquí se expresan.

Para analizar la competencia de un instrumento, planificar un nuevo sistema para rehabilitar una obra o seleccionar un instrumento, se precisa de personal responsable y competente que identifique las condiciones que requieren atención y reconozca la necesidad de ejecutar acciones inmediatas.

Este manual proporciona información y orientación indispensables para modificar sistemas de instrumentación existentes, así como para desarrollar el sistema para una nueva obra hidráulica.

Los tres usos principales de este manual son los siguientes:

- Un material de consulta y referencia de uso frecuente
- Un apoyo para la selección o el reemplazo de un instrumento
- Una guía para planear y diseñar un sistema de instrumentación y medición

1.1 OBSERVACIÓN EN INGENIERÍA

Puede afirmarse que el **método observacional** es característico de la ingeniería actual, y ésta por consiguiente requiere la observación y el registro del comportamiento de las obras, así como el control de las variables y factores relevantes; exige, además, el análisis e interpretación de las mediciones.

La **observación en ingeniería** es una percepción intencionada que persigue múltiples objetivos, no todos absolutamente preestablecidos, y está guiada por un cuerpo de conocimiento. Es un modo refinado de aprehender el mundo perceptible y de poner a prueba nuevas ideas sobre éste mismo.

Por tanto, la observación requiere la invención y revisión de una amplia variedad de técnicas experimentales; en esta situación, el ingeniero encuentra, además de los obstáculos propios de la complejidad de los fenómenos que necesita interpretar, otros de orden material. Para superarlos debe tenerse gusto por el diseño, habilidad en trabajos de precisión y, al mismo tiempo, las facultades

indispensables en el manejo de mecanismos delicados y equipo especializado para la realización de mediciones en los límites de las posibilidades instrumentales.

La **observación cuantitativa** es la medición y el producto de una medición es un dato.

1.2 OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

La **instrumentación** es el punto de apoyo del razonamiento aplicado a la interpretación de los datos.

El objetivo principal de la **instrumentación geotécnica** es obtener información confiable y oportuna del comportamiento de estructuras y depósitos de suelo mediante la colocación y lectura de instrumentos de medición, así como de la interpretación de los datos obtenidos.

En función de este objetivo principal, se desglosan de manera particular los siguientes:

1. Conocer las condiciones iniciales del sitio (e.g., estado de esfuerzos y presión de poro).
2. Medir propiedades hidráulicas y mecánicas *in situ* (e.g., permeabilidad, compresibilidad y resistencia).
3. Monitorear las diversas etapas durante la construcción.
4. Verificar la calidad de la construcción.
5. Verificar las hipótesis de diseño. La instrumentación puede revelar la necesidad de modificar el diseño.
6. Conocer las condiciones de seguridad. La instrumentación permite conocer en todo momento las condiciones de seguridad de la obra, incluyendo aquellas inesperadas, como sismos y avenidas extraordinarias. Asimismo, la instrumentación proporciona una alerta para impedir fallas, ofrece el tiempo de evacuación y posibilita la implementación de las acciones correctivas.
7. Proporcionar información que sustente una protección o defensa legal. La instrumentación aporta las evidencias para una defensa legal sobre posibles daños ocasionados a estructuras adyacentes.
8. Efectuar monitoreo a largo plazo. La instrumentación permite monitorear el comportamiento de una presa durante toda su vida de servicio.

1.3 REGISTRO DE OBSERVACIONES

Las observaciones se deben consignar en un registro sistemático, racional y completo. A fin de que la información consignada en los registros sea útil, debe ser clara, accesible y confiable. Los requisitos mínimos que deben cumplir las observaciones de obra y del terreno son:

- Plano general e información geotécnica
- Dimensiones y datos numéricos
- Frecuencia de las observaciones
- Procesamiento de datos

Plano general e información geotécnica

Todo registro de observaciones debe contener un plano general que indique la posición de cada punto de observación; además, debe mostrar la posición de los puntos donde se efectuaron perforaciones, así como los perfiles simplificados de propiedades del suelo.

Dimensiones y datos numéricos

Los resultados de todas las observaciones deben consignarse en forma tabular en el documento o informe. El encabezado de cada columna de datos numéricos debe contener el significado de la cantidad representada por dichos números.

Frecuencia de las observaciones

La frecuencia de las observaciones debe adecuarse a las características del fenómeno que se quiere investigar.

Procesamiento de datos

La presentación de los datos obtenidos de observaciones en el terreno de la obra debe ser de forma tal que un ingeniero no familiarizado con el trabajo pueda entender con el mínimo esfuerzo los resultados esenciales.

1.4 EL MÉTODO OBSERVACIONAL

Peck (1969) describió los **principios del método observacional** en mecánica de suelos y estableció las bases para el entendimiento de sus requerimientos. Los pasos esenciales para su aplicación son:

- a. Efectuar una exploración suficiente para establecer la naturaleza general, el patrón y las propiedades del sitio.
- b. Evaluar las condiciones más probables que se pueden presentar en la obra, así como sus desviaciones más desfavorables.
- c. Establecer el diseño basado en una hipótesis de trabajo del comportamiento anticipado bajo las condiciones más probables.
- d. Seleccionar las cantidades que serán observadas durante la construcción y calcular los valores anticipados con base en la hipótesis de trabajo.
- e. Calcular los mismos valores bajo las condiciones más desfavorables.
- f. Seleccionar de manera anticipada las acciones a seguir o modificar el diseño para cada pronóstico.
- g. Medir las cantidades que serán observadas y evaluar las condiciones reales.
- h. Modificar el diseño para adaptarlo a las condiciones reales.

Peck (1969) explica que el método observacional tiene ventajas y limitaciones. Peck (1970, 1972) enfatiza la importancia de hacerse las preguntas fundamentales, esto debe asegurar que las observaciones son apropiadas y con significado. Asimismo, señala que para tomar en cuenta factores tales como el comportamiento no lineal, efectos tridimensionales y efectos dependientes del tiempo, es de gran utilidad el uso de herramientas numéricas, como el **método de elementos finitos** (*finite element method*, FEM). La retroalimentación y valoración de las observaciones debe ser oportuna para confirmar predicciones o proporcionar las advertencias sobre cualquier desvío de condiciones. El método observacional ofrece, además, un gran potencial para ahorro de tiempo y costo.

Capítulo 2

CONCEPTOS BÁSICOS

Este capítulo tiene como objetivo definir la terminología usada en el presente manual. Se consideró conveniente incluir la traducción en inglés de cada término (al citarse por primera vez) para facilitar al usuario la lectura y comprensión de la literatura especializada y de los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo.

Todos los sistemas de medición incluyen cinco elementos básicos:

- Detección y medición
- Acondicionamiento
- Indicación y registro
- Automatización
- Telecomunicación

El elemento **detección y medición** (*sensor*), capta la variable física a medir (e.g., presión, temperatura, fuerza, desplazamiento) y la transforma en una señal mecánica o eléctrica.

La fase intermedia o de **acondicionamiento** modifica la señal del transductor, lo cual origina una señal de salida conveniente. Muchos transductores proporcionan señales eléctricas de salida muy débiles, por lo que deben amplificarse antes que accione un indicador o registrador. En otras aplicaciones puede ser necesario

convertir una señal de corriente directa en otra de corriente alterna, o transformarla en pulsaciones para indicación digital.

El tercer elemento del sistema de medición consiste en la **indicación o registro**. Existen para ello varias opciones, las cuales dependen del tipo y de la precisión de la información requerida.

Automatización (*automation*). Es el uso de sistemas o elementos electromagnéticos y computarizados para el control de procesos, sin la intervención de operadores humanos.

Telecomunicación (*telecommunication*). La comunicación a distancia es una técnica que consiste en la transmisión de datos e interconexión de computadoras a nivel de enlace.

Los elementos básicos de un sistema de medición electrónico se muestran en la Figura 2.1.

2.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

A continuación se definen los términos más utilizados en el presente manual para facilitar su mejor comprensión y utilización.

2.1.1 Términos generales

Aparato (*device*). Instrumento o conjunto de instrumentos que sirve para determinado objetivo.

Datos (*data*). Todos los productos de un sistema de instrumentación y medición.

Factor (*factor*). Agente capaz de inducir o modificar un efecto físico, químico o biológico.

Fenómeno (*phenomenon*). Manifestación de actividad que se produce en la naturaleza.

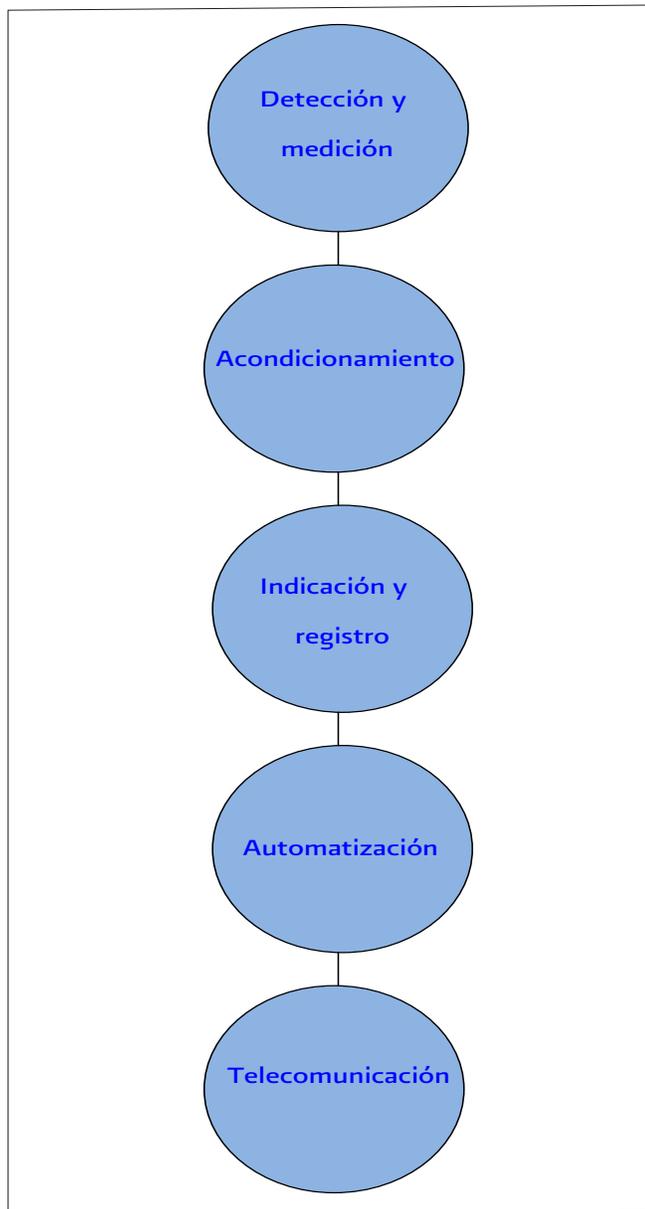


Figura 2.1 Esquema de un sistema moderno de instrumentación y monitoreo

Instrumento de medición (*measuring instrument*). Aparato diseñado para comparar unidades físicas mediante el proceso de medición. Como unidades de medida se usan estándares o patrones. De la medición resulta un número que es la relación entre el objeto de estudio y la unidad de referencia.

Parámetro (*parameter*). Variable o constante arbitraria que interviene en una expresión matemática.

Proceso (*process*). Secuencia temporalmente ordenada de acontecimientos, tal que cada miembro de la secuencia toma parte en la determinación del siguiente.

Señal (*signal*). Serie de ondas y pulsos eléctricos que representan información.

Ruido (*noise*). Perturbación en toda señal.

Valor (*value*). Determinación o medición cuantitativa particular.

Variable (*variable*). Símbolo que se utiliza para definir la variación de un fenómeno o simplemente una correspondencia funcional. Cualquier cantidad física que esté sujeta a cambio.

2.1.2 Términos relacionados con incertidumbre

Aproximación (*approximation*). Diferencia admisible entre un valor obtenido en una medición o cálculo y el valor exacto desconocido.

Error (*error*). Desviación respecto a un valor teórico y el valor real. Los errores surgen por varias causas a partir de las cuales se pueden distinguir distintos tipos de error: aleatorio, craso, numérico y sistemático.

Error aleatorio (*random error*). Acumulación de muchos efectos pequeños que sólo pueden analizarse estadísticamente.

Error craso (*crass error*). Es causado por la falta de cuidado, la fatiga y la inexperiencia. Se puede minimizar duplicando lecturas, comparando lecturas actuales con lecturas previas, y también con entrenamiento y capacitación de operadores.

Error numérico (*numeric error*). Diferencia aritmética entre el valor medido y el valor verdadero.

Error sistemático (*systematic error*). Es causado por calibración inadecuada, alteración de la calibración, por histéresis y no linealidad. Se puede minimizar mediante recalibración periódica, el uso de estándares, y con procedimientos de lectura consistentes.

Estabilidad (*stability*). Es la susceptibilidad de reproducción de las lecturas medidas de un instrumento bajo condiciones de uso definidas, repetidas en diferentes ocasiones separadas por intervalos, los cuales son largos en comparación con el tiempo de toma de una lectura.

Exactitud (*accuracy*). Grado en que la indicación del instrumento se aproxima al valor verdadero de la magnitud medida. Se expresa generalmente mostrando el error posible en porcentaje del valor indicado. La exactitud de un instrumento se representa como un porcentaje de la escala de lectura completa. Es costumbre indicar la exactitud como un número. Una exactitud de 1 mm significa que el valor medido está dentro de 1 mm del valor real; una exactitud de 1% significa que el valor medido está dentro de 1% del valor real.

Histéresis (*hysteresis*). Fenómeno por el cual el estado de un material depende de la historia previa.

Linealidad (*linearity*). Desviación de la curva de calibración con respecto a una recta. Una linealidad de 1% FS significa que el error máximo es de 1% de la escala completa.

Precisión (*precision*). Grado de finura de una medición. La precisión de un instrumento o de una observación es una medida de la capacidad de un instrumento para proporcionar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. La precisión no debe confundirse con la exactitud (Figura 2.2).

Rango (*range*). Amplitud de la variación de un fenómeno entre un límite menor y uno mayor claramente especificado.

Resolución (*resolution*). Lectura mínima que es capaz de realizar un sistema digital.

Sensibilidad (*sensitivity*). Cociente del incremento de la respuesta de un instrumento de medida entre el incremento correspondiente de la señal de entrada. Valor mínimo que es capaz de medir un instrumento. Por consiguiente, un instrumento muy sensible produce un gran movimiento del índice para un pequeño cambio en la cantidad medida.

2.1.3 Términos eléctricos

Capacitancia (*capacitance*). Valor de la impedancia en un circuito cuando sólo existe una capacidad. La propiedad de un sistema de conductores y aisladores

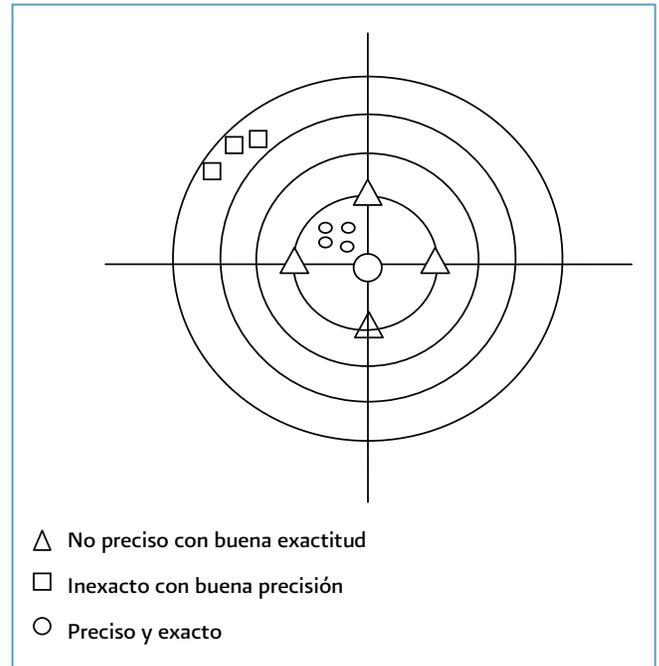


Figura 2.2 Representación de exactitud y precisión de un mismo resultado en mediciones diferentes

que determina la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar cuando existe una diferencia de potencial entre los conductores. Se mide en faradios (F).

Impedancia (*impedance*). Relación entre el valor máximo de una magnitud física sinusoidal aplicada a un sistema físico y el de una segunda magnitud que mide la respuesta de éste. Puede ser acústica, eléctrica, etc. Se mide en ohms (Ω).

Inductancia (*inductance*). Magnitud física que expresa la relación entre la corriente que recorre un circuito eléctrico y el flujo magnético producido. Se mide en hertz (Hz).

Potencia (*power*). La variación de la energía con respecto al tiempo. Se mide en watts (W).

Resistencia (*resistance*). Resistencia que ofrece un material o aparato al paso de la corriente eléctrica y que es igual a la relación entre la diferencia de potencial entre los extremos del elemento y la intensidad de la corriente que lo atraviesa. Se mide en ohms (Ω).

Voltaje (*voltage*). Medida de la diferencia de potencial con la que trabaja un aparato eléctrico. Se mide en volts (V).

2.1.4 Términos topográficos

Ángulo cenital (*zenit angle*). Ángulo formado por el eje vertical del teodolito a partir del cenit y hacia el objeto observado.

Ángulo vertical (*vertical angle*). Ángulo entre dos líneas rectas que se forma en un plano vertical generadas a partir del tránsito.

Baliza (*ranging rod*). Tubo de madera o de metal con punta de acero que se clava en el terreno, sirve para indicar la localización de los puntos o indicar dirección a las rectas.

Banco de nivel (BN) (*level bank*). Punto con elevación conocida respecto a un plano de referencia que generalmente es el nivel medio del mar; es el punto de llegada o de partida para una nivelación.

Banco de referencia. (BR) (*reference bank*). Es un monumento ubicado en las laderas, fuera de la influencia de la presa; en lugares estables y firmes. Se utiliza como puntos de control ya que a partir de él se realizan las mediciones hacia los testigos superficiales.

Campo de visión o campo visual (*visual field*). Área ocular del teodolito.

Cinta invar (*invar type*). Fabricada de una aleación de 64% de acero y 36% de níquel que presenta un coeficiente de dilatación muy bajo.

Colimación (*collimation*). Alineación de puntos a partir de dos puntos extremos de referencia.

Datum. Son puntos de referencia en la superficie terrestre asociados a un modelo elipsoidal de la Tierra y utilizados para generar sistemas de coordenadas geográficas que abarquen una gran extensión.

Datums horizontales. Se utilizan para el control de puntos sobre la superficie terrestre.

Datums verticales. Se utilizan para elevaciones o profundidades.

Elevación de la máscara. Menor elevación en grados, a partir del horizonte donde un receptor puede seguir al satélite, en áreas despejadas puede ser de 10°, la elevación estándar es de 15°.

Estación total (*total station*). Aparato electroóptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

Geodesia (*Geodesy*). Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la posición exacta de puntos en la superficie de la Tierra.

Geoide (*geoid*). Superficie equipotencial del campo gravitatorio de la Tierra que mejor se ajusta (en el sentido de mínimos cuadrados) al nivel medio global del mar.

Línea de colimación (*collimation line*). Línea imaginaria que cruza por la intersección de los hilos de la retícula y que debe coincidir con el eje óptico del equipo.

Red Geodésica (*geodesic network*). Conjunto de puntos ubicados en la superficie terrestre y que forman figuras geométricas, principalmente triangulares, que permiten relacionar las coordenadas geodésicas con las coordenadas cartesianas.

Red Geodésica Nacional (RGN). Compuesta por la Red Geodésica Horizontal, la Red Geodésica Vertical y la Red Geodésica Gravimétrica, distribuidas de forma homogénea en el territorio nacional.

Teodolito (*theodolite*). Instrumento de precisión, también se le conoce como **tránsito**, que mide ángulos horizontales, verticales y distancias. Consiste en un telescopio con un montaje que permite tanto el giro horizontal como vertical, lleva acoplado niveles tubulares, y posee una cruz filar para alinear de manera precisa un objeto.

Testigos superficiales (*surface benchmarks*). Son monumentos que se construyen sobre la cortina y los taludes de la presa, de esta forma son afectados por los movimientos tanto horizontales como verticales a que está sujeta la obra.

Triangulación topográfica (*triangulation surveying*). Método topográfico en donde las líneas del levantamiento forman figuras triangulares, de las cuales se miden sólo los ángulos, los lados se calculan trigonométricamente a partir de un lado conocido llamado base de la triangulación.

Trilateración topográfica (*trilateration surveying*). Método topográfico que consiste en medir las longitudes de los lados de un triángulo para determinar con éstos, de manera trigonométrica, los valores de los ángulos de los triángulos descritos. Es la operación inversa a la triangulación.

2.1.5 Instrumentos de medición

Celda de asentamiento (*settlement cell*). Instrumento que está diseñado para medir deformaciones verticales (asentamientos o expansiones) en un punto de interés al interior de un terraplén. Las lecturas se realizan desde una caseta, lo cual es particularmente útil donde el acceso es difícil. Además, su instalación no interfiere con el proceso de construcción.

Celda de presión total (*earth pressure cell*). Instrumento diseñado para la presión total ejercida en el interior de un terraplén o en un relleno, o la presión del suelo sobre una estructura.

Clinómetro (*tiltmeter*). Es un equipo mecánico o eléctrico diseñado 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.

Deformómetro (*probe extensometer*). Instrumento para medir la deformación entre varios puntos de referencia a lo largo de un eje, mediante una sonda (provista con diferentes tipos de transductores) que se desliza dentro de un tubo guía.

Extensómetro (*extensometer*). Instrumento para medir el cambio de distancia entre dos puntos, cuya separación inicial se conoce.

Inclinómetro (*inclinometer*). Es un instrumento muy versátil para medir desplazamientos tanto verticales como horizontales de una masa de suelo o roca, y también para monitorear la estabilidad de terraplenes y taludes. El inclinómetro mide el cambio de pendiente de un ademe guía colocado dentro de un sondeo o en un relleno, mediante el paso de una sonda guiada o fija en su interior.

Piezómetro abierto (*open standpipe piezometer*). Consiste en un tubo corto con ranuras o un cilindro de cerámica porosa, llamado bulbo piezométrico. A uno de sus extremos se le acoplan tubos rectos de menor diámetro hasta alcanzar la superficie.

Piezómetro eléctrico (*electric piezometer*). 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. La deflexión es proporcional a la presión aplicada y se mide por medio de diversos sensores o transductores eléctricos. Los sensores convierten

la presión de agua en una señal eléctrica que se transmite mediante un cable hasta el sitio de medición.

Piezómetro neumático (*pneumatic piezometer*). Se aplica para medir las variaciones de la presión de poro que se presentan en una masa de suelo; y particularmente es muy útil cuando se instala en suelos de baja permeabilidad, ya que tiene la ventaja de responder con pequeños volúmenes de agua desplazados en el interior de la celda piezométrica; por ello, se denomina de respuesta rápida.

2.2 TIPOS DE SENSORES O TRANSDUCTORES

Se describen a continuación los siguientes:

Micrómetro (*micrometer*). Indicador mecánico de carátula, consta de un vástago colocado en contacto con el elemento que se mueve, dicho movimiento se transmite a través de un engranaje de cremallera y piñón a una aguja indicadora. El vástago reacciona contra un resorte para mantenerlo en contacto con el elemento.

Transductor (*transducer*). Es un convertidor de energía. Transforma una señal en otra. Se usa para medir fuerza, presión, desplazamiento, etc. Existen transductores eléctricos de resistividad, capacitancia e inductancia.

Transductor de cuerda vibrante (*vibrating wire sensor*). Consta de un alambre de acero, protegido dentro de un tubo de acero inoxidable, fijo entre dos soportes y sometido a una tensión. Las fuerzas aplicadas a la estructura que se desea monitorear inducen movimientos relativos entre los soportes y, en consecuencia, cambian la tensión del alambre, lo cual modifica la frecuencia de vibración que es proporcional a la raíz cuadrada de la tensión (problema de la cuerda vibrante).

2.3 CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO

La realización de estas actividades garantiza el fundionamiento eficiente de los instrumentos de medición.

Calibración (*calibration*). Operación que se realiza en condiciones específicas para la determinación con exactitud de la relación entre las lecturas de determinado instrumento y los valores de la magnitud que interesa medir. Este procedimiento se efectúa en el laboratorio del fabricante o en un laboratorio certificado.

Verificación (*verification*). La verificación es la comprobación del funcionamiento óptimo del equipo; por tanto, efectuar la verificación del equipo es una actividad cotidiana que se debe realizar antes de tomar lecturas. En el sitio de la obra se utilizan los monumentos que están integrados a una línea base para la verificación del equipo en función de la medición de distancias y ángulos. Cuando proceda, se debe realizar la corrección del equipo de medición en campo o enviarlo al fabricante.

Mantenimiento (*maintenance*). El mantenimiento del equipo de medición es una actividad que debe incorporarse al trabajo diario, ya que con el uso y el paso del tiempo todo equipo o instrumento se puede deteriorar, y lo que al principio era confiable y funcional, puede llegar a no serlo. Para asegurar que el sistema de medición permanezca en condiciones óptimas de operación durante su vida de servicio, es necesario realizar un mantenimiento y verificación con regularidad y de manera sistemática.

El **mantenimiento preventivo**, como su nombre lo indica, evita con anticipación que ocurra un daño al equipo de medición. Los requisitos y procedimientos de mantenimiento del equipo forman parte del proyecto de instrumentación y monitoreo de una obra, y se basan en los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo.

La falta de mantenimiento regular y sistemático puede invalidar los datos obtenidos y llegarse a conclusiones erróneas. Cada instrumento de monitoreo debe llevar una bitácora de servicio en la que se anoten las operaciones de mantenimiento, verificación, reparación y reemplazo de componentes.

Capítulo 3

ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN

La construcción de toda obra de ingeniería civil produce un cambio en el campo de esfuerzos en el terreno, lo cual provoca una redistribución de esfuerzos y deformaciones. Por tanto, toda estructura que se desplanta en el terreno causa una interacción entre terreno y estructura.

El ingeniero en las etapas de análisis y diseño de una obra cuenta con dos aliados: su experiencia y el poderío de los métodos numéricos de análisis, la **predicción**. Sin embargo, las diferencias entre la teoría y la realidad son extremadamente complejas, sobre todo en la mecánica de suelos aplicada. El **diseño en ingeniería** se puede definir como la toma de decisiones de cara a la incertidumbre con grandes penalizaciones para el error.

Por tanto, se requiere otro aliado, aquel que confirme los supuestos y las decisiones, que compruebe que el comportamiento real de la obra esté en concordancia con las predicciones basadas en los criterios de diseño o que aporte los argumentos para introducir modificaciones o cambios importantes. Un aliado que imparcialmente confronte la predicción con la realidad, la **observación**.

La demanda de datos observacionales, cada vez más confiables y precisos, ha dado como resultado el desarrollo de nuevos y mejores instrumentos, así como

los procedimientos exigidos para el empleo de dichos instrumentos.

La **planeación de una observación** requiere la determinación previa de las condiciones en que puede surgir o presentarse el fenómeno de interés y de los procedimientos para observar y medir dicho fenómeno. El **diseño de la observación** requiere especificar los materiales, aparatos, instrumentos y dispositivos que se necesitan, el personal que intervendrá y en qué consistirá su participación concreta, así como las precauciones que deban tomarse para no correr riesgos que sea previsible evitar.

La diferencia entre una observación fructífera y un esfuerzo desperdiciado está en la confiabilidad del equipo de medición y en las habilidades y capacidades del personal que participa en el proceso.

En consecuencia, el propósito principal del diseño de un sistema de instrumentación y monitoreo es suministrar información confiable y oportuna sobre los movimientos, deformaciones y presiones que se desarrollan en una obra y compararlos con la predicción realizada en la etapa de diseño.

3.1 ORGANIZACIÓN PARA LA PLANEACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

La organización para la planeación de un sistema de instrumentación y monitoreo (IyM) consta de al menos tres partes: **el grupo de trabajo, la información requerida y las recomendaciones generales para el plan de trabajo.**

Se entiende por **sistema**, al conjunto de partes o elementos organizados y relacionados entre sí para lograr un objetivo específico.

3.1.1 El grupo de trabajo

La Figura 3.1 muestra la integración del grupo de trabajo. Cada participante tiene objetivos, habilidades e intereses muy específicos, pero que al interactuar da como resultado un grupo que tiene un objetivo común: desarrollar el sistema de instrumentación y monitoreo de una obra hidráulica en particular.

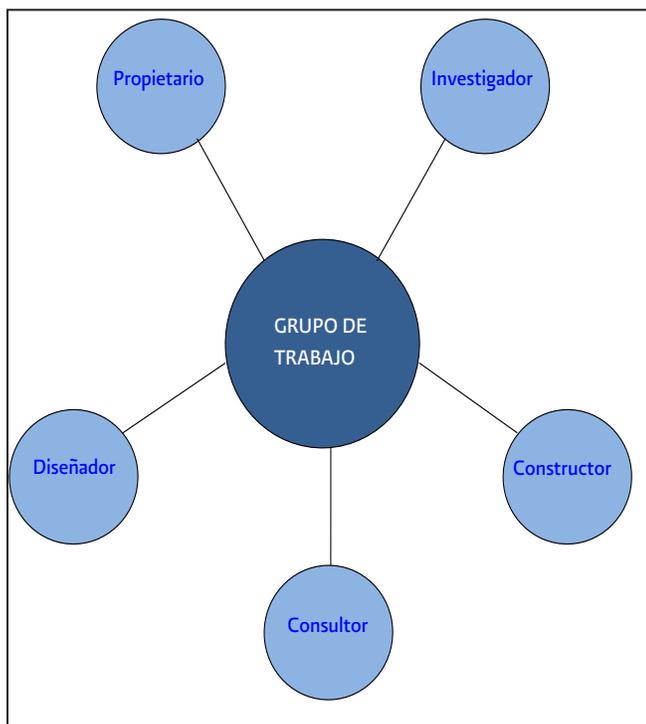


Figura 3.1 Conformación de un grupo de trabajo para la planeación del sistema de IyM

La fortaleza del grupo de trabajo (Figura 3.2) consiste en reunir: la experiencia, la capacidad de predicción y el juicio en ingeniería.

La **experiencia** representa todos los conocimientos adquiridos, debido al contacto prolongado con la realidad y a una práctica exitosa.

La **predicción** se refiere al uso de los procedimientos de análisis para estimar el comportamiento real de una obra o estructura. La predicción consiste en la respuesta de una estructura bajo un conjunto de cargas aplicadas y de las condiciones que razonablemente se esperan que ocurran en la práctica. Actualmente, una de las herramientas más poderosas y completas con que cuenta la geotecnia es el **método de los elementos finitos (FEM)**. Este método es capaz de resolver problemas complejos, con materiales no homogéneos, de comportamiento esfuerzo-deformación no lineales y bajo condiciones de frontera difíciles.

El **juicio en ingeniería** comprende un entero y cabal entendimiento de cómo se comporta una obra de ingeniería civil, el cual fundamenta y permite efectuar recomendaciones y tomar decisiones con conocimiento, experiencia, autoridad y precaución.

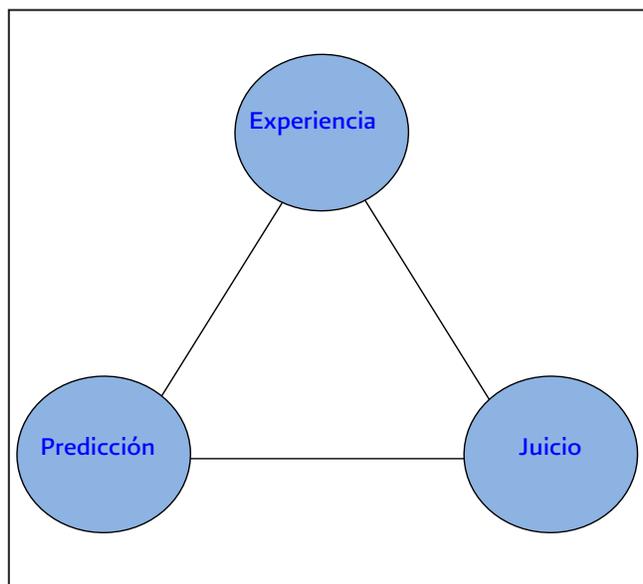


Figura 3.2 Fortaleza del grupo de trabajo

3.1.2 La información requerida

Con relación a la información requerida, ésta se puede agrupar en la siguiente forma:

- Información geológica
- Información geotécnica
- Información sísmica

La **información geológica** debe proporcionar los detalles de las condiciones geológicas existentes en la boquilla y en la cimentación. El estudio geológico define las condiciones litológicas de la boquilla, así como las condiciones de estabilidad de las laderas y algún posible accidente geológico, como puede ser una falla. La geometría de la boquilla implica que si es angosta, los efectos tridimensionales se acentúan y, por tanto, predominará la instrumentación interna. En cambio, si la boquilla es ancha, la distribución de esfuerzos es uniforme en toda la estructura. En este caso, la instrumentación también es uniforme, así como interna y externa.

La **información geotécnica** debe proporcionar los detalles de las condiciones geotécnicas existentes en la boquilla, en la cimentación y en las laderas que constituyen el vaso de almacenamiento, la información requerida se lista a continuación:

- Tipo de estructura
- Estabilidad de taludes
- Predicción de las deformaciones
- Predicción de los esfuerzos
- Predicción de las condiciones hidráulicas
- Programa de construcción
- Caracterización de las propiedades de los materiales

La **información sísmica** debe proporcionar los detalles de la sismicidad regional, así como las características del sismo de diseño.

3.1.3 Recomendaciones generales para el plan de trabajo

No existen reglas precisas para diseñar un sistema de instrumentación y monitoreo para una presa de tierra y enrocamiento, sino más bien recomendaciones generales que deben tomarse en cuenta, y que resultan apropiadas para toda obra:

1. Familiarizarse con el proyecto.
2. Reunir y asimilar la información disponible.
3. Identificar las zonas críticas del proyecto.
4. Seleccionar los parámetros que deben ser monitoreados.

5. Vincular cada instrumento con la necesidad de información requerida.
6. Estimar los valores máximos de los parámetros para seleccionar los rangos de los instrumentos.
7. Estimar los valores mínimos de los parámetros para seleccionar la precisión y sensibilidad de los instrumentos.
8. Comprobar que la instalación de un instrumento no ponga en riesgo la obra.

3.2 PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

Planear. Es proyectar un futuro deseado y los medios efectivos para lograrlo. La planeación implica tener uno o varios objetivos a realizar junto con los medios o las acciones requeridas para alcanzar exitosamente las metas propuestas. Es decir, **la planeación de un sistema de IyM** es una secuencia de actividades desde los objetivos hasta las metas. En la Figura 3.3 se muestra una secuencia de la planeación.

Objetivos. El objetivo principal es la medición de las variables de interés (e.g., presión de poro, presiones de tierra, movimientos internos y externos). Adicionalmente se tienen otros objetivos:

- Comprobar hipótesis de diseño
- Verificar los parámetros de diseño
- Examinar las técnicas de construcción
- Validar las predicciones
- Mejorar el estado del arte del diseño y construcción

Medios. Son los instrumentos de medición y monitoreo.

Requisitos. Consisten en la definición de rango, resolución, exactitud, precisión y estabilidad de los instrumentos.

Acciones. Conjunto de actividades para instalar, monitorear y mantener funcionando el equipo.

Metas. Son los resultados a lograr.

En general, planear un sistema de instrumentación y monitoreo implica:

- Definir las necesidades de efectuar mediciones
- Identificar los instrumentos que satisfacen las necesidades

- Fundamentar número y localización de instrumentos
- Estimar el costo de la instrumentación
- Planear la operación y mantenimiento del sistema

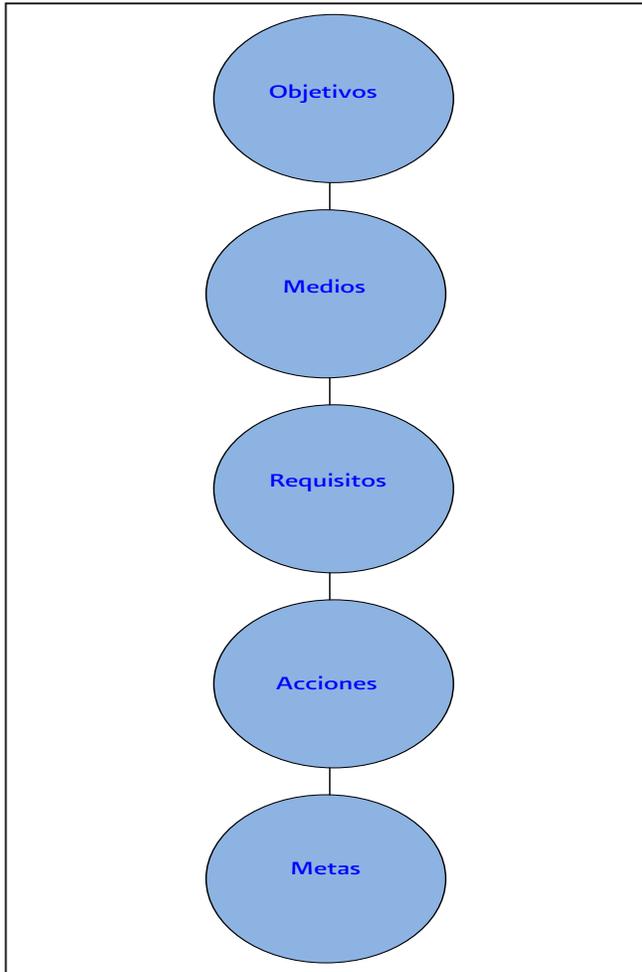


Figura 3.3 Esquema de planeación de un sistema de IyM

3.2.1 Identificación y satisfacción de las necesidades de la instrumentación

La **necesidad de instalar un instrumento** debe responder a un conjunto de preguntas:

- ¿Qué necesita medirse?
- ¿Por qué necesita medirse?
- ¿Cómo necesita medirse?
- ¿Dónde necesita medirse?

• ¿Con qué frecuencia necesita medirse?

La **identificación de las necesidades** del sistema de IyM se fundamenta en los resultados de la **predicción**, ya que ésta permite identificar zonas críticas, por ejemplo, zonas de concentración de esfuerzo o de grandes deformaciones que se requieren monitorear.

Por tanto, con base en la predicción, se define: tipo, número y localización de los instrumentos. La predicción también resulta de gran utilidad como apoyo para la interpretación de las mediciones.

La **selección del tipo de instrumentos y su localización**, en el interior de la cortina, se planea de acuerdo con el tipo y condiciones de la obra, y con los resultados de los análisis realizados. Una práctica usual consiste en colocar instrumentación:

1. En las zonas críticas de la cortina, la cimentación y los empotramientos.
2. En las zonas donde se esperen las mayores deformaciones, tanto verticales como horizontales,
3. Los planos que son representativos de la cortina: (a) plano vertical que pasa por la sección transversal máxima de la cortina, (b) planos verticales paralelos a la sección principal máxima, (c) plano vertical que pasa por el eje de la cortina, (d) planos verticales paralelos al eje de la cortina.
4. En las zonas donde haya una discontinuidad en la cimentación o en la boquilla.

Los piezómetros se localizan en el corazón impermeable, respaldo de aguas abajo, cimentación y en ambos empotramientos, con objeto de conocer la presión de poro en sitios seleccionados del corazón impermeable, así como el flujo del agua a través del mismo. El resto de los piezómetros, proporcionan datos sobre la distribución y niveles de agua en la cimentación y los empotramientos.

Las celdas de presión total se instalan en grupo junto con extensómetros y piezómetros, en un arreglo tal que permita obtener los componentes del tensor de esfuerzos y deformaciones, en sitios seleccionados.

Para **satisfacer las necesidades identificadas**, se recurre a la información contenida en este manual (Capítulos 4, 5 y 6) y a los manuales de los fabricantes, en donde se especifican las funciones y características de los instrumentos disponibles en el mercado.

3.2.2 Costo, operación y mantenimiento del sistema

El **costo de la instrumentación**, en general, representa un porcentaje pequeño del costo total de la obra, sin embargo, es necesario justificar la inversión.

La importancia de **planificar la operación y mantenimiento del sistema** es toral, ya que un sistema mal operado y con un deficiente mantenimiento puede anular el esfuerzo que realiza en grupo de trabajo, en todo lo discutido en los puntos anteriores. Conviene agregar sobre la importancia del programa de la capacitación del personal que tendrá a su cargo las actividades de operación del sistema de IyM.

3.3 INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

La instalación de la instrumentación, ya sea durante la construcción de una obra o en una estructura ya existente, no es un trabajo rutinario, por tanto, requiere de una atención muy detallada. La instrumentación mal instalada puede conducir tanto a datos erróneos o engañosos, como a situaciones que pongan en peligro la integridad de la obra. Los métodos de instalación dependen principalmente de los parámetros a monitorear, las condiciones del sitio y de los instrumentos seleccionados. El éxito de un sistema de instrumentación se sustenta en el contar con personal calificado, con experiencia y competencia.

Los procedimientos de instalación de la instrumentación se describen en los capítulos 4, 5 y 6. En este apartado se exponen las **directrices generales que se deben seguir para el caso de las presas de tierra y roca**.

Un aspecto crucial, antes de proceder a la instalación de un instrumento, consiste en revisar si las deformaciones esperadas no van a dañar los tubos, conductos y cables de la instrumentación.

3.3.1 Pruebas de preinstalación

Cuando los instrumentos se reciben en la obra, el personal de instrumentación debe desarrollar las pruebas de preinstalación para verificar su aceptación o rechazo. El *Manual del Departamento de la Armada de los Estado*

Unidos (1995) propone la siguiente lista.

- Examine los datos de calibración del fabricante
- Examine la lista de verificación del control de calidad del fabricante
- Verifique la longitud del cable
- Verifique los números que aparecen en las etiquetas del instrumento y del cable
- Verifique modelo, dimensiones y materiales
- Verifique que las lecturas del instrumento permanecen constantes cuando se flexiona la conexión entre cable y sonda
- Verifique la hermeticidad del equipo
- Verifique que todos los componentes se ajustan correctamente
- Verifique que las cantidades recibidas corresponden al pedido

Las pruebas de preinstalación deben documentarse con los siguientes datos:

- Nombre del proyecto
- Número y tipo de instrumento
- Lecturas iniciales
- Personal responsable
- Fecha y hora del ensayo de verificación

3.4 VERIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO

3.4.1 Verificación

La verificación es la comprobación del funcionamiento óptimo del equipo, por tanto, efectuar la verificación del equipo es una actividad cotidiana que se debe realizar antes de tomar lecturas.

La verificación no debe confundirse con la calibración. Por tanto, el diseño del sistema de IyM debe contener las especificaciones de verificación del equipo.

3.4.2 Mantenimiento

El mantenimiento del equipo de medición es una actividad que debe incorporarse al trabajo diario, ya que con el uso y el paso del tiempo todo equipo o instrumento se puede deteriorar, y lo que al principio

era confiable y funcional, puede llegar a no serlo. Para asegurar que el sistema de medición permanezca en condiciones óptimas de operación durante su vida de servicio, es necesario realizar un mantenimiento y verificación con regularidad y de manera sistemática.

El **mantenimiento preventivo**, como su nombre lo indica, evita con anticipación que ocurran daños al equipo de medición. Los requisitos y procedimientos de mantenimiento del equipo forman parte del proyecto de instrumentación y monitoreo de una obra, y se basan en los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo.

La falta de mantenimiento regular y sistemático puede invalidar los datos obtenidos y llegar a conclusiones erróneas. Cada instrumento de monitoreo debe llevar una bitácora de servicio en la que se anoten las operaciones de mantenimiento, verificación, reparación y reemplazo de componentes.

3.5 RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS

La **recolección de datos** se efectúa mediante un programa bien planeado. El programa es dependiente de los requerimientos específicos del proyecto. Los cuales dependen de las características del instrumento, las condiciones del sitio, las actividades de construcción o la ocurrencia de situaciones extraordinarias.

Los lineamientos generales para la recolección de datos son:

- Recolectar los datos por el mismo personal
- Efectuar las lecturas con el mismo equipo
- Tomar múltiples lecturas
- Existir comunicación constante entre el personal de recolección, procesamiento, verificación e interpretación de datos.

Respecto al **procesamiento de datos**, se debe precisar lo siguiente:

- Automatizar el procesamiento de datos para evitar errores
- Procesar los datos a la brevedad posible

Finalmente, la **presentación de los datos** debe ser en más de una forma gráfica y estar respaldados de manera tabular.

3.6 AUTOMATIZACIÓN

Un sistema de instrumentación y monitoreo moderno requiere la obtención de información en forma rápida y frecuente, incluso de instrumentos de difícil acceso. Con el acelerado desarrollo de la tecnología actual, los instrumentos de medición han mejorado considerablemente con respecto a la exactitud, confiabilidad y economía. Asimismo, los sistemas automáticos de captura y transmisión de datos a larga distancia, resultan altamente competitivos con respecto a los métodos tradicionales de lectura manual.

La automatización es apropiada particularmente en situaciones como las siguientes:

- El programa de mediciones es intensivo
- El sitio es remoto o de difícil acceso
- El costo de la mano de obra es elevado
- Situaciones de riesgo que requieran un monitoreo en tiempo real
- Requerimiento de alertas automáticas cuando ciertos niveles se exceden

3.6.1 Ventajas y limitaciones

Ventajas

- Reduce el error humano
- Incrementa la frecuencia de lecturas
- Datos en el momento que se requieran
- Alarmas que operan continuamente
- Diagnóstico remoto
- Compatibilidad

Limitaciones

- Produce grandes volúmenes de datos
- Mayor inversión en la instalación
- Posiblemente mayor costo de mantenimiento
- Requiere una fuente de energía permanente
- Requiere transductores electrónicos de larga duración
- Aumenta el vandalismo

3.6.2 Descripción del sistema

Un sistema automático está integrado por transductores electrónicos, equipo de computación y tecnología de telecomunicaciones.

Se tienen varias posibilidades de configuración de sistemas automáticos de IyM, la Figura 3.4 muestra esquemáticamente un sistema de inteligencia distribuida. Este sistema consta de lo siguiente:

1. Varias computadoras, que son unidades de monitoreo remoto (UMR). Estas computadoras actúan como registradores inteligentes de datos.
2. Una computadora central, que es el puesto central de monitoreo (PCM).
3. Una antena para telecomunicación con la oficina remota, vía satélite.

forma que las futuras predicciones sean más confiables. La aplicación exitosa de las técnicas se fundamenta en el modelo predictivo (FEM), los datos del monitoreo de la obras y las técnicas de análisis inverso.

3.7 SIMBOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN

La Tabla 3.1 muestra la simbología y nomenclatura que se utiliza en los planos de localización de los instrumentos para el monitoreo de obras hidráulicas. La Figura 3.5 ilustra un ejemplo de la simbología y nomenclatura para una presa típica.

3.8 TENDENCIAS EN LOS SISTEMAS DE IyM

Actualmente, la simulación numérica es muy común para analizar el comportamiento de las estructuras geotécnicas, como parte del proceso de diseño. Sin embargo, los métodos numéricos (FEM) contienen incertidumbres relacionadas con las propiedades del suelo, los detalles de la modelación y el procedimiento de construcción.

El desarrollo reciente de la tecnología de los sensores, la tecnología de la información y el análisis numérico permite un ciclo automatizado de medición y predicción que se basa en el comportamiento observado.

En este caso, las técnicas de análisis inverso ayudan a minimizar las diferencias entre predicción y observación. La meta de las técnicas de análisis inverso consiste en utilizar las mediciones de la obra en sus primeras etapas para calibrar objetivamente el modelo predictivo, de tal

PLANTA	PERFIL	CONCEPTO	NOMENCLATURA
		Banco de referencia para control horizontal	BRCH
		Banco de nivel	BN
		Testigo de cimentación	TC
		Testigo superficial para control de movimiento horizontal	TSMH
		Testigo superficial para control de movimiento vertical	TSMV
		Inclinómetro vertical	IV
		Inclinómetro vertical fijo	IVF
		Inclinómetro horizontal	IH
		Inclinómetro horizontal fijo	IHF
		Clinómetro portátil	CP
		Clinómetro de barra	CB
		Clinómetro sumergible	CS
		Extensómetro externo de juntas y grietas	EJG
		Extensómetro externo de convergencia	EC
		Extensómetro interno de placas	EIP
		Extensómetro interno de barras	EIB
		Deformómetro mecánico	DM
		Deformómetro con anillos magnéticos	DAM
		Deformómetro con placas y arañas magnéticas	DMA
		Piezómetro de Casagrande	PzC
		Piezómetro de cuerda vibrante	PzVW
		Piezómetro neumático	PzN
		Celdas de asentamiento	CA
		Celdas de presión neumática	CPT-N
		Celdas de presión de cuerda vibrante	CPT-VM
		Celdas de presión piezoeléctrica	CPT-PE
		Grupo de instrumentos	G1
		Caja de registro	CR
		Caseta para toma de lecturas	

Tabla 3.1 Simbología y nomenclatura de instrumentos

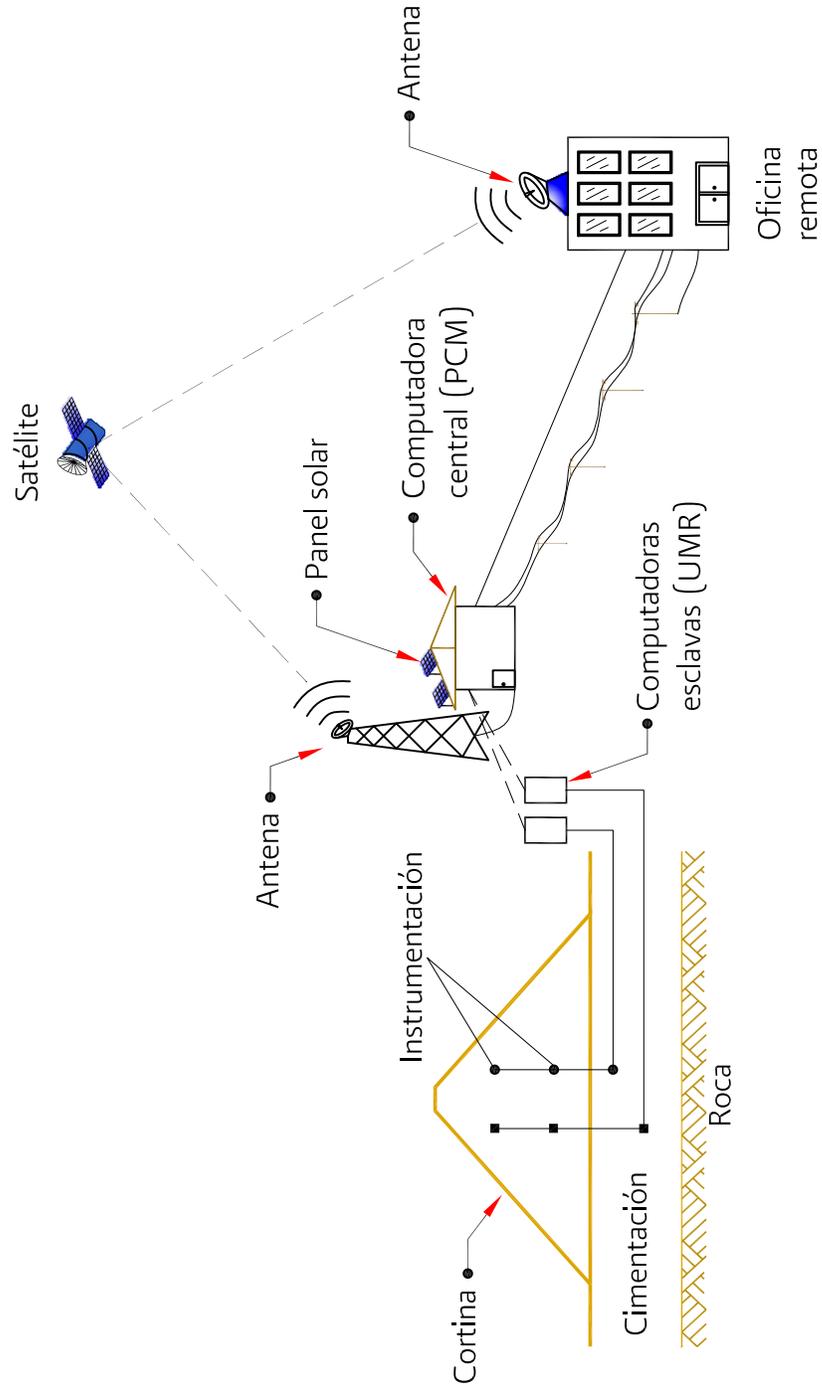


Figura 3.4 Sistema automatizado de captura de datos

Capítulo 4

MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES

Durante la construcción y vida de servicio de una cortina o terraplén, se presentan **movimientos superficiales**, que a su vez son la expresión de lo que ocurre en el interior de este tipo de estructuras. Los movimientos superficiales pueden ocurrir en cualquier dirección, por tanto, las mediciones correspondientes deben cuantificar la diversidad de tales movimientos. Para todas las mediciones es fundamental establecer una base de referencia fija, alejada de los efectos inducidos por la construcción de la obra misma. Los instrumentos que miden los movimientos del terreno, cimentaciones o estructuras térreas se pueden agrupar en tres categorías:

- Medición de movimientos superficiales
- Medición de movimientos internos
- Medición de movimientos sísmicos

Este capítulo se ocupa de la medición de los movimientos superficiales de una cortina o terraplén.

4.1 INSTRUMENTACIÓN A BASE DE TESTIGOS SUPERFICIALES

Con el avance de la tecnología, en la actualidad se cuenta con una gama de herramientas que hacen posible la medición y el cálculo de manera más rápida, eficiente y precisa de los movimientos superficiales de una obra hidráulica. Se puede mencionar la existencia de equipos más precisos y completos, como lo son las estaciones totales que permiten la obtención de ángulos y distancias reducidas al horizonte de manera más rápida, así como la determinación en tiempo real de las coordenadas de los puntos observados, los teodolitos electrónicos o los distanciómetros, por mencionar algunos.

Enlazado a ello, se encuentran los **sistemas de posicionamiento global por satélite** (GPS, por sus siglas en inglés) que permiten conocer de manera precisa la ubicación en coordenadas UTM (X, Y, Z) de los bancos de referencia (BR) a los cuales se encuentran enlazados los puntos observados, tanto los utilizados

para los trabajos geodésicos, como en los sistemas de información geográficos o los navegadores.

Para realizar la planeación de la ubicación de los testigos y BR relacionados con la presa, se utilizan las fotografías aéreas y las ortofotos, estas últimas combinan las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano.

En cuanto a gabinete, se cuenta con una variedad de programas que ayudan a procesar en menor tiempo los datos obtenidos y así conocer los movimientos que tiene la obra. De esta forma se puede mencionar a Civil Cad, Topo Cal, CICOPRE, AutoCad, entre otros.

Uno de los métodos de medición que más se utilizan para conocer los movimientos de una obra hidráulica, lo constituye la instrumentación superficial y es, probablemente, de los métodos más sencillos, económicos y confiables de que se dispone.

La **instrumentación superficial** consiste en utilizar los procedimientos topográficos para conocer los movimientos que se manifiestan en la superficie de la obra. Los valores obtenidos se comparan con puntos fijos (BR) localizados fuera de la influencia de la obra misma.

Para instalar los testigos superficiales, normalmente se hace una pequeña excavación empleando pico y pala; en algunos casos se utiliza cimbra y un colado de concreto simple; ocasionalmente se requiere de acero de refuerzo y de la colocación de algunas piezas metálicas. Para la toma de lecturas, se emplea un equipo topográfico de precisión.

El tipo de levantamiento que se realiza para obtener las lecturas de la instrumentación superficial es de precisión, el cual se encuentra relacionado directamente con el objetivo del trabajo, las especificaciones y condiciones del equipo y la experiencia del operador. En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran los tipos de levantamiento para control horizontal y vertical, así como sus precisiones.

El levantamiento que se realiza incluye cuatro tipos de mediciones:

- Medición de desplazamientos horizontales
- Medición de desplazamientos verticales
- Medición de distancia entre testigos
- Medición mediante triangulación para el apoyo del control topográfico de la obra

4.2

Tabla 4.1 Precisiones relativas para control horizontal

Tipo de control	Orden	Clase	Precisión relativa necesaria entre puntos adyacentes conectados directamente
Horizontal	Primero	N.A.	1 parte en 100 000
	Segundo	I	1 parte en 50 000
		II	1 parte en 20 000
	Tercero	I	1 parte en 10 000
		II	1 parte en 5 000

Fuente: Brinker y Wolf (1982); SIAPA (2007); DOF (1998)

N.A., No aplica

Tabla 4.2 Precisiones relativas para control vertical

Tipo de control	Orden	Clase	Precisión relativa necesaria entre bancos de nivel conectados directamente
Vertical	Primero	I	0.5 mm x \sqrt{K}
		II	0.7 mm x \sqrt{K}
	Segundo	I	1.0 mm x \sqrt{K}
		II	1.3 mm x \sqrt{K}
	Tercero	N.A.	2.0 mm x \sqrt{K}

Fuente: Brinker y Wolf (1982); SIAPA (2007); DOF (1998)

N. A., No aplica

K, distancia en kilómetros

4.1.1 Tipos de monumentos

Para conocer los movimientos que soporta una cortina o terraplén, durante y posteriormente a su construcción, es necesario instalar un grupo de monumentos que

sirven para realizar mediciones y así determinar tales movimientos. En la Figura 4.1 se muestra un esquema de la ubicación de dichos monumentos.

Los monumentos (*control stations*) se dividen en testigos superficiales y bancos de referencia.

Testigos superficiales

Son monumentos que se construyen sobre la cortina y los taludes de la presa, de esta forma son afectados por los movimientos tanto horizontales como verticales a que está sujeta la obra.

Hay dos tipos de testigos superficiales (*surface benchmark*): el testigo superficial para medir los movimientos horizontales (TSMH) y el testigo superficial para medir los movimientos verticales (TSMV).

Bancos de referencia

Son monumentos ubicados en las laderas, fuera de la influencia de la presa; en lugares estables y firmes. Se utilizan como puntos de control ya que a partir de ellos se realizan las mediciones hacia los testigos superficiales.

Se tiene dos tipos de bancos de referencia (*reference bank*): los que son para el control horizontal (BRCH) y los bancos de referencia para control vertical, llamados propiamente bancos de nivel (BN).

A partir del banco de referencia para control horizontal (BRCH) se efectúan las mediciones hacia los TSMH para conocer los movimientos horizontales, y a partir de los bancos de nivel (BN) se realizan las mediciones hacia los TSMV para conocer los movimientos verticales.

4.1.2 Localización y construcción de los monumentos

Testigos superficiales para el control de movimientos horizontales (TSMH)

Se distribuyen longitudinalmente a lo largo de la corona y los taludes, forman una o varias líneas en función de la altura de la cortina.

En la Figura 4.2 se muestra un esquema del TSMH; éste se construye de concreto simple con una resistencia $f'_c = 140 \text{ kg/cm}^2$, con las dimensiones que se muestran en la figura; su profundidad de desplante podrá variar de 40 cm a 60 cm. En la parte superior y al centro se aloja un aditamento llamado "perno de centraje forzoso",

como el que se ilustra en las Figuras 4.3 y 4.4. Además, se utiliza un tornillo de acero con cabeza de gota de 1.59 cm (5/8 in) de diámetro y longitud de 10.16 cm, que sirve de base al estadal para la nivelación. Se debe colocar un tapón de protección con cuerda, que sólo se puede remover con una llave especial, como las mostradas en las Figuras 4.5 y 4.6; un detalle de la tapa de protección se presenta en la Figura 4.7.

Con el fin de garantizar la verticalidad del perno de centraje forzoso, durante la instalación del testigo se utiliza un dispositivo, consistente en una base nivelante, similar a la de un nivel o un teodolito; va montada sobre una placa que se acopla al perno y que va unida al sistema nivelante (Figura 4.8). Previo al fraguado del concreto, se coloca el dispositivo con el perno, se nivela y se deja fraguar antes de retirar el mecanismo.

Si se contruye el testigo en enrocamiento es necesario remover los materiales en la forma en que se indica en la Figura 4.9. En algunos casos, es necesario modificar estos diseños, dependiendo principalmente de las condiciones del terreno, del tamaño de la estructura y de la visibilidad de los monumentos por medir, entre otros factores.

Durante el colado deberá producirse un vibrado para evitar oquedades. Antes del fraguado se instalan las piezas metálicas necesarias, consistentes en un perno de centraje forzoso, que deberá quedar perfectamente vertical y al centro del testigo.

Testigos superficiales para el control de movimientos verticales (TSMV)

Se localizan sobre la corona y los taludes, en líneas longitudinales o transversales, y tienen la función de medir los asentamientos o expansiones de la cortina. En la Figura 4.10 se muestra el TSMV, que se construye de concreto simple con una resistencia $f'_c = 140 \text{ kg/cm}^2$, con forma de pirámide truncada, con dimensiones de 50 cm x 50 cm en su base superior, de 40 cm x 40 cm la base inferior y de 70 cm de altura. En su parte central aloja una barra de acero de 1.9 cm (3/4 in) de diámetro y entre 30 cm y 35 cm de longitud; la barra sobresale del concreto entre 2 cm o 3 cm. Se recomienda colocar al TSMV una tapa de protección. En la Figura 4.11 se muestra otro tipo de protección para el testigo superficial.

Los TSMV localizados sobre la corona se deben desplantar sobre el material impermeable. Se debe remover el revestimiento de la corona y profundizar la excavación cuando menos 60 cm en el material impermeable. Se debe proteger de inmediato con alguna lechada o un firme de 5 cm de espesor de concreto pobre. La excavación se rellena posteriormente con concreto con agregado no mayor de 10.2 cm (4 in) de diámetro, al centro del TSMV se ahoga una varilla de acero con terminación en punta de bala.

Los TSMV ubicados sobre el talud se pueden instalar dentro del enrocamiento (Figura 4.12) o sobre el enrocamiento (Figura 4.13), se debe elegir el que más convenga dadas las condiciones de campo.

Otro tipo de testigos para el control vertical tienen la función de medir los asentamientos o expansiones mediante la variación de la posición del extremo superior libre de un tubo vertical y anclado en su extremo inferior; los que desplantan desde la cimentación se denominan **testigos de nivel profundo** (Figura 4.14) y los que desplantan a una profundidad menor de los 2 m son los **testigos de nivel somero** (Figura 4.15).

Banco de referencia para control horizontal (BRCH)

Se conoce también como **monumento de centraje forzoso**. Es una columna de 1.3 m de altura sobre el nivel del terreno natural con el fin de que, al colocar el teodolito o la estación total sobre él, quede el ocular a la altura de los ojos del operador. En la Figura 4.16 se muestran dos ejemplos de BRCH.

La Figura 4.17 muestra un esquema del BRCH, el cual consiste en una columna cuadrada de 40 cm x 40 cm con aristas achaflanadas, la base es una zapata cuadrada de 1.2 m x 1.2 m. Dependiendo de las características del terreno, se profundizará de 40 cm a 50 cm; en caso de roca, bastará con retirar la roca alterada. El armado, tanto de la zapata como de la columna, se muestra en la Figura 4.17.

En la parte superior al centro de la columna debe colocarse una pieza metálica para centraje forzoso que corresponda con el equipo que se utilizará. En la Figura 4.18 se muestran algunas bases y tapas para centraje forzoso.

Para garantizar la verticalidad del perno, durante la instalación del testigo puede utilizarse un dispositivo, consistente en una base nivelante, similar a la de un nivel

o un teodolito, montada sobre una placa que se acopla al perno y que está unida al sistema nivelante (Figura 4.8). Previamente al fraguado del concreto, se coloca el dispositivo con el perno, se nivela y se deja fraguar antes de retirar el mecanismo. Estos monumentos se enlazan a la Red Geodésica Horizontal.

Banco de nivel (banco de referencia para control vertical, BN)

Este monumento presenta los siguientes tipos:

- Banco de nivel de la Red Primaria
- Banco de nivel de la Red Secundaria

Banco de nivel de la Red Primaria. Se enlaza a la Red Geodésica Vertical; se localiza alejado y fuera de la influencia de la obra y su número depende de las necesidades del proyecto de instrumentación. La Figura 4.19 muestra los detalles de este tipo de monumento. Se construye de concreto armado con una varilla de 1.91 cm (3/4 in) de diámetro y de 30 cm de longitud, al centro de éste va hincada una varilla con punta de bala que deberá sobresalir de 2 cm a 3 cm respecto del nivel del concreto. Cada monumento se debe identificar claramente con sus coordenadas (X, Y) y la elevación (Z) correspondiente.

Banco de nivel de la Red Secundaria. Se enlaza a la Red Primaria, es menos robusto, con forma de pirámide truncada de dimensiones de 50 cm x 50 cm en su base mayor, 40 cm x 40 cm en su base menor y 70 cm de altura, similar al testigo superficial que se muestra en la Figura 4.10. Se construye de concreto simple con un $f'_c = 140 \text{ kg/cm}^2$, en la parte central se aloja una varilla corrugada de 1.91 cm (3/4 in) de diámetro y de 30 cm de longitud. La varilla deberá sobresalir del nivel del concreto de 2 cm a 3 cm y terminar en punta de bala. De acuerdo con las condiciones del sitio, se debe excavar hasta 60 cm de profundidad o menos donde se encuentre roca sana.

4.2 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA OBTENER LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES

4.2.1 Equipo

El equipo requerido para la realización de este trabajo es el siguiente:

- Teodolito (theodolite)
- Estación total (total station)
- Estadales invar (telescopic leveling staff)
- Bastones (poles)
- Prismas (prism poles/reflectors)

Teodolito

Instrumento diseñado para medir ángulos horizontales y verticales, además de distancias. Los teodolitos se pueden dividir en función de la posición del ocular en concéntricos (los más usuales) y excéntricos; y en función del movimiento general lento, en repetidores o reiteradores.

Actualmente, los teodolitos se fabrican de nonio, micrómetro óptico y electrónicos. En la Figura 4.20 se muestran las partes de un teodolito estadimétrico.

Los teodolitos deben satisfacer dos grupos de condiciones:

1. Condiciones previas (las realiza la fábrica):
 - Coincidencia entre los ejes general y particular
 - Perpendicularidad de los ejes principal y secundario respecto a los limbos azimutal y cenital
 - Invariabilidad del eje de colimación al enfocar a diferentes distancias
 - Los limbos deben estar perfectamente divididos
 - Colocación correcta de los índices
2. Condiciones de ajuste o corrección (las realiza el topógrafo):
 - Verticalidad del eje principal del equipo
 - Perpendicularidad entre el eje de colimación y el secundario

- Perpendicularidad entre los ejes principal y secundario
- El eclímetro debe estar corregido

Cuando el equipo cumple con estas condiciones, se encuentra en buen estado para realizar el trabajo, de lo contrario se tendrá que calibrar en la fábrica o en un laboratorio certificado.

Estación total

La estación total es una combinación entre un distanciómetro, un microprocesador y un teodolito electrónico. Con ella se pueden realizar las mediciones electrónicas de distancias, transferir los datos a un procesador interno o externo, además tiene la capacidad de realizar múltiples tareas de medición, guardar datos y realizar cálculos en tiempo real. En la Figura 4.21, se muestran los componentes básicos de una estación total, los cuales se pueden dividir en tres grupos:

1. Mecánicos: limbo, ejes y tornillos, nivel y base nivelante
2. Ópticos: anteojo y plomada óptica
3. Electrónicos: distanciómetro, lectores de limbos, software y memoria

La estación total debe satisfacer lo siguiente:

- Comprobación y ajuste del nivel tubular
- Comprobación y ajuste del nivel esférico
- Comprobación y ajuste del error del índice del sensor de inclinación
- Perpendicularidad del retículo con el eje horizontal
- Posiciones de la línea del retículo horizontal y vertical
- Comprobación y ajuste del sistema de bloqueo automático (autolock) (seguimiento del prisma)
- Comprobación de la plomada óptica
- Determinación de la constante aditiva de distancias
- Comprobación de fluidez y medida de distancia
- Comprobación del puntero láser
- Correcciones de refracción y curvatura
- Corrección de la diferencia en altura
- Corrección de la distancia horizontal: altura del equipo y altura de la señal
- Corrección atmosférica

Cuando el equipo cumple con las condiciones indicadas, se aprueba para realizar el trabajo, de lo contrario se tendrá que calibrar en fábrica o en un laboratorio certificado.

Estadales

Consisten en un conjunto de reglas de varios tamaños que sirven para medir distancias con los hilos estadimétricos del equipo y para realizar las nivelaciones trigonométricas o geométricas. Se fabrican de diversos materiales como aluminio, fibra de vidrio, madera, poliuretano e invar. La graduación de la escala puede ser de 0.5 cm, de 1 cm o con código de barras.

Los estadales que se recomiendan para los trabajos de monitoreo son los de invar.

Bastones

Son tubos telescópicos de diferentes longitudes, que en el extremo inferior terminan en punta y en el otro tienen un adaptador para colocar el prisma con el cual se realizan las mediciones. Se pintan de dos colores cada 25 cm o 50 cm (Figura 4.22).

Las partes que conforman el bastón son: puntas, roscas, nivel y rosca de portaprismas, las cuales deben estar en buen estado.

Prismas

Conjunto de espejos dispuestos de tal forma que permiten que el haz del láser incida en él y se refleje la señal hacia el equipo, ya sea el teodolito o la estación total, de esta forma se conoce la distancia entre dos puntos. En la Figura 4.23 se muestran algunos modelos de prismas y adaptadores para éstos mismos.

4.2.2 Mantenimiento y verificación

Mantenimiento

El mantenimiento del equipo de medición es una actividad que debe incorporarse al trabajo diario, ya que con el uso y el paso del tiempo todo equipo o instrumento se puede deteriorar, y lo que al principio era confiable y funcional, puede llegar a no serlo. Para asegurar que el sistema de medición permanezca en condiciones óptimas de operación durante su vida de servicio, es necesario realizar un mantenimiento y verificación con regularidad y de manera sistemática.

El mantenimiento preventivo, como su nombre lo indica, evita con anticipación que ocurra un daño al equipo de medición. Los requisitos y procedimientos de mantenimiento del equipo forman parte del proyecto de instrumentación y monitoreo de una obra, y se basan en los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo. La falta de mantenimiento regular y sistemático puede invalidar los datos obtenidos y llegar a conclusiones erróneas. Cada instrumento de monitoreo debe llevar una bitácora de servicio en la que se anoten las operaciones de mantenimiento, verificación, reparación y reemplazo de componentes.

Verificación

La verificación es la comprobación del funcionamiento óptimo del equipo, por tanto, efectuar la verificación del equipo es una actividad cotidiana que se debe realizar antes de tomar lecturas. En el sitio de la obra se utilizan los monumentos que están integrados a una línea base para la verificación del equipo en función de la medición de distancias y ángulos. Cuando proceda, se debe realizar la corrección del equipo de medición en campo o enviarlo al fabricante. A continuación, se listan las operaciones que se deben efectuar a los equipos de medición.

Teodolito:

- Verificación de los ejes vertical y horizontal
- Comprobación y ajuste de la plomada óptica o láser
- Engrase de los elementos mecánicos
- Ajuste de los niveles circulares y tóricos
- Limpieza general del instrumento y de la maleta de transporte
- Certificado de calibración

Estación total:

- Verificación de los ejes vertical y horizontal
- Comprobación y ajuste del distanciómetro infrarrojo o láser
- Comprobación y ajuste de la plomada óptica o láser
- Ajuste de los niveles circulares y tóricos
- Engrase de elementos mecánicos
- Limpieza general del instrumento y maleta
- Certificado de calibración

4.2.3 Toma de lecturas

Para la toma de lecturas se utiliza el banco de referencia para control horizontal (BRCH), los testigos superficiales para movimientos horizontales (TSMH), así como el prisma y el adaptador para tornillo de centraje forzoso.

El prisma utilizado para las mediciones se monta con un adaptador al tornillo de centraje forzoso de los testigos superficiales. El prisma debe ser el adecuado para las características del equipo de medición que se use. En la Figura 4.23 se muestran algunos tipos de prismas y de adaptadores.

Con la ayuda de una estación total, se miden y obtienen de manera precisa las coordenadas (X, Y, Z) de los monumentos de referencia para el control horizontal, ya que estas coordenadas servirán de base para la medición de los movimientos horizontales de la presa. También se puede utilizar equipo GPS geodésico. La toma de lecturas de los TSMH se realiza conforme al siguiente procedimiento.

El equipo seleccionado se coloca en un BRCH. Se centra y se nivela, posteriormente se hace puntería sobre el monumento que sirve de mira de referencia que se encuentra en la otra ladera, haciendo coincidir el hilo vertical del lente con el prisma o diana ubicada en el monumento de referencia, fijando el movimiento horizontal del limbo de la estación total. Desde ese monumento y hasta terminar las observaciones, se van tomando las lecturas correspondientes para cada testigo (TSMH). Para ello, se coloca el prisma reflector en el perno de centraje forzoso y se realizan las mediciones correspondientes, tomando varias lecturas en cada testigo, para posteriormente trabajar en gabinete con los promedios de las lecturas. Los datos obtenidos son ángulos y distancias, ya sea inclinadas o reducidas al horizonte (distancias horizontales), o también pueden ser coordenadas (X, Y, Z) correspondientes a cada testigo superficial.

4.2.4 Cálculo

Para conocer la magnitud y dirección de los desplazamientos horizontales tanto en la corona como 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, así como los rumbos de las visuales a cada testigo y el desplazamiento respectivo. Todo esto referido a la línea base utilizada.

Es importante señalar que se trabaja con promedios de las lecturas observadas, así se trate de coordenadas (X, Y, Z), ángulos o distancias.

Para todo lo anterior, se explican a continuación los diversos cálculos que se deben realizar.

Cálculo con las coordenadas obtenidas

A partir de las observaciones realizadas, se obtiene el valor promedio de las coordenadas que se registra en el formato que se muestra en la Tabla 4.3 (véase anexo A), en el apartado correspondiente a los desplazamientos horizontales.

El desplazamiento observado se calculará con la siguiente fórmula:

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

donde:

D = Distancia entre dos puntos

X_1 = Valor de la coordenada X del punto 1

Y_1 = Valor de la coordenada Y del punto 1

X_2 = Valor de la coordenada X del punto 2

Y_2 = Valor de la coordenada Y del punto 2

Cálculo de distancias

Si se obtuvieron distancias en lugar de coordenadas, éstas deben ser las distancias horizontales (distancias reducidas al horizonte); de lo contrario, deben calcularse utilizando las distancias inclinadas y los ángulos cenitales o los ángulos verticales (Figura 4.24); para ello, se usan las funciones trigonométricas pertinentes de acuerdo con las presentadas en la Figura 4.25.

Cálculo de los ángulos

A partir de las distancias horizontales, se calculan los ángulos del triángulo oblicuángulo formado por la línea base y el testigo observado, como se aprecia en la Figura 4.26; para ello, se utiliza alguna de las fórmulas

que se presentan en la Figura 4.27, de acuerdo con los datos que se tienen y de las incógnitas que se quieren resolver.

Cálculo de los rumbos correspondientes

En el sitio se obtiene el rumbo o el azimut de la línea base y de cada una de las visuales que se observa, se debe anotar la lectura. En la Figura 4.26, el rumbo de la línea AB es el ángulo que se forma entre la línea norte-sur y la línea AB, que para este ejemplo es de NE 83°.

En caso de que sólo se tenga el valor del rumbo o azimut de la línea base, se debe calcular el rumbo de las otras visuales para después calcular las coordenadas de los testigos observados.

El **rumbo** de una línea es la orientación de esa línea respecto a un meridiano de referencia, generalmente se toma la línea norte-sur, el valor del rumbo está dado por el valor angular (medido de manera horizontal) que forma dicha línea y el meridiano de referencia (norte-sur). El rumbo se mide del norte hacia el este u oeste y del sur hacia el este u oeste, es decir, la orientación del rumbo puede ser NE, NW, SE y SW, el máximo valor angular de un rumbo es de 90° y se conoce como rumbo franco (Figura 4.28).

El **azimut** es el ángulo horizontal medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir del meridiano de referencia, que generalmente es el norte, el valor angular del azimut está comprendido entre 0 a 360°.

Si sólo se obtuvieron los ángulos, se deberá determinar el rumbo de cada una de las visuales a cada testigo superficial medido y para ello se usa el rumbo de la línea base, a la cual se le suma el valor angular que forma la línea base con el testigo observado y con la cruz de orientación y la teoría de los ángulos se determina la orientación.

El cálculo del rumbo de una línea se muestra en la Figura 4.29. Para el triángulo formado por los puntos (A,TS-C3,B), se toman las lecturas:

$$A = 55^{\circ} 17' 55.62''$$

$$B = 39^{\circ} 35' 46.87''$$

$$TS-C3 = 85^{\circ} 06' 17.52''$$

Rumbo de la línea A,TS-C3. A partir del azimut de la línea base AB = 83°, se observa que se encuentra en el primer cuadrante y, por tanto, coincide con el valor y la orientación del rumbo de la línea que es NE 83°.

El ángulo que forman la línea base AB y la línea A,TS-C3 es de 55° 17' 55.62"; para conocer el rumbo de la línea A,TS-C3, se le resta al rumbo de la línea base AB el ángulo formado por la línea base AB y la línea A,TS-C3, que da un valor de 27° 42' 4.32" y queda en el cuadrante NE, por tanto, el rumbo de la línea A,TS-C3 es igual a NE 27° 42' 4.32", tal como se muestra en la Figura 4.29.

Rumbo de la línea TS-C3,B. El rumbo de la línea TS-C3,B es SW 27° 42' 4.32" (que es el inverso del rumbo que se determinó anteriormente).

El ángulo que forman las líneas A,TS-C3 y TS-C3,B es de 85° 06' 17.52"; ahora a 85° 06' 17.52" se le resta 27° 42' 4.32" y el valor resultante es 57° 24' 13.2" y queda en el cuadrante II; por tanto, el rumbo de la línea TS-C3,B es SE 57° 24' 13.2" (Figura 4.29).

Las distancias y los rumbos se anotan en el registro mostrado en la Tabla 4.4 y se procede a calcular las coordenadas de los testigos observados.

Posteriormente, esas coordenadas calculadas se registran en el formato presentado en la Tabla 4.4 (véase anexo A), de esta manera se calculan los desplazamientos y su dirección.

4.2.5 Presentación de resultados

Movimientos de los testigos a lo largo de la corona

La localización de los testigos se dibuja a una escala conveniente sobre el eje horizontal; en el eje vertical, se elige otra escala que resulte adecuada para el rango de medición que se espera obtener. Es útil adicionar una pequeña planta con la localización de la línea o líneas de testigos, así como la tabla que identifica las fechas de cada lectura, relacionadas con un número progresivo que se asigna a cada curva o gráfica (Figura 4.30).

En esta serie de gráficas se puede comparar el movimiento de cada una de ellas contra el anterior, tomando como guía el número progresivo de identificación correspondiente a cada fecha, consignado en una tabla adjunta.

Movimiento de los testigos con el nivel del embalse y el tiempo

En este tipo de gráfica, el tiempo se representa en el eje horizontal y la escala de las deformaciones en el

vertical, ya sean movimientos hacia aguas arriba o aguas abajo; en la parte superior, se presenta el embalse para correlacionarlo con los movimientos (Figura 4.31).

La experiencia adquirida con los trabajos en presas de tierra demuestra que los mayores desplazamientos se observan durante el primer llenado; de ahí la importancia de una instalación oportuna. Los movimientos son generalmente hacia aguas abajo y la mayor deformación se presenta en el centro de la corona; posteriormente, con el vaciado de la presa, se presenta una recuperación de los testigos con movimiento hacia aguas arriba, sin llegar en la mayoría de los casos a su posición original; después los desplazamientos continúan hacia aguas abajo con los llenados siguientes, repitiéndose el fenómeno pero con menores magnitudes.

La magnitud de los desplazamientos depende de diversos factores, tales como: altura de la presa, características de los materiales utilizados en la construcción, condiciones de carga (fundamentalmente hidráulica) y condiciones geotécnicas de la boquilla.

4.3 MÉTODO TOPOGRÁFICO PARA OBTENER DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

4.3.1 Equipo

El equipo requerido para aplicar el método topográfico es el siguiente:

- Nivel
- Estadales invar

Nivel

También llamado **nivel óptico** o **equialtímetro**, diseñado para medir desniveles entre puntos que se encuentran a diferentes alturas; también se utiliza para pasar cotas de puntos conocidos hacia puntos desconocidos.

Algunos tipos de niveles son los siguientes: de mano, fijo, basculante, automático, láser y electrónico. Actualmente, los de mayor demanda son los automáticos y los electrónicos, ya que éstos son de los más precisos

que existen en el mercado.

Es importante considerar, entre las características de los niveles, el número de aumentos de la lente. En las Figuras 4.32 y 4.33 se muestran, respectivamente, las partes de un nivel automático y algunos modelos de nivel.

4.3.2 Mantenimiento y verificación del equipo

Todo lo descrito en el apartado 4.2.2, mantenimiento y verificación, se aplica a los niveles topográficos.

A continuación, se listan las operaciones que se deben realizar a los niveles.

Nivel óptico/digital (*optical/digital level*):

- Verificación del eje horizontal y ajuste de piezas
- Limpieza general del instrumento y de la maleta de transporte
- Ajustes del nivel circular
- Verificación del compensador

Nivel láser (*laser level*):

- Verificación de los ejes horizontal y vertical
- Comprobación de elementos electrónicos
- Limpieza general del instrumento y de la maleta

El laboratorio certificado después de realizar la rectificación de los equipos, deberá entregar el certificado de calibración.

4.3.3 Toma de lecturas

Para la determinación de los movimientos verticales que se presentan en una obra hidráulica, es necesario tener un punto de referencia, en este caso un BN de la Red Primaria enlazado a un banco de nivel de la Red Geodésica Nacional con nivelación de precisión. Dichos bancos se ubican en las laderas de la obra y alejados de la influencia de ésta misma en lugares firmes y estables (Figura 4.1). El número de los BN depende de las condiciones de campo. La obtención de las coordenadas (X, Y) de los bancos de nivel se puede efectuar con equipos GPS geodésicos.

Los bancos de nivel de la Red Secundaria se establecen en los sitios convenientes para nivelar a partir de éstos los TSMV.

Los testigos superficiales para movimiento vertical (TSMV) se ubican en la corona y en los taludes de la obra, ya sea en líneas longitudinales o transversales, como se muestra en la Figura 4.1. El número de TSMV instalados depende de las condiciones de campo y de las dimensiones de la obra.

Una vez nivelados los bancos de nivel de la Red Secundaria, se procede a nivelar a partir de ellos los TSMV 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 TSMV.

Posteriormente a la instalación y a la primera nivelación, se efectúan nivelaciones periódicas. La periodicidad de las nivelaciones se podrá ajustar para realizarlas con mayor o menor frecuencia de acuerdo con la velocidad de los desplazamientos obtenidos.

El tipo de nivelación que se realiza puede ser tanto geométrica o trigonométrica, ya que con ambas se obtiene la precisión requerida.

En la nivelación geométrica o nivelación diferencial no es necesario recurrir a la corrección por curvatura de la Tierra, ya que las distancias entre los testigos son relativamente cortas; se realiza con un nivel y estadales de preferencia invar. En este tipo de trabajo se obtiene 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 los 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 (Figura 4.34).

En la nivelación trigonométrica, se usan ángulos verticales para conocer la diferencia de nivel entre dos puntos; con un teodolito o una estación total se miden distancias inclinadas y ángulos verticales, se utilizan también estadales invar. 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 (bastón con prisma) y se miden el ángulo vertical y la distancia inclinada que existe entre ambos puntos, por medio de operaciones

trigonométricas se conoce el valor de nivel del punto de interés (Figura 4.35).

Una vez definido el tipo de nivelación por realizar, las lecturas obtenidas se anotan en la forma que se presenta en la Tabla 4.5 (véase anexo A), y para calcular la magnitud de los movimientos verticales se efectúa la siguiente operación:

Desplazamiento vertical = Elevación actual - 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. La Tabla 4.5 muestra un ejemplo del cálculo respectivo.

4.3.4 Presentación de resultados

Una forma de presentar los resultados es elaborar una gráfica con la separación entre testigos en el eje horizontal, y los movimientos verticales en el eje vertical (Figura 4.36).

Otra forma de presentación consiste en dibujar una gráfica con los movimientos verticales de los testigos en el eje vertical con el tiempo, representado en el eje horizontal (Figura 4.37). También se presenta esta gráfica en papel semilogarítmico, con los asentamientos en la escala natural y el tiempo en la escala logarítmica. Esta gráfica por su similitud con las curvas de los ensayos de consolidación es muy aceptada, ya que es el mismo fenómeno sólo que a escala natural (Figura 4.38).

4.4 UBICACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS BANCOS DE CONTROL

Como ya se mencionó las mediciones realizadas de las deformaciones de una obra hidráulica, se efectúan a partir de los bancos de control, es decir, los bancos de control son el marco de referencia para la determinación de los movimientos de la obra en general, de la ubicación y control de movimientos de los brocales de los instrumentos, así como de la ubicación y movimiento de los testigos superficiales.

Para tal efecto, los bancos de control también deben medirse con cierta periodicidad y con menor frecuencia que los testigos superficiales.

Es conveniente que al menos tres de los BRCH y tres BN de la Red Primaria se enlacen a la Red Geodésica Nacional, los BRCH se enlazan a la Red Geodésica Horizontal y los BN a la Red Geodésica Vertical. Dicho enlace se realiza con métodos geodésicos que son muy semejantes a los descritos a continuación, con la salvedad de que en los geodésicos se debe considerar la curvatura de la Tierra y tomar como sistema de referencia el ITRF08 época 2010 de acuerdo con la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional (DOF, 2010).

4.4.1 Equipo

El equipo utilizado en la medición de los bancos de control es el siguiente:

- Teodolito
- Estación total
- Estadales invar
- Bastones
- Nivel
- GPS
- Prismas

En el apartado 4.2.1 se describen los teodolitos, las estaciones totales, los prismas y los estadales invar, y los niveles en el 4.3.1, mientras que en el apartado 4.2.2 se explica el mantenimiento de dichos equipos. Por esta razón, sólo se aborda más adelante el GPS (*Global Positioning Systems*) en el apartado 4.5.1.

4.4.2 Ubicación de los bancos de control

Los vértices utilizados para el control de una obra hidráulica son los bancos de referencia, tanto horizontales (BRCH) como verticales (los que corresponden a la Red Primaria). Para su ubicación se parte de un trabajo preliminar, ya sea en planos topográficos, fotografías aéreas u ortofotos (fotomapas) que cubran la zona de interés; en éstos se pueden observar todos los accidentes del terreno y elegir los sitios altos para la ubicación de los BRCH y de los BN para tener buena visibilidad hacia la obra y además que se encuentren fuera de la influencia de la construcción.

Si no se cuenta con la información anterior, se debe realizar un levantamiento preliminar utilizando brújula para determinar los ángulos y rumbos aproximados, binoculares para comprobar la visibilidad entre puntos elegidos para la ubicación de los vértices con ayuda de banderas. Los puntos también se pueden ubicar con un navegador (GPS) que nos da su posición en coordenadas, ya sea UTM o geográficas. El equipo tiene un margen de error importante (± 3 m a 5 m), dependiendo del modelo, de la presencia de nubosidad y de la cobertura de la vegetación en los lugares donde se encuentren ubicados los puntos, lo anterior se acepta para un levantamiento preliminar.

Posterior a este levantamiento preliminar, se hace el replanteamiento de los vértices en campo. Este trabajo se realiza con el equipo apropiado, ya sea teodolito o estación total, prismas y estadales; el trabajo consiste en ubicar en campo, con base en lo establecido en el levantamiento preliminar, los sitios donde se colocarán los BRCH y los BN. En la Figura 4.1 se observa la ubicación de los BRCH y de los BN en las laderas adyacentes a la presa.

Respecto a las características que deben tener los bancos de referencia, descritas en los apartados 4.1.1 y 4.1.2, éstas se pueden modificar de acuerdo con las condiciones de campo en cuanto a sus dimensiones. Si las condiciones de visibilidad no son buenas, es necesario construir los monumentos más altos, como el que se muestra en la Figura 4.39. El monumento se construye de concreto reforzado con aristas achaflanadas y ocho varillas de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ in), con estribos de alambre de 0.6 cm ($\frac{1}{4}$ in) a cada 20 cm utilizando una mezcla de concreto dosificado para lograr una resistencia de $f'_c = 200$ kg/cm², además del aditamento de centraje forzoso.

4.4.3 Medición de los bancos de control

Para realizar las mediciones entre los bancos de control se puede elegir entre la triangulación, la trilateración o la poligonación. Las operaciones realizadas son operaciones trigonométricas que permiten conocer los ángulos y las distancia entre los puntos para después calcular sus coordenadas (X, Y, Z) y así tener definida la ubicación del BRCH o el BN.

Triangulación (*triangulation*)

Es un método de intersección donde las medidas obtenidas son los valores angulares entre los vértices de interés y una sola medida de longitud llamada base de triangulación. En la Figura 4.1 se observa que la línea AB es la base de la triangulación. Dentro de los métodos para la triangulación se tienen la cadena de triángulos, la cadena de polígonos con vértice central (radiaciones) y la red de cuadriláteros, por mencionar algunos.

Trilateración (*trilateration*)

Es un método con el cual se miden las distancias entre todos los vértices que forman la red, ya sea con distanciómetro, estación total o teodolito; se realizan observaciones repetidas para asegurar una buena precisión.

Poligonación (*traverse lines*)

También llamado **itinerario**, es un procedimiento geométrico que consiste en una sucesión de líneas encadenadas, denominadas lados de la poligonal, unidas por un punto, vértice de la poligonal, y que a su vez forman un ángulo horizontal.

Este procedimiento consiste en medir la longitud de los lados de la poligonal, así como los ángulos formados entre ellos, mediante cálculo (semejante al mencionado en el apartado 4.2.4), se conoce la ubicación de los vértices de la poligonal, en coordenadas (X, Y, Z).

Las poligonales pueden ser **cerradas**, si las coordenadas del primer vértice son iguales a las coordenadas del último vértice, es decir, si se llega al final al mismo vértice donde se inició la poligonal; es **abierta** si el primer vértice no es el vértice final, es decir, se parte de un punto y se llega a un punto diferente.

Dentro de la poligonal abierta existen dos tipos (Figura 4.40):

- **Abierta sin control**, cuando se desconocen las coordenadas de los vértices inicial y final
- **Abierta con control**, cuando se conocen las coordenadas de los vértices inicial y final

El procedimiento para la toma de lecturas es el siguiente:

1. Elección del método para la toma de lecturas
2. Instalación, centrado y nivelación del equipo en el

vértice de partida

3. Visualización con el equipo del siguiente vértice, con el que se definirá la línea base para la triangulación o trilateración, o el siguiente vértice en el caso de la poligonación
4. Obtención de la distancia, del ángulo de interés o de ambos, según sea el método utilizado
5. Registro de los datos, ya sea en libreta de campo o en memoria del equipo
6. Operaciones de gabinete para los cálculos

Los cálculos que se realizan son semejantes a los mencionados en el apartado 4.2.4.

4.4.3.1 Nivelación de los BN de la Red Primaria

Una vez ubicados los BN en coordenadas (X, Y), se realiza la nivelación con base en el siguiente procedimiento:

1. Elección del tipo de nivelación (geométrica o trigonométrica)
2. Instalación, centrado y nivelación del equipo (nivel)
3. Instalación de estadal o prisma en el BN1
4. Visualización del BN1 que es el banco de partida (lectura atrás)
5. Instalación del prisma o estadal en el BN2 (o puntos intermedios)
6. Visualización del punto siguiente (BN2 o puntos intermedios), a esto se llama "lectura adelante", en la Figura 4.1 sería del BN1 al BN2
7. Cálculo de la cota (nivel) del BN2 (Figura 4.41 y Tabla 4.6 (véase anexo A))

De esta forma, se conocen las cotas de los BN de la Red Primaria, que se pasan a su vez a los BN de la Red Secundaria y a los TSMV para obtener los movimientos verticales.

4.5 UTILIZACIÓN DE LA GEODESIA

Los monumentos empleados para el control de la obra deben estar enlazados a los puntos de la Red Geodésica Nacional; para ello, es suficiente que cuando menos un BRCH se enlace a la Red Geodésica Horizontal al

igual que un BN de la Red Primaria se enlace a la Red Geodésica Vertical. Debido a las distancias a las que se encuentran los puntos, se deben ejecutar trabajos geodésicos, dichas distancias rebasan los 20 km (Medina Peralta, 1986).

A la geodesia como tal, en la actualidad, le compete la medición y representación de la Tierra, que incluye su campo de gravedad en un espacio tridimensional variante con el tiempo, todo esto por medio de los levantamientos geodésicos que incluyen el levantamiento horizontal y vertical.

Dentro del levantamiento horizontal, donde el sistema de referencia es el elipsoide, se consideran los métodos de triangulación, trilateración y poligonación.

Actualmente, se cuenta con las técnicas celestes y satelitales que hacen uso, entre otros, de los sistemas geodésicos satelitales como el Sistema Global de Posicionamiento estadounidense (GPS), el sistema ruso

GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova*) y el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), también llamado GALILEO, creado por la Unión Europea y que pretende ser de uso exclusivamente civil. En la Figura 4.42 se presentan las órbitas de los sistemas GPS y GLONASS, y en la Tabla 4.7 sus características; el sistema GALILEO no se muestra porque aún se encuentra en fase de prueba.

El levantamiento vertical, donde el sistema de referencia es el geoide, incluye los métodos de nivelación geométrica, trigonométrica, barométrica y satelital.

El sistema GPS, al igual que el GLONASS, consta de tres componentes que son **el espacial**, que se refiere al número de satélites que forman la constelación, **el de control**, que son las estaciones de rastreo ubicadas en la Tierra y **los usuarios**, que integra a los receptores GPS

Tabla 4.7 Características de los sistemas GPS y Glonass

	Glonass	GPS
Administrado por	Ministerio de Defensa	Departamento de Defensa
	Federación Rusa	de los Estados Unidos
	Portadora L1: 1602.56 - 1615.5 Mhz	Portadora L1: 1575.42 Mhz
	Portadora L2: 1246.43 - 1256.5 Mhz	Portadora L2: 1227.60 Mhz
Señales de navegación	SP (Precisión estándar) 1.023 Mhz	C/A L1 0.511 Mhz
	HP (Alta precisión) 10.23 Mhz	P (L1 , L2) 5.110 Mhz
Constelación	24 satélites	24 satélites
	21 satélites activos	21 satélites activos
	3 satélites de reserva	3 satélites de reserva
	8 satélites por órbita	4 satélites por órbita
	3 planos orbitales a 120°	6 planos orbitales a 55°
Altura de órbita	19 100 km	20 180 km
Radio orbital	25 510 km	26 560
Inclinación orbital	64.8°	55°
Periodo orbital	11 horas, 15 minutos	11 horas, 58 minutos
Referencia temporal	UTC (SU)	UTC (USNO)
Coordenadas	SGS 85	WGS84

Fuente: <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo4/glonass.htm>

que registran la señal emitida por los satélites para el cálculo de las posiciones.

4.5.1 Receptores GPS

Los receptores se pueden clasificar en:

- **Receptores de navegación** (navegadores o receptores de posicionamiento), últimamente muy difundidos para uso recreativo y vehicular.
- **Receptores de monofrecuencia** que reciben únicamente la señal L1 (1.5 MHz) y obtienen con ello precisiones submétricas en distancias entre 5 km y 10 km. Trabajan sólo en modo diferencial.
- **Receptores de posicionamiento de doble frecuencia** que reciben señal L1 y L2 (1.2 MHz), lo cual permite tener precisiones subcentimétricas en distancias de hasta 10 km. En ambas señales se encuentran, además, dos códigos: uno es el C/A (código de adquisición imprecisa) que posee una longitud de onda de 293.1 m y se encuentra modulado sobre la L1, y el otro es el código P (código de precisión) con longitud de onda de 29.31 m, modulado sobre la L1 y L2 (INEGI, 2011).

4.5.2 Levantamiento con GPS

El uso del GPS no se recomienda en zonas urbanas, ya que éstas son una fuente importante de interferencias ocasionadas por cables de alta tensión y transformadores, superficies reflejantes (espejos de agua, estructuras metálicas, techos metálicos, etc.) que ocasionan efectos de multitrayectoria en la propagación de las ondas.

Sin embargo, para utilizar los equipos GPS en condiciones óptimas, se han diseñado herramientas para realizar correcciones a la señal emitida por los satélites y recibida en los receptores GPS, es decir, la modelación, la comparación de la velocidad relativa de dos señales diferentes (llamada doble frecuencia), los sistemas de rechazo de los receptores GPS para minimizar la señal fantasma debida al rebote, las correcciones a la efémerides de los satélites y la creación de técnicas avanzadas para el procesamiento de señales.

Para la realización de los levantamientos con GPS se recomienda lo siguiente:

1. Verifique el equipo para asegurarse que se encuentra funcionando correctamente (certificados de calibración).
2. Instale el equipo, cuidando el centrado a plomo de la antena, la orientación de la antena (norte geográfico) y la altura de la antena para conocer la horizontalidad del plano de ésta misma.
3. Asegure la configuración correcta de satélites; en la medida que los satélites se acercan entre sí se deteriora su precisión durante la observación, dicha precisión se define por el GDOP (*geometric dilution of precision*), que es un número adimensional para identificar el efecto producido por la geometría satelital en la precisión de las medidas, el cual debe ser siempre inferior a 6.

4.5.2.1 Métodos utilizados para los levantamientos con GPS

Método absoluto. Utiliza sólo un receptor que después de rastrear al menos tres satélites dará la posición del observador, es rápido y sencillo, pero tiene muchas fuentes de error y, por tanto, es impreciso, es utilizado por los navegadores.

Método diferencial. Se utilizan dos equipos de forma simultánea, uno se ubica en un punto con coordenadas conocidas (estación de referencia) y el otro se va desplazando en los puntos desconocidos (estación remota).

Método diferencial post-proceso. Los equipos tanto de base como remoto obtienen información durante cierto tiempo, para posteriormente pasar los datos del equipo a la computadora y procesarlos para obtener las coordenadas de los puntos de interés.

Método estático. Los receptores se quedan fijos sobre las estaciones y durante 1 o 2 horas reciben señal en cada punto; a mayor distancia entre estaciones, mayor tiempo de observación.

Método estático rápido. Los receptores se quedan fijos en las estaciones y obtienen información durante 5 o

10 min para distancias de 10 km para equipos de doble frecuencia; en el caso de los de una frecuencia, el tiempo de observación es de 30 min.

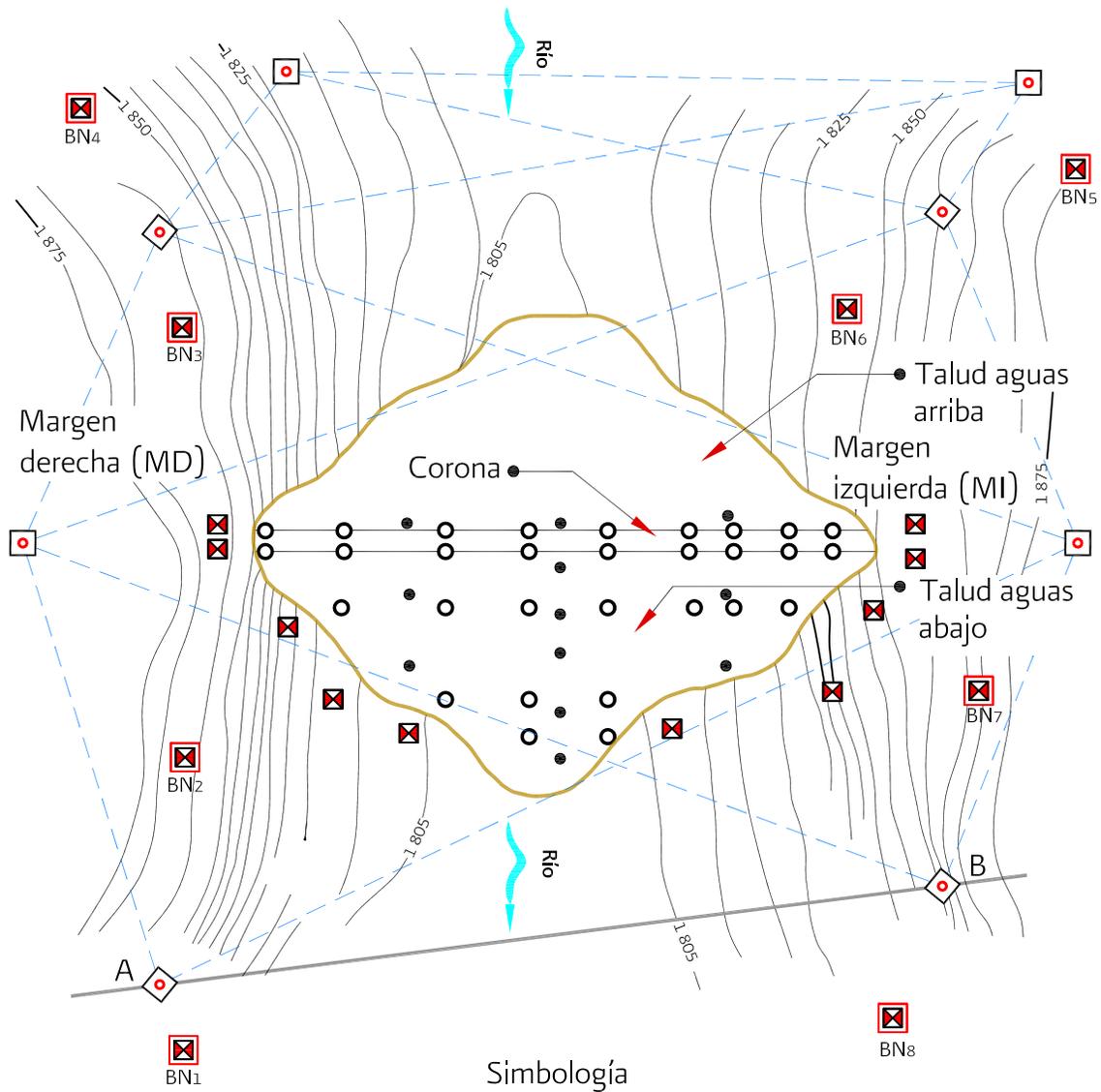
Método cinemático. Éste es recomendado para líneas o áreas, el equipo remoto (móvil) se desplaza por la zona de trabajo y obtiene información de manera continua.

4.5.3 Red Geodésica Nacional

La Red Geodésica Nacional se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y está conformada por tres vertientes: la Red Geodésica Horizontal, subdividida en Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), que recibe señal de manera continua. Las estaciones se pueden utilizar en los levantamientos como las estaciones fijas. La Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP), que tiene el inventario de los puntos (vértices) ubicados en toda la República Mexicana; la Red Geodésica Vertical y la Red Geodésica Gravimétrica.

El marco de referencia utilizado (*datum*) es el ITRF08, época 2010.0.

En la Figura 4.43 se muestra la instalación de las antenas satelitales para la Red Geodésica Horizontal de INEGI.



- Simbología**
- Radiaciones
 - Línea base A,B
 - X Banco de nivel- BN# 1 (Red primaria)
 - X Banco de nivel (Red secundaria)
 - Banco de referencia para control horizontal (BRCH)
 - Testigo superficial para movimiento vertical (TSMV)
 - Testigo superficial para movimiento horizontal (TSMH)

Figura 4.1 Ubicación de monumentos para control topográfico

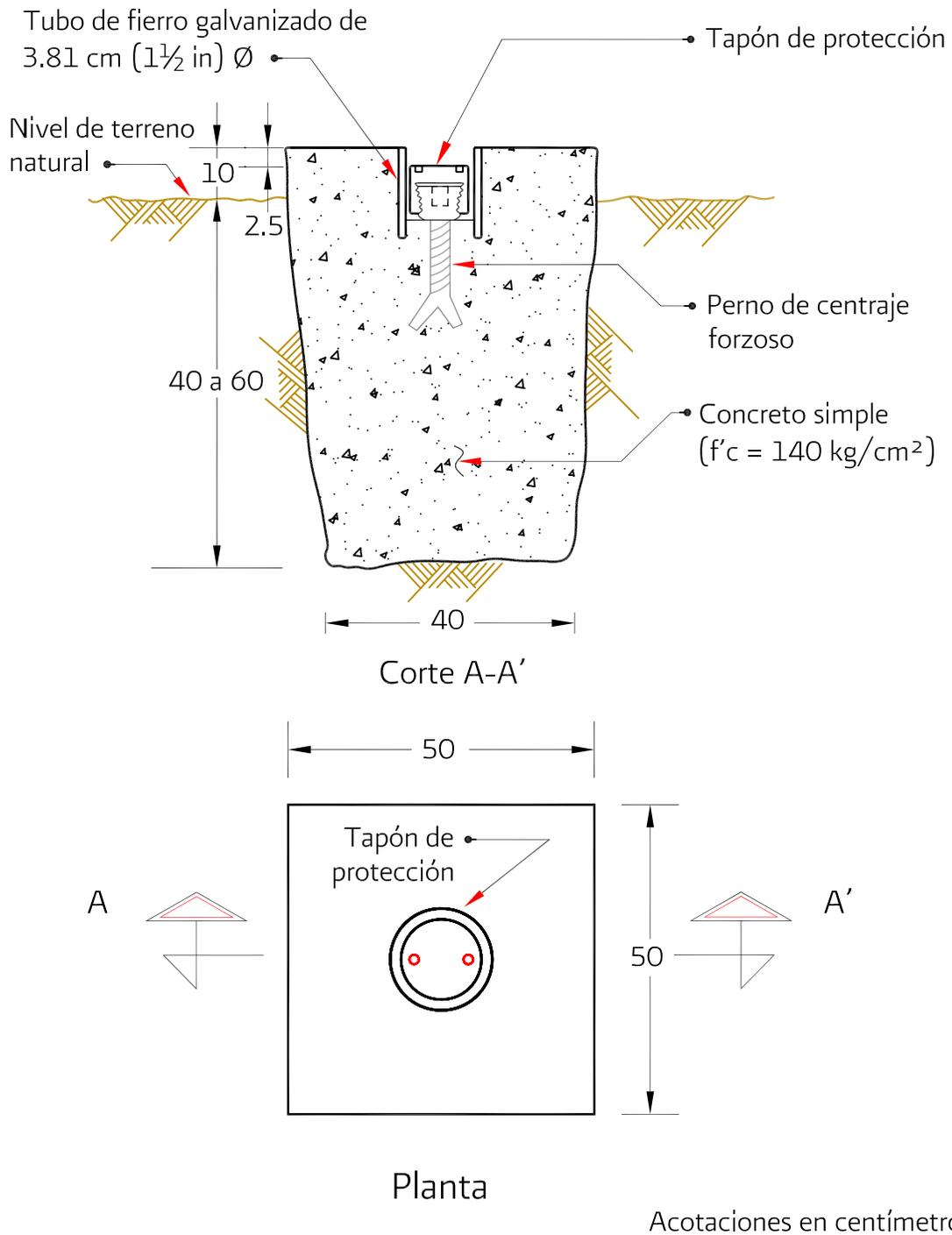


Figura 4.2 Testigo superficial para control del movimiento horizontal (TSMH)

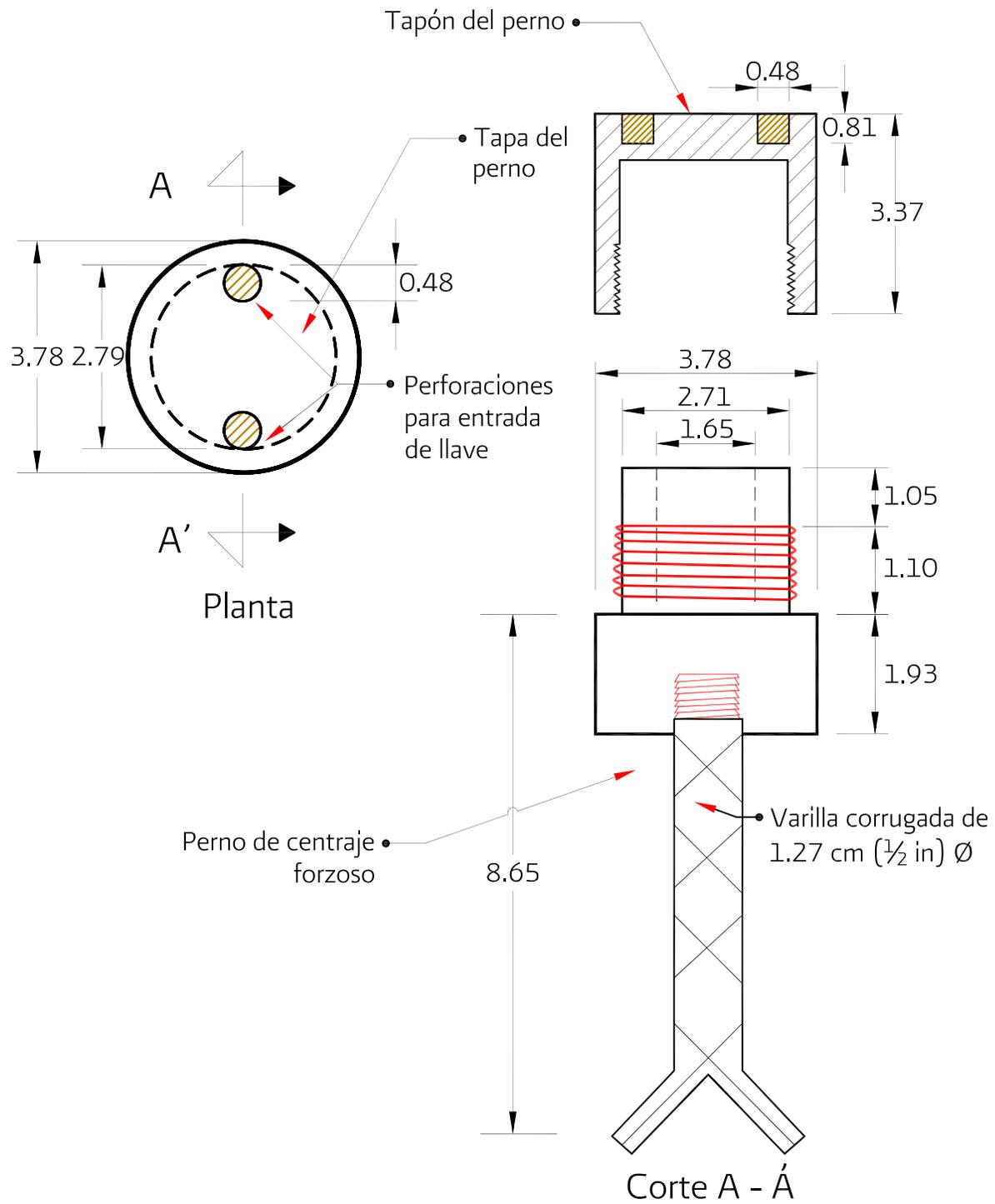


Figura 4.3 Perno de centrado forzoso

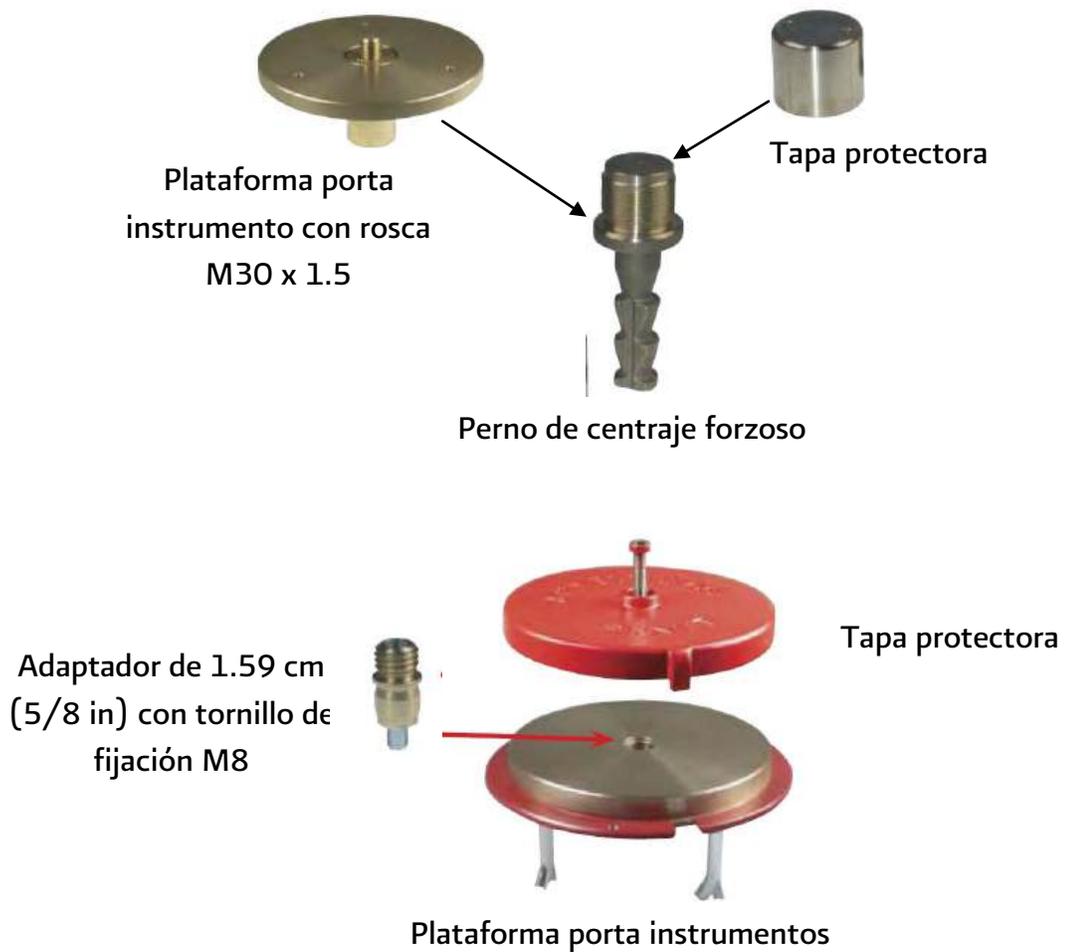
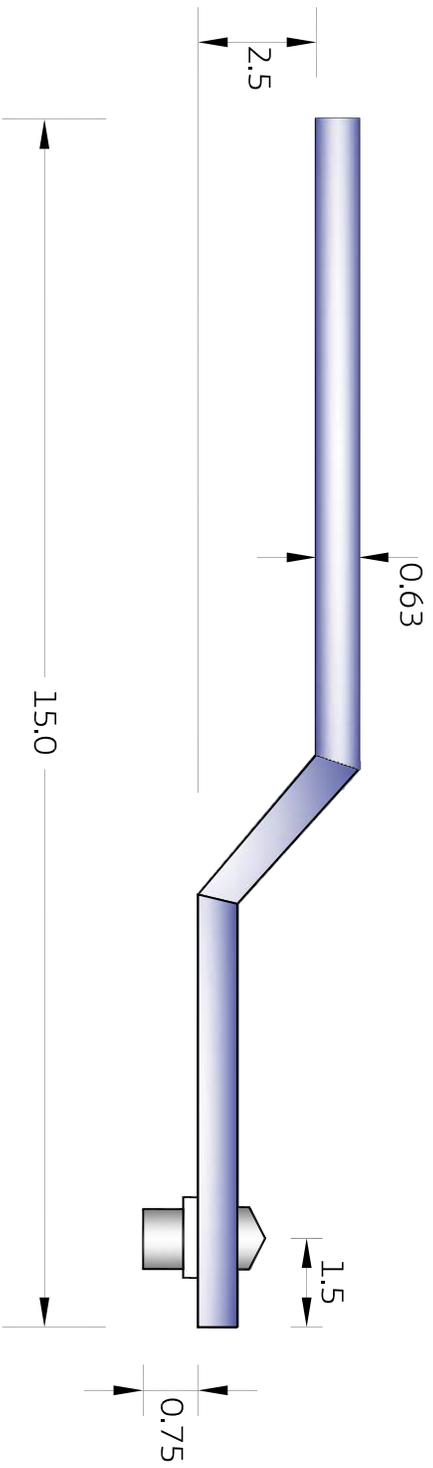


Figura 4.4. Perno de centrado forzoso y plataforma porta instrumento con tapa (cortesía de Geoconcept)



Acotaciones en centímetros

Figura 4.5 Llave para tapón de perno de centraje forzado (1)

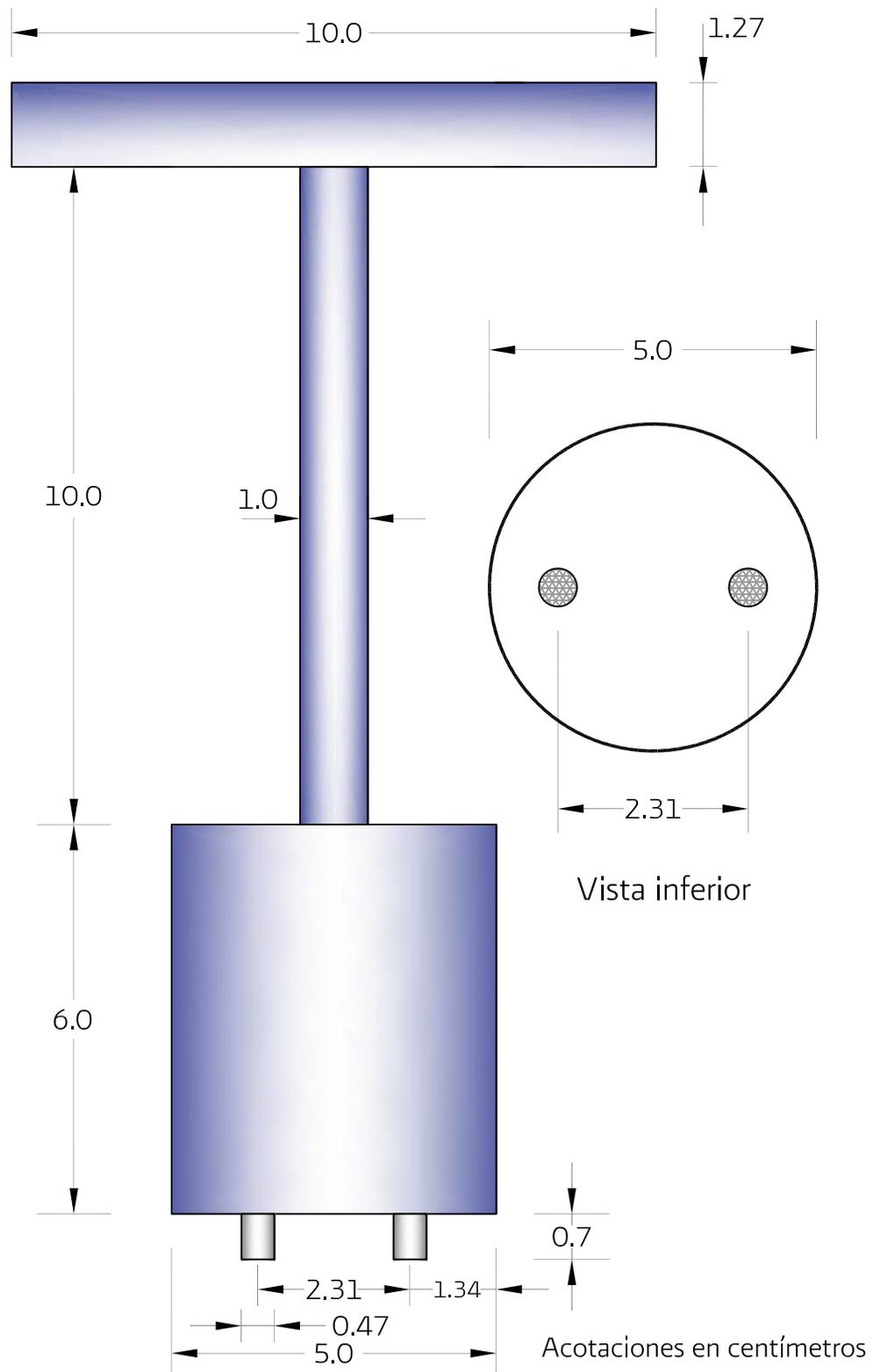
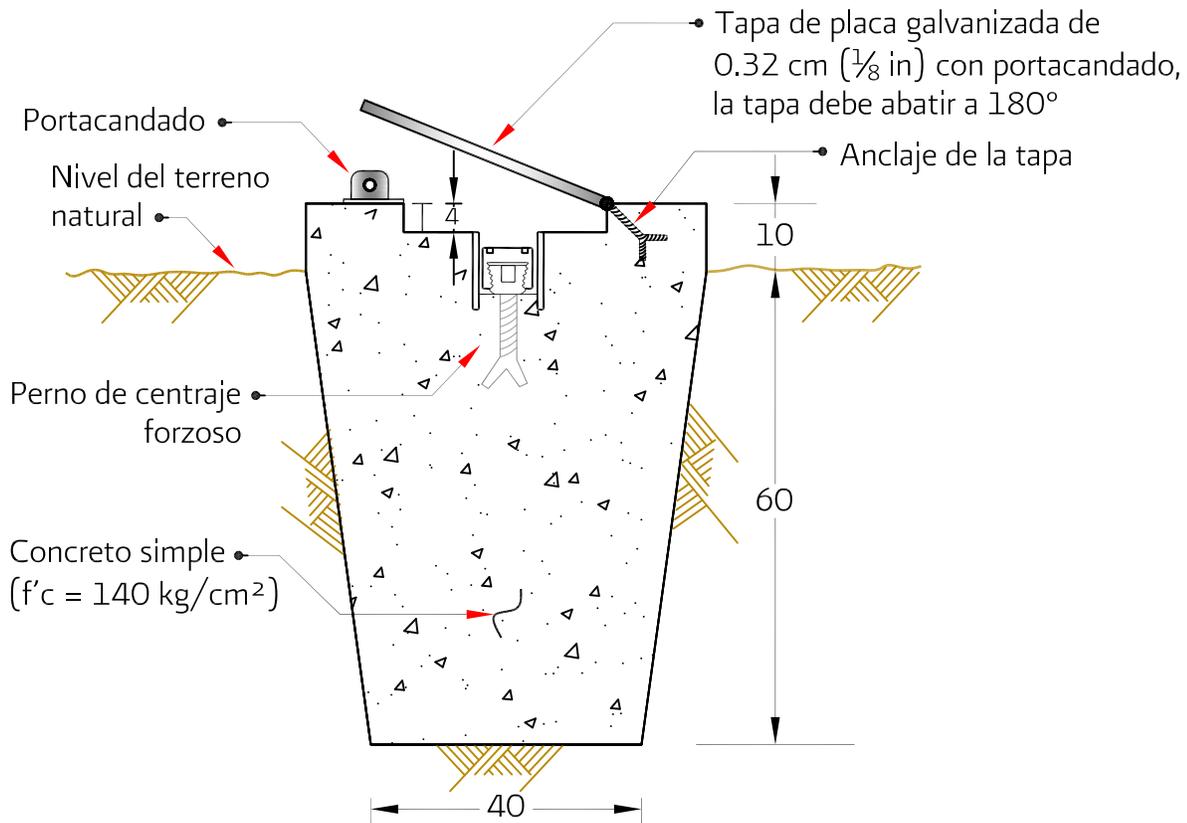
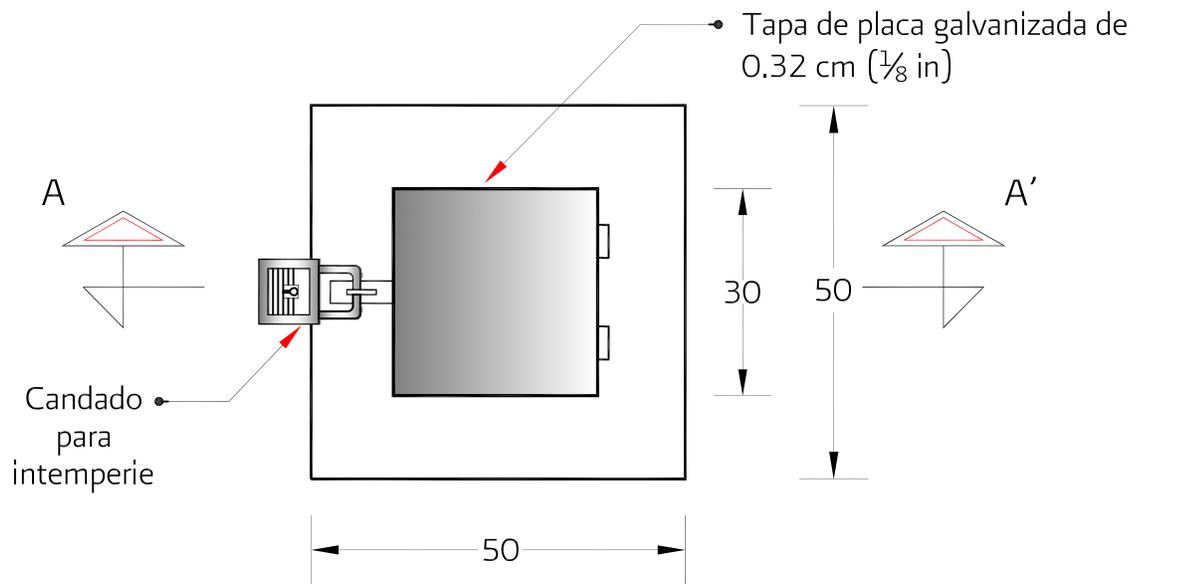


Figura 4.6 Llave para tapón de perno de centraje forzoso (2)



Corte A-A'



Planta

Acotaciones en centímetros

Figura 4.7 Testigo superficial para control horizontal con tapa de protección (TSMH)

Solera de 6.35 cm (2 ½ in) × 0.64 cm (¼ in) con barreno de 38 mm para alojar el tapón del perno y soldar dicho tapón a la solera lo suficientemente alto para que quede juego entre el perno y el tapón, que permita subir o bajar el perno dentro del tapón de manera que el perno quede al mismo nivel del colado; además, lleva dos barrenos a 2.4 cm del borde para apoyar todo el conjunto en la cimbra mediante los tornillos nivelantes

Entre la solera y la cimbra, se pueden colocar apoyos para nivelar la base y, por consiguiente, verticalizar el perno de centraje forzoso

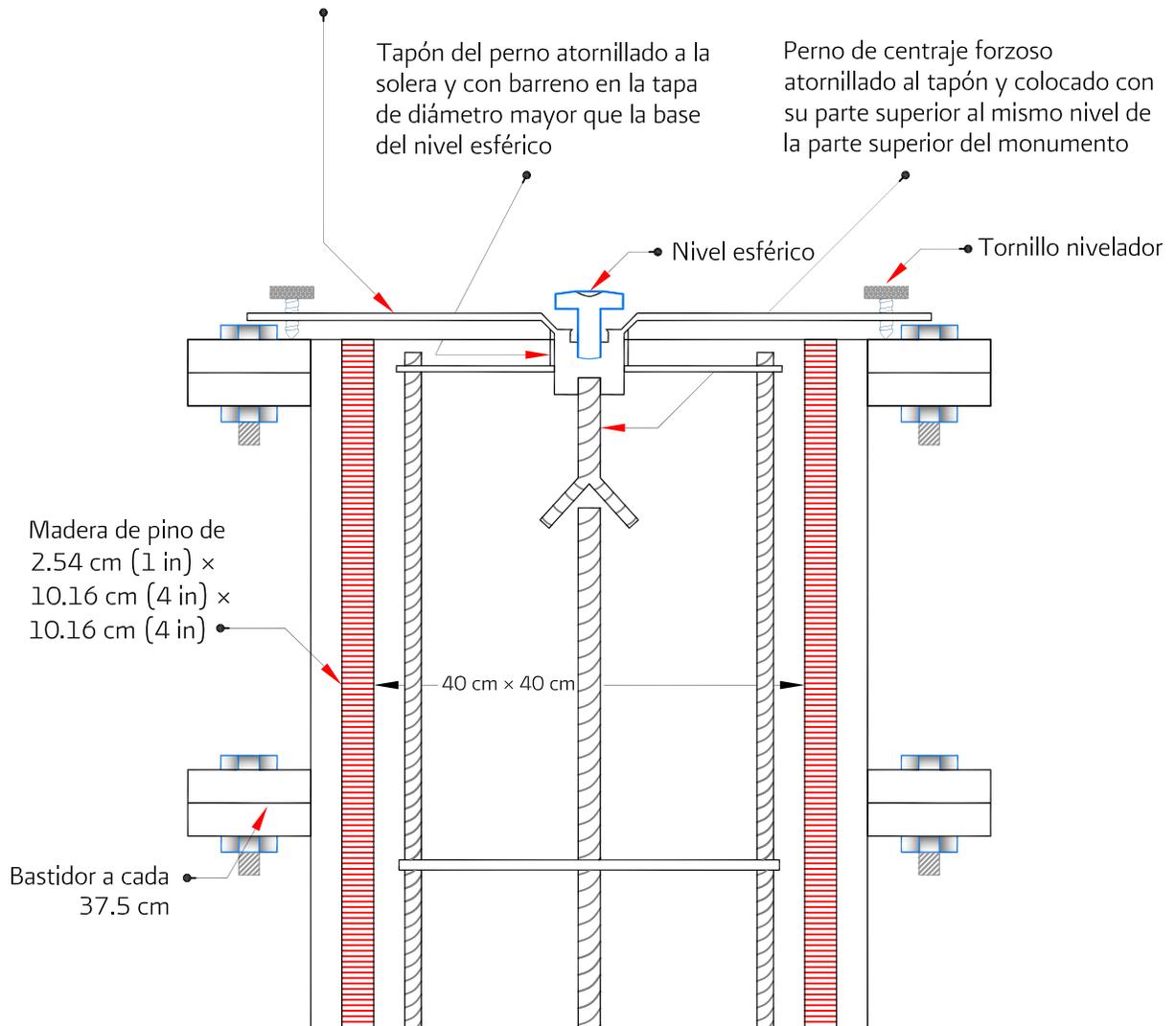


Figura 4.8 Detalle de placa para nivelar perno de centraje forzoso

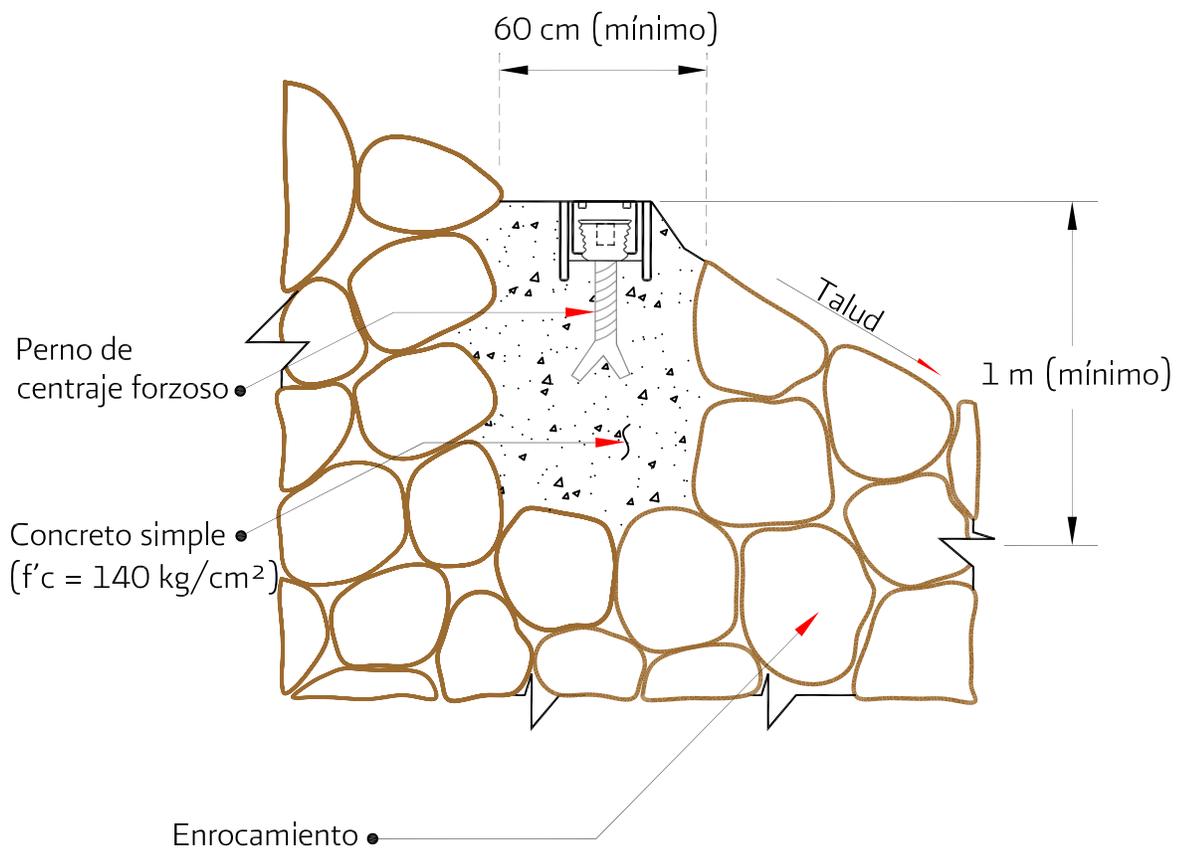
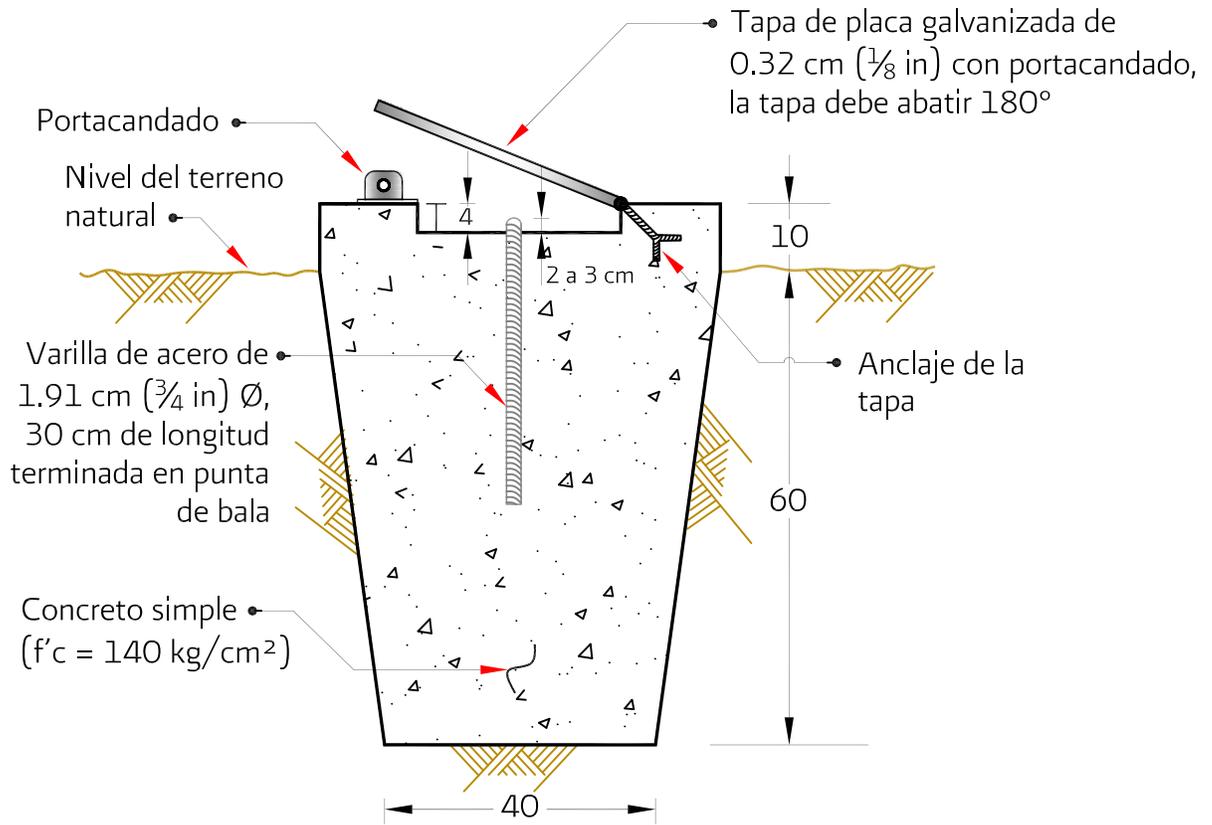
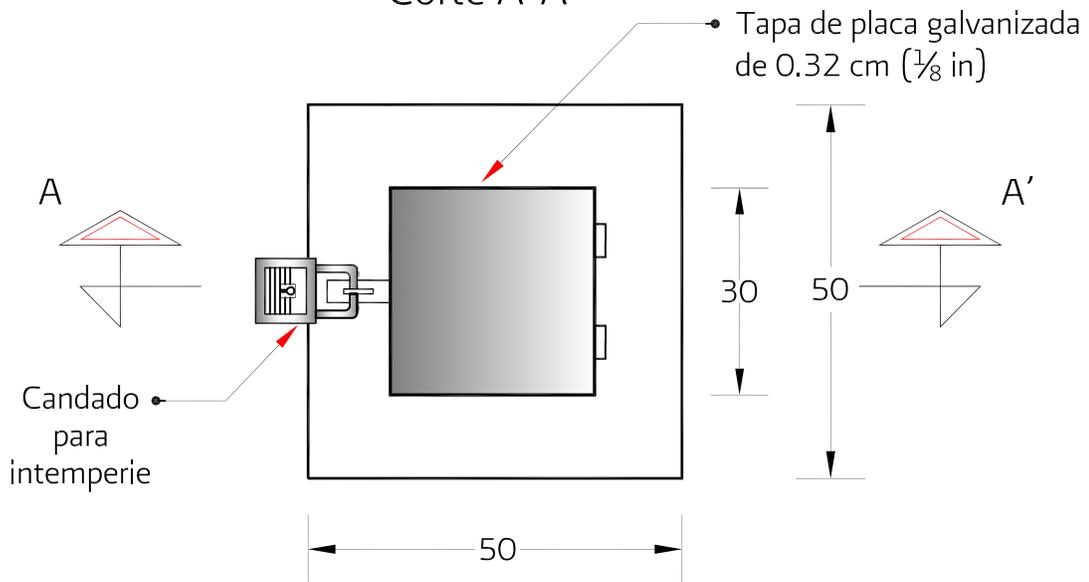


Figura 4.9 Testigo superficial para control de movimiento horizontal (TSMH) dentro del enrocamiento



Corte A-A'



Planta

Acotaciones en centímetros

Figura 4.10 Testigo superficial para control de movimiento vertical (TSMV)

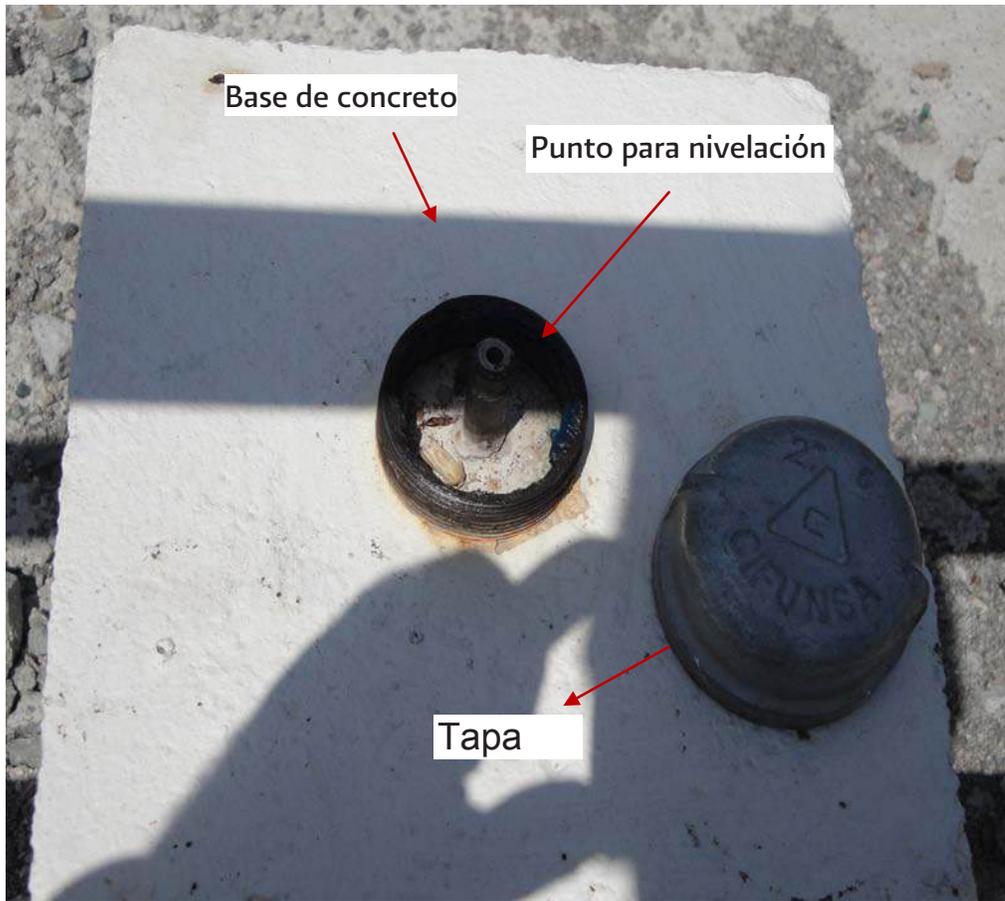


Figura 4.11 Testigo superficial con tapa

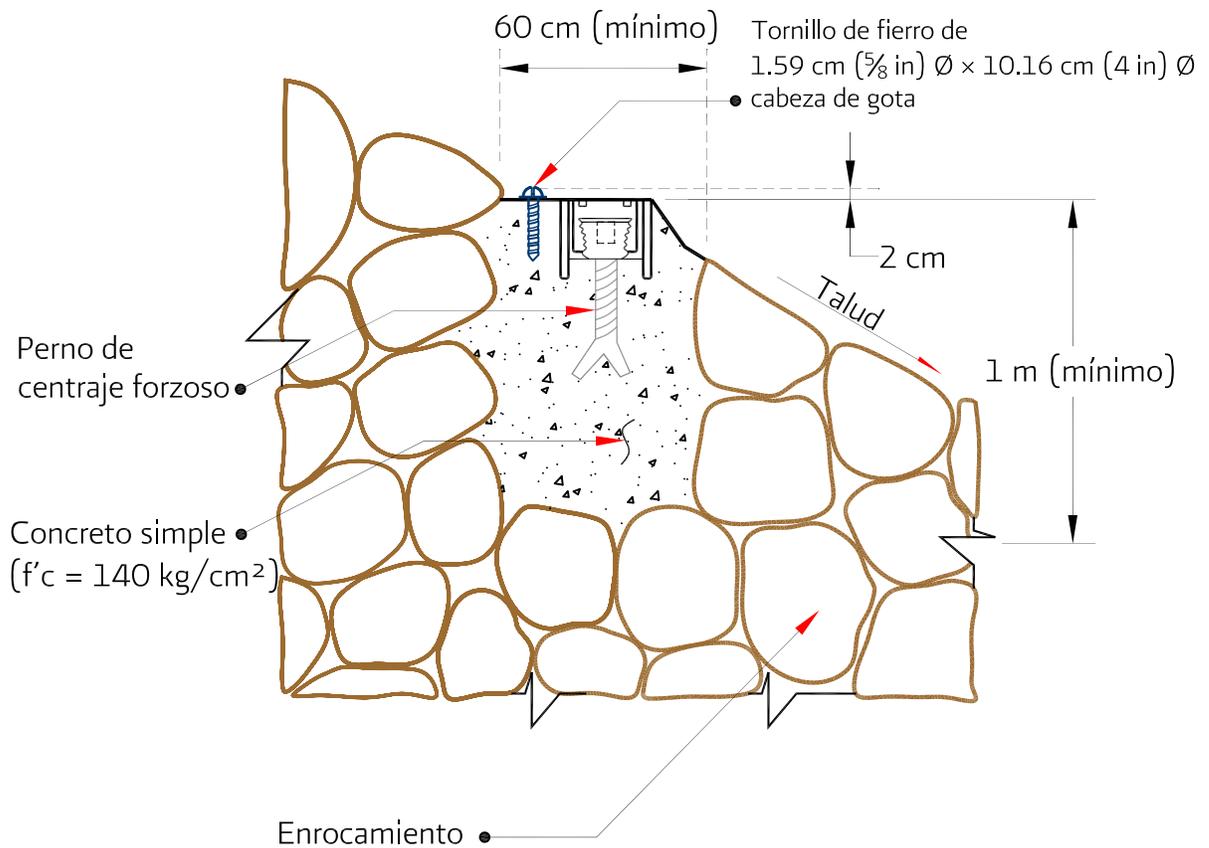


Figura 4.12 Testigo superficial para control de movimiento vertical (TSMV) dentro del enrocamiento

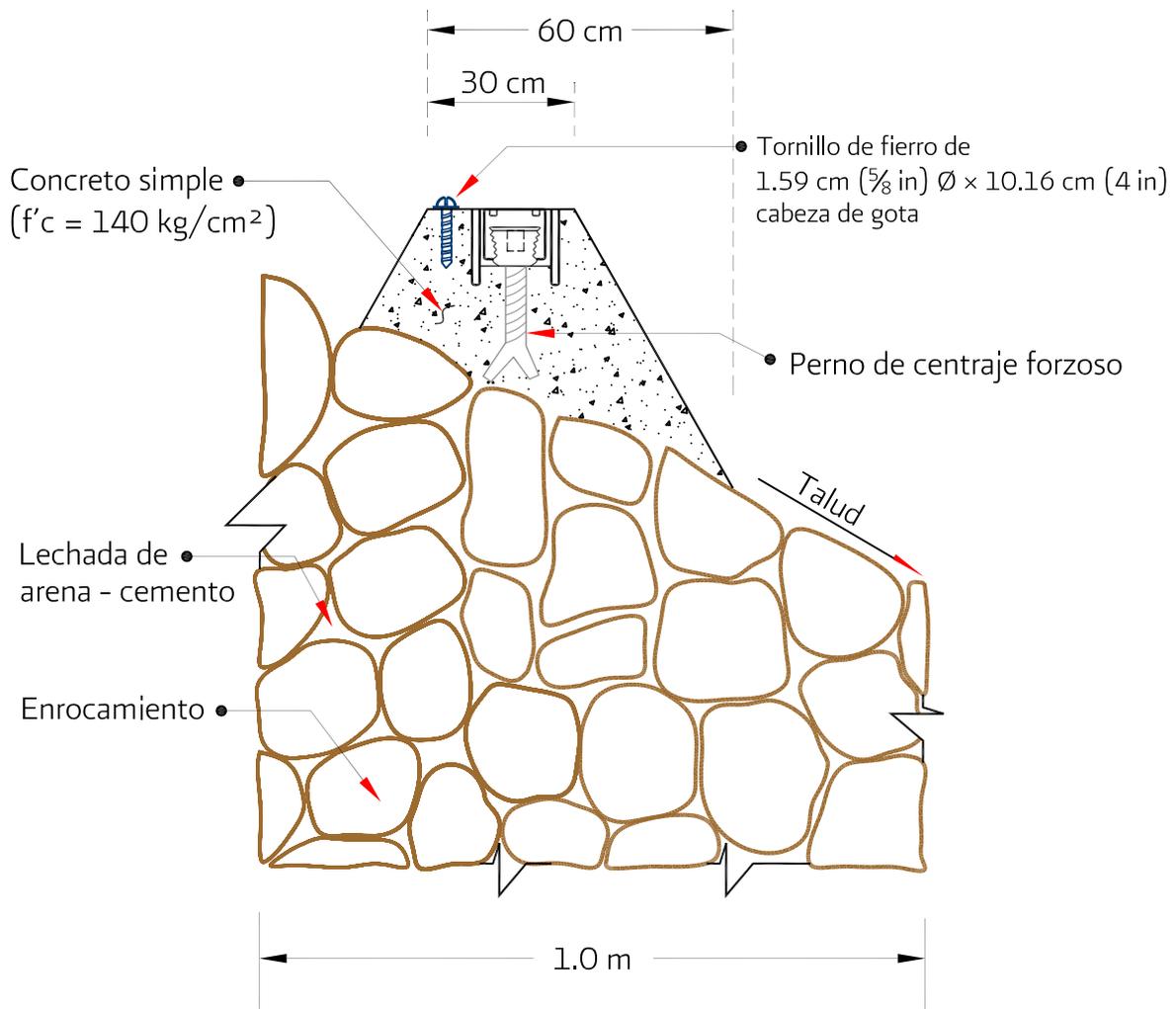


Figura 4.13 Testigo superficial sobre talud

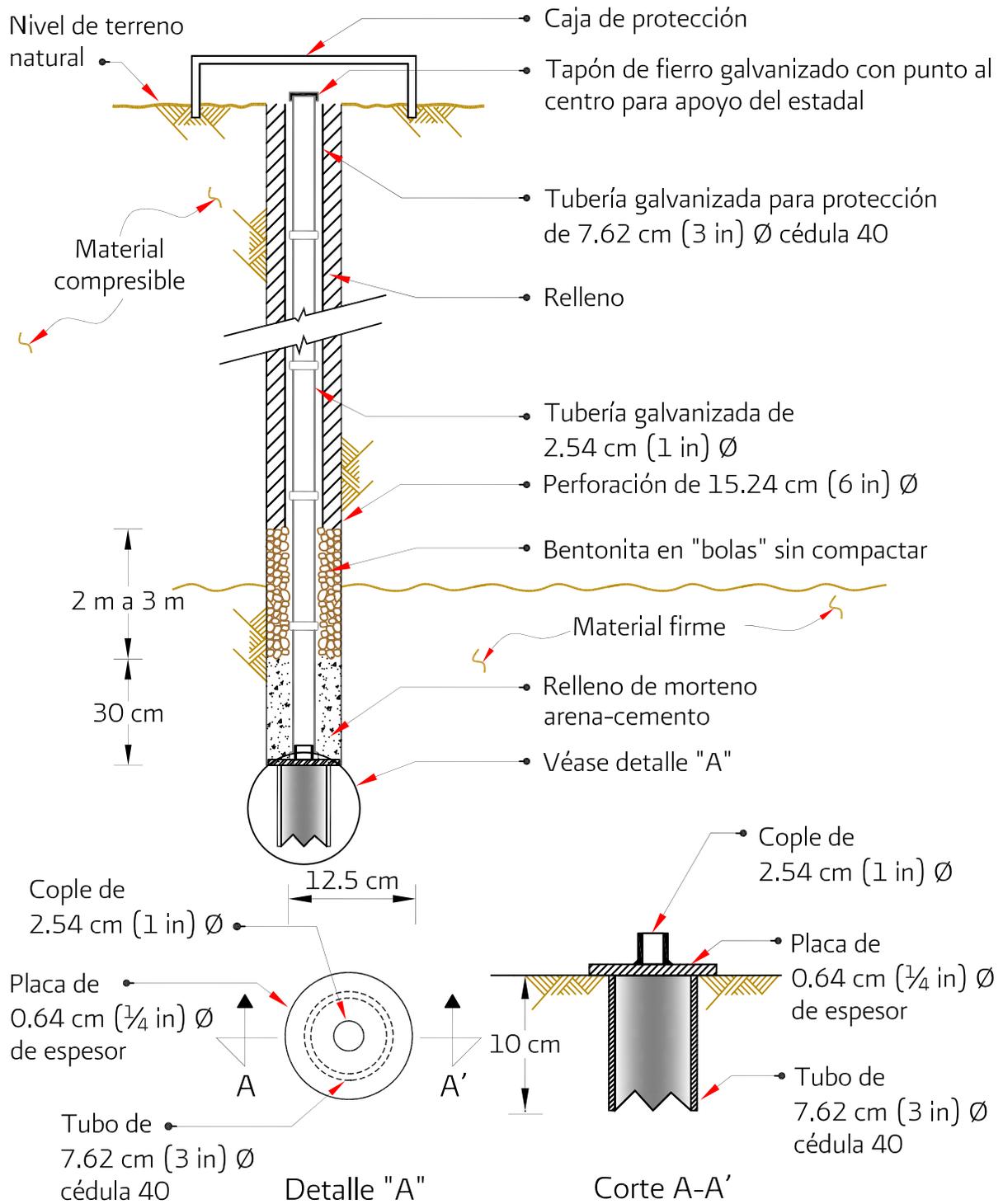
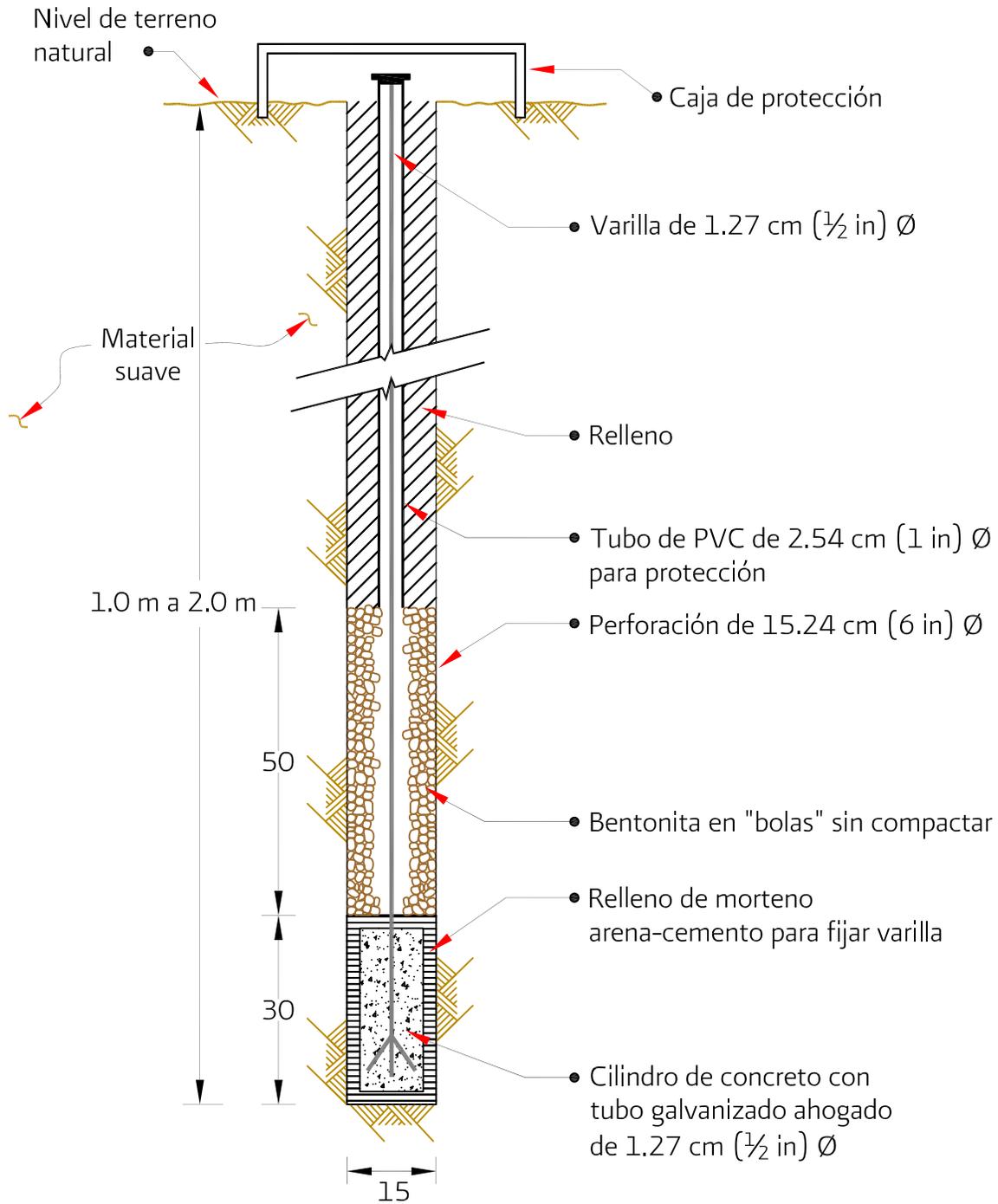


Figura 4.14 Detalle de testigo de nivel profundo para control de movimiento vertical

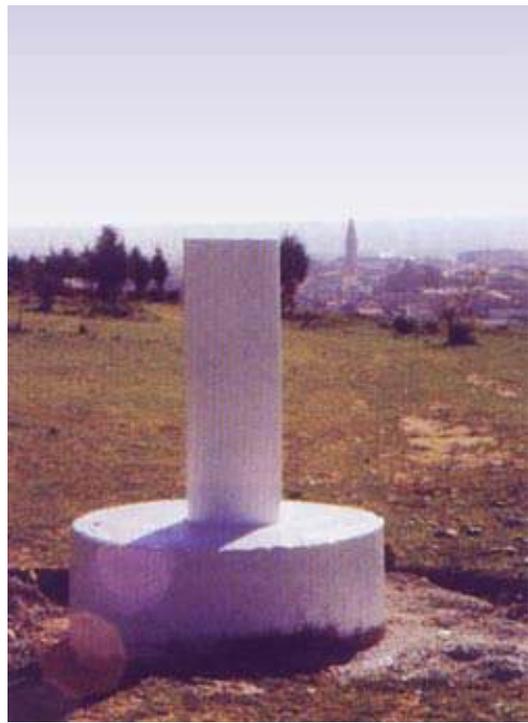


Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad

Figura 4.15 Detalle de testigo de nivel somero para control de movimiento vertical



a) Monumento de centraje forzoso con diana



b) Monumento de centraje forzoso

Figura 4.16 Tipos de monumentos de centraje forzoso (BRCH)

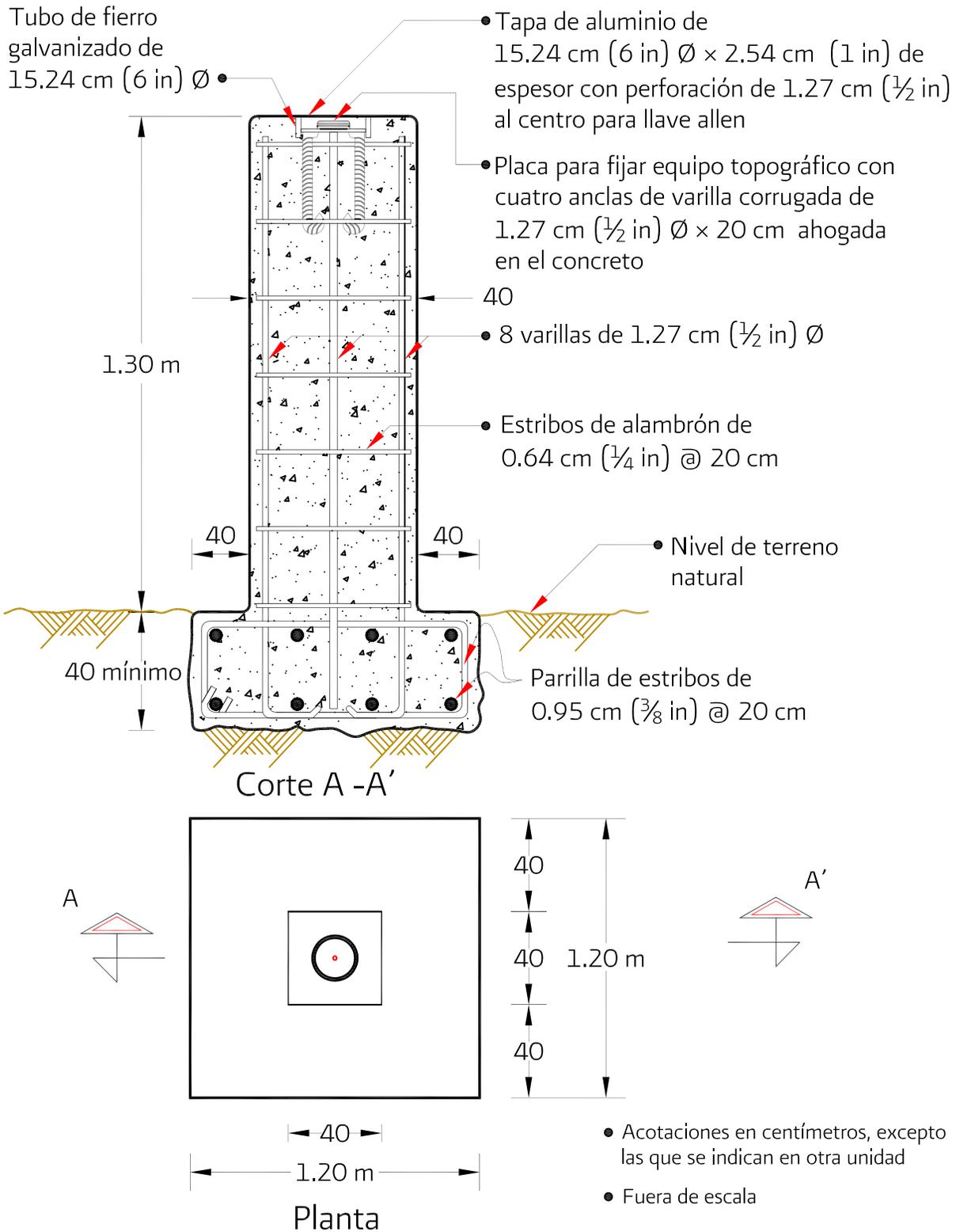
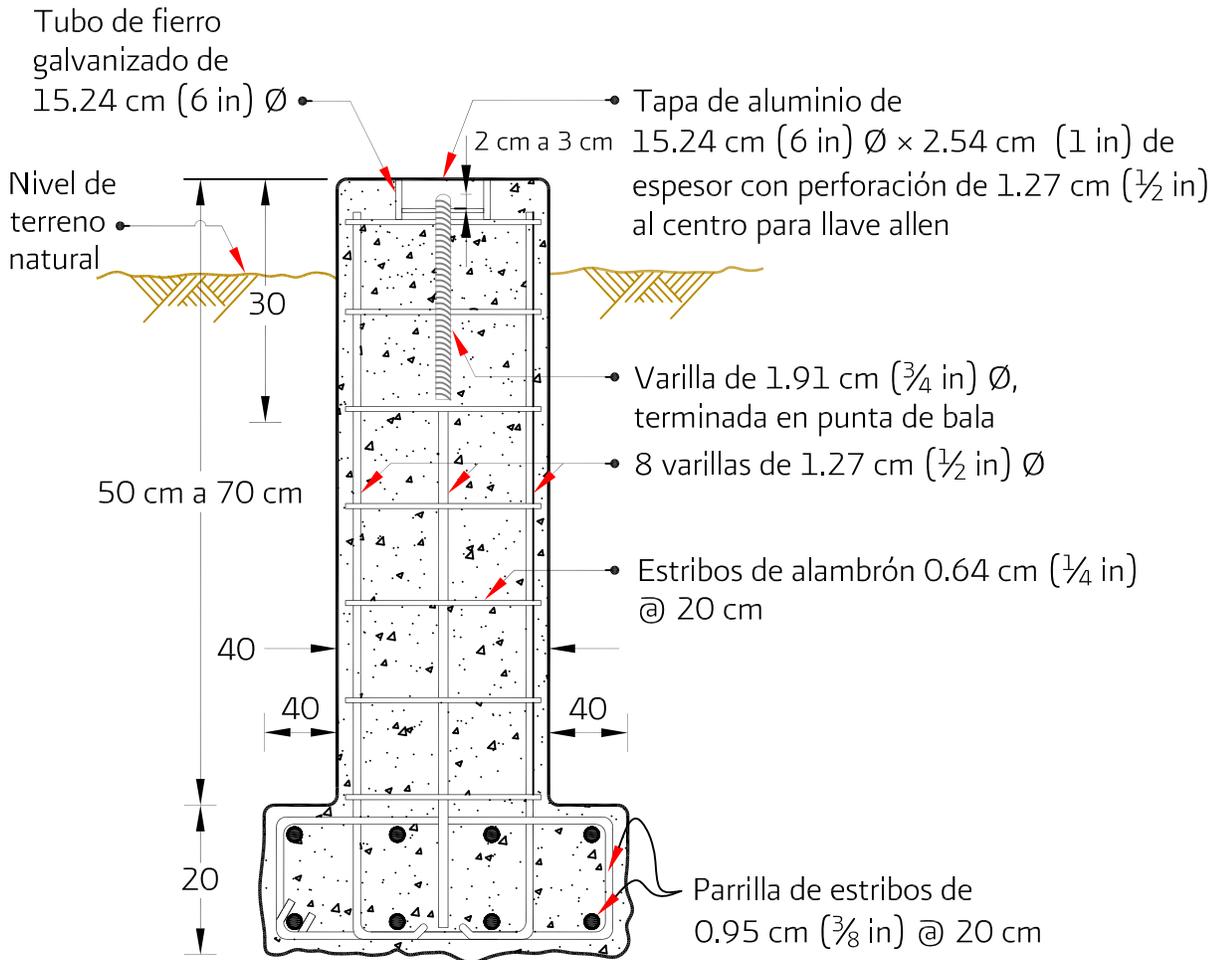


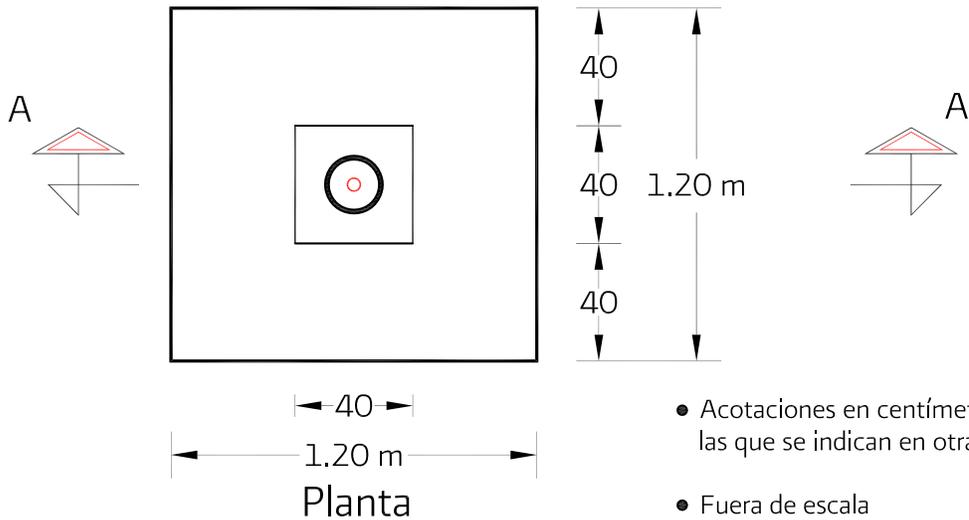
Figura 4.17 Banco de referencia para control horizontal (BRCH)



Figura 4.18 Bases y tapas para el monumento de centraje forzoso (cortesía de Leica)



Corte A -A'



- Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad
- Fuera de escala

Figura 4.19 Banco de nivel enlazado a la red geodésica vertical

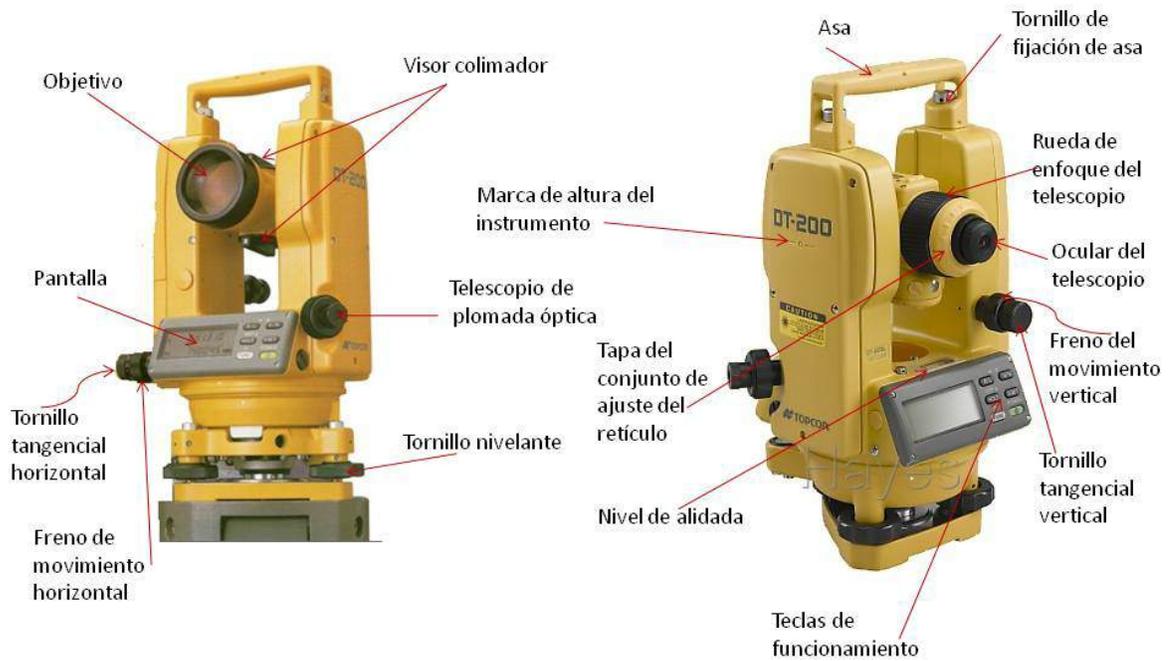


Figura 4.20 Partes de un teodolito estadimétrico modelo DT200 (cortesía Topcon)



Figura 4.21 Partes de la estación total modelo R300 (cortesía de Pentax)

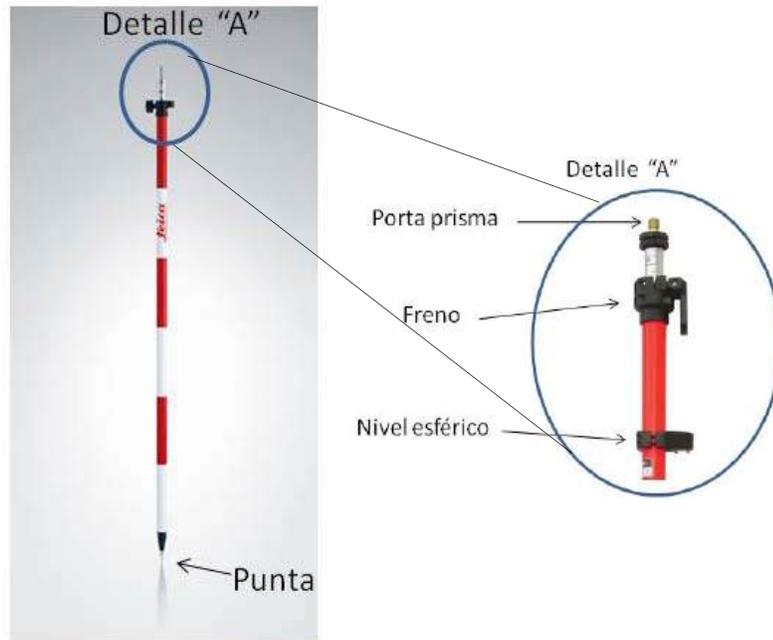


Figura 4.22 Bastón (cortesía de CST/berger)



Tipos de prismas



Tipos de adaptadores para prismas

Figura 4.23 Prismas con base y adaptadores (cortesía de Leica-Instop, Omni)

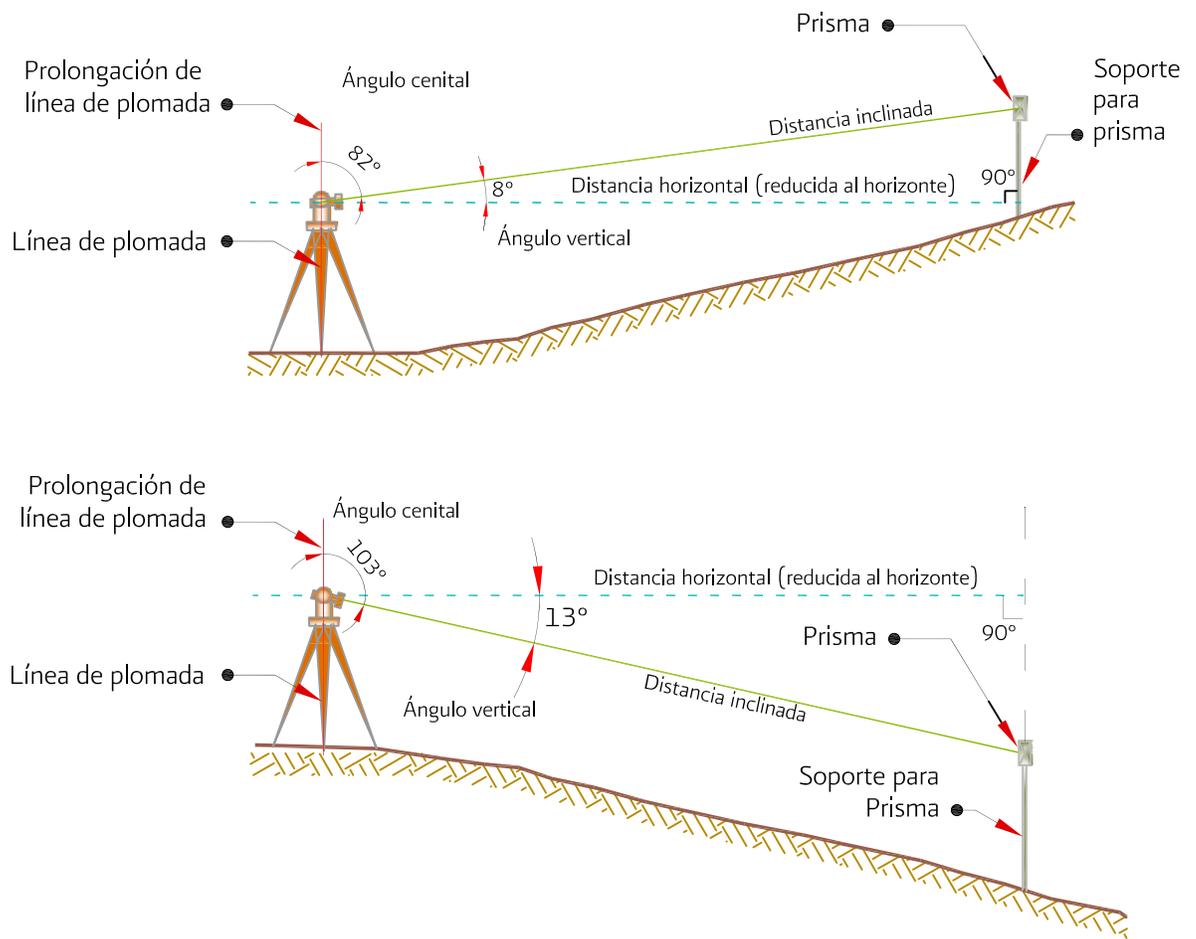
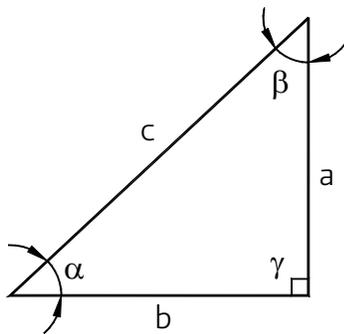


Figura 4.24 Vista de ángulos verticales y cenitales

RESOLUCIÓN DE UN TRIÁNGULO RECTÁNGULO



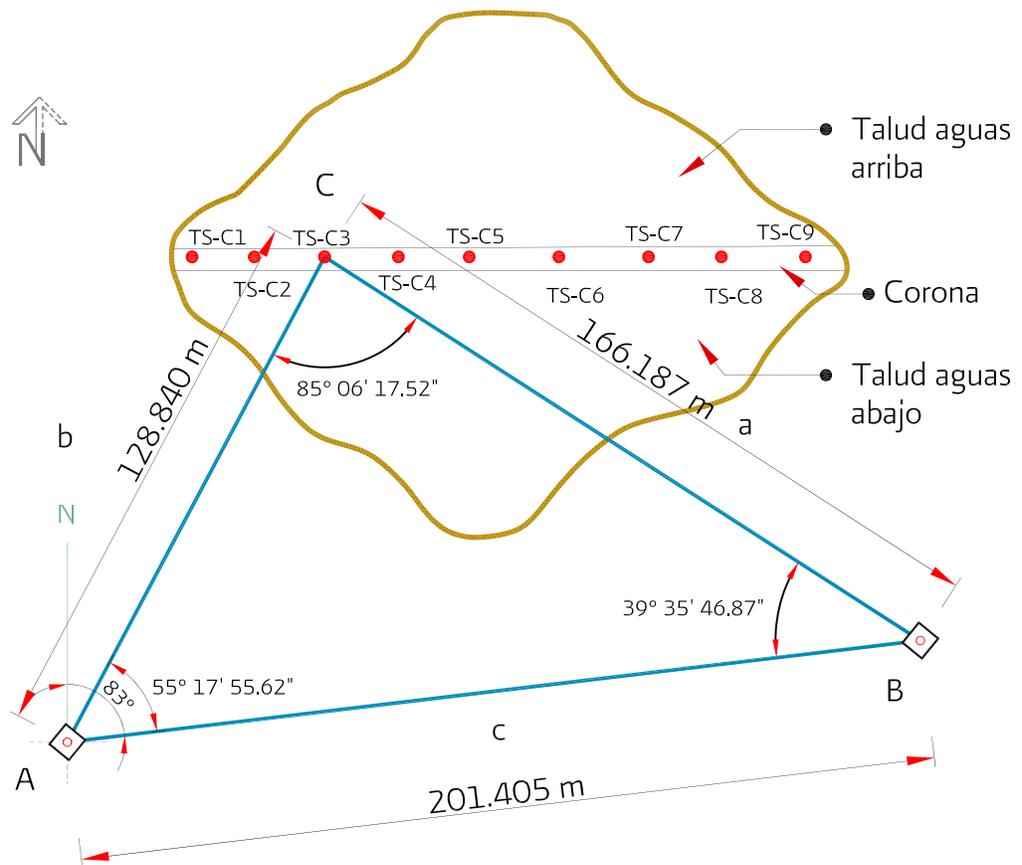
$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \text{ (Suma de ángulos internos)}$$

$$\text{Área} = \frac{ba}{2}$$

Datos	Incógnitas	Fórmulas
a, c	α, β, b	$\text{sen } \alpha = \frac{a}{c}; \text{ cos } \beta = \frac{a}{c}; b = \sqrt{c^2 - a^2}$
a, b	α, β, c	$\text{tan } \alpha = \frac{a}{b}; \text{ tan } \beta = \frac{b}{a}; c = \sqrt{a^2 + b^2}$
α, a	β, b, c	$\beta = 90^\circ - \alpha; b = \frac{a}{\text{tan } \alpha}; c = \frac{a}{\text{sen } \alpha}$
α, b	β, a, c	$\beta = 90^\circ - \alpha; a = b \text{ tan } \alpha; c = \frac{b}{\text{cos } \alpha}$
α, c	β, a, b	$\beta = 90^\circ - \alpha; a = c \text{ sen } \alpha; b = c \text{ cos } \alpha$

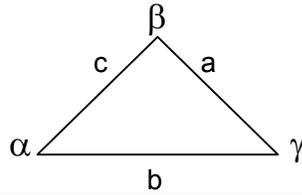
c = Distancia inclinada

Figura 4.25 Fórmulas trigonométricas para triángulo rectángulo



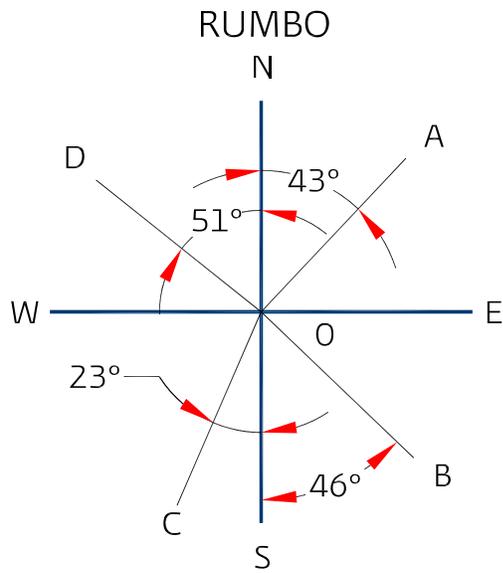
- Banco de referencia para control horizontal (BRCH)
 - TS-C1 - Testigo superficial corona 1
- Línea base A,B (c) 201.405 m
 Azimut línea base A,B 83°
 Rumbo línea base A,B NE 83°
 Línea b 128.840 m
 Línea a 166.187 m
 Ángulo A 55°17' 55.62"
 Ángulo B 39°35' 46.87"
 Ángulo C 85°06' 17.52"

Figura 4.26 Solución de triángulo oblicuángulo

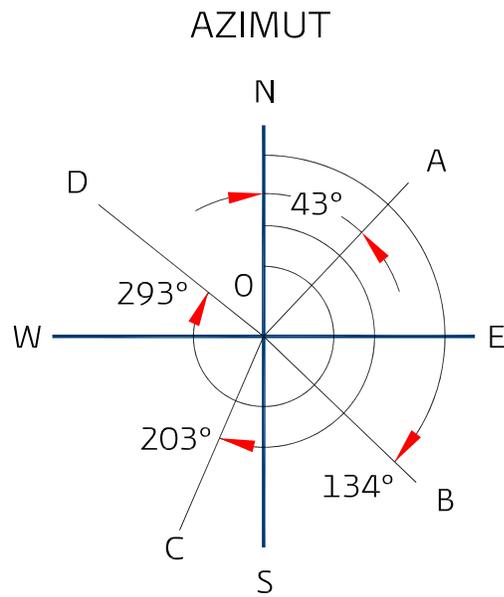


Datos	Incógnitas	Fórmula
α, β, a	α, b, c	$\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ $b = \frac{a}{\operatorname{sen} \alpha} \times \operatorname{sen} \beta$ $c = \frac{a}{\operatorname{sen} \alpha} \times \operatorname{sen} (\alpha + \beta) = \frac{a}{\operatorname{sen} \alpha} \times \operatorname{sen} \gamma$
	Área	$\text{Área} = \frac{1}{2} ab \operatorname{sen} \gamma = \frac{a^2 \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma}{2 \operatorname{sen} \alpha}$
α, a, b	β, γ, c	$\operatorname{sen} \beta = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{a} \times b$ $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ $c = \frac{a}{\operatorname{sen} \alpha} \times \operatorname{sen} \gamma$
	Área	$\text{Área} = \frac{1}{2} ab \operatorname{sen} \gamma$
γ, a, b	c	$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma}$
	$\frac{1}{2}(\alpha + \beta)$	$\frac{1}{2}(\alpha + \beta) = 90^\circ - \frac{1}{2}\gamma$
	$\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$	$\tan \frac{1}{2}(\alpha - \beta) = \frac{a - b}{a + b} \times \tan \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$
	α, β	$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) + \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$ $\beta = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) - \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$
	c	$c = (a + b) \times \frac{\cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta)}{\cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)} = (a - b) \times \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2}(\alpha + \beta)}{\operatorname{sen} \frac{1}{2}(\alpha - \beta)}$
	Área	$\text{Área} = \frac{1}{2} ab \operatorname{sen} \gamma$
a, b, c	α	$\text{Sea } s = \frac{a + b + c}{2}$ $\operatorname{sen} \frac{1}{2} \alpha = \sqrt{\frac{(s - b)(s - c)}{bc}}$ $\cos \frac{1}{2} \alpha = \sqrt{\frac{s(s - a)}{bc}}$ $\tan \frac{1}{2} \alpha = \sqrt{\frac{(s - b)(s - c)}{s(s - a)}}$ $\operatorname{sen} \alpha = \frac{2\sqrt{s(s - a)(s - b)(s - c)}}{b^2 + c^2 - a^2}$ $\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$
	Área	$\text{Área} = \sqrt{s(s - a)(s - b)(s - c)}$

Figura 4.27 Fórmulas trigonométricas para triángulo oblicuángulo (Brinker y Wolf, 1982)

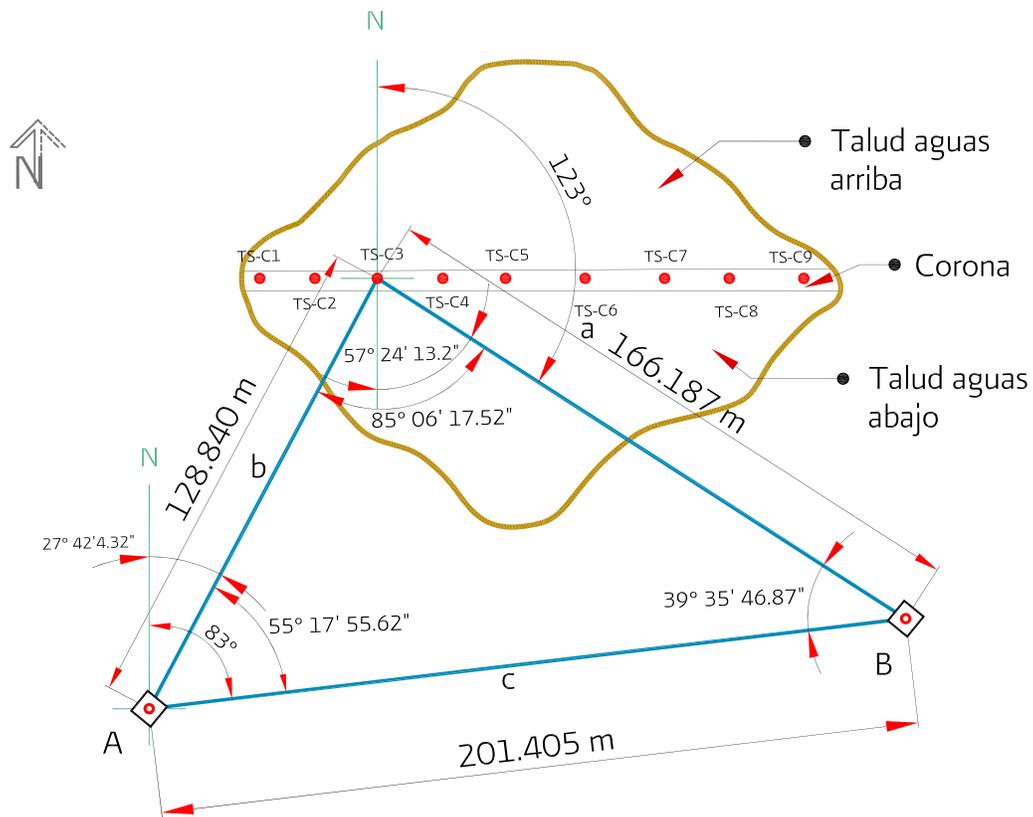


Línea OA Rumbo NE 43°
 Línea OB Rumbo SE 46°
 Línea OC Rumbo SW 23°
 Línea OD Rumbo NW 51°



Línea OA Azimut 43°
 Línea OB Azimut 134°
 Línea OC Azimut 203°
 Línea OD Azimut 293°

Figura 4.28 Orientación, rumbo y azimut de una línea

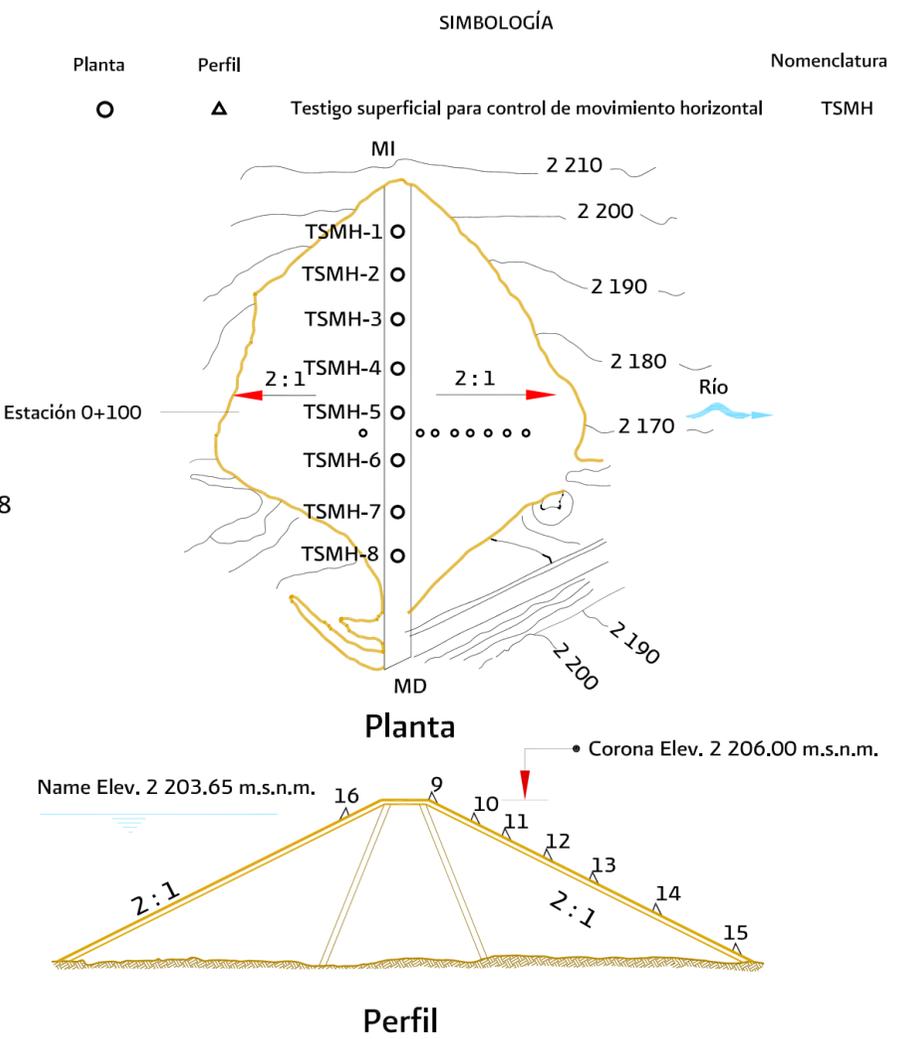
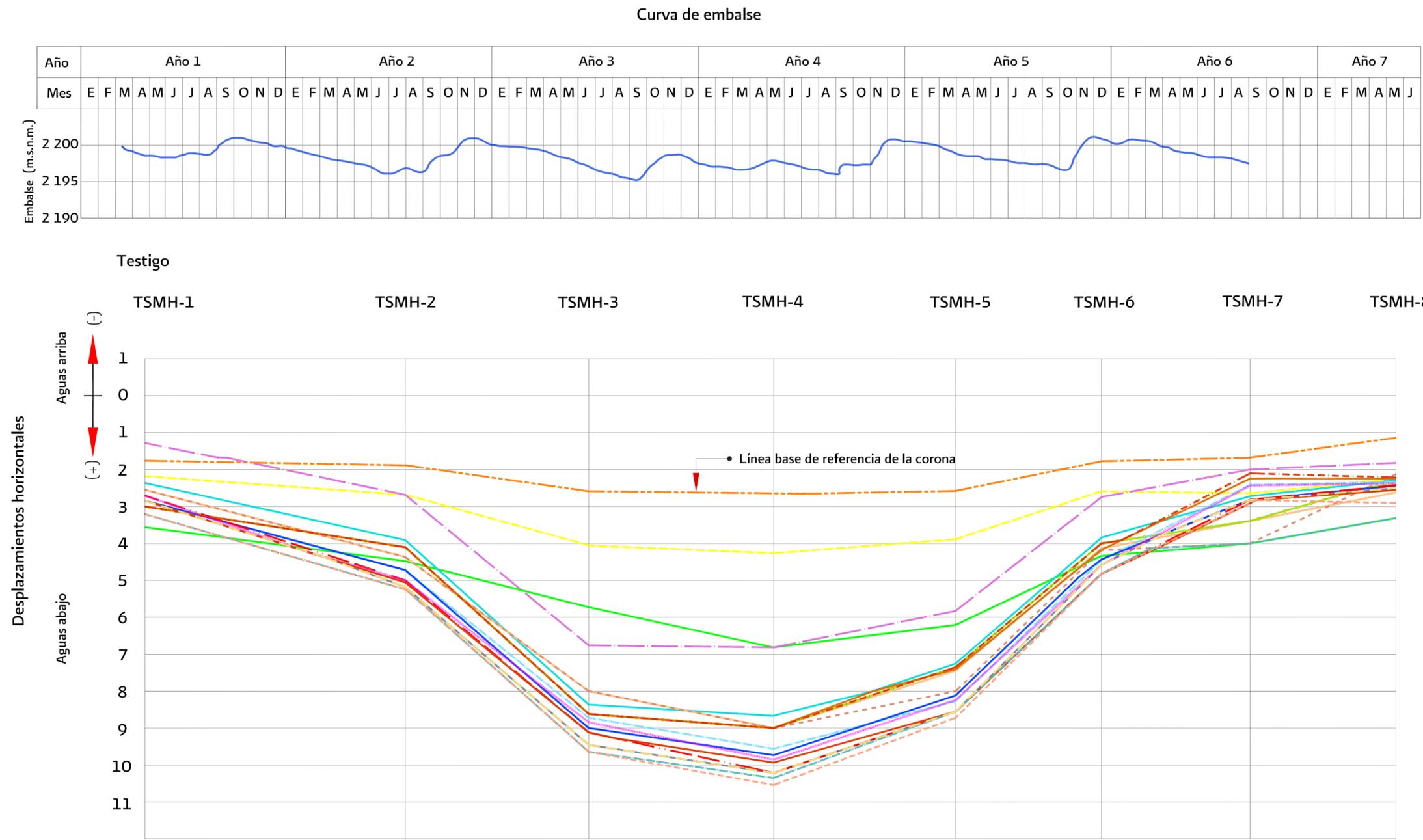


- Banco de referencia para control horizontal (BRCH)
 - TS-C1 - Testigo superficial corona 1
- Línea base A,B 201.405 m
 Línea A,TS-C3 128.840 m
 Línea B,TS-C3 166.187 m
 Azimut línea base A,B 83°
 Rumbo línea base A,B 83°
 Rumbo línea TS-C3,A SW 27° 42' 4.32"
 Rumbo línea TS-C3,B SE 57° 24' 13.2"

Figura 4.29 Determinación de rumbos y azimuts

Gráfica	Fecha
1	7/Abr/Año 1
2	15/Sep/Año 1
3	13/Feb/Año 2
4	25/Sep/Año 2
5	23/May/Año 3
6	24/Ago/Año 3
7	12/Ene/Año 4
8	17/May/Año 4
9	16/Ago/Año 4
10	13/Dic/Año 4
11	16/May/Año 5
12	22/Ago/Año 5
13	19/Dic/Año 5
14	16/Ene/Año 6
15	13/Feb/Año 6
16	27/Mar/Año 6
17	24/Abr/Año 6
18	17/Jul/Año 6
19	28/ago/Año 6

Gráfica	Fecha
1 (L.R.)	---
2	---
3	---
4	---
5	---
6	---
7	---
8	---
9	---
10	---
11	---
12	---
13	---
14	---
15	---
16	---
17	---
18	---
19	---

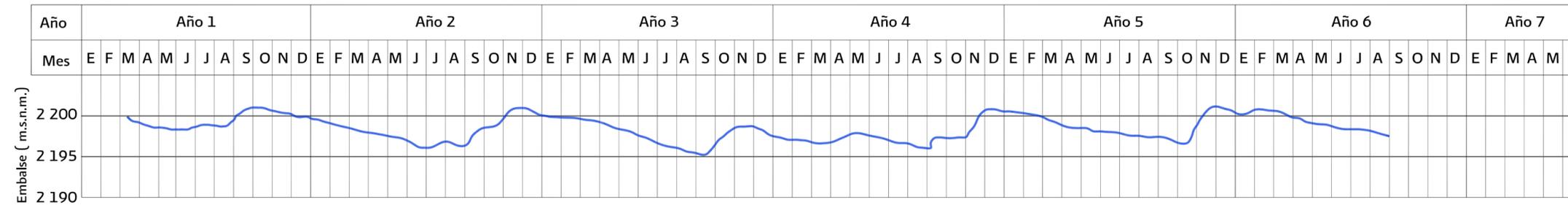


COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 4.30 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN TESTIGOS SUPERFICIALES EN LA CORONA

Curva de embalse



SIMBOLOGÍA

Planta ○ Perfil ▲ Testigo superficial para control de movimiento horizontal

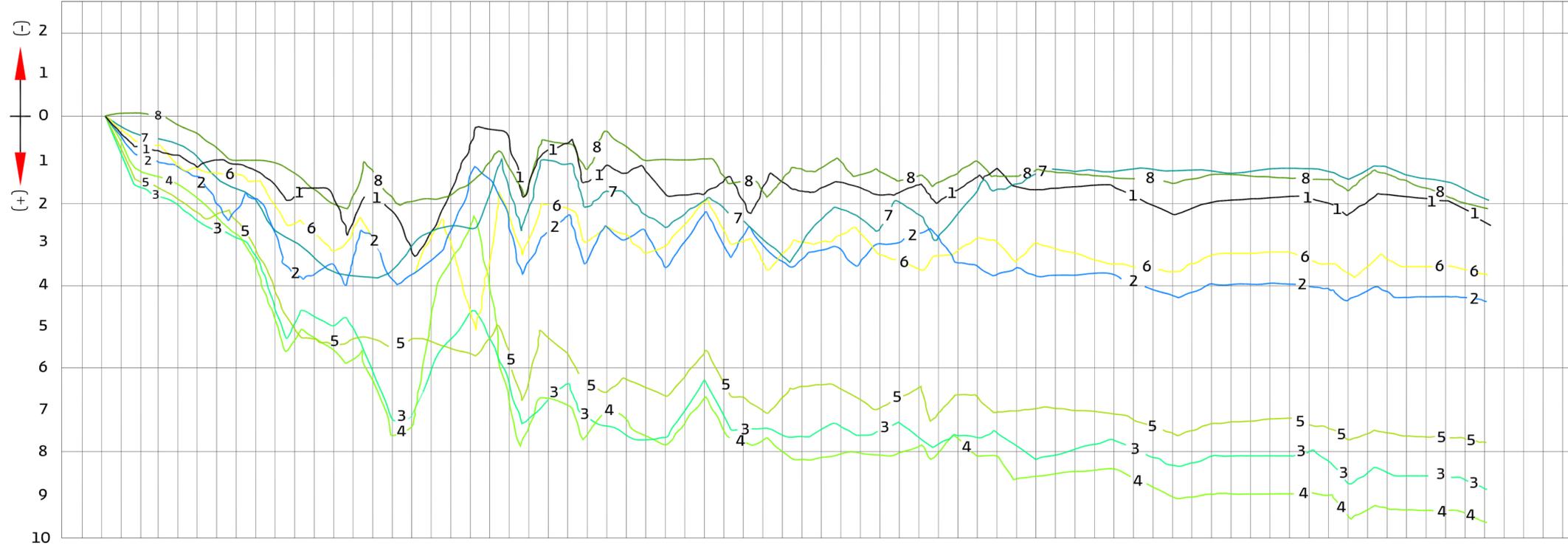
Nomenclatura

TSMH

Desplazamientos horizontales (cm)

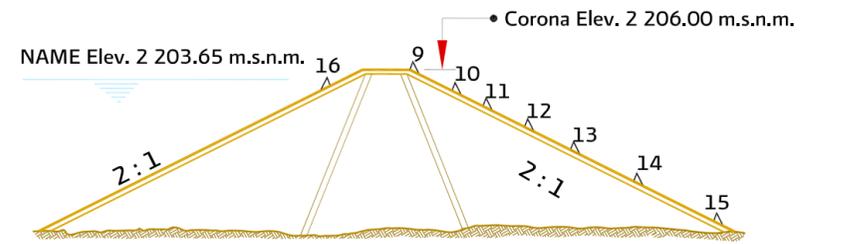
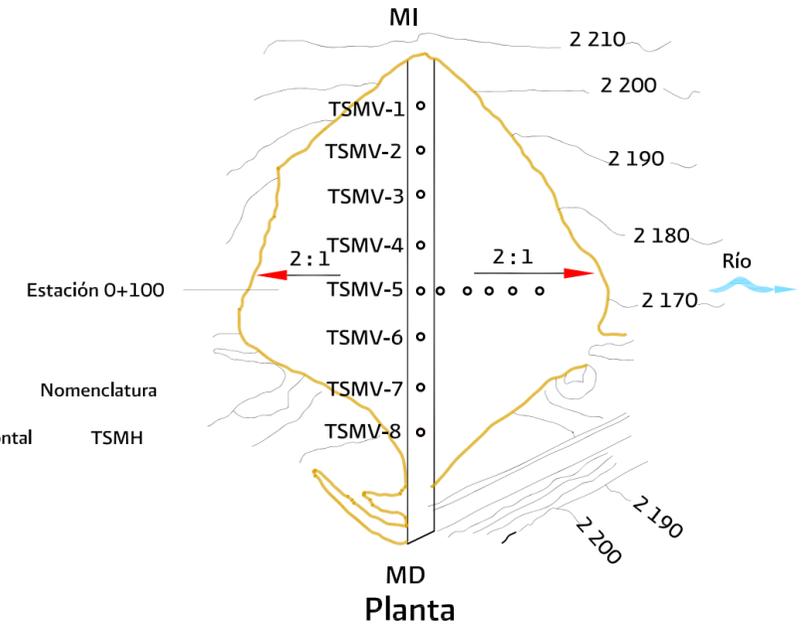
Aguas arriba

(-)



Aguas abajo

(+)

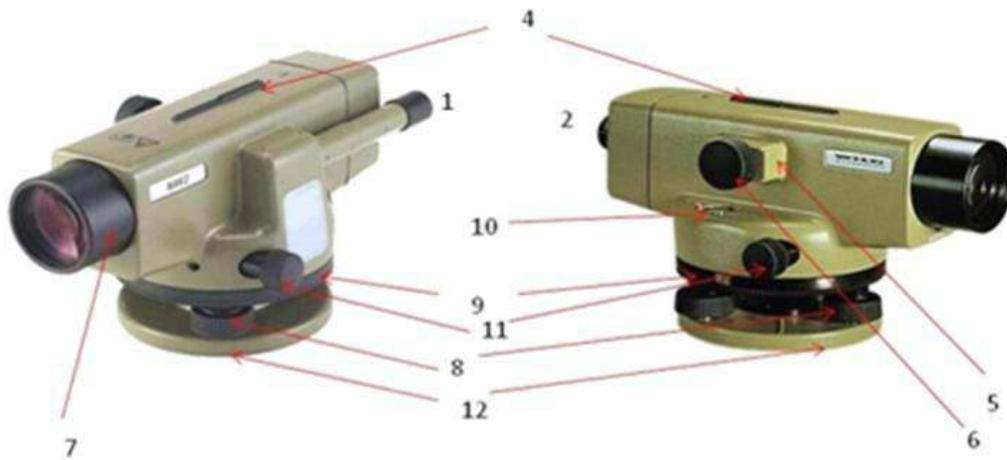


Perfil

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 4.31 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES
 CON EL TIEMPO EN TESTIGOS
 SUPERFICIALES DE LA CORONA



- | | |
|--|---|
| 1. Ocular del microscopio | 7. Carcasa del objetivo |
| 2. Ocular del anteojo | 8. Tornillo nivelante |
| 3. Anillo de bayoneta (no se observa en la figura) | 9. Aro para ajustar el círculo horizontal |
| 4. Visor | 10. Nivel esférico |
| 5. Prisma para el nivel esférico | 11. Placa de base |
| 6. Botón de enfoque rápido/fino | 12. Tornillo de movimiento sin fin |

Figura 4.32 Partes de un nivel automático NAK2 (cortesía de Leica)



Nivel Digital Sokkia SDL30



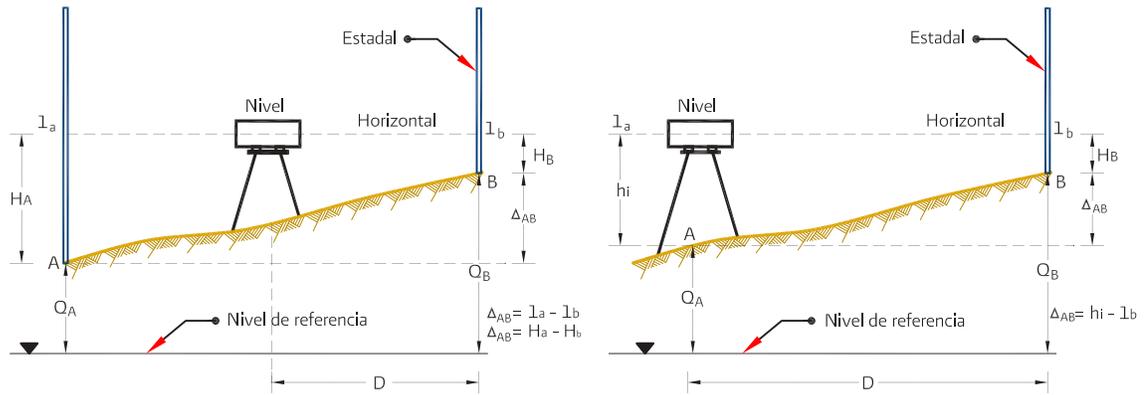
Nivel Óptico Leica NAK2



Nivel automático Sokkia Serie C

Figura 4.33 Modelos de niveles

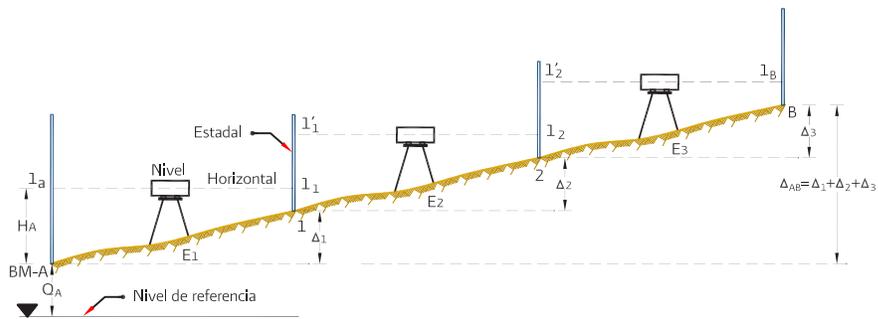
a) Nivelación simple



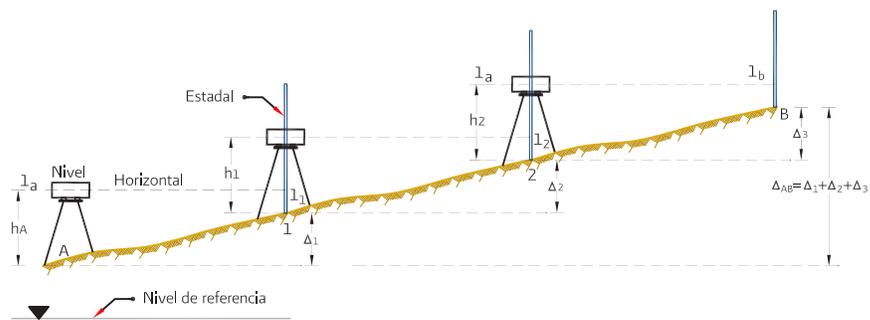
a. Nivelación desde un punto medio

b. Nivelación desde un punto extremo

b) Nivelación compuesta

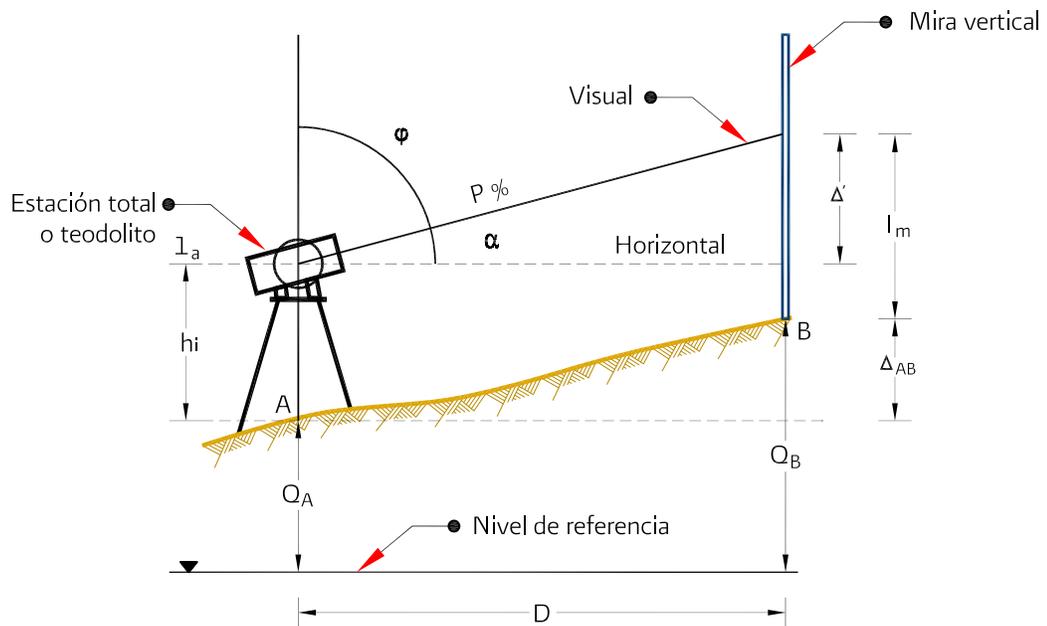


a. Nivelación desde un punto medio



b. Nivelación desde un punto extremo

Figura 4.34 Nivelación geométrica



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

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

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

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

En donde:

Δ_{AB} = desnivel entre A y B

D = distancia horizontal

α = ángulo vertical de elevación

φ = ángulo cenital

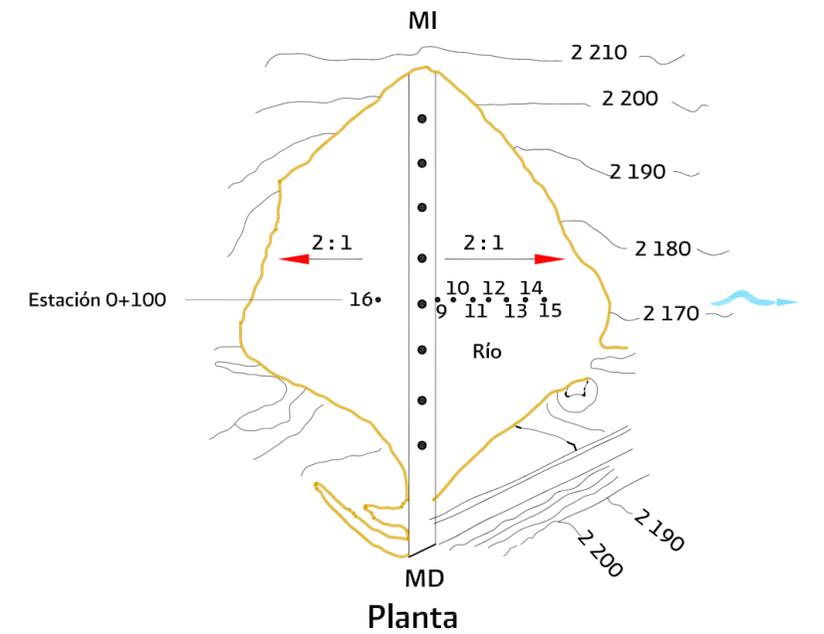
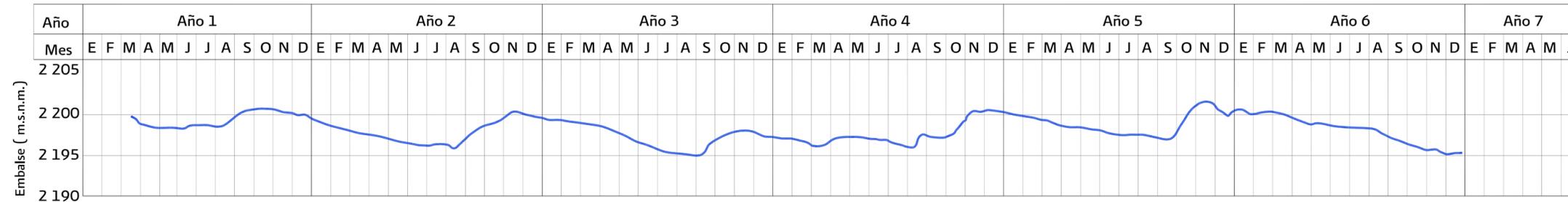
P = inclinación de la visual en %

h_i = altura del instrumento

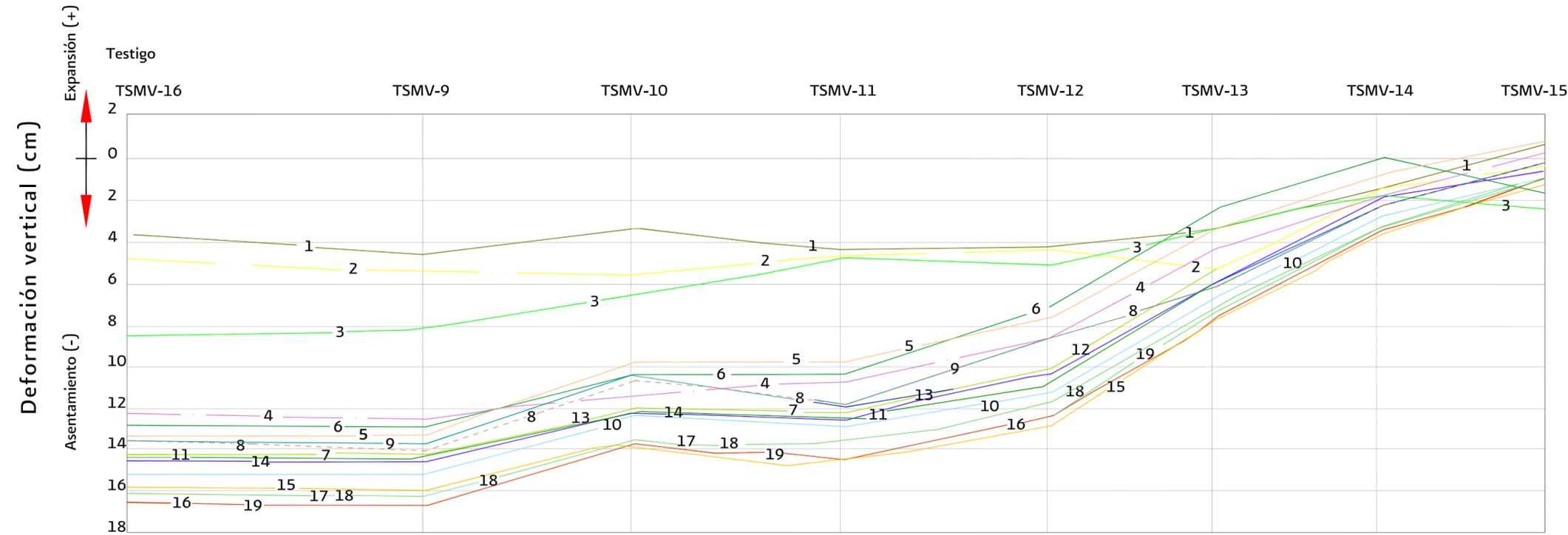
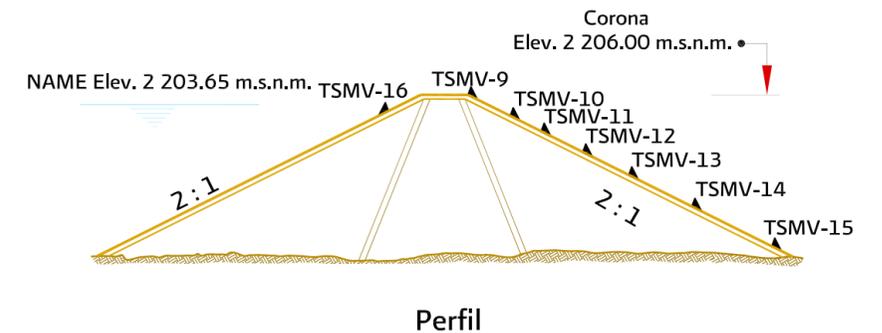
h_s = altura de la señal (lectura en mira) l_m

Figura 4.35 Nivelación trigonométrica

Curva de embalse



Gráfica	Fecha
1	7/Abr/Año 1
2	15/Sep/Año 1
3	13/Feb/Año 2
4	25/Sep/Año 2
5	23/May/Año 3
6	24/Ago/Año 3
7	12/Ene/Año 4
8	17/May/Año 4
9	16/Ago/Año 4
10	13/Dic/Año 4
11	16/May/Año 5
12	22/Ago/Año 5
13	19/Dic/Año 5
14	16/Ene/Año 6
15	13/Feb/Año 6
16	27/Mar/Año 6
17	24/Abr/Año 6
18	17/Jul/Año 6
19	28/ago/Año 6



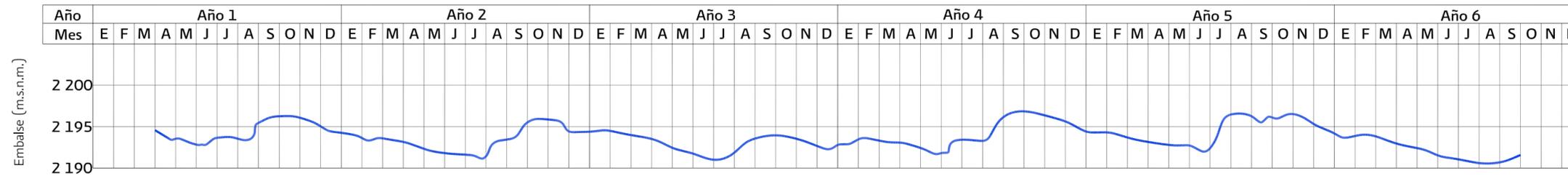
SIMBOLOGÍA
 ● Planta
 ▲ Perfil
 ● Testigo superficial para control de movimiento vertical
 TSMV Nomenclatura


COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 4.36 ASENTAMIENTO EN TESTIGOS SUPERFICIALES EN EL TALUD, ESTACIÓN 0+100

Curva de embalse

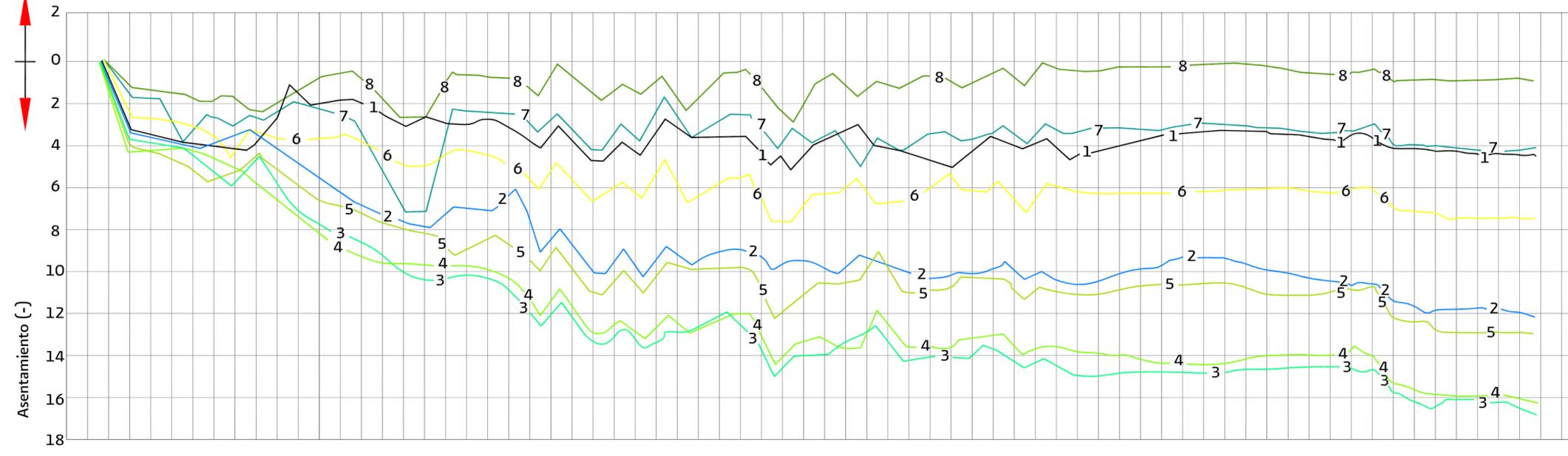


Expansión (+)



Asentamiento (-)

Deformación vertical (cm)

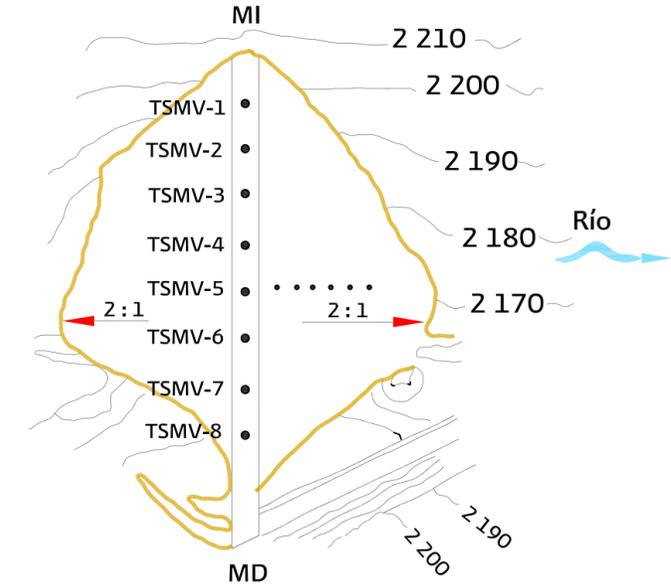


Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Año	Año 1				Año 2				Año 3				Año 4				Año 5				Año 6																																																			

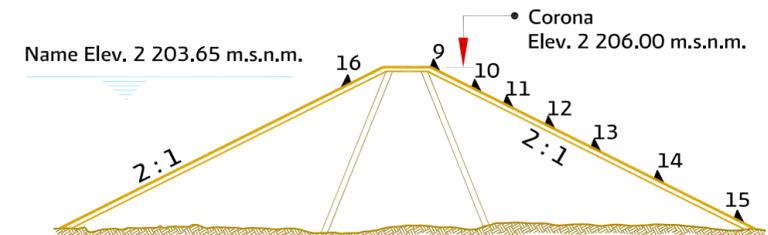
SIMBOLOGÍA

● Planta ▲ Perfil

● Testigo superficial para control de movimiento vertical TSMV



Planta

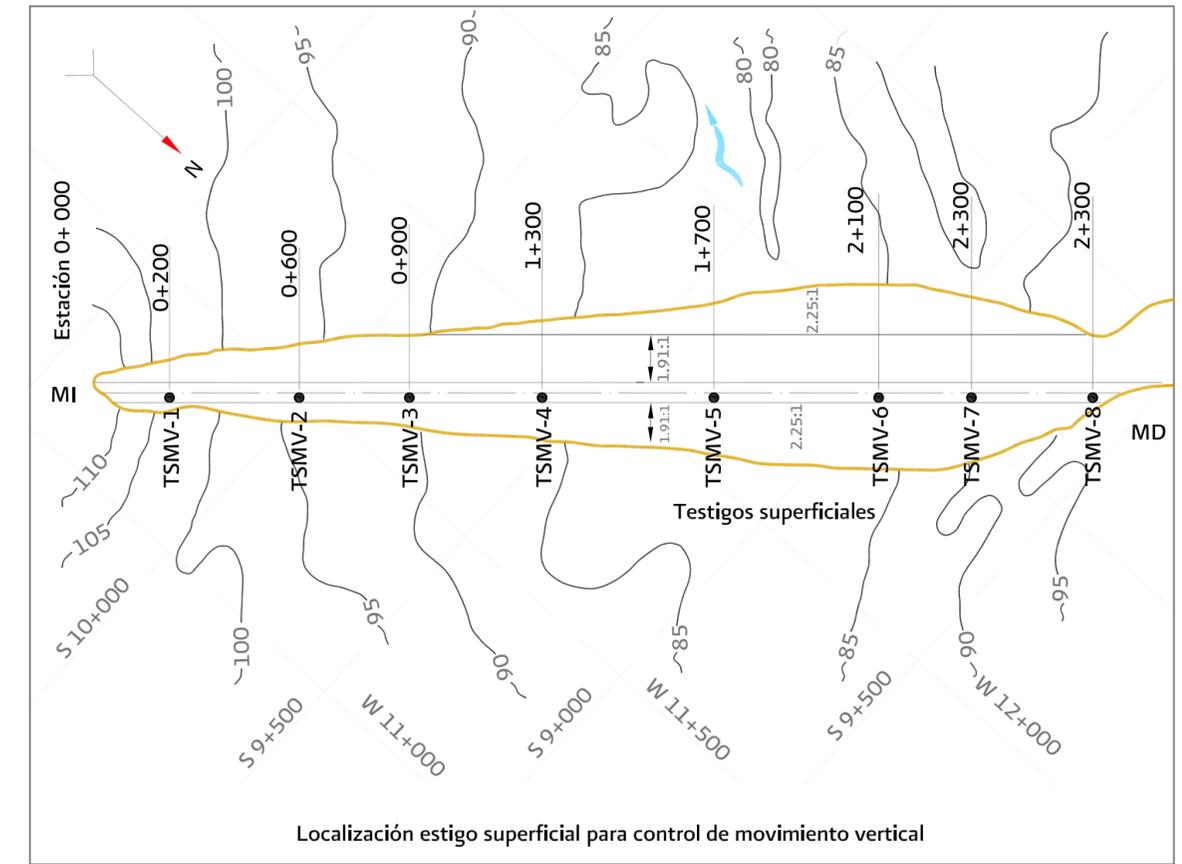
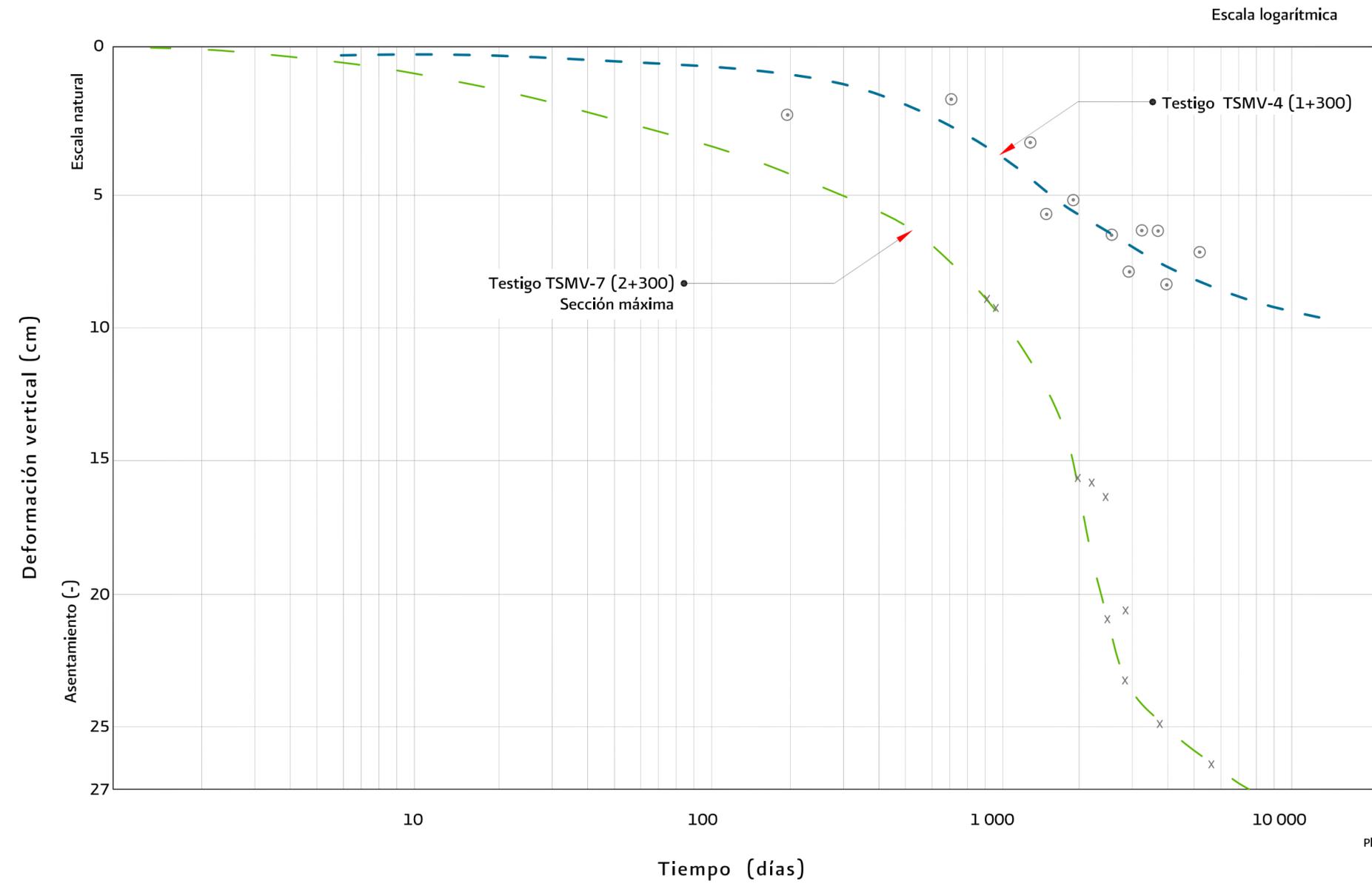


Perfil

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 4.37 ASENTAMIENTOS CON EL TIEMPO EN TESTIGOS SUPERFICIALES DE LA CORONA



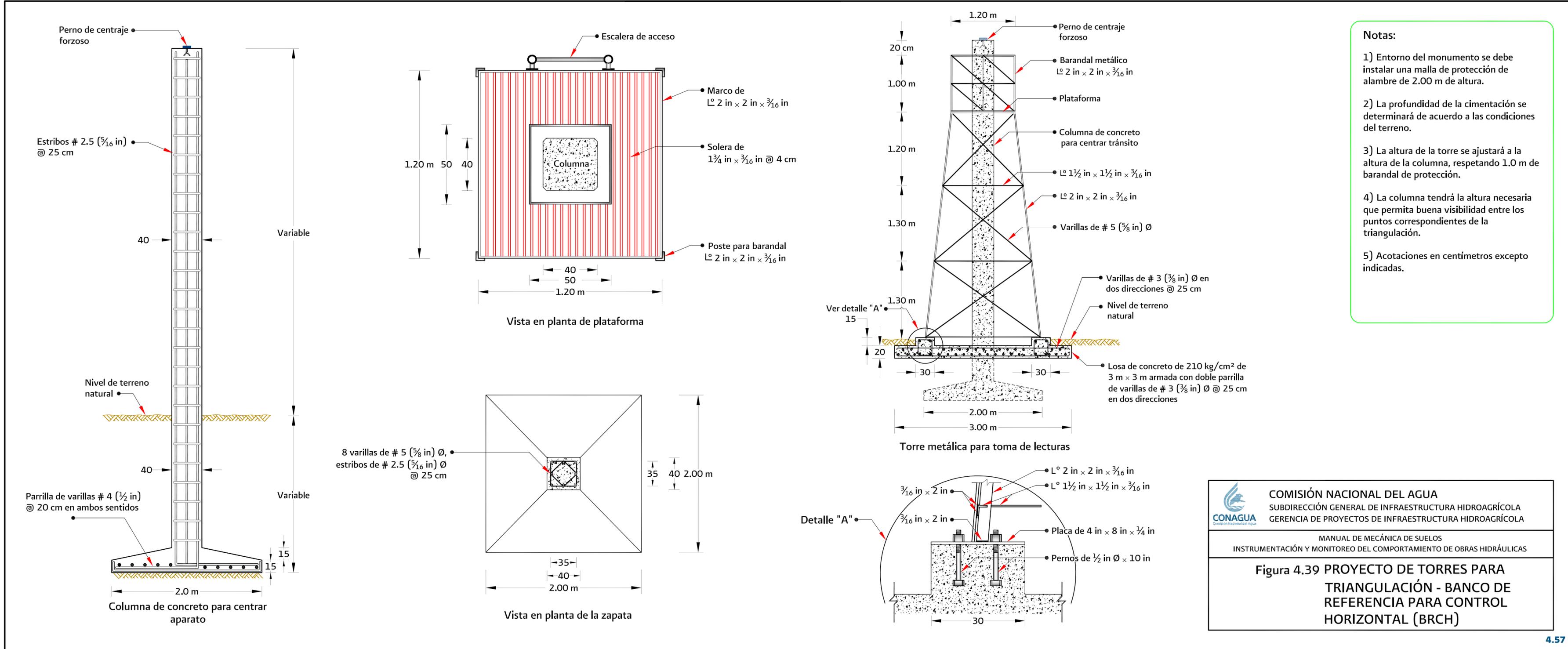
SIMBOLOGÍA

- | | | |
|--------|--------|--|
| ● | ▲ | |
| Planta | Perfil | Nomenclatura |
| ● | ▲ | Testigo superficial para control de movimiento vertical TSMV |

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

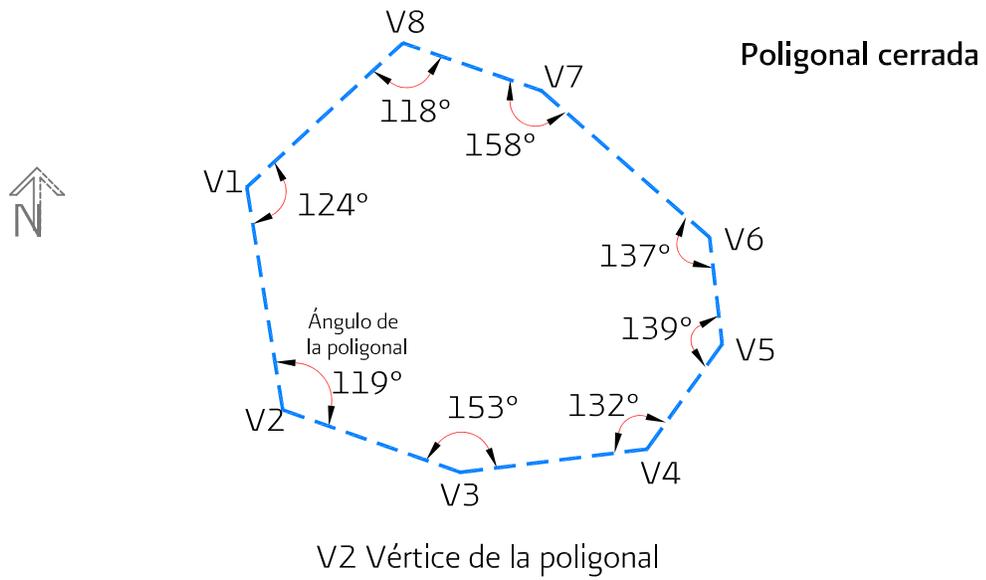
MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 4.38 ASENTAMIENTOS CON EL TIEMPO DE TESTIGOS SOBRE LA CORONA EN ESCALA LOGARÍTMICA

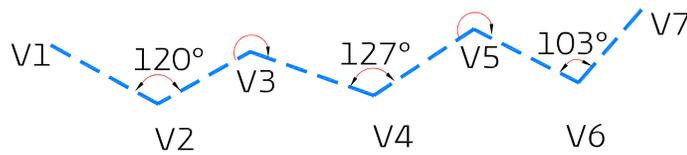


- Notas:**
- Entorno del monumento se debe instalar una malla de protección de alambre de 2.00 m de altura.
 - La profundidad de la cimentación se determinará de acuerdo a las condiciones del terreno.
 - La altura de la torre se ajustará a la altura de la columna, respetando 1.0 m de barandal de protección.
 - La columna tendrá la altura necesaria que permita buena visibilidad entre los puntos correspondientes de la triangulación.
 - Acotaciones en centímetros excepto indicadas.

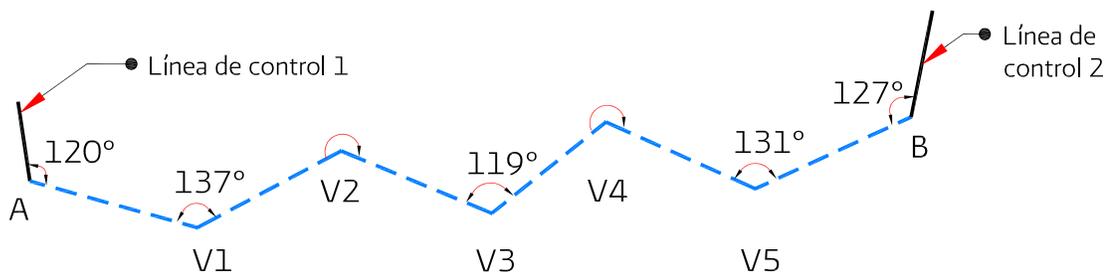

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
 MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS
Figura 4.39 PROYECTO DE TORRES PARA TRIANGULACIÓN - BANCO DE REFERENCIA PARA CONTROL HORIZONTAL (BRCH)



Poligonal abierta sin control



Poligonal abierta con control



A y B puntos de coordenadas y rumbo conocido

Figura 4.40 Tipos de poligonales

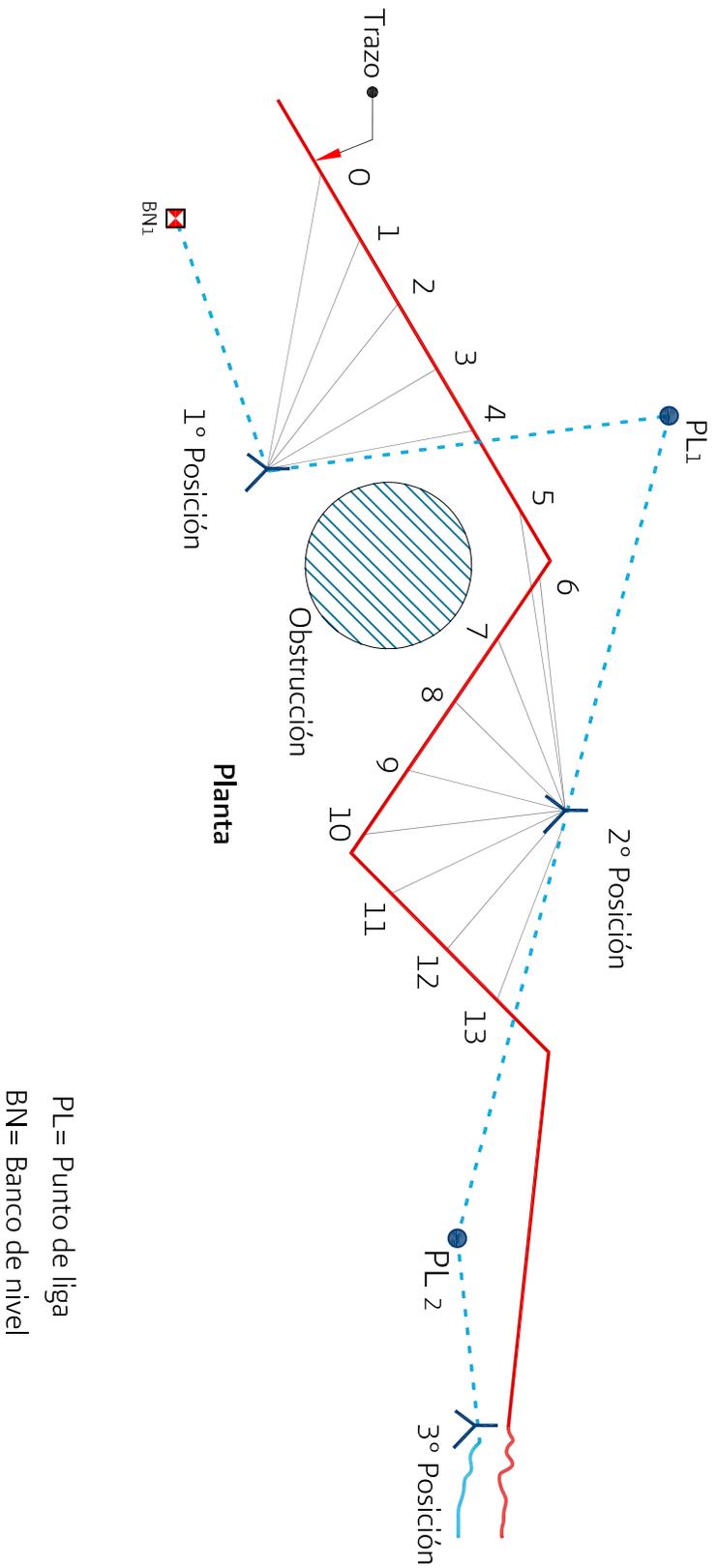
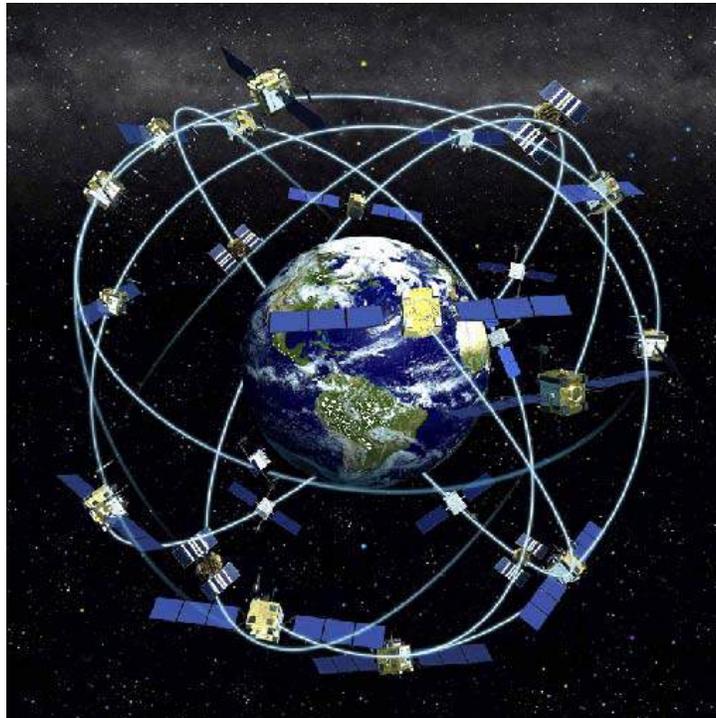


Figura 4.41 Esquema de nivelación



Constelación GLONASS

Fuente: http://4.bp.blogspot.com/_b1AE8x4eLKI/SRdRvcYJ3CI/AAAAAAAAFF0/OJjudoZ1adA/s1600-h/Imagen+9.png



Constelación GPS

Fuente: http://carlospuch.desnivel.com/blogs/files/2010/01/GPS_Sat_02.jpg

Figura 4.42 Configuración orbital de los sistemas GLONASS y GPS



Figura 4.43 Instalación de antenas satelitales de la Red Geodésica Nacional Activa (cortesía INEGI)

Capítulo 5

MEDICIÓN DE MOVIMIENTOS INTERNOS

Durante la construcción de una cortina o terraplén, ocurren movimientos tanto superficiales como internos, debido a los cambios de esfuerzos, presión de poro, creep o efectos secundarios. Asimismo, después de la terminación de la presa, se presentan movimientos importantes durante el primer llenado del embalse. Posteriormente, la velocidad de los movimientos disminuye con el tiempo, con excepción de situaciones extraordinarias como cambios en el nivel del embalse o sismos.

Como parte del proceso de diseño, el ingeniero debe predecir el estado de esfuerzos y deformaciones de la presa en proyecto con base en los resultados de los ensayos de laboratorio y de los análisis numéricos, sin embargo, es necesario comprobar la validez de tales predicciones mediante la observación.

Por tanto, 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.

Los movimientos del terreno, cimentaciones o estructuras térreas pueden ocurrir en cualquier dirección, por tanto, los instrumentos se diseñan para medir

componentes tanto horizontales como verticales del movimiento. Para todas las mediciones de movimientos es fundamental establecer una base de referencia fija.

Los instrumentos que miden movimientos del terreno, cimentaciones o estructuras térreas se pueden agrupar en tres categorías:

- Medición de movimientos superficiales
- Medición de movimientos internos
- Medición de movimientos sísmicos

Este capítulo se ocupa de los movimientos internos de una cortina o terraplén.

5.1 INCLINÓMETROS

Son instrumentos muy versátiles y útiles para medir desplazamientos tanto verticales como horizontales de una masa de suelo o roca, y también para monitorear la estabilidad de terraplenes y taludes. El inclinómetro mide el cambio de pendiente de un ademe guía colocado dentro de un sondeo o en un relleno, mediante el paso de una sonda guiada o fija en su interior.

Se colocan generalmente alineados en secciones longitudinales paralelos a la corona y en secciones transversales aguas abajo, en laderas y taludes, en los vertedores, obras de toma, de excedencia y de desvío.

Los inclinómetros se clasifican en:

- Verticales
- Verticales fijos
- Horizontales
- Horizontales fijos

Dentro de la clasificación, los dos últimos se emplean en terraplenes donde se requiere tener acceso por ambos extremos de la tubería guía, o mediante una polea y un cable es posible deslizar la sonda. Sin embargo, para dis-

tancias 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.

En el presente capítulo, se describen principalmente los dos primeros.

En la Tabla 5.1 se muestran los alcances de algunos transductores de la sonda para inclinómetros.

5.1.1 Inclinómetro vertical

Un sistema de inclinómetro vertical (*inclinometer*) consta de cinco partes básicas (Figura 5.1), que a continuación se describen.

Tabla 5.1 Alcances de algunos transductores de la sonda para inclinómetros (modificado de Dunncliff, 1993)

Tipo de transductor	Ventajas	Limitaciones	Rangos típicos	Precisión aproximada
Acelerómetro de fuerza balanceada	Se han obtenido buenos registros experimentales. Versión disponible con lecturas automáticas, grabación, reducción de datos y aportación de gráficos. Versión disponible para uso en tubos de 3.8 cm (1.5 in) de diámetro interior. Versión disponible para uso en tubos guía horizontales para obtener asentamientos.		±30°, opcional a ±90°	±1-13 mm en 30 m (±0.05-0.5 in en 100 ft)
Indicador de pendiente serie 200B	Grabación automática de información.	La versión estándar es uniaxial. No considera revisión en lecturas automáticas.	±12°, opcional a ±25°	±8-25 mm en 30 m (±0.3-1.0 in en 100 ft)
Cuerda vibrante	Grabación automática de información.	Técnicas de manufactura especial para minimizar la deriva de cero. Transductor voluminoso que dificulta su instalación.	±20°	±3-13 mm en 30 m (±0.1-0.5 in en 100 ft)

Tubos guía o ademes guía (*guide casing*)

Se instalan de manera permanente dentro de una perforación vertical o se van colocando en un terraplén a medida que se construye. El ademe guía se fabrica de plástico o aluminio. Actualmente, el más recomendado es el de plástico ABS (*acrylonitrile/butadiene/styrene*). El ademe tiene cuatro ranuras longitudinales para guiar a la sonda, lo que permite medir la inclinación en dos planos perpendiculares (A y B). El plano A se orienta en la dirección principal del movimiento. La unión entre tramos de tubos guía es mediante acoplamientos telescópicos cuando se prevén asentamientos en el material circundante, de lo contrario la unión es directa entre tramos (Figura 5.2 y Tabla 5.2.).

Unidad medidora hermética y portátil o sonda (*probe*)

Consiste en una carcasa hermética de acero inoxidable en donde se aloja el dispositivo para medir la inclinación. La sonda se une a un cable graduado mediante un conector. El otro extremo del cable graduado termina en la unidad de lectura. La sonda se desliza dentro del ademe, guiada por dos conjuntos de ruedas guía que se introducen en las ranuras longitudinales del ademe. La distancia típica entre los dos conjuntos de ruedas guía es de 50 cm. La sonda se usa para medir la inclinación del ademe con respecto a la vertical y de esta forma detectar cualquier cambio causado por el movimiento del terreno (Figura 5.3 y Tabla 5.3).

Cable eléctrico graduado (*electric cable graduated*)

Se utiliza para subir y bajar la sonda dentro del ademe y para transmitir las señales eléctricas a la superficie. El cable tiene marcas de diferentes colores a cada 50 cm y 100 cm, está enrollado en un carrete con manivela y un seguro de fijación (Figura 5.4 y Tabla 5.4).

Unidad portátil de control, lectura y almacenamiento (*readout*)

Cuya función es proporcionar energía, recibir las señales eléctricas, exhibir las lecturas en forma digital y almacenar los datos (Figura 5.5 y Tabla 5.5).

Polea (*pulley*)

Fabricada de diversos materiales, sirve para que deslice el cable eléctrico graduado sin dañarlo

durante la operación con la sonda dentro de la tubería guía y se sujeta mediante una abrazadera al brocal de ésta (Figura 5.6). La polea se puede sustituir por un aditamento metálico circular ranurado que acopla como tapa en el brocal que permite mantener sujeto al cable eléctrico en posición estable (Figura 5.7).

5.1.1.1 Tubería guía

La tubería guía utilizada para el sistema del inclinómetro se fabrica de plástico, aleación de aluminio o fibra de vidrio. Está provista de cuatro ranuras internas longitudinales diametralmente opuestas (en ángulos de 90°), que sirven de guía a las ruedas de la sonda (Figura 5.8). La tubería guía se deforma debido a los movimientos del suelo, por tanto, está sujeta a esfuerzos de tensión o de compresión. Esto implica que la excesiva flexión, sobre todo en suelos blandos, puede impedir que pase la sonda; en tal caso, se debe instalar la tubería guía en barrenos con mayores diámetros rodeada de lechada blanda.

Tubería guía de plástico

El plástico ABS (*acrylonitrile/butadiene/styrene*) es el material más común empleado para la fabricación de los inclinómetros. Otro tipo de plástico es el PVC (*poly-vinylchloride*), más frágil especialmente a bajas temperaturas. Los tubos se fabrican con diámetros de 48 mm a 89 mm (1.9 in a 3.5 in).

Los **acoplamientos** para los tramos de tubos guía son rígidos, se fabrican del mismo material que la tubería guía y vienen preparados para que las ranuras se autoalineen. Para evitar filtraciones al interior, están provistos de arosellos, o se deben impermeabilizar o cubrirlos con cinta gris reforzada o con algún epóxico. Estos acoplamientos son muy útiles para minimizar el tiempo de instalación y no se requiere de mucha habilidad para su ensamble. Pueden ser telescópicos en un rango de 15 cm (6 in), lo que permite una compresión hasta de 9% cuando se usan tubos guía de 1.5 m (5 ft) de longitud. Para utilizarse en arcillas blandas, donde la compresión vertical puede ser hasta de 30%, se han fabricado acoplamientos para desplazamientos mayores a 15 cm (Handfelt, *et al.*, 1987).

Se debe tener la precaución de no exponer los tubos guía a los rayos solares porque pueden provocarles

Tabla 5.2 Tuberías guía para inclinómetros

Fabricante	Tipo de tubería	Características
Slope Indicator	Rígida de plástico QC	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm
	Rígida de plástico estándar	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 4.8 cm, 7 cm y 8.5 cm
	Rígida de plástico CPI	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm
	Rígida de plástico con cable cortante	Sección principal: Longitud: 1.52 m y 3.05 m Diámetro: 7 cm y 8.5 cm
	Rígida de plástico EPIC	Sección principal: Longitud: 3.05 m Diámetro: 7 cm
Geokon	Rígida de plástico ABS modelo 6400	Sección principal: Longitud: 1.5 o 3 m Diámetro máximo: 7 cm Acoplamiento (sección telescópica) Longitud de compresión: 50.8 cm Longitud de extensión: 66 cm
	Rígida de fibra de vidrio modelo 6500	Sección principal: Longitud: 3 m Diámetro máximo: 7 cm Acoplamiento (sección telescópica) Diámetro: 7.65 cm Longitud: 30 cm
Rst Instruments	Rígida de plástico	Sección principal: Longitud: 1.5 m a 3 m Diámetro externo: 7 cm a 8.5 cm Diámetro interno: 5.9 cm a 7.3 cm Acoplamiento (sección telescópica) Diámetro externo: 7.3 cm a 9 cm Longitud de compresión: 50.8 cm Longitud de extensión: 66 cm

Fuente: Catálogo de los fabricantes

Tabla 5.3 Sondas para inclinómetro vertical

Fabricante	Sonda	Tipo de sensor
Slope Indicator	Digital (Digitilt)	Acelerómetro digital
Geokon	Modelo 6000	Acelerómetro de fuerza balanceada
Rst Instruments	Vertical MEMS	MEMS

Fuente: Catálogo de los fabricantes

torsión o que se incremente su longitud, por lo que se recomienda almacenarlos en la sombra.

Tubería guía de aluminio

Se fabrica con ranuras mediante extrusión. Su diámetro está en el rango de 6.1 cm a 8.6 cm (2.4 in a 3.4 in). Los acoplamientos son ligeramente de mayor diámetro, rígidos y con una longitud máxima telescópica de 15 cm (6 in).

Las tuberías guía de aluminio son susceptibles de corrosión por el agua y los materiales cementantes, por lo que se deben proteger por ambas caras con pintura protectora; no obstante, se puede presentar en los extremos o en los hoyos de los remaches.

Los acoplamientos del tipo telescópico se recomiendan cuando se instalen en materiales deformables, ya que no permitirán que el tubo guía se dañe, sin embargo, pueden ocasionar que la sonda al paso por esta zona no deslice adecuadamente.

5.1.1.1.1 Instalación de la tubería guía

La instalación de los tubos guía del inclinómetro se lleva a cabo de acuerdo con las siguientes condiciones que a continuación se describen.

A. Instalación durante la construcción, manteniendo la tubería por arriba de las terracerías

Este procedimiento consiste en efectuar simultáneamente la sobreelevación de la tubería del inclinómetro conforme avanzan las terracerías hasta llegar a su terminación. Es muy importante cuidar y proteger la tubería guía del paso de la maquinaria pesada.

Para iniciar la instalación de la tubería, primero se

localiza físicamente en el terreno el punto donde se instalará el instrumento, de acuerdo con el proyecto de instrumentación. Posteriormente, se localiza topográficamente el centro de la tubería guía; es necesario disponer de por lo menos de dos monumentos de control topográfico (por si se llegará a presentar daño en alguno de ellos) desde la etapa de construcción para garantizar, de esta manera, la instalación vertical de la tubería del inclinómetro y la orientación adecuada de las ranuras.

Los monumentos deben ubicarse en las laderas de la cortina, diques o bordo, deben tener una elevación mayor que la elevación final del brocal del inclinómetro y de la corona de la cortina (Figura 5.9).

- **Anclaje.** Una vez ubicadas e instaladas las referencias, se inicia el desplante de la tubería guía. El tramo de tubería que va a instalarse en el fondo, se ancla a la cimentación, perforando un barreno a la profundidad marcada en el proyecto, la cual generalmente es de 7 m para asegurar un buen empotramiento cuando el material es roca, puede variar para otro tipo de material. En el extremo inferior se coloca un tapón macho, fijo con 4 remaches pop (ciegos). Se coloca un pasador de acero de 9.5 mm (3/8 in) de diámetro, localizado a 1.52 m del fondo, como tope a la sonda. La parte debajo del pasador sirve como receptáculo para los azolves (Figura 5.10).

Para efectuar la perforación, debe utilizarse una máquina que garantice una barrenación vertical, en suelos blandos donde pueda existir inestabilidad en el barreno, es recomendable utilizar ademe de lodos bentoníticos. Para realizar la perforación es necesario emplear una broca que garantice un barreno con el diámetro especificado en el proyecto, generalmente de 15.24 cm (6 in) SX especificación ASTM-D2113.

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

A continuación, se introduce el tubo guía a la perforación, orientando dos de sus ranuras para que quede en un plano A perpendicular al eje de la cortina; como las ranuras están dispuestas en ángulo recto, las otras quedan paralelas al eje de la cortina (plano B). Al trazarse el punto donde se fija la tubería del inclinómetro, deberá obtenerse el ángulo

Tabla 5.4 Cables eléctricos para la sonda del inclinómetro

Fabricante	Descripción	Características
Slope Indicator	El cable eléctrico puede colocarse dentro de un carrete con anillos deslizantes (<i>slip-ring</i>) que permite tomar lecturas mientras esté operando; el carrete es diseñado con su eje de gran diámetro para evitar dañarlo cuando se enrolle.	Longitud de 30 m, 70 m, 110 m en carrete sin accesorio de anillos deslizantes.
		Longitud de 200 m, 300 m en carrete con accesorio de anillos deslizantes.
Geokon	Están diseñados para una gran variedad de aplicaciones geotécnicas e hidrológicas. Son a prueba de agua, mantienen buena conductividad eléctrica y pueden ser enterrados en el suelo o permanecer embebidos en el concreto. La fabricación del cable consta de uno o más pares de cubiertas con hilos de drenado individuales para protección contra el ruido eléctrico. Una variedad de envolturas están disponibles, incluido el PVC para aplicaciones estándar, el uso de teflón para temperaturas altas y poliuretano para su uso en situaciones donde es necesario una resistencia extra a la abrasión. Cables Kevlar® o Kapton blindados o cables con alambre de refuerzo integral están disponibles para su uso en presas de tierra.	Conductores fabricados de cobre.
		Puede ser colocado en un carrete para su almacenaje.
		Codificación por color y gran variedad de diámetros.
Rst Instruments	El cable empleado es delgado, fuerte, contiene una cubierta de refuerzo tipo Kevlar® que permite su manipulación sin que se rompa, además de que se puede enrollar en un carrete pequeño. Está provisto de marcas de aluminio que envuelven al cable. Las marcas de medición están espaciadas a cada 50 cm. El cable es marcado con color rojo a cada 5 m. La cubierta es de poliuretano altamente resistente a la abrasión y mantiene flexibilidad a bajas temperaturas. Es recomendable no deslizarlo sobre bordes filosos y periódicamente limpiarlo con un paño.	

Fuente: Catálogo de los fabricantes

Tabla 5.5 Unidades de lectura para sonda de inclinómetro

Fabricante	Unidad de lectura	Descripción
Slope Indicator	Grabador de datos VW	Es económica. No se necesita de instalación previa y su funcionamiento es simple. En el panel frontal se encuentran las terminales de conexión rápida que permiten la conexión directa de cables de señal del sensor, lo cual elimina los problemas por pérdidas u olvidos de cables. Fácil de usar con Windows® para recuperar las lecturas y guardarlas en un archivo ASCII delimitado por comas y listo para una hoja de cálculo.
	Grabador de datos EL/MEMS	Empleada para leer sensores MEMS y EL SC. No se necesita de instalaciones previas y su funcionamiento es sencillo. El panel frontal tiene terminales para la conexión rápida y directa del cableado provenientes del sensor. Fácil de usar con Windows® recupera la lectura y la guarda en un archivo ASCII delimitado por comas y listo para hojas de cálculo.
Geokon	Modelo GK-401 VW	Diseñada para cualquier medidor y transductor de Geokon de cuerda vibrante bajo cualquier condición climática. Contiene un cargador de batería, cable de conexión y manual. Se puede manipular para proporcionar lecturas directas. Una versión especial está disponible para uso en ambientes con mezclas de aire-metano.
	Modelo GK-403 VW	Diseñada para cualquier medidor y transductor de Geokon de cuerda vibrante bajo cualquier condición climática. Contiene un cargador de batería, cable de conexión, cable de interfaz RS-232, programa de comunicación y manual. El almacenamiento de las lecturas es una operación sencilla de un solo botón y cada lectura almacenada se identifica por un número de referencia que va desde 1 a 256, más el tiempo, los datos y la temperatura. Todas las lecturas pueden ser transmitidas a una computadora central e importadas a una hoja de cálculo y bases de datos.

Tabla 5.5 Unidades de lectura para sonda de inclinómetro (continuación)

Fabricante	Unidad de lectura	Descripción
Geokon	Modelo GK-404 VW	Es una unidad de mano de baja potencia, capaz de funcionar durante más de 20 horas seguidas con dos pilas AA. Está diseñada para la lectura de todos los medidores de cuerda vibrante. Capaz de mostrar la lectura, ya sea en ocho dígitos, frecuencia (Hz), tiempo (μ s) o microdeformaciones (μ ϵ). El GK-404 también muestra la temperatura del transductor con una resolución de 0.1° C.
	Modelo GK-603 inclinómetro	Es portátil, de uso rudo y fácil de operar, empleado para sondas de inclinómetros y clinómetros sirve para almacenar y analizar datos. Esta fabricada en aluminio con autoiluminación y pantalla de 15 filas por 20 columnas. Emplea una batería recargable de 12 volts a 7 amperes, pero si es desconectada o falla tiene una batería de litio con duración de 4 años.
Rst Instruments	Modelo VW Z106	Es portátil, sirve para leer sondas de cuerda vibrante y termistores (sensores por temperatura). Es precisa, de memoria flexible y de fácil operación. Requiere de tres baterías AA. Puede realizar un diagnóstico del sensor. Los datos pueden ser transferidos a una computadora vía USB, siendo compatible con programa de una hoja de cálculo. Amigable con el programa Windows®.
	Modelo PC de campo ultrarresistente	Proporciona una interfaz de usuario de alto nivel, de memoria líder en la industria, en el análisis de datos <i>in-situ</i> e inmediata sincronización mediante USB con una computadora en la oficina. También ofrece opciones de comunicación inalámbrica. La unidad es sólida lista para operar aun bajo condiciones extremas. Compatible con los MEMS de las sondas de los inclinómetros.

Fuente: Catálogo de los fabricantes

que forma el eje de la cortina o alguna paralela, con una de las líneas de intersección y este mismo ángulo se conserva en la sobre elevación de la tubería, y lograr así que las ranuras siempre estén orientadas, evitando o corrigiendo los posibles giros de éstas. Enseguida se procede a su instalación definitiva, en

la cual debe impedirse el movimiento de la tubería dentro del barreno.

Para lograr un buen empotramiento, se tiene que retacar el espacio entre la pared del barreno y el tubo guía con arena gruesa a fina bien graduada que pase

la malla número 8 (abertura 2.362 mm) o mortero simple, compactándola y dejándola caer lentamente. Se debe introducir una varilla en todo el contorno y efectuar el vibrado a lo largo de la perforación para asegurar no dejar huecos.

Cuando se utiliza lechada se debe usar tubo “tremie”, por fuera de la tubería guía, el exceso de lechada puede ser removido con agua.

El proporcionamiento recomendado se muestra en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Proporcionamiento de la lechada

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

Fuente: Slope Indicator

Se mezcla el agua y el cemento para que se pueda controlar la resistencia de la lechada. A continuación, se agrega la bentonita necesaria hasta que la consistencia de la mezcla sea de una crema espesa. La cantidad de bentonita necesaria varía con el tipo de agua, temperatura y agitación. A los 28 días, la dureza media de la mezcla en suelos de medios a duros debe ser aproximadamente de 7.04 kg/cm² (100 psi), y en suelos blandos aproximadamente de 0.28 kg/cm² (4 psi).

Para evitar la flotación de la tubería guía se utilizan dos métodos:

1. Se coloca el peso suficiente en el fondo o se ancla la tubería en su extremo inferior.
2. Se aprovecha el peso del tubo con que se coloca la lechada.

Las operaciones de sobreelevación se efectúan de diferente forma, dependiendo si la tubería está localizada dentro del núcleo impermeable o dentro de los respaldos de roca; los dos procesos se explican a continuación.

- **Sobreelevación en el núcleo impermeable.** Conforme van avanzando las terracerías, se requiere vigilar la tubería de manera que no sufra golpes con el paso de la maquinaria. Por lo anterior, es preciso protegerla con un terraplén circular de arcilla, compactado con equipo neumático manual (bailarina) o con un pisón. Esta capa es un cono truncado de 4 m de base y de 2 m en la parte superior, con una altura entre 1 m y 1.5 m, como se indica en la Figura 5.11. Se debe proteger la tubería guía con un tapón en la parte superior para evitar que se introduzcan piedras u otros objetos.

Cuando la colocación de las terracerías llegue a 30 cm, por debajo del cono de arcilla, se procede al acoplamiento de un nuevo tramo, cuidando la orientación a sus ranuras; se continúa con el mismo procedimiento de colocar el terraplén de arcilla y sobreelevar la tubería hasta que la elevación del brocal alcance la de proyecto, procurando dejar la tubería unos 25 cm por arriba del nivel de proyecto, y enseguida se realiza su protección definitiva. Esto se logra por medio de un cajón de concreto armado con tapa metálica y pasador portacandado, tal como se indica en la Figura 5.12. Se coloca un tapón en el brocal para dar por terminada su instalación. Se procede a colocar la identificación anotando el número correspondiente en la tapa.

- **Sobreelevación en los respaldos.** Cuando la tubería tenga que atravesar por material de respaldo, que generalmente es grava-arena o rezaga de roca, la protección de la tubería se realiza formando un corral de piedra acomodada a mano de 2 m de diámetro y de 1 m a 1.5 m de altura, rellenando el espacio entre éste y la tubería guía con material grueso a fino (grava-arena), con la misma compactación que el resto del material circundante, como se ilustra en la Figura 5.13.

Las operaciones de orientación de las ranuras de la tubería y acoplamiento de un nuevo tramo se verifican con métodos topográficos, tal como se mencionó anteriormente.

Un procedimiento alternativo para la instalación de la tubería guía en los respaldos consiste en utilizar una caja metálica sin fondo (Figura 5.14), que sirve como protección de la tubería. En el interior de la caja se realiza el acoplamiento del tramo de tubería

y se efectúa la colocación del material circundante en capas de 20 cm, con el mismo peso volumétrico especificado en el proyecto para los respaldos. Cuando la colocación del material circundante a la caja llegue a 30 cm por debajo de su borde superior, se procede a izar la caja una distancia de 2 m con ayuda de una retroexcavadora, y a efectuar el acoplamiento del siguiente tramo de tubería (Figura 5.15).

La posición de la tubería y la orientación de las ranuras debe controlarse mediante métodos topográficos y la verticalidad con nivel de burbuja (Figura 5.16). En el acoplamiento de la tubería debe usarse cinta gris reforzada de 5 cm (2 in).

B. Instalación durante la construcción, conservando la tubería por debajo de las terracerías

Este procedimiento de instalación consiste en conservar la tubería guía por debajo del nivel de colocación de la terracería para proporcionar la protección requerida a fin de que la tubería guía no sea dañada por el equipo de construcción.

Para la protección de la tubería guía durante la sobre-elevación se procede de la siguiente manera: el tubo guía debe sobresalir 15 cm del nivel de desplante de la cortina, se coloca sobre la tubería guía una caja cilíndrica de 25 cm de diámetro y de 60 cm de altura, fabricada con lámina estructural de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ in) de espesor, como se indica en la Figura 5.17, o bien se coloca una caja hecha con tabloncillos de madera de 5.08 cm (2 in) de espesor, con las dimensiones que se muestran en la Figura 5.18.

Cuando la sobre-elevación de las terracerías alcance una altura de 2.3 m por arriba del brocal de la tubería, se procede a efectuar las operaciones previas para acoplar un nuevo tramo, para lo cual se localiza nuevamente la tubería del inclinómetro por métodos topográficos, se procede a excavar una trinchera de aproximadamente 1.5 m \times 1 m hasta encontrar el brocal del tubo instalado.

Posteriormente, se acopla el nuevo tramo, se orienta y se verifica que no tenga giros, se impermeabiliza y se procede a rellenar esta trinchera con el mismo tipo de material que el de las terracerías, y darle la misma compactación de material circundante con equipo manual, hasta llegar a una elevación de 80 cm por debajo de las

terracerías, se procede a tomar lecturas de asentamientos, desplazamientos y elevaciones del brocal. Enseguida se coloca el cilindro de acero de protección o la caja de madera y se termina el relleno hasta llegar al nivel de terracería.

Esta secuencia se repite para cada tramo de tubería por instalar hasta llegar a la elevación de proyecto, donde se efectuarán las mismas actividades comentadas para el otro sistema.

Las etapas de control y orientación topográfica de la tubería guía se realizan de igual forma que para el procedimiento anterior.

5.1.1.1.2 Recomendaciones adicionales en los acoplamientos para deformaciones verticales

La tubería guía debe estar sellada contra el material de relleno. El acoplamiento provisto de arosellos (*o-rings*) no requiere sellado adicional, pero en el caso de duda se coloca cinta, algún epóxico, o remaches, cuidando de que éstos no interfieran con las ranuras o con la trayectoria del sensor.

A continuación, se procede a unir el siguiente tramo, por medio de los coples, que se colocan abrazando a los dos tubos (los traslapes cople-tubo son de 7.5 cm en cada uno de los tramos), lo anterior deja espacio para absorber las deformaciones verticales de 15 cm (Figura 5.19).

Se debe procurar que la tubería y el cople deslicen sin oponer resistencia. Una vez acoplados se impermeabilizan, envolviendo las uniones de los tubos y coples con cinta gris reforzada hasta ± 10 cm de los extremos del cople; esta misma operación de impermeabilizado se realiza en la unión tapón-tubería del fondo.

Para la medición de las deformaciones verticales, se procura dar una mayor adherencia al tubo con el material circundante. Para ello se adiciona a cada tramo de tubo una zapata de asentamiento, como la que se muestra en la Figura 5.20. Las zapatas son del mismo material que la tubería, las cuales se colocan al centro de cada tubo y se fijan por medio de remaches.

Al finalizar la instalación del instrumento, se deberá elaborar una ficha de instalación, como se muestra en la Figura 5.21, que contenga nomenclatura de identificación, croquis de ubicación con coordenadas, fotos y referencias principales, los detalles relevantes de

instalación; tipo, características y dimensiones del instrumento, etc.

5.1.1.2 Sonda

La sonda para inclinómetro vertical, consiste en un cilindro de acero inoxidable (carcasa) a prueba de agua, de 60 cm de longitud y 6 cm de diámetro, en donde se aloja el sensor o dispositivo para medir la inclinación con respecto a la vertical, las dimensiones de la carcasa pueden variar según la marca y modelo. La carcasa está provista de dos pares de ruedas separadas 50 cm como se muestra en la Figura 5.22. Durante la toma de lecturas, la sonda mide la inclinación del ademe en dos planos perpendiculares entre sí, de esta manera se obtiene dos conjuntos de datos o lecturas (A+, B+ y A-, B-). Las lecturas se toman a incrementos fijos de 50 cm a lo largo de toda la profundidad. Por tanto, se pueden calcular las componentes horizontales del movimiento tanto transversal como paralela a una cierta dirección del movimiento. Mediante mediciones periódicas se conoce la magnitud, dirección y velocidad de movimiento del ademe.

Los sensores más comúnmente empleados para medir la inclinación con respecto a la vertical son los siguientes:

- **Transductor de potenciómetro.** Un resistor lineal se activa mediante un péndulo de movimiento libre amortiguado magnéticamente, cuya punta hace contacto con una bobina de resistencia eléctrica, dividiendo a la bobina en dos resistencias que forman la mitad del puente de Wheatstone. La otra mitad del puente, contenida en la caja de control portátil, incluye un potenciómetro de precisión.
- **Transductor con *strain gages*.** Alrededor de un péndulo rígido se adhieren *strain gages* de resistencia eléctrica. La inclinación de la carcasa causa que los *strain gages* produzcan un voltaje que es proporcional al ángulo de inclinación del ademe guía.
- **Transductor con servo-acelerómetro.** Está constituido por un circuito de trayectoria cerrada a base de un servo-acelerómetro. Este tipo de transductor mide el voltaje de salida, que es proporcional al seno del ángulo de inclinación del ademe guía con respecto a la vertical. En general, se utilizan dos servo-acelerómetros colocados en planos

perpendiculares. El voltaje de salida es de 5 volts para 30° de inclinación. Este tipo de sensor es uno de los más sensibles que está disponible comercialmente.

- **Transductor de cuerda vibrante.** Los sensores de cuerda vibrante utilizan un péndulo rígido al cual está unida una cuerda vibrante (Figura 5.23). Los sensores de cuerda vibrante tienen muchas ventajas: un amplio rango de operación, gran sensibilidad, una excelente estabilidad a largo plazo, con una dependencia a la temperatura prácticamente nula, además las lecturas se transmiten sin pérdida de precisión independientemente de la longitud del cable.
- **Transductor con MEMS.** Los MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) representan un avance tecnológico muy importante, estos microsensores han demostrado un comportamiento que supera el comportamiento de los sensores convencionales, además de su bajo costo.

5.1.1.3 Cable eléctrico

El cable conductor para inclinómetro vertical está fabricado de conductores eléctricos individuales de cobre, aislados entre sí, que son trenzados en parejas, atados y protegidos del exterior con revestimiento tipo Mylar (película de poliéster). El número total de conductores en cada cable se determina por el número de sensores y el número de conductores por cada sensor. El cable conductor está blindado contra radiación electromagnética proveniente de equipo eléctrico, descargas eléctricas, líneas de transmisión de corriente eléctrica, transformadores, etc. El cable conductor es flexible, pero con alta resistencia a la tensión si se agrega un revestimiento con acero o kevlar. Se recomienda adquirir el cable de la longitud necesaria para cada instrumento, sin embargo, se puede adquirir el juego de materiales y herramientas (*splice kit*) para realizar los empalmes.

5.1.1.4 Operación

La función principal del inclinómetro es medir los cambios de inclinación del ademe guía con respecto a su posición original (vertical). La sonda del inclinómetro obtiene dos conjuntos de datos o lecturas (A+, B+

y A-, B-), en planos verticales perpendiculares entre sí. El eje A es el eje principal de referencia, se orienta para que registre el componente principal del desplazamiento previsto, en consecuencia el eje B es el eje secundario (Figura 5.24).

La base de las mediciones subsecuentes son las lecturas iniciales, que constituyen el perfil inicial. Se recomienda que las mediciones las efectúe el propio operador con el mismo instrumento. Asimismo, se recomienda que una vez que se ha fijado el incremento de lectura (50 cm) no se cambie dicho incremento, ya que puede dar origen a conclusiones erróneas.

A partir del fondo y hacia arriba, para cada profundidad de medición, se toman las lecturas A+ y B+, a lo largo de todo el tubo guía, se extrae la sonda y se gira 180° y se toman las lecturas A- y B-. El cálculo de las diferencias entre estos dos grupos de lecturas (A+, A-) y (B+ y B-) reduce los errores producidos por irregularidades en la ranura del tubo guía y por la calibración del aparato. Una verificación de la confiabilidad de cada medición consiste en obtener la suma algebraica de las dos lecturas a cada profundidad y que ésta resulte aproximadamente constante. Cuando la suma algebraica no resulta constante, se debe revisar el sensor, la unidad lectora o el ademe guía.

5.1.1.4.1 Toma de lecturas

Se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Verifique el equipo completo del inclinómetro: sonda, cable eléctrico graduado, polea, etc. (Figura 5.1).
2. Coloque la polea con su eje de rotación a 30 cm de la parte superior guía mediante el ajuste de su abrazadera.
3. Conecte la sonda con el cable eléctrico graduado.
4. Introduzca suavemente la sonda con las ruedas alineadas al eje A.
5. Descienda la sonda dentro de la tubería guía, de preferencia 6 m (20 ft) bajo el nivel del agua.
6. Espere aproximadamente 10 min para que se establezca la temperatura y las lecturas sean consistentes.
7. Descienda la sonda lentamente a lo largo de la tubería guía hasta llegar al fondo.
8. Mediante el uso de la polea y el cable, haga ascender la sonda hasta la profundidad de lectura.
9. Anote la lectura de profundidad con el cable graduado.

10. Tome las lecturas A+ y B+ con la unidad portátil de lectura.
11. Al terminar la toma de lecturas para el eje A, extraiga la sonda y gírela 180°; repita los pasos 8 a 10, ahora para tomar las lecturas A- y B-.

- **Procesamiento de las lecturas de inclinómetros.** Para efectuar el procesamiento de las lecturas del inclinómetro, lo más práctico es utilizar el software desarrollado por el fabricante. Esto ofrece una combinación de rapidez y eficiencia, evita los errores de transferencia de datos; además, los datos procesados se pueden presentar en una gran variedad de formatos (Figura 5.25 y Tabla 5.7).

Cálculo de los desplazamientos horizontales

La Tabla 5.8 (véase anexo A) muestra un ejemplo de cálculo de los desplazamientos horizontales:

$$\text{Lectura (A+)} = c \times \text{sen } \theta$$

$$\text{Constante (c) en el sistema métrico} = 25\,000$$

$$\text{Desviación lateral} = \text{Intervalo de medición} \times \text{sen } \theta$$

$$\text{Desviación lateral} =$$

$$0.5 \text{ m} \times (\text{lectura promedio})/25\,000$$

$$\text{Desplazamiento} = \text{intervalo de medición} \times (\text{suma actual} - \text{suma inicial})/(2 \times 25\,000)$$

Cálculo de las deformaciones verticales

La medición de las deformaciones verticales es empleando la sonda sujeta con una cinta métrica o cable de acero graduado. Al introducirla al tubo guía y cuando las ruedas inferiores se sientan que se localizan en el extremo inferior de cada uno de los tramos en los acoplamientos telescópicos se toma la profundidad considerando un nivel de referencia marcado en la parte superior del tubo guía, y así se continúa conforme aumenta la altura del terraplén y con el paso del tiempo (Figura 5.19). Las separaciones que hay entre tramo y tramo de la tubería se van reduciendo a medida que el material del terraplén se va asentando (Tabla 5.9 véase anexo A).

5.1.1.4.2 Presentación de resultados

Los desplazamientos horizontales se representan gráficamente de acuerdo a una convención de signos, tomándose de la siguiente manera: positivo (+) para desplazamientos hacia aguas abajo o margen derecha, y negativo (-) para los ocurridos hacia aguas arriba o hacia

Tabla 5.7 Programas para el procesamiento de datos del inclinómetro

Fabricante	Programa	Descripción	Especificaciones
Slope Indicator	Digipro para Windows®	Procesa y grafica los datos registrados por la consola de medición Digitilt DataMate. Genera gráficos de alta resolución y los parámetros los almacena para su reutilización. El programa también proporciona rutinas de corrección y gráficos de diagnóstico que pueden mejorar la precisión y elimina horas de trabajo de hojas de cálculo.	<p>Gráfico estándar: desplazamiento incremental, desplazamiento acumulado y gráficos de tiempos de desplazamiento.</p> <p>Diagnóstico gráfico: desviación incremental, desviación acumulada y las sumas de control (<i>checksum</i>) para la verificación.</p> <p>Rutinas de corrección: la orientación del tubo guía, sesgo, desplazamiento y rotación del sensor. También procesa los datos de asentamientos y los datos espiral generados por el programa DataMate Manager.</p>
Geokon	Programa modelo-8001-2	Simplifica las tareas de configuración, comunicación y monitoreo en la adquisición de datos utilizado en el registrador de datos modelo LC-1. Incluye formulario de configuración, una pantalla para las mediciones, recopilación de datos en tiempo real basado en un monitor y emulador terminal (que permite ejecutar un programa de computadora). La forma de reducir datos incluye un editor de archivos. La hoja de cálculo es compatible con Excel. La hoja de cálculo se puede cargar y guardar archivos de Excel versión 4.0/5.0/95 y crear tablas en HTML para su uso en Internet.	<p>Requisitos del procesador: 486 funcionando a 25 MHz (mínimo) Pentium / Pentium Pro / Pentium II (o equivalente) o superior funcionando a 166 MHz o superior.</p> <p>Memoria requerida: 8 MB (mínimo), 32 MB o más (recomendado).</p> <p>Disco duro requerido: 12 MB (mínimo), 20 MB o más (recomendado).</p>

Tabla 5.7 Programa para el procesamiento de datos del inclinómetro (continuación)

Fabricante	Programa	Descripción	Especificaciones
Rst Instruments	Rst Inclinalysys™ digital	<p>Es la herramienta de programación para los inclinómetros Rst MEMS Digitales. Permite al usuario de forma rápida y eficaz reducir volúmenes de datos en una gran variedad de formatos adecuados para el análisis y su presentación. Utiliza una interfaz multidocumentos, para que el usuario sea capaz de ver los datos de varias formas simultáneamente en la pantalla. Botones que con sólo pulsarlos crean presentaciones de datos en cuestión de segundos. Las presentaciones se pueden guardar como los informes individuales, lo cual permite flexibilidad en obtención de datos múltiples o para un solo sitio.</p> <p>Los datos se organizan en una estructura de archivos estándar que hace la importación de datos sin interrupción con PC de campo ultrarresistente.</p>	<p>Crea gráficos personalizados, vista de texto, gráficos vectoriales o de tiempo.</p> <p>Con sólo pulsar una tecla se puede obtener la desviación media, el desplazamiento incremental, posición absoluta, el desplazamiento acumulado, suma de comprobación, la trama del tiempo y gráficos vectoriales.</p> <p>El usuario puede definir la configuración de propiedades en los ejes X y Y como la escala, las unidades, las etiquetas y las líneas de división.</p> <p>Capacidad para leer una variedad de tipos de archivos de los inclinómetros: *.csv, *.rpp, *.bch.</p> <p>Soporte para la conversión de tipos de archivos en espiral: *.rpp, *.txt, *.prn, *.twi.</p> <p>Conversión de unidades entre milímetros, metros, pulgadas o pies.</p> <p>Selección de zonas de movimiento para gráficos en tiempo o vectorial.</p>

Fuente: Catálogo de los fabricantes

margen izquierda. Se representa el perfil acumulado del desplazamiento sobre un eje vertical, se anotan las correspondientes elevaciones del brocal y el del fondo de la tubería del inclinómetro, que deben representarse sobre el perfil o eje río, lo cual se realiza a una escala donde sea posible apreciar adecuadamente los movimientos.

Para su interpretación, es importante anotar el avance de construcción y la correspondiente curva de embalse en una gráfica por separado; se deberán anotar también las fechas de lectura, e identificar las gráficas con el número que le corresponda para su correlación.

Generalmente se presentan los movimientos registrados en dos etapas: “durante la construcción” y “en operación”, presentando para tal efecto dos formatos con sus correspondientes movimientos ocurridos.

Cada inclinómetro se identifica con un número, asignado en el proyecto; para ilustrar la presentación de los desplazamientos horizontales, un ejemplo se muestra en la Figura 5.26, en la que se aprecian los desplazamientos de la sección según el eje río y cortina.

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

Para representar estas deformaciones, antes hay que referenciar la tubería con sus correspondientes tramos y elevaciones y así mismo presentar fecha, número de gráfica y la planta de localización, así como los correspondientes movimientos representados sobre una escala horizontal con sus magnitudes dadas en centímetros, como se puede apreciar en el ejemplo mostrado en la Figura 5.27.

5.1.1.4.3 Mantenimiento

La sonda del inclinómetro debe tener un mantenimiento preventivo frecuente. Después de usar la sonda se debe limpiar, apretar y aceitar las ruedas; cuando sea necesario, las ruedas se deben reemplazar. Se limpian y secan los conectores para evitar corrosión. La sonda se debe verificar frecuentemente en el campo, ya sea mediante el dispositivo proporcionado por el fabricante o con la instalación de un tramo de tubo guía en una zona alejada de la obra, que se use como referencia; cualquier lectura diferente a la inicial representa variaciones en la precisión del aparato o fallas de operación.

Cuando menos una vez al año, es necesario enviar la sonda al laboratorio del fabricante para su calibración y mantenimiento.

5.1.2 Inclinómetro vertical fijo

Los inclinómetros verticales fijos (*vertical in-place inclinometers*) consisten en una serie de sondas (Figura 5.28), 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 datos obtenidos se pueden recuperar en forma remota y el sistema se puede programar para la detección de alertas.

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.

El procesamiento de datos y los tubos guía utilizados son similares a los inclinómetros verticales. No obstante, 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 (Figura 5.29).
- Un tubo de conexión (*gauge tubing*) o una serie de n tubos de conexión
- Un par de ruedas superiores, un par de ruedas inferiores o de fondo y un conjunto de $n-1$ pares de ruedas intermedias
- Cable conductor
- Cable de suspensión
- Un cable de seguridad
- Un juego de herrajes metálicos de seguridad
- Unidad portátil de lectura

Los tubos de conexión son de 1 m, 2 m, o 3 m de longitud. El par de ruedas superiores tienen una armella cerrada para atar el cable de suspensión de acero inoxidable y un enchufe para conectar el tubo de conexión. El par de ruedas inferiores o de fondo es el extremo inferior de todo el sistema. El par de ruedas intermedias sirve de enlace entre el fondo de un sensor y el enchufe del tubo de conexión. Por último, el cable de seguridad se ata al sensor superior para prevenir la pérdida de sensores durante la instalación. En caso necesario, el cable de seguridad también sirve para extraer los sensores del tubo guía.

5.1.2.1 Instalación del sistema de inclinómetro fijo

Se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Verifique cada sensor (véase el manual del fabricante).
2. Anote el número de serie de cada sensor y la profundidad de instalación.
3. Verifique las longitudes de cable y póngales una etiqueta.
4. Marque los sensores en el orden de instalación.
5. Determine la distancia entre las ruedas superiores y el brocal del tubo guía. Corte una longitud de cable de suspensión de la longitud determinada.
6. Conecte el cable de suspensión a las ruedas superiores.
7. Conecte el cable de suspensión a la cadena.
8. Remueva el tornillo del enchufe.
9. Alinee el agujero del tubo medidor con el agujero del enchufe.
10. Inserte el tornillo y apriételo.
11. Sostenga el tubo de conexión mientras conecta los sensores adyacentes.
12. Sujete el cable al tubo de conexión.
13. Tienda los sensores en el orden de instalación.
14. Ate el cable de seguridad al primer sensor.
15. Baje el sensor dentro del tubo guía.
16. Sostenga el tubo de conexión mientras conecta el siguiente sensor.
17. Continúe así hasta introducir todos los sensores.
18. Elabore la ficha de instalación.

Se recomienda leer el manual de instrucciones del fabricante para más detalles de instalación.

5.1.2.2 Cálculo y presentación de resultados

La recuperación de los datos se realiza de manera automatizada debido a la gran cantidad de lecturas y cálculos que se generan simultáneamente, para lo cual se recurre al software de cada fabricante. Durante el procesado de la información se pueden aplicar correcciones por temperatura y analizar el desplazamiento sensor por sensor, para después generar la representación gráfica a través de todo el sistema y de este modo determinar zonas críticas siguiendo la misma convención de signos definidos para los inclinómetros verticales.

5.1.3 Inclinómetro horizontal

Un sistema de inclinómetro horizontal (*horizontal inclinometer*) consta de seis partes básicas (Figura 5.30) que a continuación se describen.

Tubería guía

Se instala en una zanja o en un barreno. Las características de la tubería guía son las mismas que las descritas para inclinómetros verticales. Un par de ranuras se orienta en un plano vertical, por tanto se tiene una ranura superior y una ranura inferior. Su diámetro está en el rango de 70 mm a 85 mm (2.75 in a 3.34 in), y es recomendable el uso de tubería de ABS. No se utilizan secciones telescópicas.

Sonda

Es semejante a la descrita para inclinómetro vertical y mide la inclinación a lo largo del tubo guía en dos planos perpendiculares (Figura 5.31). Las ruedas fijas (*fixed wheels*) de cada extremo de la carcasa se colocan en la ranura inferior y las ruedas móviles (*sprung wheels*) en la ranura superior. La carcasa de la sonda tiene conectores idénticos en cada extremo (conectores 1 y 2). Cuando la sonda está horizontal y se eleva el conector 1, la lectura será un valor positivo, el caso inverso será negativo, como se muestra en la Figura 5.32.

Cable de tracción (*pull cable*)

Se fabrica de acero inoxidable y se usa para cada operación de lectura, se deja dentro del tubo guía al terminar las operaciones de lectura. Se recomienda el uso de un carrete para manipular el cable de tracción (Figura 5.30a).

Polea de extremo cerrado (*dead-end pulley*)

Cuando se instala un tubo guía con un extremo lejano cerrado, como se ilustra en la Figura 5.30b, es necesario colocar una polea en el extremo cerrado de la tubería guía para realizar las maniobras de deslizamiento de la sonda en el interior de la tubería guía.

Cable de control (*control cable*)

Se usa para conocer la posición de la sonda, enviar energía eléctrica a los sensores y transmitir las lecturas a la unidad de lectura.

Unidad de lectura

Su función es proporcionar energía a los sensores, recibir las señales eléctricas, exhibir y almacenar las lecturas.

5.1.3.1 Instalación de la tubería guía

Las condiciones del sitio de instalación son muy variadas, por lo cual aquí sólo se darán recomendaciones de carácter general.

1. Instale la tubería guía con un par de ranuras orientadas en el plano vertical. Se pierde precisión cuando las ranuras tienen desviaciones de más de 3° .
2. Marque en la parte externa del tubo guía la posición de la ranura superior.
3. Cada vez que agregue un nuevo tramo de la tubería guía, verifique la verticalidad de la ranura mediante una plomada y nivel de albañil.
4. Mantenga los tramos de tubería guía dentro de las cajas de envío y a la sombra.
5. Limpie cuidadosamente los extremos de la tubería guía antes de ensamblarla al tramo anterior.
6. Verifique que el cable de tracción tenga una longitud mayor que la longitud total de la tubería guía. Esto facilita su operación en campo.
7. Utilice un carrete para enrollar y manipular el cable de tracción.
8. Verifique que las dimensiones de la zanja sean de 50 cm de ancho y 60 cm de profundidad, o las que especifique el proyecto de instrumentación.
9. Verifique que la zanja tenga una pendiente de 3% para facilitar el drenaje.
10. Coloque una capa de arena de 15.24 cm (6 in) de espesor, en el fondo de la zanja; verifique que la capa de arena quede horizontal.
11. Verifique que la compactación del relleno en la zanja satisfaga las especificaciones de construcción.
12. Coloque un trapo en el extremo del tubo guía que ayude a ubicarlo para la conexión del siguiente tramo.
13. Mantenga limpia la tubería guía, proteja su extremo con un tapón.
14. Verifique la orientación de la tubería guía (verticalidad de las ranuras).
15. Al terminar la instalación de la tubería guía, coloque la polea de extremo cerrado si es el caso.

16. Cubra toda la tubería guía con arena y compáctela de acuerdo con las especificaciones de construcción. Cerciórese de no mover la alineación de la tubería guía.
17. Proteja los extremos de la tubería guía con un cajón de concreto armado con tapa metálica galvanizada y portacandado.
18. Coloque la leyenda de identificación del inclinómetro.
19. Elabore la ficha de instalación.

5.1.3.2 Operación

La función principal del inclinómetro es medir los cambios de inclinación del ademe guía con respecto a su posición (estación) 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 (Figura 5.30).

La base de las mediciones subsecuentes son las lecturas iniciales, que constituyen el perfil inicial. Se recomienda que las mediciones las efectúe el propio operador con el mismo instrumento. Asimismo, se recomienda que una vez que se ha fijado el incremento de lectura (50 cm) no se cambie dicho incremento, ya que puede dar origen a conclusiones erróneas.

A partir del extremo remoto y hacia el extremo opuesto, para cada localización de medición (estación) 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-. El cálculo de las diferencias entre estos dos grupos de lecturas (A+, A-) y (B+ y B-) reduce los errores producidos por irregularidades en la ranura del tubo guía y por la calibración del aparato. Una verificación de la confiabilidad de cada medición consiste en obtener la suma algebraica de las dos lecturas a cada profundidad y que esta resulte aproximadamente constante. Cuando la suma algebraica no resulta constante, se debe revisar el sensor, la unidad lectora o el ademe guía.

La diferencia de elevación entre los conectores (1 y 2) está dada por $L \sin \theta$, donde L es la distancia entre los ejes de las ruedas (50 cm) y θ es el ángulo de

inclinación de la sonda con respecto a la horizontal. 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:

Asentamiento en la estación

$$\Delta = \sum_1^n (L \operatorname{sen} \theta_n)_{\text{actual}} - (L \operatorname{sen} \theta_n)_{\text{inicial}}$$

5.1.3.2.1 Toma de lecturas

Antes de efectuar la toma de lecturas, permita que el sensor alcance la temperatura de equilibrio del interior de la tubería guía.

Se realiza el mismo procedimiento del inclinómetro vertical.

La captura de datos se realiza pasando dos veces la sonda del inclinómetro a través de la tubería guía para obtener las lecturas A+ y A-.

- **Lecturas A+ (0)**

1. Retire los tapones protectores de los conectores 1 y 2.
2. Sujete el conector 1 con el cable que jalará al sensor; mientras en el conector 2 será el cable eléctrico graduado hacia la unidad de lectura.
3. Asiente las ruedas fijas sobre la ranura inferior y las móviles en la ranura superior (plano A).
4. Tirando del cable, colóque el sensor en el extremo interno del tubo guía.
5. Ubique el sensor jalando el cable eléctrico graduado.
6. Registre la lectura en forma manual o mediante programa, después que se establezca la información.
7. La toma de lectura se concluye cuando la sonda llegue al extremo externo del tubo guía.

- **Lectura A- (180)**

8. Retire la sonda para intercambiar los cables.
9. Sujete el conector 2 con el cable que jalará al sensor; mientras en el conector 1 será el cable eléctrico graduado. Esto es posible debido a que el funcionamiento de la sonda es reversible.
10. Continúe con los pasos del 3 al 7.
11. Retire completamente el sensor.

12. Desconecte cables y coloque tapones de protección al sensor y las tapas al tubo guía.
13. Dé mantenimiento preventivo a la sonda (revisión, limpieza y aceiteada).

El promedio de la suma algebraica de las lecturas 0 y 180 para una misma posición será la lectura definitiva.

5.1.3.2.2 Cálculo y presentación de resultados

Bajo el principio de operación, lo que interesa es conocer el desplazamiento horizontal del tubo guía que se ha alejado de su posición original, o sea:

$$\text{Lectura (A+)} = c \times \operatorname{sen} \theta$$

Constante (c) en el sistema métrico = 25 000

Desviación lateral = Intervalo de medición x $\operatorname{sen} \theta$

Desviación lateral = 0.5 m x (lectura promedio)/25 000

En que 0.5 m es la distancia entre ejes de las ruedas inferiores del sensor.

Desplazamiento = Intervalo de medición x (suma actual - suma inicial)/(2 x 25 000).

Después de tener el registro de la ubicación con respecto al desplazamiento, se puede generar un plano similar al que se muestra en la Figura 5.26 para los inclinómetros verticales.

5.1.4 Inclinómetro horizontal fijo

Los inclinómetros horizontales fijos (*horizontal in-place inclinometers*) se componen de uno o varios sensores dispuestos en serie en una ubicación definida y colocados en forma horizontal dentro 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 (Figura 5.33).

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.

Para la instalación, se marca el orden y los componentes por utilizar, se introduce al tubo guía sensor por sensor mediante empuje y después tirando de ellos para

que se mantengan en tensión y dentro de su posición definitiva, cuidando que los cables no se crucen o doblen y manteniendo 15.24 cm (6 in) expuesto para continuar con la conexión del siguiente.

Para recuperar los sensores, se desmontan uno por uno debido a que se puede correr el riesgo de dañar el mecanismo de las ruedas si se trata de realizarlo en un solo paso.

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 (Figura 5.34a): los desplazamientos negativos indican el movimiento hacia arriba, mientras que los positivos son hacia abajo.

b) Extremo cercano de referencia (Figura 5.34b): los desplazamientos negativos indican movimiento hacia abajo, mientras que los positivos son hacia arriba.

Para su operación, adquisición de datos, cálculos y representación de resultados, se realizan los pasos indicados para el inclinómetro vertical fijo (apartado 5.1.2) y para mayores detalles véase específicamente el manual correspondiente al instrumento.

5.2 CLINÓMETROS

El clinómetro (*tilt meter*) 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.

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

La Figura 5.35 muestra varios modelos de clinómetros y la Tabla 5.10 contienen las características de fabricación de estos instrumentos.

El sistema básico que compone a un clinómetro 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.

5.2.1 Dispositivo metálico de fijación

Existe una diversidad de dispositivos metálicos de fijación, según el fabricante y el modelo. Para el uso de clinómetros mecánicos, el sistema de fijación consiste en dos anclas metálicas con cabezas esféricas de referencia. Para montar un clinómetro portátil, se usa una placa circular fabricada de bronce de 13.97 cm (5.5 in) de diámetro. La placa tiene cuatro agujeros para fijarse con tornillos a la superficie o estructura; además, tiene cuatro clavijas que sobresalen de su superficie, cuya función es sujetar al sensor. Otro dispositivo de fijación consiste en utilizar perfiles de acero (ángulos).

5.2.2 Tipos de sensores

5.2.2.1 Sensor mecánico

Es un dispositivo que consta de una barra, un nivel de burbuja y un micrómetro. La barra se fija al par de anclas con cabeza esférica. Mediante el nivel de burbuja, se verifica que la barra esté horizontal. El movimiento vertical se mide con el micrómetro.

Tabla 5.10 Clinómetros

Tipo	Fabricante	Especificaciones
Portátil	Slope Indicator	<p>Especificaciones métricas inclinómetro Tipo de sensor: acelerómetro Digitilt Rango: $\pm 53^\circ$ Resolución: 8 segundos de arco Sistema repetitividad: ± 50 segundos de arco Rango de temperatura: -20 a 50° C Las especificaciones de la placa base Tamaño: 14 cm (5.5 in) de diámetro Material: bronce Montaje: tornillos o pegamento epóxico</p>
Clinómetro	Slope Indicator	<p>Tipo de sensor: de inclinación uniaxial electrolítico, trabaja directamente con el adquisidor de datos Campbell Scientific. La señal condicionada versión SC ofrece compatibilidad con otros adquirentes y grabadores de datos. Rango: ± 40 minutos de arco Resolución: 1 segundo de arco Repetitividad: ± 3 segundos de arco Rango de temperatura: de -20 a 50° C Tamaño: 12.5 cm x 8 cm x 5.9 cm (5 in x 3.2 in x 2.3 in)</p>
MEMS Monopod	Slope Indicator	<p>Tipo de sensor: MEMS para lectura de clinómetros y un termistor de $3\text{ k}\Omega$ para lectura de temperatura. Rango: $\pm 10^\circ$ Resolución: 9 segundos de arco Repetitividad: ± 22 segundos de arco Tamaño: 3.2 cm x 19 cm (1.25 in x 7.5 in)</p>
Sumergible MEMS	Rst Instruments	<p>Rango: $\pm 15^\circ$ (otros rangos sobre pedido) Resolución: ± 5 segundos de arco (± 0.25 mm/m) (10 Hz BW) (o mejor, dependiendo del método de lectura) Repetitividad: $\pm 0.025\%$ F.S. ($\pm 0.0125\%$ F.S. para la salida digital) Tipo de sensor: sensor de inclinación de MEMS (<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>) Excitación: 8-15 VCD Temperatura de funcionamiento: -40 a 85° C Lectura: IC6800-V (analógico), PC de campo ultrarresistente (digital) Adquisidor de datos: Datalogger flexDAQ (tanto para los sistemas analógicos y digitales)</p>

Tabla 5.10 Clinómetros (continuación)

Tipo	Fabricante	Especificaciones
Portátil MEMS	Rst Instruments	<p>Placa del clinómetro Material: acero inoxidable 316 Dimensiones: 1.4 cm x 6.3 cm x 1.4 cm Peso: 0.77 kg Sensor del clinómetro Rango: $\pm 15^\circ$ (otros rangos sobre pedido) Resolución: ± 5 segundos de arco (± 0.025 mm/m) (10 Hz BW) (mejor, dependiendo de la técnica de lectura) Repetitividad: $\pm 0.025\%$ F.S. Sensor: sensor de clinómetro MEMS Material: acero inoxidable/aluminio NEMA 4X (IP-65) resistente al medio ambiente Unidad de lectura: IC6800-S</p>
MEMS en el lugar	Rst Instruments	<p>Rango: $\pm 15^\circ$ (otros rangos sobre pedido) Resolución: segundos de arco (± 0.25 mm/m) (10 Hz BW) (mejor, la lectura depende del método) Repetitividad: $\pm 0.025\%$ F.S. ($\pm 0.0125\%$ F.S. para la salida digital) Tipo de sensor: MEMS (Micro system-Electro-Mechanical System) inclinómetro Excitación: 8-15 VCD Temperatura de operación: -40° a 85° C Unidad de lectura: IC6800-V (analógico), PC de campo ultrarresistente (digital) Adquisidor de datos: Datalogger flexDAQ (tanto para los sistemas analógicos y digitales) Dimensiones: 8 cm x 8 cm x 6.1 cm Longitud del medidor: 1 m, 2 m o 3 m</p>
Vliga clinómetro MEMS	Rst Instruments	<p>Rango: $\pm 15^\circ$ (otros rangos sobre pedido) Resolución: ± 5 segundos de arco (± 0.25 mm/m) (10 Hz BW) (o mejor, de la lectura depende del método) Repetitividad: $\pm 0.025\%$ F.S. ($\pm 0.0125\%$ F.S. para la salida digital) Tipo de Sensor: MEMS inclinómetro Excitación: 8-15 VCD Temperatura de operación: -40 a 85° C Unidad de lectura: IC6800-V (analógico), PC de campo ultrarresistente (digital) Adquisidor de datos: Datalogger flexDAQ (tanto para los sistemas analógicos y digitales) Dimensiones de la barra de fibra de vidrio: 5.1 cm x 5.1 cm Longitud del medidor: 1 m, 2 m o 3 m</p>

Tabla 5.10 Clinómetros (continuación)

Tipo	Fabricante	Especificaciones
Portátil Modelo 6201	Geokon	Rango estándar: $\pm 30^\circ$ Resolución: ± 10 segundos de arco (± 0.05 mm/m) Precisión: $\pm 0.1\%$ F. S. Salida @ 30° : ± 5.00 VDC Rango de temperatura: 0° C a 50° C Supervivencia de choque: 1,000 g L x W x H: 15.9 cm x 8.9 cm x 14.3 cm
De cuerda vibrante modelo 6350	Geokon	Rango estándar: $\pm 10^\circ$ Resolución: ± 10 segundos de arco (± 0.05 mm/m) Precisión: $\pm 0.1\%$ F.S. Rango de temperatura: -20° C a $+50^\circ$ C Longitud x diámetro: 13.9 cm x 3.2 cm
De sensor electrolítico modelo 6700	Geokon	Rango estándar: ± 15 minutos de arco ($\pm 1^\circ$, $\pm 3^\circ$) Resolución: 0.03% F.S. Repetitividad: 0.3% F.S. Rango de temperatura: -20° C a $+50^\circ$ C Error térmico máximo: 0.2% F.S. / $^\circ$ C Impedancia del sensor: 12 k Ω Longitud de la barra: 1 m o 2 m
De péndulo modelo 6850	Geokon	Rango estándar: (eje X) 0 cm a 5 cm; (eje Y) 0 cm a 5 cm Resolución: 0.01 mm Precisión: mejor que 0.1 mm Tiempo de medición: 60 s Temperatura de operación: -15° C a $+60^\circ$ C L x W x H: 38 cm x 33 cm x 14.5 cm

Fuente: Catálogo de los fabricantes

Los movimientos relativos en el plano vertical se registran como cambios en la lectura del micrómetro de carátula. La precisión es de ± 0.013 mm (± 0.0005 in) para barras de hasta 20.32 cm (8 in) de largo, disminuyendo a ± 0.13 mm para un largo de 90 cm (3 ft). Estos valores corresponden a ± 13 segundos y 29 segundos de arco respectivamente.

5.2.2.2 Sensor con servo-acelerómetro

Es un equipo portátil para medir la inclinación tanto en un plano vertical como horizontal. Tiene una placa de referencia metálica o de cerámica que se fija a la superficie por medio de tornillos o adherido, lo cual ayuda a aumentar la precisión. La medida se realiza en una posición fija, se toma la lectura y se gira el clinómetro 180°

y se vuelve a tomar la lectura para verificar la medición. Su rango de medición es de ± 30 grados desde la horizontal o la vertical con una precisión de ± 50 segundos de arco. La sensibilidad a la temperatura es de 2-3 s/°C.

5.2.2.3 Sensor de cuerda vibrante

El transductor de cuerda vibrante puede sujetarse a la superficie de una estructura o colocarse embebido. Están disponibles dos configuraciones: en la primera, un péndulo se fija firmemente a la parte superior de un clinómetro que al deformarse es monitoreado por transductores de cuerda vibrante, uno de cada lado del péndulo en el plano de inclinación; otra manera alternativa es colocando cuatro transductores espaciados alrededor del péndulo para monitorear la inclinación en dos planos verticales. En la segunda, se colocan los transductores montados en lados opuestos al lado del péndulo, lo cual ocasiona iguales deformaciones, pero en sentido contrario. Los rangos disponibles suelen variar de ± 0.1 a 1° , con una precisión de aproximadamente 0.5% del rango, que es de $\pm 2-20$ segundo de arco.

5.2.2.4 Sensor con MEM

Contiene un sensor MEM que mide inclinaciones en un rango de $\pm 10^\circ$ con respecto a la vertical, se fabrica en la versión uniaxial o biaxial, se emplea de manera sumergida con cables de gran longitud sin que se degrade la señal de salida. Tiene una excelente confiabilidad y estabilidad con el tiempo y la temperatura, resistente a los golpes y las sobrecargas.

5.2.3 Cable eléctrico

En el caso de clinómetros eléctricos, el cable tiene la función de transmitir la señales eléctricas del sensor a la unidad de lectura.

5.2.4 Unidad de lectura

Tiene la función de proporcionar energía, recibir las señales eléctricas y exhibir las lecturas en forma digital y almacenar los datos.

Debe instalarse de manera que el observador tenga fácil acceso.

5.2.5 Instalación y operación

La instalación y operación de un clinómetro consiste en el siguiente procedimiento:

1. Ubique las placas en los diferentes sitios de interés (Figura 5.36).
2. Fije las placas o barras orientadas en función de la dirección de rotación esperada o con respecto a una retícula de proyecto.
3. Identifique cada placa o barra con un código.
4. Coloque horizontalmente las placas o barras para que pueda montar el módulo del clinómetro en dos planos para realizar la medición: A y B. El plano A es en la dirección de las clavijas 1 y 3, mientras que el B es en el de 2 y 4 (Figura 5.37).
5. Cuando la orientación de la placa es vertical, alinee el módulo con las clavijas 1 y 3.
6. Revise que la superficie donde coloque la placa de fijación esté limpia y plana.
7. Marque la ubicación de la base y de los puntos de fijación.
8. Taladre los puntos de fijación, lo suficientemente profundo para permitir el acceso de los tornillos o anclas. Los tornillos deben ser de cabeza plana.
9. Después de haber alineado las placas o barras, debe fijarlas a la superficie de estudio.
10. Fije la placa mediante almohadillas de cemento, lo suficientemente gruesa para que pueda ser presionada y nivelada.
11. Después de fijar las bases en un plano horizontal, sujete el módulo mediante las clavijas en el plano A haciendo que el extremo positivo concuerde en la clavija 1 (Figura 5.38a). Permita que la temperatura del módulo se estabilice a la del medio ambiente para la toma de lecturas.
12. Rote el módulo 180° , esto implica que el extremo negativo concuerde con la clavija 1, tome una lectura.
Repita los pasos 11 y 12 tres veces para obtener una lectura promedio.
13. Coloque el módulo en el plano B haciendo coincidir el extremo negativo con la clavija 2 (Figura 5.38b).
14. Rote el módulo 180° , lo cual implica que el extremo negativo concuerde con la clavija 4 y tome una lectura.

Repita los pasos 13 y 14 tres veces para obtener la lectura promedio.

- Si coloca verticalmente la placa, fije el módulo de igual manera, primero haciendo coincidir el extremo positivo con la placa y únalo mediante las clavijas 1 y 3, tome la lectura, después rote el módulo 180°, cuidando que el extremo negativo se una a la placa con las clavijas 1 y 3 y tome la lectura. Repita este paso tres veces para obtener la lectura promedio (Figura 5.38c).
- Elabore la ficha de instalación (Figura 5.39).

5.2.6 Cálculo

Para conocer los cambios de inclinación, reste la lectura inicial de la actual y el resultado se convertirá en grados o unidades de desplazamiento contra el tiempo.

- Para realizar esta conversión, utilice la siguiente expresión:

$$\text{Lectura} = c \times \text{sen } \theta$$

Constante (c) en el sistema métrico = 25 000

- Obtenga el promedio de lecturas positivas en un plano, gire el módulo 180° y obtenga el promedio de lecturas negativas.
- El resultado de restar lecturas promedio es:

$$\text{Diferencia actual} = \text{Promedio lecturas (+)} - \text{Promedio lecturas (-)}$$

- Para convertir la diferencia actual en grados, debe dividir entre $2 \times c$ y aplicarla a la función *arc sen*:

$$\text{Ángulo en el clinómetro} = \text{arc sen} \left(\frac{\text{Diferencia actual}}{2 \times c} \right)$$

Un ángulo del clinómetro positivo implica una inclinación hacia el lado positivo del instrumento.

- Para calcular el cambio en grados en el clinómetro, utilice la siguiente expresión:

$$\text{Cambio en Diferencia} = \text{Diferencia actual} - \text{Diferencia inicial}$$

$$\text{Cambio en el clinómetro} = \text{arc sen} \left(\frac{\text{Cambio en diferencia}}{2 \times c} \right)$$

- Para obtener unidades de desplazamiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Desplazamiento} = \text{Longitud} \times \left(\frac{\text{Cambio en Diferencia}}{2 \times c} \right)$$

5.2.7 Hoja de registro

- Anote el número de código de la placa en la hoja de registro (Tabla 5.11 véase anexo A).
- Describa su localización.
- Anote la lectura en la columna A+ cuando el clinómetro se coloca en el plano A y el lado positivo se encuentra en la clavija 1.
- Anote la lectura en la columna A- cuando el clinómetro se coloca en el plano A y el lado negativo se encuentra en la clavija 1.
- Repita las operaciones de los incisos 3 y 4 tres veces. Obtenga la lectura promedio.
- Si alguna lectura está fuera de rango, repita la lectura.
- Anote la lectura en la columna B+ cuando el clinómetro se coloca en el plano B y el lado positivo se encuentra en la clavija 4.
- Anote la lectura en la columna B- cuando el clinómetro se coloca en el plano B y el lado negativo se encuentra en la clavija 4.
- Repita las operaciones de los incisos 7 y 8 tres veces. Obtenga la lectura promedio.
- Si alguna lectura está fuera de rango, repita la lectura.
- Para cada lectura anote fecha, hora y temperatura.
- Obtenga la diferencia en la columna de diferencia entre los valores de A+ y A-, restando un valor del otro.
- En la columna de cambio, anote el valor de cambio inicial, o sea, la diferencia del cambio inicial. Subsecuentemente, los valores de cambio son la diferencia actual menos la diferencia inicial o anterior.

5.2.8 Presentación de resultados

Para mostrar los resultados de los clinómetros, se pueden dibujar diferentes gráficas de inclinaciones y desplazamientos con respecto al tiempo.

5.3 EXTENSÓMETROS

Los extensómetros (*extensometers*) 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).

En la Tabla 5.12 se muestran los alcances de algunos extensómetros.

5.3.1 Extensómetros externos

5.3.1.1 Extensómetro externo de juntas y grietas (*crack gage o joinmeter*)

Equipo que se emplea para obtener el cambio de distancia entre dos puntos sobre una superficie rocosa en las laderas, en juntas constructivas o en una estructura de concreto.

El sistema básico que compone a un extensómetro externo consta de:

- Dos **puntos de referencia o anclas**, que 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**, que 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**, que consiste en un micrómetro o en un dispositivo portátil de lectura .

La Figura 5.40 muestra los componentes básicos de un extensómetro externo, en tanto que en la Figura 5.41 se ilustra con fotografías dichos extensómetros. En la Tabla 5.13 se muestran las especificaciones de algunos sistemas comerciales.

5.3.1.1.1 Instalación

Para la instalación de un extensómetro externo de juntas y grietas, se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Ubique el sitio de la instalación de las anclas.
2. Fije las dos anclas dentro del terreno. En suelo las anclas deberán empotrarse alrededor de 40 cm; y en roca se tendrá que realizar una barrenación de cuando menos 30 cm donde se introducirán las anclas y, posteriormente, rellenar el hueco con lechada o con algún tipo de epóxico resistente. En ambos casos, las anclas deberán sobresalir de la superficie cuando menos 12.7 mm (0.5 in) para colocar el instrumento de medición.
3. Limpie de residuos u obstrucciones la superficie entre las dos anclas.
4. Instale el cuerpo del extensómetro de manera que una a las dos anclas.
5. Obtenga una primera lectura y verifique la medida con otro tipo de equipo (cinta, calibrador, etc.).
6. En caso de que la recuperación de datos sea mediante una unidad de lectura, compruebe su funcionamiento.
7. Elabore la ficha de instalación (Figura 5.42).

5.3.1.1.2 Cálculo y presentación de resultados

Para el cálculo de la deformación en equipos eléctricos, se aplica el siguiente procedimiento:

1. Obtenga del manual de operación del fabricante los factores de calibración polinomial: A, B, C y lineal G. Estos factores se aplican a las expresiones:

$$\text{Deformación polinomial (mm)} = AF^2 + BF + C$$

$$\text{Deformación lineal (mm)} = G(F - F_0)$$

Tabla 5.12 Alcances de los extensómetros (Modificado de Dunnicliff, 1993)

Extensómetros	Ventajas	Limitaciones	Precisión aproximada
Externos			
De juntas y grietas con varillas	Económico.	La medición está sujeta a la apreciación del observador.	±3 mm (±0.1 in)
De convergencia por medio de cinta	Fácil de operar.	Existen diferencias al tratar de ajustar lecturas en el mismo sitio con diferentes instrumentos.	±0.03 mm-3 mm (±0.001 in-0.01 in)
Internos			
En terraplenes con transductores eléctricos de desplazamiento lineal	Puede instalarse durante y después de la construcción de un terraplén. Pueden colocarse en serie.	Se debe tener control durante su instalación para no dañarlo ni que quede mal colocado.	±0.25% F.S.R. (rango de escala completa)
De barras, mecánicos y eléctricos	Disponibles de manera automatizada. Pueden instalarse con una o varias anclas. Los transductores pueden ser potenciómetros lineales, de cuerda vibrante, inducidos por una bobina, etc. Pueden emplearse varios tipos de anclas según las condiciones del terreno. Pueden ser de longitud variable.	En la versión mecánica, se requiere acceso al cabezal para tomar las lecturas. En el caso de eléctricos, es necesario que los transductores no se encuentren en contacto con humedad y evaluarse la protección contra descargas.	±0.03 mm-0.13 mm (±0.001 in-0.005 in)

Tabla 5.13 Extensómetros externos de juntas y grietas

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Slope Indicator	De cuerda vibrante	Tipo de sensor: cuerda vibrante Distancia: 6 cm (2.4 in) y 10 cm (4 in) nominales Resolución: 0.025% FS Repetitividad: $\pm 0.5\%$ FS Rango de temperatura: -20° a 80° C Longitud nominal: 40 cm (15.7 in) y 53 cm (21 in)
Rst Instrument	De cuerda vibrante	Rangos: 1.2 cm, 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm, 10 cm, 15 cm y 20 cm Precisión: 0.2% F. S. (0.1% F. S. opcional) Temperatura de funcionamiento: -20° a 80° C Longitud: 31.8 cm, 36.2 cm y 52.7 cm Dimensión al eje: 8 mm Dimensión de la bobina: 25 mm
Geokon	Modelo 4420	Rangos normales: 1.25 cm, 2.5 cm, 5 cm, 10 cm y 15 cm Resolución: 0.025% F. S. Precisión: $\pm 0.1\%$ F. S. No linealidad: $< 0.5\%$ F. S. Rango de temperatura: de -20° a 80° C Diámetro: (eje) de 8 mm (bobina) de 2.5 cm

Fuente: Catálogo de los fabricantes

donde

F = es la lectura del instrumento en hertz.

F_0 = la lectura inicial del instrumento en hertz.

2. Reste la deformación actual de la inicial. Si la diferencia es positiva, indicará que la discontinuidad se está abriendo; y si es negativa, que se está cerrando.
3. En caso de que proceda (consulte el manual del fabricante), corrija las lecturas por temperatura.
4. Cuando el instrumento sea manual, las lecturas se obtendrán directamente del sistema instalado.

La representación gráfica de los resultados debe efectuarse de la siguiente forma:

1. Elabore un registro con las lecturas, donde se indique fecha y hora.
2. Dependerá de las recomendaciones del fabricante si es necesario realizar algún ajuste debido a la variación de la temperatura para determinar lecturas de distancias corregidas.
3. Dibujelos resultados para visualizar el comportamiento de la discontinuidad.

Tabla 5.14 Extensómetros externos de convergencia

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Slope Indicator	De cinta, digital	Tamaño: 7 cm x 61 cm Resolución de la pantalla: 0.01 mm Repetitividad: ± 0.10 mm Cinta métrica: de acero, de 13 mm x 20 m o 30 m
Rst Instruments	De convergencia	Rango estándar: 15 cm Resolución: 0.01 mm Extensión (se pueden fabricar al tamaño requerido) 3.7 m completamente extendido 2.06 m contraído
Rst Instruments	De cinta	Cinta con longitud de: 10 m, 15 m, 20 m, 30 m Resolución del indicador de carátula: 0.01 mm Repetitividad: ± 0.25 mm Peso con cinta de 20 m: 2.2 kg
Geokon	De convergencia modelo 4425	Rangos normales: 1.25 cm, 2.5 cm, 5 cm, 10 cm y 15 cm Resolución: 0.025% F. S. Precisión: $\pm 0.1\%$ F. S. No linealidad: $< 0.5\%$ F. S. Rango de temperatura: de -20° a 80° C Longitud: (transductor) 35.6 cm, 50.8 cm y 83.8 cm
Geokon	De cinta modelo 1610	Longitud de la cinta: 15 m, 20 m y 30 m Tensión de la cinta: 10 kg Precisión: ± 0.01 mm Longitud total: 55 cm

Fuente: Catálogos de los fabricantes.

5.3.1.2 Extensómetro externo de convergencia (*convergence gages*)

Se utilizan para medir el cambio de la distancia entre dos puntos en zonas cerradas, como túneles, excavaciones y galerías (Figura 5.43). La Tabla 5.14 muestra las especificaciones de algunos sistemas comerciales. Dentro de esta clasificación se tienen:

- **Medidor con cinta o cable** (*tape extensometer*). 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, como se muestra en la Figura 5.44. El cable o cinta se fabrica de acero invar, acero inoxidable o fibra de vidrio. La 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. En la Figura 5.45 se muestran los elementos que componen un extensómetro de convergencia con cinta.
- **Medidor con tubo o barra** (*rod and tube convergence gage*). Consiste en un tubo rígido o barra telescópica de material invar, aluminio o acero galvanizado, provisto de placas en sus extremos; se emplea un micrómetro para las mediciones. Se utiliza 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. Al medidor se le puede adaptar un transductor eléctrico.
- **Medidor ultrasónico** (*ultrasonic convergence gage*). Se compone de 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 operación es entre 30 cm y 11 m, considerando que no se tenga ninguna obstrucción para la toma de lectura.

Las **unidades de lectura** pueden ser con indicador de carátula, de lectura digital o con una unidad portátil para cuando se dispone de un transductor.

5.3.1.2.1 Instalación

Para la instalación de un extensómetro externo de convergencia con cinta o cable, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Defina los dos puntos de referencia donde se colocarán las anclas. Debe mantenerse una disposición geométrica respecto al espacio por cubrir de manera que la cinta quede libre de cualquier contacto con las paredes. En el caso de túneles, donde se recomienda la colocación de más de un extensómetro de este tipo, deberán quedar distribuidos y ubicados en zonas que se consideren críticas (Figura 5.43).
2. Perfore con taladro, cuya barrena sea de 1.91 cm a 2.54 cm (3/4 in a 1 in) de diámetro a una profundidad de 1.27 cm (0.5 in) más la longitud del ancla.
3. Verifique que no se tenga la presencia de material de desecho en la perforación.
4. Coloque las anclas dentro de la perforación; con respecto a las de tipo hidráulico, inyecte la lechada o resina apropiada a las condiciones a las que estará sujeta el ancla.
5. Atornille las armellas a las anclas, cuidando de no forzar su colocación para no dañar al anclaje.
6. En el caso de las armellas que son soldadas o atornilladas en alguna estructura, verifique que hayan quedado firmes.
7. Las armellas deberán ser capaces de soportar una fuerza de 13.62 kgf (30 lbf).
8. Retire el pasador tipo nariz y abra la manivela del carrete para desenrollar la cinta del carrete del extensómetro, la longitud necesaria para alcanzar los dos puntos de referencia.
9. Coloque el extensómetro sujetándolo con los ganchos de seguridad a las armellas de las anclas.
10. Tense la cinta de manera estándar, colocando el agujero índice apropiado con el pasador de nariz y alineando las dos marcas de control reguladas por un resorte.
11. Tome la distancia mediante la unidad de lectura.
12. Verifique que la lectura sea estable.
13. Quite la tensión de la cinta girando del cuello del módulo.
14. Libere los ganchos del extensómetro de las anclas.
15. Proceda a la siguiente ubicación, repita desde el paso 9, cuidando que la cinta no se atore o se flexione.

16. Libere el pasador de nariz y enrolle la cinta limpiándola con un paño.
17. Elabore la ficha de instalación.

5.3.1.2.2 Cálculo y presentación de resultados

En cuanto al cálculo, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Para cada par de puntos de referencia, obtenga dos valores: de la cinta indicada por el agujero índice y de la unidad de lectura. Por ejemplo:

Lectura en el agujero índice (m)	Unidad de lectura (mm)	Total (mm)
11.10	12.35	11 112.35

2. Obtenga la diferencia con respecto a la lectura inicial:

Lectura actual (mm)	(-) Lectura inicial (mm)	Diferencia (mm)
11 112.35	11 112.60	-0.25

3. Si debido a la extensión o convergencia se tiene que cambiar de agujero índice, debe realizar un ajuste de la siguiente manera:

	Lectura actual (mm)	(-) Lectura inicial (mm)	Diferencia (mm)
Agujero inicial	11 073.25	11 123.25	-50.00
Agujero actual	11 073.37	11 123.25	-49.88

4. Teóricamente debería ser el mismo valor, sin embargo, la diferencia es de 0.12 mm. Para que los cálculos sean los correctos, se puede considerar esta diferencia de la siguiente manera:

Lectura actual (mm)	(-) Lectura inicial	Diferencia (mm)	(-) corrección (mm)	Lectura corregida (mm)
11 073.37	11 123.25	-49.88	-(0.12)	-50.00

5. Corrección por temperatura:

Debido a los cambios de temperatura, se tienen los siguientes coeficientes:

Cintas de acero: 11.6×10^{-6} ppm/°C

Cinta de aluminio: 23×10^{-6} ppm/°C

Para la corrección se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{Longitud corregida} = L + \Delta L$$

$$\Delta L = (L)(\alpha)(\Delta t)$$

donde:

ΔL = Incremento de longitud de la cinta

L = Longitud medida en la cinta

α = Coeficiente por temperatura

Δt = Incremento por temperatura =

temperatura actual – temperatura inicial

Ejemplo:

La cinta es de acero

$L = 20.3$ m

$\Delta t = 15^\circ\text{C}$

$\alpha = (11.6 \times 10^{-6})(15) = 0.000174$ m

$\Delta L = (20.3)(0.000174)(15) = 0.052$ m

Longitud corregida = $20.3 + 0.052 = 20.352$ m

Si el resultado es positivo (+) se tiene una extensión entre las anclas y si es negativo (-) se presenta una compresión.

La representación gráfica de los resultados debe efectuarse de la siguiente forma:

1. Elabore un registro con las lecturas, donde se indique fecha y hora para cada par de puntos de referencia.
2. Realice las correcciones por ajuste en la posición del agujero índice y por temperatura para tener las longitudes corregidas.
3. Dibuje los resultados para visualizar como se está comportando el desplazamiento de los puntos de referencia.

Tabla 5.15 Extensómetros internos de placas

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Rst Instrument	Para suelo de cuerda vibrante	<p>Medidor de longitud: 1 m con extensiones de 0.5 m, 1 m, 2 m y 3 m de largo.</p> <p>Alcance del sensor: 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm, 10 cm, 150 cm (otros rangos disponibles).</p> <p>Precisión: $\pm 0.25\%$ F.S.R.</p> <p>Resolución: 0.02% F.S.R.</p> <p>Linealidad: 0.25% F.S.R.</p> <p>Cambio a térmico cero: $< 0.05\%$ F.S.R./$^{\circ}\text{C}$</p> <p>Temperatura de operación: -20° a 80° C</p> <p>Cuerpo del instrumento/diámetro de brida: 2.8 cm/2.8 cm</p> <p>Cable de la señal: dos pares de cables trenzados con recubrimiento de poliuretano</p>

Fuente: Catálogo del fabricante

5.3.2 Extensómetros internos

5.3.2.1 Extensómetros internos de placas

Los extensómetros internos de placas (*soil strainmeter*) se colocan en terraplenes (rellenos) para monitorear tanto deformaciones horizontales entre dos puntos como grietas en una masa de suelo (Figura 5.46 y Tabla 5.15).

El sistema básico que compone a un extensómetro interno consta de:

- Dos **placas de referencia** fabricadas de acero, las cuales se instalan de manera permanente en el interior de una masa de suelo y pueden ser de forma circular o cuadrada.
- El **cuerpo del extensómetro**, que se instala permanentemente entre las dos placas de referencia, contiene al tubo telescópico, transductor y varilla de acero.
- Una **unidad de lectura**, que consiste en un dispositivo eléctrico de lectura.

5.3.2.1.1 Instalación

Previamente a la instalación definitiva, se debe realizar lo siguiente:

1. En un área apropiada fuera de la zona donde será instalado, arme el sistema de forma provisional, con el fin de verificar que se cuenta con todos los componentes y queden las barras con las longitudes ajustadas para cubrir los tramos de interés (Figura 5.47).
2. Con un multímetro verifique el buen funcionamiento de los sensores y observe el deslizamiento de las juntas telescópicas.
3. Dibuje un croquis con los componentes del sistema y de como quedará armado de manera definitiva.
4. Marque todos los componentes en función del orden que tendrán en el momento de instalarse definitivamente, verificando que concuerden con lo dibujado en el croquis.
5. En el caso de tener varios sistemas en serie, se podrán preensamblar las partes que componen al

conjunto por tramos de 3 m por ser longitudes de fácil maniobrabilidad.

6. La instalación de los extensómetros internos en terraplenes se consideran únicamente durante la construcción.

Se localiza topográficamente el sitio marcado por el proyecto, cuando las terracerías sobrepasen en 60 cm la elevación de proyecto del extensómetro y una vez marcado el sitio de instalación, se abre una trinchera de 1 m de profundidad. La dimensión de la trinchera estará de acuerdo con las dimensiones del extensómetro.

Se revisa la unión de las placas con el transductor y la varilla, verificando que estén debidamente acopladas, que la varilla esté recta y deslice adecuadamente.

Asimismo, se verifica que el instrumento tenga un funcionamiento óptimo, que se cuente con la tubería de protección y con el cable eléctrico con la longitud adecuada, hasta la elevación de la caseta de observación, ya que es recomendable evitar uniones.

Se excavan dos cajas de 50 cm x 25 cm x 25 cm de profundidad para alojar las placas de referencia.

Se debe apoyar bien la tubería de protección de la varilla del extensómetro, para lo cual se extiende una delgada capa de arena compactada en el fondo de la excavación. La placa extrema se une con la varilla y se va introduciendo en los tubos de protección telescópica, situando la varilla en la posición de proyecto se embebe la placa de acero en la cavidad, rellenándola de concreto para lograr anclar media placa. Enseguida se procede a dejar el extensómetro en la posición adecuada, es decir, dándole espacio suficiente al vástago para que pueda medir acortamientos o alargamientos. Una vez realizada esta operación, se procede a embeber la mitad de las placas, tal como se comentó anteriormente (Figuras 5.48 y 5.49).

Se procede a identificar el cable eléctrico del extensómetro con un color, se obtienen y anotan en la bitácora de instrumentación los siguientes datos: elevación, longitud entre placas de referencia al milímetro (o base de medición), posición de instalación bien definida, constante del aparato, localización con sus coordenadas y lectura inicial; enseguida, se

hace pasar el cable por los tubos de protección, a los cuales se les deberán rebajar los bordes interiores para no averiar el cable, que se proyectará, ya sea en forma vertical u horizontal (esta última es más económica y segura) hasta la caseta de lecturas.

Se rellena la excavación con el material utilizado y se compacta en pequeñas capas, con pisón de mano, un espesor de 20 cm, sobre las tuberías de protección y de 45 cm, por encima de la zona del sensor. Se rellena después el resto de la trinchera, pero esta vez se compacta con equipo neumático; posteriormente, se colocará una zona de protección de acuerdo con las dimensiones de la trinchera, abarcando 1 m por fuera de la trinchera y dejando aproximadamente una altura de 1.5 m a 2 m, y se continúa la construcción normal de las terracerías. Se prolongan o sobreelevan los conductores eléctricos. Se coloca la tubería de protección igual que en las prolongaciones verticales y se rellena y compacta con equipo manual (Figuras 5.50 y 5.51).

7. Elabore la ficha de instalación (Figura 5.52).

5.3.2.1.2 Operación

El extensómetro interno eléctrico utiliza una varilla de acero inoxidable, protegida por una tubería de PVC telescópica. En un extremo de la barra se localiza un sensor que puede ser de cuerda vibrante que mide el desplazamiento del suelo mediante el cambio de posición de las placas de referencia, a través de la lectura inicial y las lecturas subsecuentes para conocer la magnitud y la velocidad de los movimientos.

La varilla de acero inoxidable de 1.27 cm (0.5 in) de diámetro, con una longitud inicial de 1 m con extensiones hasta de 3 m, se une a una de las placas circulares de acero y el otro extremo de la barra al sensor y éste a la otra placa de referencia (Figura 5.53).

Los extensómetros internos se pueden arreglar en serie para medir movimientos en varias direcciones en un plano horizontal.

Para que la varilla tenga un movimiento libre, se le protege con tubería telescópica de 3.81 cm (1 ½ in) o 2.54 cm (1 in) de diámetro, empacando las uniones con material flexible.

5.3.2.1.3 Verificación de funcionamiento

Para transformar las lecturas de la unidad de lectura a deformaciones, es necesario verificar el funcionamiento del aparato para conocer su factor de conversión, de la siguiente manera:

1. Fije el aparato completo sobre una base horizontal y en el extremo de la varilla, donde se localiza el sensor, coloque un micrómetro para hacer las lecturas de deformación.
2. Introduzca la varilla hasta el fondo y comience a extraer tomando lecturas a cada cierta distancia, tanto para el micrómetro como para el extensómetro, en este último se hace a través de una unidad de lectura, mediante una tabla para anotar las lecturas correspondientes.

Lecturas de micrómetro	Lecturas de la unidad de lectura
En unidades de longitud	En unidades de puente

Los datos obtenidos se dibujan como se muestra en la Figura 5.54.

5.3.2.1.4 Toma de lecturas

Se conecta el cable conductor del extensómetro a una unidad de lectura, se enciende el interruptor y se opera el selector hasta que la aguja esté en el cero de la carátula del potenciómetro; se toma la lectura en el contador, la cual está dada en unidades de puente, siempre se toman dos lecturas y se anotan en la forma de campo como la primera y segunda lectura, o sea, en las columnas (2) y (3) (Tabla 5.16 véase Anexo A).

Durante la etapa de construcción es necesario efectuar lecturas constantemente, dependiendo del avance del terraplén, para conocer el estado de deformaciones que se van presentando en esta etapa. Durante la etapa de operación, es necesario efectuar lecturas con mayor periodicidad en las etapas del primero y segundo llenado. Posteriormente, se podrán ir espaciando, dependiendo de los movimientos observados.

5.3.2.1.5 Cálculo y presentación de resultados

Para el cálculo, primero se toman, convencionalmente, los signos positivo (+) para las extensiones, o sea, movimientos de la varilla del extensómetro hacia fuera del sensor, y negativo (-) para compresiones.

Los números entre paréntesis corresponden a las columnas del formato que se utiliza para este registro, el cual se presenta en la Tabla 5.16.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Anote el número del extensómetro en la columna (1).
2. Obtenga el promedio de ambas lecturas, o sea, $[(2) + (3)]/2 = (4)$.
3. Anote la lectura inicial en la columna número (5).
4. Efectúe la diferencia de la lectura actual a la lectura inicial y anote en la columna número (6), o sea, $(6) = (4) - (5)$.
5. Divida esta diferencia entre el factor de conversión obtenido de la verificación del instrumento en el laboratorio, o sea, $(6)/(7) = (8)$, la cual es la deformación obtenida (Δ).
6. Obtenga la deformación unitaria y anote en la misma columna.

$$\varepsilon = \Delta/L_i$$

donde:

ε = deformación unitaria

L_i = longitud inicial entre placas del extensómetro

Δ = deformación observada

Para el caso de medir y registrar periódicamente la distancia entre anclas de varios sistemas en serie, la suma de las longitudes parciales nos dará la longitud total (LT_{actual}) que se compara con la inicial ($LT_{inicial}$) para determinar si hubo compresiones o extensiones.

$$LT_{inicial} = \sum_{i=1}^n L_i$$

$$LT_{actual} = \sum_{i=1}^n (L_i + \Delta_i)$$

$$Diferencia = LT_{actual} - LT_{inicial}$$

Los resultados obtenidos se deben dibujar a una escala que permita observar con claridad los movimientos; asimismo, es necesario que las deformaciones se grafiquen contra el tiempo, y se indique en la misma gráfica la elevación del embalse y el avance de la construcción; datos que son necesarios para correlacionar los movimientos.

Las extensiones se representan con signo positivo (+) y las compresiones con signo negativo (-), las cuales se indican sobre el eje vertical; en este mismo eje por separado y a una escala conveniente, se indican las elevaciones de la curva del embalse y del avance de la construcción; en el eje horizontal se representa el tiempo, expresado en días, meses o años y se obtienen las curvas: deformación con el tiempo, embalse con el tiempo y avance con el tiempo.

Es importante anotar en un recuadro el número del extensómetro, así como su longitud inicial y anotar el número de extensómetro en su gráfica correspondiente; asimismo, en un costado se presenta a escala la sección de la estructura con la ubicación y elevación de cada una de las estaciones extensométricas.

Lo anterior se ilustra en la Figura 5.55, que se presenta para extensómetros eléctricos.

5.3.2.2 Extensómetros internos de barras

Los extensómetros internos de barras (*rod extensometers*) se instalan en un barreno realizado en suelo o roca donde se tenga la presencia de discontinuidades, pero que mediante barras ancladas en un extremo y libre en el extremo del cabezal donde se tiene un punto de referencia, se puede determinar su movimiento relativo axial, empleando algún instrumento ya sea mecánico o eléctrico (Figura 5.56 y Tabla 5.17).

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 (Figura 5.57).

El extensómetro de barras se instala en barrenos entre 61 mm a 96 mm (2.4 in a 3.8 in) de diámetro, comprobando que pasen todos los componentes del extensómetro. En cada barreno se pueden colocar de una a ocho barras, la dificultad de instalación crece al aumentar el número de anclas en un mismo barreno. Cada barra se fija al barreno en su extremo inferior mediante un ancla,

el otro extremo de la barra se fija al cabezal de referencia, el cual a su vez se fija firmemente a la boca del barreno (Figura 5.58).

El criterio para la selección del anclaje se basa en que resista la aplicación de una carga de 100 kg (220 Lb).

Las anclas van unidas a las barras mediante adaptadores roscados y sellos de goma, dependiendo del tipo de ancla utilizada (Figura 5.59).

5.3.2.2.1 Tipos de anclas

- **Anclas hidráulicas** (*hydraulic anchors*). Son apropiadas para su uso en suelos. Se fabrican de dos tipos: de tubo **expandible** y de **puntas Borros**.

Las anclas de tubo **expandible** consisten en un tubo metálico suave aplanado con sus extremos sellados y una conexión para inyectar aceite a presión. Para expandir el ancla, se inyecta aceite a presión hasta que el metal haga contacto con la pared del barreno. Cuando la presión de aceite se reduce, el ancla mantiene su forma expandida.

Las anclas de **puntas Borros** son apropiadas para uso en suelos blandos. Consisten en tres puntas de acero ubicado en un tramo corto de 5.08 cm (2 in) de tubos de acero, con las puntas saliendo por ranuras a partir de un punto de forma cónica. El extremo superior de 2.54 cm (1 in) tiene una rosca de mano izquierda y 6.35 mm (0.25 in) de tubo de acero está soldado a la parte superior de las puntas. Las anclas Borros son mejores que las hincadas o en lechada, se empotran entre 30 cm a 1 m.

Anclas de cuña expandible (*expanding wedge anchors*). Consisten en una pieza cilíndrica provista de una cubierta con hendidura con tuerca tipo cuña. Al rotar la barra en el extensómetro, ocasiona que la tuerca cuña se mueva axialmente respecto a la cubierta, expandiéndose y quedando sujeta dentro de las paredes del barreno. Para evitar inicialmente que la cubierta rote, hay que introducir el ancla de manera que exista fricción con el material circundante.

- **Anclas elásticas** (*spring-loaded*). Se conocen también como anclas-C. Se instalan empujándolas dentro de la perforación hasta la profundidad requerida, se libera al pasador en forma de U que permite que los anillos se abran para fijarse contra la pared del barreno. Estos anclajes son útiles en roca

Tabla 5.17 Extensómetros internos de barras

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Rst Instruments	De barras múltiples dentro de un barreno (MPBX)	<p>Anclas expandibles de perno para roca: son preferidas para utilizarse para uno o dos puntos. Gran expansión y ajuste mecánico. Se usan dentro de barrenos de paredes ásperas o dentro de roca fracturada.</p> <p>Anclaje dentro de lechadas: sencillo de instalar en perforaciones dirigidas, no es recomendable para uso en terrenos blandos o suelos. Hasta seis puntos pueden ser colocados dentro de un barreno de 7.62 cm (3 in).</p> <p>Anclaje de ajuste de anillo: Para uso en roca competente (dura) o en donde puedan perforar barrenos uniformes. Ofrecen la mejor velocidad y simplicidad de instalación. Sobre los ocho puntos pueden ser colocadas en un barreno de 7.62 cm (3 in).</p> <p>Anclas hidráulicas: para uso en suelos blandos, especialmente cuando la perforación tienda a cerrarse. Tres tipos de anclas están disponibles: tipo tubo estándar de expansión, tipo Borros de una sola punta y tipo Borros de doble punta.</p>
Geokon	Extensómetro modelo A-1	<p>Rango estándar: hasta 10 cm</p> <p>Lectura menor: 0.025 mm</p> <p>Diámetro de la perforación: 3.5 cm, 4.4 cm, 5.1 cm, 6.4 cm</p> <p>Longitud máxima: 10 m</p>
Geokon	Extensómetro modelo A-3	<p>Rango estándar: hasta 30 cm nominal</p> <p>Lectura menor: 0.025 mm</p> <p>Diámetro de la perforación: 7.6 cm o más</p> <p>Longitud máxima: 100 m</p>
Geokon	Extensómetro modelo A-4	<p>Rango estándar: hasta 30 cm nominal</p> <p>Lectura menor: 0.025 mm</p> <p>Diámetro de la perforación: 3.8 a 7.6 cm</p> <p>Longitud máxima: 50 m</p>

Tabla 5.17 Extensómetros internos de barras (continuación)

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Geokon	Extensómetro modelo A-5	Rango estándar: hasta 30 cm nominal Lectura menor: 0.025 mm Diámetro de la perforación: 3.8 cm a 10.2 cm Longitud máxima: 100 m
Geokon	Extensómetro modelo A-6	Rango estándar: hasta 30 cm nominal Lectura menor: 0.025 mm Diámetro de la perforación: 5 cm mínimo (un punto único) Longitud máxima: 100 m

Fuente: Catálogo de los fabricantes

dura y competente. En estas condiciones, es sencillo y rápido de instalarlas y pueden colocarse varias anclas dentro del mismo sitio.

- **Anclas en lechada** (*groutable anchors*). Se utilizan preferentemente en barrenos inclinados en roca. No se recomienda su uso en suelos. Las barras deben protegerse con tubos de plástico para aislarlas de la lechada. Los extensómetros se arman en la superficie y se introducen dentro del barreno. Se pueden colocar hasta seis anclas en un barreno (NX) de 7.62 cm (3 in) de diámetro.

5.3.2.2.2 Tipos de barras

Las barras se fabrican de acero dulce, acero inoxidable, de acero invar, fibra de vidrio o fibra de carbón, con diámetros comprendidos entre 5 mm a 13 mm (0.2 in a 0.5 in) y de una longitud de 3 m (10 ft). No se recomienda exceder una longitud mayor de 90 m. Para unir las se emplean coples roscados. También se fabrican en rollos

de fibra de vidrio que no requieren enderezarse para su instalación. Las barras se deben proteger con tubos de plástico rellenos de aceite.

5.3.2.2.3 Cabezal de referencia

Se fabrica para medidores mecánicos, cuando se tiene fácil acceso al barreno y de tipo eléctrico, cuando el acceso es difícil o cuando se requiere lectura remota. La parte superior sobresale del nivel terreno. Para la toma de lecturas está provisto de perforaciones que deberán contar con la identificación de la barra correspondiente (Figura 5.58).

5.3.2.2.4 Unidad de lectura

Para la unidad de lectura, se tienen varias opciones. Unidades de lectura manual, con indicador de carátula o micrómetro de profundidad. Los de micrómetros son más resistentes que los indicadores de carátula, sin

embargo, estos últimos son preferibles por ser capaces de registrar movimientos de 0.03 mm (0.001 in). Para ambos casos se requiere de una verificación regular contra un patrón estándar (Figura 5.60).

Las unidades de lectura eléctrica requieren un sensor, como los potenciómetros lineales, los transformadores diferenciales de variable lineal o los transductores de cuerda vibrante, son de costo más económico y más resistentes se deben considerar como primera selección, siempre y cuando no se requieran automáticos o de monitoreo remoto.

5.3.2.2.5 Instalación

Para instalar un extensómetro de varias barras (Figura 5.61), se recomienda extremar las precauciones para su colocación.

Debe empezarse por la barra más profunda. La posición correcta debe mantenerse en todo momento. Un código de colores puede ser de gran utilidad para la identificación de las barras alrededor de la boca del barreno.

Cuando el barreno se rellena con lechada, la manguera utilizada se introduce junto con las barras, y debe alcanzar la parte más profunda del barreno.

Cuando este tipo de extensómetros se utiliza en roca, donde las deformaciones previstas son de compresión, la resistencia de la lechada debe ser debilitada por el uso de aditivos. Las fuerzas de flotación pueden presentarse y es preciso eliminarlas. La presión debe ser controlada para evitar el colapso de las protecciones de las barras del extensómetro. Si el tubo flexible de plástico se utiliza para protección, el riesgo de colapso se puede evitar llenando los tubos con presión de aceite aplicada con una bomba de mano hasta que se estabilice conjuntamente con la lechada.

Se recomienda seguir el procedimiento de instalación de extensómetros internos en el barreno que se describe a continuación:

1. Defina el sitio de instalación y ubicación mediante métodos topográficos.
2. Realice el barreno con el diámetro necesario para el tipo de extensómetro por colocar y a una profundidad de un metro más del ancla más profunda.
3. Acople las barras en el caso de ser de acero; y si son de fibra de vidrio, corte la longitud de tramos que

se requieran. Al maniobrar las barras de acero, evite que se flexionen.

4. Una las barras con las anclas. El procedimiento de unión dependerá del tipo de ancla que esté empleando. Generalmente se cuenta con un adaptador de doble cuerda que une en un extremo con el ancla y por el otro con la barra y sellado con pegamento.
5. Mediante acoplamientos se puede incrementar la longitud de las barras de acero.
6. Coloque los tubos de plástico de protección a las barras, utilizando un código de colores que permita su identificación.
7. La longitud del tubo de protección deberá tener una longitud de 43.18 cm (17 in) menor a la longitud de la barra.
8. La parte superior del tubo de protección va unido con una junta telescópica.
9. A su vez, en la parte superior de la junta telescópica, coloque el sensor que ajusta con un cabezal de operación mecánica o eléctrica.
10. Introduzca dentro del barreno cada una de las barras, empezando por la más profunda.
11. Ensamble el cabezal de referencia con el extremo superior de las juntas telescópicas empleando una base con perforaciones circulares. Los huecos que no se utilizan deberán sellarse mediante tapones. Se deberá identificar cada barra en la superficie del cabezal de referencia.
12. La distancia entre la parte superior de la superficie de referencia y la parte superior de las barras debe ser de aproximadamente 12.7 cm (5 in), que es el rango de desplazamiento que puede presentar la barra.
13. Finalmente, para la instalación de un extensómetro de barras de acero dentro de un barreno, son importantes tres longitudes (Figura 5.57):

R = Longitud de la barra

P = Longitud del tubo de protección de la barra
 $= R - 43$ cm

A = Longitud a partir de la parte inferior del cabezal de referencia hasta la parte superior del ancla = $R + 12.7$ cm

En el caso de barras de fibra de vidrio, se colocan preensambladas por lo que no es necesario realizar este ajuste.

14. Coloque una cuerda de seguridad y una manguera para la lechada en cada ancla.
15. Antes de colocar la lechada, primero bombee agua para limpieza del barreno.
16. Dependerá de la posición del barreno para bombear la lechada. En un barreno vertical descendente o inclinado, el tubo de lechada se va extrayendo conforme se va rellenando el barreno. Cuando se trata de barreno ascendente, se coloca un tubo adicional de ventilación que tendrá una longitud menor de donde se localice el ancla más profunda. Taponee el cuello del barreno, bombee la lechada a partir de la manguera más corta hasta que rebose por el tubo de ventilación. Para levantar la presión de la lechada, doble y amarre con alambre este tubo.
17. Inyecte la lechada con la consistencia que se requiera, dependiendo del tipo de suelo en cada una de las mangueras colocadas.
18. Lave la bomba con agua limpia.
19. Elabore la ficha de instalación (Figura 5.62).

5.3.2.2.6 Cálculo y presentación de resultados

El procedimiento para calcular las deformaciones de un extensómetro interno, se describe a continuación:

1. La diferencia de distancia que mida entre la superficie expuesta del cabezal de referencia (Figura 5.58) y la parte superior de la barra a partir de una lectura inicial será el desplazamiento. Sin embargo, este desplazamiento es necesario analizarlo: si el cabezal de referencia se encuentra en una zona estable, el cálculo del movimiento fue debido al ancla; no obstante, si el cabezal de referencia se localiza en una zona inestable, el cálculo es inverso debido a que el desplazamiento se está dando en esta parte del extensómetro.
2. Cuando se utiliza un sensor mecánico, las lecturas del desplazamiento son las mostradas directamente por el micrómetro o por el indicador de carátula (Figura 5.60); en cuanto a los sensores eléctricos, es necesario convertir las unidades del sensor a unidades de ingeniería.
3. En el caso de que el sensor sea de cuerda vibrante, debe consultar el manual del fabricante para conocer los factores de ajuste (calibración) únicos A, B y C, en donde:

$$\text{Unidades de ingeniería (mm)} = AF^2 + BF + C$$

donde: F = Lecturas leídas por el instrumento en hertz

4. Para las lecturas con potenciómetro, cada sensor tiene valores únicos de sensibilidad y ajuste al cero, donde:

$$\text{Unidades de ingeniería (mm)} = (\text{Lectura} - \text{Ajuste a cero}) / \text{Sensibilidad}$$
 donde: Lectura son las arrojadas por el sensor en porcentaje de la escala total (FS)
5. Tome lecturas periódicamente de cada una de las barras, ya sea de manera mecánica o manual. Elabore una tabla donde mensualmente vaya registrando las lecturas obtenidas por cada ancla (columnas 2, 4, 6, 8, 10 y 12) y las diferencias por cada una de ellas (columna 3, 5, 7, 9, 11, y 13) (Tabla 5.18 véase anexo A). Cuando el resultado de esta diferencia es positivo (+), indica que hubo una extensión, y cuando es negativa (-), es de compresión.
6. Cuando sea necesario realice el cálculo a partir de la posición del ancla más profunda, efectúe un cálculo inverso como el mostrado en la Tabla 5.19 (véase anexo A), en el cual se resta el valor de la posición final de la inicial para cada barra y después se obtiene la diferencia del desplazamiento de la barra profunda que se considera de referencia con respecto a la diferencia de cada una de las demás barras. Debido a que el punto de referencia fue invertido, el resultado (-) implica extensión y (+) compresión.

Para la presentación de los resultados de los extensómetros internos de barras, se dibujan diferentes gráficas de desplazamiento correspondientes a cada barra con su respectiva identificación, como se muestra en la Figura 5.63.

5.4 DEFORMÓMETROS

Los **deformómetros** (*probe extensometers*) 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. El tubo acceso se coloca en forma vertical dentro de un terraplén o en un cimiento y sirve para evaluar los asentamientos o expansiones.

Tabla 5.20 Alcances de los deformómetros (modificado de Dunicliff, 1993)

Tipo	Ventajas	Limitaciones	Precisión aproximada
Mecánico (sonda USBR)	Crossarm asegura que la deformación axial del tubo será conforme a la deformación del suelo. Puede medir grandes compresiones.	Las bisagras en el sondeo pueden atascarse. No pueden instalarse en un pozo. La tubería de acero puede corroerse. La probeta puede apretarse si se presenta una gran deformación lateral. Complicado para leerse. Difícil compactación.	± 1 mm-5 mm (± 0.05 in-0.2 in).
Con anillos magnéticos (corriente inducida por una bobina)	Versiones disponibles para todo tipo de sitios.	Algunas lecturas pueden ser erróneas. Precisión reducida por fugas de corriente eléctrica. Difícil compactación.	± 0.5 mm-5 mm (± 0.02 in-0.2 in) para instalaciones verticales.
Magnético	Versiones disponibles para todo tipo de sitios. Puede ser usado sin interferir la excavación.	Difícil compactación.	± 0.5 mm-5 mm (± 0.02 in-0.2 in) para instalaciones verticales.

Los deformómetros se pueden dividir en mecánicos y magnéticos. Sus alcances se indican en la Tabla 5.20 y en la Tabla 5.21 se muestran las especificaciones proporcionadas por los fabricantes.

Un sistema de deformómetro consta de tres partes básicas (Figura 5.64):

- **Tubo de acceso** (*access tube*). En algunos casos se emplea el tubo guía como tubo de acceso dependiendo del tipo de deformómetro. Se instala de manera permanente dentro de una perforación vertical, que se rellena como se indica en el apartado 5.1.1.1.1 correspondiente a los inclinómetros verticales, o se coloca en un terraplén a medida que se construye. 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%.
- **Unidad medidora hermética y portátil** o sonda (*probe*).

- **Carrete con cable eléctrico graduado** (*graduated electrical cable*). Se conecta a la sonda. 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 y sumbido.

En el caso de que el cable eléctrico no sea graduado se tendrá que emplear una cinta métrica.

5.4.1 Deformómetro mecánico

En el deformómetro mecánico, los puntos de medición se identifican mecánicamente con el paso de la sonda de medición diseñada por el *U. S. Bureau of Reclamation*, conocida como sonda USBR (Figura 5.65).

Cuando se usa la sonda USBR, 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

Tabla 5.21 Deformómetros

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Slope Indicator	Anillos magnéticos Sondex	<p>Graduaciones métricas del cable: 2 mm</p> <p>Diámetro de la sonda: 4.3 cm (1.7 in)</p> <p>Tubos corrugados de diámetro exterior de 9.2 cm (3.6 in), este tubo tiene capacidad para tubo guía del inclinómetro de 7 cm (2.75 in) de Ø. También está disponible en tubo corrugado de 8.5 cm.</p>
Slope Indicator	Con placas y arañas magnéticas	<p>Graduaciones métricas del cable: 2 mm</p> <p>Diámetro de la sonda: 1.6 cm (5/8 in)</p> <p>Longitud del cable: 30 m, 50 m, 100 m y 150 m</p> <p>Araña magnética para tubería de 2.54 cm, 7 cm y 8.5 cm</p> <p>Placa magnética para tubería de 2.54 cm, 7 cm y 8.5 cm</p> <p>Tubo magnético para tubería de 2.54 cm, 7 cm y 8.5 cm</p> <p>Acceso a una tubería de 2.54 cm x 30 cm (1 in x 10 ft)</p> <p>Sección telescópica de 2.54 cm x 30 cm (1 in x 10 ft)</p> <p>Tapa inferior para tubería de 2.54 cm (1 in)</p>
Rst Instruments	Sistema magnético de asentamiento	<p>Resolución: 1 mm</p> <p>Cinta: recubrimiento de polietileno (teflón opcional) 1 cm (0.4 in) de estilo plano. Conductores de acero inoxidable.</p> <p>Sonda: dos interruptores de láminas estándar 1.6 cm x 20 cm de largo.</p> <p>Interruptor de lengüeta de precisión: ± 0.03 mm a 0.3 mm</p> <p>Sistema de precisión: instalación vertical ± 3 mm a 5 mm instalaciones verticales con la cabeza del micrómetro ± 0.5 mm</p> <p>Batería: estándar de 9 V</p>

Fuente: Catálogo de los fabricantes

(generalmente una canal de 7.5 cm a 10 cm de peralte) de manera transversal a cada tramo de tubo. Los perfiles transversales (*crossarm*) 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.

5.4.2 Deformómetros magnéticos

5.4.2.1 Deformómetros con anillos magnéticos (Sondex)

Este sistema es una modalidad híbrida de deformómetro es en realidad un deformómetro mecánico-eléctrico, el cual consta de tubería de acceso, tubería corrugada de plástico, anillos sensores, una sonda y una unidad portátil de lectura (Figura 5.66).

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

La instalación típica del sistema consiste en colocar una tubería de acceso de PVC (sin ranuras) de 7 cm de diámetro dentro de un tubo corrugado de plástico con un diámetro interno entre 8.5 cm y 9.2 cm, a este último se le colocan anillos metálicos sensores sujetos de manera externa, preferentemente colocados en fábrica. El espacio entre el tubo corrugado y el barreno se debe rellenar con lechada que cumpla con la propiedad de que el módulo de elasticidad y la resistencia al esfuerzo cortante sea similar a las del suelo circundante, de manera que pueda desplazarse con los asentamientos o expansiones que se presenten en el suelo, el tubo corrugado debe sellarse para evitar filtraciones de lechada, empleando epóxicos y cinta de vinil gris reforzada (Figura 5.67).

La parte inferior del tubo corrugado lleva una tapa pesada que debe quedar asentada en el fondo del barreno, y en el extremo superior se le coloca una tapa de protección.

Slope Indicator sugiere las siguientes proporciones para elaborar una lechada suave (Tabla 5.22):

Tabla 5.22 Proporcionamiento de lechada suave

Material	Cantidad
Cemento Portland	40 kg
Agua	285 l
Bentonita	17 kg

Fuente: Slope Indicator

5.4.2.2 Deformómetros de placas y arañas magnéticas

Los deformómetros de placas y arañas, comúnmente denominados deformómetros magnéticos (*magnetic extensometers*), se diseñaron para medir asentamientos y expansiones de suelos blandos debido a cargas y descargas producidas por la construcción de terraplenes, rellenos o edificios (Figura 5.68).

El sistema de un deformómetro magnético consta de cuatro partes básicas (Figura 5.69) que a continuación se describen.

- **Tubo de acceso** (*access tube*). Se instala de manera permanente dentro de una perforación vertical o se va colocando en un terraplén a medida que se construye. El ademe de acceso se fabrica de PVC (sin ranuras) de 2.54 cm, 7 cm y 8.5 cm de diámetro y longitud de 30 cm, 100 cm y 150 cm.

- **Imanes** (*magnets*). Se colocan alrededor del tubo de acceso, en los puntos donde se desee hacer mediciones. Pueden ser de dos tipos:

Arañas magnéticas (*spider magnet*)

Empleadas en barrenos. Su nombre se debe a su forma, constan de tres hojas metálicas superiores y tres inferiores, dispuestas a 120°. Las seis hojas son retráctiles y se mantienen retraídas con un par de hilos de nylon. En cada ancla se tiene un cortador neumático, de manera que al ubicarse en su posición de proyecto, se activa el cortador y se liberan las hojas metálicas.

Placas magnéticas (*magnet plates*)

Empleadas en terraplenes. Son de aluminio de forma cuadrada (30 cm x 30 cm x 0.5 cm) para un mejor acoplamiento con el terreno, en el centro se adapta un anillo magnético por donde atravesará el tubo de acceso.

- **Sonda.** Consiste en un cuerpo metálico en donde se aloja un interruptor de lengüeta. El circuito se cierra cuando el interruptor de lengüeta cruza el campo magnético de una araña o placa magnética, lo cual hace sonar un timbre.
- **Cable eléctrico graduado.** Enrollado dentro de un carrete y está graduado para definir a qué profundidad se encuentra la sonda con respecto a un nivel de referencia marcado en la superficie. Se utiliza para subir y bajar la sonda dentro del tubo de acceso y para transmitir las señales eléctricas a la superficie. El cable está graduado cada 1 mm, al sonar el timbre se efectúa una lectura.

5.4.2.2.1 Instalación

1. Ubique mediante métodos topográficos el sitio donde colocará el tubo guía o de acceso.
2. Perfore un barreno vertical utilizando un ademe de perforación tipo HW (\emptyset int 10.1 cm - 4 in).
3. Una cada tramo de tubo de acceso.
4. Deslice y coloque las arañas magnéticas en la parte especificada de cada tramo de acceso o separados a 1.5 m (5 ft). Procure que no queden ubicadas cerca de los acoplamientos. Debe tenerse especial cuidado para que las hojas no se liberen antes de que se encuentren en su posición final.
5. Baje dentro del barreno, mediante una cuerda, el tubo de acceso de PVC por tramos ya unidos y habilitados con las arañas magnéticas.
6. Una la manguera para aplicar la lechada al arreglo de tubos en su parte inferior (método del tubo tremie).
7. Mantenga sujetas en un apoyo las cuerdas en superficie.
8. Coloque otro cable de nylon, denominado liberador, entre las hojas de los imanes tipo araña provisto de un pasador cortador o mediante un cortador neumático. La parte inferior del tubo de acceso deberá quedar asentada en el fondo del barreno.

9. Baje la sonda y compruebe la posición de los imanes.
10. Tire del cable liberador en superficie para cortar las cuerdas que unen a las hojas de los imanes.
11. Mezcle la cantidad de lechada suficiente, y rellene mediante la manguera el espacio anular entre el tubo corrugado y las paredes del barreno.
12. Extraiga el ademe en caso de haber sido utilizado.
13. Conforme vaya relleno el barreno, extraiga la manguera, suspendiéndose hasta que la lechada sea depositada en la parte superior del barreno.
14. Coloque una tapa en la parte superior de protección y asegure el tubo de acceso mientras fragüe la lechada.
15. Coloque los imanes en las placas cuando la instalación se esté realizando en un relleno.
16. Deslice la placa en el tubo de acceso hasta que quede en la posición de proyecto.
17. Compacte con cuidado el material de relleno circundante a la placa.
18. Verifique la verticalidad de la tubería de acceso.
19. Elabore la ficha de instalación (Figura 5.70).

5.4.2.2.2 Operación

Se recomienda utilizar la misma sonda para un mismo sitio o, de lo contrario, realizar comparaciones entre ellas para realizar ajustes posteriores en el proceso del cálculo. El procedimiento es el siguiente:

1. Establezca un punto cero de referencia que se marca en la parte superior del tubo de acceso.
2. Después de concluir la instalación del tubo de acceso, realice tres recorridos para seleccionar dos lecturas por cada imán y elimine la que resulte discordante, que promediadas servirán de lectura inicial. Este proceso debe realizarse antes de que concluyan las 48 horas de instalación del tubo de acceso.
3. Descienda la sonda hasta el fondo del tubo de acceso. Cuando se escuche el timbre, debido a que detecta la presencia de imanes, deberá moverse en forma ascendente y lenta hasta que se escuche un segundo sonido que será donde se tome la lectura de profundidad que se registrará en la hoja de datos.
4. Determine la profundidad con respecto al punto cero de referencia mediante el cable eléctrico graduado y grabe de donde se localiza la sonda.

5. Continúe levantando la sonda y registre lecturas con el segundo sonido de la alarma para cada uno de los imanes magnéticos colocados en el tubo de acceso.

5.4.2.2.3 Cálculo

En la hoja de registro (Tabla 5.23a, véase anexo A), en la columna (1) se enlista la relación de los anillos magnéticos (placas o arañas); de la columna (2) a la (7) se anotan mensualmente las lecturas de profundidad desde el cabezal a la profundidad de cada uno de los elementos magnéticos localizados a lo largo de la tubería de acceso del deformómetro, y se define un nivel de referencia (*datum*) en el fondo donde se considera que es una zona estable, ya que la parte superior estará sujeta a deformaciones. En la Tabla 5.23b (véase anexo A), en las columnas (8), (9), (11), (13), (15) y (17) se resta la lectura del *datum* con respecto a cada una de las posiciones de los imanes. En las columnas (10), (12), (14), (16) y (18) se anotan los cambios resultado de la diferencia de posiciones mensuales con respecto a la inicial. En el caso de que el resultado sea (+) implica que se presentan expansiones, y (-) cuando sean asentamientos. Posteriormente, conforme se realicen otras lecturas se seguirá llenando la tabla.

El método de cálculo descrito es directo para evaluar las deformaciones; en el caso de que el nivel de referencia sea en el cabezal, será necesario apoyarse en nivelaciones topográficas para ajustar las lecturas y poder determinar las deformaciones reales.

5.4.2.2.4 Representación de los resultados

Para los deformómetros verticales, se dibujan las diferentes gráficas correspondientes a cada tramo o elevación del instrumento, con una identificación para conocer a qué tramo se refiere. También se recomienda adicionar un pequeño corte de la sección que es necesario para lograr una fácil localización de la identificación del instrumento, el cual muestre las elevaciones de interés, lo anterior se ilustra en la Figura 5.71.

5.5 CELDAS DE ASENTAMIENTO

La celda de asentamiento (*settlement cell*) es un instrumento muy sencillo y útil, que está diseñado para medir deformaciones verticales (asentamientos o expansiones) en un punto de interés al interior de un terraplén. Las lecturas se realizan desde una caseta y es particularmente útil donde el acceso es difícil. Además, su instalación no interfiere con el proceso de construcción.

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 (Figura 5.72).

En la Tabla 5.24 están indicados los alcances que se pueden obtener al utilizar estos equipos. En la Figura 5.73 se muestran algunos tipos de celdas de asentamiento fabricadas comercialmente y en la Tabla 5.25 se listan algunas de las especificaciones indicadas por el fabricante.

5.5.1 Componentes

A continuación, se describen brevemente los componentes principales y los accesorios:

Transductor (*transducer*)

Dispositivo que consta de una carcasa hermética de acero inoxidable en donde se aloja el sensor para medir la presión. Los transductores pueden ser de cuerda vibrante o neumáticos.

Tubos portadores (*carrier pipe*)

Consisten en un par de tubos de plástico de 4.8 mm (3/16 in) de diámetro dentro de una cubierta de polietileno, que están llenos de un líquido compuesto por una mezcla de 50% de agua y 50% líquido anticongelante (etilenglicol). Los tubos usan conectores rápidos para acoplarse al depósito de líquido. En el transductor venteado se utiliza un tubo de 3.2 mm (1/8 in) de diámetro conectado a una cámara desecante (para absorción de humedad).

Cables eléctricos

Para conectar el transductor con la unidad de lectura.

Tabla 5.24 Alcance de algunas celdas de asentamiento (modificado de Dunicliff, 1993)

Tipo	Ventajas	Limitaciones	Precisión aproximada
Celda única con la unidad de lectura a una mayor altura	La celda puede instalarse en un barreno, zanja o perforación. La presión ejercida por el líquido se puede verificar continuamente.	El diseño y operación del transductor requiere atención para asegurar la precisión. La versión del transductor con cuerda vibrante puede estar sujeta a daños si opera en vacío. Si el transductor es venteado estará sujeto a errores por corrosión y el no venteado es sensible a los cambios de presión barométrica. Se requiere aeración del líquido. Solo se monitorea un punto. Se requiere precisión en el conocimiento de la densidad del líquido. En nivel de lectura debe estar por arriba del de la celda. Cuando se utiliza mercurio crea riesgos al medio ambiente.	Con transductor de cuerda vibrante y mercurio: $\pm 3 \text{ mm}-25 \text{ mm}$ ($\pm 0.1 \text{ in}-1.0 \text{ in}$). Con transductor neumático $\pm 1.3 \text{ mm}-38 \text{ mm}$ ($\pm 0.5 \text{ in}-1.5 \text{ in}$).
Celdas múltiples	Preciso. Grabación automática de datos.	Todas las celdas de un arreglo deben estar a la misma elevación y presión barométrica	$\pm 0.1 \text{ mm}-3 \text{ mm}$ ($\pm 0.004 \text{ in}-0.1 \text{ in}$)

Depósito de líquido (*reservoir*)

Este depósito mantiene llena la tubería de conexión con el transductor. El líquido es agua desaerada; si el instrumento está localizado en un sitio donde se presenten heladas, el líquido debe estar compuesto por una mezcla de agua y etilenglicol en una proporción 1:1.

Derivador múltiple (*connection manifold*)

Para conectar al depósito hasta ocho celdas.

Barómetro (*barometer*)

Registra la presión atmosférica en el momento de la toma de lecturas.

Unidad de lectura

Tiene la función de proporcionar la energía y recibir las señales eléctricas del transductor, exhibir las lecturas en forma digital y almacenar los datos.

5.5.2 Operación

El transductor de presión unido al tubo lleno de líquido quedan ambos embebidos en el relleno; el otro extremo del tubo termina en un depósito de líquido. El depósito de líquido debe colocarse con una elevación mayor que el punto de medición. El tubo actúa como una columna

Tabla 5.25 Celdas de asentamiento

Fabricante	Tipo	Especificaciones
Slope Indicator	De cuerda vibrante	Celda VW venteadada Rango: 14 m Resolución: 0.025% F.S. Repetibilidad: ±0.25% F.S. a 1% F.S. Rango de temperatura: -20° a 80° C
		Celda VW sellada Rango: 33 m Resolución: 0.025% F.S. Repetibilidad: ±0.25% F.S. a 1% F.S. Rango de temperatura: -20° a 80° C
		Celda neumática Tipo de sensor: neumático Rango: 64 m Repetitividad: ±0.25% F.S. a ±1% F.S.
Rst Instruments	De cuerda vibrante modelo VWSP105	Rango estándar: 7, 17 mm Resolución/sensibilidad: 0.05% F.S. Precisión: 0.1% F.S. Rango de temperatura: -20° a 80° C

Fuente: Catálogo de los fabricantes

de líquido, y el transductor mide la presión en el fondo creada por la columna de agua. Al asentarse la base en la que está colocado el transductor, se incrementa la altura de la columna de agua. El asentamiento se calcula midiendo el cambio de presión y transformándolo en metros de carga hidráulica, mediante la diferencia se conoce el asentamiento.

5.5.3 Instalación

Se efectúa durante la etapa de construcción en la forma siguiente:

1. Localice topográficamente mediante estacas el sitio de colocación de la celda de asentamiento, de la tubería y el cableado, de acuerdo con el proyecto de instrumentación y monitoreo (Figura 5.74).
2. Localice topográficamente el sitio de colocación de la caseta de medición (Figura 5.75), la cual debe tener una mayor elevación que el sitio de instalación de la celda.
3. Cuando se encuentre la terracería a 1 m por encima de la elevación de la celda, excave una zanja con un ancho de 60 cm hasta la profundidad de instalación, eliminando los fragmentos de roca angular de la superficie horizontal para evitar dañar tubería y cableado.

4. Coloque una capa de arena fina húmeda compactada con equipo manual o neumático (bailarina) de 10 cm de espesor en el fondo de la zanja.
5. Coloque la placa de apoyo de la celda sobre la capa de arena perfectamente nivelada.
6. Instale el transductor de presión sobre la placa de apoyo.
7. Realice el tendido de los tubos de fluidos y de los cables eléctricos a lo largo de la zanja; procure dejar gazas en los cables, es decir, enrolle holgadamente el cable para que no sufra daños por tensión.
8. Cubra a mano, con una capa de arena fina de 20 cm de espesor, el transductor, las tuberías y los cables.
9. Con equipo manual rellene la zanja con el material de las terracerías. Al concluir esta etapa, se podrá continuar utilizando el equipo pesado.
10. Instale el depósito de líquido en el interior de la caseta en uno de los muros o en un poste, cuide que no quede expuesto a los cambios de temperatura.
11. Llene el depósito con una mezcla de agua y etilenglicol. El depósito se debe rellenar debido a la evaporación.
12. Para mantener el depósito con un nivel constante, se puede incluir una bomba con un tanque de abastecimiento.
13. Conecte el cable eléctrico a la unidad de lectura.
14. Compruebe el funcionamiento del sistema de la siguiente manera:
 - Tome una lectura inicial.
 - Mueva el depósito 50 cm de manera ascendente y tome una segunda lectura.
 - Mueva el depósito 1 m de manera descendente y tome una tercera lectura.
 - Realice la conversión de las lecturas registradas, de manera que la segunda y tercera lectura muestren el cambio de 50 cm con respecto a la lectura inicial.
 - Si las lecturas son correctas, fije el depósito en la posición definitiva.
15. Registre la presión y la temperatura provenientes de la celda, así como la presión barométrica.
16. Elabore la ficha de instalación (Figura 5.76).

5.5.4 Toma de lecturas

El proyecto de instrumentación y monitoreo especifica la periodicidad de la toma de lecturas, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento:

1. Verifique que el depósito de líquido esté lleno; para ello, remueva la tapa y rellénelo hasta que desborde.
2. Conecte la unidad de lectura o una grabadora de datos.
3. Encienda el equipo.
4. Seleccione rangos de operación en un intervalo de 1.4-3.5 kHz.
5. Tome la lectura pulsando la tecla correspondiente para desplegar la información que proviene del transductor de cuerda vibrante en hertz. Mida la temperatura en grados Celsius y la presión barométrica en psi o bares.
6. Tome dos veces la lectura y obtenga una lectura promedio.

5.5.5 Cálculo

Existe en el mercado una diversidad de fabricantes e instrumentos, por lo que a continuación se describe, en forma muy general, un conjunto de puntos a tomar en cuenta en el cálculo. Para una marca y modelo en particular, debe consultarse el manual de instrucciones del fabricante.

Para la toma de lecturas se realiza lo siguiente:

1. Convierta la lectura en hertz a unidades de presión, utilizando las expresiones y factores de calibración del fabricante.
2. Realice la corrección por presión barométrica.
3. Realice la corrección por densidad del líquido en función de la temperatura.
4. Obtenga la altura de columna de agua, que multiplicada por la densidad del líquido utilizado nos dará la elevación de la celda.
5. El cálculo se realiza según la Tabla 5.26 (véase anexo A).

Se obtienen el promedio de las lecturas efectuadas, o sea, corresponde en la forma a:

$$\text{Promedio (5)} = ((3) + (4)) / 2$$

Se efectúa la diferencia de la lectura actual (5) y la inicial (6), o sea:

$$\text{Diferencia } (7) = (6) - (5)$$

6. Para determinar el desplazamiento vertical. El desplazamiento (+) implica asentamientos mientras (-) son expansiones.

suspendido de un transductor de cuerda vibrante. El sensor no tiene corrimiento de cero, y es altamente estable a variaciones de temperatura. Como la lectura del sensor es frecuencia, dicha lectura no es afectada por la longitud del cable eléctrico.

Es apropiado para monitorear asentamientos muy pequeños. Se instala en cortinas, túneles y cimentaciones. La Figura 5.80 ilustra el sistema descrito.

5.5.6 Presentación de resultados

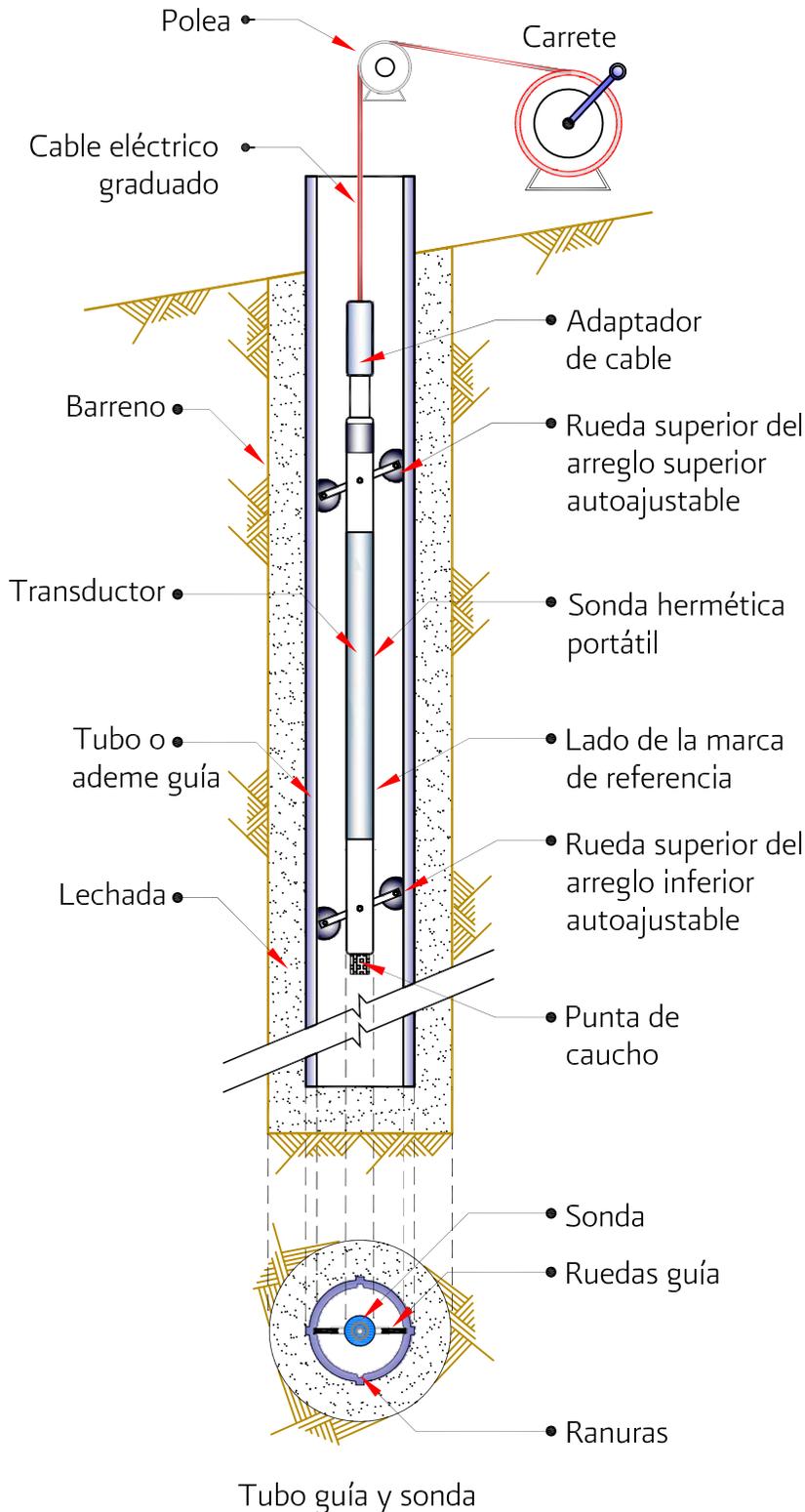
Con el fin de analizar los movimientos que presenta la zona a través de las celdas de asentamientos desde su instalación, es frecuente elaborar tres tipos de gráficas. En la primera (Figura 5.77), se presenta la variación de cada una de las celdas de asentamientos con el tiempo, mientras que en la segunda (Figura 5.78), la configuración de un grupo de celdas de asentamientos con el tiempo; es muy conveniente que en estas dos gráficas se indique la etapa de construcción y el embalse para correlacionar ambos efectos. En la tercera (Figura 5.79), empleando la primera información, se grafica en escala semilogarítmica, donde en el eje vertical (escala natural) se representa la deformación y en el horizontal (escala logarítmica) el tiempo con lo que se logra visualizar el proceso de consolidación.

5.6 NUEVOS DESARROLLOS

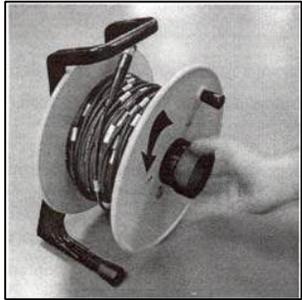
Actualmente existen en el mercado una gran diversidad de fabricantes e instrumentos en desarrollo, a continuación se menciona un dispositivo que se considera útil y muy interesante. Sin embargo, comercialmente la información para su instalación, operación, cálculos y resultados es muy escasa.

Sensor de nivel de agua de alta precisión

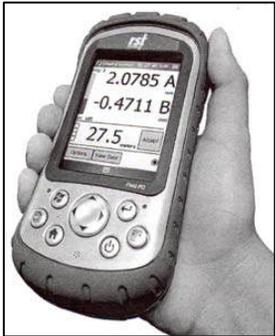
El sensor de nivel de agua de precisión (*high sensitivity settlement system*) es un transductor altamente estable para monitorear niveles de agua mediante un transductor de cuerda vibrante. Es capaz de medir cambios en el nivel del agua tan pequeños como 0.07 mm. El sensor consiste en un cuerpo cilíndrico parcialmente sumergido dentro de una carcasa de PVC llena de líquido y



Polea para el control del cable eléctrico



Carrete con cable eléctrico graduado



Unidad de lectura portátil

Figura 5.1 Componentes básicos de un sistema de inclinómetro vertical



Tubo guía de plástico rígido tipo QC (cortesía de Slope Indicator)



Tubo guía de plástico rígido tipo CPI (cortesía de Slope Indicator)



Tubo guía de plástico (cortesía de Rst Instruments)

Figura 5.2 Tubos guía y tipos de acoplamiento para inclinómetros



Figura 5.3 Sonda para inclinómetro vertical con dos sensores tipo acelerómetro de fuerza balanceada modelo 6000 (cortesía de Geokon)



Figura 5.4 Carrete con cable eléctrico graduado para inclinómetro (cortesía de Slope Indicator)



Figura 5.5 Unidad de lectura modelo GK-401 para inclinómetro (cortesía de Geokon)



Figura 5.6 Adaptación de la polea en el cabezal del tubo guía del inclinómetro (cortesía de Geokon)



Figura 5.7 Toma de lecturas con la sonda del inclinómetro vertical sin utilizar polea

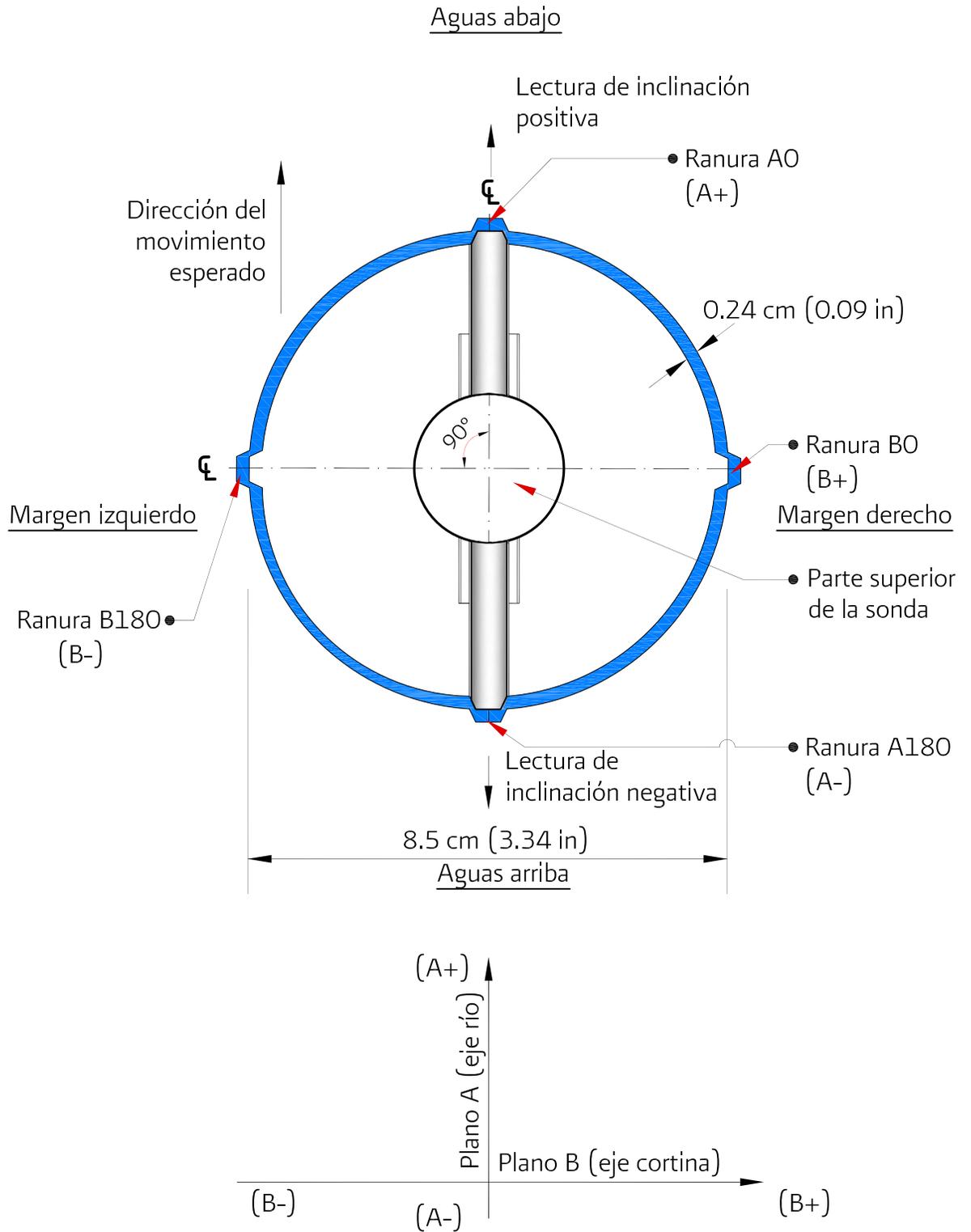
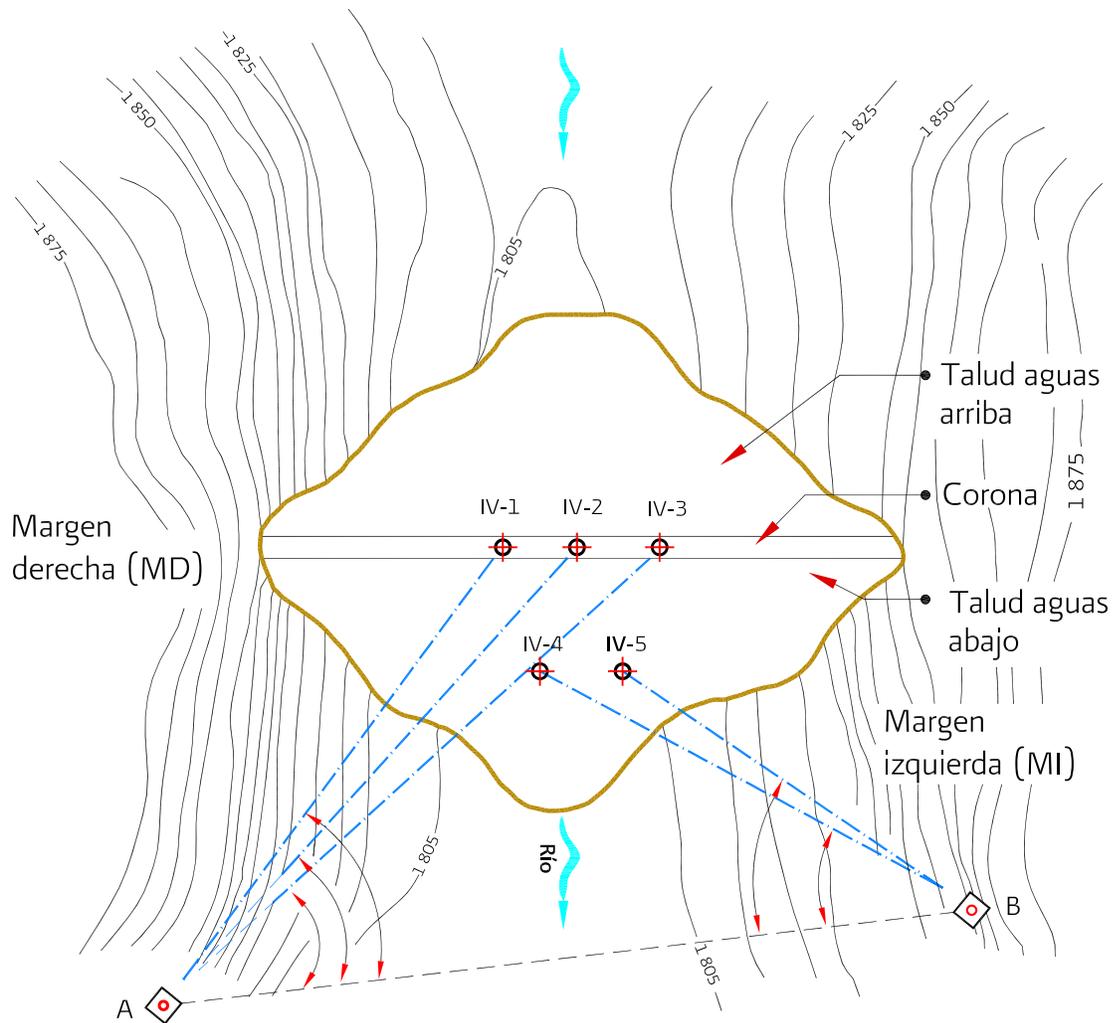


Figura 5.8 Sección transversal de la tubería guía para inclinómetro



Simbología

- A  Banco de referencia A para control horizontal (BRCH)
- Línea base
-  Radiaciones
- IV-1  Inclínómetro vertical # 1

Figura 5.9 Ubicación del brocal de la tubería guía del inclinómetro vertical con apoyo de método topográfico

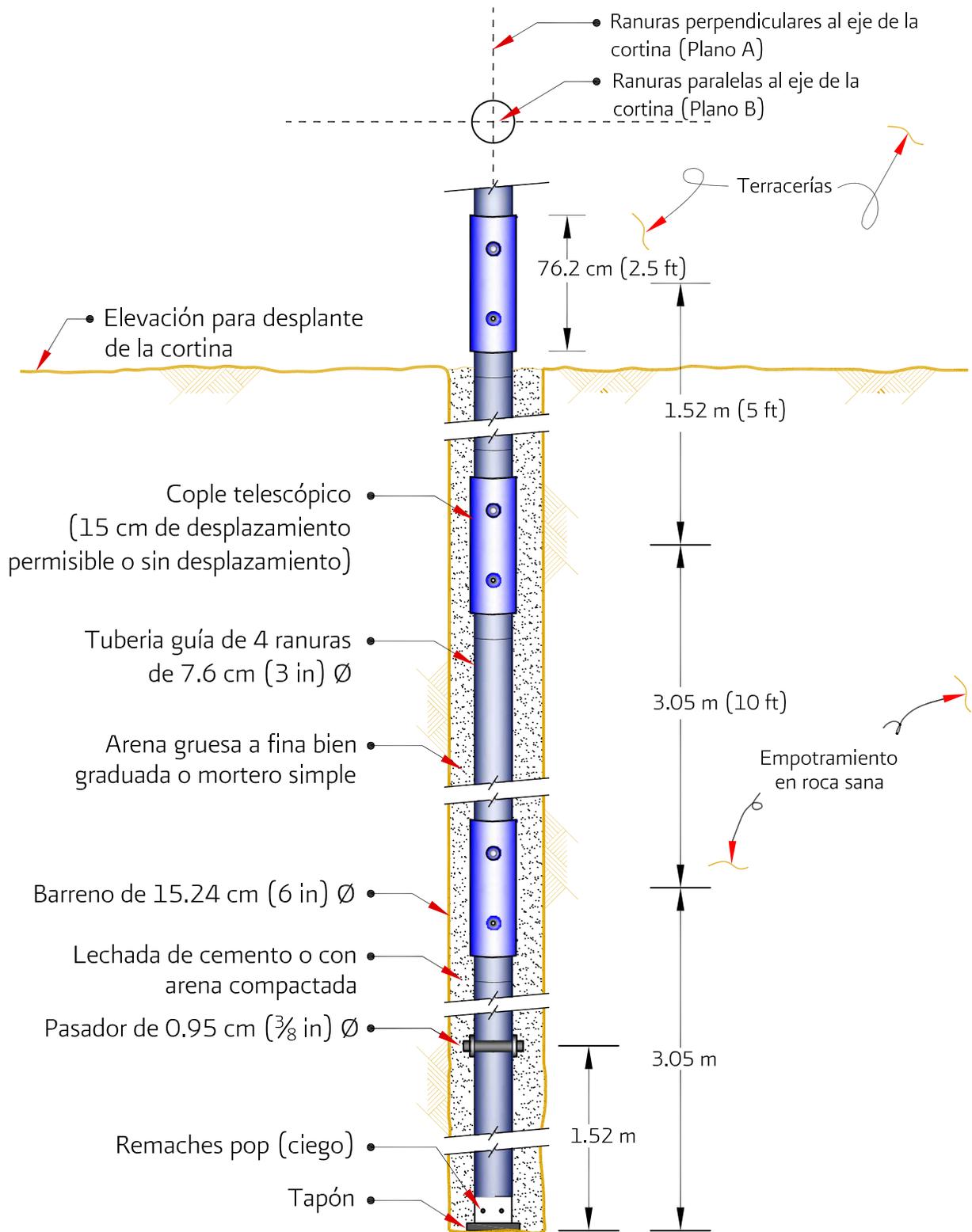


Figura 5.10 Detalle de anclaje de la tubería guía del inclinómetro en su extremo inferior

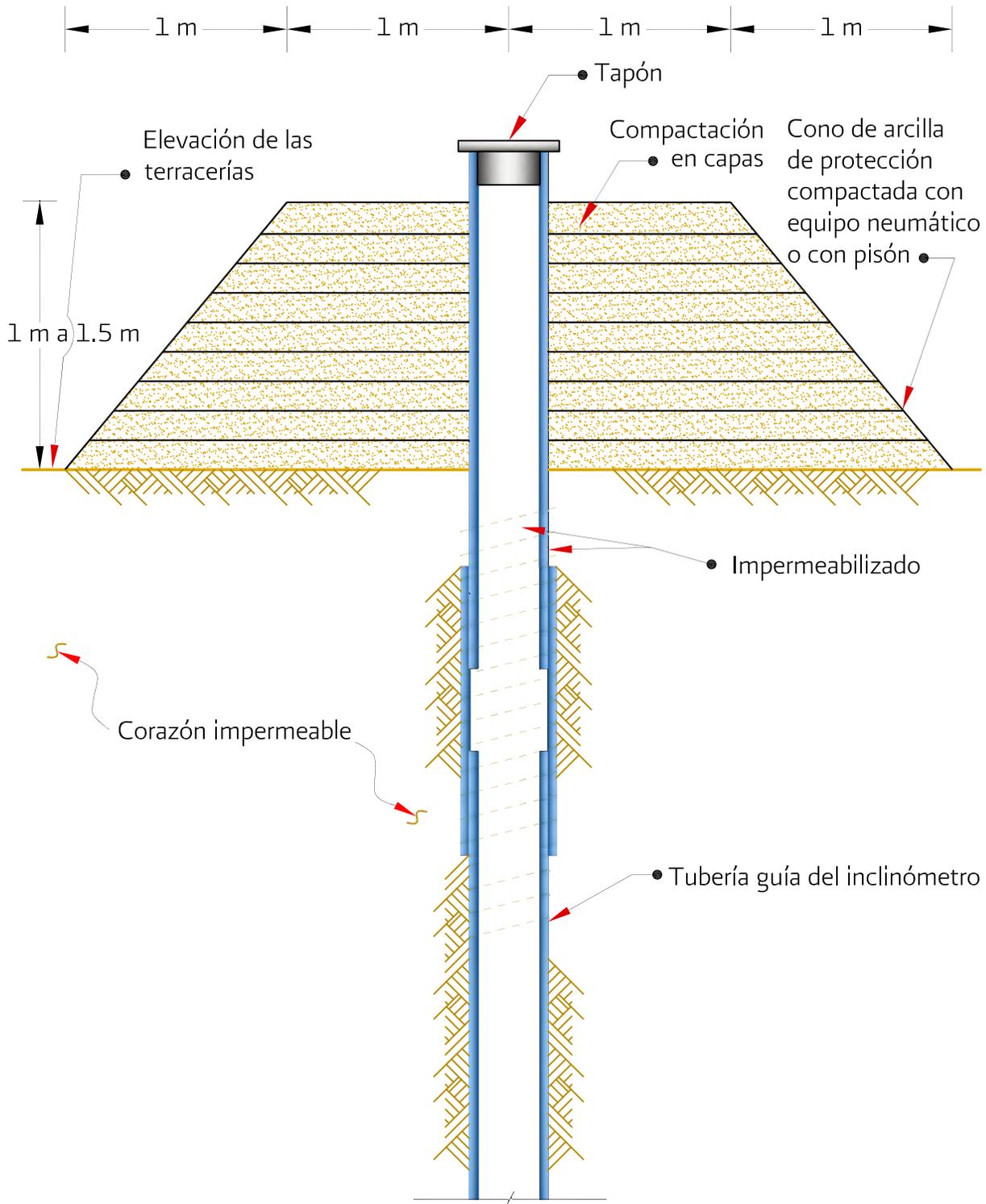
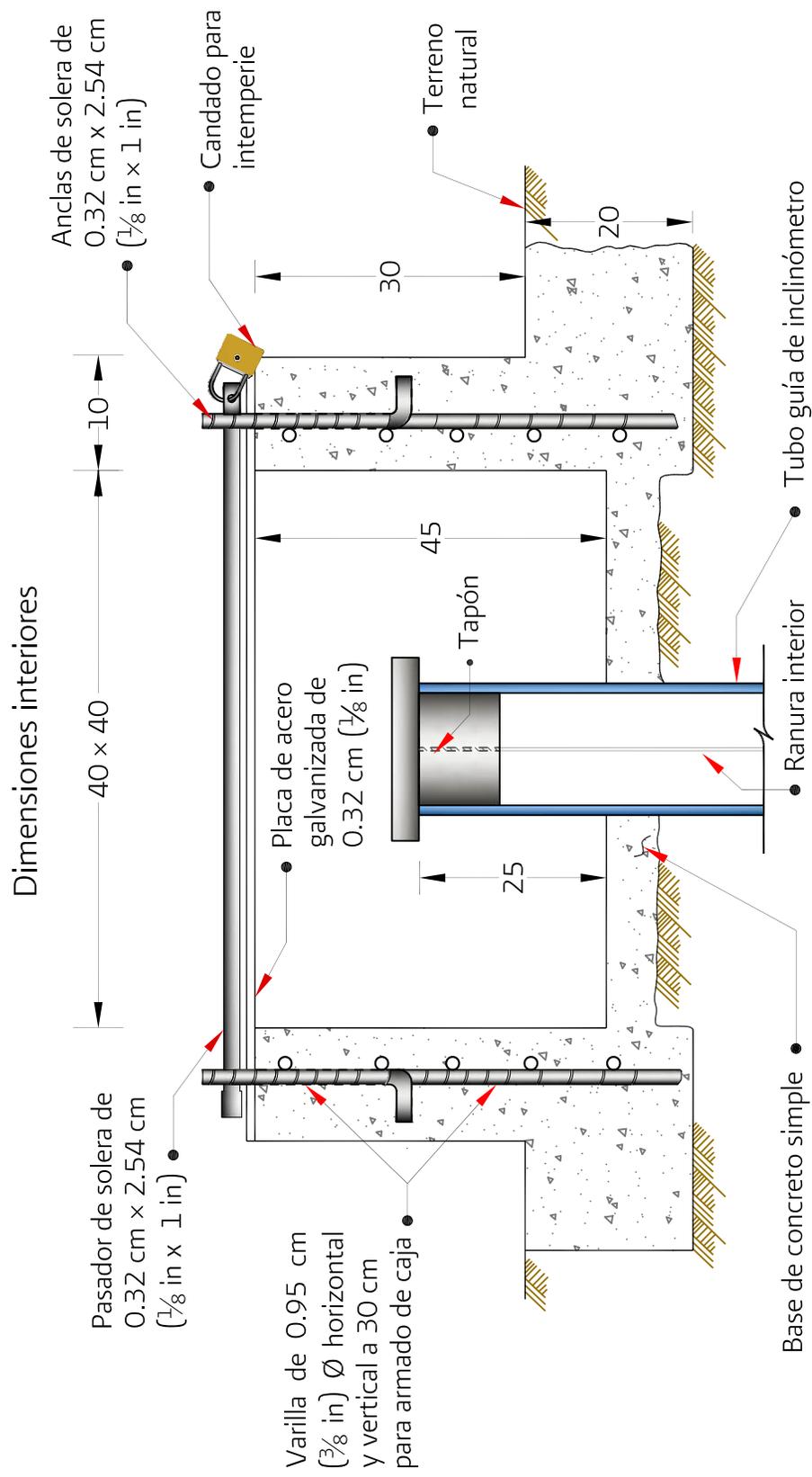


Figura 5.11 Sobreelevación en el núcleo impermeable para protección del tubo guía del inclinómetro



Acotaciones en centímetros

Figura 5.1.2 Caja de protección del brocal del inclinómetro

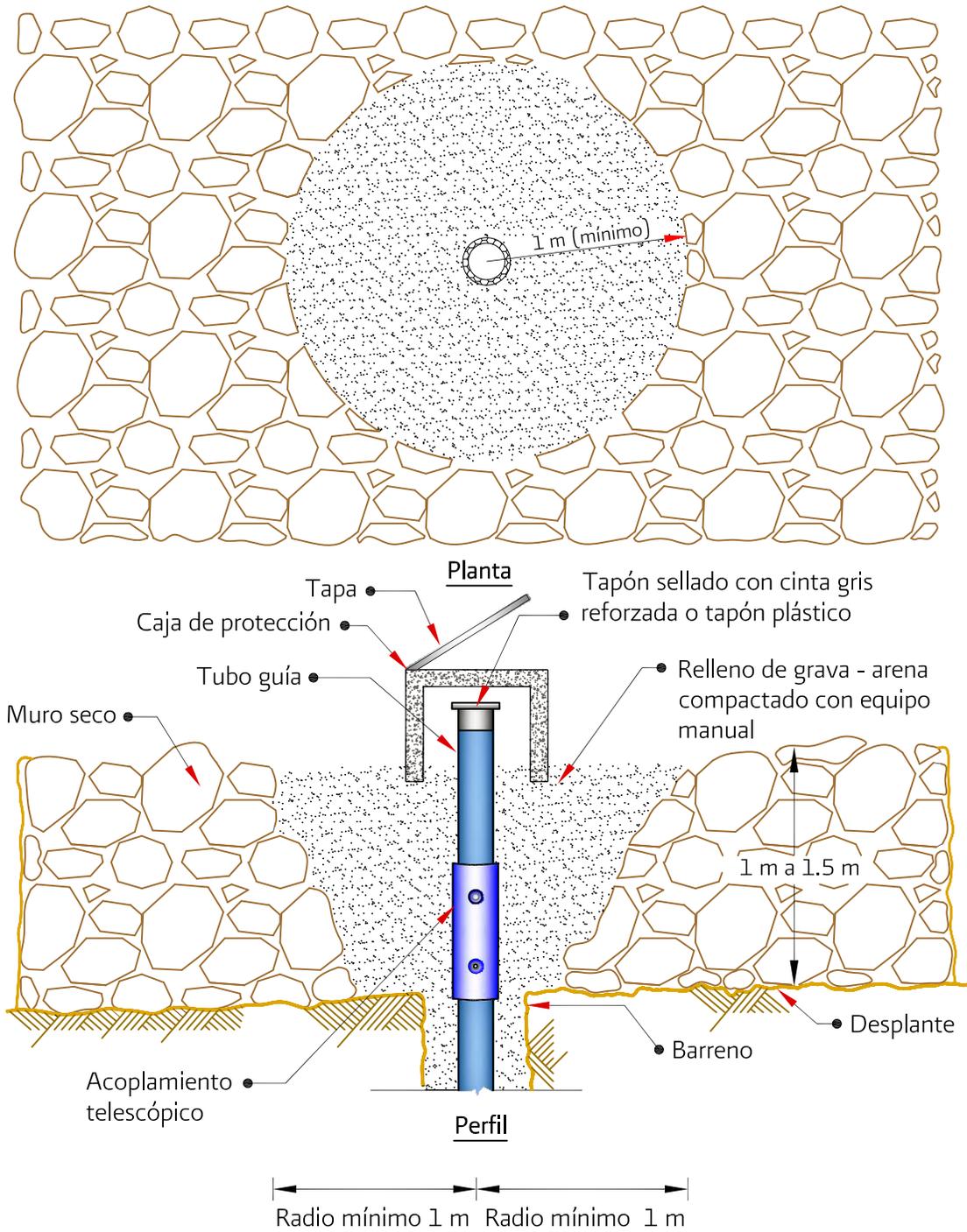


Figura 5.13 Protección en sobreelevación del tubo guía en los respaldos (rezaga o enrocamiento)

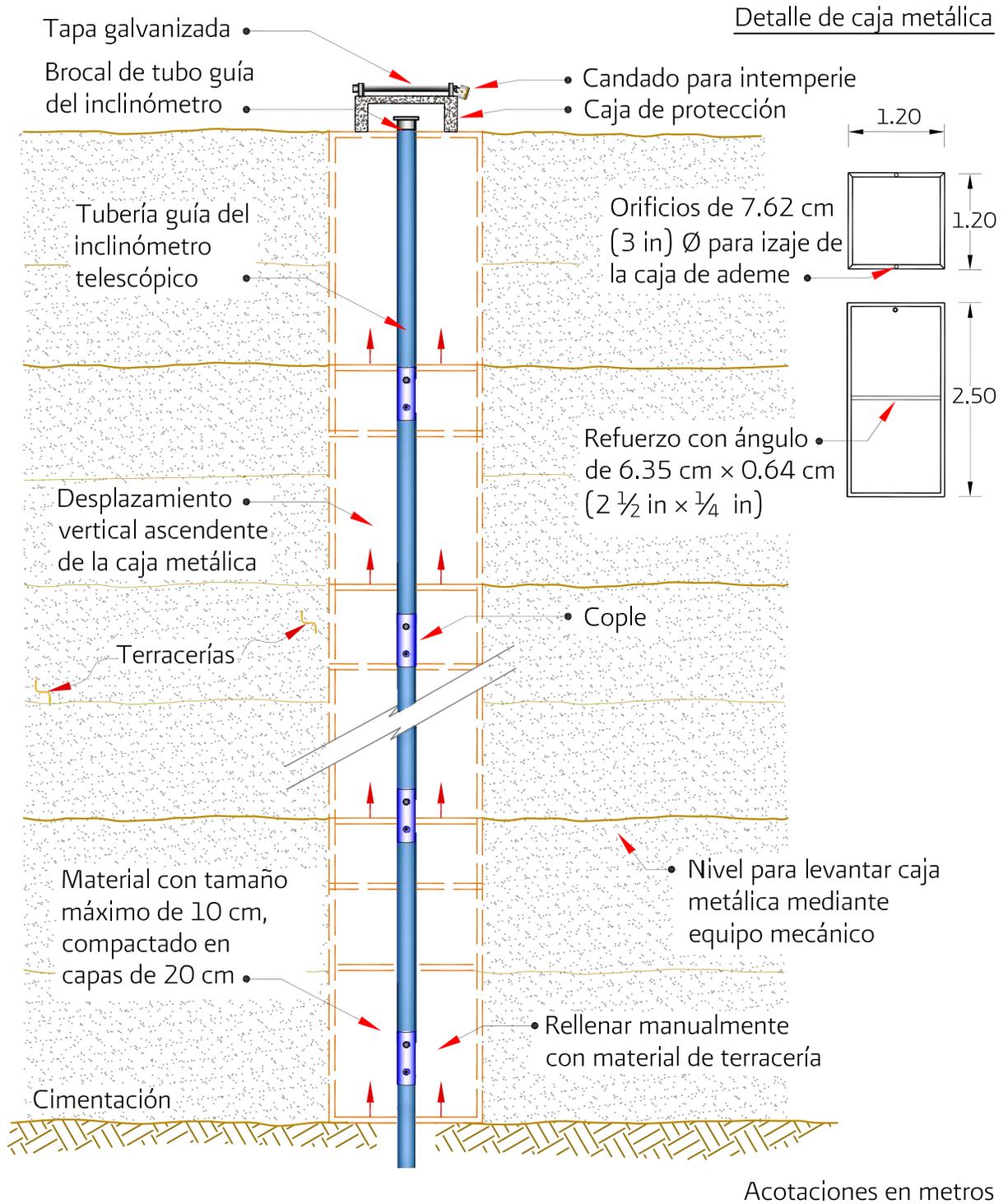


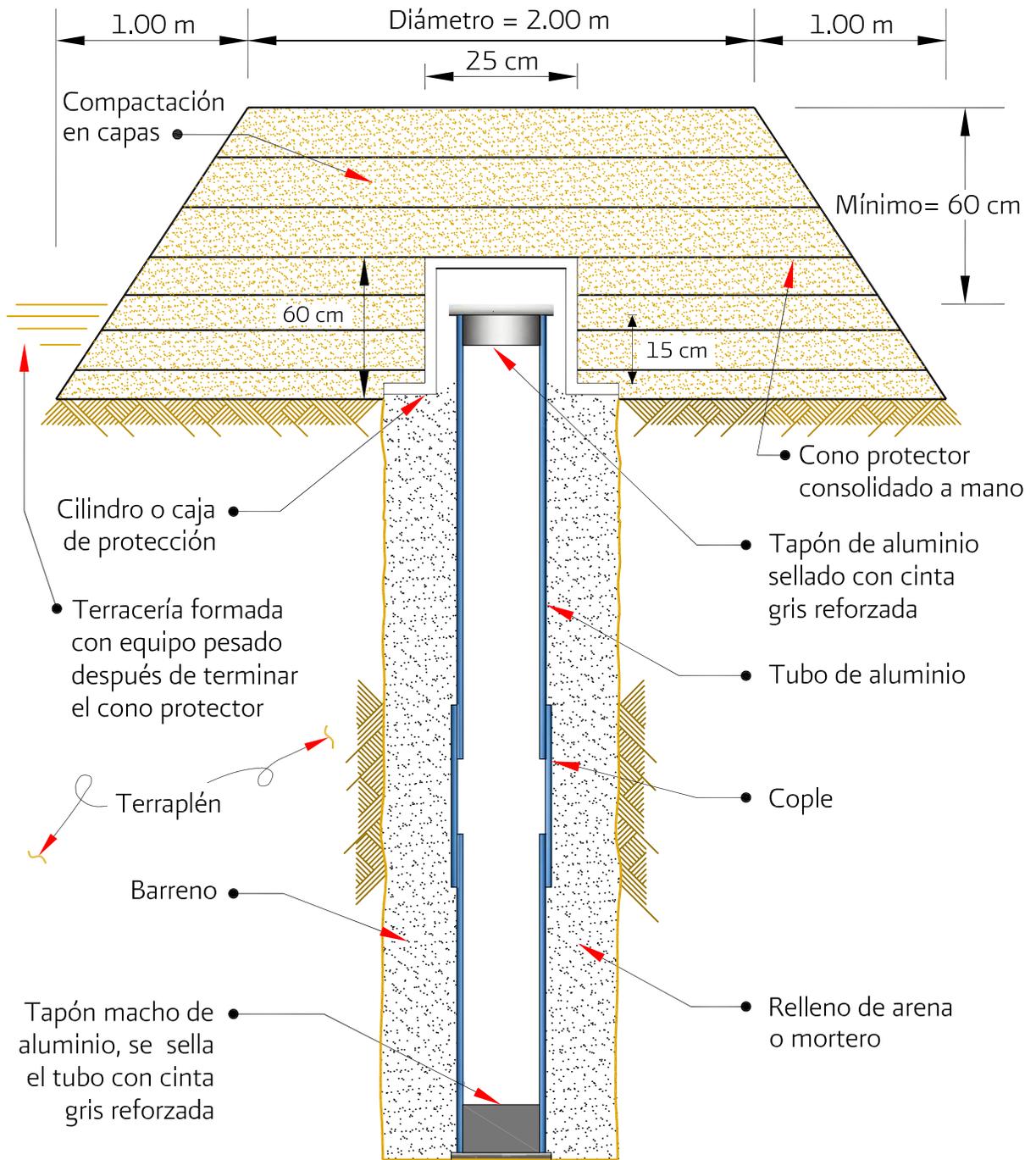
Figura 5.14 Desplazamiento de la caja metálica para la instalación del tubo guía del inclinómetro en enrocamiento



Figura 5.15 Caja metálica para la instalación de tubos guía del inclinómetro durante la construcción de un terraplén



Figura 5.16 Instalación de tubos guía de plástico y de aluminio dentro de una caja metálica de protección durante la construcción de un terraplén



Sin escala

Figura 5.17 Protección metálica de inclinómetro en sobreelevación por debajo de las terracerías

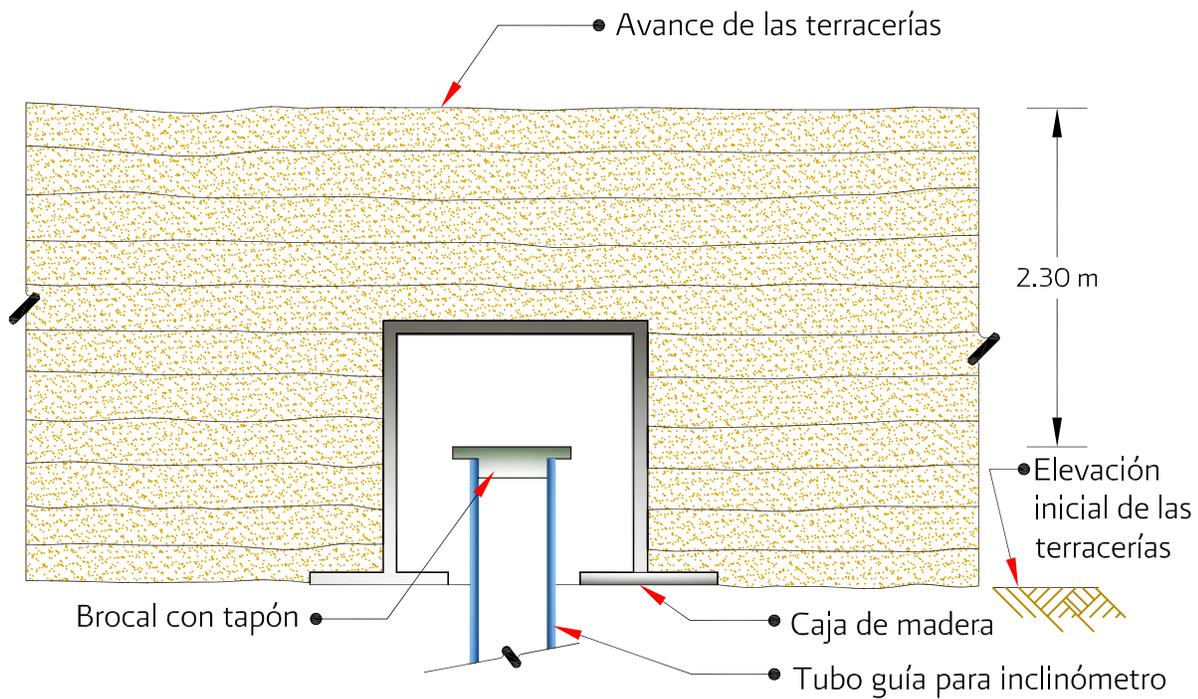
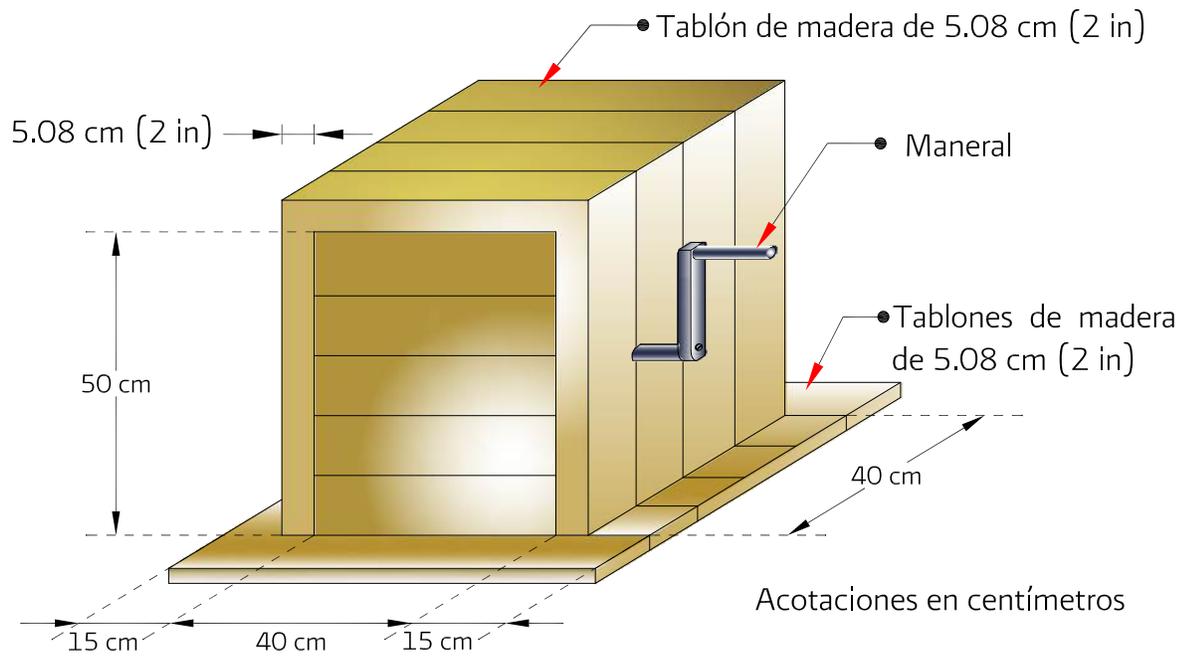


Figura 5.18 Caja de protección para inclinómetros en sobreelevación por debajo de las terracerías

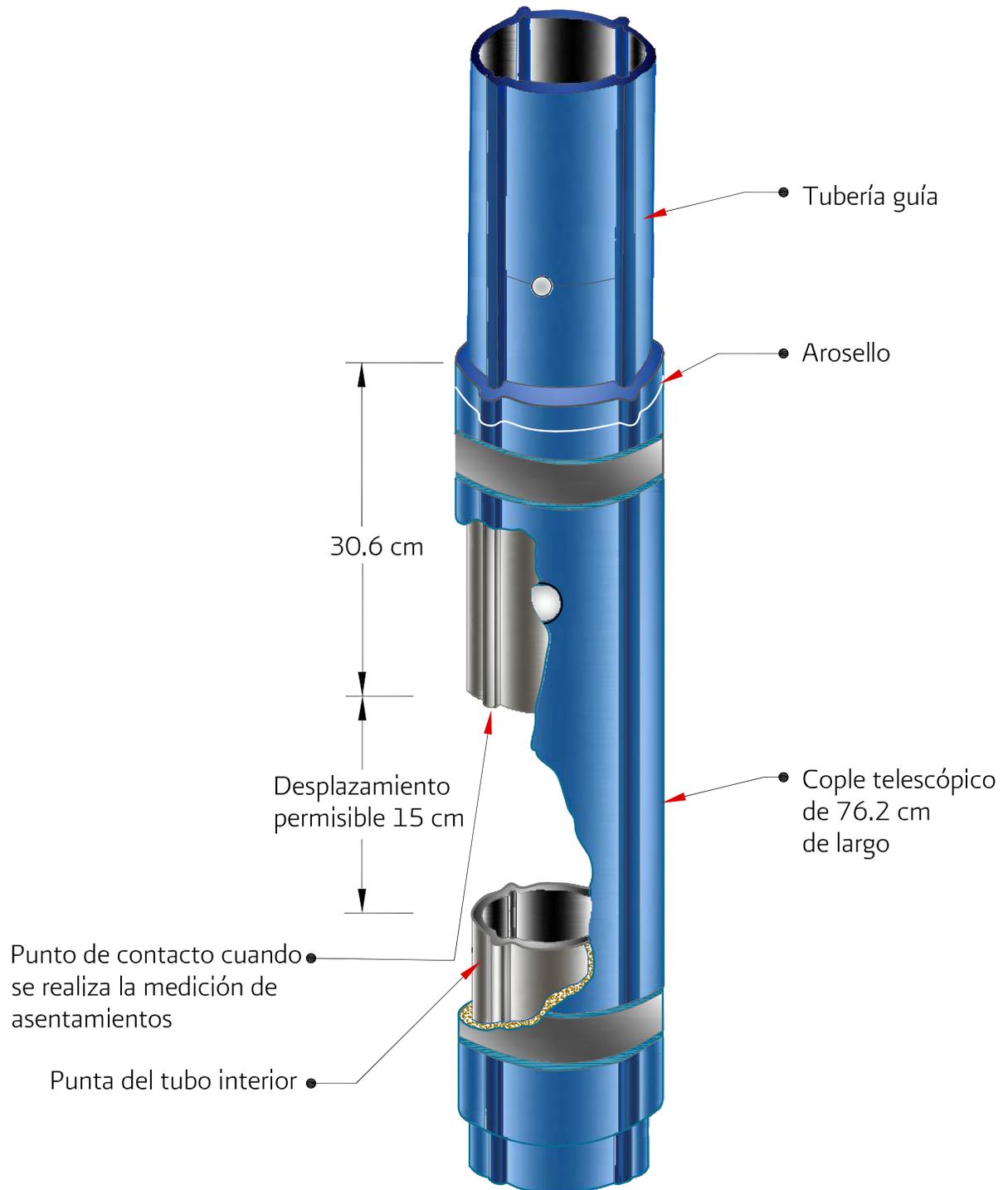


Figura 5.19 Detalle de acoplamiento telescópico y tubo guía del inclinómetro

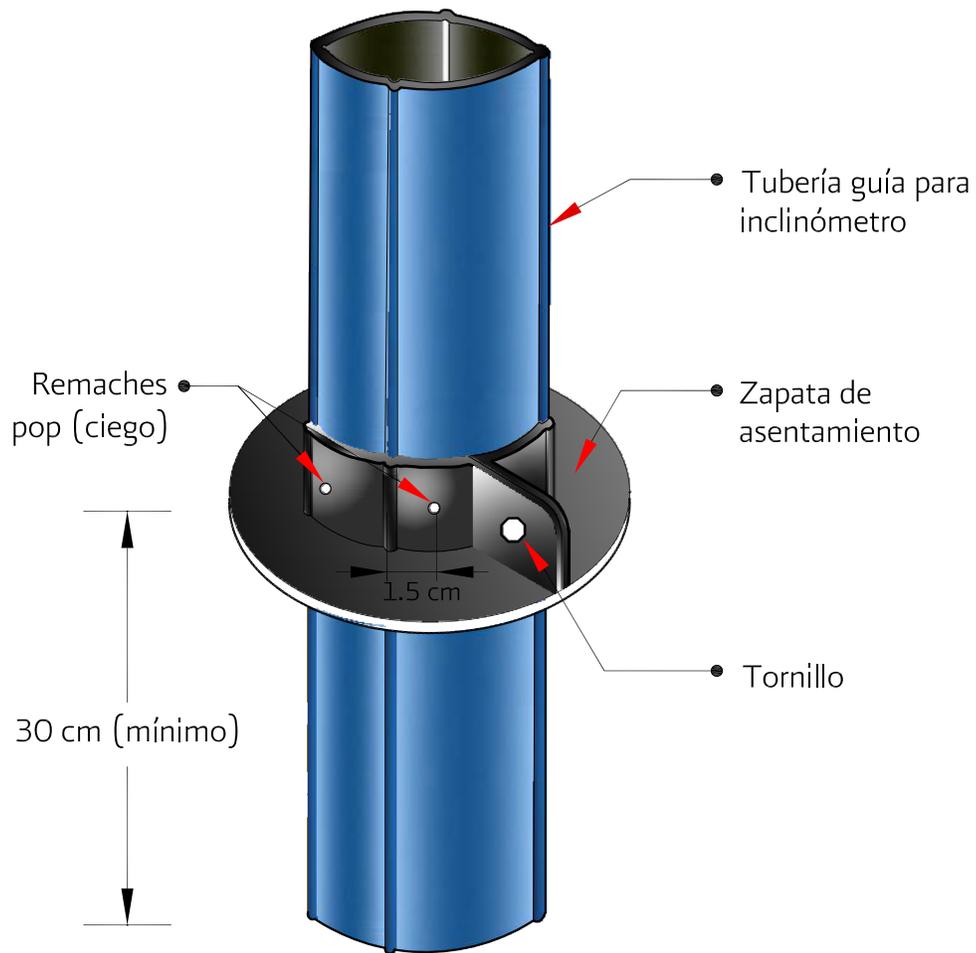
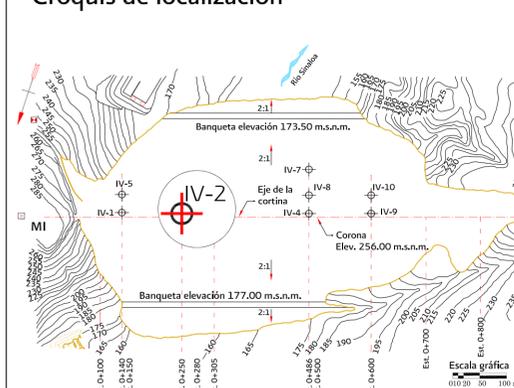
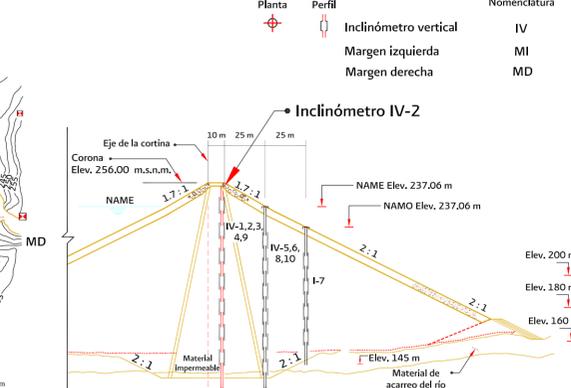


Figura 5.20 Zapata de asentamientos

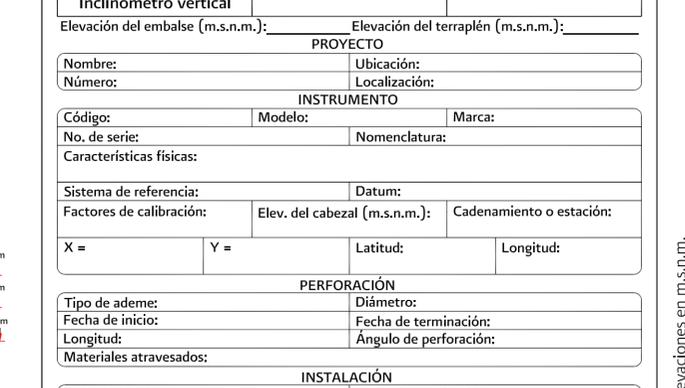
Croquis de localización



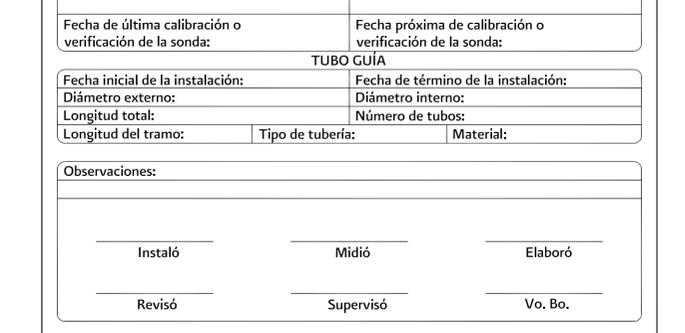
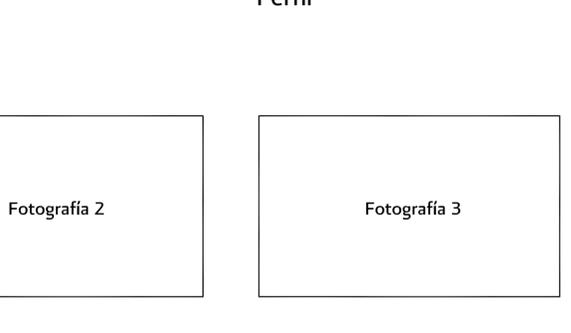
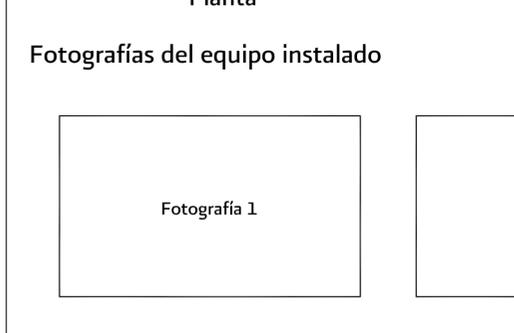
Planta



Perfil



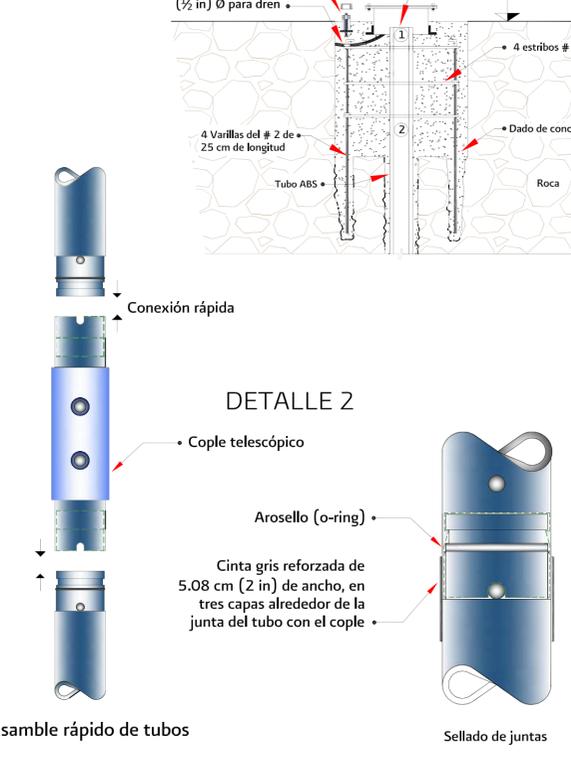
Fotografías del equipo instalado



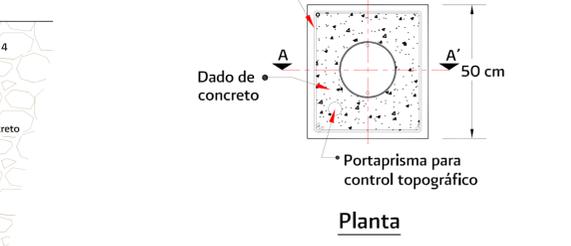
Formulario de datos

EQUIPO: Inclinómetro vertical		No. de ficha:	Código de plano:
Elevación del embalse (m.s.n.m.):		Elevación del terraplén (m.s.n.m.):	
PROYECTO			
Nombre:		Ubicación:	
Número:		Localización:	
INSTRUMENTO			
Código:	Modelo:	Marca:	
No. de serie:	Nomenclatura:		
Características físicas:			
Sistema de referencia:		Datum:	
Factores de calibración:		Elev. del cabezal (m.s.n.m.):	Cadenamiento o estación:
X =	Y =	Latitud:	Longitud:
PERFORACIÓN			
Tipo de ademe:		Diámetro:	
Fecha de inicio:		Fecha de terminación:	
Longitud:		Ángulo de perforación:	
Materiales atravesados:			
INSTALACIÓN			
Fecha de inicio:		Fecha de terminación:	
Lectura inicial, fecha y hora:		Lectura posterior, fecha y hora:	
Fecha de última calibración o verificación de la sonda:		Fecha próxima de calibración o verificación de la sonda:	
TUBO GUÍA			
Fecha inicial de la instalación:		Fecha de término de la instalación:	
Diámetro externo:		Diámetro interno:	
Longitud total:		Número de tubos:	
Longitud del tramo:	Tipo de tubería:	Material:	
Observaciones:			
Instaló	Midió	Elaboró	
Revisó	Supervisó	Vo. Bo.	

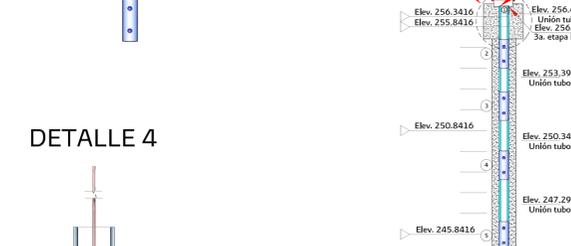
Diagrama de elevaciones



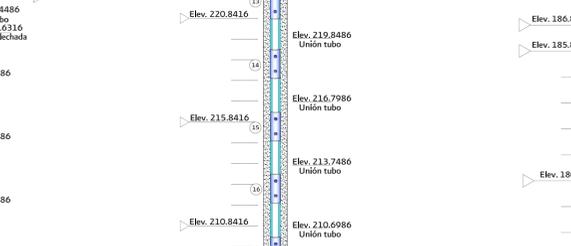
DETALLE 1



DETALLE 2



DETALLE 3



DETALLE 4

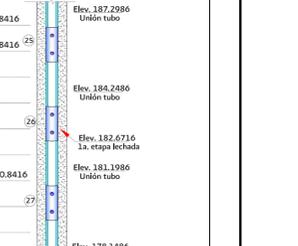
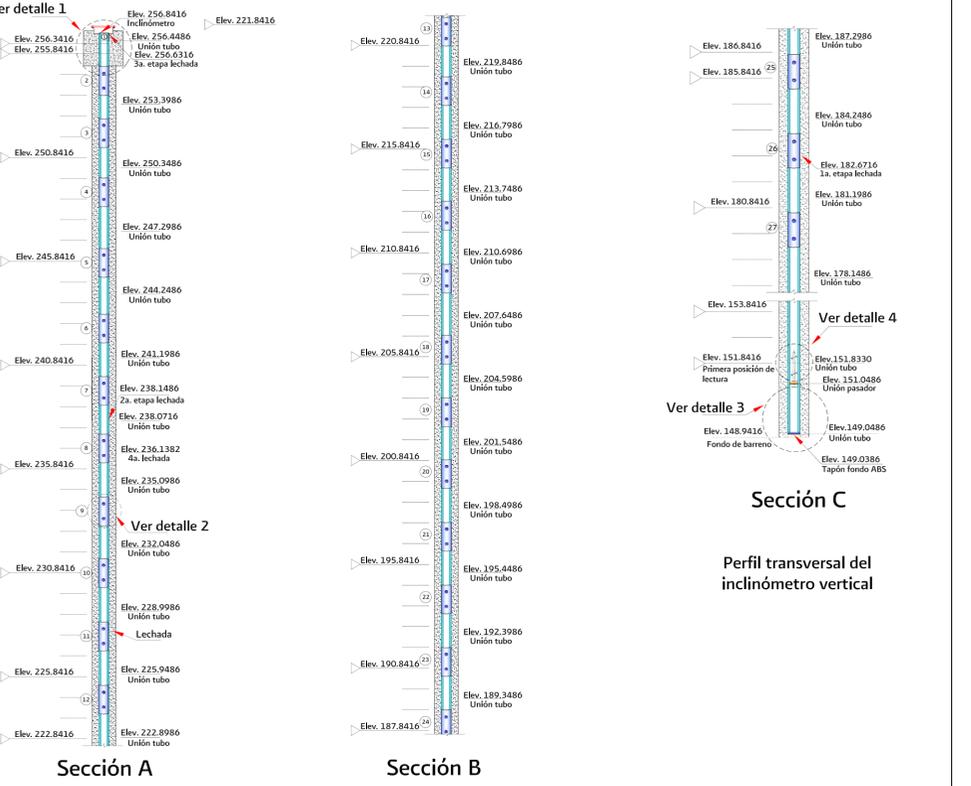


Figura 5.21 FICHA DE INSTALACIÓN DEL INCLINÓMETRO VERTICAL



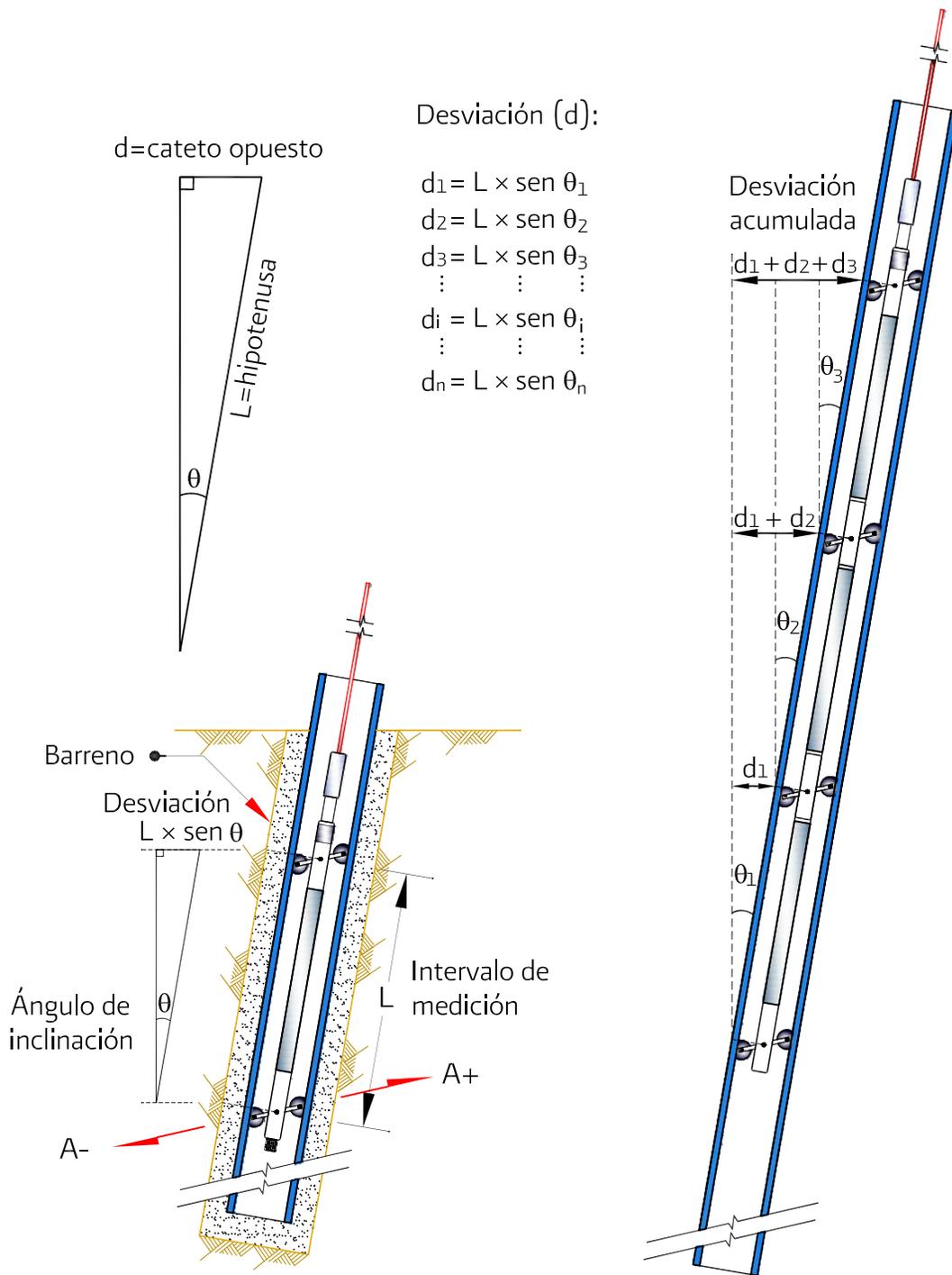


Figura 5.22 Principio de funcionamiento del inclinómetro vertical (cortesía de Slope Indicator)

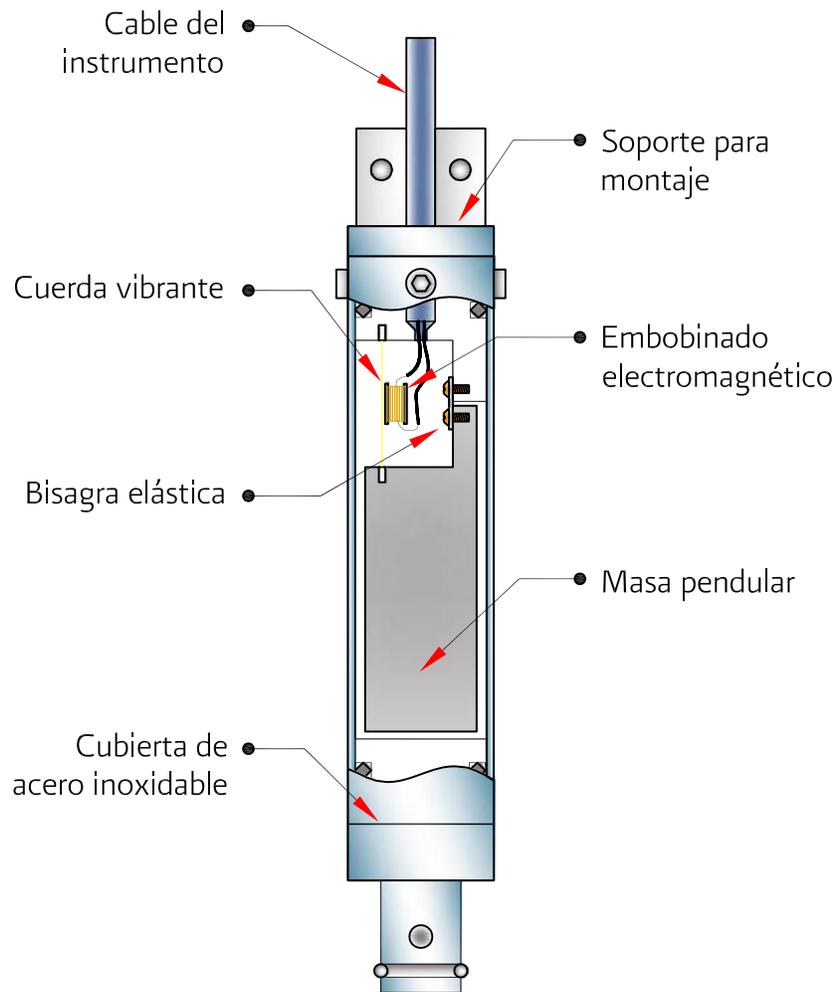


Figura 5.23 Transductor de cuerda vibrante de la sonda del inclinómetro vertical (cortesía de Geokon)



Figura 5.24 Operación en campo de una sonda para inclinómetro vertical

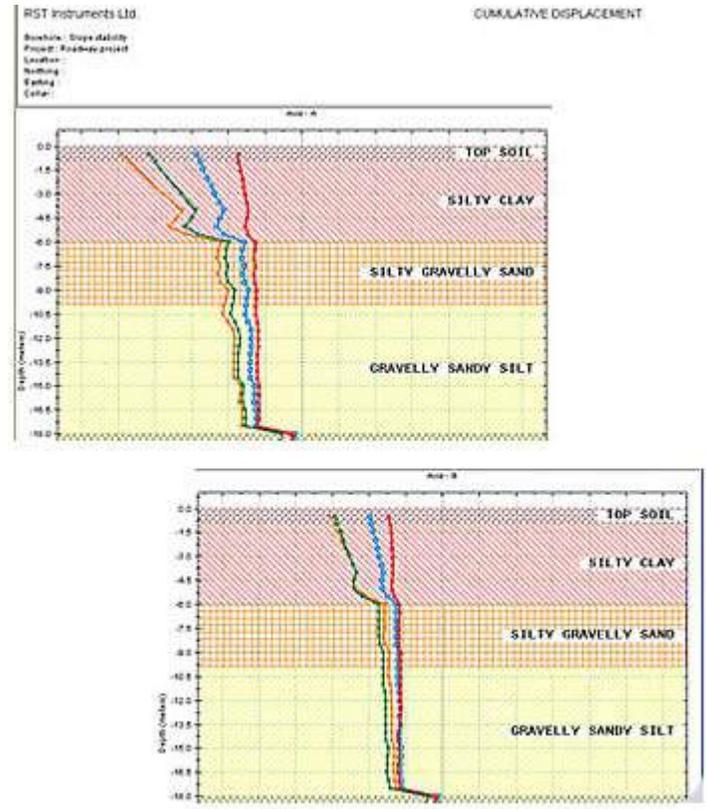
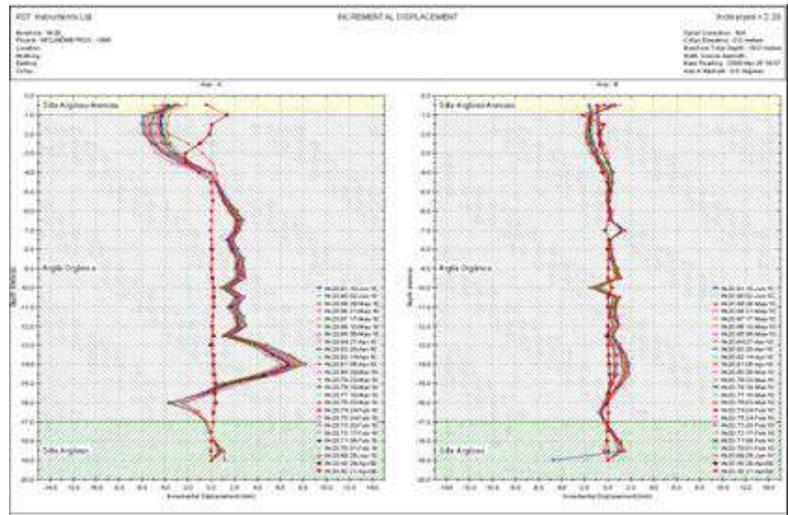
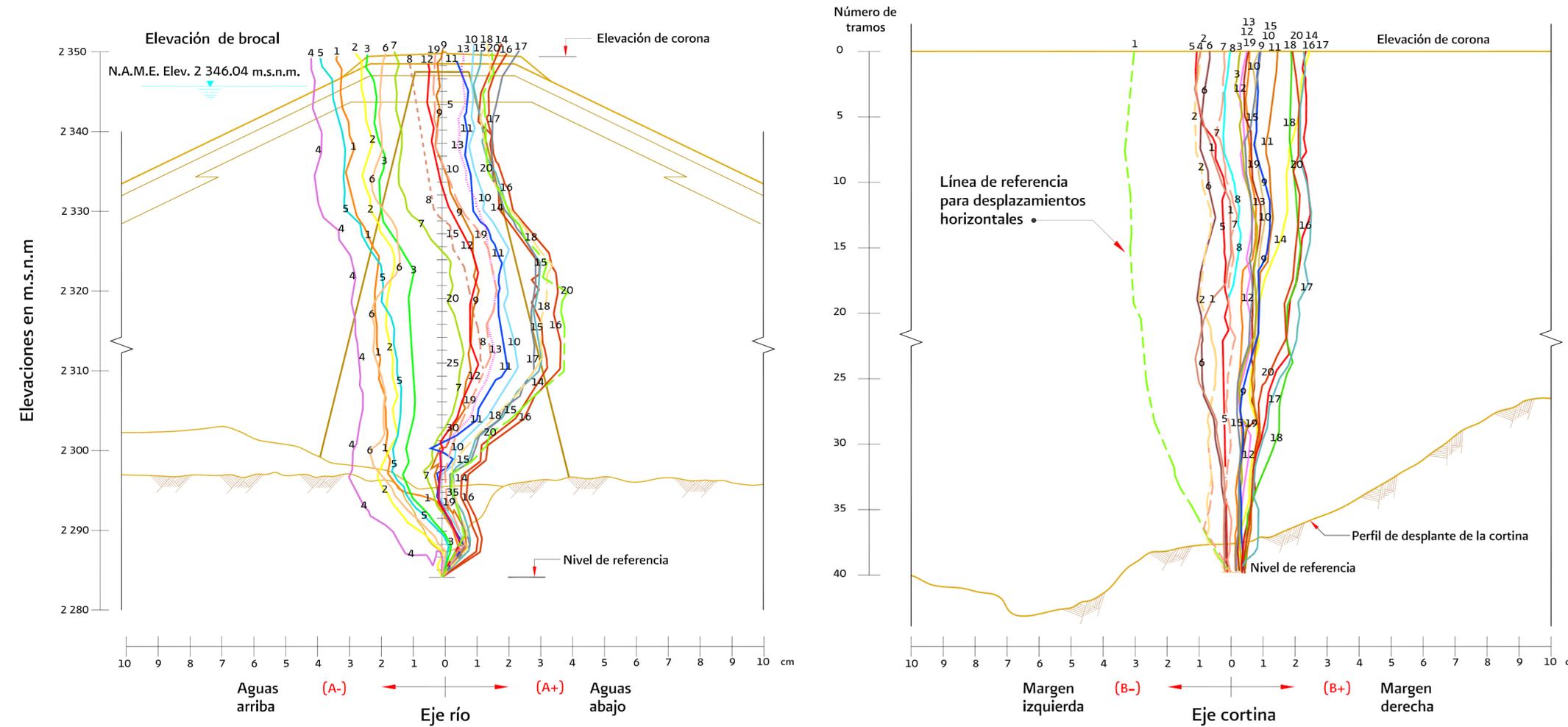
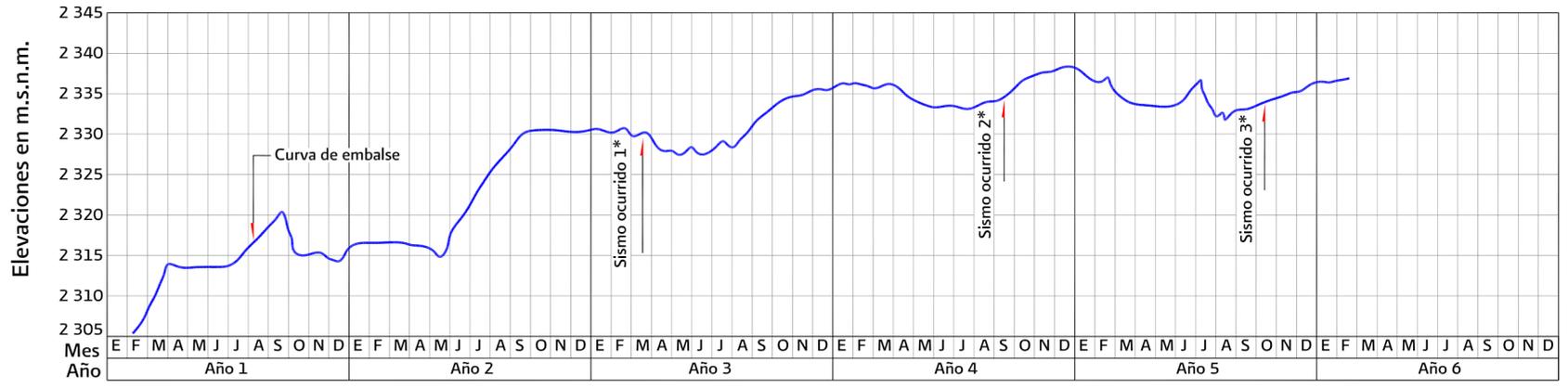


Figura 5.25 Pantallas del programa Inclinalysis™ para inclinómetros (cortesía de Rst Instruments)

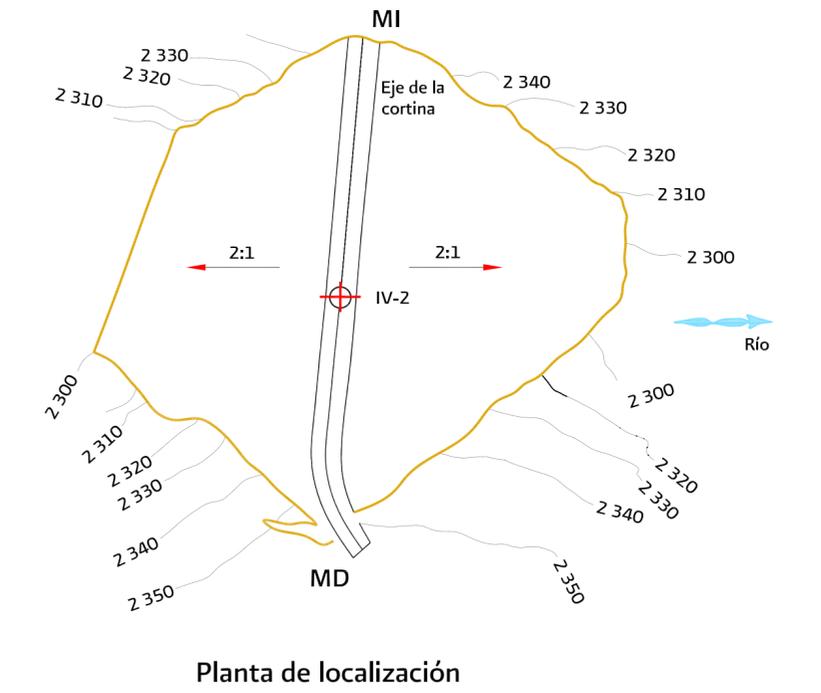


Desplazamientos horizontales en un inclinómetro vertical



Inclinómetro vertical No. 2

Eje río		Eje cortina	
Gráfica	Fecha	Gráfica	Fecha
Inicial	1/Febrero/Año 1	Inicial	1/Febrero/Año 1
1	23/Marzo/Año 1	1	23/Marzo/Año 1
2	2/Junio/Año 1	2	2/Junio/Año 1
3	14/Oct/Año 1	3	14/Oct/Año 1
4	14/Marzo/Año 2	4	14/Marzo/Año 2
5	8/Junio/Año 2	5	8/Junio/Año 2
6	7/Dic/Año 2	6	7/Dic/Año 2
7	14/Marzo/Año 3	7	14/Marzo/Año 3
8	23/Oct/Año 3	8	23/Oct/Año 3
9	4/Dic/Año 3	9	7/Dic/Año 3
10	1/Febrero/Año 4	10	1/Febrero/Año 4
11	22/Abril/Año 4	11	22/Abril/Año 4
12	18/Junio/Año 4	12	18/Junio/Año 4
13	10/Dic/Año 4	13	10/Dic/Año 4
14	22/Enero/Año 5	14	27/Enero/Año 5
15	27/Febrero/Año 5	15	27/Febrero/Año 5
16	29/Mayo/Año 5	16	29/Mayo/Año 5
17	8/Julio/Año 5	17	18/Nov/Año 5
18	18/Nov/Año 5	18	10/Dic/Año 6
19	10/Dic/Año 5	19	18/Febrero/Año 6
20	18/Febrero/Año 6	20	



Planta de localización

Notas:

- 1* Sismo 7.2° escala Richter 14/Mar/Año 3
- 2* Sismo 6.0° escala Richter 24/Sep/Año 4
- 3* Sismo 6.4° escala Richter 25/Oct/Año 5

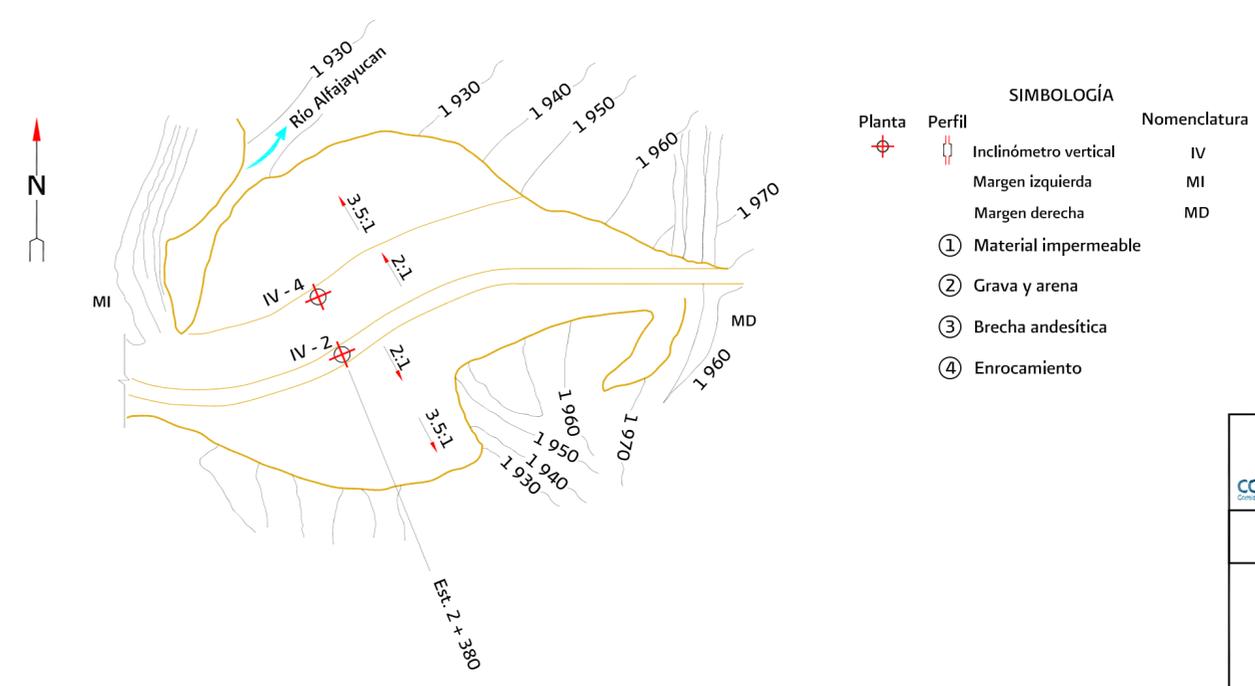
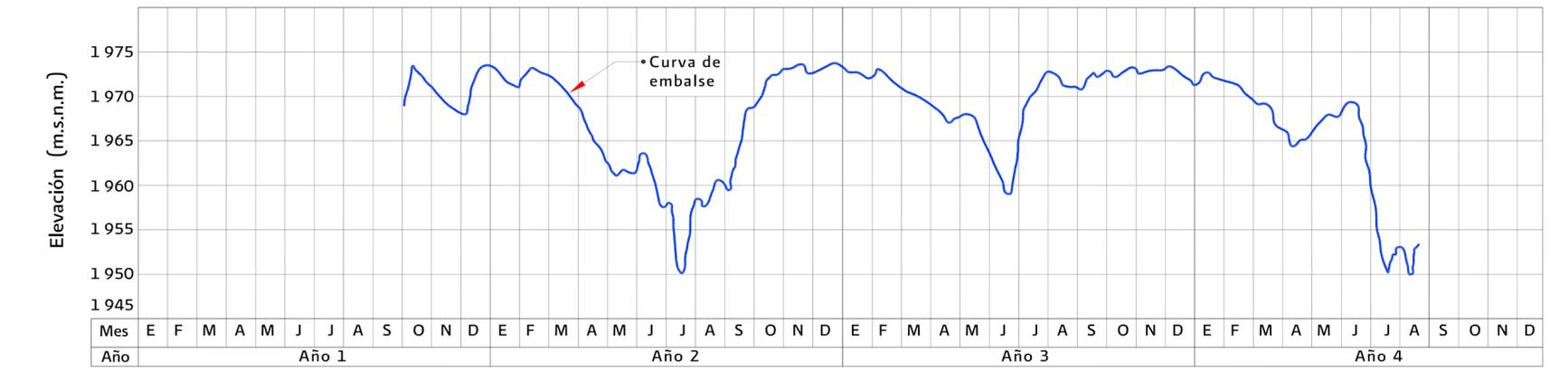
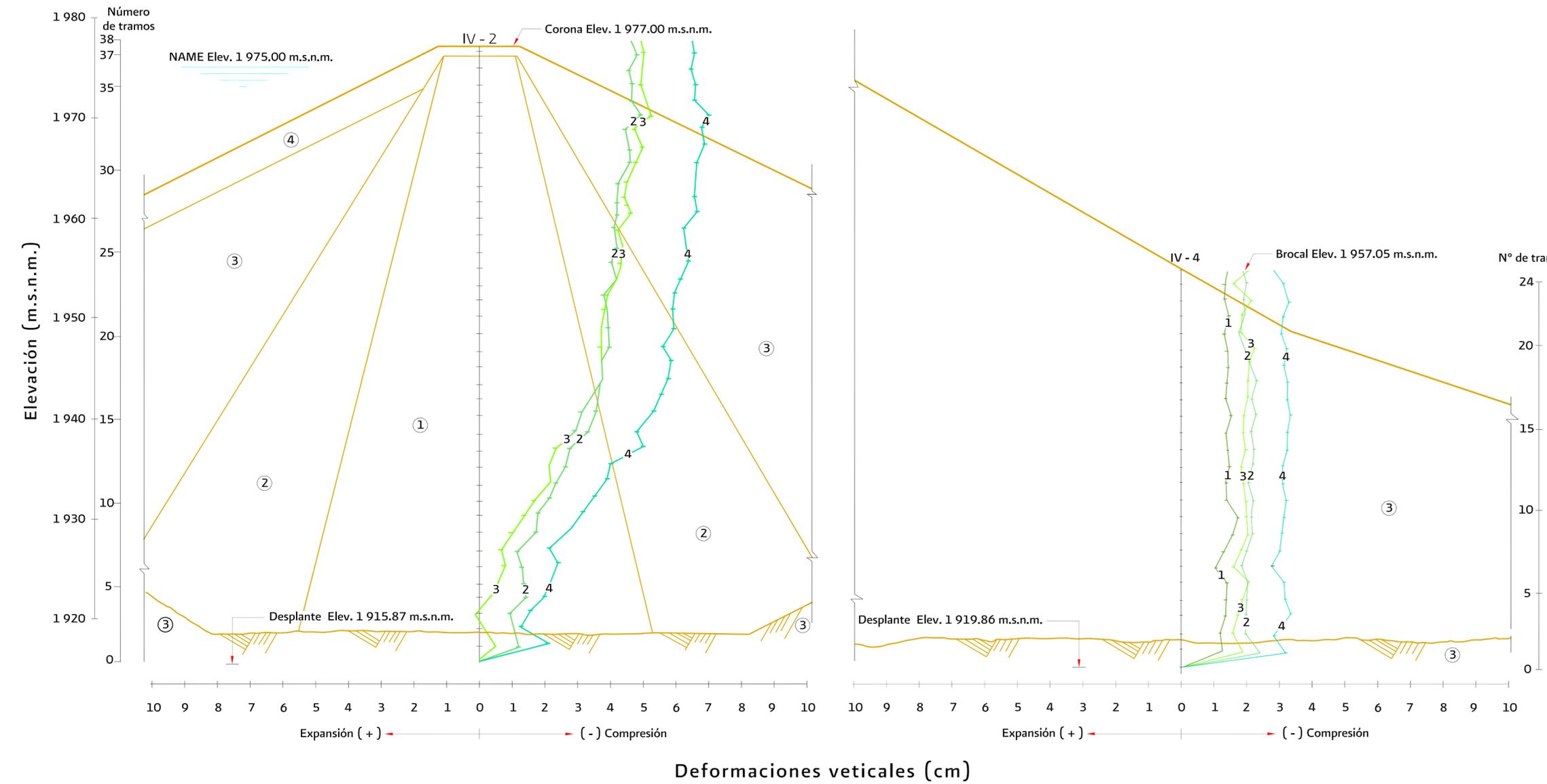
SIMBOLOGÍA

Planta	Nomenclatura
	IV
	MI
	MD

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.26 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DEL INCLINÓMETRO IV-2 EJE RÍO Y EJE CORTINA



SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		IV
	Margen izquierda	MI
	Margen derecha	MD
①		Material impermeable
②		Grava y arena
③		Brecha andesítica
④		Enrocamiento

Inclinómetros

IV - 2		IV - 4	
Gráfica	Fecha	Gráfica	Fecha
1	2/oct/Año 1	1	2/oct/Año 1
2	23/jun/Año 2	2	26/jun/Año 2
3	19/jul/Año 2	3	20/jul/Año 2
4	18/mar/Año 3	4	19/mar/Año 3

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.27 ASENTAMIENTOS EN INCLINÓMETROS VERTICALES IV-2 Y IV-4



Figura 5.28 Sondas en serie para inclinómetro vertical fijo, modelo API (cortesía de Slope Indicator)

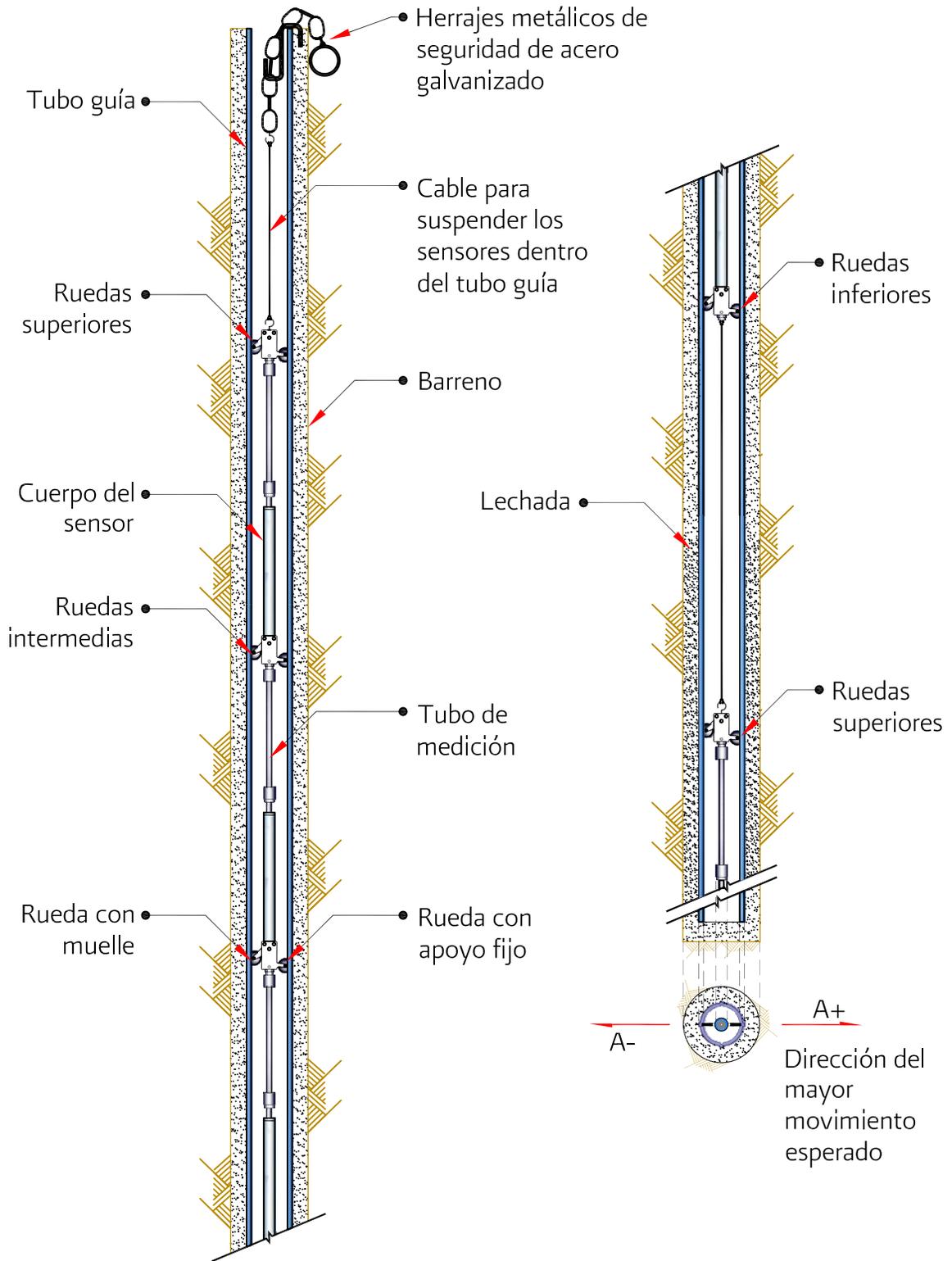


Figura 5.29 Sensores en serie para inclinómetro vertical fijo

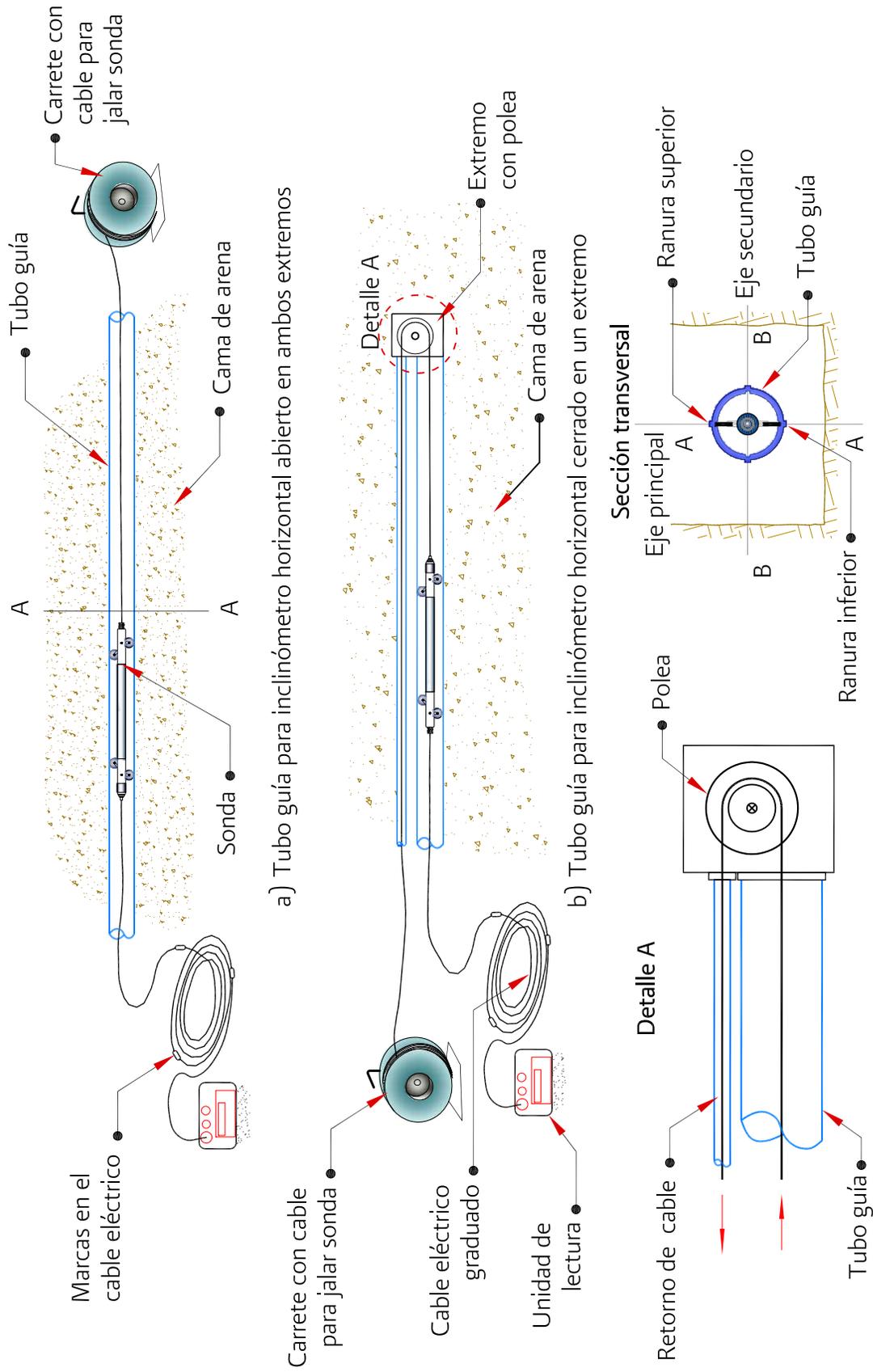
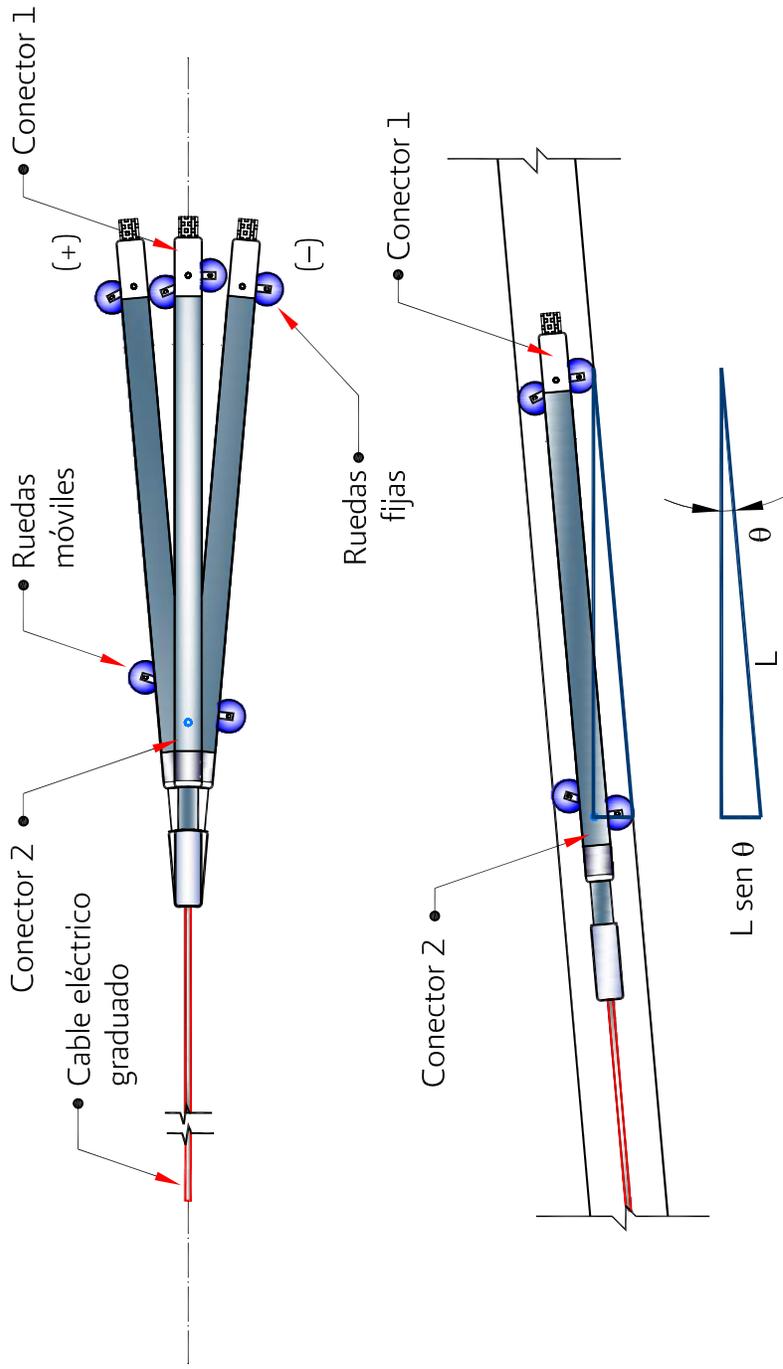


Figura 5.30 Componentes del inclinómetro horizontal



Figura 5.31 Sonda para un inclinómetro horizontal modelo 6015 (cortesía de Geokon)



L: longitud de la hipotenusa (longitud de la sonda)

θ : ángulo de inclinación

$L \text{ sen } \theta$: longitud del cateto opuesto (desviación)

Figura 5.32 Principio de operación de la sonda del inclinómetro horizontal (cortesía de Slope Indicator)

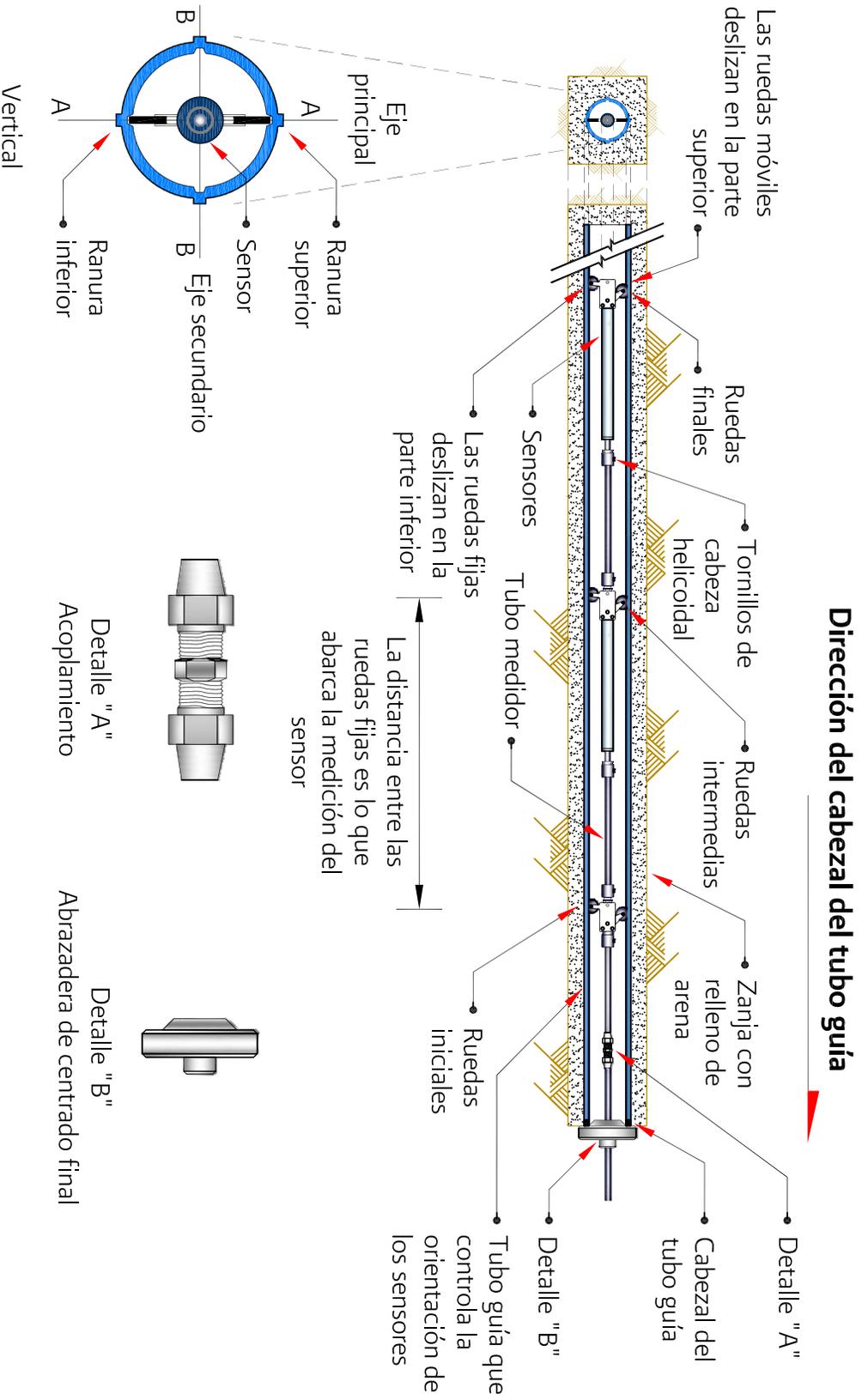
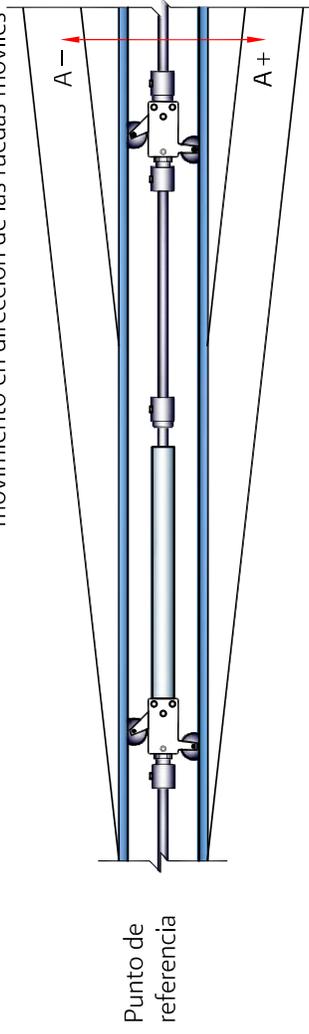


Figura 5.33 Instalación de las sondas del inclinómetro horizontal fijo

A) Extremo lejano de referencia

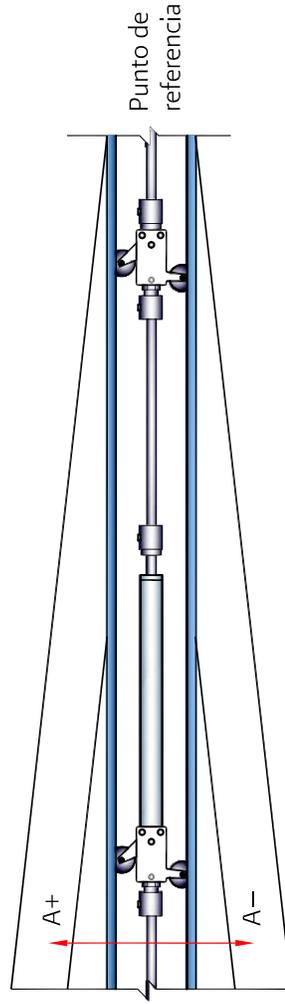
Un valor negativo del desplazamiento indica el movimiento en dirección de las ruedas móviles



Un valor positivo del desplazamiento indica el movimiento en dirección de las ruedas fijas

B) Extremo cercano de referencia

Un valor positivo del desplazamiento indica el movimiento en dirección de las ruedas móviles



Un valor negativo del desplazamiento indica el movimiento en dirección de las ruedas fijas

Figura 5.34 Principio de operación de la sonda del inclinómetro horizontal fijo



Figura 5.36 Instalación de un clinómetro (cortesía de Sisgeo)

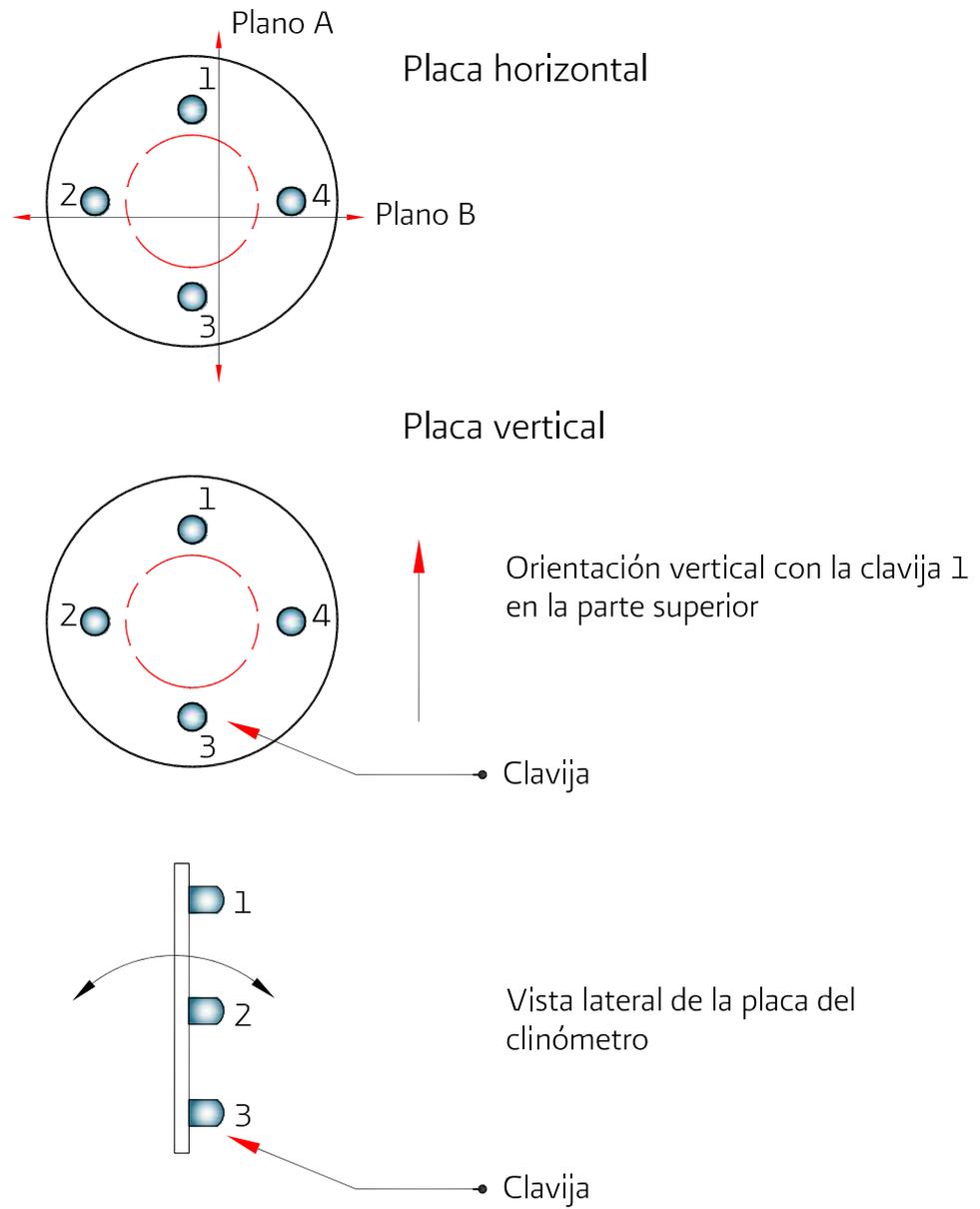
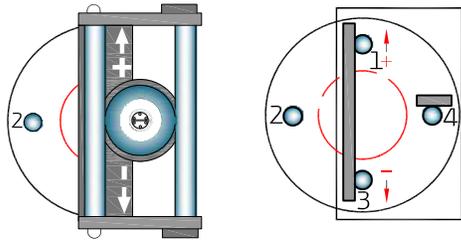
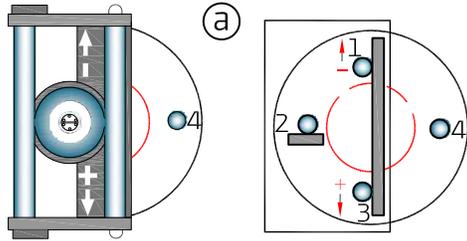


Figura 5.37 Posiciones para instalar la placa de un clinómetro (cortesía de Slope Indicator)

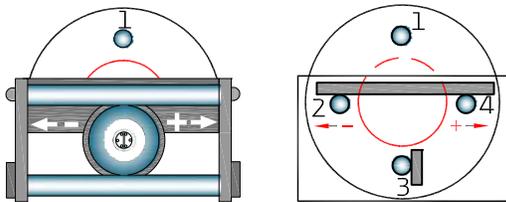


POSICIÓN HORIZONTAL

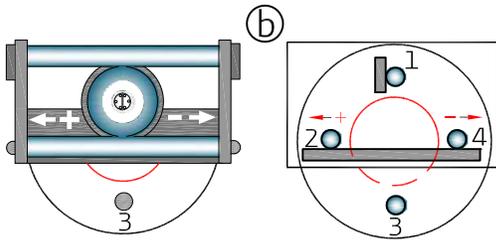
Toma de lectura A+ con el extremo (+) del clinómetro en la clavija 1



Rotar 180°, toma de lectura A- con el extremo (-) del clinómetro en la clavija 1

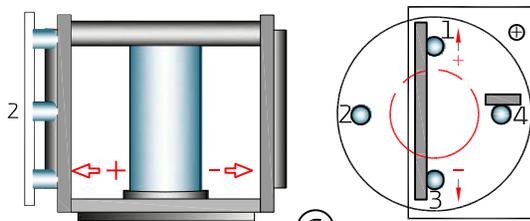


Toma de lectura B+ con el extremo (+) del clinómetro en la clavija 4

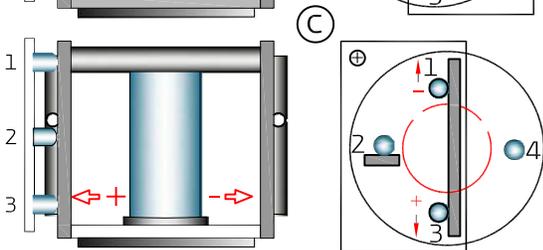


Rotar 180°, toma de lectura B- con el extremo (-) del clinómetro en la clavija 4

POSICIÓN VERTICAL

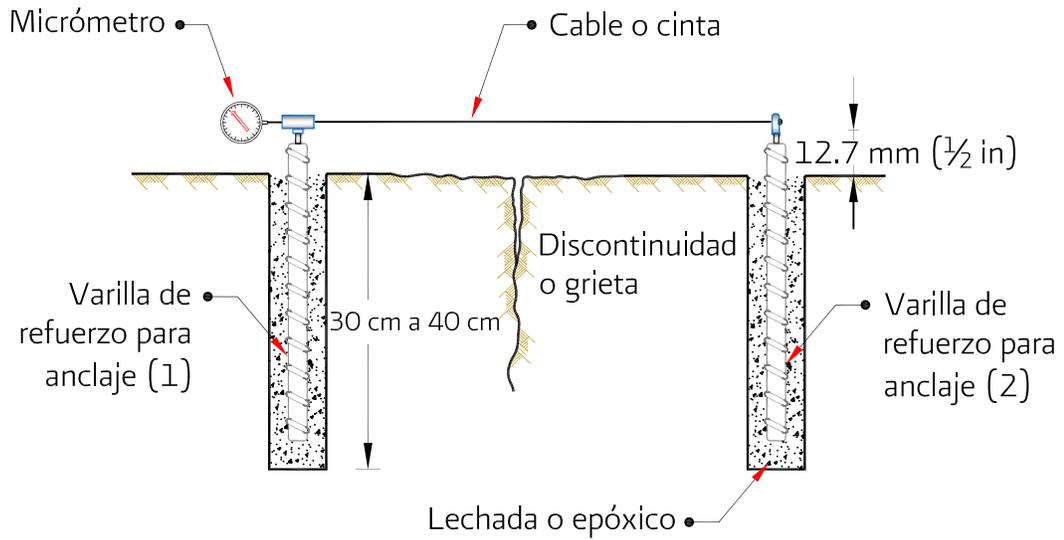


Toma de lectura A+ con el extremo (+) del clinómetro en la clavija 1, 3 y 4

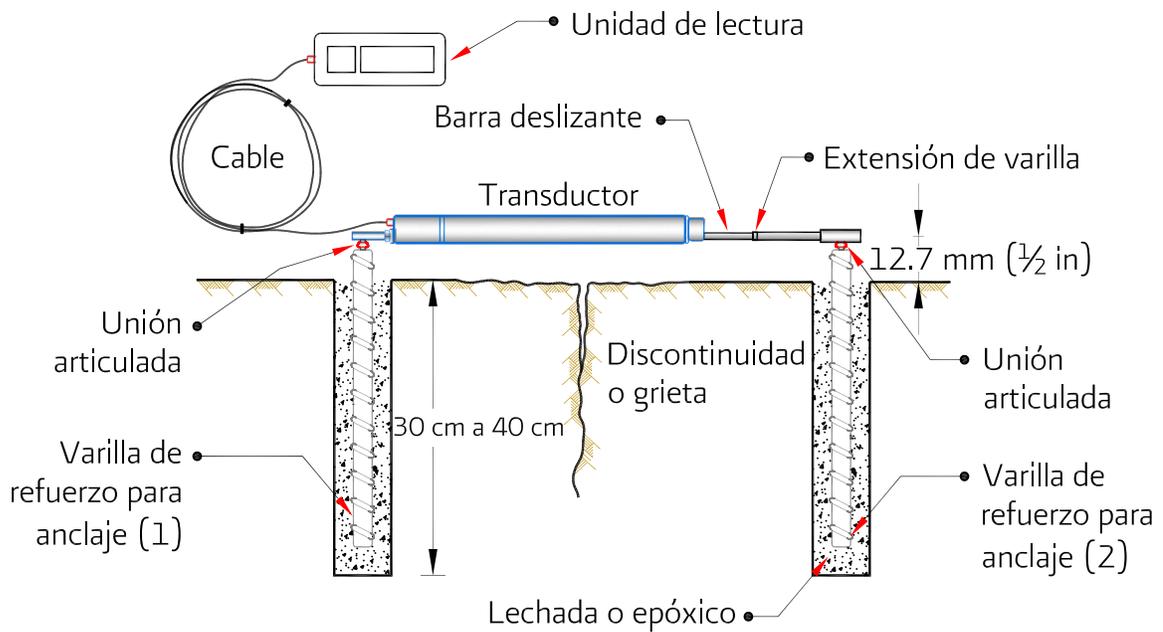


Toma de lectura A- con el extremo (-) del clinómetro en la clavija 1, 2 y 3

Figura 5.38 Diversas posiciones del clinómetro portátil para la toma de lectura (cortesía de Slope Indicator)



a) Extensómetro mecánico

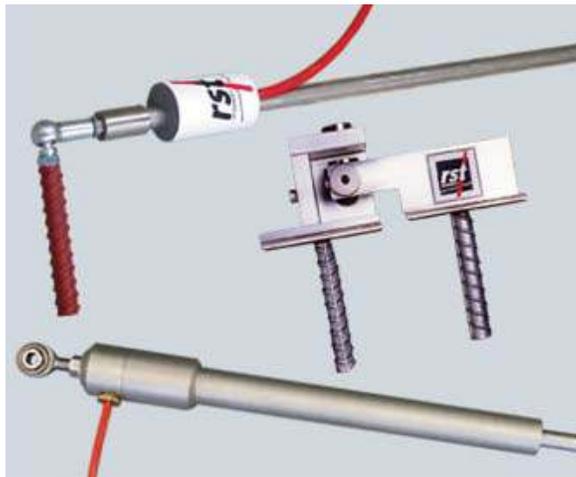


b) Extensómetro eléctrico

Figura 5.40 Componentes de un extensómetro externo de juntas y grietas



Extensómetro de cuerda vibrante (cortesía de Slope Indicator)



Extensómetro de cuerda vibrante (cortesía de Rst Instruments)



Extensómetro modelo 4420 (cortesía de Geokon)

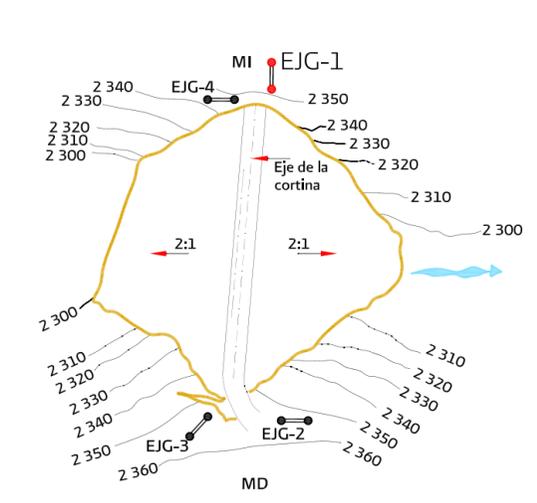
Figura 5.41 Tipos de extensómetros externos de juntas y grietas

Proyecto:
Obra:
PRESA:

Observaciones generales:

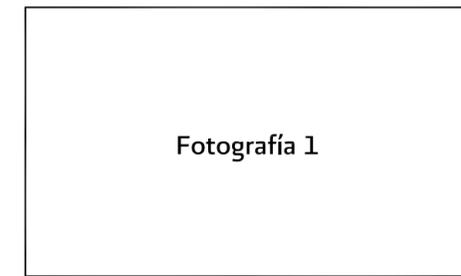
**Figura 5.42 FICHA DE INSTALACIÓN DEL
 EXTENSÓMETRO EXTERNO DE
 JUNTAS Y GRIETAS**

Croquis de localización



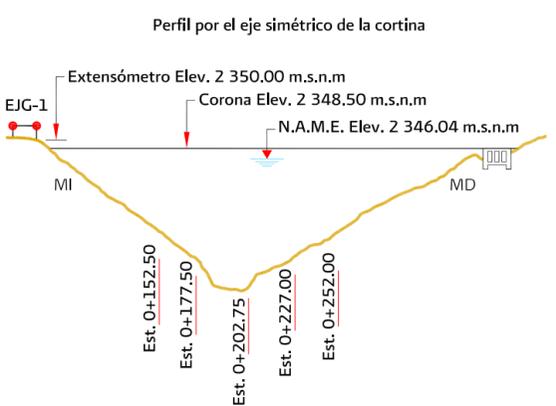
Planta

Fotografías del equipo instalado



SIMBOLOGÍA

Perfil	Planta	Nomenclatura
		EJG
		MI
		MD



Perfil

EQUIPO: Extensómetro externo de juntas y grietas	No. de ficha:	Código de plano:
--	---------------	------------------

Elevación del embalse (m.s.n.m.): _____ Elevación del terraplén (m.s.n.m.): _____

PROYECTO	
Nombre:	Ubicación:
Número:	Localización:

INSTRUMENTO		
Código:	Modelo:	Marca:
No. de serie:	Nomenclatura:	

Características físicas:

Sistema de referencia:	Datum:
Factores de calibración:	Elevación (m.s.n.m.):
Cadenamiento o estación:	

X =	Y =	Latitud:	Longitud:
-----	-----	----------	-----------

PERFORACIÓN

Tipo de ademe:	Diámetro:
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Longitud:	Ángulo de perforación:
Materiales atravesados:	

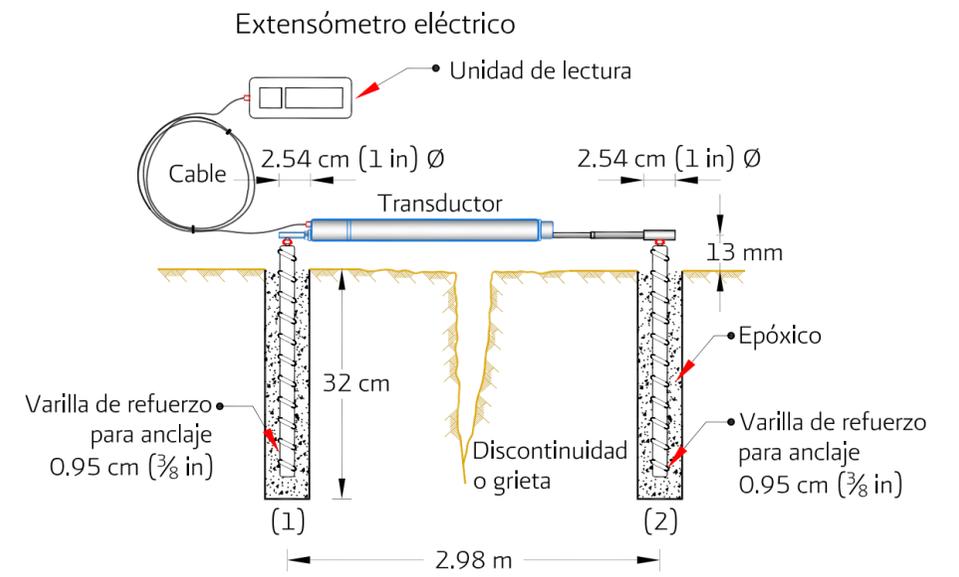
INSTALACIÓN

Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Lectura inicial, fecha y hora:	Lectura posterior, fecha y hora:

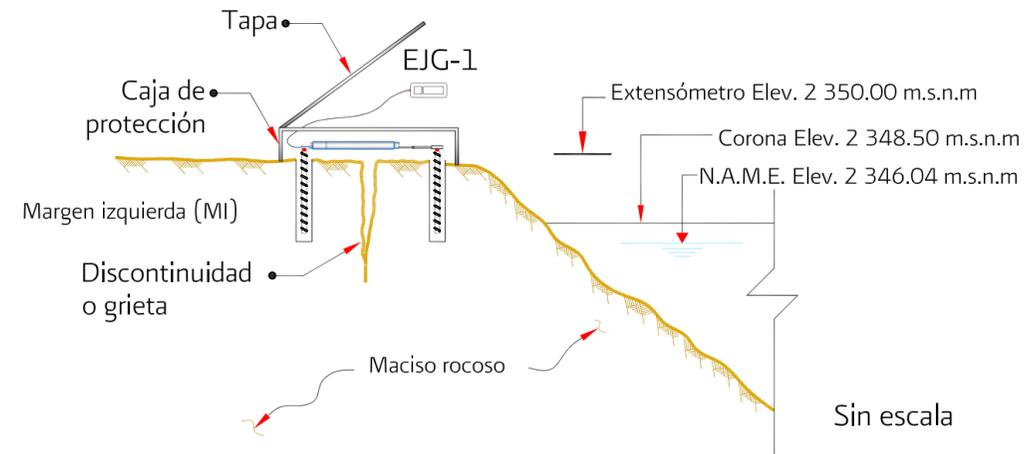
Fecha de última calibración o verificación del transductor:	Fecha próxima de calibración o verificación del transductor:
---	--

Observaciones:

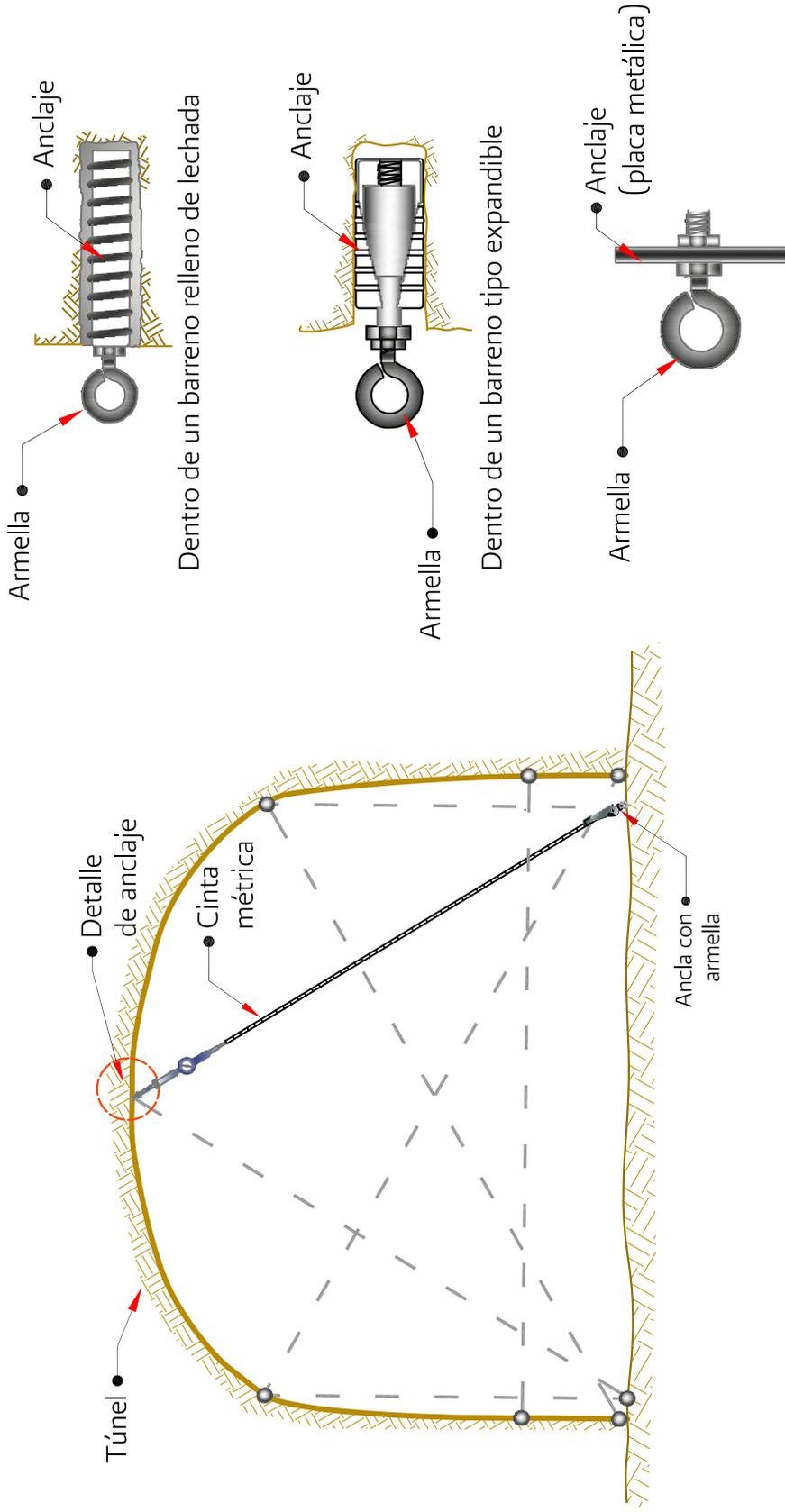
Instaló	Midió	Elaboró
Revisó	Supervisó	Vo. Bo.



Extensómetro localizado en la Elev. 2 350 m.s.n.m. sobre la margen izquierda a 3 m del eje de la cortina dirección aguas abajo



Detalle de tipos de anclaje



Se fija con soldadura a una estructura metálica

Figura 5.43 Ubicaciones propuestas para instalar un extensómetro de convergencia



Extensómetro digital de cinta (cortesía de Slope Indicator)



Extensómetro de cinta (cortesía de Rst Instruments)



Extensómetro de cinta modelo 1610 (cortesía de Geokon)

Figura 5.44 Extensómetros externos de convergencia con cinta

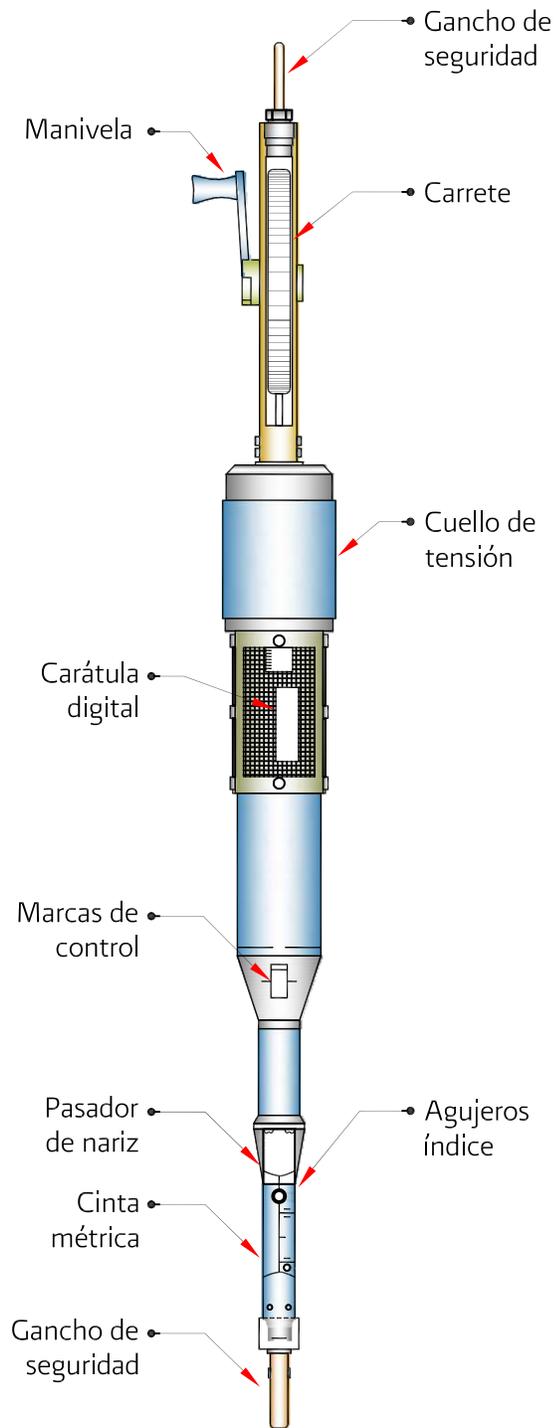


Figura 5.45 Extensómetro externo de convergencia con cinta
(cortesía de Slope Indicator)

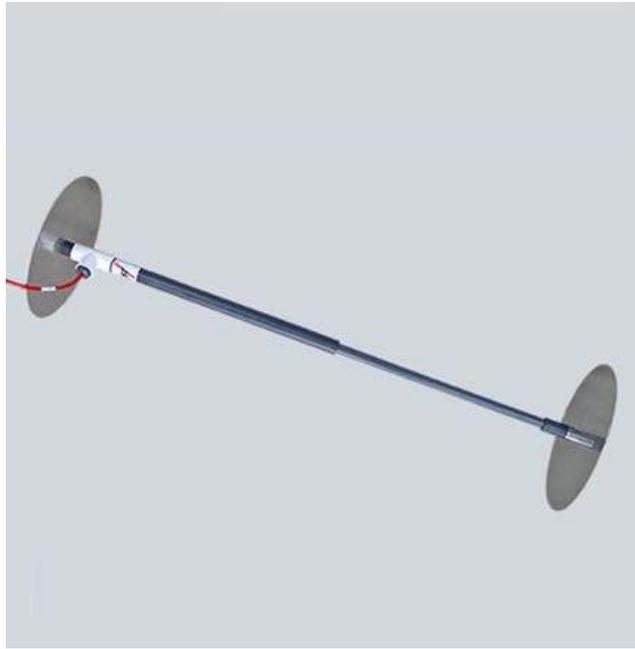


Figura 5.46 Extensómetro interno de placas de cuerda vibrante (cortesía de Rst Instruments)



Figura 5.47 Instalación de un extensómetro interno de placas (cortesía de Sisgeo)

Nota: la separación entre dos placas intermedias unidas entre sí, dependerá del diámetro de los codos de salida de cada extensómetro

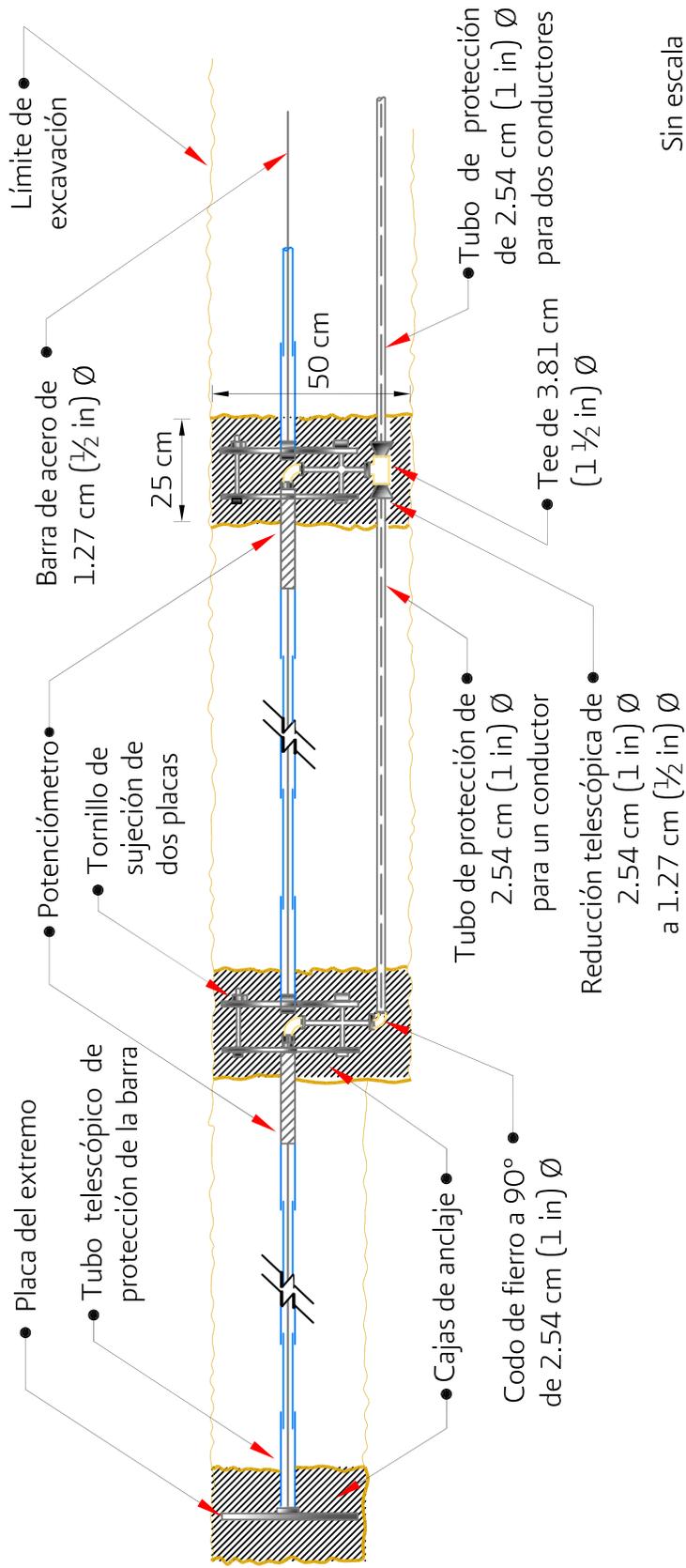


Figura 5.48 Planta de una serie de extensómetros internos de placas en terraplenes unidos entre sí linealmente (1)

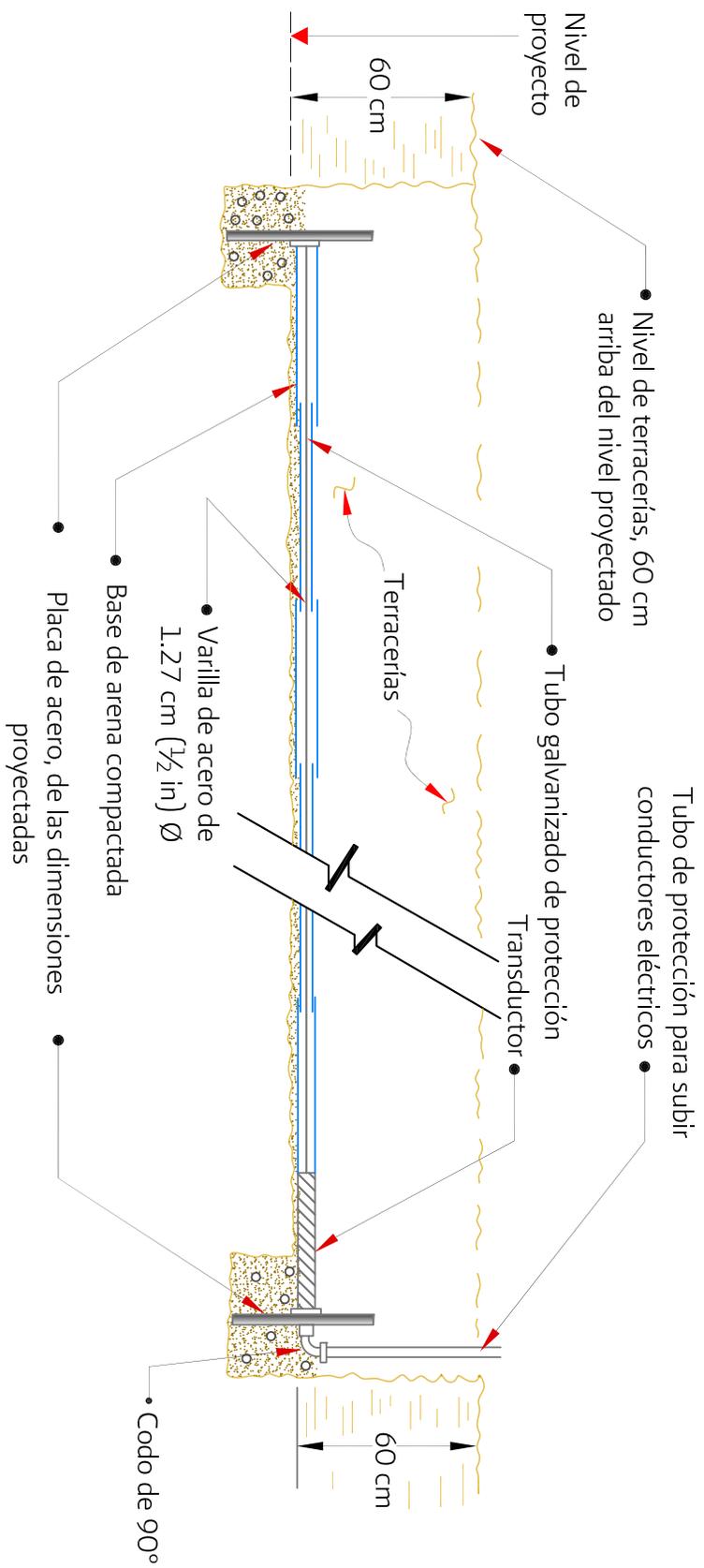


Figura 5.49 Corte longitudinal de una serie de extensómetros internos de placas en terraplén unidos entre sí linealmente (2)

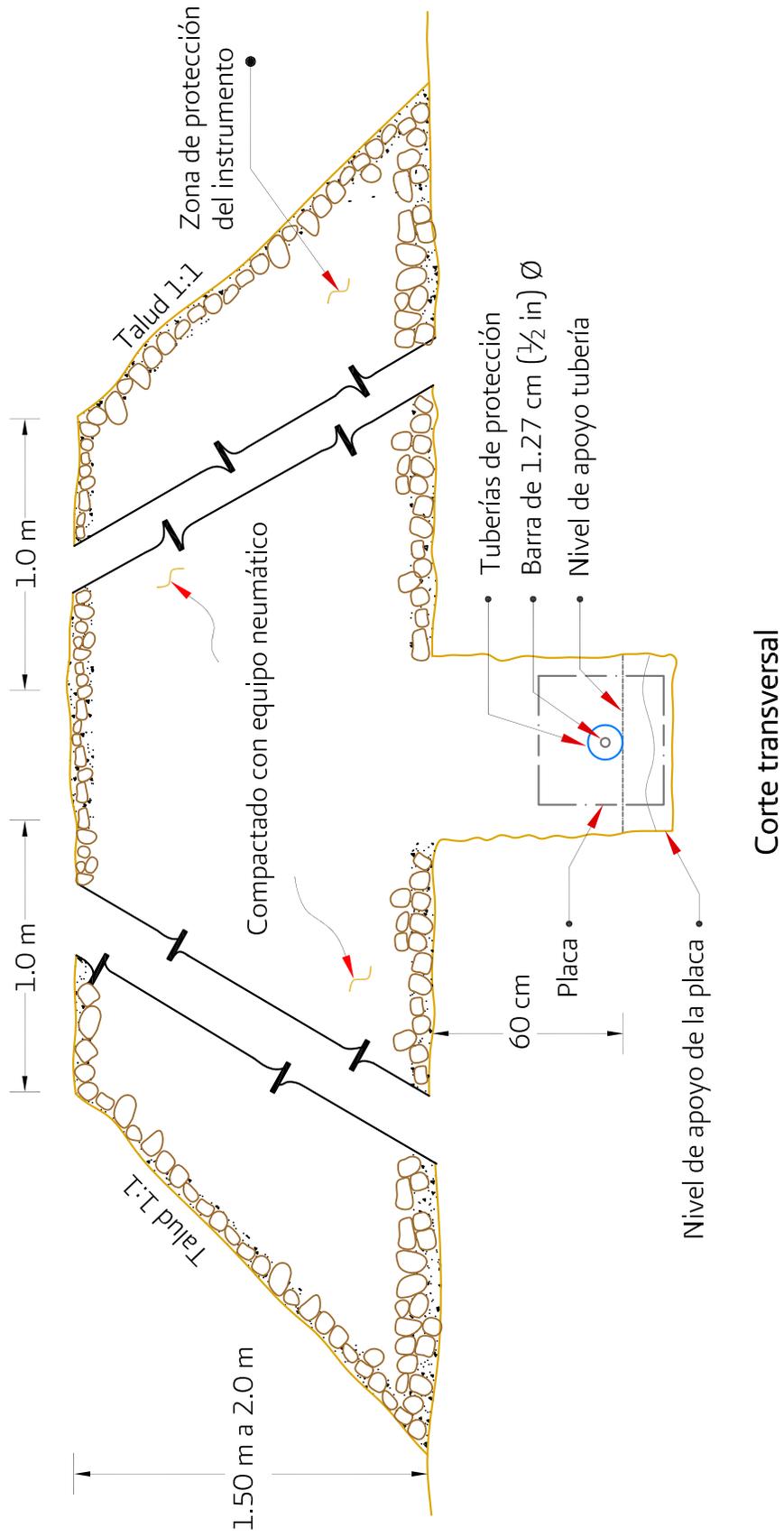


Figura 5.50 Protección del extensómetro interno de placas en un terraplén (1)

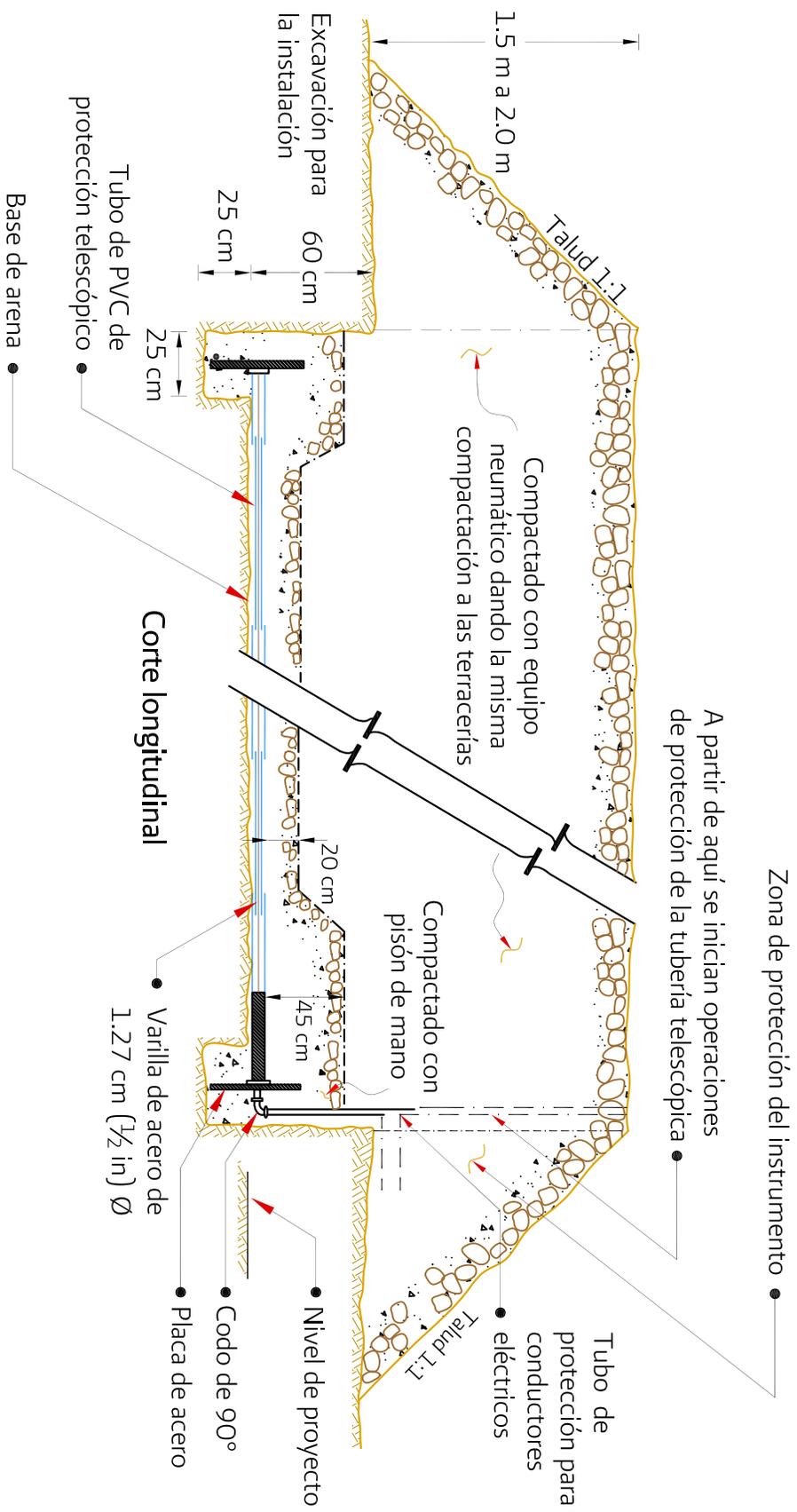


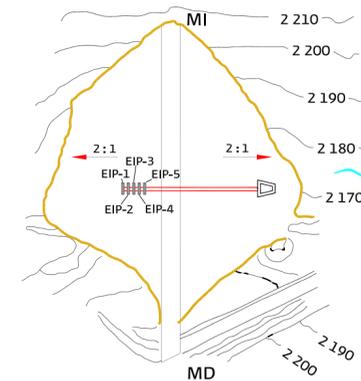
Figura 5.51 Protección del extensómetro interno de placas en un terraplén (2)

Proyecto:
Obra:
PRESA:

Observaciones generales:

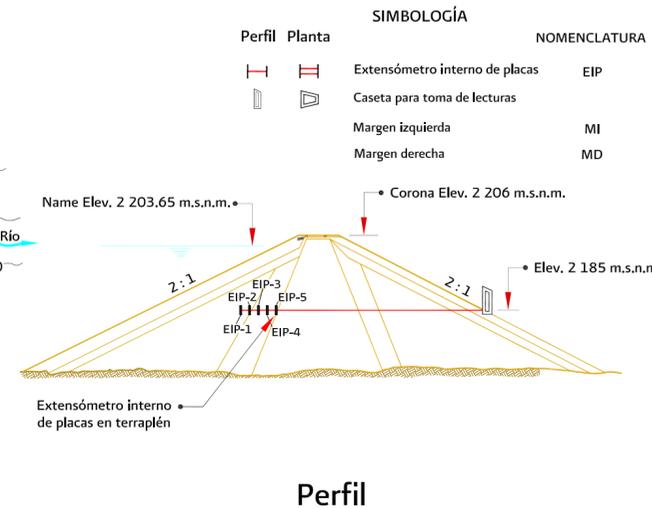
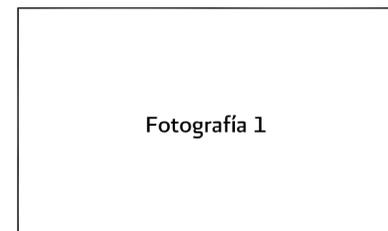
Figura 5.52 FICHA DE INSTALACIÓN DEL EXTENSÓMETRO INTERNO DE PLACAS

Croquis de localización



Planta

Fotografías del equipo instalado



Perfil

Perfil	Planta	SIMBOLOGÍA	NOMENCLATURA
[Symbol]	[Symbol]	Extensómetro interno de placas	EIP
[Symbol]	[Symbol]	Caseta para toma de lecturas	
[Symbol]	[Symbol]	Margen izquierda	MI
[Symbol]	[Symbol]	Margen derecha	MD

EQUIPO: Extensómetro de placas	No. de ficha:	Código de plano:
Elevación del embalse (m.s.n.m.): _____ Elevación del terraplén (m.s.n.m.): _____		

PROYECTO		
Nombre:	Ubicación:	
Número:	Localización:	

INSTRUMENTO		
Código:	Modelo:	Marca:
No. de serie:	Nomenclatura:	
Características físicas:		

Sistema de referencia:	Datum:	Factores de calibración:
Extremo del instrumento inicial		

Elevación (m.s.n.m.):	Cadenamiento o estación:
X =	Latitud:
Y =	Longitud:

Extremo del instrumento final	
Elevación (m.s.n.m.):	Cadenamiento o estación:
X =	Latitud:
Y =	Longitud:

ZANJA	
Profundidad:	Ancho:
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Longitud:	Ángulo o pendiente:
Materiales atravesados:	Tipo de relleno:

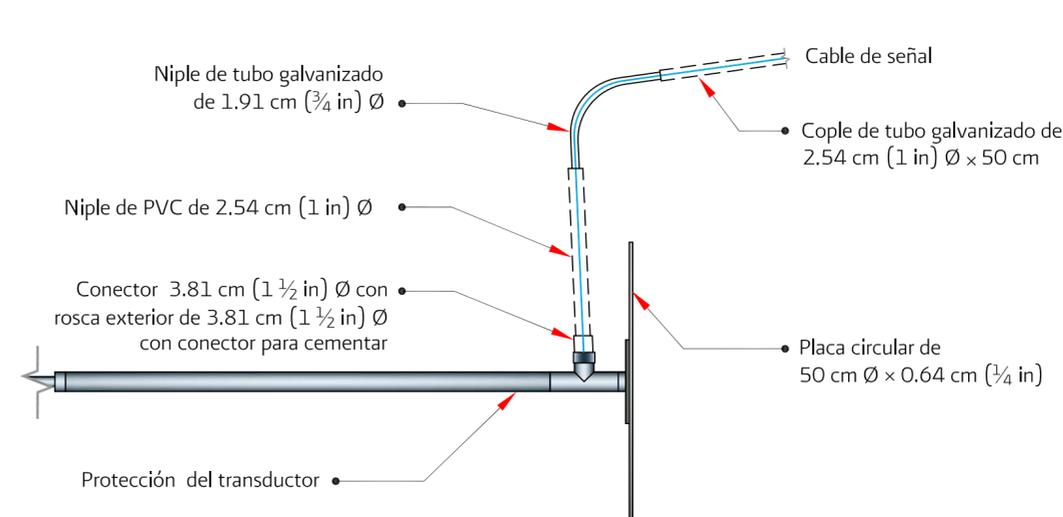
INSTALACIÓN	
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Lectura inicial, fecha y hora:	Lectura posterior, fecha y hora:

Fecha de última calibración o verificación del transductor:	Fecha próxima de calibración o verificación del transductor:
---	--

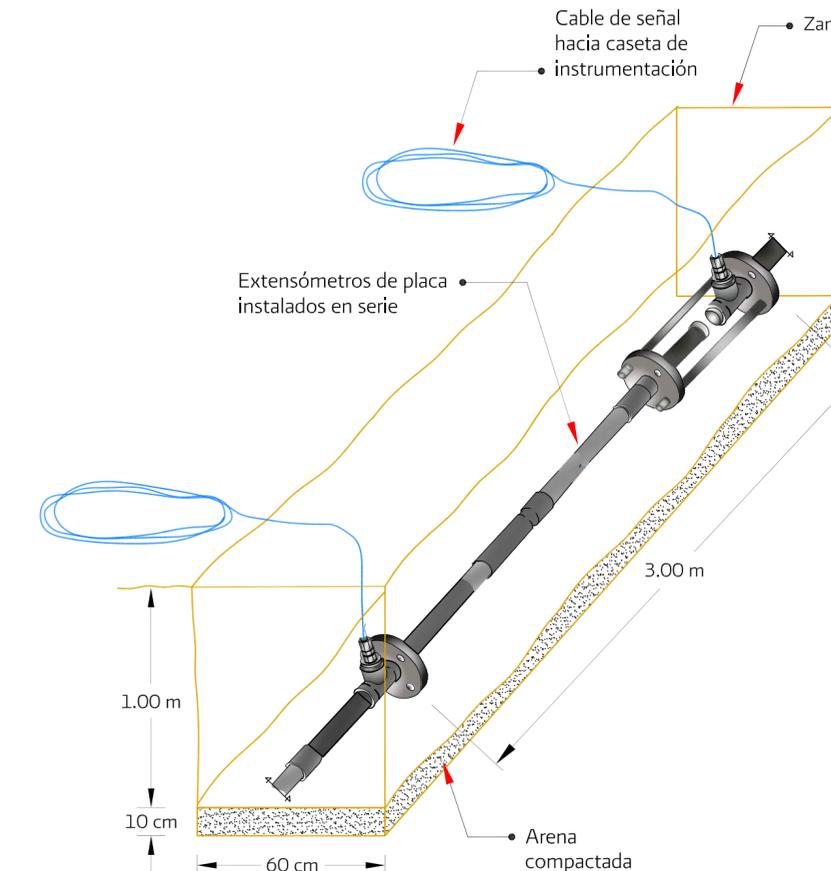
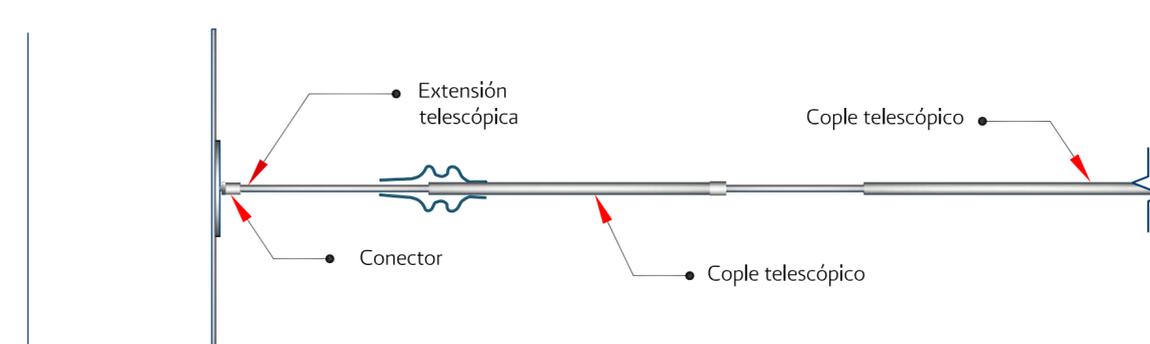
Observaciones:		
----------------	--	--

Instaló	Midió	Elaboró
Revisó	Supervisó	Vo. Bo.

Detalles de instalación



Placa circular



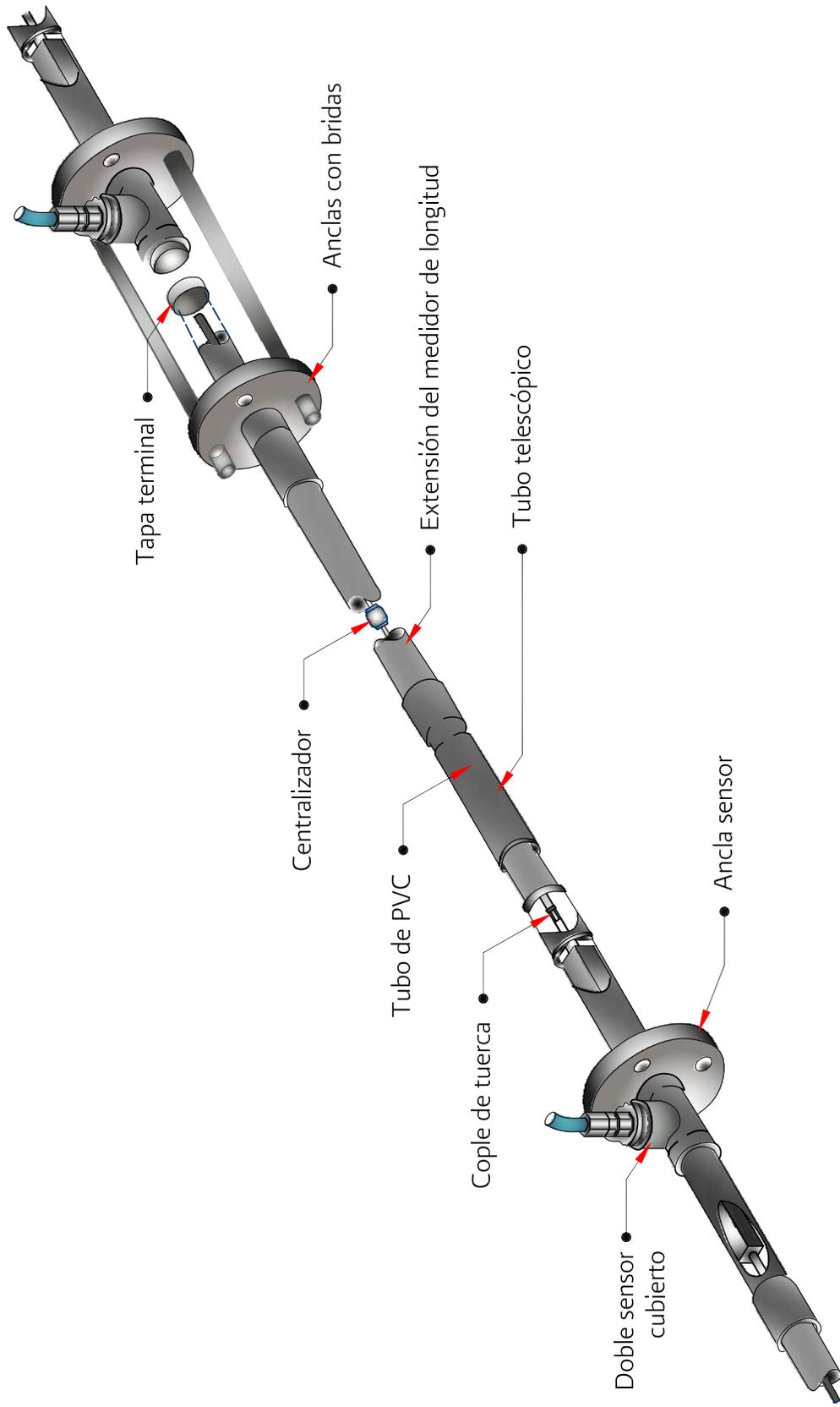


Figura 5.53 Extensómetros internos de placa colocados en serie dentro de un terraplén

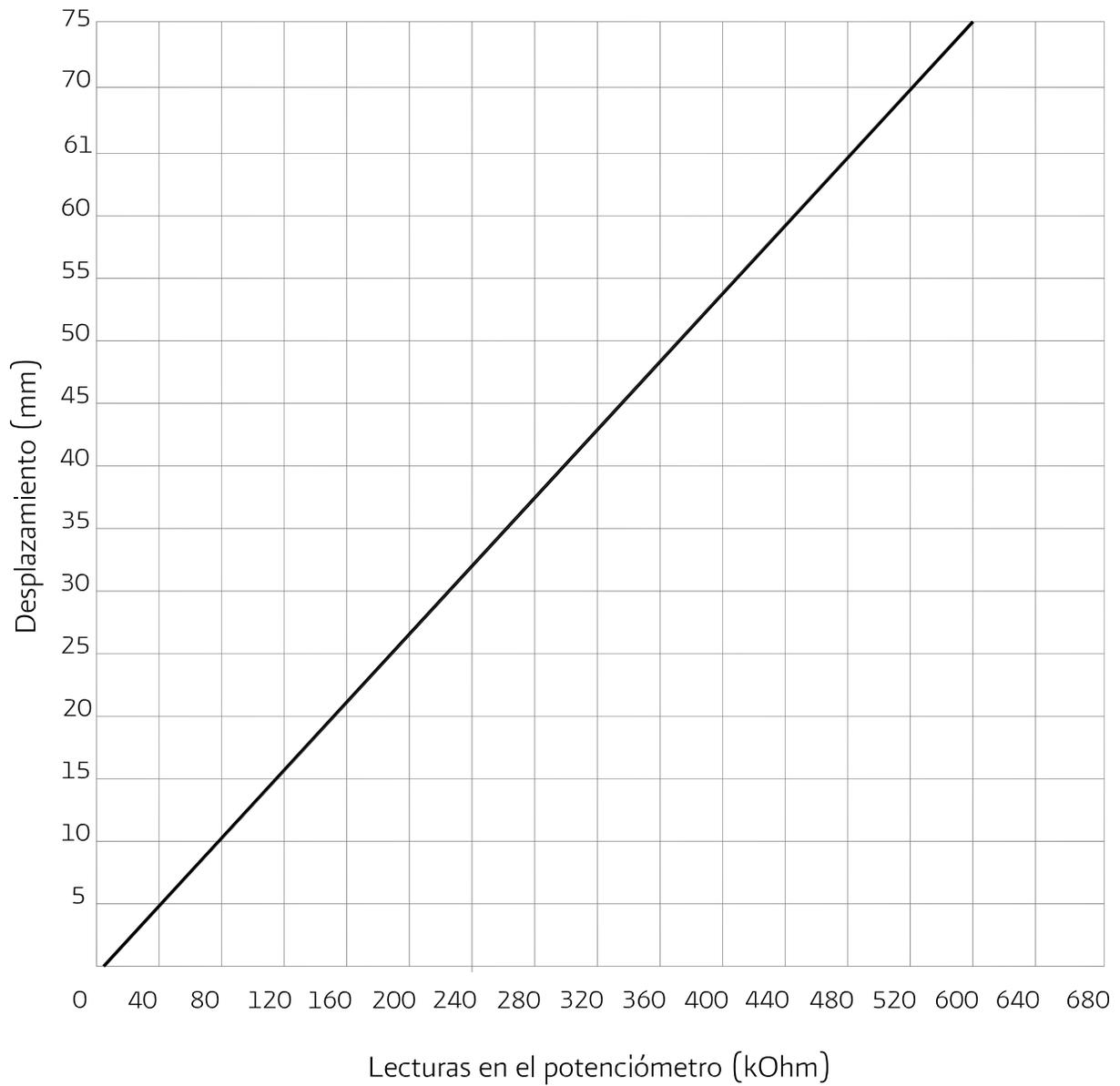
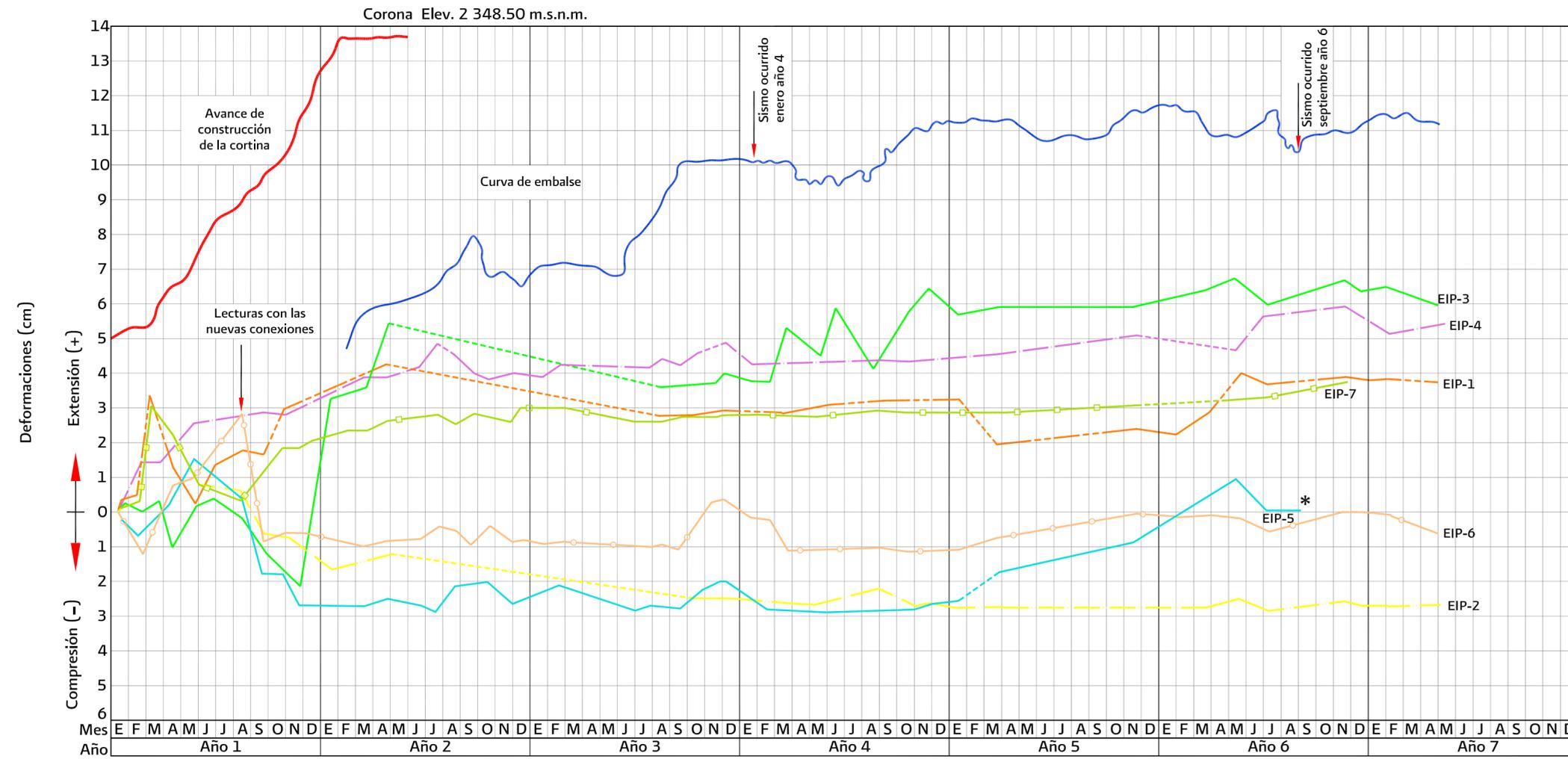
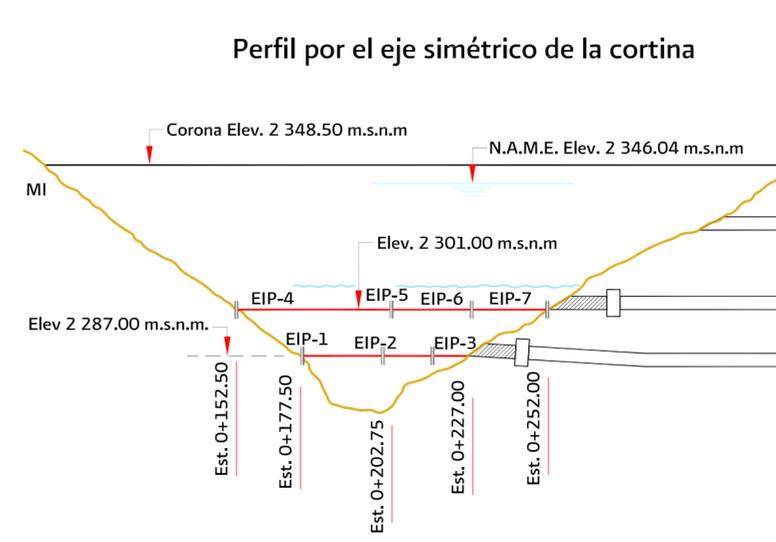
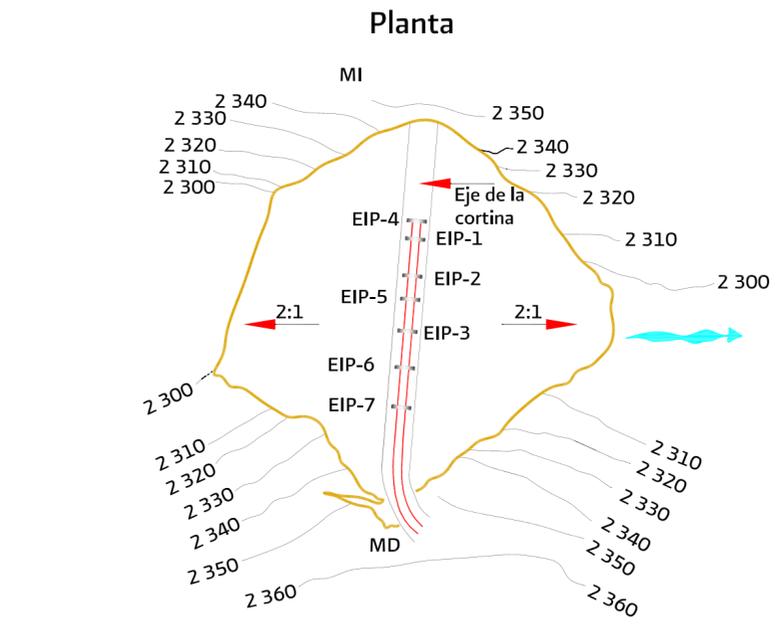


Figura 5.54 Verificación del funcionamiento del transductor del extensómetro interno de placas en un terraplén



Elevaciones para curva de embalse (m.s.n.m.)



Extensómetro	Base de medición (m²)
EIP-1	16.50
EIP-2	16.50
EIP-3	16.50
EIP-4	25.00
EIP-5	24.75
EIP-6	24.75
EIP-7	18.00

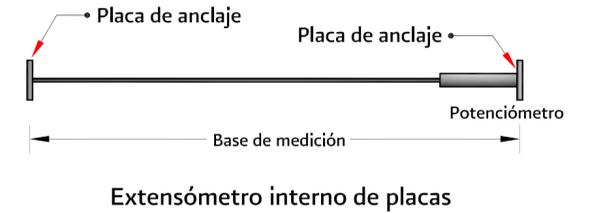
Notas:

La línea discontinua indica aparato fuera de servicio

- EIP-1 (Orange dashed line)
- EIP-2 (Yellow dashed line)
- EIP-3 (Green dashed line)
- EIP-4 (Purple dashed line)
- EIP-5 (Cyan dashed line)
- EIP-6 (Light blue dashed line)
- EIP-7 (Light green dashed line)

SIMBOLOGÍA

- Planta Perfil
- Extensómetro interno de placas (EIP)
- Caseta para toma de lecturas
- Margen izquierda (MI)
- Margen derecha (MD)



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

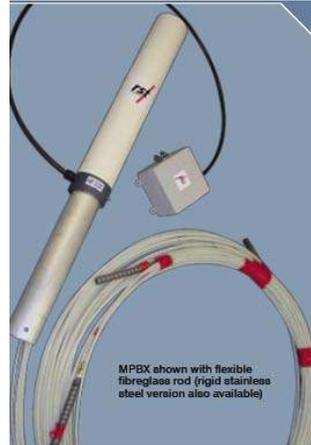
MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.55 DEFORMACIONES EN LOS EXTENSÓMETROS INTERNOS DE PLACAS EIP-1, EIP-2, EIP-3, EIP-4, EIP-5, EIP-6 Y EIP-7



Cabezal del extensómetro interno de barras (cortesía de Slope Indicator)

Extensómetro interno de barras múltiples de fibra de vidrio MPBX (cortesía de Rst Instruments)



Extensómetros internos de barras para diferentes tipos de terrenos modelo A-1, A-3, A-4 y A-5 (cortesía de Geokon)

Figura 5.56 Tipos de extensómetros internos de barras

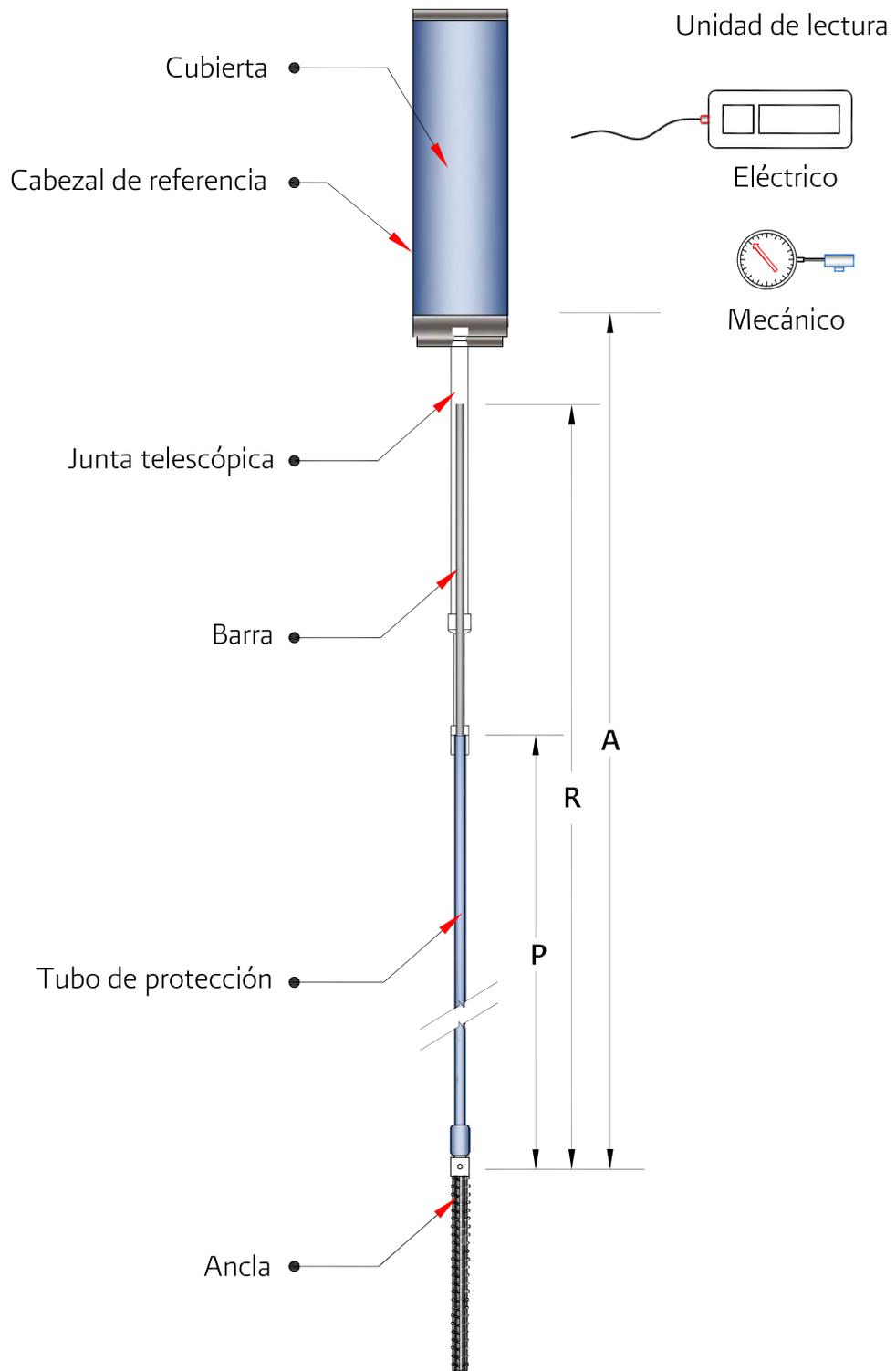
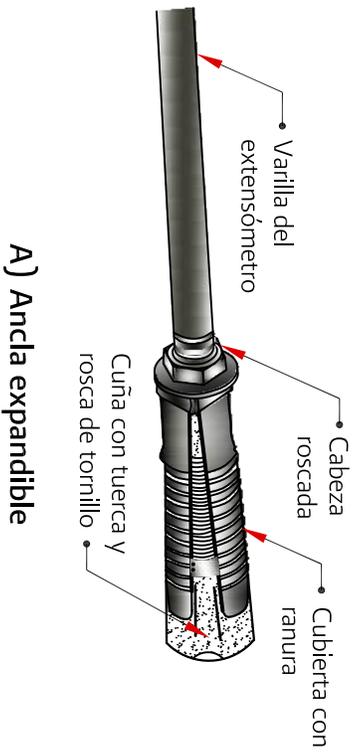


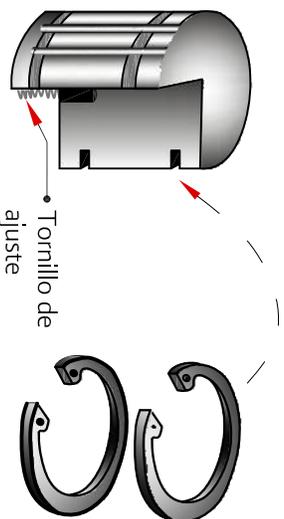
Figura 5.57 Componentes de un extensómetro interno de barras (cortesía de Slope Indicator)



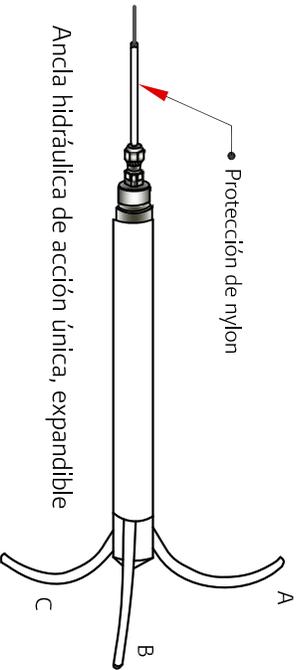
Figura 5.58 Cabezal de referencia de un extensómetro interno de barras con numeración en la superficie para la identificación de cada barra



A) Ancla expandible



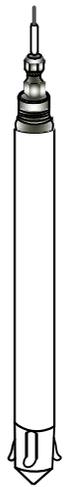
Anillos de retención



Ancla hidráulica de acción única

A, B, C Puntas

B) Ancla Borros



C) Ancla elástica

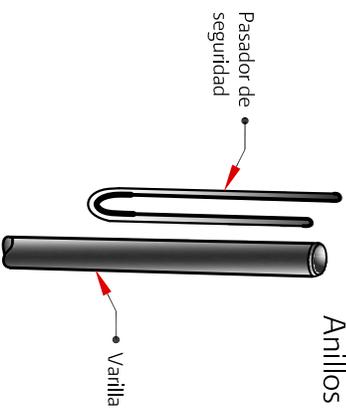


Figura 5.59 Tipos de ancla para extensómetro interno de barras



Figura 5.60 Toma de lecturas en un extensómetro interno de barras con un micrómetro digital

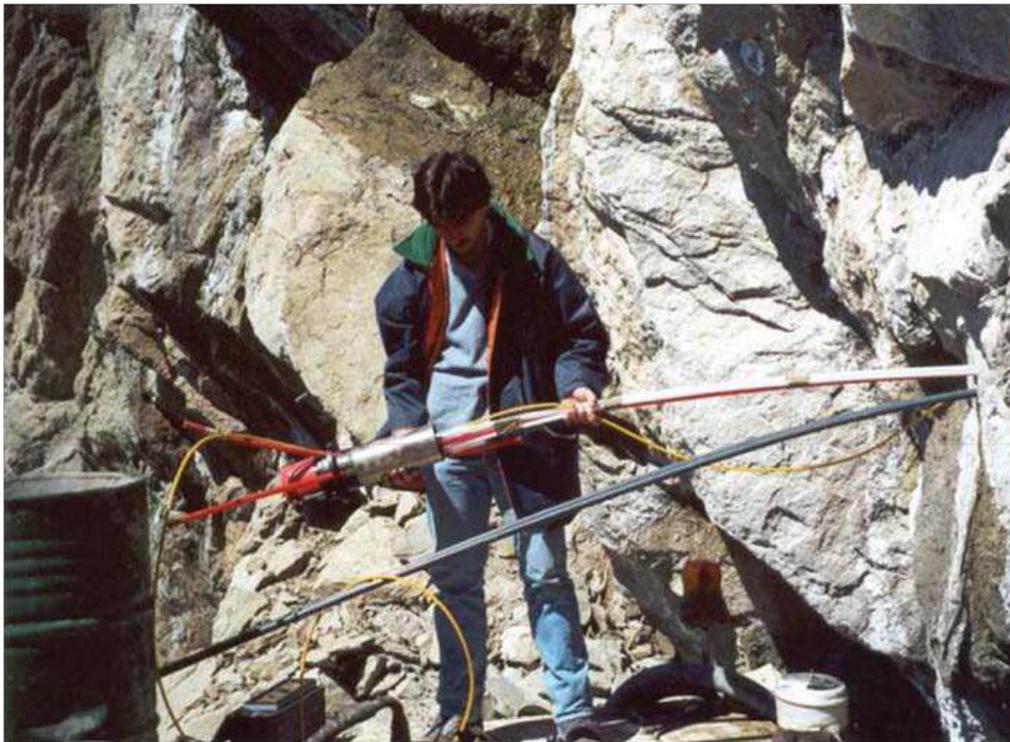


Figura 5.61 Instalación de un extensómetro interno de barras (cortesía de Sisgeo)

Proyecto:

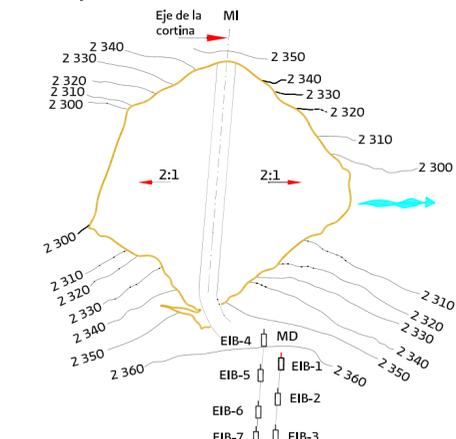
Obra:

PRESA:

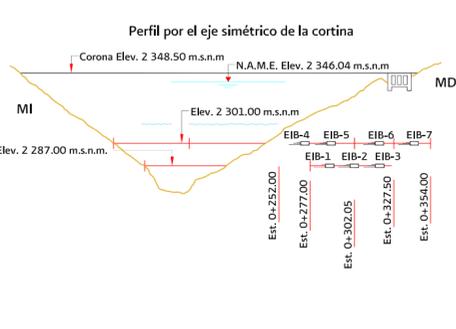
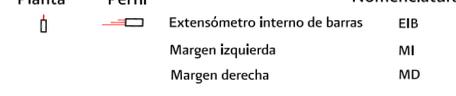
Observaciones generales:

Figura 5.62 FICHA DE INSTALACIÓN DEL EXTENSÓMETRO INTERNO DE BARRAS

Croquis de localización



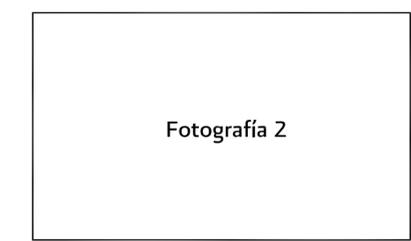
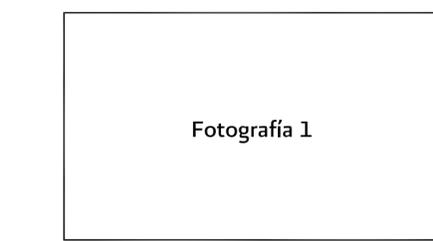
SIMBOLOGÍA



Planta

Perfil

Fotografías del equipo instalado



EQUIPO:	No. de ficha:	Código de plano:
Extensómetro interno de barras		
Elevación del embalse (m.s.n.m.):		Elevación del terraplén (m.s.n.m.):

PROYECTO		
Nombre:	Ubicación:	
Número:	Localización:	

INSTRUMENTO		
Código:	Modelo:	Marca:
No. de serie:	Nomenclatura:	
Características físicas:		

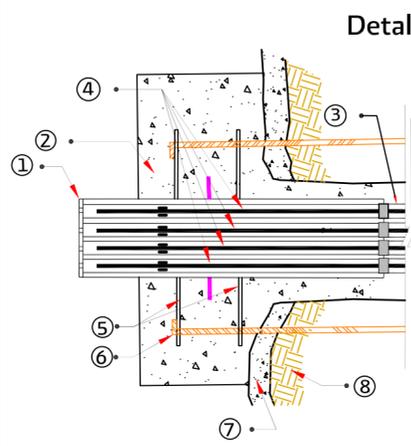
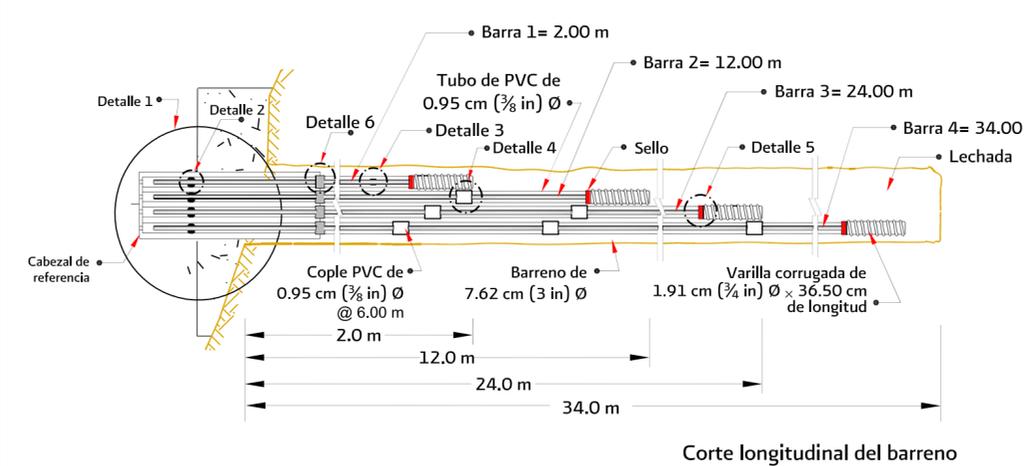
Sistema de referencia:		Datum:
Factores de calibración:	Elevación (m.s.n.m.):	Cadenamiento o estación:
X =	Y =	Latitud:
		Longitud:

PERFORACIÓN	
Tipo de ademe:	Diámetro:
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Materiales atravesados:	
Ángulo de perforación:	

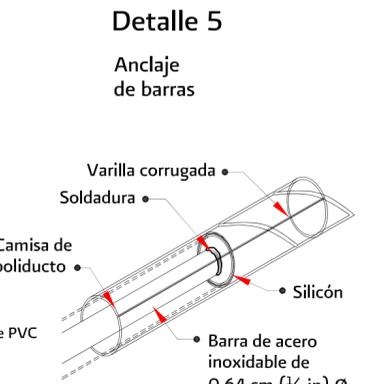
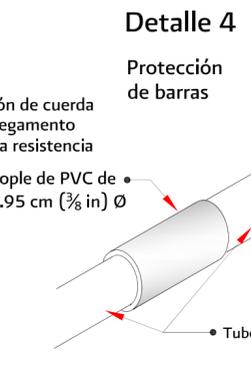
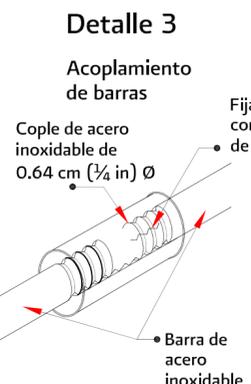
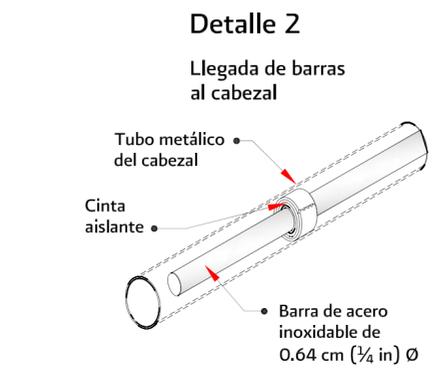
INSTALACIÓN	
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Lectura inicial, fecha y hora:	Lectura posterior, fecha y hora:
Fecha de última calibración o verificación de la unidad de medición:	Fecha próxima de calibración o verificación de la unidad de medición:

BARRAS	
Fecha inicial de la instalación:	Fecha de término de la instalación:
Diámetro:	Tipo de barras:
Longitud del tramo:	Longitud total:
Tipo de cople:	Separación de coples:
Número de barras:	Materiales:

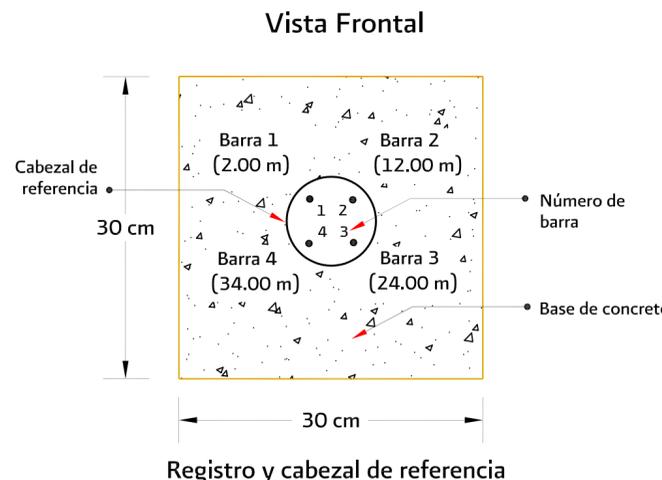
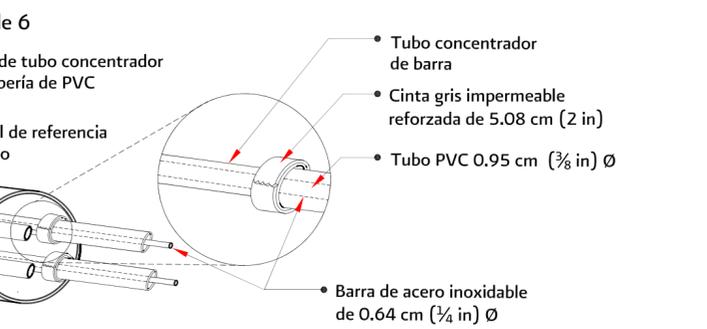
Observaciones:		
Instaló	Midió	Elaboró
Revisó	Supervisó	Vo. Bo.



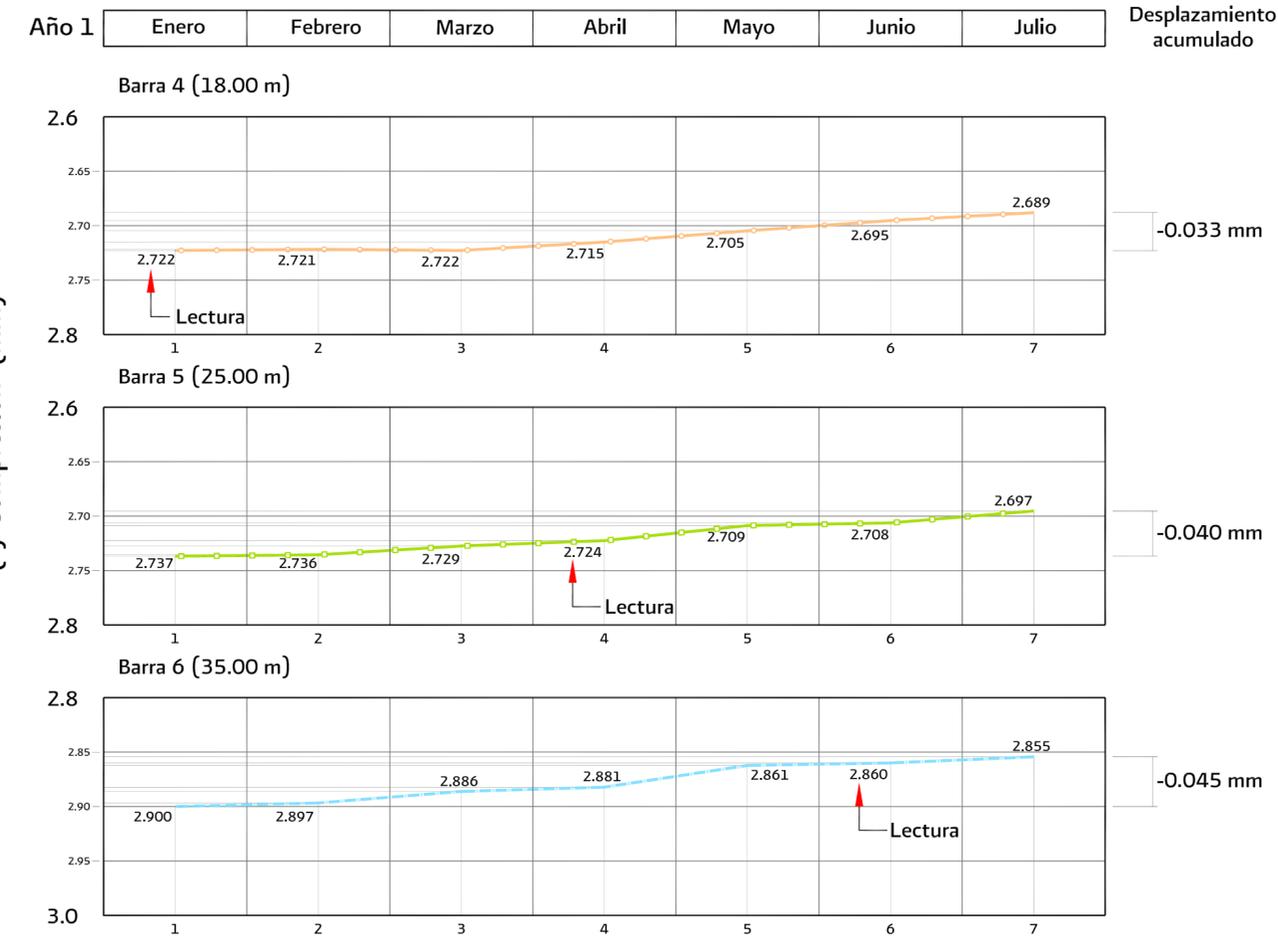
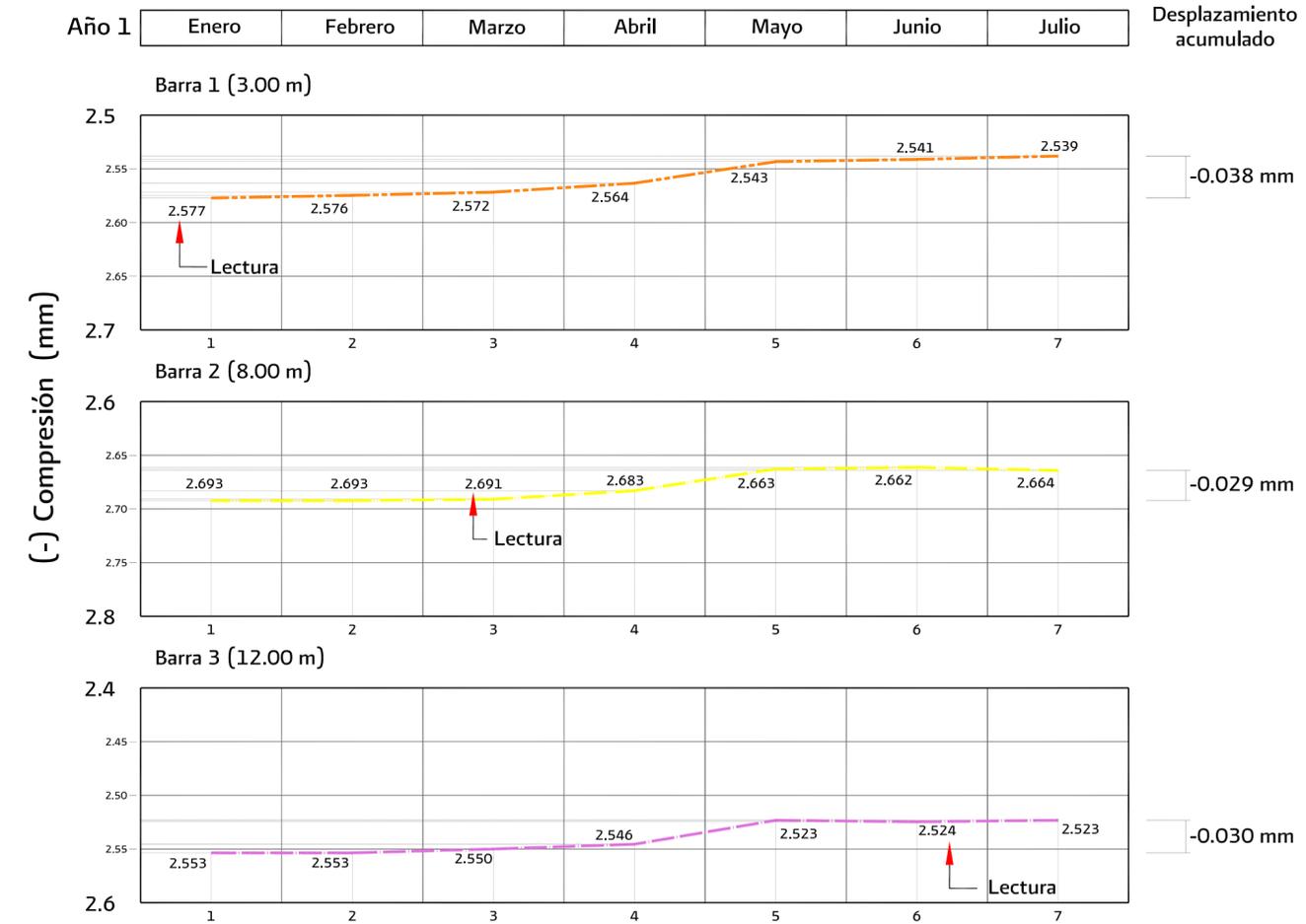
- 1.- Cabezal de referencia metálico de 7.3 cm Ø
- 2.- Base de concreto f'c > 200 kg/cm²
- 3.- Tubo de PVC de 0.95 cm (3/8 in) Ø, tramos de 6 m de longitud.
- 4.- Barras de acero inoxidable de 0.64 cm (1/4 in) Ø, tramos de 3 m de longitud.
- 5.- Acero de refuerzo a base de malla electrosoldada.
- 6.- Anclas de acero de 1.27 cm (1/2 in) Ø de 50 cm de longitud.
- 7.- Concreto lanzado.
- 8.- Roca.



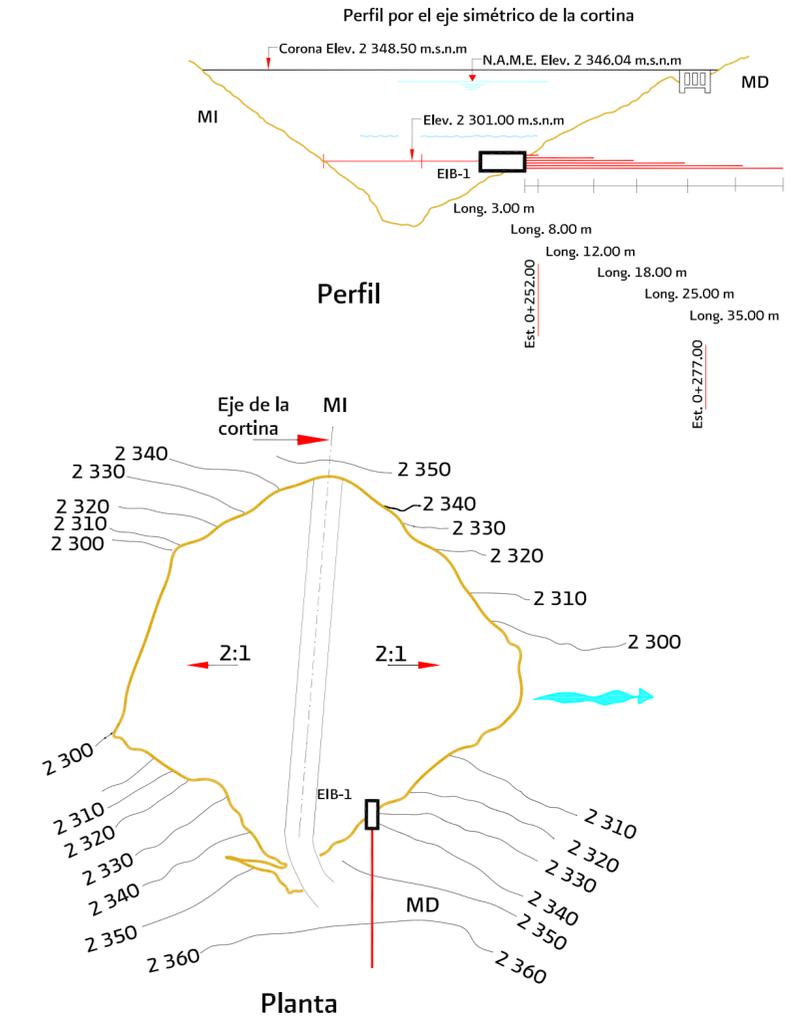
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
MEDICIÓN INIC. (m)	23.715	0.078	0.593	21.312
LONGITUD (m)	2.00	12.00	24.00	34.00
N° DE TRAMOS ACOPLADOS	—	4	8	11
TRAMOS DE AJUSTE (m)	2.00	—	—	1.00



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



Croquis de localización



SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		EIB
		MI
		MD

Lectura	Fecha
1	16/Enero/Año 1
2	14/Febrero/Año 1
3	13/Marzo/Año 1
4	15/Abril/Año 1
5	14/Mayo/Año 1
6	16/Junio/Año 1
7	15/Julio/Año 1

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.63 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN EXTENSÓMETRO INTERNO DE BARRAS

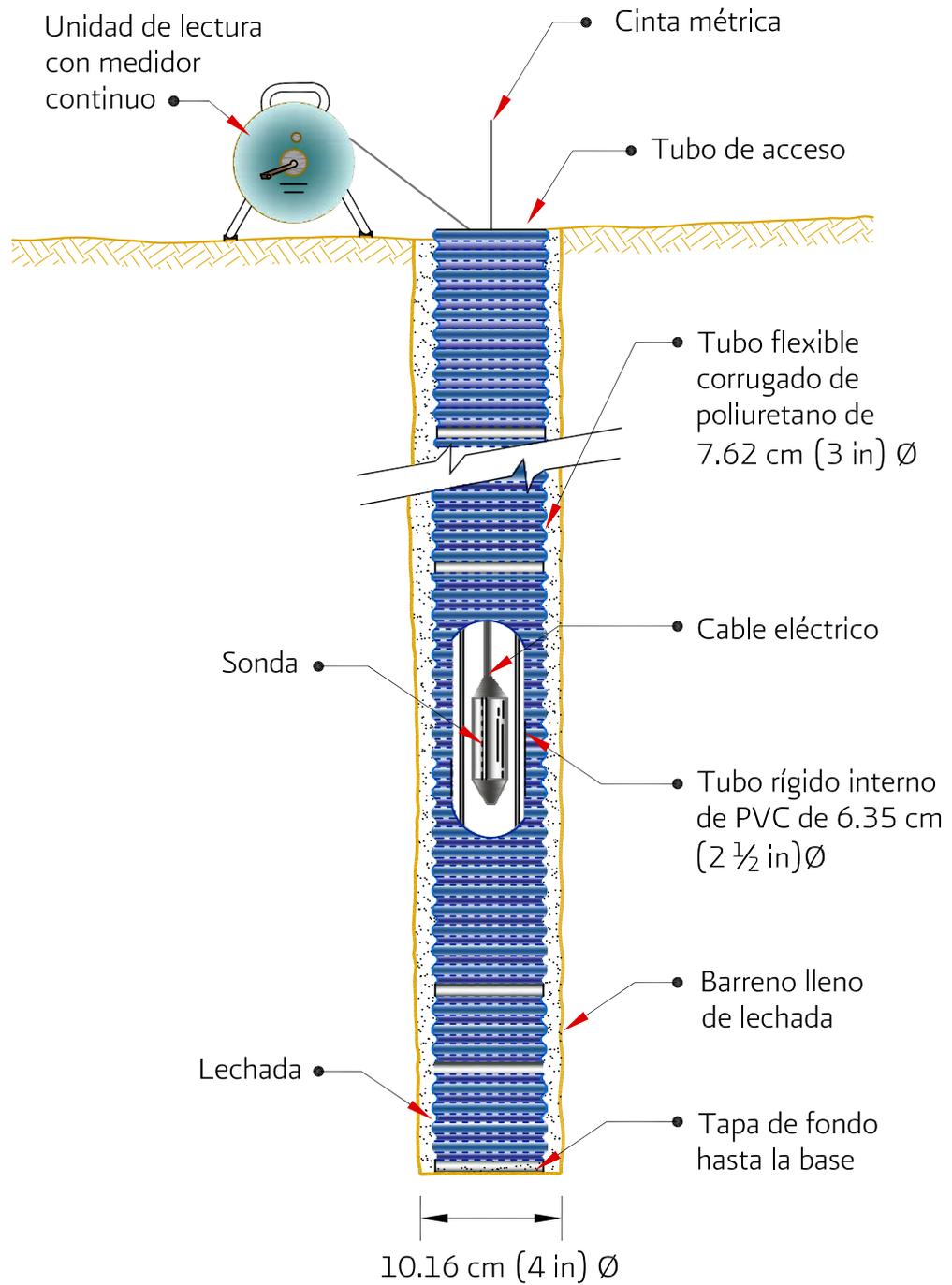
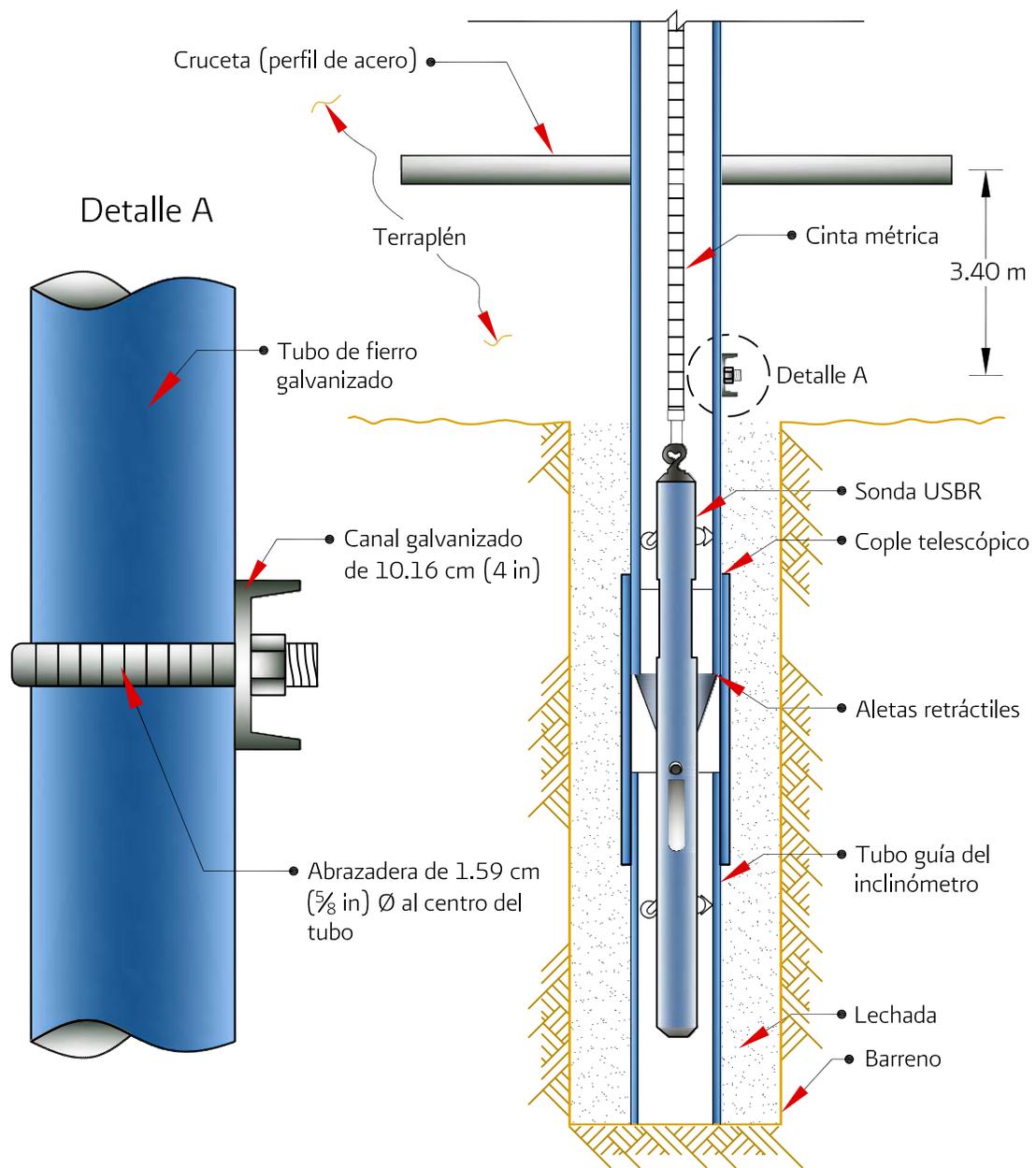


Figura 5.64 Partes de un deformómetro de anillos magnéticos



Sin escala

Figura 5.65 Deformómetro mecánico con sonda USBR (cortesía de Slope Indicator)



Figura 5.66 Deformómetro de anillos magnéticos (Sondex): 1) Carrete eléctrico graduado, 2) Tubo corrugado con anillos de acero inoxidable y 3) Sonda (cortesía de Slope Indicator)

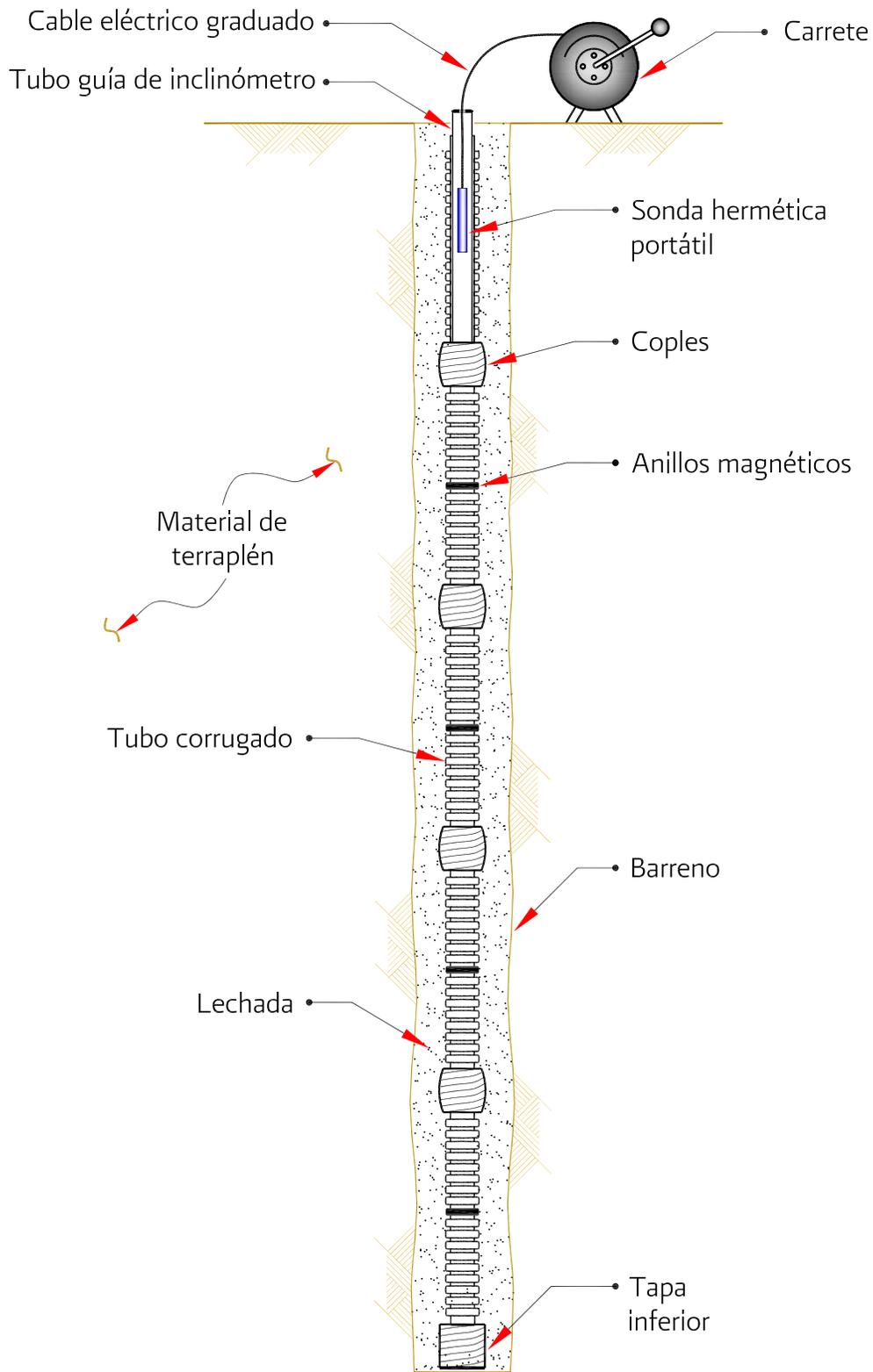


Figura 5.67 Deformómetro con anillos magnéticos tipo Sondex (cortesía de Slope Indicator)



Figura 5.68 Deformómetros magnéticos: 1) Carrete eléctrico graduado con sonda, 2) Araña magnética y 3) Placa con imanes (cortesía de Slope Indicator)

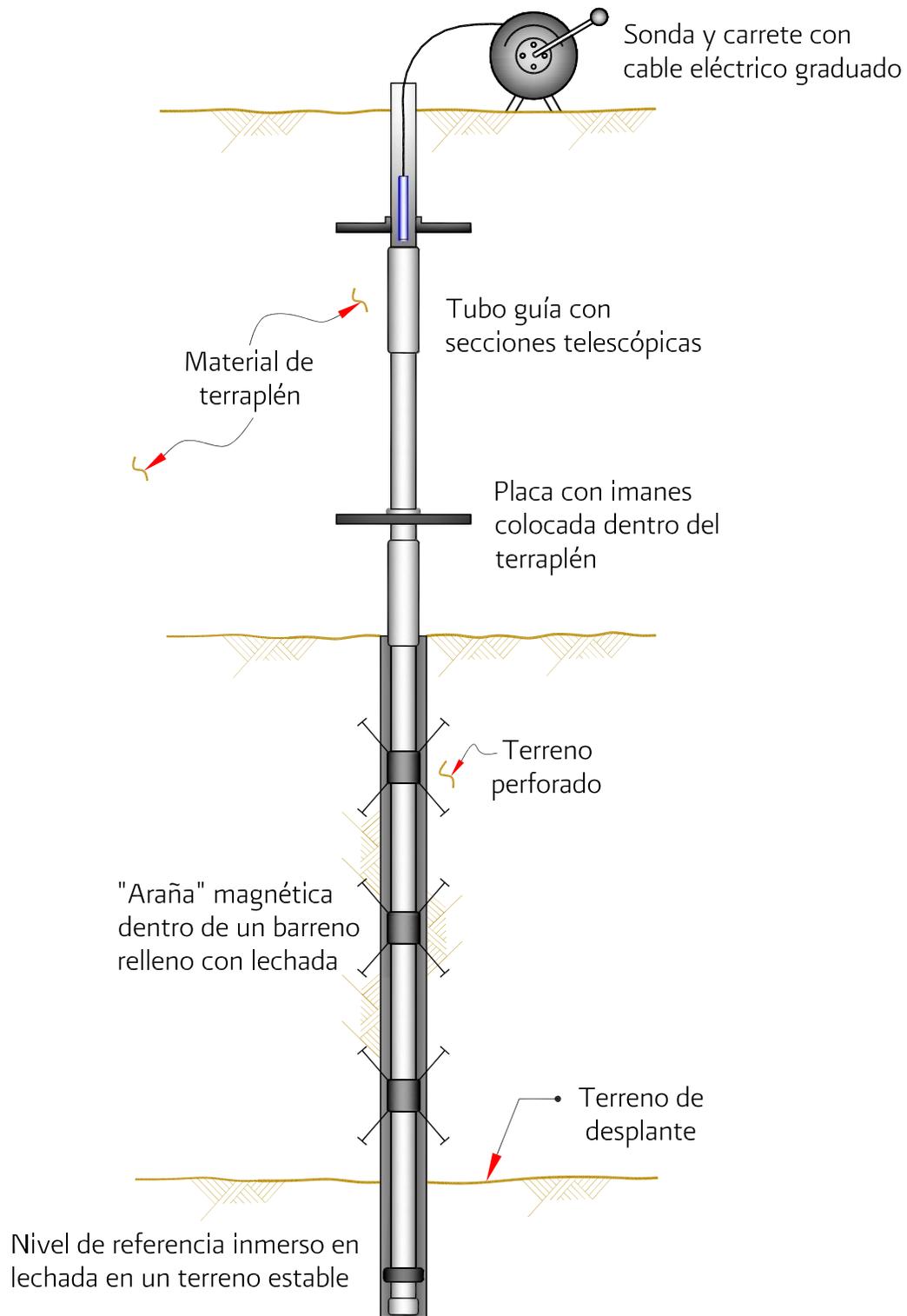


Figura 5.69 Instalación de un tubo de acceso para deformómetro con placas y arañas magnéticas (cortesía de Slope Indicator)

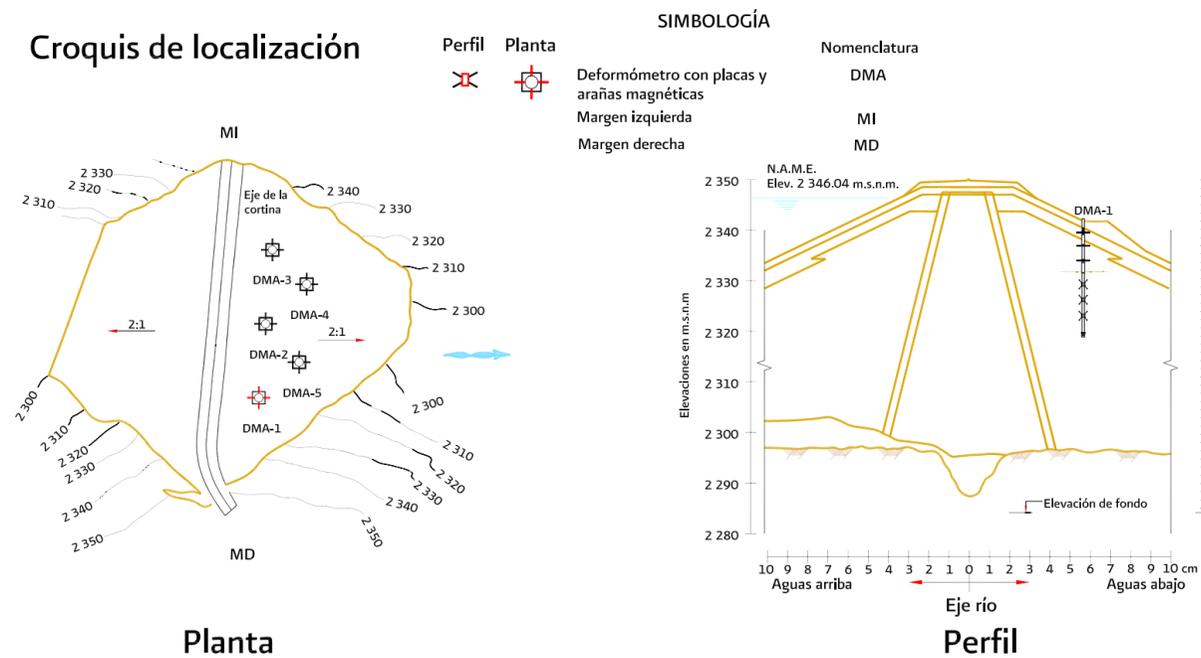
Proyecto:

Obra:

PRESA:

Observaciones generales:

Figura 5.70 FICHA DE INSTALACIÓN DEL DEFORMÓMETRO CON PLACAS Y ARAÑAS MAGNÉTICAS



Fotografías del equipo instalado



EQUIPO: Deformómetro con placas y arañas magnéticas	No. de ficha:	Código de plano:
---	---------------	------------------

Elevación del embalse (m.s.n.m.): _____ Elevación del terraplén (m.s.n.m.): _____
 PROYECTO _____

Nombre:	Ubicación:
Número:	Localización:

INSTRUMENTO		
Código:	Modelo:	Marca:
No. de serie:	Nomenclatura:	
Características físicas:		

Sistema de referencia:		Datum:	
Factores de calibración:		Elev. del cabezal (m.s.n.m.):	Cadenamiento o estación:
X =	Y =	Latitud:	Longitud:

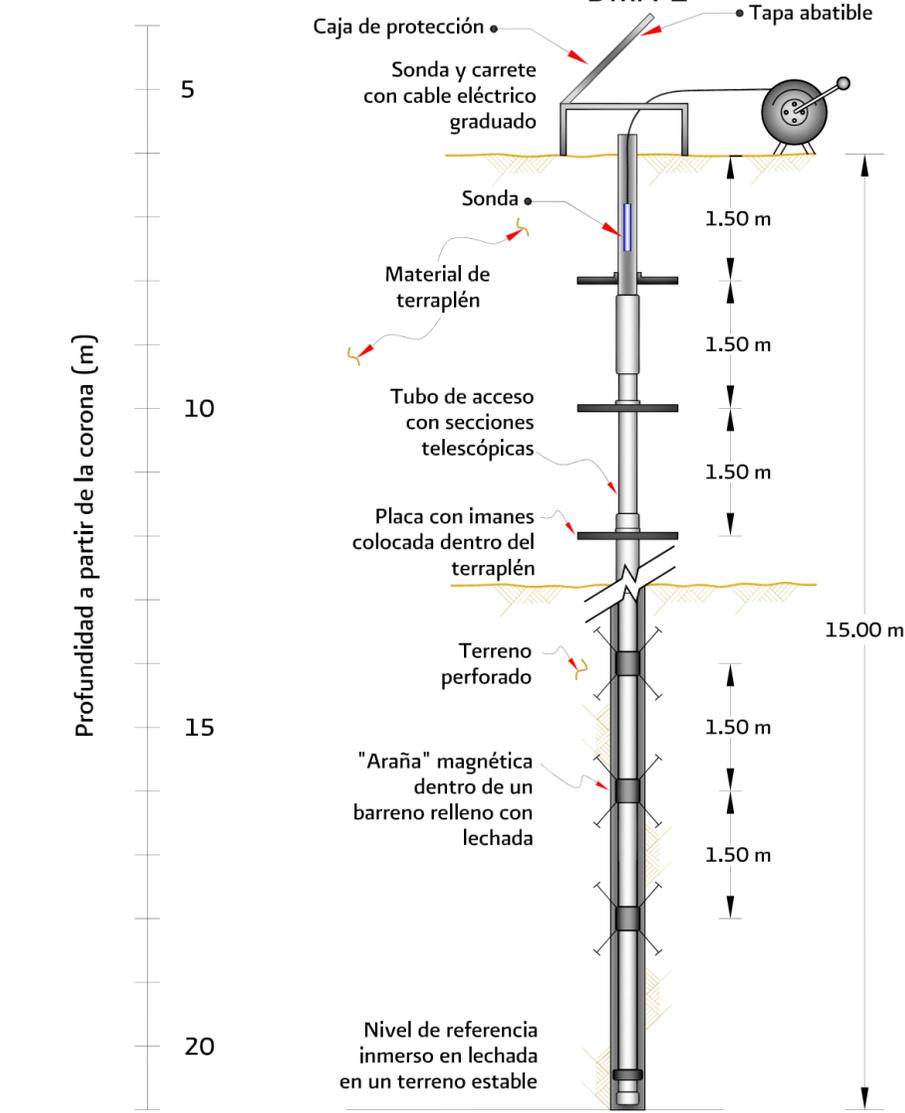
PERFORACIÓN	
Tipo de ademe:	Diámetro:
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Longitud:	Ángulo de perforación:
Materiales atravesados:	

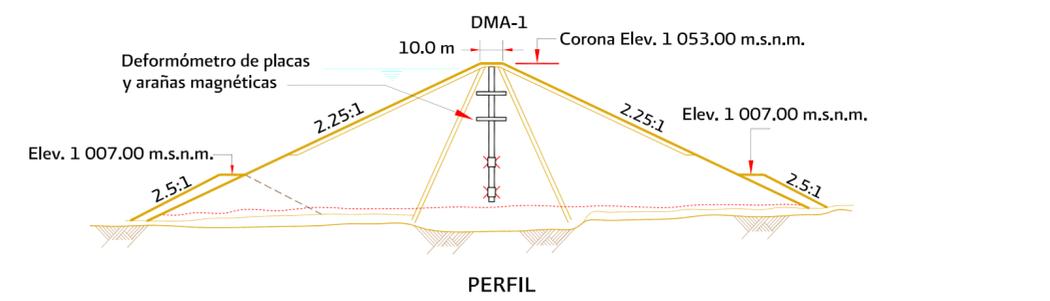
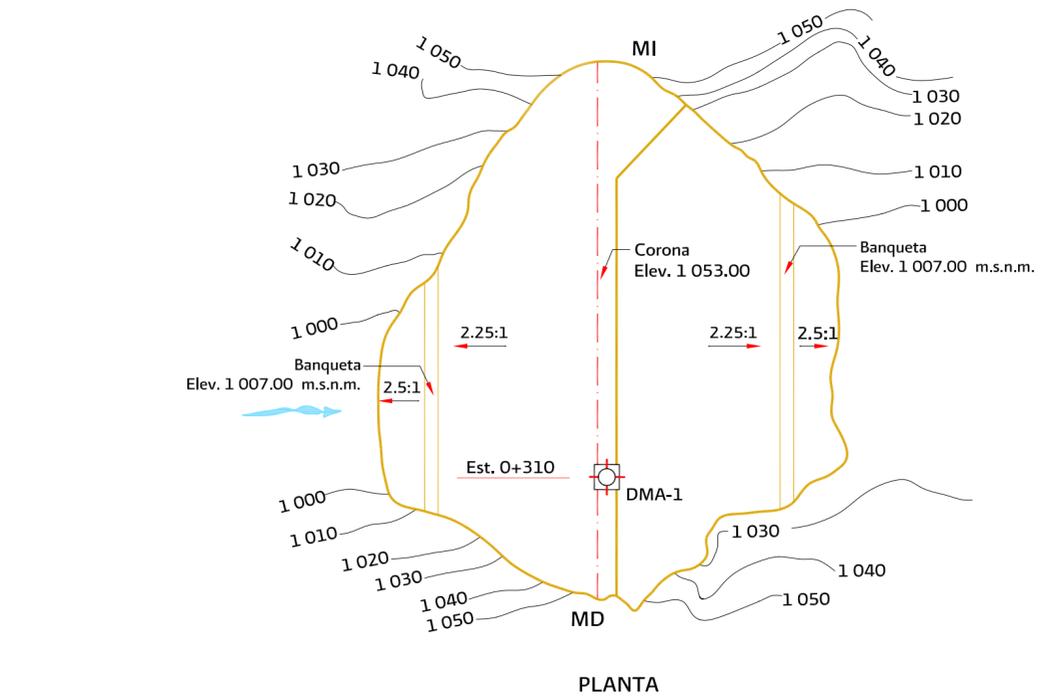
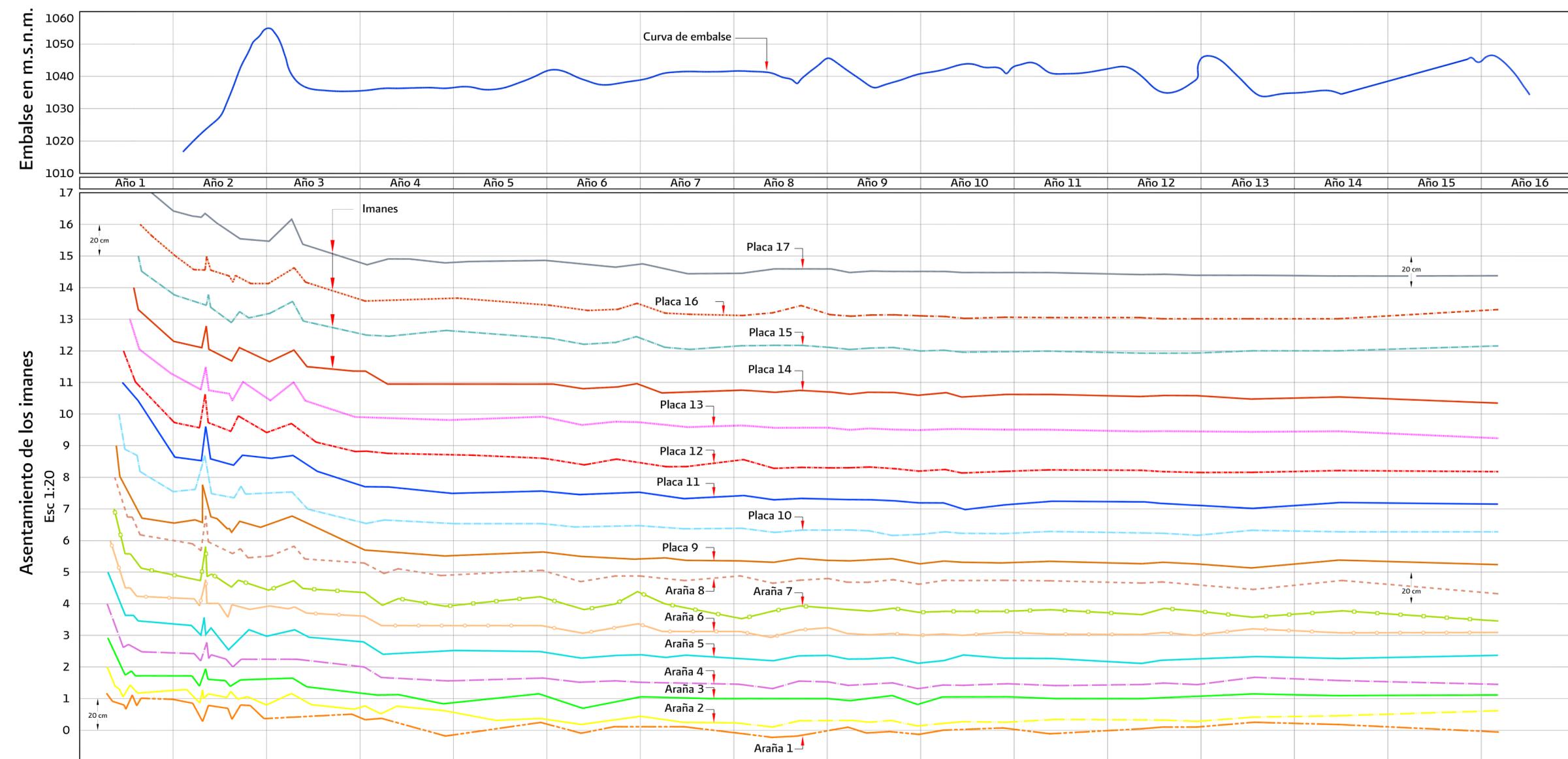
INSTALACIÓN	
Fecha de inicio:	Fecha de terminación:
Lectura inicial, fecha y hora:	Lectura posterior, fecha y hora:
Fecha de última calibración o verificación de la sonda:	Fecha próxima de calibración o verificación de la sonda:

TUBO DE ACCESO		
Fecha inicial de la instalación:	Fecha de término de la instalación:	
Diámetro externo:	Diámetro interno:	
Longitud total:	Número de tubos:	
Tipo de tubería:	Material:	Tipo de imanes:

Observaciones:		
_____	_____	_____
Instaló	Midió	Elaboró
_____	_____	_____
Revisó	Supervisó	Vo. Bo.

Detalle de instalación





SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		DMA
		MI
		MD

Iman (placa o araña) No.	Elevación inicial (m.s.n.m.)
17	1 050.596
16	1 047.339
15	1 044.039
14	1 040.757
13	1 037.446
12	1 034.151
11	1 030.808
10	1 027.488
9	1 024.129
8	1 020.739
7	1 017.454
6	1 014.112
5	1 010.747
4	1 007.406
3	1 004.025
2	1 000.620
1	997.211

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.71 ASENTAMIENTO DE IMANES DEL DEFORMÓMETRO DE PLACAS Y ARAÑAS MAGNÉTICAS

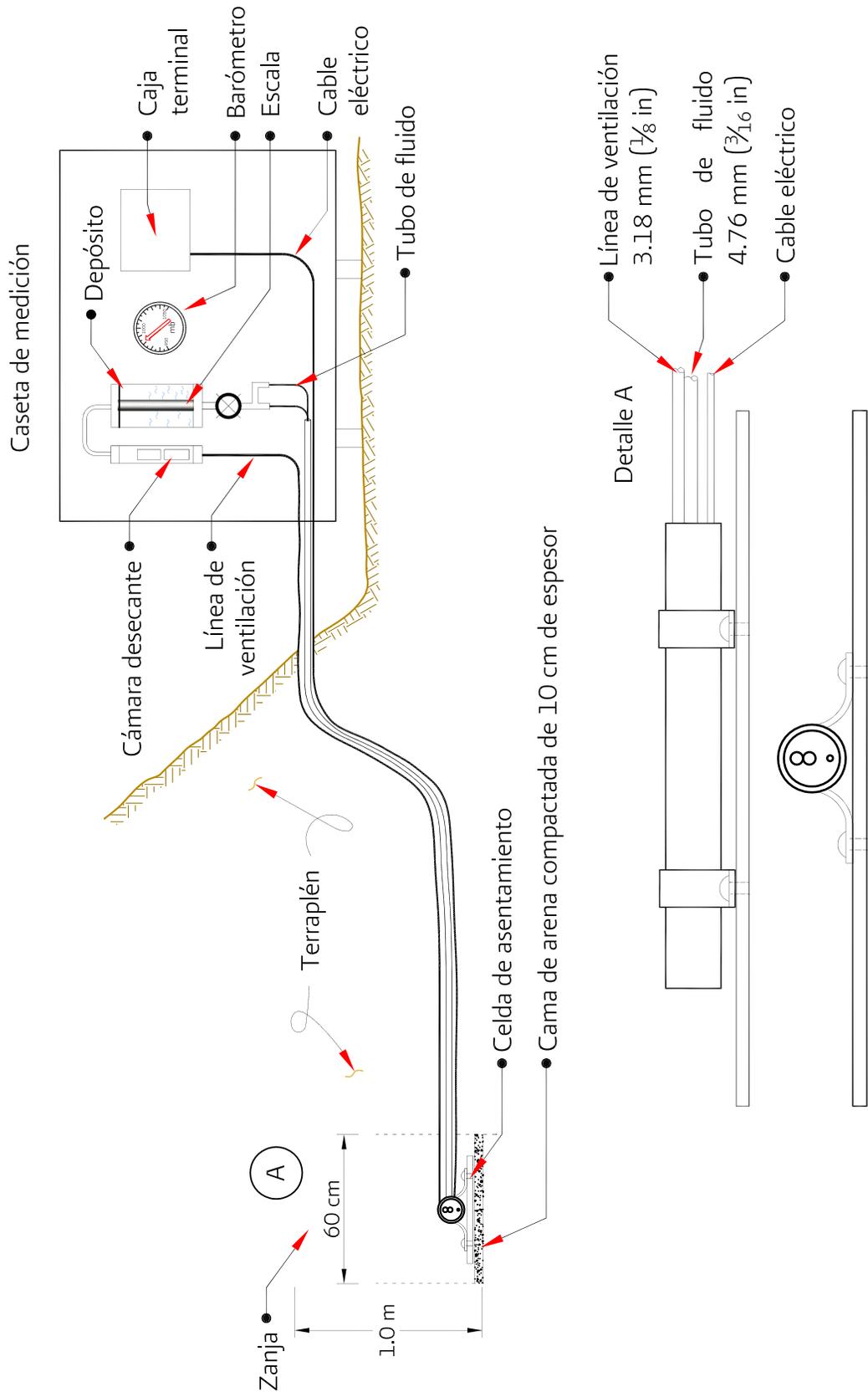
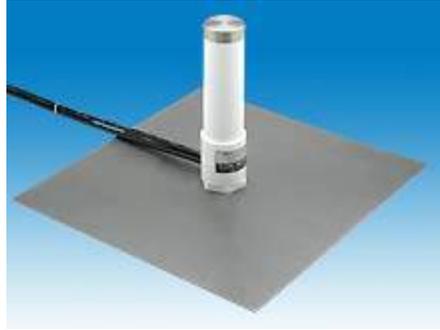


Figura 5.72 Componentes de la celda de asentamiento



Celda de asentamiento de cuerda vibrante
(cortesía de Slope Indicator)



Celda de asentamiento modelo VWSP105
(cortesía de Rst Instruments)

Figura 5.73 Celdas de asentamiento

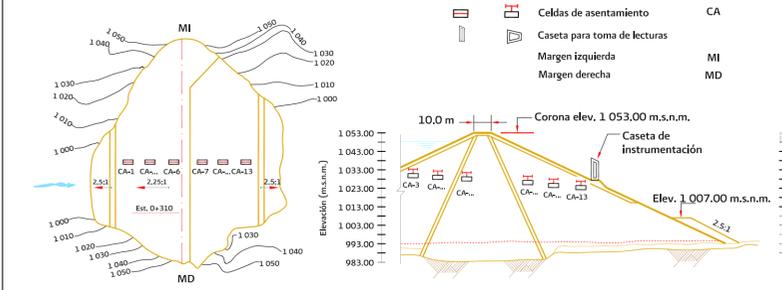


Figura 5.74 Instalación de una celda de asentamiento (cortesía de Sisgeo)



Figura 5.75 Caseta para la toma de lecturas de las celdas de asentamientos

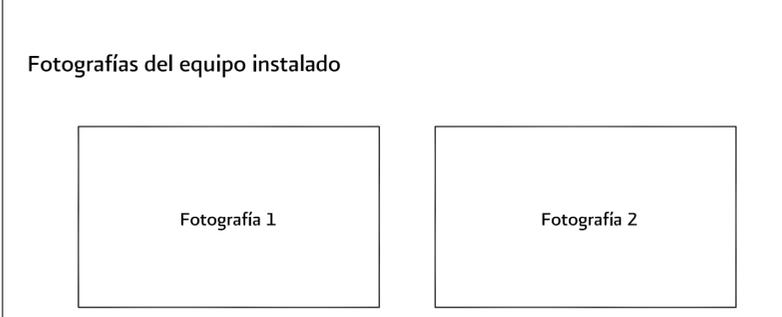
Croquis de localización



SIMBOLOGÍA

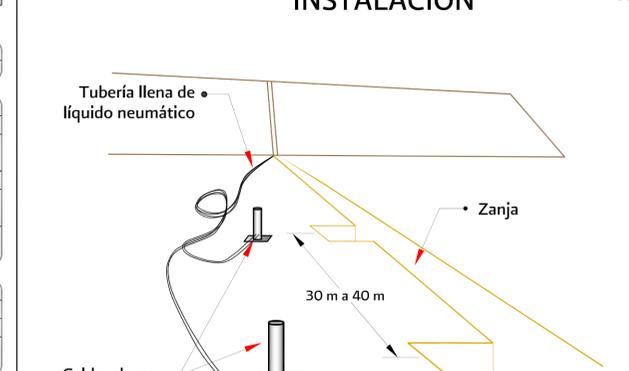
Planta	Perfil	Nomenclatura
		Celdas de asentamiento CA
		Caseta para toma de lecturas MI
		Margen izquierda MD
		Margen derecha MD

Fotografías del equipo instalado

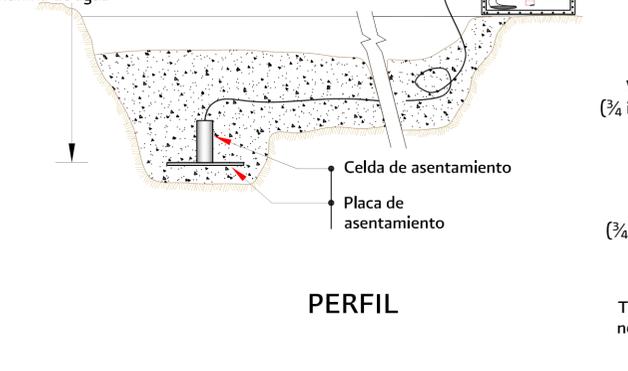


EQUIPO:		No. de ficha:	Código de plano:
Celdas de asentamiento			
Elevación del embalse (m.s.n.m.):		Elevación del terraplén (m.s.n.m.):	
PROYECTO			
Nombre:		Ubicación:	
Número:		Localización:	
INSTRUMENTO		Modelo:	Marca:
Código:		Nomenclatura:	
No. de serie:		Características físicas:	
Sistema de referencia:		Datum:	
Factores de calibración:		Elev. del instrumento (m.s.n.m.):	
X =		Cadenamiento o estación:	
Y =		Latitud:	
		Longitud:	
ZANJA			
Profundidad:		Ancho:	
Fecha de inicio:		Fecha de terminación:	
Longitud:		Ángulo o pendiente:	
Materiales atravesados:		Tipo de relleno:	
INSTALACIÓN			
Fecha de inicio:		Fecha de terminación:	
Lectura inicial, fecha y hora:		Lectura posterior, fecha y hora:	
Fecha de última calibración o verificación del transductor de la celda:		Fecha próxima de calibración o verificación del transductor:	
Observaciones:			
Instaló		Elaboró	
Revisó		Vo. Bo.	
Midió		Supervisó	

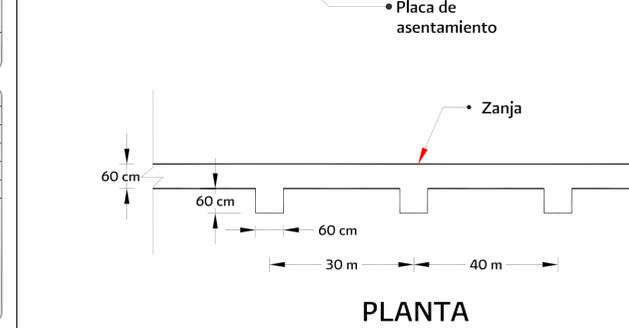
INSTALACIÓN



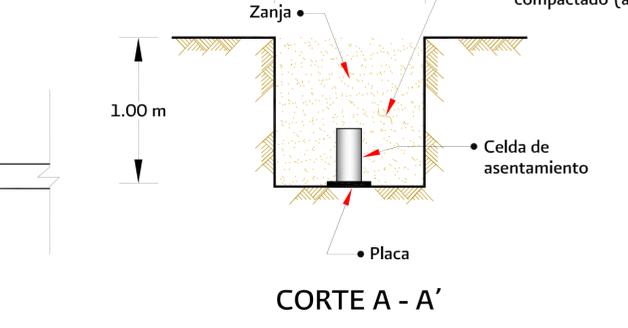
PERFIL



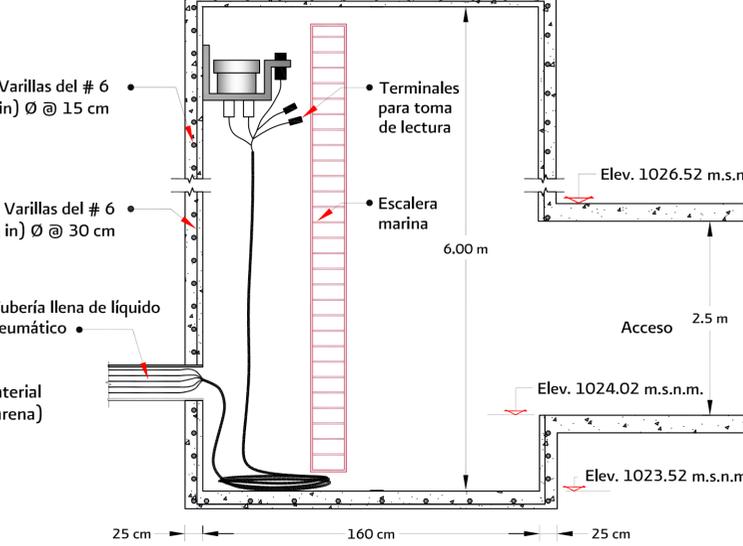
PLANTA



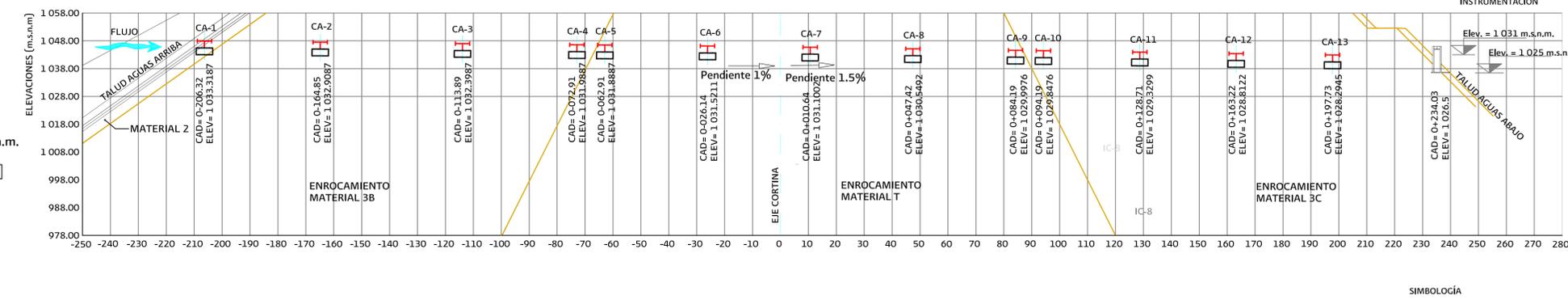
CORTE A - A'



CASETA DE INSTRUMENTACIÓN



UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS



SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		Celdas de asentamiento CA

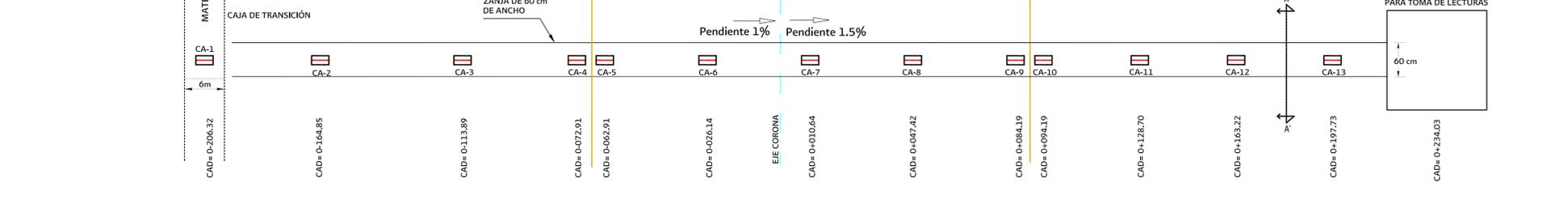
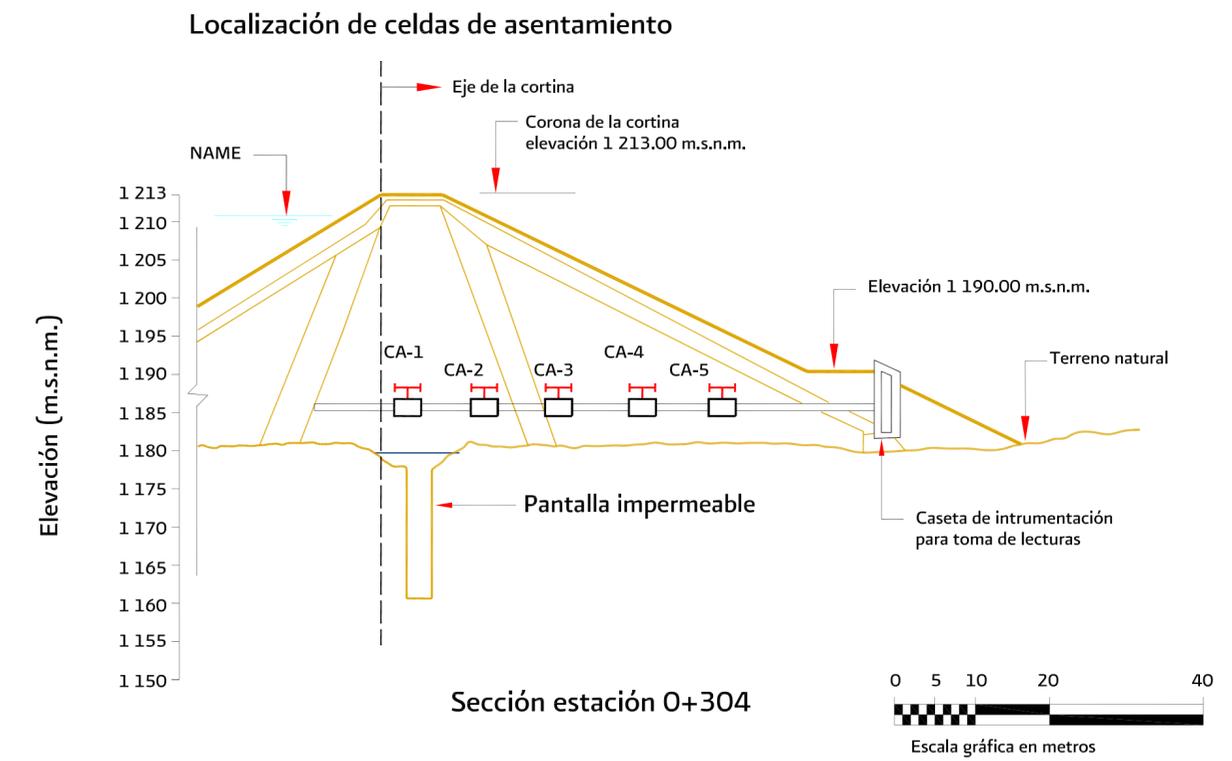
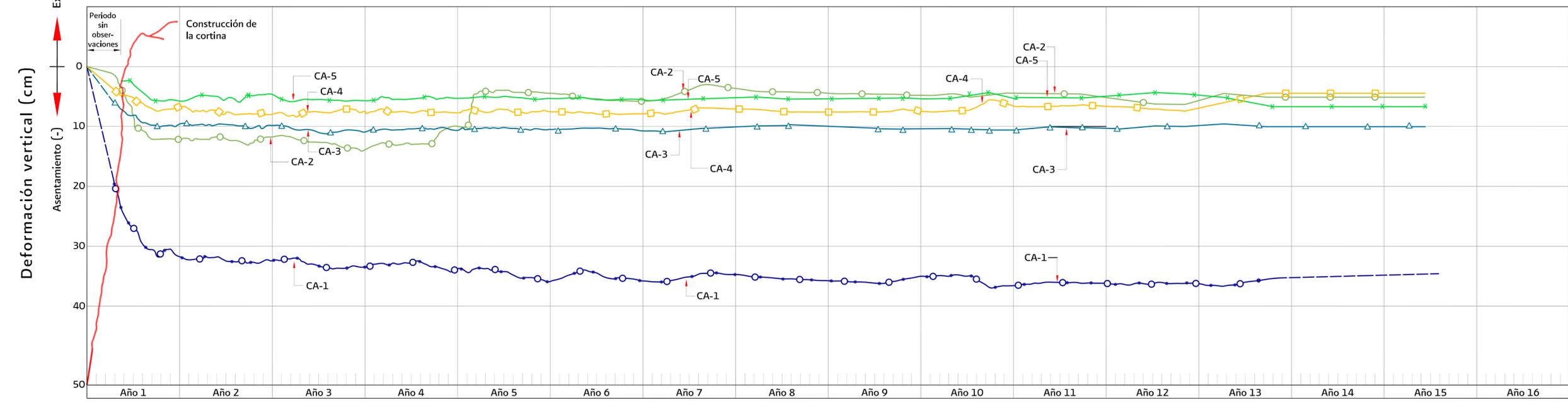
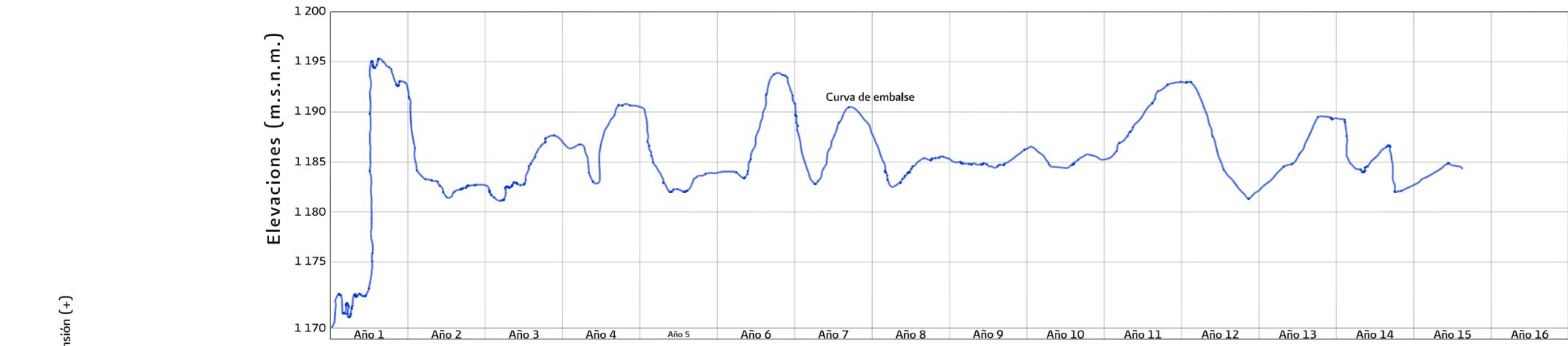


Figura 5.76 FICHA DE INSTALACIÓN DE CELDAS DE ASENTAMIENTO

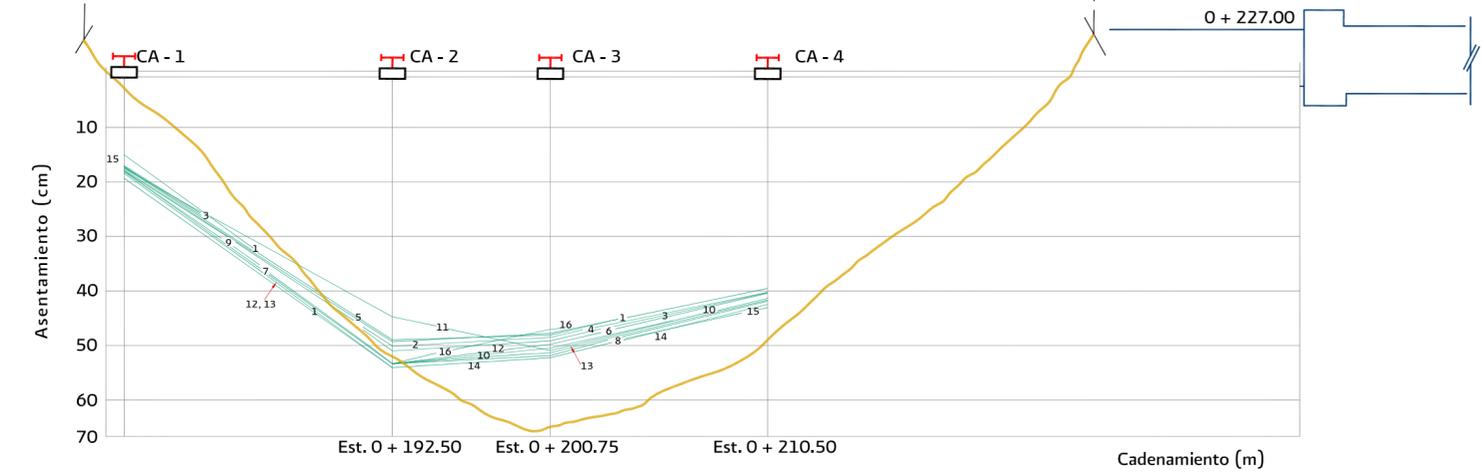
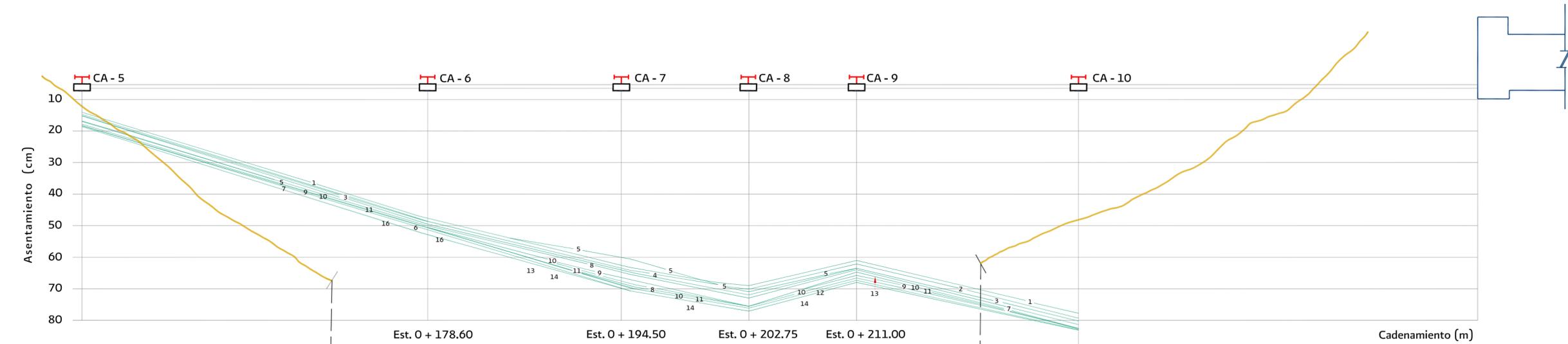


- LÍNEA
- Curva de embalse
 - Curva de celda de asentamiento 1
 - Curva de celda de asentamiento 2
 - △— Curva de celda de asentamiento 3
 - Curva de celda de asentamiento 4
 - ×— Curva de celda de asentamiento 5

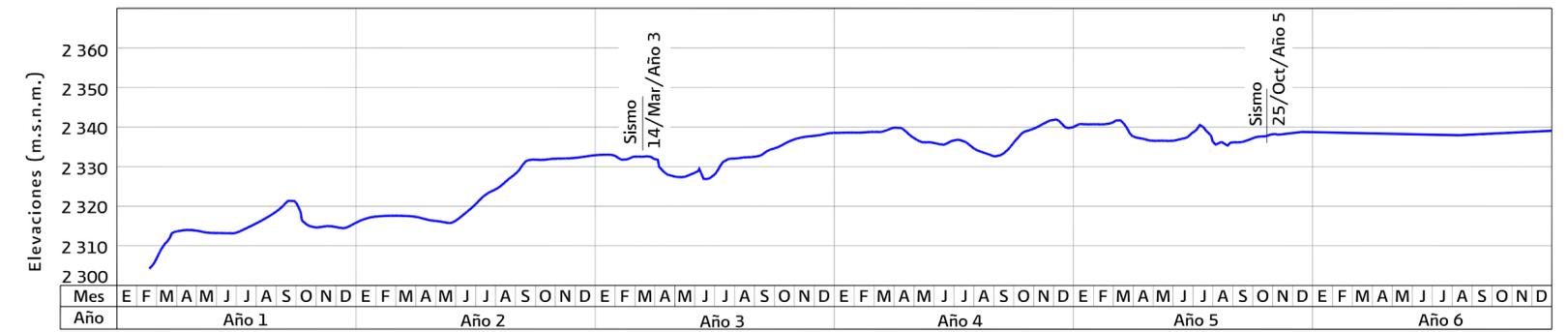
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.77 OBSERVACIONES DE CELDAS DE ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO

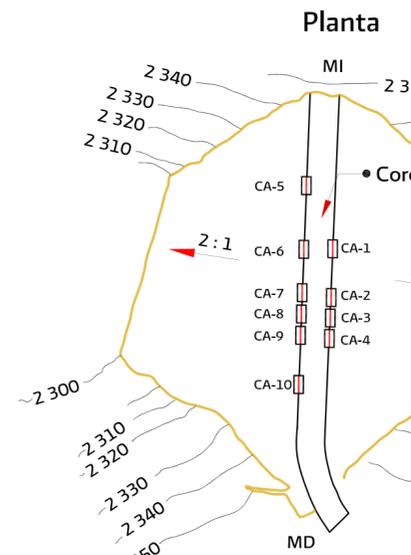
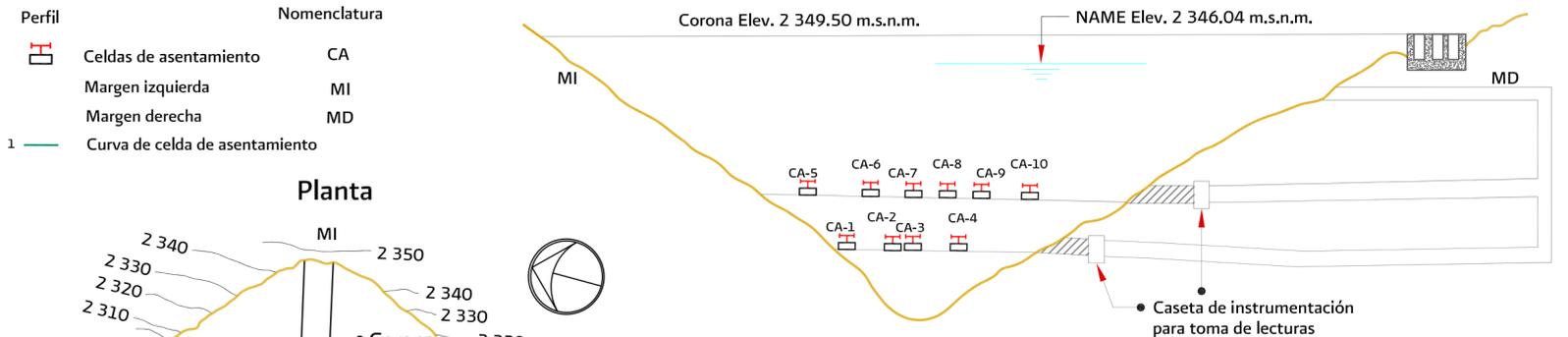


Gráfica	Fecha	Embalse m.s.n.m.
Inicial	15/Feb/Año 1	2 315.38
1	6/jun/Año 2	2 319.38
2	18/ago/Año 2	2 326.42
3	3/oct/Año 2	2 331.22
4	10/mar/Año 3	2 332.44
5	27/jun/Año 3	2 328.81
6	20/sep/Año 3	2 334.81
7	15/ene/Año 4	2 339.11
8	28/ago/Año 4	2 334.90
9	29/abr/Año 5	2 337.58
10	16/dic/Año 5	2 339.04
11	25/mar/Año 6	2 338.72
12	18/may/Año 6	2 338.26
13	21/jul/Año 6	2 339.16
14	23/nov/Año 6	2 339.22
15	21/jul/Año 6	2 339.35
16	23/nov/Año 6	2 339.42



SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		CA Celdas de asentamiento
		MI Margen izquierda
		MD Margen derecha
		1 Curva de celda de asentamiento



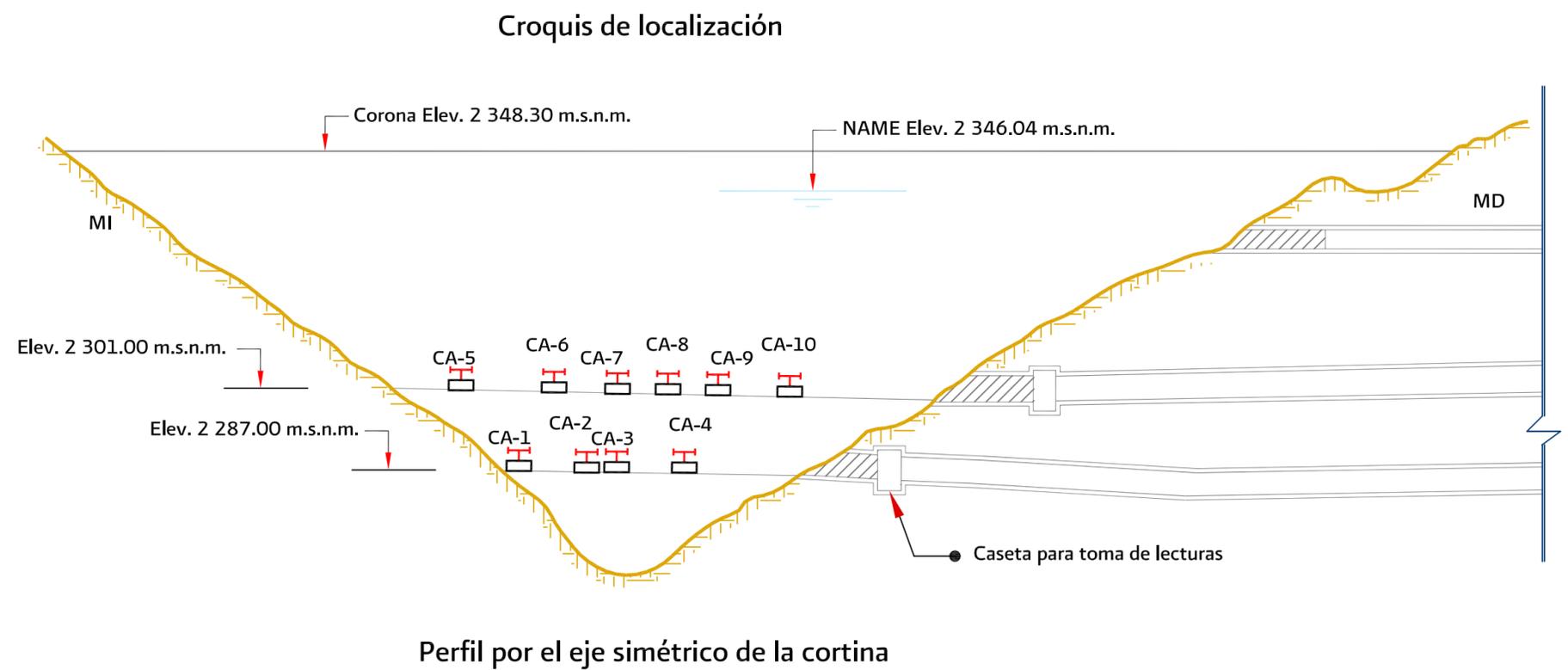
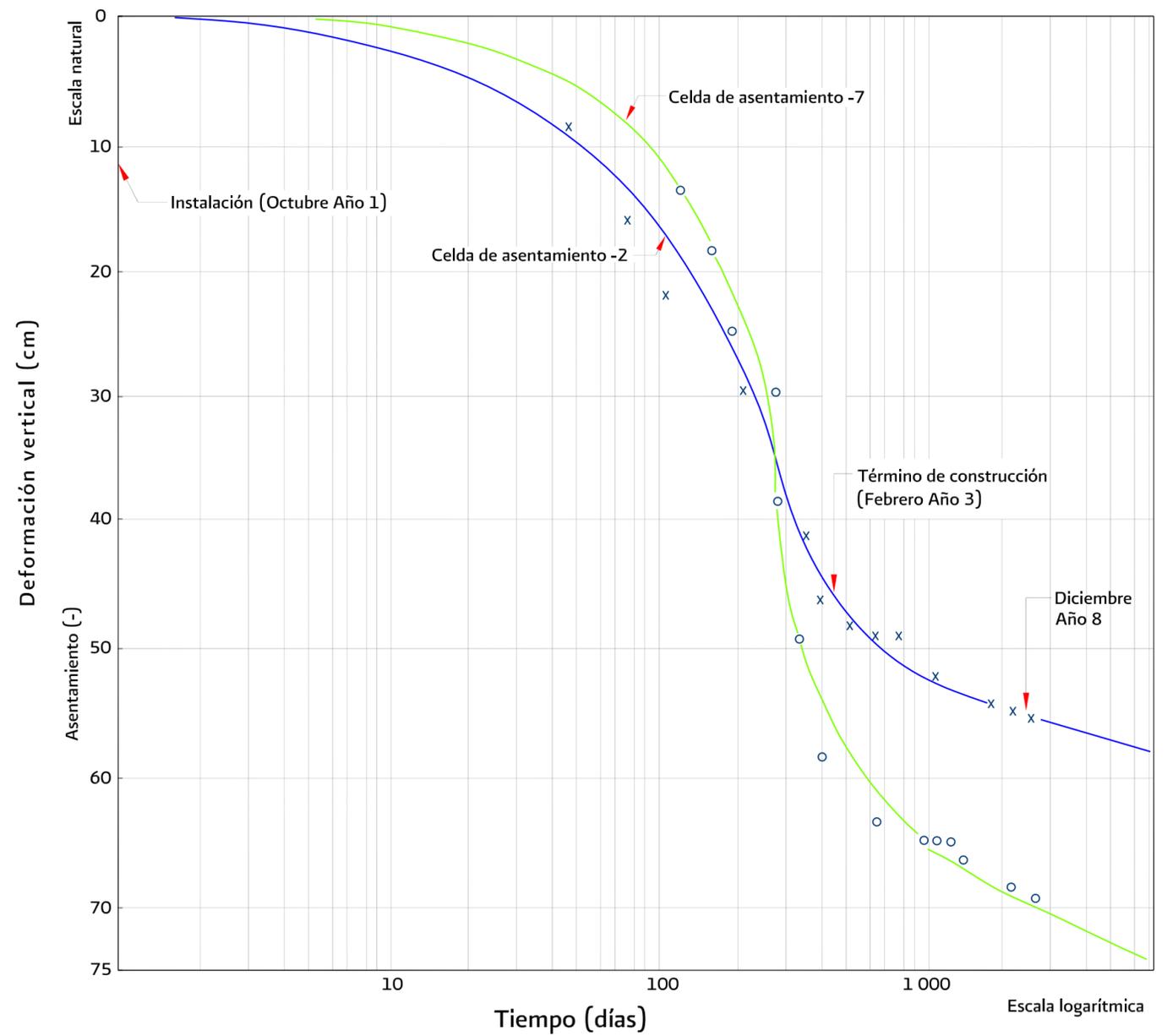
Perfil por el eje simétrico de la cortina

Notas:
 Sismo 7.2° Richter 14/Mar/Año 3
 Sismo 6.4° Richter 25/Oct/Año 5

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.78 OBSERVACIONES EN GRUPO DE CELDAS DE ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO



SIMBOLOGÍA

Planta	Perfil	Nomenclatura
		Celdas de asentamiento CA
		Margen izquierda MI
		Margen derecha MD

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 5.79 ASENTAMIENTOS DE LAS CELDAS DE ASENTAMIENTO CONTRA TIEMPO, EN ESCALA LOGARÍTMICA

Capítulo 6

MEDICIÓN DE PRESIONES

Conocer la variación del estado de esfuerzos en el interior de una masa de suelo, se trate de un relleno artificial o natural, resulta imprescindible para el análisis de su estabilidad estructural.

Particularmente, en obras hidráulicas formadas con rellenos artificiales, es importante conocer la variación de las presiones de tierra y las presiones de poro en las etapas de construcción, en el primer llenado del embalse y en la operación.

Durante la construcción de una cortina de tierra y enrocamiento, se desarrollan presiones de poro en la cimentación, en el corazón impermeable y en las zonas semipermeables a medida que la altura del terraplén se incrementa. La medición de las presiones de poro mediante piezómetros permite, por una parte, tomar decisiones sobre la velocidad de construcción a fin de controlar dichas presiones a valores límite establecidos, según los criterios de diseño, y por otra, juzgar la efectividad de las obras de drenaje y de control de flujo de agua planeadas.

Las aplicaciones de los piezómetros se pueden agrupar en dos categorías:

- Problemas relacionados con el flujo de agua
- Problemas de resistencia al esfuerzo cortante del suelo

En la primera categoría, se pueden mencionar las condiciones hidráulicas iniciales (antes de la construcción), la determinación de la magnitud y distribución de la presión de poro y de sus variaciones con el tiempo (patrón de flujo de agua), efectividad de drenes, pozos de alivio y pantallas impermeables.

La segunda categoría se refiere a los problemas de la valoración de la resistencia al esfuerzo cortante: disipación de la presión de poro generada durante la construcción, disipación de la presión de poro durante la consolidación de la cimentación y materiales de relleno, así como el efecto de un vaciado rápido.

Cuando el suelo es impermeable, la presencia de un dispositivo para medir la presión de poro puede alterar radicalmente dicha presión cerca del punto de medición y los resultados pueden ser engañosos. En efecto, si para indicar un cambio de la presión se necesita que una pequeña cantidad de agua fluya dentro o fuera del dispositivo de medición, el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio puede resultar inadmisiblemente

largo. Por tanto, con objeto de evitar resultados erróneos, el instrumento para medir la presión de poro en un suelo debe tener un tiempo de reacción instantáneo.

Por otra parte, medir con precisión las presiones totales existentes en el interior de una masa de suelo es una tarea muy difícil, debido principalmente a que la presencia del instrumento de medición altera el campo de esfuerzos que existiría si aquél no se hubiera colocado. Los esfuerzos en el interior de una masa de suelo los producen tanto su propio peso como las cargas externas aplicadas. La medición de los esfuerzos se realiza mediante celdas de presión total.

Los términos **esfuerzo** y **presión** se refieren a la relación fuerza entre área unitaria y se pueden usar en forma intercambiable.

En este capítulo se presentan los instrumentos que miden las presiones o esfuerzos totales en el interior de las masas de suelo que constituyen la estructura de una obra hidráulica. Se incluyen los piezómetros que miden la presión de poro y las celdas de presión total en sus diferentes tipos.

Asimismo, se describen los componentes de cada instrumento, y el mecanismo de su funcionamiento para detectar el fenómeno que se desea medir. De manera general, se mencionan las especificaciones y los métodos de verificación de cada uno de ellos, así como los criterios de selección, según las condiciones ambientales a las que se sometan y la naturaleza de los materiales en los que se instalan; también se describen los procedimientos y las normas de instalación, que incluyen materiales, equipos y herramientas.

Finalmente, se presentan dos formatos: la ficha de instalación y el registro de la toma de lecturas; en particular, la ficha de instalación incluye el tipo de instrumento, su localización, profundidad y lecturas iniciales.

6.1 PRESIONES HIDRÁULICAS

En la Tabla 6.1 se presenta la clasificación de los tipos de instrumentos de medición de presiones, en términos del funcionamiento de sus transductores.

6.1.1 Piezómetro abierto

El piezómetro abierto (*standpipe piezometer*) consiste en un tubo corto con ranuras o un cilindro de cerámica porosa, llamado **bulbo piezométrico**. A uno de sus extremos se le acoplan 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. Para su instalación se hace descender el bulbo piezométrico a su posición en el subsuelo, en un empaque de arena, a través de una perforación o barreno. Al sellar el empaque de arena con bentonita a una cierta altura del bulbo, se forma una zona piezométrica que garantiza la medición de la presión de poro a la profundidad de instalación del bulbo. En la superficie se construye un tapón, generalmente con mortero de cemento para aislar la zona de estudio. En la Figura 6.1 se muestra el arreglo de un piezómetro abierto, que también se conoce como **piezómetro Casagrande**.

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; por otra parte, no se recomienda para automatización.

6.1.1.1 Descripción

El bulbo piezométrico, tubo ranurado de plástico, se forma con dos tubos de PVC concéntricos de 50 cm de longitud; el tubo exterior es de 5.08 cm (2 in) de diámetro y el tubo interior es de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in), ambos con perforaciones de 0.32 cm ($\frac{1}{8}$ in) separadas a cada 2.5 cm o con ranuras de 0.16 cm ($\frac{1}{16}$ in) separadas a cada 1 cm. El espacio anular entre los tubos se rellena con arena bien graduada que funciona como filtro. En el extremo inferior se coloca un tapón que fija a los dos tubos, y en el extremo superior se acopla una reducción de 5.08 cm (2 in) a 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) por la que sobresale el tubo de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) en una longitud de 10 cm. En la Figura 6.2 se muestran los componentes del bulbo permeable como piezómetro abierto, y en la Figura 6.3,

Tabla 6.1 Instrumentos para la medición de presiones

	Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Limitaciones
Manuales	Piezómetro abierto o tipo Casagrande	Columna de agua en un ducto que conecta la celda de captación con la atmósfera. La variación de la longitud de la columna en el interior del ducto se relaciona directamente con la presión de poro.	Simple, económico y adecuado para la mayoría de problemas en suelos.	No se puede medir presión de poro negativa
				No se puede usar si el nivel piezométrico está arriba de la boca del tubo vertical.
	Piezómetro neumático	Diafragma flexible sometido a presión del agua, equilibrada por una presión neumática aplicada desde el exterior a través de un ducto flexible.	Estable, tiempos de retraso cortos.	
		El valor de la presión de equilibrio inyectada es el valor de la presión de poro.	Adaptable a registro continuo.	
Eléctricos	Piezorresistivo	Contiene un diafragma delgado de cerámica con resistores (strain gauges). Al deformarse el diafragma con la presión del líquido se modifica la resistencia de los sensores en forma directamente proporcional al esfuerzo aplicado. De manera electrónica se puede convertir esta señal de salida en una señal de corriente 4–20 mA (miliamperes).	Respuesta rápida a cambios de presión sin requerir cambios volumétricos importantes, gran precisión aun con rangos de presión pequeños.	No recomendable para monitoreo de largo plazo (menor estabilidad).
			Pueden emplearse para mediciones dinámicas y conectarse a un sistema automático de adquisición de datos.	La longitud del cable afecta su calibración.

Tabla 6.1 Instrumentos para la medición de presiones (continuación)

	Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Limitaciones
Eléctricos	Cuerda vibrante	Convierte la presión del agua en una señal de frecuencia con un diafragma metálico unido a un delgado filamento tensionado, el cual se excita mediante una bobina electromagnética. La variación en la presión aplicada sobre el diafragma modifica la tensión del filamento y en su frecuencia natural de vibración. Esta señal es transmitida en hertz (Hz).	Respuesta muy rápida a cambios de la presión de poro.	Menor precisión para pequeñas presiones.
			Alta repetitividad.	
			Gran estabilidad en periodos de tiempo prolongados.	
			La longitud del cable puede modificarse sin afectar la calibración del sensor.	
			Se puede instalar con más de 1000 metros de cable sin afectar su precisión.	
			Se puede conectar a un sistema automático de adquisición de datos.	
	Fibra óptica	Está diseñado para medir sin contacto las deformaciones de un elemento mecánico óptico en miniatura (moms por sus siglas en inglés).	Las dimensiones del sensor son muy pequeñas (5 mm), por lo que facilita su instalación en tuberías delgadas.	Costo elevado.
			Inmune a interferencias magnéticas, de señales de radio y a descargas eléctricas.	
			Alta resolución y estabilidad.	
			Baja influencia de cambios térmicos.	

el esquema del piezómetro abierto preparado con su envoltura en arena con geotextil filtrante con poros de 0.05 mm a 0.2 mm de abertura para hacerlo descender a su posición en el subsuelo.

La sección de cerámica porosa comercialmente se presenta como un cilindro de 30 cm de largo y 5 cm de diámetro, con poros de 60 micras; en algunos casos con capuchas de plástico rígido acopladas en sus extremos, y en otros, con camisas de plástico rígido perforado, como se ilustra en la Figura 6.4. Los hay también con punta de acero para hincarlos a presión, particularmente en suelos finos blandos.

A cualquiera de los dos tipos de bulbo piezométrico, tubo ranurado o cerámica porosa se le acoplan en el extremo superior tramos de PVC de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) de diámetro hasta que sobresalgan a la superficie libre del terreno. El brocal se referencia a un banco de nivel fijo y se protege con una caja de concreto con tapa metálica galvanizada y con un candado resistente a la intemperie, con su etiqueta de identificación.

6.1.1.2 Instalación

Los procedimientos para la instalación de los piezómetros abiertos están en función de las condiciones de los materiales que se atraviesan y las que establece el proyecto. Los casos que se presentan son los siguientes:

- Instalación en laderas
- Instalación en cimentación
- Instalación en obra terminada

6.1.1.2.1 Instalación en laderas

Para instalar un piezómetro es necesario localizar topográficamente la posición del brocal del tubo, así como su elevación con respecto a un banco de nivel.

El equipo utilizado para perforar debe garantizar la verticalidad del barreno, con los diámetros especificados en el proyecto. Cuando la perforación atraviese suelos inestables en sus paredes y se provoquen caídos durante las operaciones de instalación, se deberá usar ademe metálico recuperable; no se deben utilizar lodos de bentonita como estabilizadores de las paredes de barreno.

La perforación debe llegar hasta una profundidad de 50 cm por debajo de la profundidad de localización

del centro del bulbo piezométrico, según lo indique el proyecto. Previo al descenso del bulbo, se vierte arena gruesa a media, limpia, bien graduada, en un espesor de 30 cm sobre el fondo del barreno; en tanto, el piezómetro se envuelve en arena gruesa a fina, sostenida por una malla de geotextil filtrante. Para el descenso se acoplan los tramos de tubería de PVC, cuidando su limpieza interna. En el caso de la presencia de ademe, éste se extrae desde el fondo del barreno una longitud de 50 cm antes de bajar el piezómetro. En la Figura 6.1 se muestran la instalación del piezómetro en su sitio y los componentes de sellado.

Al bajar el bulbo piezométrico a su posición, se debe tener cuidado con los tramos de tubería acoplados para que no se fracturen durante la manipulación con el tripié de apoyo; el bulbo piezométrico debe asentarse sobre el relleno de arena, previamente vertido; una vez asentado, se vierte otra vez arena hasta alcanzar un espesor total de 1 m desde el fondo del barreno. En el caso de ademe metálico, se extrae nuevamente 50 cm para permitir que la arena descienda por completo. La zona piezométrica se sella al colocar sobre el empaque de arena, esferas de bentonita (*pellets*) que se colocan en capas hasta alcanzar un espesor de 50 cm. Sobre este sello, se rellena el barreno con mortero arena-cemento-bentonita hasta 3 m de espesor, en proporciones de una parte de cemento por dos de arena en volumen y la bentonita al 3% en peso del cemento. En este proceso, después de colocar 50 cm de mortero se extrae el ademe otros 50 cm, para repetir el llenado de mortero hasta alcanzar el espesor señalado. Se continúa con el relleno del barreno hasta llegar a una altura de 50 cm por debajo de la superficie libre del terreno. El tramo final de la tubería hacia la superficie se adapta para protegerse con un cajón de concreto armado con tapa metálica galvanizada y portacandado, como se muestra en la Figura 6.5; a la tapa metálica se le coloca la etiqueta de identificación del piezómetro.

En el caso de condiciones de asentamiento regional, el tubo de PVC del piezómetro se protege con un tubo galvanizado de 5.08 cm (2 in) de diámetro. Para disminuir la fricción entre tubo galvanizado y terreno, sobre el mortero arena-cemento-bentonita ya fraguado, se coloca un colchón de bentonita sin compactar de 2 m a 3 m de espesor, sobre el que se asienta el tubo galvanizado de 5.08 cm (2 in).

6.1.1.2.2 Instalación en cimentación

Una vez localizados topográficamente los puntos de instalación de los piezómetros, se realiza una perforación con broca, según el diámetro y profundidad especificados. La colocación del bulbo en el fondo del barreno se realiza, como se indicó en el apartado 6.1.1.2.1, con la longitud de tubería suficiente para llegar al nivel de desplante de las terracerías y que sobresalga al menos 25 cm o la longitud suficiente para acoplar el siguiente tramo de tubería de PVC.

Este procedimiento hace compatible la colocación sucesiva de las terracerías, con el acoplamiento sucesivo de tubería del piezómetro, para seguir los niveles crecientes de las terracerías. Lo relevante en este procedimiento es proteger los tramos de tubería PVC que se agregan al piezómetro, y mantener su verticalidad durante el tendido y compactación de los materiales.

A continuación, se describen los procedimientos para la protección de la tubería ya colocada y los siguientes tramos de tubo de PVC de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) que conecta el bulbo piezométrico con la atmósfera en la superficie final de la obra.

Los procedimientos para la sobreelevación de la tubería son los siguientes:

1. Instalación de la tubería por arriba de las terracerías
 - En material impermeable
 - En material pétreo
2. Instalación de la tubería por debajo de las terracerías

A. Instalación de la tubería por arriba de las terracerías en material impermeable

Este procedimiento consiste principalmente en sobreelevar la tubería del piezómetro antes de colocar y compactar las terracerías del cuerpo principal de la obra; la tubería debe protegerse de los daños que pudiera causarle la maquinaria que tiende y compacta las terracerías, este procedimiento de sobreelevación de tuberías se sigue paralelamente a la sobreelevación de las terracerías y se repite hasta el final de su colocación.

Antes de colocar la primera capa de terracerías de la obra, a la tubería de PVC que se instaló en la cimentación y que sobresale del nivel de desplante, se le agrega un tramo de 1.40 m de longitud de igual diámetro, con un cople y pegamento especial, protegiendo el extremo superior del tramo con un tapón hembra. Desde el

inicio, la tubería de PVC se protege de la fricción que generan los asentamientos de las terracerías con un tubo galvanizado de 3.81 cm ($1\frac{1}{2}$ in) de diámetro y de 1.5 m de longitud, que funciona como tubo telescópico al agregarle otro tubo, también galvanizado, de 2.54 cm (2 in) de diámetro en la siguiente etapa de sobreelevación. Para evitar los daños debidos a la colocación de las terracerías y su compactación, las tuberías se protegen rodeándolas con un terraplén de arcilla compactada que tiene forma troncocónica con 4 m de base, 2 m en la parte superior y una altura que puede variar entre 1 m y 1.5 m, dependiendo de la longitud de los tramos de tubería que se agreguen, como se ilustra en la Figura 6.6; este terraplén se compacta con equipo operado manualmente. De la superficie del terraplén de protección debe sobresalir una longitud suficiente de tubo PVC y de tubo galvanizado, de al menos 25 cm, para los acoplamientos de los tramos de tubería para la siguiente sobreelevación.

Cuando las terracerías llegan a una altura de 30 cm por debajo del extremo superior del terraplén de protección, se procede al acoplamiento de los siguientes tramos de tubería de la manera ya indicada, excepto que ahora el tubo de PVC se protege con un tubo galvanizado de 5.08 cm (2 in), que envuelve al tubo galvanizado de 3.81 cm ($1\frac{1}{2}$ in) previamente colocado, para absorber los efectos de fricción. Después de cada etapa de elevación se debe tomar la elevación del brocal y la lectura del nivel del agua del piezómetro.

Este procedimiento se repite hasta que se alcance el nivel final del proyecto, En la Figura 6.7 se ilustra el caso de la sobreelevación en corazón impermeable.

Al final, los brocales de la tubería deben protegerse con un cajón de concreto armado, como se muestra en la Figura 6.5, con su respectiva identificación.

B. Instalación de la tubería por arriba de las terracerías en materiales pétreos

En el caso de que la tubería atraviese material de respaldo, que generalmente es grava-arena o rezaga de roca, ésta se protege con un corral circular de piedra, acomodada a mano, de aproximadamente 2 m de diámetro y de una altura que varía entre 1 m y 1.5 m; el espacio entre la tubería y el corral se rellena con una mezcla de grava y arena, con la misma compactación del material circundante, como se ilustra en las Figuras 6.8a y 6.8b.

C. Instalación de la tubería por debajo de las terracerías

En este caso, las extensiones de las tuberías se colocan después de haber compactado las terracerías del cuerpo principal de la obra. Una vez instalado el bulbo piezométrico en el terreno de cimentación, la tubería de conexión se hace sobresalir al menos 25 cm por encima del nivel de desplante; la protección de esta tubería de PVC consiste en cubrirla con un cilindro metálico de 25 cm de diámetro y 50 cm de altura con su tapa correspondiente; el espesor de la pared del cilindro debe ser al menos de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ in); también se puede proteger la tubería del piezómetro con un cajón de madera fabricado con tablones de 5.08 cm (2 in) de espesor, de 40 cm de lado y de 50 cm de altura, con una ampliación de las aristas de la base de 10 cm al interior y 15 cm al exterior. Sobre y en torno a estas protecciones, por única vez, se coloca un terraplén de arcilla con forma troncocónica de 4 m de base, de 2 m de corona y de 1 m a 1.5 m de altura que se compacta con equipo manual.

En la Figura 6.9 se muestra el detalle del arreglo de la protección de los brocales de la tubería, con el cilindro metálico y el terraplén circundante, y en la Figura 6.10, el cajón de madera como alternativa del uso del cilindro.

En la Figura 6.11, se ilustran las etapas de sobreelevación de las tuberías de PVC en material impermeable, así como los arreglos de tubos galvanizados para absorber la fricción por asentamientos locales. En este caso, una vez que las terracerías alcanzan un altura de 2.5 m desde el nivel de desplante, se realizan las operaciones de relocalización de la tubería y la excavación de una trinchera de 1.5 m \times 1 m que permita encontrar el brocal protegido y acoplar el nuevo tramo de tubería PVC, asociado con el tubo galvanizado de 3.81 cm ($1\frac{1}{2}$ in) o de 5.08 cm (2 in) de diámetro para el arreglo telescópico; posteriormente, se coloca el material excavado con una compactación igual a la de la terracería circundante con equipo manual, hasta una altura por debajo del nivel las terracerías que permite a la tubería de PVC sobresalir una longitud de 45 cm; enseguida, se coloca sobre el brocal de las tuberías la protección de cilindro metálico o caja de madera y se termina el relleno compactado, para alcanzar el nivel de las terracerías. Esta secuencia se sigue hasta alcanzar el nivel final de proyecto, con el correspondiente cajón de concreto armado de protección.

En la Figura 6.11 se ilustra el caso de un terraplén troncocónico de 1.1 m de altura; los tramos de tubería de PVC acoplados, de 1.4 m de longitud; el primer tramo de tubo galvanizado protector es de 1.75 m de longitud y los subsecuentes de 1.6 m para efecto telescópico.

6.1.1.2.3 Instalación en obra terminada

La instalación de los piezómetros después de terminada la obra sigue el mismo procedimiento descrito en el apartado 6.1.1.2.1 instalación en ladera. En ese apartado se explican los procedimientos para la protección de las tuberías de PVC en los casos de atravesar el núcleo impermeable o materiales gruesos como grava-arena y rezaga de enrocamiento.

A. Instalación a través de material impermeable

Una vez localizados los puntos de instalación, se perfora el barreno que alojará el piezómetro con una broca que no requiera agua, que puede ser una broca helicoidal con un diámetro de 15.24 cm (6 in), y una máquina que garantice la verticalidad del barreno. Si se trata de la instalación del piezómetro en el interior de la cimentación, al llegar al nivel de desplante de las terracerías, se usará una broca de diamante para perforar la roca hasta la profundidad de proyecto, y para enfriar la broca durante la perforación se debe inyectar agua a presión, para ello es necesario colocar un ademe metálico desde el inicio de la perforación. Si se trata de instalar el piezómetro en el interior del núcleo impermeable, esta operación se realiza con la broca helicoidal.

La tubería de PVC que atraviesa el núcleo impermeable debe protegerse de la fricción generada por el asentamiento local. Esta protección consiste en una tubería galvanizada telescópica, que se forma alternando tramos de tubería de diámetros de 5.08 cm (2 in) y de 3.81 cm ($1\frac{1}{2}$ in), como el arreglo de tubería que se ilustra en la Figura 6.11. El espacio anular entre tubería galvanizada y núcleo impermeable, se rellena con el producto de la perforación. En la superficie los brocales de la tubería se protegen con un cajón de concreto y tapa metálica galvanizada, como se muestra en la Figura 6.5.

B. Instalación a través de materiales pétreos

Para alcanzar la profundidad de ubicación del bulbo piezométrico en el terreno de cimentación, también se aplica el procedimiento que se describe en el apartado 6.1.1.2.1 y durante la perforación debe usarse ademe metálico para evitar los caídos de las paredes de la perforación.

También, para evitar la fricción del material que rodea al tubo de PVC por el asentamiento local, es conveniente proteger la tubería con el mismo arreglo telescópico de tubería galvanizada, señalado anteriormente. En la Figura 6.12, se ilustra la tubería de conexión protegida al atravesar materiales pétreos. La protección de los brocales de la tubería consiste en una caja de concreto armado y tapa metálica galvanizada, como se muestra en la Figura 6.5.

Después de instalar el bulbo piezométrico y sus tuberías de conexión con la superficie, se registran los datos que precisen las condiciones de instalación, su localización y profundidad, así como la lectura del nivel del agua en el tubo de PVC. En la Figura 6.13 se muestra la ficha de instalación de un piezómetro abierto tipo Casagrande.

6.1.1.3 Funcionamiento

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.

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.

6.1.1.4 Toma de lecturas y cálculo de presiones

La sonda más comúnmente usada es la **sonda eléctrica**, que consiste en un cable de dos conductores eléctricos con una barra cilíndrica pesada de acero inoxidable en su

extremo inferior, y un dispositivo de lectura. El extremo superior del cable se conecta a una batería y a un indicador de luz, una alarma o un amperímetro. 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. Si se usa un cable graduado, se toma la lectura que corresponda en la posición del nivel del brocal; en su defecto, se marca el cable en ese punto y con una cinta métrica se mide la distancia entre este punto y el extremo inferior del cable; en la Figura 6.14, se muestran varios tipos de sonda.

En la Tabla 6.2 (véase anexo A) se ilustra el formato para el registro de las lecturas, el cálculo de la altura de la columna o carga de agua sobre el bulbo y la presión de poro correspondiente. Se registra la siguiente información: identificación del piezómetro, sus coordenadas de localización y las características del instrumento; en la columna (1), la fecha; en la (2), la hora; en la (3), la lectura de la sonda, en metros; en la (4), se presenta el cálculo de la elevación del nivel del agua en el piezómetro, en metros; en la (5) el cálculo de la columna de agua sobre el bulbo piezométrico, en metros; en la (6) se calcula la presión de poro en kilopascales y en la (7) se registra la elevación del nivel del embalse, en metros.

6.1.1.5 Presentación de resultados

Las lecturas y su variación con el tiempo se muestran en la Figura 6.15. En el eje vertical se indica la elevación del nivel del agua, y en el eje horizontal, el tiempo; en el mismo eje vertical también se indica el nivel del embalse de la presa, lo que permite correlacionar los movimientos del embalse y las variaciones de los niveles del agua en los piezómetros; cada curva corresponde a la historia de presiones medidas de un piezómetro específico. En la Figura 6.15 se agregan las secciones de las estaciones en las que muestran las elevaciones de los piezómetros instalados.

6.1.2 Piezómetro neumático

Los piezómetros neumáticos (*pneumatic piezometers*) se usan para medir las variaciones de la presión de poro que se presentan en una masa de suelo; y particularmente son muy útiles cuando se instalan en suelos de baja permeabilidad, ya que tienen la ventaja de responder

con pequeños volúmenes de agua desplazados en el interior de la celda piezométrica; por ello se denominan de respuesta rápida. 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.

6.1.2.1 Descripción

El piezómetro neumático consta principalmente de tres partes: un cilindro metálico (piezómetro) que contiene un diafragma y una piedra porosa, dos mangueras de aire y un dispositivo de medición para inyectar aire a presión. El cilindro metálico, en uno de sus extremos, contiene un disco poroso que protege a un diafragma flexible; en el otro extremo del cilindro se insertan dos ductos o mangueras flexibles de 0.64 cm ($\frac{1}{4}$ in) de diámetro, de las que el extremo de una de ellas está separada del diafragma y se conecta con una fuente de gas con presión y un manómetro; la otra manguera que tiene su extremo en contacto con el diafragma, se conecta a la atmósfera. Por el lado del disco poroso, a la celda metálica se le puede acoplar un tubo de PVC con arena gruesa a media como filtro o un cilindro de cerámica porosa, como se ilustra en la Figura 6.16. El filtro de PVC tiene 5.08 cm (2 in) de diámetro y de 20.32 cm (8 in) de longitud aproximadamente, con perforaciones de 0.32 cm ($\frac{1}{8}$ in) de diámetro o ranuras de 0.16 cm ($\frac{1}{16}$ in) de ancho, que contiene arena limpia bien graduada, de gruesa a media, como filtro. Las versiones actualizadas de piezómetros neumáticos en el mercado, sustituyen el filtro de PVC con un filtro de cerámica porosa. El arreglo de celda metálica y el filtro forman el bulbo piezométrico.

Entre el diafragma y el disco poroso se encuentra un disco metálico perforado ligeramente cóncavo hacia la membrana, esta cavidad permite el desplazamiento del diafragma hacia ella al inyectar presión del exterior y libera la entrada del ducto al exterior.

En la Figura 6.17a se muestra el detalle del arreglo de los componentes del bulbo piezométrico; disco poroso, diafragma, disco de apoyo, filtro y conexiones

de mangueras, y en la Figura 6.17b, la instalación del piezómetro en una perforación.

La medición de la presión de poro se realiza con equipo portátil que incluye la fuente de gas para la activación del diafragma y el manómetro para la lectura de la presión de inyección y la presión de equilibrio.

A continuación se describe brevemente un sistema sencillo para la aplicación de la presión que activa el diafragma. En la Figura 6.18a se muestran los componentes de este sistema: un filtro que recibe el gas presurizado conectado a un regulador de 0 a 150 kPa, que permite controlar los incrementos de la presión de inyección y evitar daños al diafragma; le siguen una válvula de inyección 1, que aplica el gas directamente al piezómetro a través de una manguera de 6.4 cm ($\frac{1}{4}$ in) de diámetro; una válvula micrométrica 2, que conecta al sistema con la atmósfera; una válvula 3 de intercomunicación entre la manguera de inyección y la de retorno y, finalmente, una válvula de paso 4, que conecta una manguera que se introduce en un depósito con agua que funge como indicador de flujo de gas por las burbujas que genera. Entre la manguera de retorno y la válvula 4, se coloca un manómetro con una capacidad de 1500 kPa, como indicador de la presión de inyección y la presión de poro. En la Figura 6.18b se muestra un conjunto de gabinete de activación y lectura del piezómetro y el tanque fuente de gas.

Actualmente, existen en el mercado equipos portátiles más ligeros y compactos para la toma de lecturas de piezómetros neumáticos con el tanque fuente de gas integrado, los cuales contienen aire, nitrógeno o dióxido de carbono. En las Figuras 6.19a y 6.19b se muestran los paneles de control de equipos actuales para medir la presión de poro analógica o digitalmente; en la Figura 6.19c un gabinete compacto para trasladarlo al sitio de medición, y en la Figura 6.19d el panel de control de un equipo con capacidades para la automatización de la toma de datos de presión de poro, y descargarlos en sistemas de cómputo para su procesamiento; algunos de estos equipos incluyen dispositivos para controlar la velocidad de flujo del gas excedente en la tubería de salida. Mayores detalles se encuentran en los manuales de los fabricantes.

6.1.2.2 Instalación

Existen dos formas de instalación de los piezómetros neumáticos que se aplican de acuerdo con las necesidades del proyecto la instalación en barreno y la instalación en sobreelevación.

A. Instalación en barreno o perforación

Este procedimiento de instalación se aplica cuando se requiere de un piezómetro dentro del terreno de cimentación o durante la colocación de las terracerías.

Una vez localizado el punto de instalación del piezómetro, por medios topográficos, el método tradicional consiste en la perforación vertical de un barreno de 10.16 cm (4 in) de diámetro hasta una profundidad de 60 cm por debajo de la elevación del piezómetro especificado en el proyecto. El equipo de perforación debe garantizar la verticalidad del barreno y no deberá utilizarse lodo de perforación; en el caso de desprendimientos, éstos se evitarán introduciendo un ademe metálico recuperable. Previo a la colocación del piezómetro, en el fondo del barreno se vierte arena bien graduada que pasa la malla de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ in) y se retiene en la malla No. 4 (0.476 cm) para formar una capa de 30 cm. Antes de colocar el bulbo piezométrico en su posición, éste se empaca en arena limpia bien graduada de gruesa a media, envuelta con una tela de malla de mosquitero de plástico, como se muestra en la Figura 6.20.

Antes de conectar las mangueras al bulbo piezométrico debe asegurarse que no presenten fugas; para ello se les introduce en un recipiente con agua y se les aplica una presión de 0.2 kg/cm² a 0.5 kg/cm²; además debe garantizarse la suficiente longitud de las mangueras para alcanzar la superficie, aunque al aumentar la longitud de las mangueras el tiempo de respuesta aumenta.

Después de conectar las mangueras y de protegerlas con la tubería de PVC, el piezómetro se introduce en el barreno y se coloca sobre la arena previamente vertida. Enseguida se agrega más gravilla hasta cubrir completamente el bulbo 40 cm sobre la conexión de las mangueras; en el caso de usarse ademe metálico, se debe extraer para que la gravilla se asiente, el espesor se controla con una sonda. Sobre esta capa de arena se coloca el sello que se forma con esferas de bentonita (pellets) de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) a 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ in) de

diámetro para formar una capa de 50 cm; después el barreno se rellena con mortero arena-cemento en proporción 4:1 hasta 1 m sobre el sello, y el resto del barreno se puede rellenar con el material producto de la excavación o con arena, asegurando que el tubo de PVC quede bien confinado con este relleno, y no existan oquedades entre la pared del barreno y el tubo de PVC.

Una vez instalado el piezómetro, se registran los datos de identificación del bulbo, de las mangueras de inyección y retorno, coordenadas y elevación. Cuando se instalan piezómetros con diferentes coordenadas, pero de igual elevación, las mangueras deben distinguirse por diferentes colores y con una etiqueta de identificación.

B. Instalación en el núcleo impermeable

Este procedimiento se aplica cuando es necesario instalar el piezómetro en el núcleo impermeable durante el tendido y compactación de las terracerías.

En este caso, una vez que las terracerías alcancen una elevación de 1 m sobre el nivel de instalación del bulbo piezométrico, se localiza el sitio de perforación del barreno por medios topográficos, de acuerdo con el proyecto. La perforación del barreno se realiza con una broca helicoidal de 15 cm (6 in) de diámetro, sin utilizar agua, hasta una profundidad 40 cm por debajo de la elevación de instalación de proyecto siguiendo las mismas operaciones mencionadas en 6.1.1.2.1. Sobre el sello de bentonita de la zona piezométrica, se rellena el barreno con el material producto de la perforación y se compacta adecuadamente. Por último, se registran los datos de identificación del bulbo en el formato correspondiente. En la Figura 6.21 se muestra el esquema de instalación.

6.1.2.3 Protección de las mangueras

Después de la instalación del bulbo piezométrico, lo relevante es la protección de las mangueras en la etapa de sobreelevación de las terracerías, que se da bajo los siguientes casos:

- Mangueras horizontales
- Mangueras verticales

Con respecto a las **mangueras horizontales**, se cava una zanja horizontal para alojar las mangueras y llevarlas a una galería, registro o caseta de lecturas en el talud aguas

abajo. La zanja para alojar las mangueras y las tuberías de protección deberá tener un ancho de 30 cm y una altura de 40 cm; la protección de las mangueras se hará con tubos galvanizados con un arreglo telescópico con diámetros de acuerdo al número de pares de mangueras que se alojen. La superficie del fondo de la zanja donde se asienta la tubería debe estar libre de irregularidades; se debe asegurar un arreglo claro de identificación de las mangueras con sus correspondientes bulbos piezométricos, y se debe garantizar la suficiente longitud para alcanzar la galería o caseta de control de lecturas.

Una vez asentadas las tuberías en el piso de la zanja, se coloca el mismo material de la excavación compactado con pisón de mano hasta cubrir las tuberías; posteriormente, el relleno se compacta con pisón neumático hasta el nivel de las terracerías. Enseguida, sobre la superficie de la zanja, se coloca un terraplén de 80 cm en la corona, 1 m de altura y taludes 1:1, con el material de las terracerías, compactado con pisón neumático y con el mismo grado de compactación de las terracerías; en la Figura 6.22 se muestra el arreglo de protección de las tuberías. Después de la colocación del terraplén, se continúa con la colocación de los materiales de la obra.

Con relación a las **mangueras verticales**, la protección de las mangueras durante la sobreelevación de las terracerías se realiza mediante extensiones verticales de tubería, lo que permite llevarlas a la superficie a través del núcleo impermeable, para lo cual es necesario protegerlas con tubería de fierro galvanizado con un arreglo telescópico de manera que absorban la fricción por asentamientos locales.

Por cada par de mangueras de un bulbo, es suficiente alternar tubos galvanizados de 5.08 cm (2 in) y de 3.82 cm (1.5 in) de diámetro, en tramos de 1.5 m de longitud. En el caso de alojar a más de un par de mangueras, se debe seleccionar el diámetro de los tubos galvanizados de manera que las mangueras queden suficientemente holgadas. Al respecto, existen dos opciones en la sobreelevación de las tuberías:

- Protección por arriba de las terracerías
- Protección por debajo de las terracerías

A. Protección por arriba de las terracerías

Cuando se extienden las tuberías en arcillas por arriba del avance de la colocación y compactación de las

terracerías, en torno a la tubería extendida se forma un terraplén troncocónico, también de arcilla, con 1 m de diámetro en la parte superior y tres metros en la base, con talud 1:1 y una compactación con equipo neumático, igual a la del material circundante; este terraplén formará una protección contra el paso del equipo pesado de compactación y así evitar daños a la tubería. En la Figura 6.23 se muestra esta forma de protección.

En el caso de que las tuberías atraviesen materiales pétreos, enrocamiento o rezaga, se formará un corral circular de piedra colocada a mano, de 2 m de diámetro y de 1 m a 1.5 m de altura; el espacio entre el corral y la tubería se rellena con material de rezaga, compactada con equipo manual. En las Figuras 6.8a y 6.8b, se muestra el corral de protección, aplicable en este caso. En esta forma de protección, las tuberías deben sobresalir de las terracerías al menos 1 m.

B. Protección por debajo de las terracerías

Los extremos superiores de las tuberías del piezómetro neumático por debajo del nivel de las terracerías se protegen con una caja metálica o madera de 50 cm de altura y de 50 cm x 50 cm en la base, con los espesores de sus paredes, como se indica en la Figura 6.9, con suficiente espacio entre el techo de la protección y los extremos de la tubería (brocales) para no dañar las mangueras del piezómetro; sobre la caja se coloca un terraplén troncocónico similar al que se usa para el caso de protección de los extremos de la tubería de los piezómetros abiertos. Posterior a la sobreelevación de las terracerías, se relocaliza topográficamente el sitio de instalación y se excava para descubrir los brocales de la tubería y acoplar las extensiones de tuberías galvanizadas de protección de las mangueras hasta 40 cm por debajo de la elevación actual de las terracerías. Este procedimiento se repite hasta alcanzar la superficie, con un arreglo final funcional para la toma de lecturas, protegidas con una caja de concreto armado, tapa metálica y candado. En la Figura 6.23 se ilustra el procedimiento de sobreelevación, con tramos de tubería de protección de 1.6 m de longitud y traslapes de 20 cm entre los diámetros de 2.54 cm (1 in) y de 3.81 cm (1.5 in) para los efectos telescópicos; el espacio entre techo y brocales es de 10 cm. En la Figura 6.24,

se muestra el registro de concreto armado y el arreglo de las terminales de las mangueras en un tablero de lecturas.

Cuando se instala una serie o batería de piezómetros a la misma elevación o diferentes elevaciones, las mangueras se colocan en una sola tubería de protección con diámetro suficiente para alojar holgadamente el conjunto de mangueras. Los arreglos de las tuberías de cada piezómetro y sus conexiones al tubo colector principal, para la batería horizontal y la batería vertical de piezómetros, se muestran en las Figuras 6.25 y 6.26, respectivamente. Siempre deben evitarse conexiones en ángulos de 90°.

Después de instalar el bulbo piezométrico y sus tuberías de conexión con la superficie, se registran los datos que precisen las condiciones de su instalación, su localización y profundidad, así como el registro de la lectura inicial, utilizando el formato que se muestra en la Figura 6.13.

6.1.2.4 Funcionamiento y verificación

La única parte en movimiento del piezómetro neumático es el diafragma flexible que se encuentra en contacto directo con el agua subterránea después del filtro; la presión de poro actúa sobre uno de los lados del diafragma, y la presión del gas inyectado desde el exterior, sobre el lado opuesto. Para obtener el valor de la presión de poro, por el ducto de entrada se inyecta gas a presión a través de una manguera conectada a un indicador de una fuente presurizada. La presión de inyección se incrementa hasta exceder la presión de poro; este exceso de presión desplaza el diafragma hacia el filtro (disco poroso), lo cual libera la entrada del tubo de ventilación o salida, y expulsa el exceso de presión inyectada. Al detectarse el flujo de gas de regreso, se cierra la válvula de inyección; el gas continúa saliendo y la presión de inyección actuante sobre el diafragma disminuye hasta que la presión de poro cierra la entrada del tubo de ventilación y el gas deja de escapar. En ese momento se alcanza el equilibrio entre la presión del gas del interior y la presión de poro, cuyo valor lo indica el manómetro como lectura de la presión de poro de la zona piezométrica. En la Figura 6.27 se muestra el esquema del funcionamiento del diafragma ante las presiones de poro y de inyección.

Es muy importante comparar la lectura registrada en campo con la gráfica de calibración del piezómetro.

Antes de la instalación el piezómetro debe verificarse mediante un sistema que permite comparar la presión aplicada al diafragma con la presión de equilibrio, inyectada desde el panel de medición.

El sistema de verificación es relativamente sencillo, consiste en un cilindro metálico hermético, de diámetro mayor que la del bulbo piezométrico, con una tapa con sello hermético, perforada en uno de sus extremos que permite la salida de las conexiones de las mangueras de inyección y de retorno del piezómetro; lateralmente cuenta con dos conexiones, una para la manguera que aplica la presión confinante y la restante para la manguera que lo conectó a un manómetro para verificación. En la Figura 6.28, se muestran los componentes del sistema para la verificación.

En el proceso de verificación, el piezómetro se confina en el recipiente hermético para someterlo a presión y descompresión por varios ciclos hasta que las lecturas de la presión aplicada sean proporcionales a las lecturas registradas en el manómetro del panel de medición. Previamente a la aplicación de la serie de compresión y descompresión, desde el panel de control, se aplica una presión de inyección de 25 kPa para provocar un flujo de agua que elimine las burbujas. En una primera serie de pruebas de compresión y descompresión, la presión confinante alcanza un valor máximo de 200 kPa, con la aplicación de incrementos de 25 kPa y decrementos de igual magnitud. Esta operación se repite al menos tres veces. Para verificar fugas se aplica de nuevo la máxima presión de 200 kPa y se mantiene durante una hora; en ese lapso se deben observar las variaciones de la presión confinante en los manómetros del panel de control. Posteriormente, se aplica una presión en el rango de 200 kPa a 800 kPa, con incrementos de 50 kPa y decrementos de la misma magnitud. También se repite al menos tres veces y se verifica la hermeticidad a la máxima presión. De cada una de las series de compresiones y descompresiones se deben registrar los valores indicados por el manómetro conectado a la presión confinante y por el manómetro conectado a la manguera con la presión de salida del piezómetro, instalados en el panel de control. Con estos valores se obtiene una gráfica de verificación; en uno de sus ejes se

indican los valores de la presión confinante y en el otro la presión de salida del piezómetro.

En la Figura 6.29 se muestra el diagrama del sistema de verificación del piezómetro neumático y la gráfica correspondiente. Es muy importante que el equipo utilizado en la verificación de los piezómetros, se aplique en la lectura de los piezómetros en campo.

En la gráfica de verificación, generalmente se observa una línea recta con una inclinación muy cercana a los 45° con respecto a los ejes coordenados, como se ilustra en la Figura 6.29. Cada bulbo piezométrico debe tener su correspondiente gráfica de verificación.

6.1.2.5 Toma de lecturas y cálculo

En la Figura 6.18a se muestra un diagrama elemental con las válvulas que controlan la inyección de activación del diafragma y el confinamiento de la presión de equilibrio para la medición de la presión de poro. La Figura 6.18b ilustra un gabinete portátil para la toma de lecturas de presión de poro.

A continuación se describe la operación de las válvulas, previa identificación de las mangueras de inyección de presión y de retorno (Figura 6.18a).

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

Antes de accionar el regulador de gas, las válvulas deben estar en las siguientes posiciones: la válvula de inyección 1, cerrada; la válvula micrométrica a la atmósfera 2, cerrada; la válvula 3, abierta, y la válvula al indicador de flujo 4, abierta.

Con las cuatro válvulas en las posiciones indicadas, se abre el regulador para activar el diafragma del piezómetro con un primer incremento de 25 kPa; enseguida se abre la válvula 1, y momentos después de iniciado el flujo de gas se cierra la válvula 3 para inyectar en forma directa la presión al piezómetro; se continúa con estos incrementos hasta activar el diafragma y permitir el paso del gas a la manguera de salida, manifestado por el burbujeo del agua en el depósito indicador de flujo; enseguida se cierra la válvula 4 y se toma la lectura del manómetro, que indica la presión de activación; después se cierra la válvula de inyección 1 y enseguida se abre

la válvula 2, de alivio, condiciones para generar el flujo del gas en dirección inversa hasta que la presión del gas iguala a la presión de poro y se cierra el diafragma; la presión que queda atrapada en la manguera de retorno es la presión que equilibra la presión de poro y se mide con el manómetro. En el caso de no existir presión de poro, el valor indicado por el manómetro es cero.

La operación de la medición de la presión de poro se repite al menos tres veces, y cuando existan diferencias en las lecturas, se deben tomar lecturas adicionales.

Las lecturas de la presión de poro del piezómetro en cuestión se registran en un formato especial como el que se muestra en la Tabla 6.3 (ver Anexo A). En la columna 1 y 2 se registran la fecha y hora respectivamente; en las columnas 3, 4 y 5, las lecturas de presión, repetidas al menos tres veces; en la columna 6 se anota el valor promedio de las presiones leídas, y en la columna 7 se registran los niveles del embalse.

6.1.2.6 Presentación de resultados

Generalmente los resultados se presentan en forma gráfica en el eje vertical de la gráfica se indican los valores de las lecturas, y en el eje horizontal, se indican los tiempos correspondientes a las lecturas. En el mismo eje vertical también se indican los valores de las variaciones de la altura del embalse, lo que permite visualizar la relación que tiene con las gráficas de los piezómetros. En el caso de representar las historias de las lecturas de varios piezómetros, es conveniente usar símbolos distintos para identificarlos. En la Figura 6.30, se muestra una gráfica con la evolución de las lecturas de piezómetros neumáticos. Cuando se toman lecturas durante la construcción del terraplén, es importante indicar el avance de la construcción para correlacionarlo con el aumento o disminución de la presión total.

6.1.3 Piezómetro eléctrico

El principio de operación de un piezómetro eléctrico (*electric piezometer*) 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. La deflexión es proporcional a la presión aplicada y se mide por medio de diversos sensores o transductores

eléctricos. Los sensores convierten la presión de agua en una señal eléctrica que se transmite mediante un cable hasta el sitio de medición. Los piezómetros eléctricos se pueden emplear en los mismos casos en los que se utilizan piezómetros abiertos tipo Casagrande, así como, en pozos de observación, e incluso para registrar el nivel de agua en canales vertedores de galerías de filtración o para conocer el nivel de agua de un río o de un embalse.

6.1.3.1 Tipos de sensores

Las principales tecnologías empleadas en la fabricación de estos instrumentos consisten en sensores piezorresistivos (*strain gauge piezometer*) y de cuerda vibrante (*vibrating wire*). Recientemente, se han desarrollado sensores de fibra óptica (*fiber optic pore pressure sensor*).

6.1.3.1.1 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).

6.1.3.1.2 Sensor de cuerda vibrante

En la Figura 6.31 se muestra esquemáticamente un piezómetro eléctrico de cuerda vibrante (PCV). Un cambio en la presión de poro induce una deflexión del diafragma y, en consecuencia, un cambio en la tensión

de la cuerda. La tensión en la cuerda se mide haciéndola vibrar para conocer su frecuencia natural de vibración. La vibración se produce mediante un pulso de voltaje a través de la bobina colocada junto a la cuerda. La frecuencia de vibración de la cuerda es idéntica a la frecuencia de voltaje de salida, que se trasmite a lo largo del cable eléctrico hasta el dispositivo que mide dicha frecuencia. La frecuencia de vibración de la cuerda varía en función de su tensión y ésta varía en función de la presión de agua.

La señal que se transmite por el cable no se distorsiona con la longitud de éste, por tanto, se puede modificar la longitud del cable (cortar o añadir, hasta 1000 m) sin afectar la medición. Sin embargo, la precisión del sensor de cuerda vibrante disminuye para rangos de medición pequeños, y requiere corrección por temperatura. El sensor de cuerda vibrante no es apto para mediciones continuas o dinámicas. La Figura 6.32 muestra una variedad de piezómetros de cuerda vibrante (PCV).

En algunos diseños de PCV, se usan dos bobinas colocadas cerca de la cuerda: una de ellas hace vibrar la cuerda y la otra capta y transforma la frecuencia de vibración en corriente alterna que se registra en la unidad de lectura; también incluyen una resistencia sensible a la temperatura como termómetro, llamada termistor, para compensar los efectos de la temperatura, así como una protección contra alteraciones súbitas de cargas eléctricas. En la Figura 6.33 se muestra un corte longitudinal de la cápsula metálica y los componentes internos de un piezómetro de cuerda vibrante.

Comercialmente se disponen de PCV para medir presiones de poro en el rango de 0 a 4000 kPa; con diámetros que varían entre 28 mm y 35 mm, longitudes de 200 mm y 260 mm, y con un peso de 0.5 kg a 1 kg.

6.1.3.1.3 Sensor de fibra óptica

La Figura 6.34 muestra un sensor de fibra óptica (*fiber optic piezometer*). Esta clase de sensores se diseñan para medir la presión que ejerce el agua a una membrana sin contacto directo, y registran las deformaciones de un elemento mecánico óptico en miniatura (MOMs, por sus siglas en inglés).

Las dimensiones del sensor son muy pequeñas (5 mm), por lo que facilita su instalación en tuberías delgadas. Es inmune a interferencias magnéticas, señales de radio

y a descargas eléctricas. Tiene una alta resolución y estabilidad, así como baja influencia de cambios térmicos. Los costos de esta tecnología son más elevados que los anteriormente descritos, particularmente el cable y el equipo de medición. Se requiere de personal calificado para su instalación.

6.1.3.2 Tipos de filtros

El cuerpo cilíndrico metálico de todos los piezómetros de diafragma, incluyendo los piezómetros eléctricos, tiene una cámara limitada por el diafragma sensor y un filtro que tiene contacto directo con el suelo; el lado opuesto del diafragma contiene el dispositivo transductor. El filtro es un disco poroso que separa el fluido del poro de la estructura del suelo y evita el paso de las partículas sólidas a la cámara y al diafragma sensor. El filtro puede ser de cerámica o de acero inoxidable poroso (sinterizado).

Los filtros se clasifican en dos categorías; filtros de alta entrada de aire, y filtros de baja entrada de aire. Los piezómetros instalados en suelos saturados deben tener filtros de baja entrada de aire con poros de 60 micrones de abertura, y para suelos parcialmente saturados o donde se tenga presión de poro negativa, se les colocan filtros de alta entrada de aire con poros de 1 micrón de abertura. En la Figura 6.35, se muestra un piezómetro de cuerda vibrante con su filtro.

Para los mismos efectos el piezómetro de fibra óptica también dispone de un filtro en su extremo en contacto con el suelo.

Es importante realizar la saturación de los filtros siguiendo las instrucciones del fabricante, descritas en el manual de cada instrumento. Durante este proceso no debe dañarse la membrana del sensor debido a la aplicación de presiones superiores a su rango.

6.1.3.3 Unidad de lectura

Existe una diversidad de equipos portátiles de lectura (*readout*). También se pueden instalar adquirentes (*data loggers*) que permiten automatizar la medición y respaldar la información.

Se recomienda evaluar la relación costo-beneficio en cada proyecto para determinar el tipo de equipo

que se empleará. La automatización de piezómetros es redituable, particularmente en situaciones como las siguientes: el programa de mediciones es intensivo, el sitio es remoto o inaccesible, el costo de la mano de obra es elevado, en situaciones de riesgo que requieran un monitoreo en tiempo real, o en el caso de necesitar alertas automáticas, cuando ciertos niveles de presión (definidos por el usuario) se exceden.

Consideraciones de la presión barométrica

En algunos sitios los cambios en la presión barométrica son pequeños, excepto cuando se presentan tormentas, en tanto que en otros sitios los cambios pueden ser mayores a 30 milibares, lo cual afecta las lecturas donde se requiere mayor precisión, por ejemplo, en canales vertederos o pozos de observación. En estos casos puede emplearse cualesquiera de las siguientes técnicas:

- Corrección por presión atmosférica: se coloca un sensor adicional (barómetro) y se realiza la corrección de la lectura piezométrica de acuerdo al cambio en la presión barométrica registrada.
- Utilizar un cable venteado: se tiene una pequeña manguera en su interior para igualar la presión atmosférica dentro del sensor y obtener lecturas totales. Es muy importante contar con filtros adecuados y cambiarlos constantemente para evitar que la humedad se introduzca al sensor y lo dañe.

Si el piezómetro se encuentra instalado dentro de un barreno sellado en una cámara piezométrica para medir la presión de poro, entonces la única presión que actuará en la membrana del sensor será la presión del agua a esa profundidad, por lo que no es necesario aplicar una corrección barométrica.

6.1.3.4 Instalación

A continuación se describen las operaciones de instalación del piezómetro de cuerda vibrante (PCV), similares para todos los piezómetros de diafragma (de respuesta rápida), incluyendo el piezómetro de fibra óptica.

6.1.3.4.1 Lectura base

Antes de instalar el PCV en su sitio, se debe determinar la lectura cero, lectura inicial o lectura base. Los fabricantes enfatizan la importancia de obtener la lectura base de cada piezómetro en el ambiente local, antes de su instalación en el subsuelo; este dato está indicado en el certificado de calibración y es la lectura del piezómetro a la presión atmosférica en las condiciones del laboratorio del fabricante. La determinación de esta lectura base consiste en tomar una serie de lecturas del piezómetro conectándolo a la unidad de excitación y lectura, hasta que se obtengan valores iguales repetidos; esta operación debe realizarse en condiciones de temperaturas ambientales constantes, bajo la sombra, ya que las temperaturas extremas y los gradientes de temperatura en el cuerpo del piezómetro pueden producir lecturas erróneas.

El piezómetro de cuerda vibrante se diferencia de otros tipos de sensores de presión en que siempre indican una lectura no nula con presión cero, que se toma como lectura inicial o lectura base. Por tanto, es indispensable determinar con exactitud tal valor inicial para cada piezómetro, ya que esta lectura se usa en el procedimiento de todos los datos subsecuentes.

La determinación de la lectura inicial o cero en condiciones de campo es una prueba de aceptación y una verificación de que el piezómetro trabaja apropiadamente; es aceptable una diferencia entre las lecturas de campo y la lectura inicial indicada en el certificado de calibración. Las diferencias de gran magnitud pueden indicar fallas en el sensor o daños en el cable.

Existen diferentes formas para determinar la lectura inicial, y lo esencial en todas ellas es la estabilización térmica del piezómetro en un ambiente de temperatura constante y registrar la presión barométrica correspondiente.

6.1.3.4.2 Determinación de la lectura inicial o lectura base

En un depósito con capacidad de 8 litros, se vierte agua potable, limpia, y a la temperatura ambiente (lo ideal es tener la temperatura del agua subterránea). Esta labor se realiza a la sombra y lejos de cualquier fuente de calor, debe agitarse el agua con frecuencia para homogeneizar

la temperatura. En la Figura 6.36 se ilustran las condiciones de operación con el piezómetro durante la determinación de las lecturas iniciales o base.

Con el transductor sumergido en agua, se quita con cuidado el filtro, girando y jalando la cubierta que contiene el filtro y se dejan sumergidos.

Se conectan los cables eléctricos del piezómetro a la unidad de lectura para monitorear la lectura del piezómetro; después de 10 o 20 lecturas, se apaga la unidad de lectura y se desconecta el cable eléctrico, para evitar el calentamiento de la cuerda vibrante. Se deja sumergido el transductor durante 30 o 60 minutos y después se conecta el piezómetro y se toman las lecturas hasta que no cambien en un lapso de 2 a 5 minutos.

Se apaga la unidad de lectura y se levanta el piezómetro del cable para que adopte una posición vertical, con el filtro hacia abajo y fuera del depósito de agua; inmediatamente se toman dos o tres lecturas y se coloca de nuevo el transductor en el agua, un minuto después se registra otra serie de lecturas. Se repite tres veces esta serie de pasos y se verifica que las lecturas desplegadas se encuentren en el rango de 0.5 dígitos una de otra; para cada lectura se anota la fecha y la hora.

Nuevamente se sumerge el transductor en agua con su extremo libre (la punta) hacia arriba; se obtiene y se registra la presión barométrica (atmosférica) para usos posteriores; también se puede utilizar el dato de una estación meteorológica local.

Se toma el filtro sumergido en el depósito con agua y se coloca en el piezómetro, y se verifica que la cámara entre el filtro y el diafragma donde se aloja el filtro esté llena de agua.

Se debe tener precaución con los filtros de alta resistencia a la entrada del aire, y disipar la presión del agua a través del filtro aplicándole una ligera presión con los pulgares para expulsar el agua.

Se conserva el piezómetro en agua hasta su instalación o se repite el procedimiento descrito antes de su instalación, el cual se ilustra en la Figura 6.37.

6.1.3.4.3 Instalación en barreno

Actualmente se tienen dos procedimientos: el primero es la **técnica tradicional** descrita en la instalación de los piezómetros abiertos, que consiste en la creación de una cámara o zona piezométrica permeable con arena limpia, en cuyo centro se localiza el piezómetro; esta zona se

sella en su parte superior con un tapón de bentonita, la longitud restante del barreno hacia la superficie se rellena con mortero o con material producto de la perforación. El segundo procedimiento, desarrollado recientemente, y que está fundamentado de manera experimental y en varios casos de la práctica de la instrumentación geotécnica (véase Referencias), consiste en colocar el piezómetro a la profundidad de proyecto y luego rellenar totalmente el barreno con una lechada de cemento-bentonita (*fully grouted method*) con una rigidez similar a la del material circundante; con este segundo procedimiento es posible instalar en el mismo barreno más de un piezómetro en diferentes niveles; incluso, en los barrenos para tubería de inclinómetro pueden instalarse piezómetros que se asocien a los niveles en los que se miden desplazamientos.

Para el segundo caso, es importante diseñar la dosificación adecuada de la lechada que permita un comportamiento similar al medio donde se instala, es decir, con mayor rigidez en roca y más plástica en suelos blandos (Tabla 6.4).

En caso necesario, puede agregarse a la lechada algunos aditivos que disminuyan la reducción de volumen al momento del fraguado y con ello evitar la comunicación de diferentes sensores instalados en un mismo barreno en roca. Se pueden agregar aditivos plastificantes que facilitan la colocación a gravedad cuando se tienen diámetros reducidos de tubería.

A continuación, se describe con detalle los dos procedimientos.

A. Procedimiento tradicional

Este procedimiento consiste en efectuar una perforación de 10 cm (4 in) de diámetro, se debe colocar un ademe metálico para sostener las paredes de la perforación. La profundidad del barreno será de 30 cm debajo de la elevación de la punta del piezómetro. Si el piezómetro se instala para medir la presión de poro en una capa específica del subsuelo, será necesario hincar el ademe 90 cm bajo la elevación del piezómetro para colocar un sello de bentonita en el fondo del barreno.

Después de hincar el ademe, debe extraerse todo el azolve producto de la perforación y lavarse el barreno hasta que brote agua limpia por el brocal. Para formar el sello de fondo, se coloca una capa de 30 cm con

esferas de bentonita (*pellets*); este sello se coloca en capas de 15 cm previo izado del ademe cada vez, hasta completar el espesor del sello. Debe tenerse cuidado de que no se adhieran los pellets de bentonita en la pared interna del ademe y no formen un tapón; también asegurar que la bentonita se coloque por debajo del extremo del ademe, que se consigue al dejar caer las esferas de bentonita en pocas cantidades cada vez y en fila; también se puede bajar una masa cilíndrica de diámetro ligeramente menor al diámetro del ademe para asegurar la limpieza de la perforación y la posición del sello de bentonita en el fondo del barreno. No se requiere de la compactación de la bentonita, ya que ésta se expande con la humedad del fondo del barreno. La Figura 6.38 muestra la forma de vaciado de la bentonita y la arena para formar la zona piezométrica y los sellos de bentonita.

Enseguida y sobre el fondo de bentonita se colocan capas de arena limpia de 15 cm de espesor, con el previo izado del ademe cada vez que se agrega una capa, hasta alcanzar un espesor de 60 cm. Después se hace descender el piezómetro (sostenido por su propio cable), con el filtro hacia arriba hasta que toque la superficie de la arena vertida; en esta posición se conecta el cable eléctrico a la unidad o gabinete de activación y lectura para tomar una serie de lecturas del piezómetro, que se registran hasta que establezca la temperatura, como datos iniciales o lecturas cero.

Nuevamente se vierte arena limpia en capas de 15 cm, izando el ademe cada vez que se agrega una capa como ya se mencionó, hasta formar una capa de 60 cm de espesor, capa que debe cubrir el piezómetro 30 cm sobre su extremo superior; de nuevo se toma la lectura del piezómetro y su temperatura de la manera mencionada. Enseguida se forma el sello superior de bentonita izando el ademe en incrementos de 15 cm y dejando caer esferas de bentonita hasta formar una capa de 120 cm de espesor como mínimo. De esta manera se define una zona piezométrica de 90 cm de altura, sellada por dos capas de bentonita: una en el fondo, de 30 cm de espesor, y otra en su extremo superior, de 120 cm de espesor.

Se deben verificar continuamente los niveles de las capas de bentonita y de arena con una cinta graduada lastrada en su extremo inferior. En la Figura 6.39, se

ilustra la forma de verificación de los espesores de las capas de sello y de arena, y la colocación del mortero para rellenar completamente el barreno.

Durante la extracción del ademe para el vaciado de los materiales que forman la cámara piezométrica, el cable del piezómetro debe mantenerse suficientemente suelto para que el piezómetro no se mueva de su nivel,

Finalmente, se extraen los tramos del ademe, sin girarlos, conforme se rellena el resto del barreno con un mortero de cemento-bentonita o arena-bentonita, y asegurarse de no dañar el cable.

En la Figura 6.40, se muestra el perfil y espesores de las capas de bentonita y arena que forman la cámara de presión de un PCV instalado en un barreno.

Después de instalado el piezómetro, es muy importante tomar nuevamente una serie de lecturas para verificar su funcionamiento y la lectura base, debido a que las operaciones de instalación pueden desequilibrarlo. Se registra una serie de lecturas hasta que se restablezcan los datos iniciales; sólo entonces se puede considerar que las lecturas del piezómetro registradas en el sitio son verdaderas.

El extremo del cable de señal debe protegerse contra daños del tráfico y de la intemperie; es conveniente protegerlo con un registro de concreto armado, su tapa asegurada, y una etiqueta de identificación (Figura 6.41).

Para instalar un segundo piezómetro en el mismo barreno sobre el sello de bentonita superior del piezómetro ya instalado, se coloca una capa de mortero cemento-bentonita de 120 cm que sella el piezómetro inferior. Sobre este relleno se coloca una segunda capa de este material de igual espesor, 120 cm; después se coloca un sello de bentonita de 90 cm de espesor y una capa de arena de 60 cm de espesor sobre la que se asienta el segundo piezómetro, para continuar sobre el extremo superior del piezómetro con el relleno de arena limpia y de sello de bentonita, similares a los del piezómetro inferior, para terminar con el relleno del barreno con mortero cemento-bentonita. Se deben tomar lecturas del piezómetro y su temperatura en el momento de colocarlo sobre la arena y al cubrirlo totalmente con la arena limpia. En la Figura 6.42 se muestra el perfil de la instalación de dos piezómetros, sostenidos por sus respectivos cables, con diferentes elevaciones, con sus

correspondientes cámaras piezométricas; en caso necesario se puede instalar de esta manera un tercer piezómetro.

B. Barreno completamente lleno de mortero cemento-bentonita

Es un método relativamente nuevo (*fully grouted method*) que consiste en colocar el piezómetro dentro de un barreno, a la profundidad de proyecto y rellenar el barreno con un mortero de cemento-bentonita con las proporciones tales que al fraguar adquiera una rigidez similar al suelo en el que se instala el piezómetro. Este método se describe a continuación:

1. Realice una perforación de 14 cm de diámetro.
2. Utilice lodos estabilizadores o ademe metálico, para estabilizar las paredes del barreno.
3. Utilice un tubo de PVC de 2.54 cm (1 in) de diámetro como tubo inyector de lechada.
4. Tienda el tubo inyector en el terreno para facilitar las maniobras de ensamblado.
5. Sature el extremo del sensor que contiene el filtro (siga las instrucciones del fabricante).
6. Coloque el sensor con el filtro hacia arriba y átelo al tubo de inyección, en la posición que corresponda al proyecto.
7. Ate el cable eléctrico del sensor al tubo de inyección, procure dejar poco tenso el cable.
8. Introduzca y haga descender el tubo inyector hasta que el sensor quede en la profundidad de proyecto.
9. Conecte el cable del sensor al dispositivo de lectura
10. Tome una lectura inicial.
11. Utilice el tubo de PVC para inyectar la lechada dentro del barreno (método Tremie).
12. Si utilizó ademe metálico, extraiga lentamente dicho ademe a medida que va introduciendo la lechada.
13. Tome las lecturas al terminar la inyección.

En la Figura 6.43 se muestran los perfiles de barreno relleno totalmente de mortero cemento-bentonita para los casos de uno y tres piezómetros.

Las lecturas del piezómetro realizadas inmediatamente después de la instalación son altas con respecto a la lectura inicial o lectura base y van disminuyendo conforme el mortero está fraguando; una vez que el mortero ha fraguado, se considera que el tiempo de

Tabla 6.4 Proporciones de mezclas cemento-bentonita y sus resistencias a los 28 días (Mikkelsen, 2003)

Materiales	Mortero para suelos de duros a rígidos		Mortero para suelos blandos	
	Peso	Relación en peso	Peso	Relación en peso
Agua	108	2.5	287	6.6
Cemento Portland	43	1	43	1
Bentonita	13	0.3	18	0.4
Nota	La resistencia de esta mezcla a 28 días es de 50 psi (34.52 kPa), similar a una arcilla de rígida a muy rígida		La resistencia de esta mezcla a 28 días es de 4 psi (2.76 kPa), similar a la de una arcilla muy blanda	

retraso para que el piezómetro dé la lectura base, debido al mortero mismo, es de unos minutos.

Cuando se requiere asociar las mediciones efectuadas con un piezómetro con las mediciones de un inclinómetro, a una misma elevación, se utiliza la tubería guía del inclinómetro para atar, en la superficie externa con cinta adhesiva de plástico reforzado, el piezómetro y su cable eléctrico.

En la Figura 6.44 se ilustra el caso de piezómetros instalados en barrenos acoplados a una tubería de PVC de 1.91 cm (3/4 in) de diámetro, que al mismo tiempo sirve como ducto para vaciar el mortero desde el fondo a la superficie.

Preparación del mortero de cemento-bentonita. La mezcla del mortero de cemento-bentonita se prepara de manera tal que tenga características de resistencia y deformación aproximadas al suelo circundante. La resistencia del mortero se ajusta controlando el contenido de cemento. En la Tabla 6.4 se indican las proporciones de agua, cemento y bentonita para dos tipos de suelo. En la preparación de la mezcla se debe mezclar primero el cemento con el agua y después agregar la bentonita, cuya cantidad se ajusta hasta producir una mezcla que pueda bombearse, identificada por una consistencia espesa color crema. Si la mezcla es poco espesa, los sólidos tienden a separarse del agua; si es muy espesa, se presentan dificultades en el bombeo. En la Figura 6.45 se muestra la preparación de la mezcla. Para mayores detalles consulte las referencias y el manual del fabricante.

6.1.3.4.4 Procedimiento de hincado a presión

Existen modelos de piezómetros de cuerda vibrante, diseñados para hincarse en suelos finos no consolidados como las arcillas, limos o arenas finas. Se trata de un piezómetro robusto de pared gruesa con una zapata de hincado similar a la utilizada en la prueba de penetración de cono (CPT), para hacerlo penetrar a presión. Puede aplicarse en estratos naturales de suelo blando o en presas de tierra y enrocamiento ya construidas. En su instalación por hincado debe tenerse cuidado en no torcer el cable de señal y no dañar el piezómetro por presión excesiva durante su hincado.

En la Figura 6.46 se muestra este tipo especial de piezómetro.

El piezómetro de CV está diseñado para hincarse superficialmente, sin embargo, se puede hincar a mayor profundidad mediante una perforación auxiliar; en cualquier caso se requiere de una torre de perforación. El piezómetro tiene en su extremo superior una cuerda especial para un adaptador tipo niple que por abajo soporta al piezómetro y por arriba se le acoplan las barras metálicas necesarias para bajarlo al fondo de la perforación desde donde se presiona a su sitio de instalación. Los fabricantes de este tipo de instrumentos ofrecen los adaptadores para acoplarlos a barras metálicas para rea-lizar el hincado. En la Figura 6.47 se muestra un adaptador con una barra de transición entre la primera barra metálica de hincado y el adaptador. Deben consultarse los manuales de operación de los fabricantes para mayores detalles.

La perforación se realiza con una barrena helicoidal o con una broca, y en caso necesario se debe usar ademe o lodo de perforación biodegradable; la limpieza se realiza con agua a presión o con el mismo lodo de perforación biodegradable.

Para cada piezómetro instalado debe elaborarse una ficha de Instalación, como la que se muestra en la Figura 6.13

A. Instalación de un PCV en zanjas y cavidades superficiales

Este procedimiento de instalación de un PCV se realiza durante la construcción de los terraplenes; el piezómetro instalado proporciona información de los efectos del proceso de colocación del relleno.

En ocasiones, particularmente donde la saturación del sitio de instalación ocurre después de un largo tiempo, el piezómetro se coloca en posición inclinada con la punta y filtro hacia arriba; esta posición disminuye la posibilidad de que el aire quede atrapado alrededor del diafragma cuando se presente la saturación.

Con los arreglos mencionados, el piezómetro se aloja en una cavidad excavada en el extremo de la zanja y se cubre con el mismo material excavado y compactado manualmente con densidad similar a la del material circundante.

En los materiales arcillosos o de baja permeabilidad, los piezómetros se pueden colocar en contacto directo con el suelo, no se requiere de cámaras especiales de arena, ya que pueden reducir el tiempo de respuesta y atrapar aire, lo que provoca lecturas menores de las reales.

B. Instalación en materiales permeables

Una vez trazada la ruta del cable eléctrico desde el sitio específico de colocación del piezómetro hasta la estación de lectura, se excava una zanja de 20 cm de profundidad y de 30 cm de ancho, con taludes laterales de inclinación 1:1. En el sitio de colocación del piezómetro, se excava una cavidad de 30 cm de lado, 10 cm de profundidad mayor que la del fondo de la zanja, y se verifica la elevación del fondo del barreno para asegurarse que el diafragma del piezómetro quede a la elevación indicada por el proyecto.

En la Figura 6.48, se muestra la geometría y las dimensiones de la zanja en la que se aloja el cable y la cavidad en la que se instala el piezómetro.

Con el propósito de conservar la saturación del filtro, el piezómetro se coloca en una posición inclinada sobre una pared del pozo y con la punta hacia arriba, Figura 6.48a, o con la punta introducida en un depósito con arena saturada, Figura 6.48b.

Si la excavación se hace en material granular que pueda dañar el cable, se debe colocar una membrana geotextil que cubra la base y las paredes de la zanja y se colocan 10 cm de arena cribada sobre la base tanto de la trinchera como del pozo. Antes de colocar el piezómetro en su sitio se verifica el funcionamiento y la lectura inicial del piezómetro, con una unidad de lectura portátil.

Se tiende el cable del piezómetro sobre la capa de arena cribada en el fondo de la cavidad y se forma un lazo que reduce el riesgo de dañarlo por asentamientos excesivos del terraplén.

Se extiende una parte del cable sobre la base de la zanja y se rellena la cavidad y zanja con arena libre de partículas gruesas y angulosas; se riega agua sobre la arena para facilitar la compactación; se termina de colocar el cable en la zanja en zigzag, y se rellena con arena (el zigzag se especifica con la intención de reducir el riesgo de romperlo por tensión; la solución alternativa es la de usar un cable de buena calidad con armadura de acero y colocarlo en línea recta). Las primeras capas de relleno sobre piezómetro y cable se deben compactar con equipo manual; posteriormente se puede usar equipo neumático.

Antes de continuar con el relleno de pozo y zanja, se verifica el funcionamiento del piezómetro con una unidad de lectura portátil (Figura 6.49).

C. Instalación en materiales impermeables

Sobre la ruta trazada entre la ubicación del piezómetro y la estación de lecturas, se excava una zanja de 20 cm de profundidad y 30 cm de ancho, como mínimo, a todo lo largo de la ruta; si es necesario las paredes de la zanja tendrán taludes 1:1 (Figura 6.50).

Se rellena el fondo de la zanja con material excavado y cribado con una malla de 0.5 cm de abertura como máximo, para eliminar las partículas gruesas y angulosas que puedan dañar el cable eléctrico al colocarlo a lo largo de la zanja; el espesor de este relleno será

de 10 cm como mínimo. El material de relleno sobre el cable también es material excavado y cribado.

En el extremo de la zanja, sitio de instalación, se excava una cavidad con dimensiones iguales a las indicadas en el apartado de instalación en materiales permeables. En el fondo de la cavidad se coloca una capa de material cribado de 10 cm de espesor y sobre una de las paredes del pozo se prepara una superficie regular, plana e inclinada, se coloca el piezómetro con el filtro hacia arriba, como se muestra en la Figura 6.50a; después se cubre con material de la excavación cribado y se compacta. Finalmente, la cavidad y la zanja se rellenan y se compactan con equipo neumático. También se puede optar por encajar el piezómetro en el fondo de la cavidad dentro de un barreno de diámetro y profundidad justo del diámetro y longitud del piezómetro, de manera que quede completamente encajado en él, en este caso, el filtro del piezómetro quedará hacia abajo. En la Figura 6.50b se muestra el esquema de esta alternativa de instalación.

Se debe verificar (con una unidad de lectura portátil) el funcionamiento del piezómetro antes y después de instalarlo.

El cable del piezómetro debe formar un lazo en el fondo de la cavidad y se tiende una parte del cable sobre la cama de arena en el fondo de la zanja, se rellena tanto la cavidad como la zanja con material cribado, cubriendo cable y piezómetro. Se compacta el material alrededor del piezómetro con equipo manual y con equipo neumático alrededor del cable.

El cable se extiende sobre la base de la zanja en zigzag, sólo donde se especifique, y se rellena la zanja con material cribado, compactándolo en capas de 10 cm para asegurar un sello adecuado. Antes de colocar y compactar el relleno, se debe verificar el funcionamiento del piezómetro.

Con el recorrido horizontal de los cables se pueden crear trayectorias potenciales de flujo de agua a lo largo de las superficies de recubrimiento de los cables en contacto con el relleno, por tanto, es necesario hacer más impermeable el material alrededor del cable en la trinchera usando bentonita en polvo mezclada con el material de relleno, o formar tapones a determinados intervalos de la trayectoria del cable, con pellets de bentonita parcialmente saturados. En la Figura 6.50 se esquematiza este sistema de tapones o sellos.

6.1.3.5 Toma de lecturas y procesamiento de datos

Actualmente existen en el mercado una diversidad de marcas y modelos de piezómetros eléctricos, por lo mismo, se recomienda consultar el manual de instrucciones del fabricante del instrumento específico, además en dicho manual se encuentra la información necesaria para el procesamiento de datos con un ejemplo ilustrativo.

Cada piezómetro de cuerda vibrante tiene su certificado de calibración. En dicho certificado se incluyen las relaciones de presiones con las lecturas de la frecuencia de vibración de la cuerda. Se presentan dos series de datos de presiones con su correspondiente lectura en unidades B. Se obtienen dos columnas de datos, uno con la presión promedio y la otra con el promedio de lecturas (unidades B). Se calcula la presión aplicada y se obtiene el error lineal de escala completa.

6.2 CELDAS DE PRESIÓN

En esta sección se presenta el tema de la instrumentación de una masa de suelo para medir los esfuerzos totales en su interior. Se trata de la instalación de celdas de presión total durante la construcción de terraplenes que conforman las cortinas de tierra y enrocamiento.

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

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.

La medición de los esfuerzos totales presenta problemas que surgen de la interacción suelo-instrumento debidos a la naturaleza diferente de los materiales de suelo e instrumento, y a la alteración del campo de esfuerzos en el interior de una masa de suelo (efecto de inclusión).

La complicada reología de los suelos dificulta reproducirla en un instrumento de medición (Weiler & Kulway, 1982). A menos que las características esfuerzo-deformación de la celda sean idénticos a las del suelo, la presión aplicada a la celda siempre será función de la interacción suelo-celda, (Nichols et al. 1987). Una celda más rígida que el suelo circundante tenderá a detectar una mayor presión que la aplicada (sobreestimación), mientras que una celda menos rígida que el suelo circundante tenderá a medir una menor presión que la aplicada (subestimación).

Según Ingram (1968), la presencia de una inclusión como un dispositivo de medición en un medio granular, altera el campo de esfuerzos, lo cual provoca una concentración de esfuerzos, cuando la inclusión sea más rígida; por otra parte provoca la liberación de esfuerzos, cuando una inclusión sea menos rígida que el medio. Esta movilización de esfuerzos se ha designado como **arqueo de suelos**; posteriormente se define como arqueo pasivo cuando el suelo se deforma más que el dispositivo, y como arqueo activo cuando el dispositivo se deforma más que el suelo. El arqueo puede afectar seriamente la señal de salida del dispositivo; por lo tanto, un dispositivo de medición que se coloca en una masa de suelo debe tener las mismas características de deformación que las del suelo en el que se coloca.

Otro aspecto crítico, es la instalación del transductor en la masa de suelo; si el suelo que rodea al transductor no se restaura al estado de esfuerzos previo a la colocación, el suelo se comportará de manera diferente al suelo circundante. Una región densa de suelo que rodea al transductor provocará una sobreestimación, mientras que una región de suelo suelto provocará una subestimación.

6.2.1 Descripción

Una **celda de presión** (*pressure cell*) consta de cuatro partes básicas: una cápsula plana llena de líquido, un sensor, un cable eléctrico y una unidad de lectura.

Las celdas de presión se pueden dividir en dos categorías en función de su aplicación: celdas de presión en suelos y celdas de contacto. Las celdas de presión en suelos se instalan en el interior de una masa de suelo o relleno y las celdas de presión de contacto se usan

para medir las 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.

6.2.1.1 Celdas de presión de diafragma

Están constituidas por una membrana circular rígida apoyada sobre un anillo perimetral, la membrana circular se deforma debido a la presión externa, la deformación se detecta mediante un transductor de resistencia eléctrica (*strain gage*) adherido sobre la cara interna de la membrana circular, o por un transductor de cuerda vibrante, cuerda soportada por postes adheridos también a la cara interna de la membrana.

6.2.1.2 Celda de presión hidráulica

Es una cápsula plana (lenteja) que consiste en dos placas de acero, circulares o rectangulares, que se unen con soldadura en la periferia; la cavidad interna entre sus caras internas se llena con un fluido no compresible y se conecta a un transductor mediante un tramo de tubo de acero inoxidable. En la Figura 6.51 se muestran esquemáticamente los dos tipos de celdas de presión.

En las cortinas de tierra y enrocamiento se recomienda utilizar las celdas tipo hidráulica, ya que son de alta sensibilidad, si se garantiza que el fluido que llena la cavidad interna no contenga burbujas de aire. Estas celdas se instalan durante la colocación de los materiales de relleno,

En el mercado existen diversos modelos de celdas tipo hidráulica; de forma rectangular, de diferentes dimensiones; de forma circular, con diámetros (D) que varían de 20 cm a 50 cm y espesores (t) que varía de 6 mm a 12 mm, manteniendo siempre una relación de aspecto, D/t mayor que 20.

El tubo que conecta la celda con el transductor es de acero inoxidable, de 6 mm de diámetro con una longitud variable. En la Figura 6.52 se muestran celdas típicas comerciales, rectangulares y circulares

El tipo de transductor puede ser neumático, de resistencia eléctrica, de cuerda vibrante, piezocerámicos o de fibra óptica; la capacidad o rango varía desde 70 kPa a 700 kPa y de 1 MPa a 35 MPa.

Tabla 6.5. Características típicas de las celdas de presión tipo hidráulico disponibles en el mercado

Características	Transductor				
	Neumático	Strain gage		Cuerda vibrante	Fibra óptica
Rango, (F S)	≤ 13 800 kPa	≤ 34 500 kPa		≤ 34 500 kPa	≤ 20 000 kPa
Sobre-rango	2 000 psi, máx. 14 000 kPa, máx	200 - 500% F.S. (dependiente del sensor)		200 % FS	200 % FS
Exactitud	0.25 o 0.15% F.S.	± 0.1% F.S (dependiente del sensor)		0.1% FS	± 0.1% F.S
Resolución	Igual al de la unidad de lectura	Infinito		0.025 % FS, mínimo	0.01 % FS,
Voltaje de excitación	n/a	Dependiente del sensor		5 V sq. Wave	
Señal de salida	n/a	0-100 mV 0-1 V 0-5 V	4-20 mA	1200–2000 Hz	
Conductor	Dos tubos neumáticos de 3/16" (0.48 cm) diámetro exterior	4 cables No 20 AWG	2 cables No 20 AWG	2 cables No 20 AWG	
Temperatura de operación	-40 °C a +40 °C	-40 °C a 20 °C		-29 °C a 65 °C	
Diámetro	11.4 cm, 24.1 cm y 31.7 cm	11.4 cm, 24.1 cm y 31.7 cm		11.4 cm, 24.1 cm y 31.7 cm	23 cm

En la Tabla 6.5 se muestran las especificaciones generales típicas de las celdas de presión para diferentes tipos de transductor, que se pueden obtener en el mercado. En la Tabla 6.6, se muestra una relación de celdas de presión comerciales, sus dimensiones y rangos de medición, así como el tipo de transductor utilizado.

6.2.2 Tipos de sensores

En la Tabla 6.7 (Pag.s. 6.86 y 6.87), se muestran los diferentes tipos de transductores, que pueden conectarse con las celdas de presión total.

En la práctica, se prefieren los transductores que ofrecen una señal de salida eléctrica, ya que la transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas, pero éstas pueden ser más convenientes en determinadas circunstancias; por otra parte durante el proceso de medición no conviene extraer demasiada energía del medio donde se realiza la medición y las señales eléctricas de salida pueden amplificarse con dispositivos electrónicos.

Tabla 6.6 Capacidades, dimensiones y tipo de transductor de celdas hidráulicas comerciales

Fabricante	Celda				
	Tipo de transductor				
	Neumático	Resistive Strain gage	Semiconductor Strain gage	Cuerda vibrante	Fibra óptica
Geokon			D=23 cm; t = 6 mm	D = 23 cm; t = 6 mm	
			A=25 cm B =15 cm t = 6 mm	A= 25 cm; B= 15 cm t = 6mm	
			R: 6 000 psi; 42 000 kPa	350, 700 kPa; 1.5, 2.5, 5, 7, 20 MPa	
Rst Instruments	D= 114, 241, 317 mm		D = 11.4 cm, 24.1 cm, 31.7 cm	D = 11.4 cm, 24.1 cm, 31.7 cm	
	D/t > 20		D/t > 20	D/t > 20	
	R; ≤ 13 800 kPa		R: ≤ 34 500kPa	R: ≤ 34 500kPa	
Soils Instruments				D = 20 cm, 24 cm, 30 cm, 34.5 cm	
				R: 300; 500; 1 000; 2 000; 4 000; 6 000; 10 000; 15 000 kPa	
Slope Indicator	D = 23 cm t = 11 mm			D = 23 cm t = 11 mm	
	R: 50, 100, 250, 500 psi R: 350; 700; 1 750; 3 500 kPa			R: 300 psi; 2100 kPa	
Sisgeo		D= 23 cm, 50 cm A = 20 cm, B = 10 cm		D = 23 cm, 50 cm A = 20 cm, B = 10 cm	
		Circular: t=12mm		Circular: t= 12mm	
		Rectangular: t=6 mm		Rectangular: t= 6 mm	
TriTech		R: 500 kPa; 1, 2, 5 MPa		R: 350, 700 KPa 2, 5, 10 MPa	
				D = 20 cm t= 7 mm	
				R: 200, 300, 500, 700 kPa R: 1.0, 1.5, 2.0, 3.5, 5.0, 10.0, 35 MPa	

RocTest	D = 23 cm t = 6.3 mm	D = 23 cm t = 6.3 mm		D = 23 cm t = 6.3 mm	D=23 cm t= 6.3 mm
	A = 20 cm, 25 cm, 30 cm B = 10 cm, 15 cm, 20 cm	A = 20 cm, 25 cm, 30 cm B = 10 cm, 15 cm, 20 cm		A = 20 cm, 25 cm, 30 cm B = 10 cm, 15 cm, 20 cm	A = 20 cm, 25 cm, 30 cm B = 10 cm, 15 cm, 20 cm
	R: 200, 350, 500, 750, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 20 000 kPa	R: 200, 350, 500, 750,1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 20 000 kPa		R:200, 350, 500, 750, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 20 000 kPa	R: 200, 350, 500, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 20 000 kPa
Geosense				D= 12 cm, 23 cm, 30 cm t= 6 mm R: 70, 170, 350, 700 kPa 1, 2, 3, 5, 7.5, 20 MPa	
Encardio- Rite				D = 20 cm t = 7 mm R: 0.5, 1.0, 2.0, 3.5, 5.0, 10 MPa	

Nota D: Diámetro; t: Espesor; R: Rango; A: Largo; B: ancho.

6.2.2.1 Transductor de resistencia eléctrica

En este sensor la deformación del filamento de resistencia se asocia con un cambio en el voltaje de la corriente eléctrica.

6.2.2.2 Transductor de cuerda vibrante

La deformación del diafragma se asocia con un cambio en la tensión de la cuerda, y por tanto, un cambio en la frecuencia natural de vibración de la cuerda.

6.2.2.3 Transductor piezoeléctrico

En este tipo de sensor el diafragma es un semiconductor que tiene la propiedad de transformar la deformación que le produce la presión interna en energía eléctrica, las variaciones de esta energía eléctrica se asocian con las variaciones de la presión; en el transductor neumático, la deformación del diafragma producida por la presión interna, es compensada y equilibrada por la inyección de una contrapresión inyectada mediante ductos desde el exterior.

6.2.2.4 Transductor de fibra óptica

Consiste en un dispositivo colocado en un extremo de la fibra que contiene dos espejos paralelos separados una cierta distancia para formar una cavidad; el primer espejo es semirreflector y el segundo es un diafragma que expone su cara externa a la presión; la luz incidente en el primer espejo es parcialmente reflejado y la luz remanente atraviesa la cavidad y es reflejada por el segundo espejo, así el pulso de luz incidente en el primer espejo se divide en dos pulsos de retorno, el segundo con un retardo de $t = 2Ls/c$, con respecto al primero; la deformación del segundo espejo debido a la presión hace variar la distancia entre las caras internas de los espejos, con la consecuente variación del tiempo de retorno de la luz reflejada en el segundo espejo.

6.2.3. Instalación

Los procedimientos de instalación implican esencialmente lograr el contacto pleno de las placas de la celda con el suelo, sin dañar los componentes de la celda; las

placas de la cápsula, el tubo de conexión, el transductor y el cable eléctrico.

6.2.3.1 Consideraciones previas

Los aspectos más relevantes que deben considerarse al realizar los procedimientos de instalación se explican enseguida.

Contacto pleno

El propósito del contacto pleno es que la presión aplicada a la cápsula, sea uniforme; por tanto, deben evitarse las protuberancias de la superficie de contacto, grumos y/o gravas, más rígidas ya que producen concentraciones de esfuerzos.

La naturaleza y rigidez distinta de la cápsula y el suelo no se pueden evitar. Se recomienda que los suelos que rodean a la cápsula, tengan el mismo contenido de agua y grado de compactación que los suelos del terraplén, con ello se logra una rigidez homogénea en torno a la celda y una disminución de los efectos de arqueado del suelo.

Cables eléctricos

Los cables deben estar libres de tensiones debidas a los movimientos diferenciales de la masa de suelo que conforma los terraplenes. La base de apoyo de los cables debe estar libre de irregularidades y de protuberancias, grumos y/o partículas angulosas, que puedan cortar el recubrimiento aislante del cable eléctrico. Para evitar la canalización de agua tanto en la interface suelo-cable, como en la zanja de instalación, se debe colocar pantallas impermeables a cada cierta distancia en torno al cable, abarcando toda la sección de la zanja.

Celda de presión

Durante las operaciones de instalación de la celda (colocación del relleno y compactación de envoltorio de la celda, relleno y compactación del terraplén sobre la celda, tendido de cables en zanja, relleno y compactación de materiales de recubrimiento) debe verificarse que la celda no deje de funcionar.

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.

6.2.3.2 Instalación de celdas individuales

Para lograr una carga uniforme representativa de la presión sobre la celda, la superficie de apoyo de las placas de la celda debe ser plana, compacta y sin protuberancias (Figura 6.53).

Después de asentar la celda, tubo hidráulico y transductor, el conjunto se protege con un relleno lenticular o en forma de domo o montículo, sin partículas gruesas compactado con equipo manual, con el mismo contenido de agua y con la misma densidad del relleno circundante. (Figura 6.54); antes de colocar el montículo se debe verificar el funcionamiento de la celda.

Este arreglo de protección lenticular se facilita colocando la celda sobre el fondo rectangular de un pozo o nicho, con una profundidad de tres veces el diámetro de la celda y paredes inclinadas 45° ; el fondo del pozo debe tener un ancho de tres veces el diámetro de la celda y una longitud que aloje la celda, el tubo de transmisión y el transductor, con un claro en cada extremo de un diámetro de la celda. El nicho de instalación es práctico para celdas en posiciones horizontal e inclinada.

En la Figura 6.55 se muestra el esquema de este nicho con arreglo de celda en posiciones horizontal e inclinada.

En los casos de colocar celdas de presión en posición vertical para medir esfuerzos horizontales, las celdas deben sostenerse mediante marcos de madera que se remueven inmediatamente después de rodear las celdas de material fino o de arena cuidadosamente compactada con equipo manual. En la Figura 6.56 se muestra el esquema de instalación de una celda en posición vertical.

El nicho de la celda se construye en el fondo de una excavación practicada bajo la superficie del terraplén de la obra. Cuando el terraplén alcance una elevación de un metro más tres veces el diámetro de la celda sobre la elevación de instalación; se excava el nicho con paredes inclinadas, debe tener un fondo con dimensiones que permitan las operaciones de excavación del nicho y de

colocación de la celda. En la Figura 6.57 se muestran las dimensiones mínimas de la excavación.

Después de colocar la celda de presión dentro del pozo, este se rellena con el material excavado. El relleno de transición se coloca en capas de 10 cm de espesor hasta alcanzar 50 cm, compactado el material con equipo manual con el mismo contenido de agua y grado de compactación del suelo circundante; se verifica el funcionamiento de la celda de presión; para continuar con el relleno 1 m más, compactándolo con rodillo neumático en capas de 10 cm. En la Figura 6.58 se muestra un esquema de los espesores del relleno sobre la celda.

6.2.3.3 Instalación de un grupo de celdas

Para la instalación de un grupo de celdas con diferente orientación en una misma elevación, cada una de ellas se instala en su propio nicho, siguiendo el mismo procedimiento ya descrito. La separación entre nichos debe ser de al menos 1 m, entre las bases de apoyo. En la Figura 6.59, se muestra la disposición de cinco celdas; una celda en posición horizontal; dos en posición vertical y dos inclinadas.

Como en el caso de la celda individual, las celdas agrupadas se colocan en nichos con su protección lenticular, en el fondo de una excavación bajo el nivel del terraplén terminado con una elevación de un metro más tres veces el diámetro de la celda sobre la elevación del punto de medición de presiones, determinado por el proyecto.

El procedimiento de instalación de celda individual y en grupo es aplicable cuando se trata de medir las presiones en el núcleo impermeable de una obra hidráulica.

Cuando se instalan las celdas de presión en zonas de filtros o de enrocamiento, es más conveniente hacerlo en rampas formadas sobre el nivel temporal del terraplén terminado antes de continuar con el tendido y compactación de las terracerías. En este caso, la base o plataforma de asentamiento de las celdas serán rectangulares con un ancho y una longitud de tres veces y seis veces el diámetro de la celda, respectivamente, y un espesor de 15 cm, formado de material fino compactado con equipo manual; al ancho de esta base se le debe agregar una cierta distancia para el operador que instala la celda. En la figura 6.60 se muestra el esquema de la plataforma sobre un terraplén petreo.

Para facilitar la colocación de la plataforma, base para la instalación de la celda de presión y su cable, es conveniente confinar el perímetro de la plataforma con una caja metálica de fondo abierto, rectangular o circular, que cubra las dimensiones de la plataforma; las paredes de la caja serán verticales con una altura de 1.20 m, y de 2.54 cm (1 in) de espesor como mínimo, con refuerzos verticales de ser necesario (Figura 6.60). Con este confinamiento, la celda se protege con un domo de material libre de partículas gruesas, y se cubre con rellenos de transición, como ya se ha indicado en párrafos anteriores, hasta la altura de 1 m. Los cables en su recorrido horizontal sobre los materiales pétreos se protegen con un tubo galvanizado de 3.81 cm (1.5 in) o 2.54 cm (1 in) de diámetro, en su longitud hacia la estación de medición sobre el respaldo del terraplén. Con esta protección se procede a la sobreelevación de las terracerías circundantes y una vez que se alcance 1 m de altura, se extrae la caja metálica.

Oosthuizen (2003) recomienda el siguiente procedimiento que supera el problema de la compactación en torno a la celda; la instalación se inicia cuando el terraplén alcanza una elevación de 80 cm sobre la elevación de la instalación de la celda; este procedimiento requiere de un tipo especial de celda con tubo de recarga de presión. La trinchera donde se ubica la celda y sus cables se excava a una profundidad de 50 cm, en el fondo de esta trinchera se excava un nicho de 30 cm, con paredes inclinadas a 45° que alojará a la celda. Se asienta firmemente la celda sobre una capa de mortero con estabilizador volumétrico, de 5 cm de espesor; enseguida el nicho se rellena de concreto ligero y vibrado, con agregados de tamaño máximo de 19 mm ($\frac{3}{4}$ in), en capas de 10 cm hasta cubrir el nicho de instalación; después de 24 h de fraguado, la celda se recarga con presión, hasta que las lecturas de presión desplegadas en la unidad de medición empiecen a cambiar. Enseguida se rellena la excavación en capas de 10 cm, hasta el nivel temporal del terraplén, como se describe en las secciones anteriores; cada capa se puede compactar con rodillos vibratorios operados manualmente. La Figura 6.61 muestra el arreglo de las celdas de presión asentadas en mortero arena cemento y cubiertas en la parte superior con concreto de baja resistencia.

6.2.3.4 Protección de cables

En terraplenes, los cables se protegen al envolverlos con una capa de arena o con materiales cribados del terraplén; la protección típica de cables de un grupo de celdas consiste en colocarlos sobre una capa de materiales finos compactados de 20 cm de espesor. Para protegerlos de las operaciones de construcción, la capa de apoyo debe colocarse en zanjas (bajo el nivel temporal del terraplén) o en rampas expuestas (sobre el nivel temporal del terraplén).

En presas de tierra y enrocamiento, es conveniente proteger los cables en zanjas en las zonas del núcleo impermeable y en zonas de filtros finos; en zonas de filtros gruesos y de enrocamiento es conveniente protegerlos en rampas expuestas. Los cables de las celdas deben estar espaciadas como mínimo 2.5 cm y separadas al menos 10 cm de la orilla de la capa de apoyo. En la Figura 6.62 se muestra el tendido de cables sobre el fondo de la zanja y la separación entre cables de un grupo de celdas.

Durante el relleno de las zanjas, en presas de tierra, se deben colocar tapones de bentonita de 50 cm de espesor que cubran la sección de la zanja y a cada 20 m en toda la extensión de la zanja. El propósito de estos tapones es reducir la posibilidad de flujo de agua a través del núcleo impermeable a lo largo de los rellenos de las zanjas.

Los cables deben etiquetarse de manera que se identifique cada cable con su correspondiente celda de presión, particularmente en la salida a la estación de lecturas. Cada cable debe etiquetarse a intervalos regulares en toda su longitud para su identificación en el caso de realizar una excavación para reparación de una ruptura.

Para evitar rupturas de los cables por tensiones debidas a los asentamientos diferenciales del terraplén, éstos deben formar lazos o tendidos en zigzag en la salida de los nichos de instalación y en los cambios de dirección sobre la ruta hacia la estación de lectura. En la Figura 6.62 se ilustra el arreglo del cable en "S" en la salida.

El relleno de la zanja que aloja los cables se deberá hacer con material del terraplén, cribado para eliminar las partículas gruesas mayores a 0.5 cm, y compactarse en capas de 10 cm de espesor con equipo neumático operado manualmente, hasta alcanzar la compactación de los materiales circundantes.

Cuando los cables atraviesen la zona de filtros gruesos y enrocamiento de respaldo, se deberán proteger con tubos galvanizados en diámetros suficientes para alojar holgadamente los cables.

El procedimiento de instalación de los cables es diferente para celdas individuales y para grupo de celdas, pero en general existen requisitos comunes:

- Los cables deben protegerse de daños debidos a partículas angulosas en contacto con el blindaje.
- El cable debe protegerse de daños que pueda causarle el equipo de compactación.
- En terraplenes de tierra y enrocamiento el cable debe protegerse de tensiones que resultan de los movimientos diferenciales en la compactación de los terraplenes.
- Evitar el traslape de cables, ya que se pueden afectar las lecturas de la celda de presión.

Para conocer los detalles de su instalación, cada celda de presión debe tener la ficha de instalación correspondiente con los siguientes datos:

- Datos de localización: ubicación del asiento del instrumento en los ejes x, y, z.
- Datos del instrumento: diámetro y espesor de la celda; tipo y rango del transductor, y calibre y longitud de cables.
- Datos de instalación: elevación temporal del terraplén o plataforma; elevación y dimensiones del fondo de la excavación madre o primaria; elevación del fondo y dimensiones del nicho de asentamiento de la celda; posición relativa de la celda; horizontal, vertical o inclinada; dimensiones de la sección y longitud de la trinchera de tendido de cables; condiciones de colocación de base de asiento y rellenos de protección de celda y cables de señal.
- Datos de lecturas del transductor. Valores de las lecturas después de cada etapa de instalación de la celda, colocación y compactación de rellenos de protección de celda y cables.

En la Figura 6.63 se ejemplifica un formato de ficha de instalación.

6.2.3.5 Toma de lecturas

El procedimiento de toma de lecturas depende del tipo de transductor acoplado a la celda de presión, por tanto, se recomienda consultar los manuales de operación del fabricante.

Actualmente, las unidades de lectura electrónicas, facilitan considerablemente el registro, almacenamiento y el desplegado de lecturas. En la Figura 6.64, se muestran unidades de lectura que se ofrecen en el mercado.

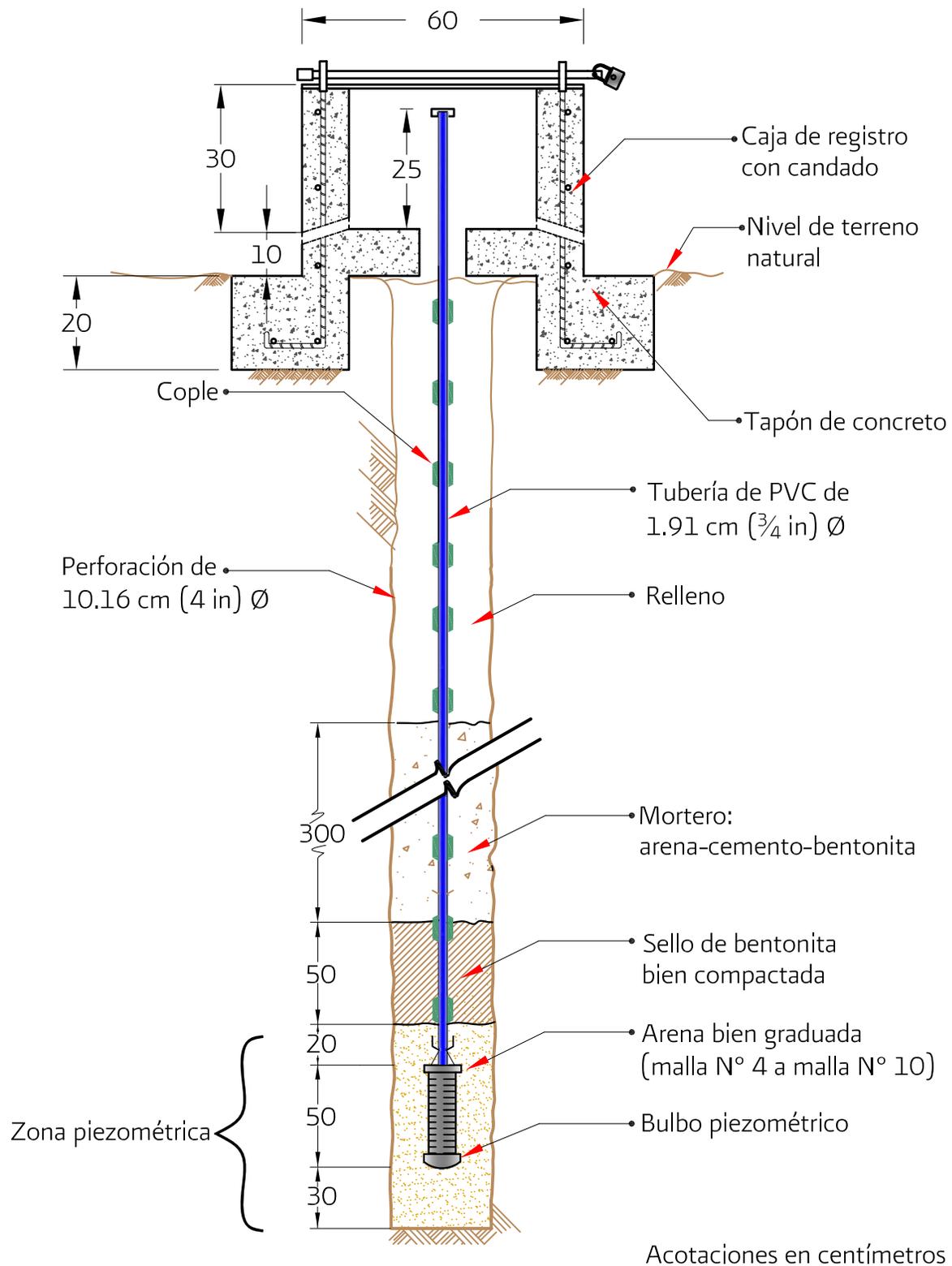


Figura 6.1 Detalle de la instalación del piezómetro abierto tipo Casagrande



Figura 6.2 Piezómetro abierto

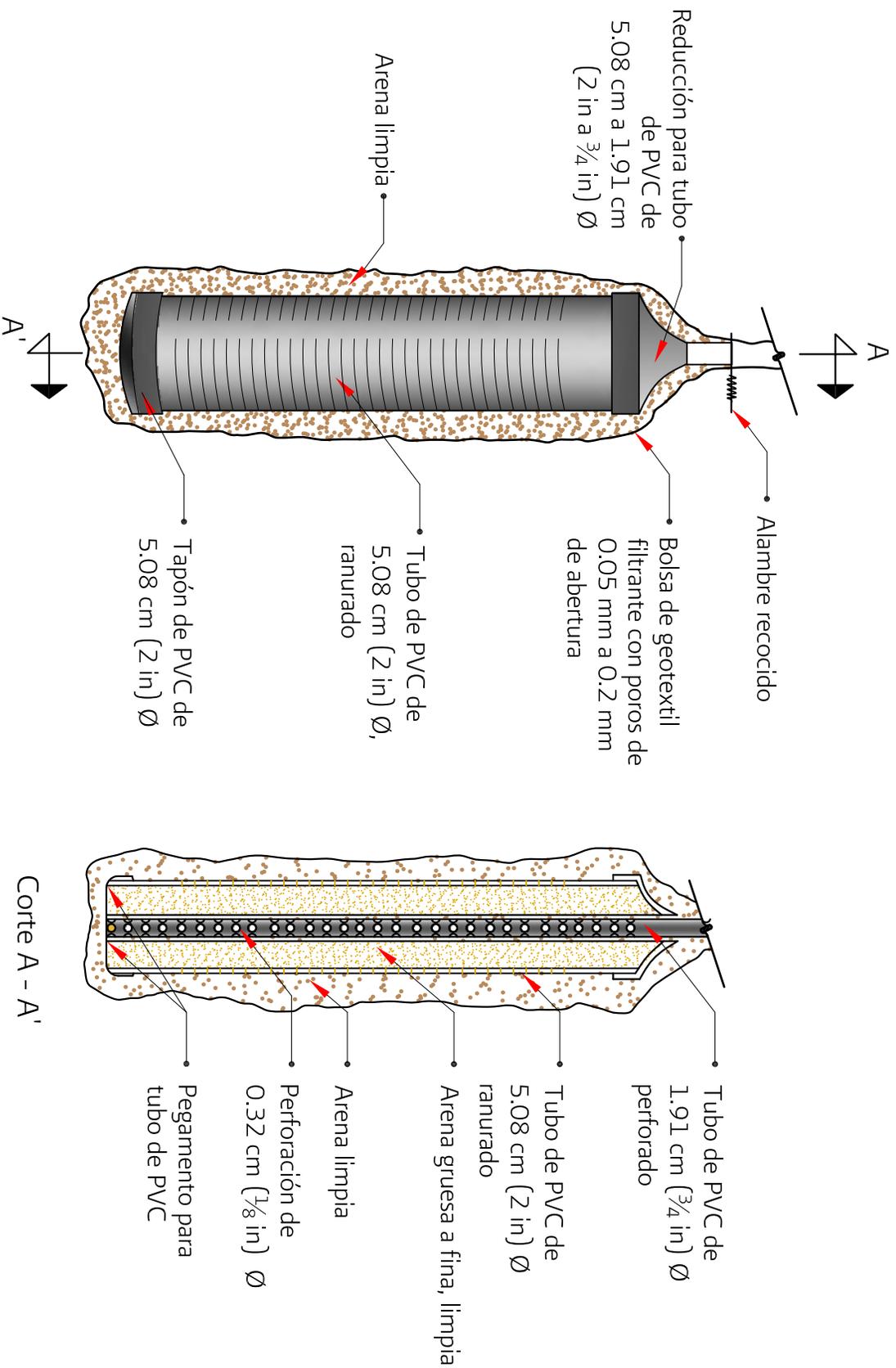


Figura 6.3 Bulbo del piezómetro abierto empacado en arena y bolsa de geotextil



Figura 6.4 Cilindros de cerámica porosa como bulbos permeables de los piezómetros abiertos (cortesía de Soil Instruments)

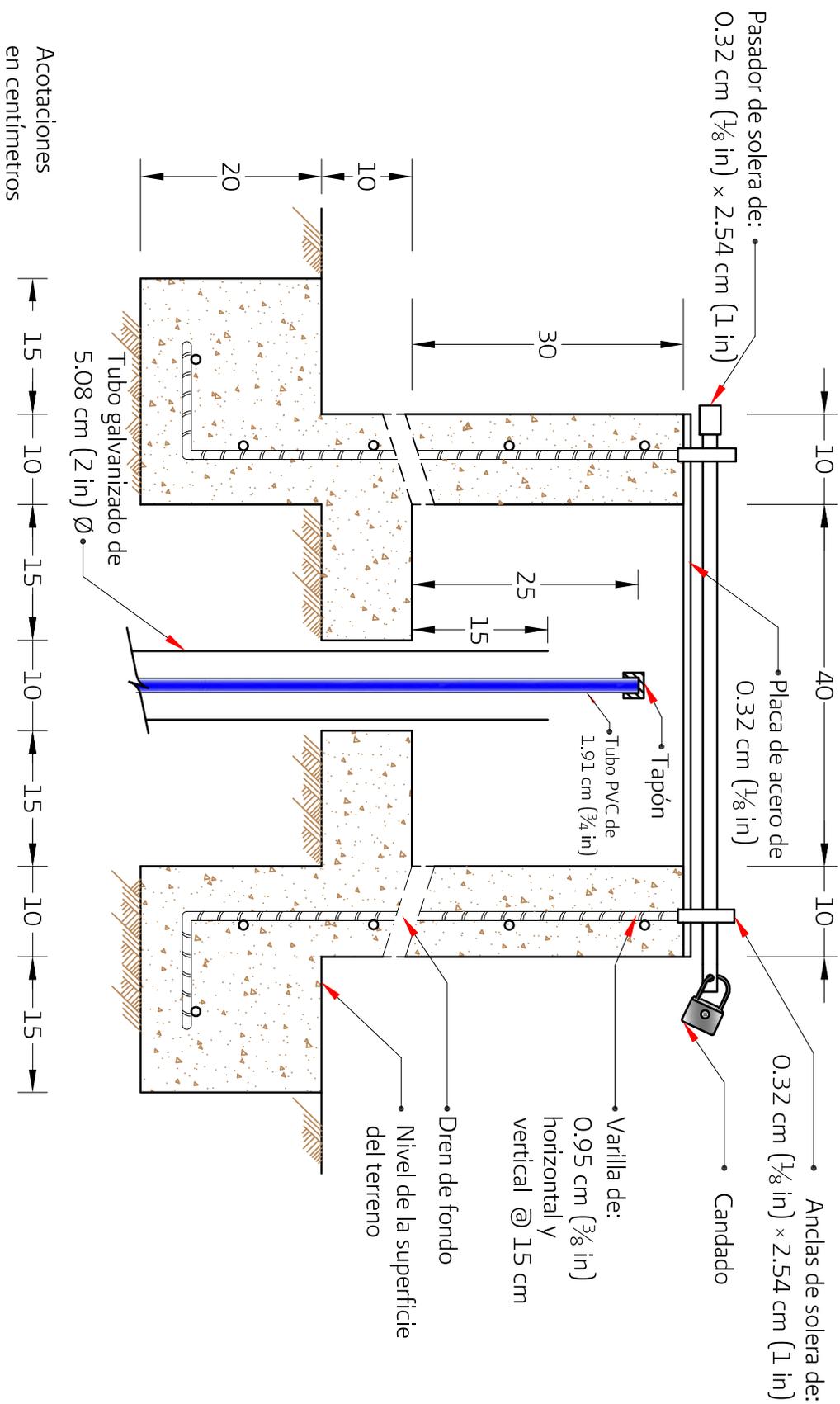


Figura 6.5 Caja de concreto armado para protección del brocal del piezómetro abierto

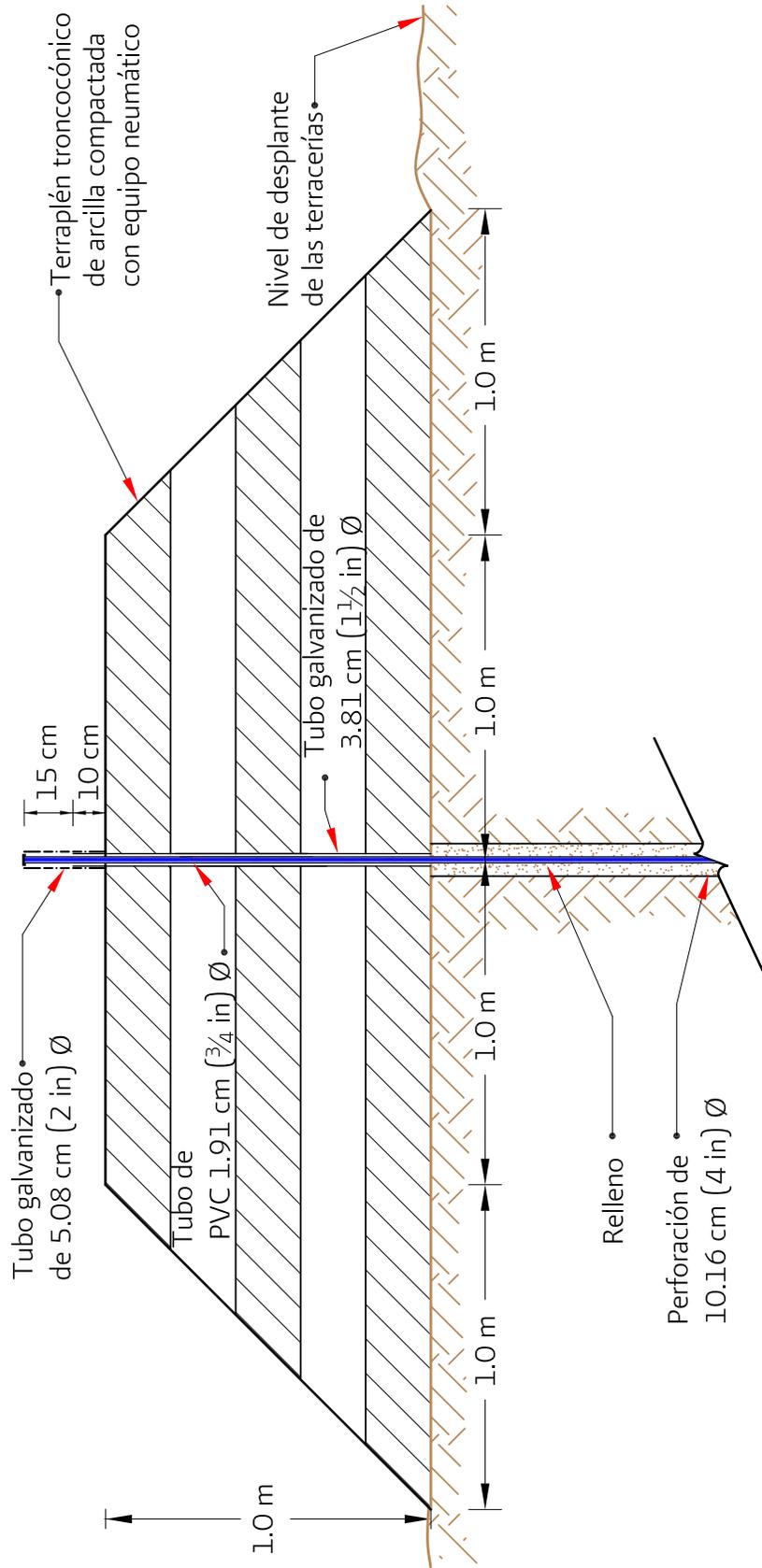


Figura 6.6 Terraplén para protección de tubería del piezómetro abierto instalado en la cimentación

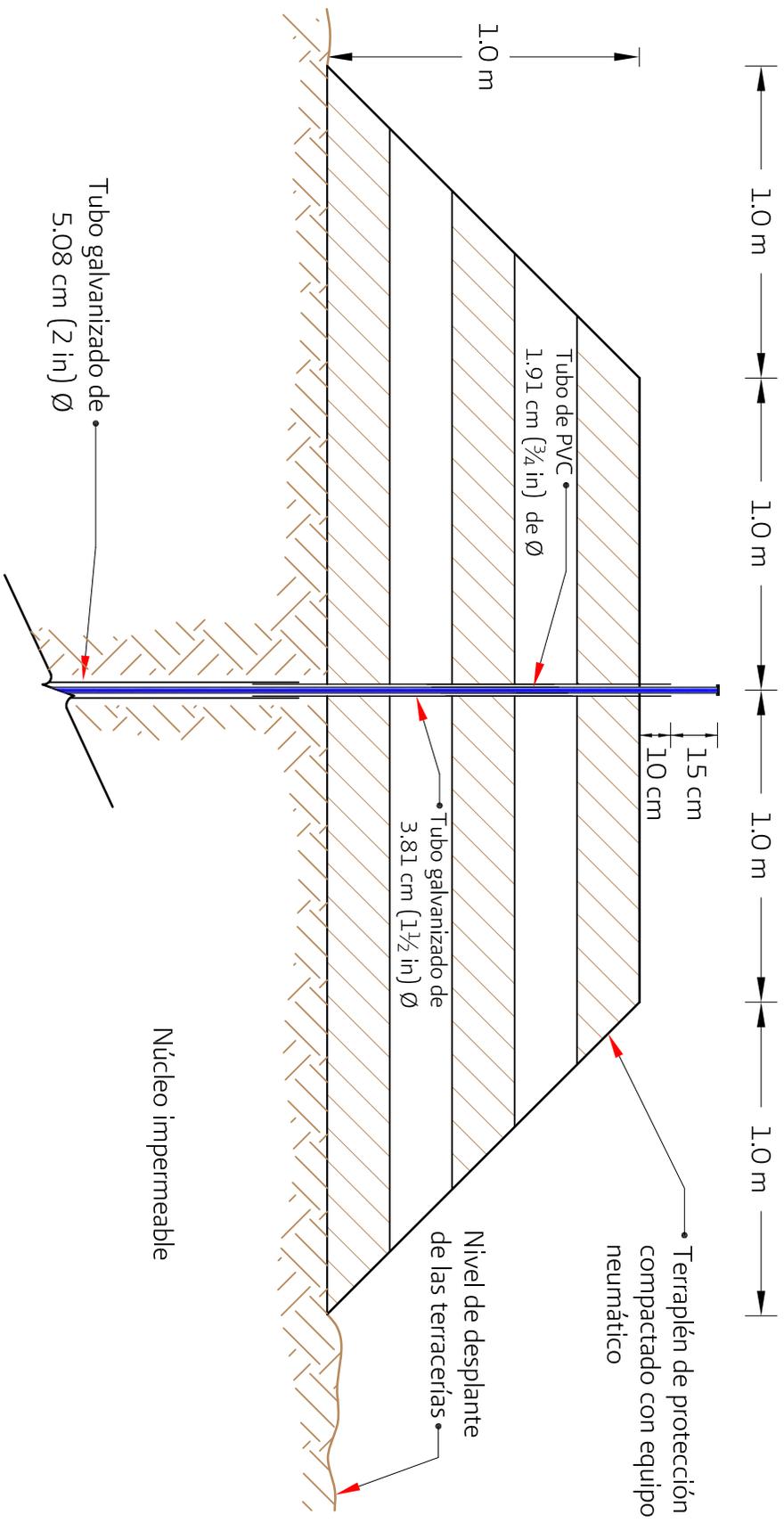


Figura 6.7 Terraplén para protección de tubería de piezómetro abierto, instalado en núcleo impermeable

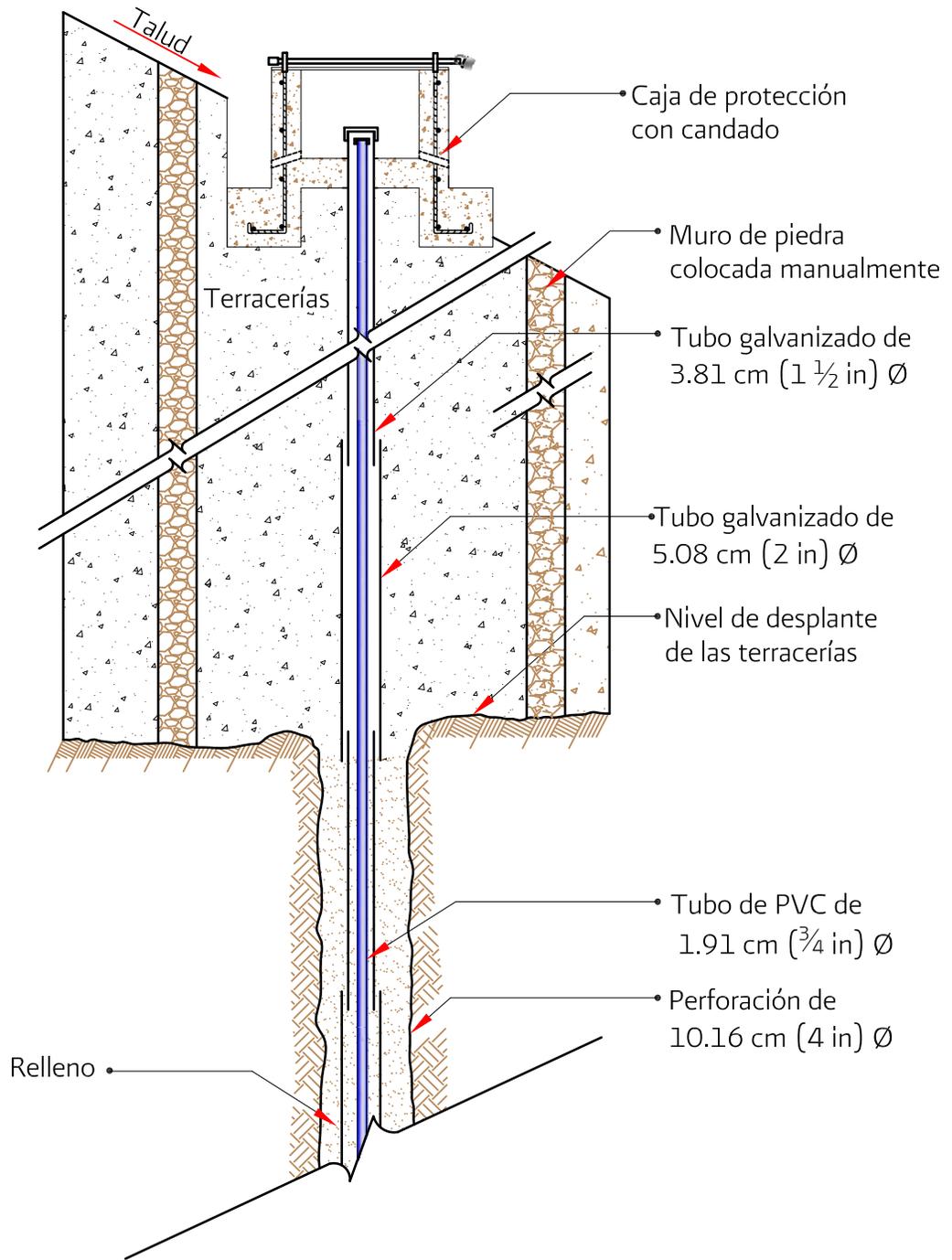
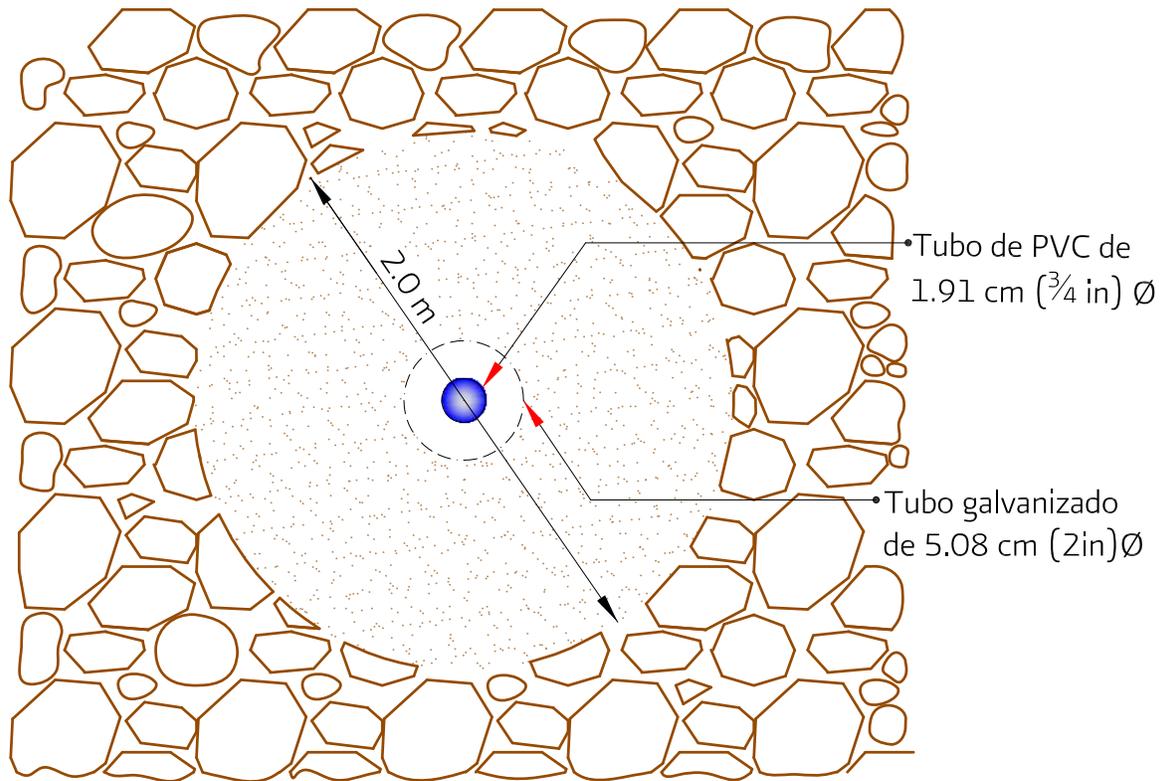
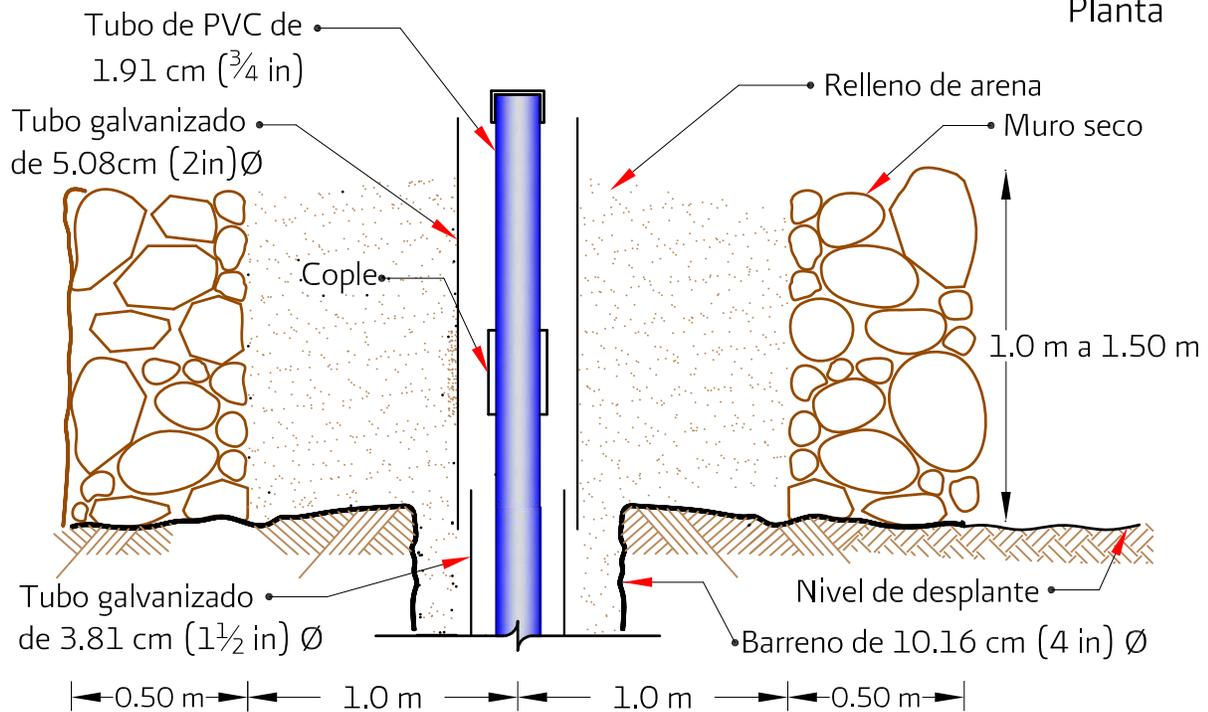


Figura 6.8a Protección de tubería de piezómetro abierto que atraviesa materiales gruesos de rezaga o rocas en respaldo



Planta



Corte

Figura 6.8b Cerco de piedra para protección de la tubería de piezómetro abierto que atraviesa materiales gruesos de rezaga o rocas en respaldo

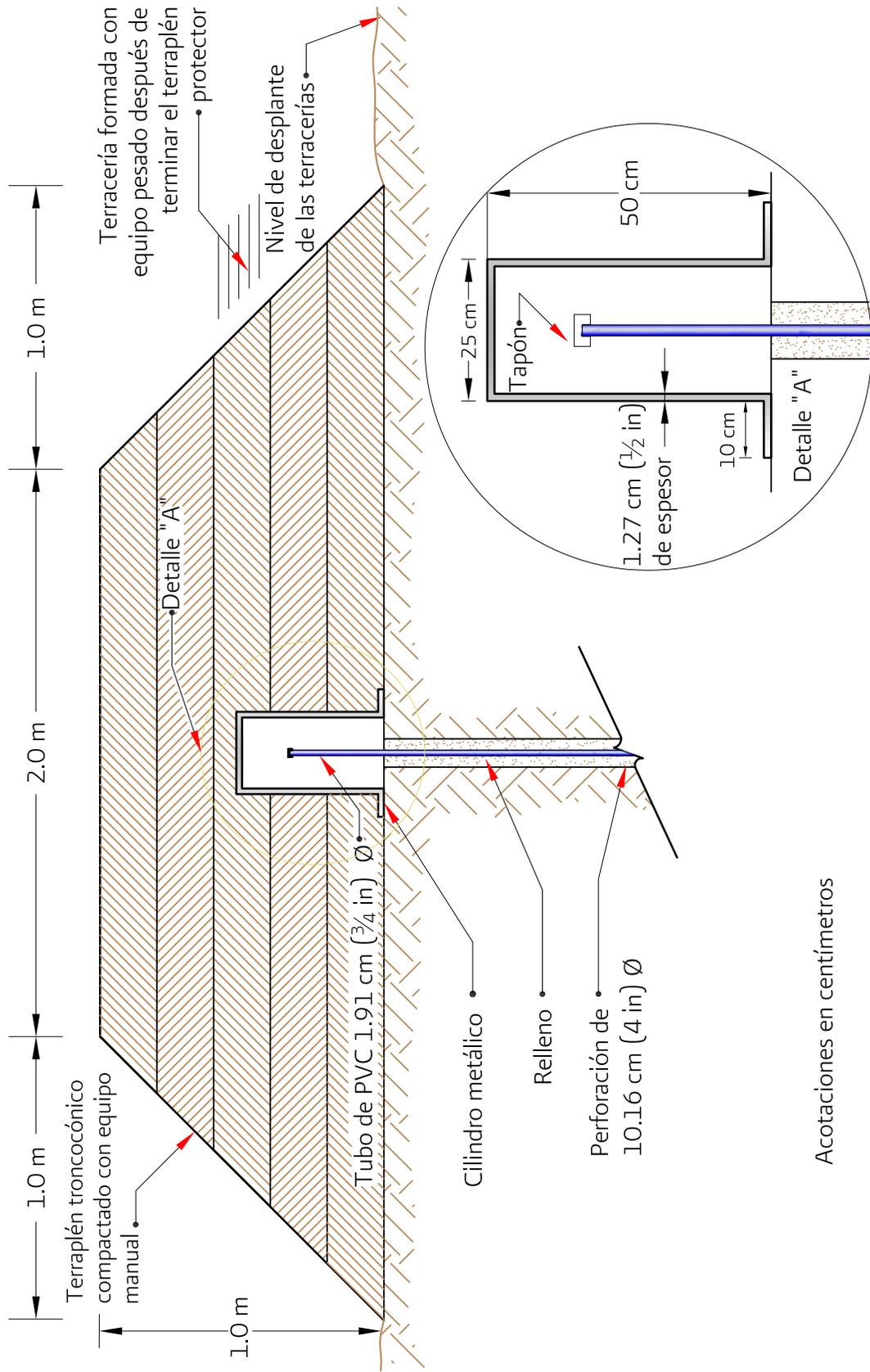


Figura 6.9 Protección de brocales de tubería de piezómetro abierto con cilindro metálico

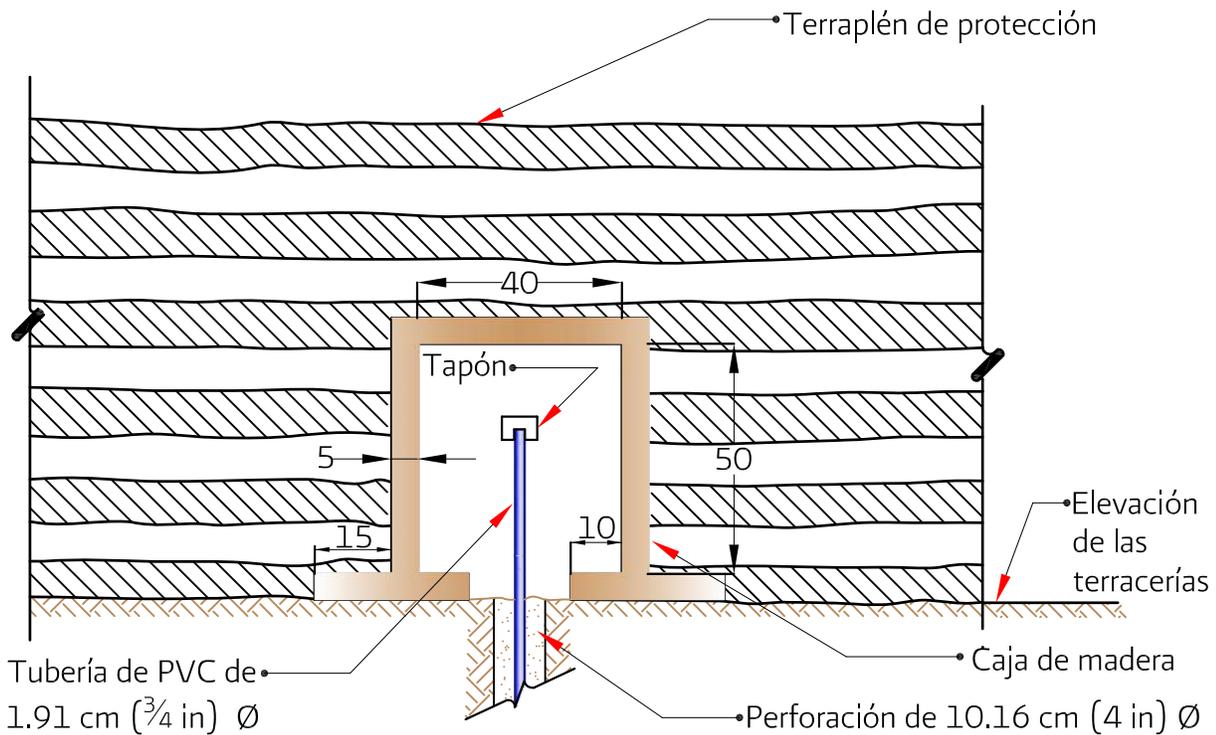
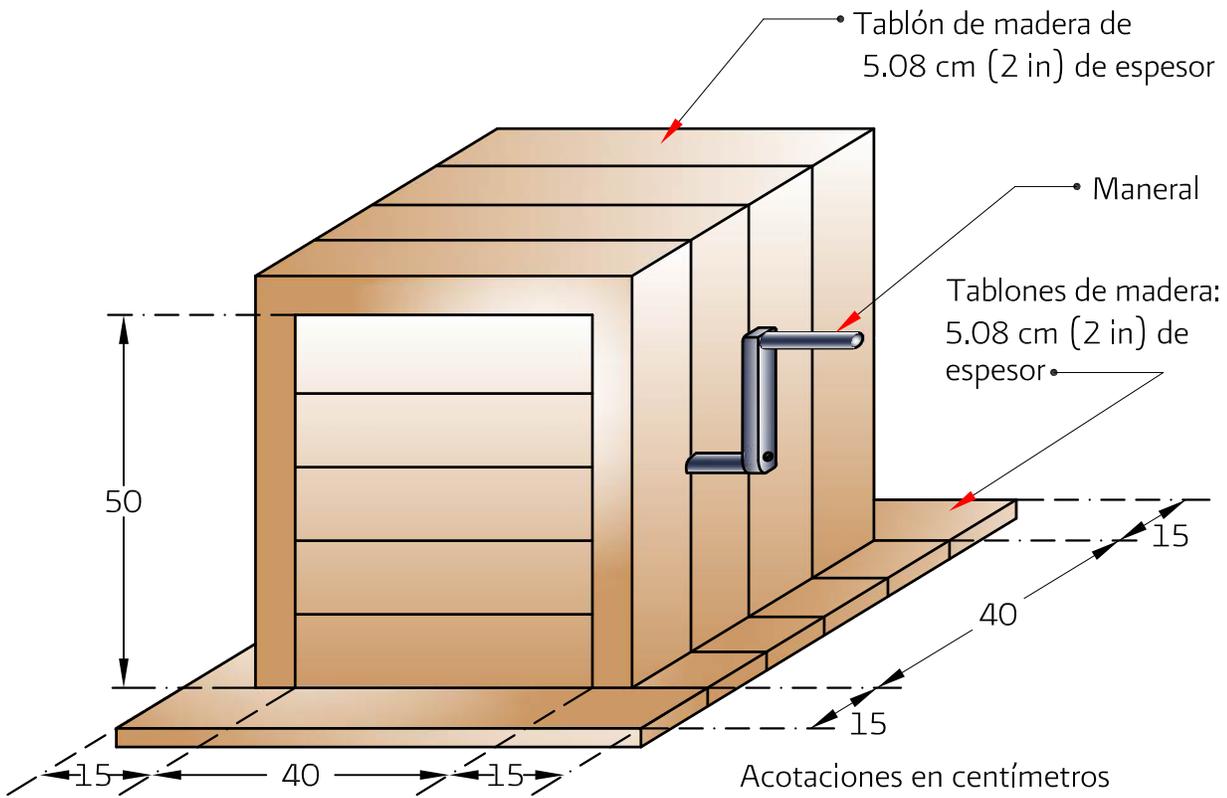


Figura 6.10 Caja de madera para proteger brocales de piezómetro abierto

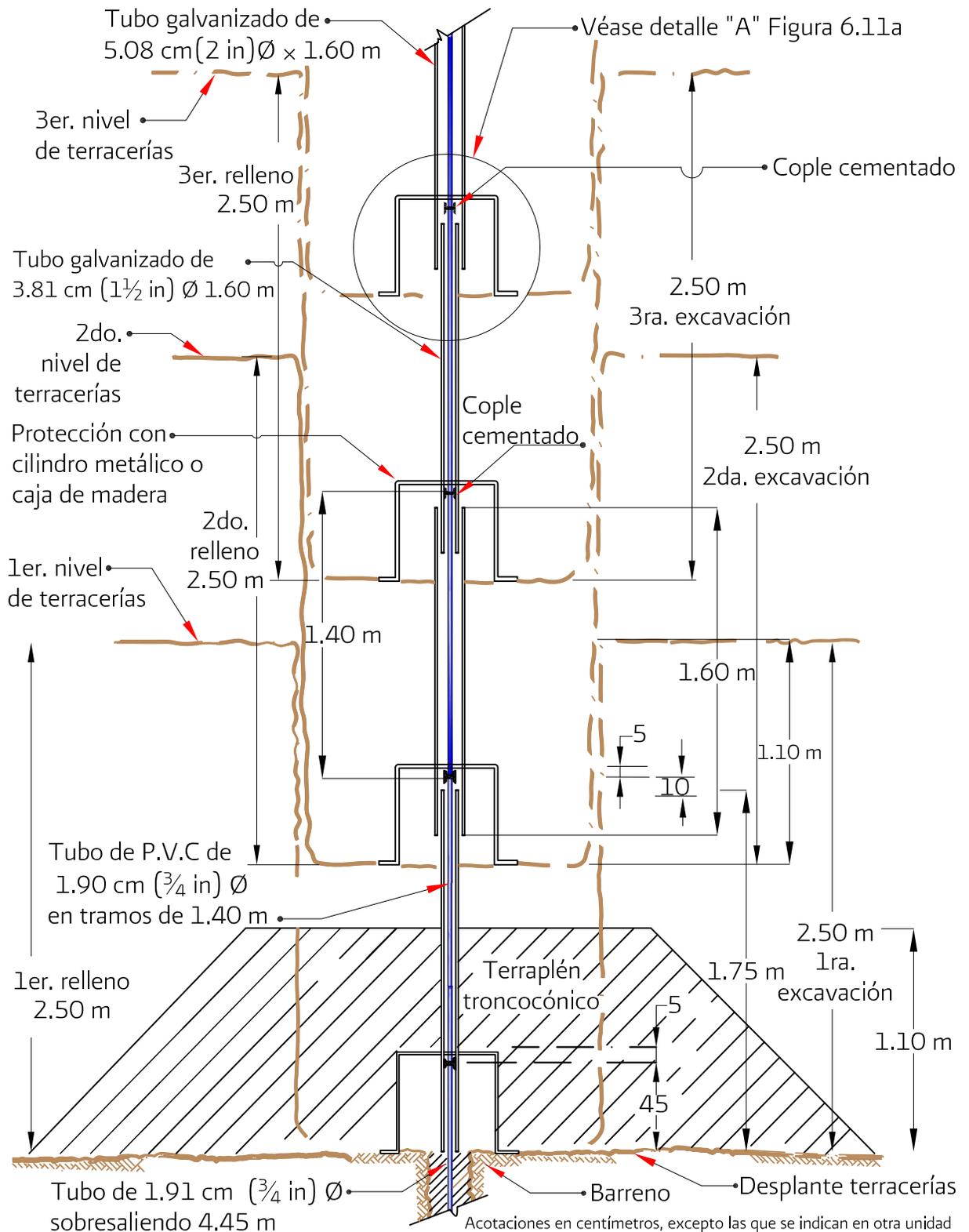
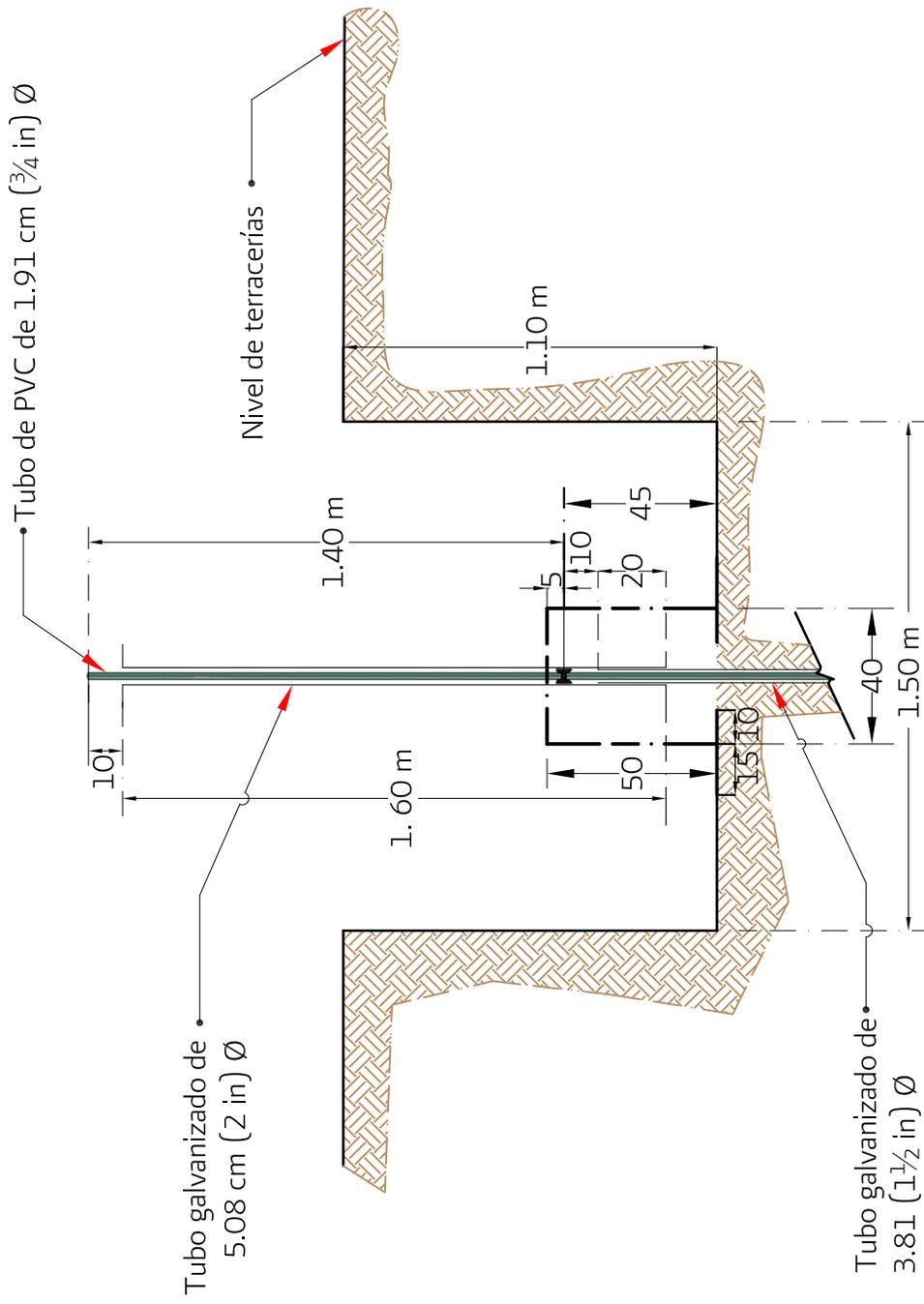


Figura 6.11a Etapas de protección de tuberías de piezómetro abierto durante la colocación de las terracerías en núcleo impermeable



Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad

Figura 6.11b Detalle "A" de etapa de sobreelevación de tuberías en núcleo impermeable

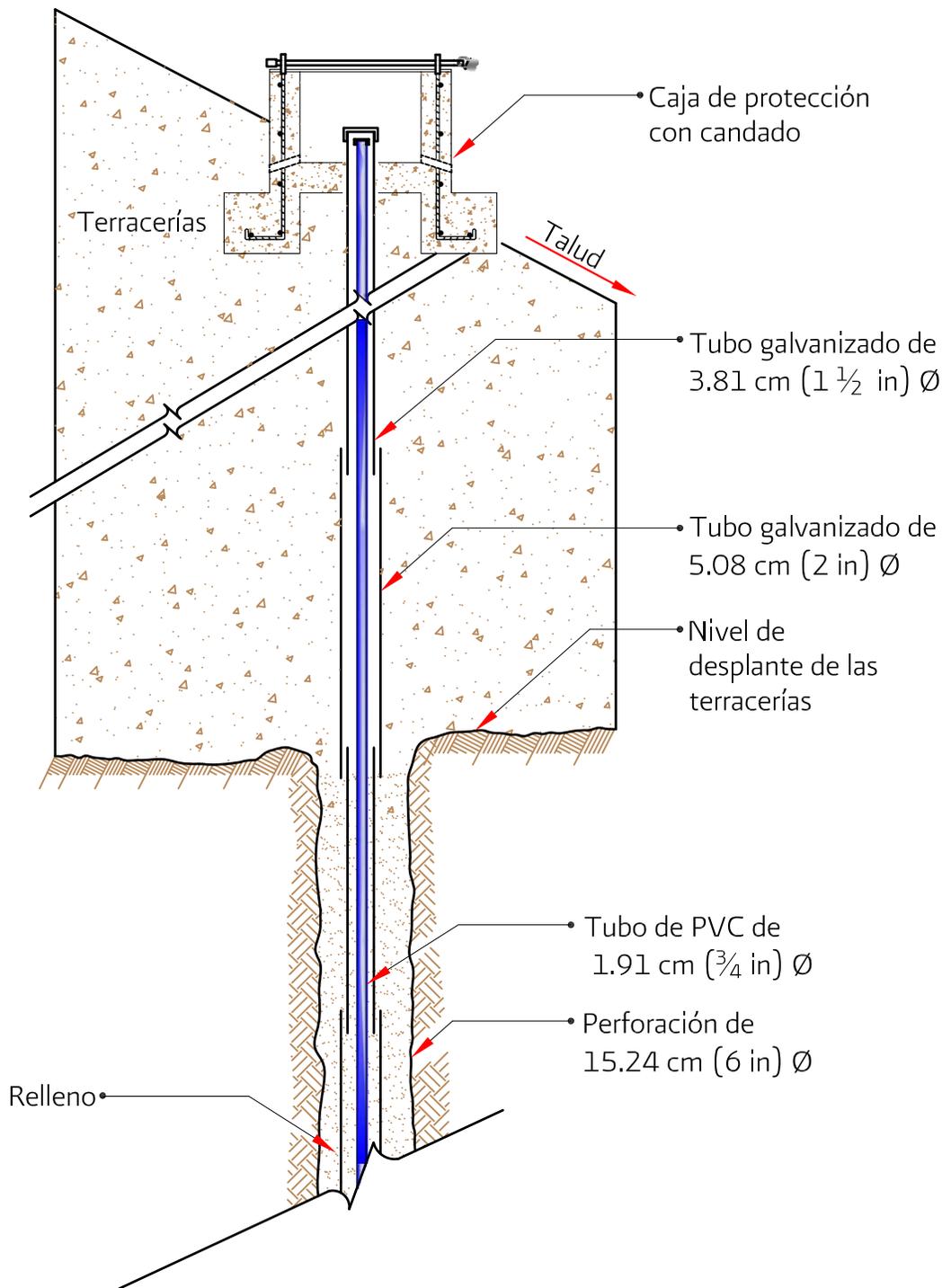
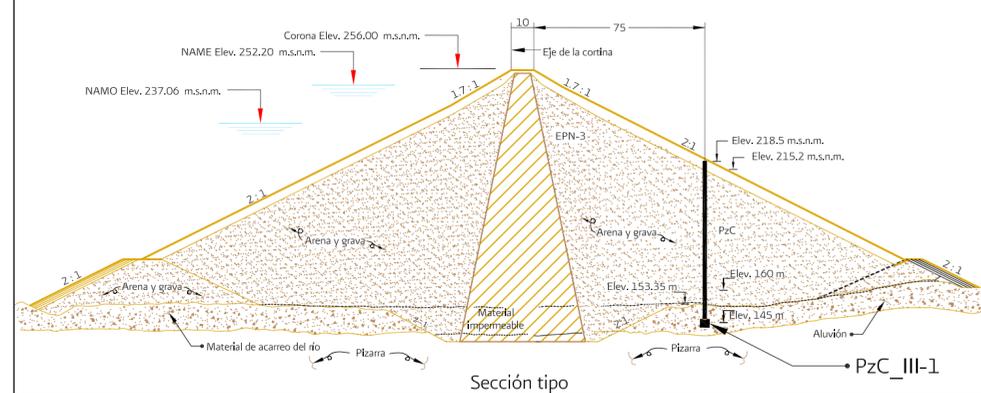
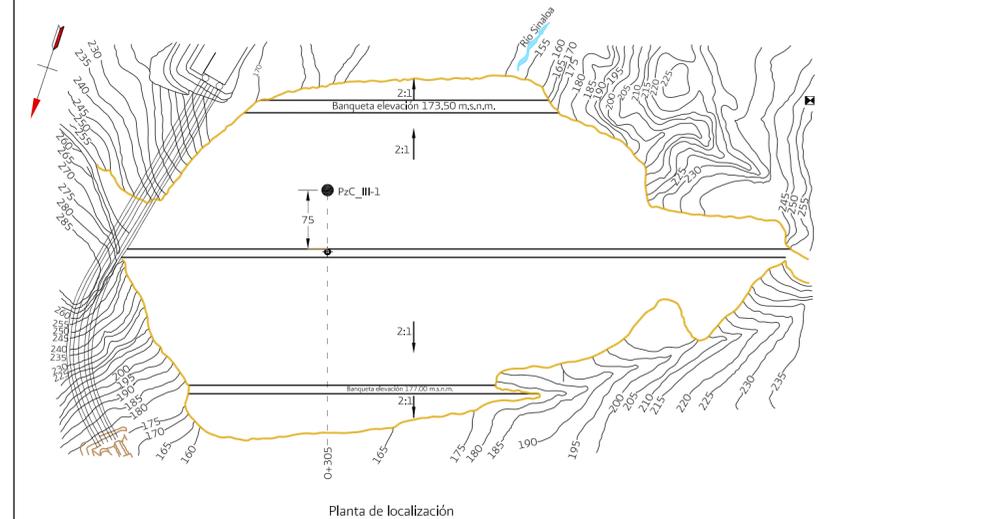
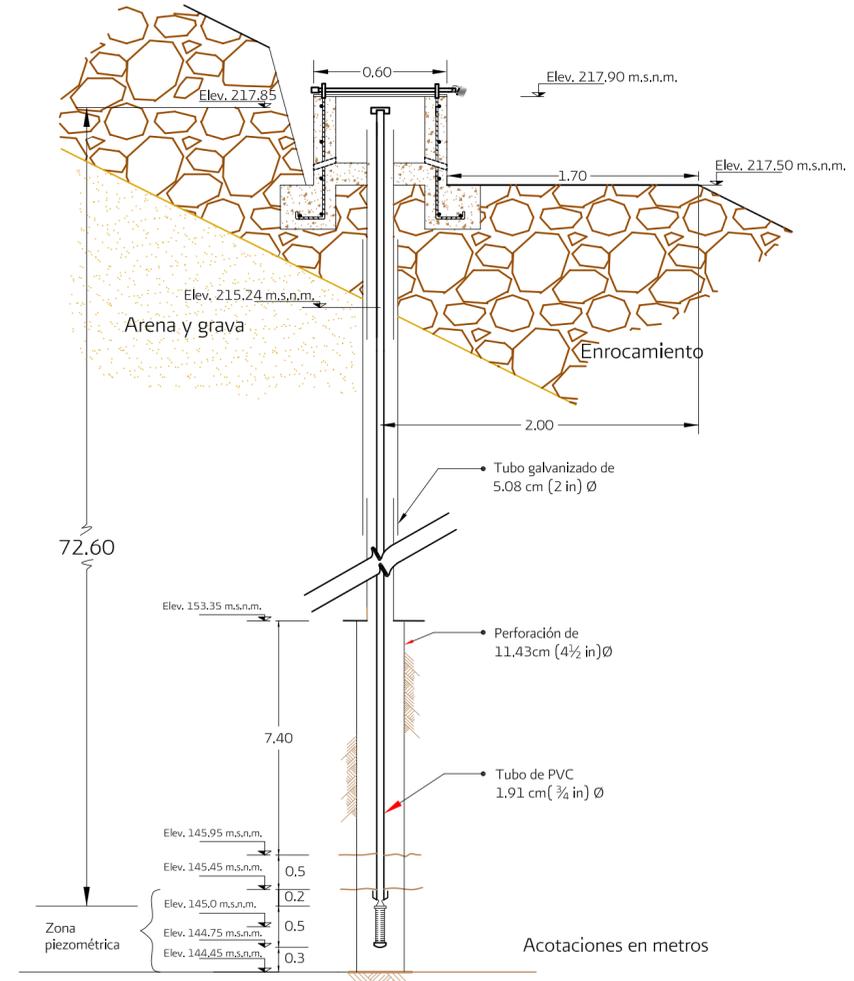
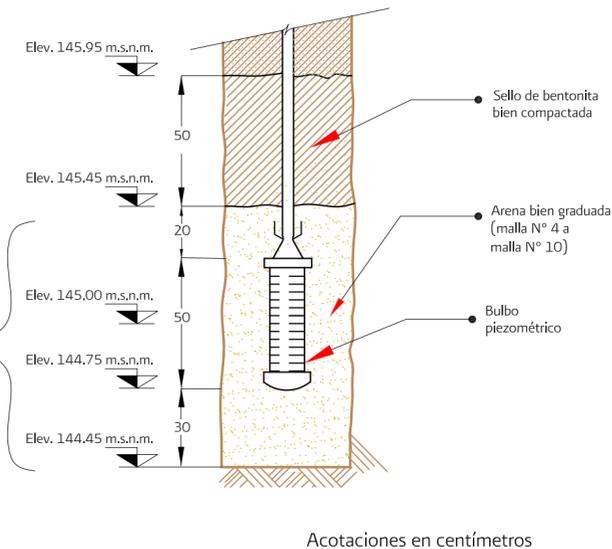
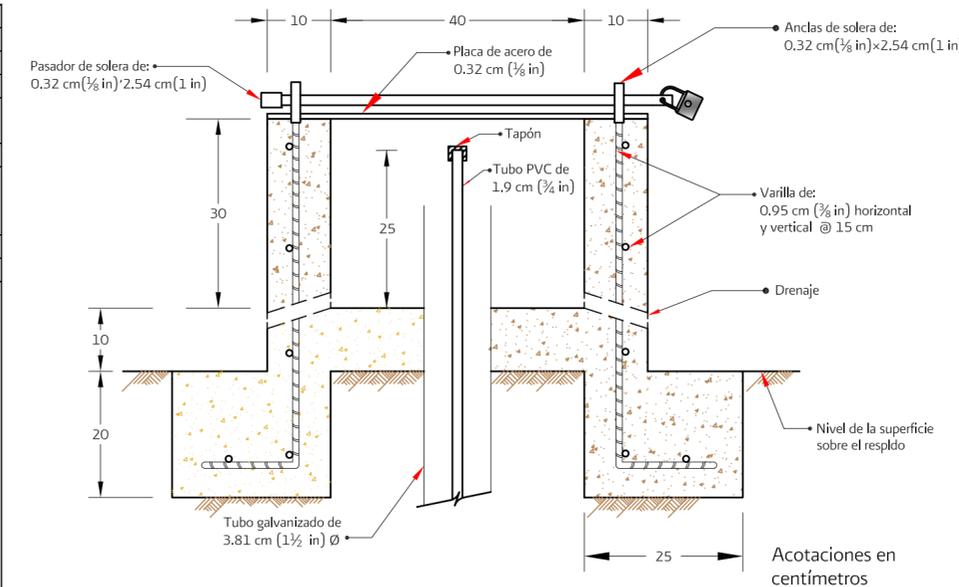


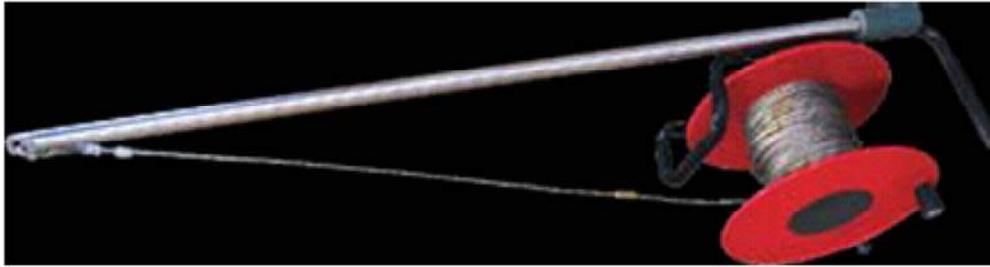
Figura 6.12 Protección de tubería de PVC del piezómetro abierto que atraviesa materiales pétreos, en obra terminada

Figura 6.13 FICHA DE INSTALACIÓN DE PIEZÓMETRO ABIERTO



FORMATO DE PARA REGISTRO DE INSTALACIÓN.	
INSTRUMENTO:	PIEZÓMETRO CASAGRANDE O ABIERTO
NÚMERO DE SERIE: xxxxxx	CÓDIGO: PzC- III - 1
DATOS DE LA PERFORACIÓN	
Coordenadas de barreno	
X = _____ m; Y _____ m	Diámetro de la perforación: 11.43 cm (4.5 in)
Z = _____ m	Diámetro del ademe (HW): 10.16 cm (4 in)
Longitud del barreno: 8.90 m	Elev. del fondo: 144.45 m
Desviación: 0	
Materiales atravesados:	
Material:	Aluvión; de 144.45 m a 153.35 m
Fecha de inicio: día/mes/año	Fecha de terminación: día/mes/año
DATOS DE INSTALACIÓN	
Diámetro del bulbo : 5.04 cm (2 in); Longitud de del bulbo: 50 cm;	
Diámetro de la tubería de PVC. 1.91 cm (3/4 in); Elevación del brocal: 217.85 m	
Elevación del fondo del bulbo piezométrico: 144.75 m; Longitud de la tubería: 72.60 m	
Sello de fondo: Espesor No _____ m; de _____ m a _____ m	
Filtro: Espesor 1.00 m; de 144.45 m a 145.45 m	
Material. Arena bien graduada	
Sello superior: Espesor 0.50 m; de 145.45 m a 145.95 m	
Material: Bentonita	
Relleno de mortero (arena cemento bentonita): Espesor 7.40 m ; de 145.95 m a 153.35 m	
Proporciones de la mezcla: Arena/Cemento (2/1); 3% Peso de cemento.	
Relleno final del barreno: Espesor 61.89 m ; de 153.35 m a 215.24 m	
Materiales: Material del cuerpo de la cortina; arena y grava;	
Espesor 2.26 m; de 215.24 m a 217.50 m; material de enrocamiento, de respaldo.	
Elevación del agua antes de la instalación: 0.00 m	
Fecha de instalación: _____	Primera lectura: _____
CALIDAD DE LA INSTALACIÓN	
Verificación de lavado del barreno :	ok
Verificación de no obstrucciones:	ok
Verificación de seguridad de la instalación:	Caja de concreto reforzado, con tapa y candados especiales
Observaciones:	
Instaló:	Midió:
Medición topográfica:	Supervisó:

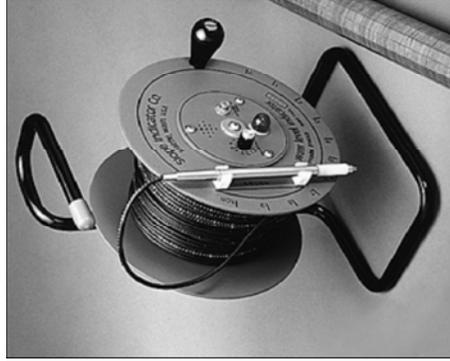




a) Cortesía de Rst Instruments



b) Cortesía de Migs Geosense

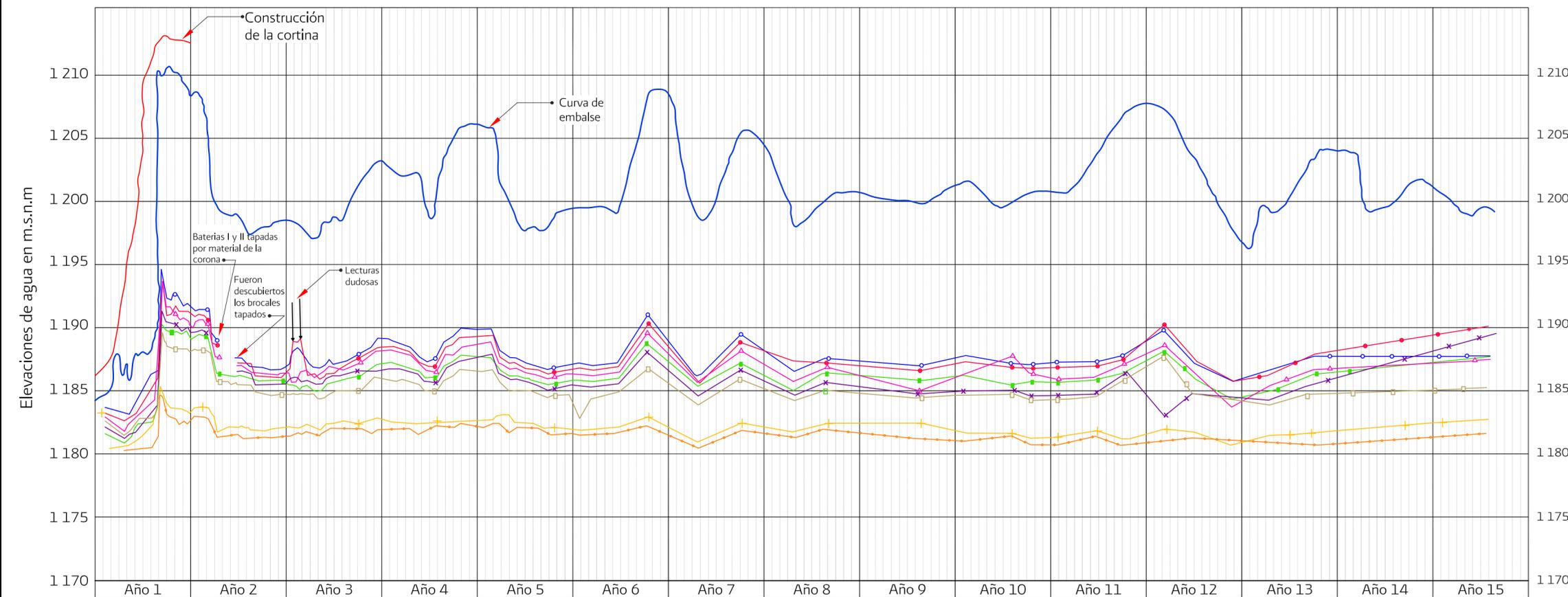


c) Cortesía de Slope Indicator

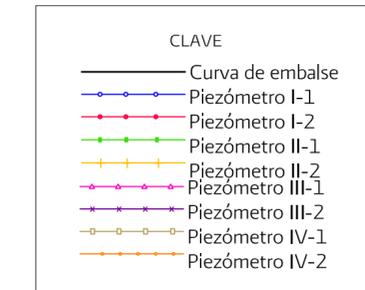
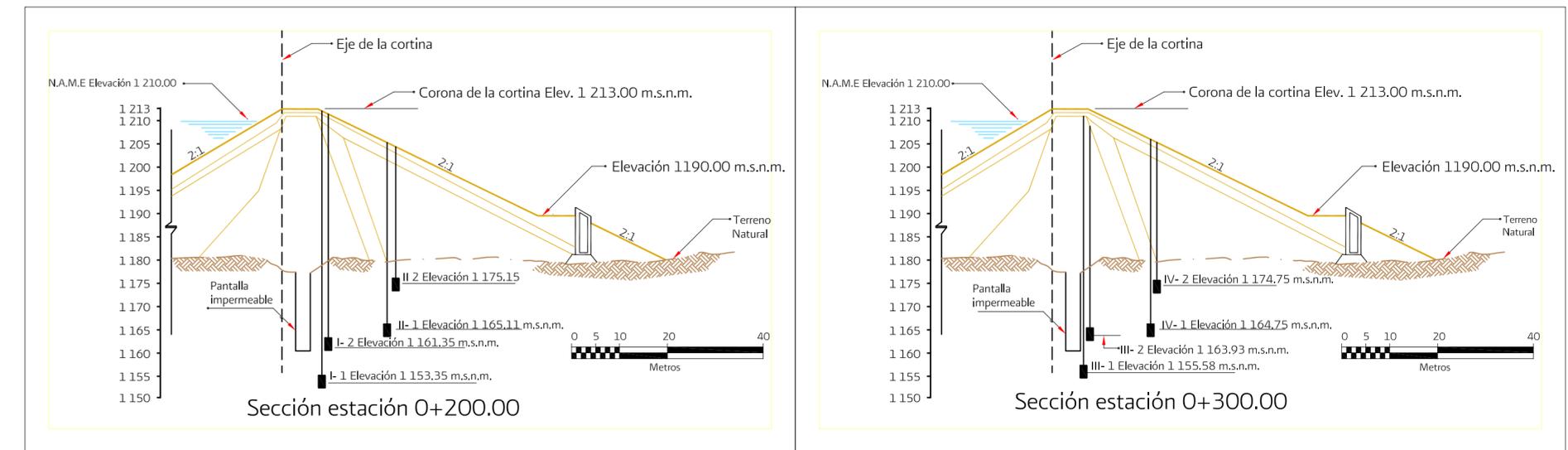


d) Cortesía de Sisgeo

Figura 6.1.4 Tipos de sondas eléctricas para medir nivel de agua en piezómetro abierto



Localización de piezómetros tipo abierto




COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 6.15 GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS LECTURAS DE PIEZÓMETROS ABIERTOS

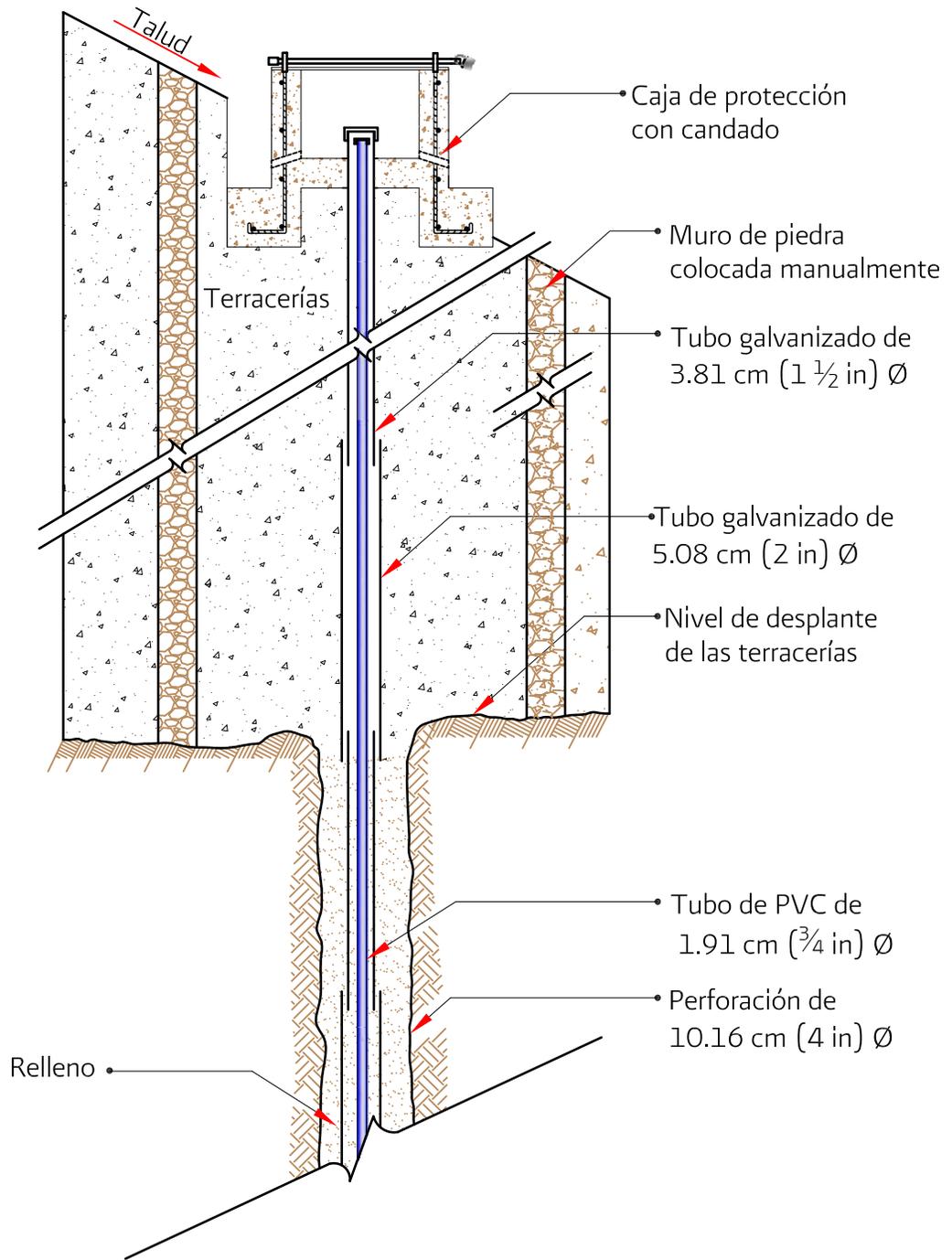


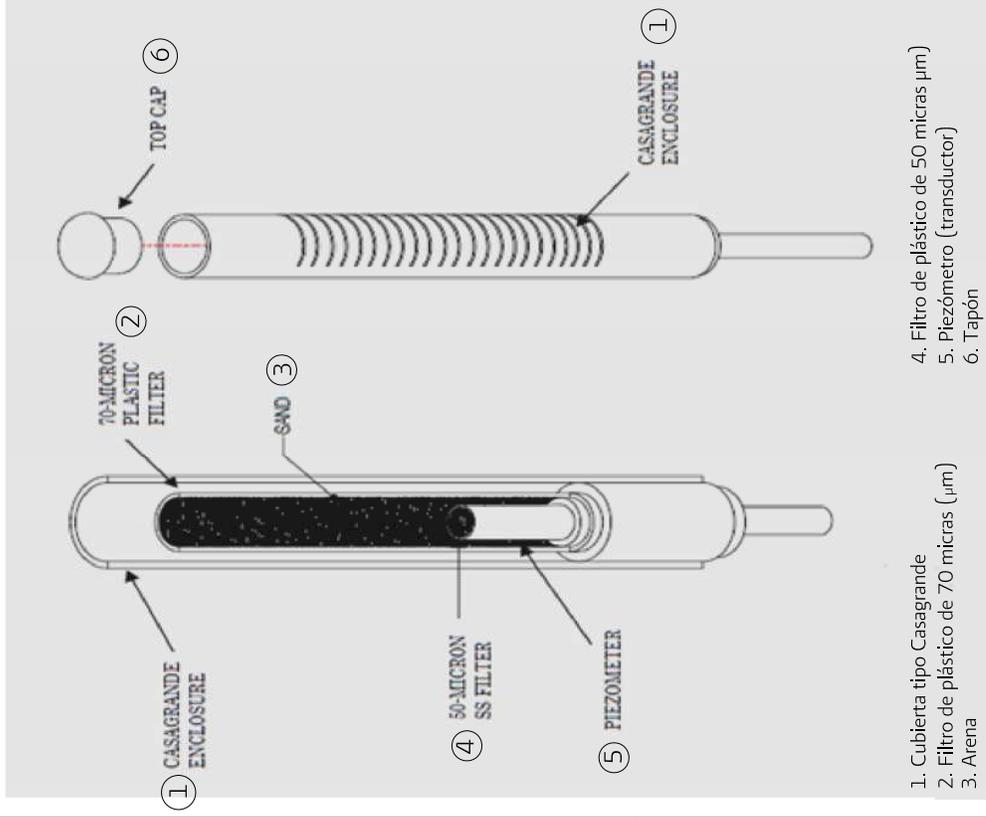
Figura 6.8a Protección de tubería de piezómetro abierto que atraviesa materiales gruesos de reza o rocas en respaldo



a) Tipos de piezómetros neumáticos (cortesía de Rst instruments)



b) Piezómetro neumático con filtro cerámico de 50 μm o 1 μm de poro (Cortesía de Soil Instruments)



c) Arreglo general del piezómetro neumático protegido con tubo de piezómetro tipo Casagrande (cortesía de Rst instruments)

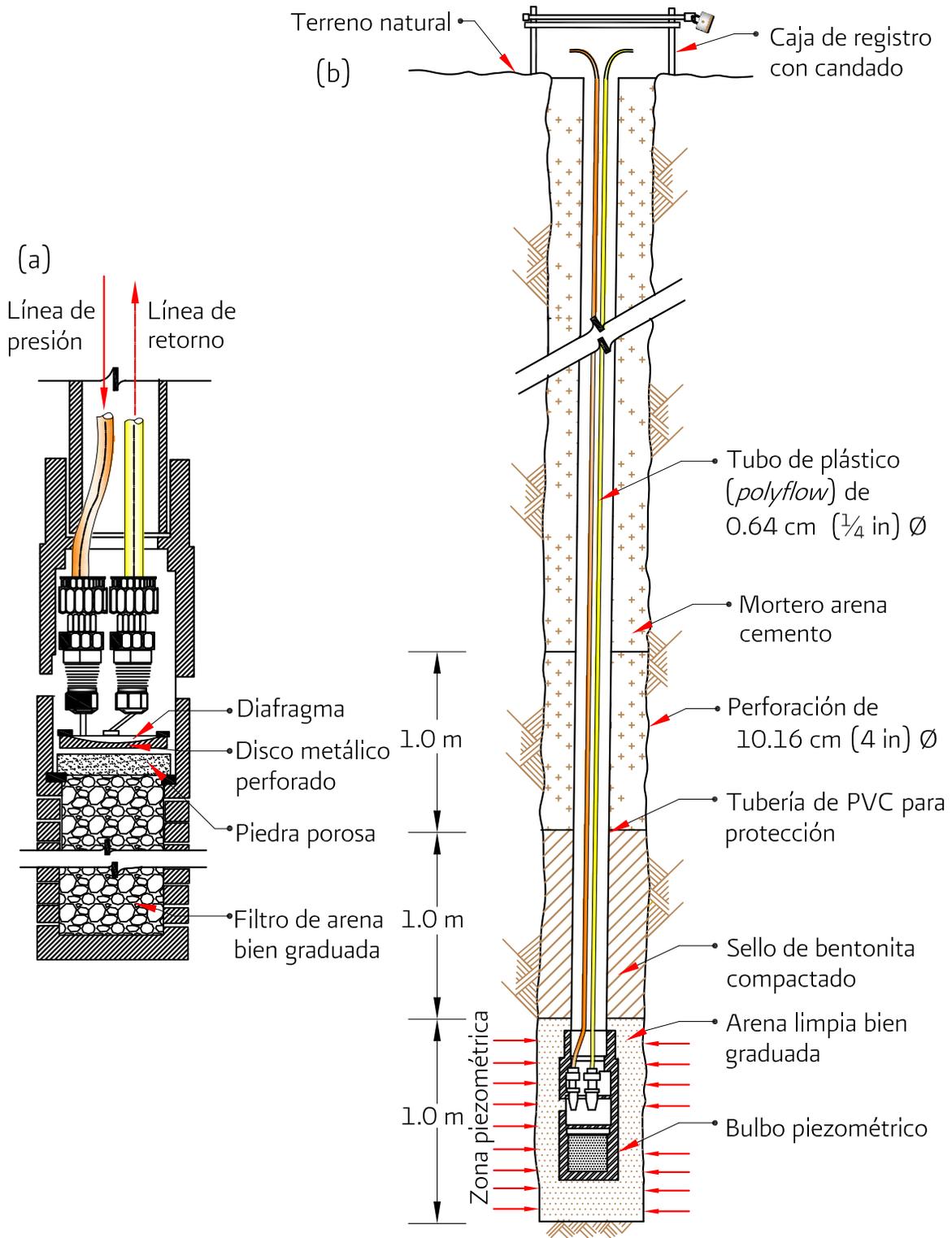


Figura 6.17 Piezómetro neumático:
 a) Arreglo de los componentes del bulbo piezométrico,
 b) Instalación y sellado de piezómetro neumático en barreno

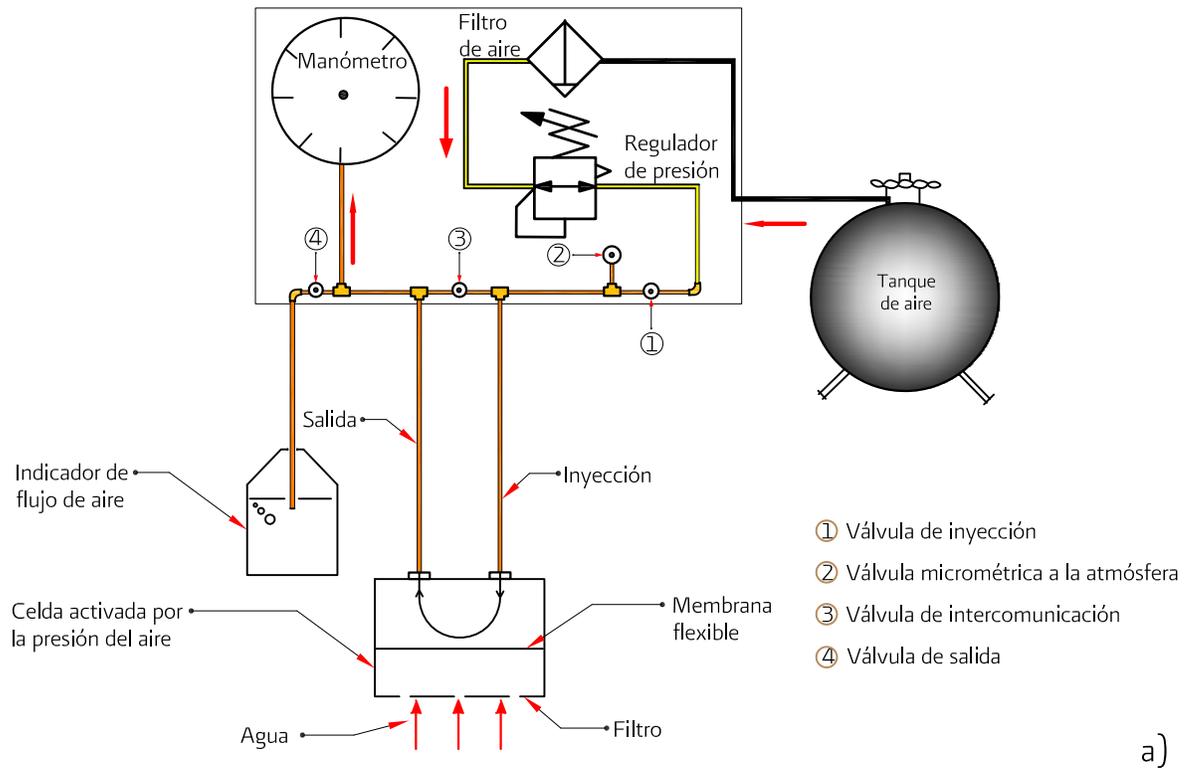
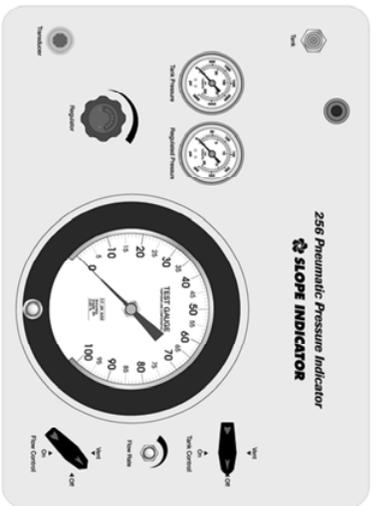
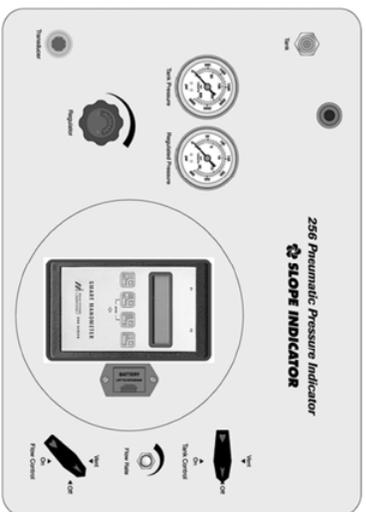


Figura 6.18 Sistema de toma de lecturas de piezómetro neumático:
a) Diagrama del sistema,
b) Gabinete de activación (cortesía de Sisgeo)



a) (Cortesía de Slope Indicator)



b) (Cortesía de Slope Indicator)



c) (Cortesía de Slope Indicator)



- Internal Tank Pressure 1. Tanque de presión Integrado
- Bypass Valve 2. Válvula de paso
- Display Screen 3. Pantalla de datos
- Backlight 4. Lámpara
- ESC (navigates back a menu) 5. ESC (un menú de soporte de navegación)
- Scroll Up 6. Desplazamiento hacia arriba
- Scroll Down 7. Desplazamiento hacia abajo
- Enter 8. Inicio
- Serial Connection (RS232) 9. Conexión de señal
- Serial Number Plate/Calibración Date 10. Placa de número de serie/ Fecha de calibración
- Tank Valve 11. Válvula del tanque
- Tank Input 12. Entrada al tanque
- Piezometer Input 13. Entrada al piezómetro

d) (Cortesía de Rst Instruments)

Figura 6.19 Paneles de control de flujo de gas para medir la presión de poro en piezómetros neumáticos: a) con indicador analógico, b) con indicador digital, c) equipo portátil compactado con indicador digital, d) panel de control de toma de datos

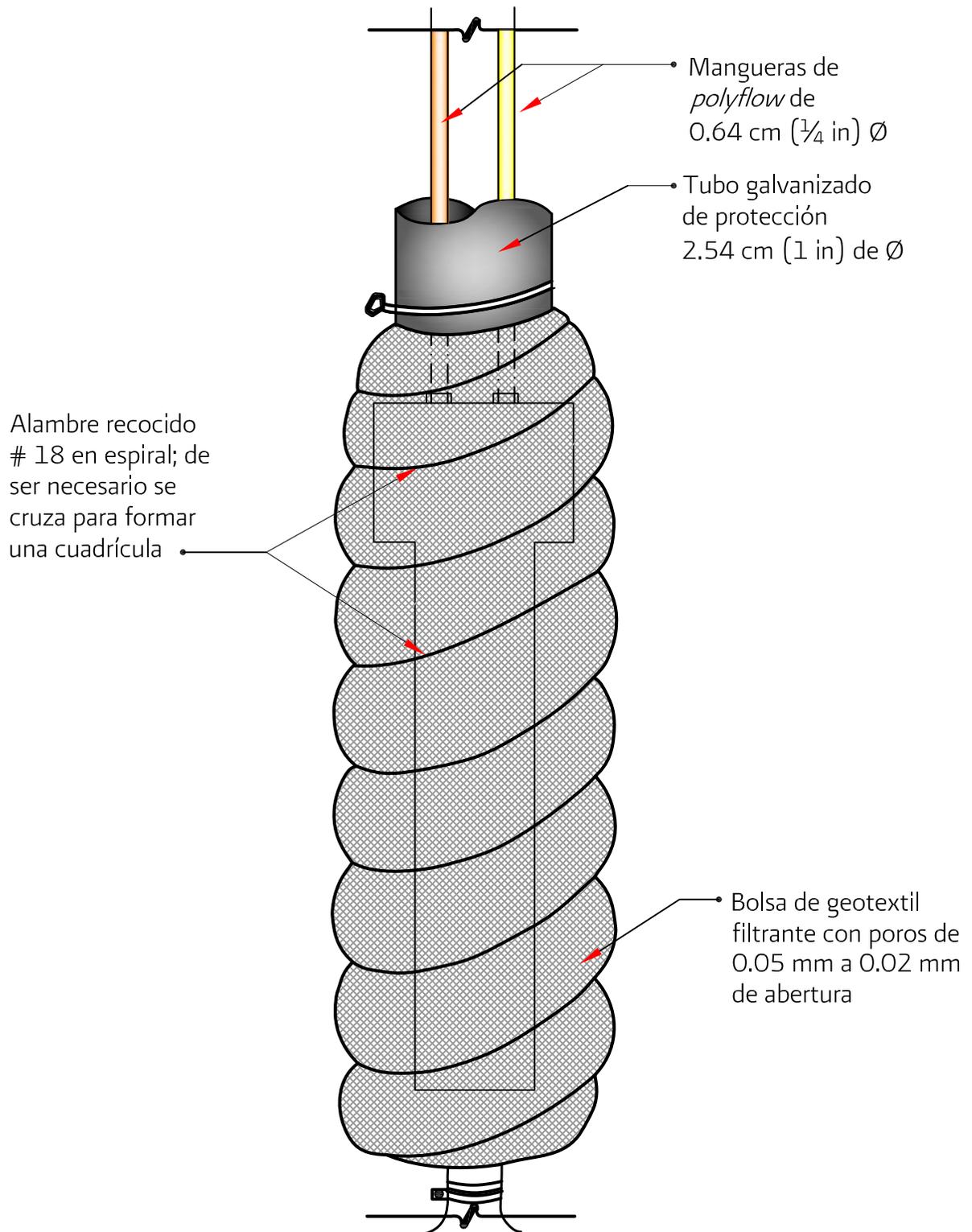
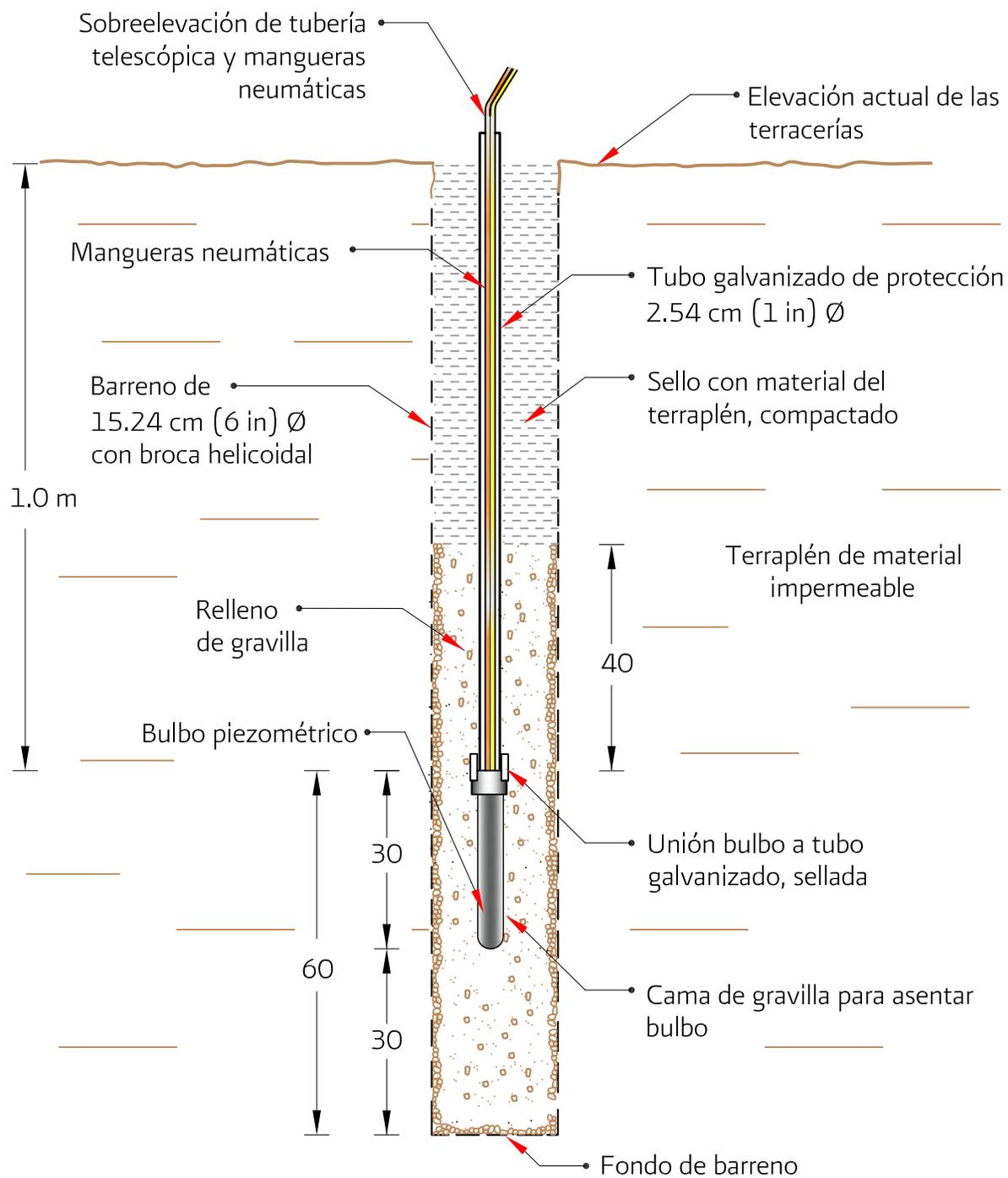
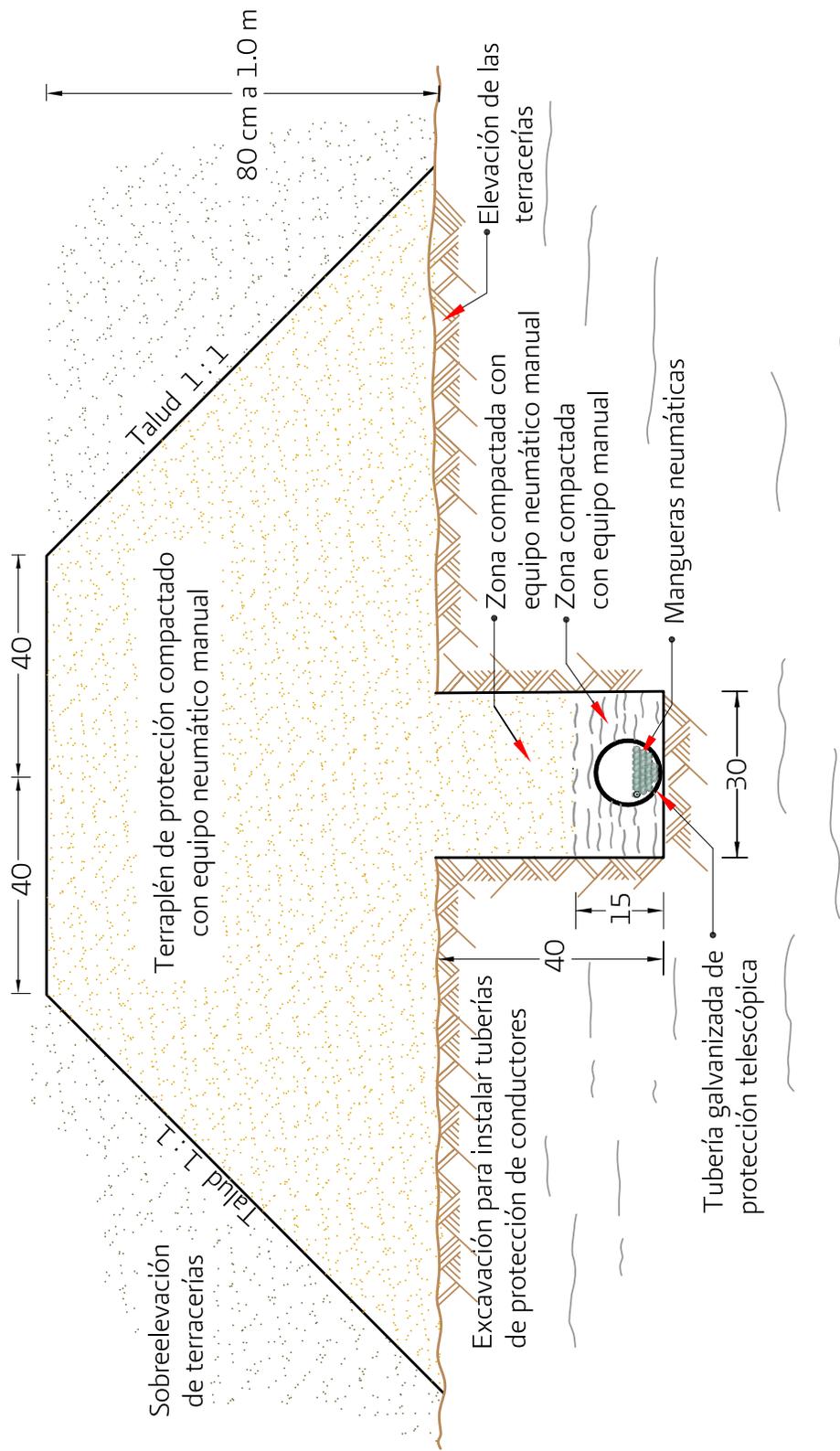


Figura 6.20 Bulbo piezométrico neumático empacado en arena y en bolsa de geotextil



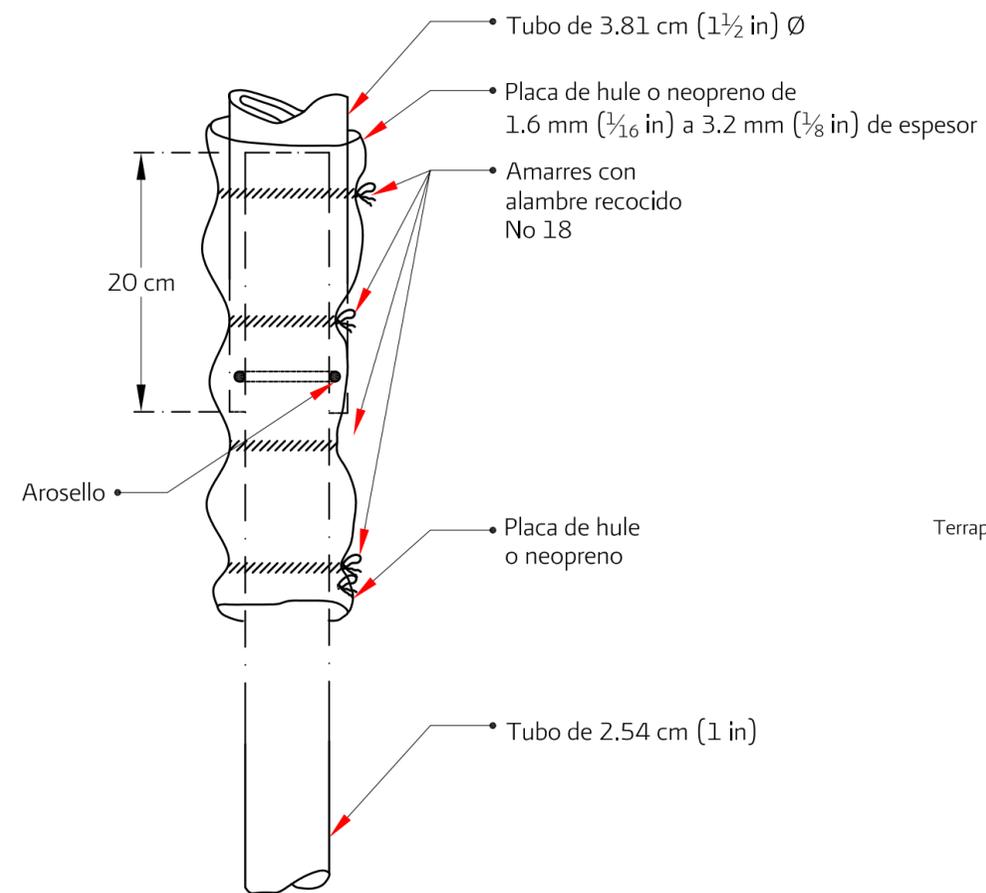
Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad

Figura 6.21 Instalación de piezómetro neumático en material impermeable

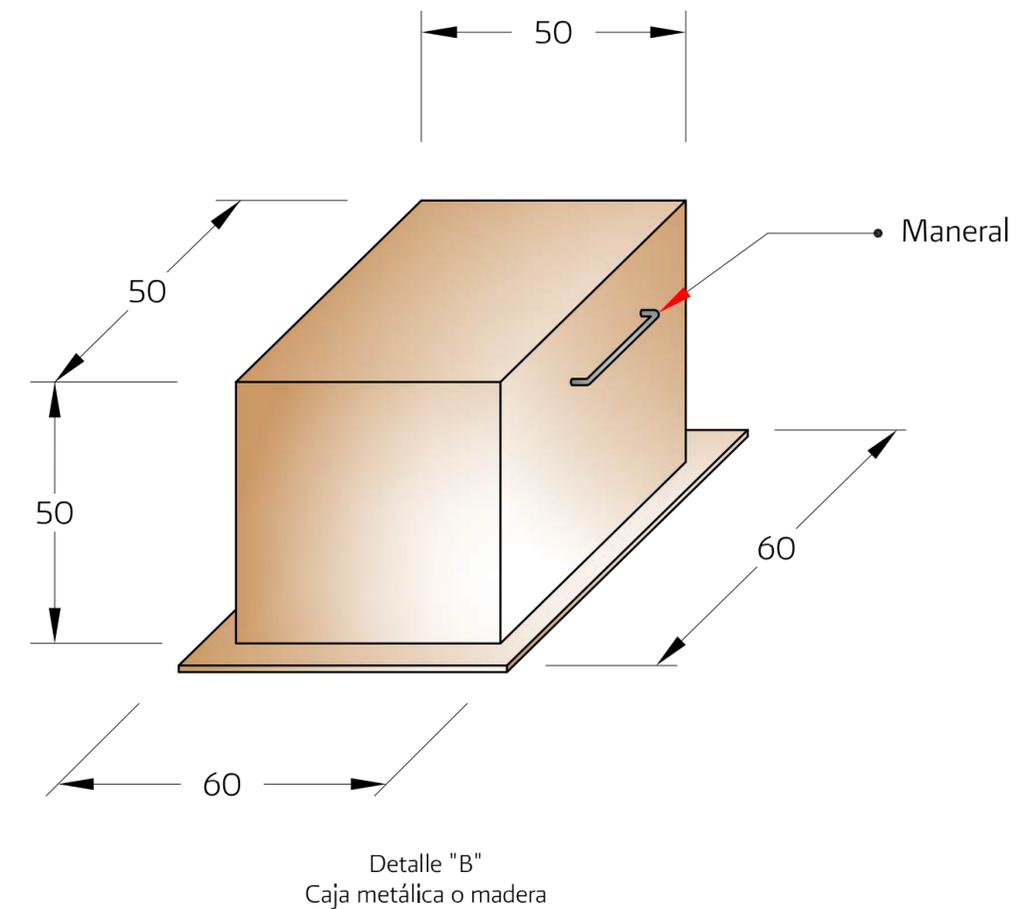
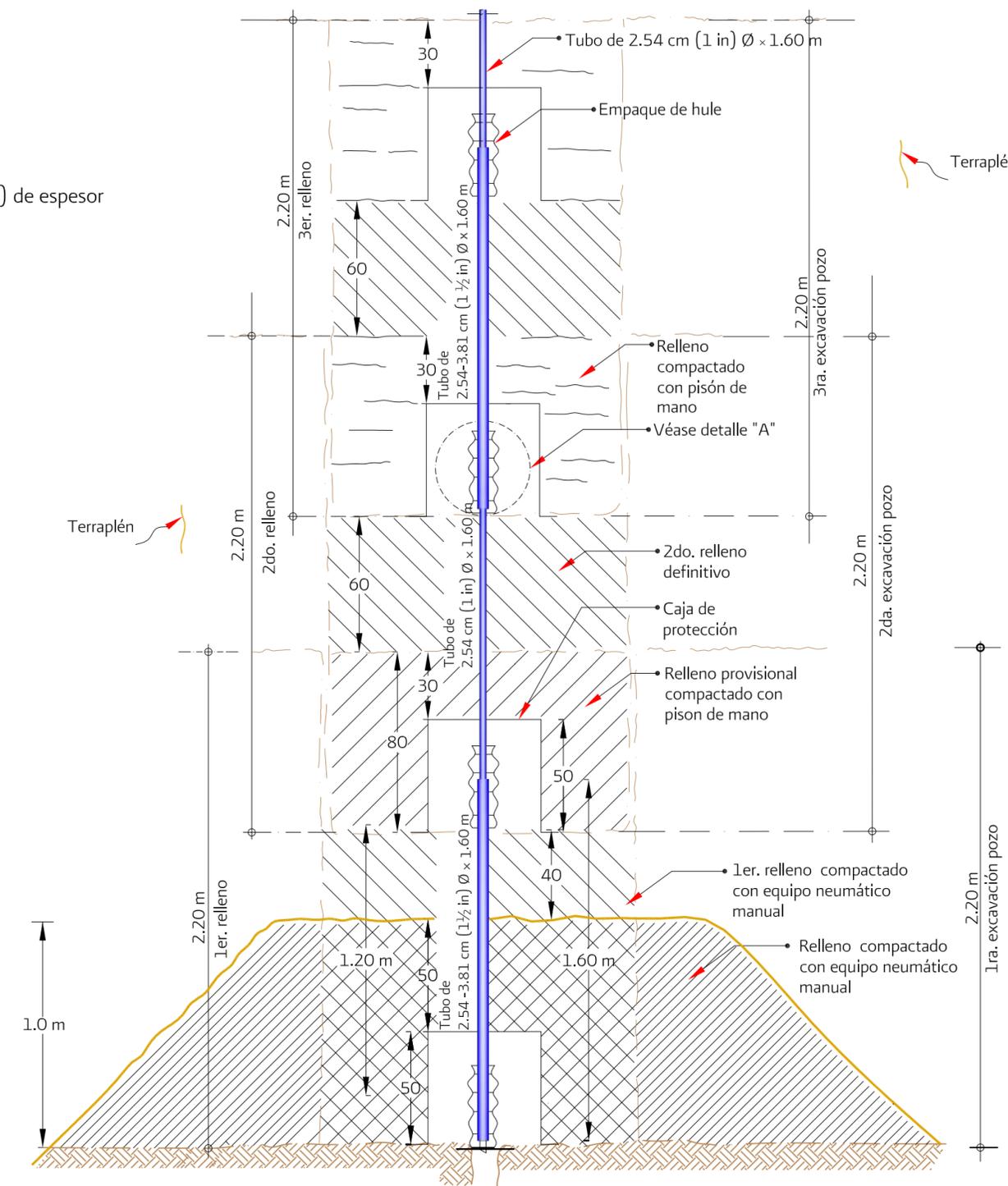


Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad

Figura 6.22 Zanja y terraplén para protección de tubería de piezómetro neumático

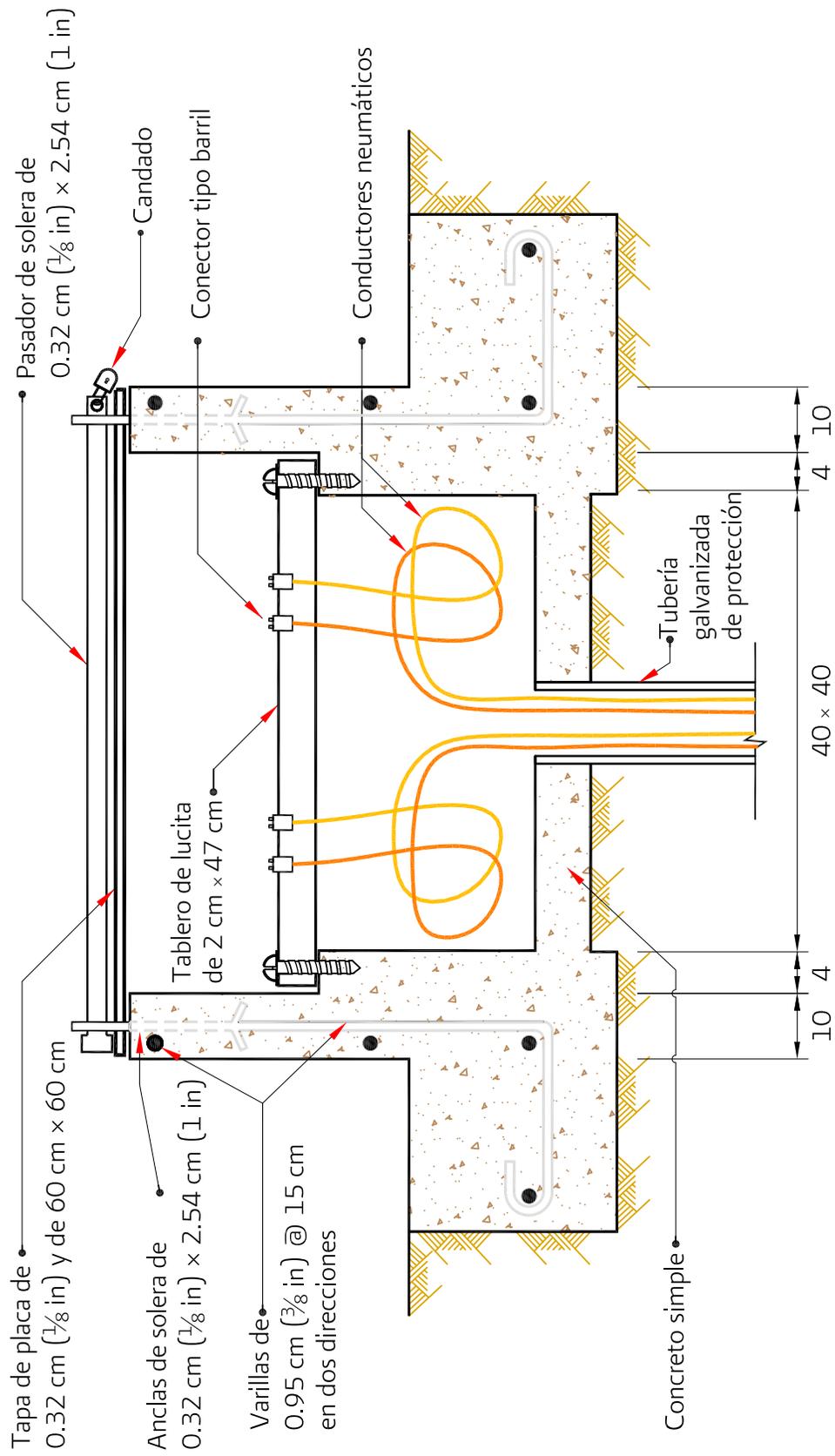


Detalle "A"
"Envoltura con placa de hule o neopreno"



Acotaciones en centímetros, excepto las que se indican en otra unidad.


COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS
Figura 6.23 ETAPA DE PROTECCIÓN DE TUBERÍA DE PIEZÓMETRO NEUMÁTICO DURANTE LA COLOCACIÓN DE TERRACERÍAS EN NÚCLEO IMPERMEABLE



Acotaciones en centímetros

Figura 6.24 Caja de concreto armado para protección de tuberías y mangueras de piezómetros neumáticos

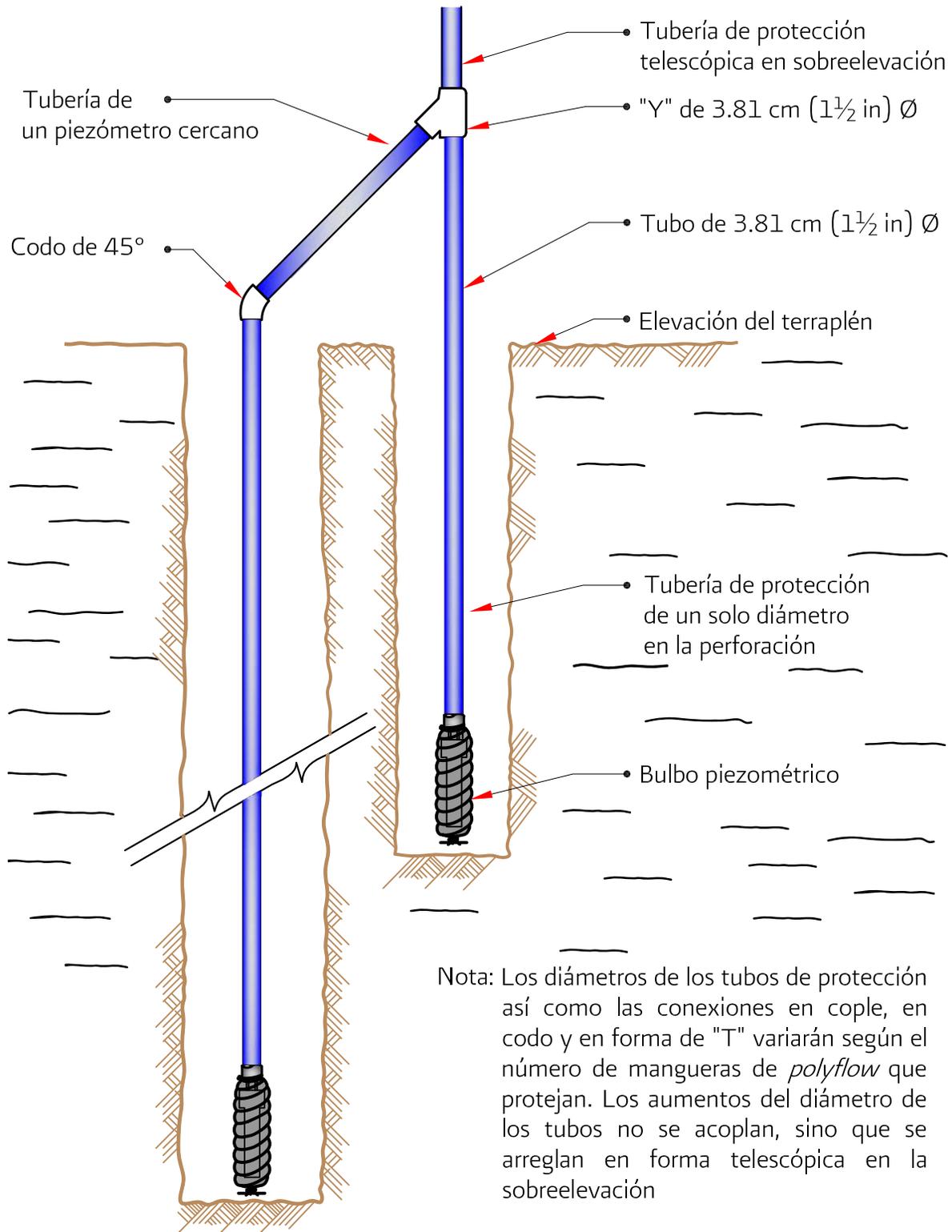


Figura 6.25 Arreglo de tuberías verticales para proteger las mangueras de los piezómetros neumáticos instalados en batería a diferentes elevaciones

Nota: Los diámetros de los tubos de protección, codos y conexiones en "T", variarán según el número de mangueras de *polyflow* que protejan y las extensiones de los tubos serán telescópicas

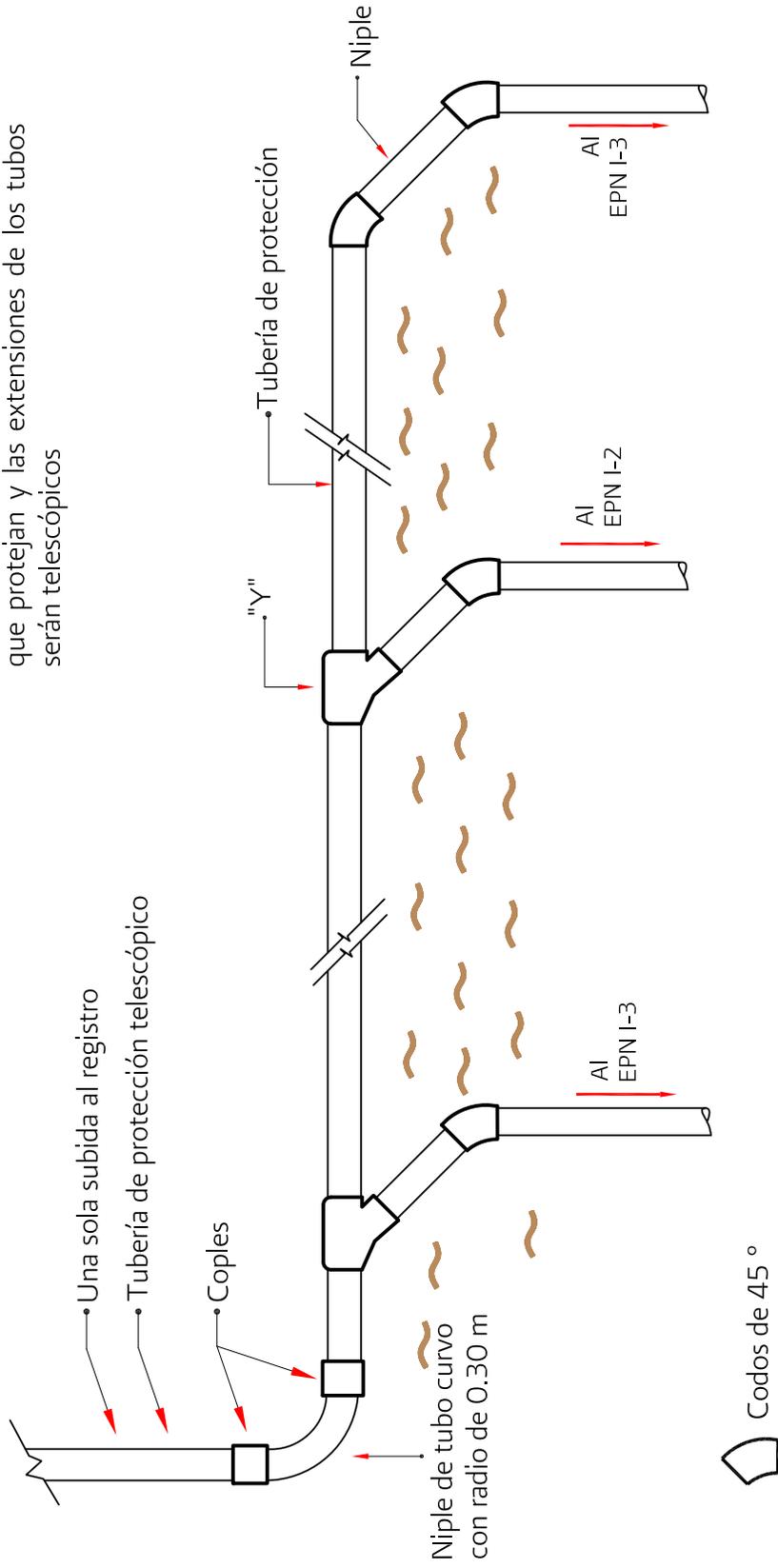


Figura 6.26 Arreglo de tuberías horizontales para protección de las mangueras de los piezómetros neumáticos instalados en batería en una misma elevación

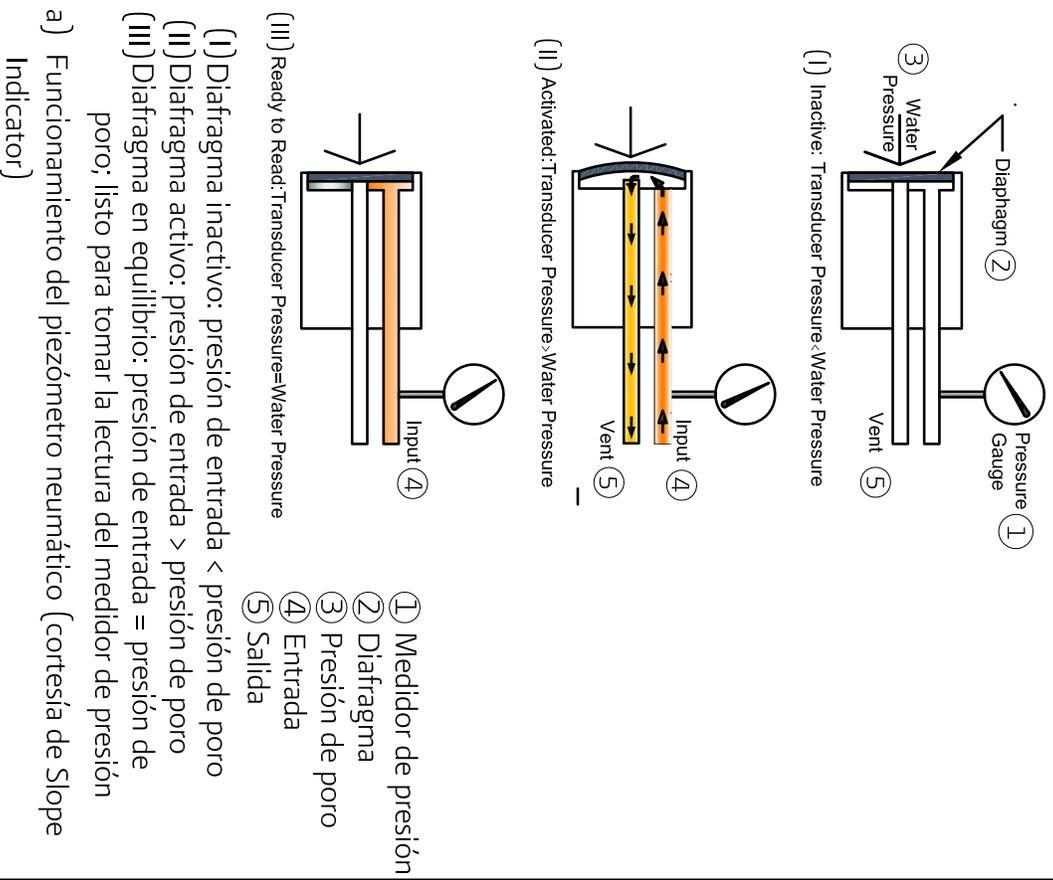


Figura 6.27 a) Principio del funcionamiento del diafragma del piezómetro neumático,
b) Gabinete de activación y lectura

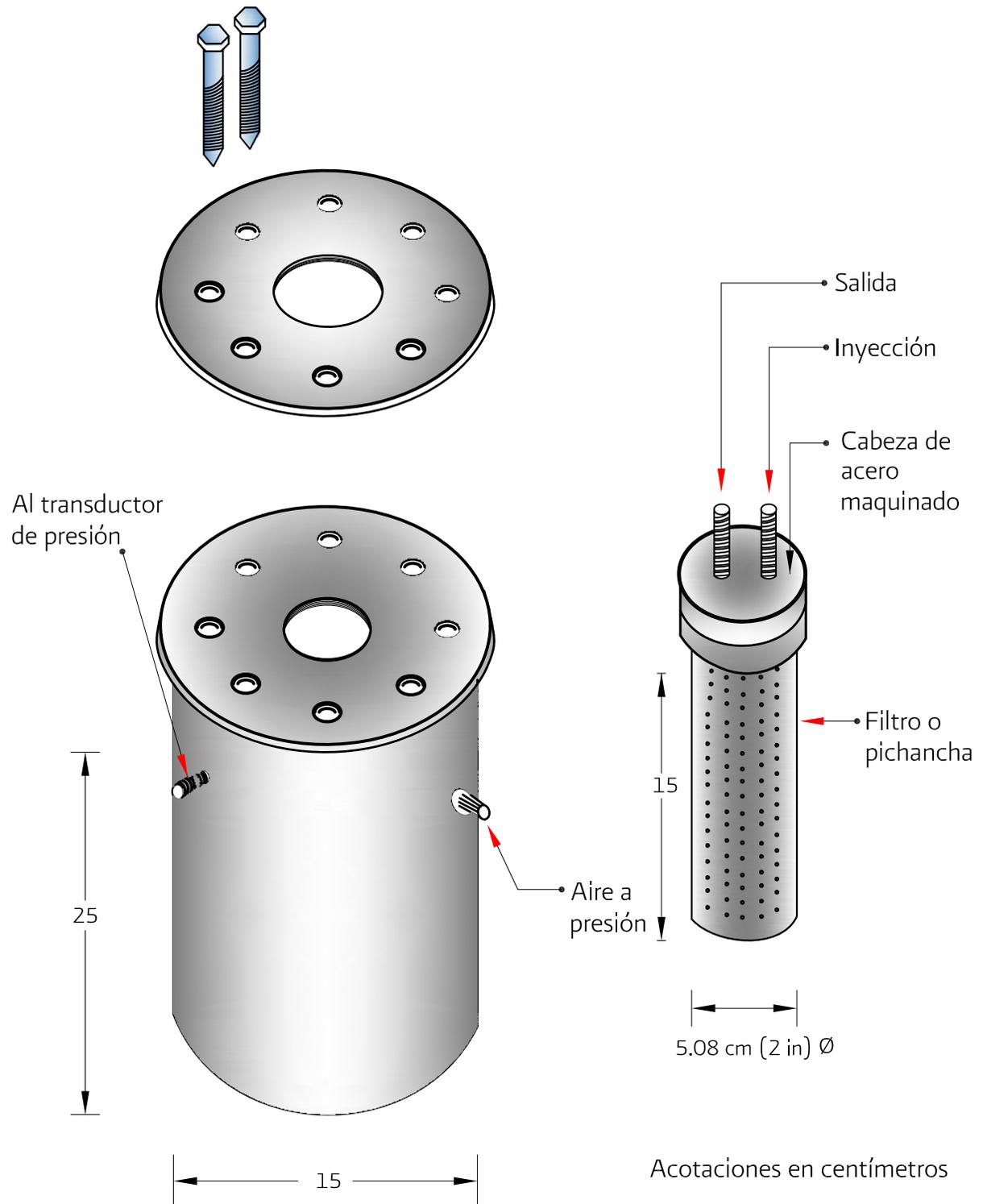


Figura 6.28 Cilindro hermético para la calibración del piezómetro neumático

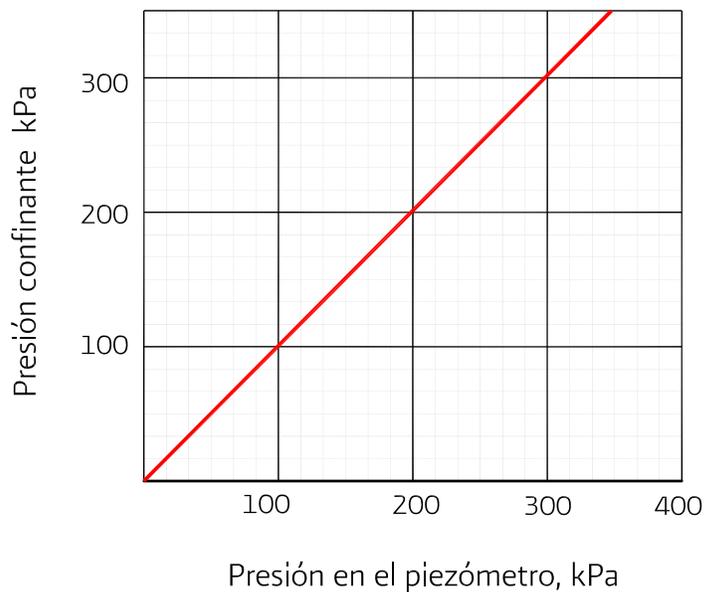
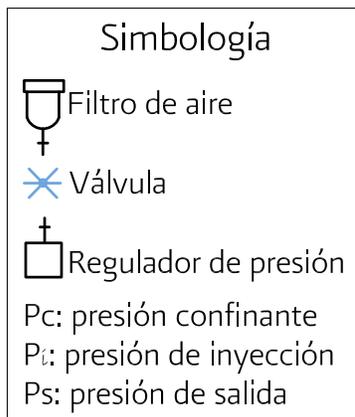
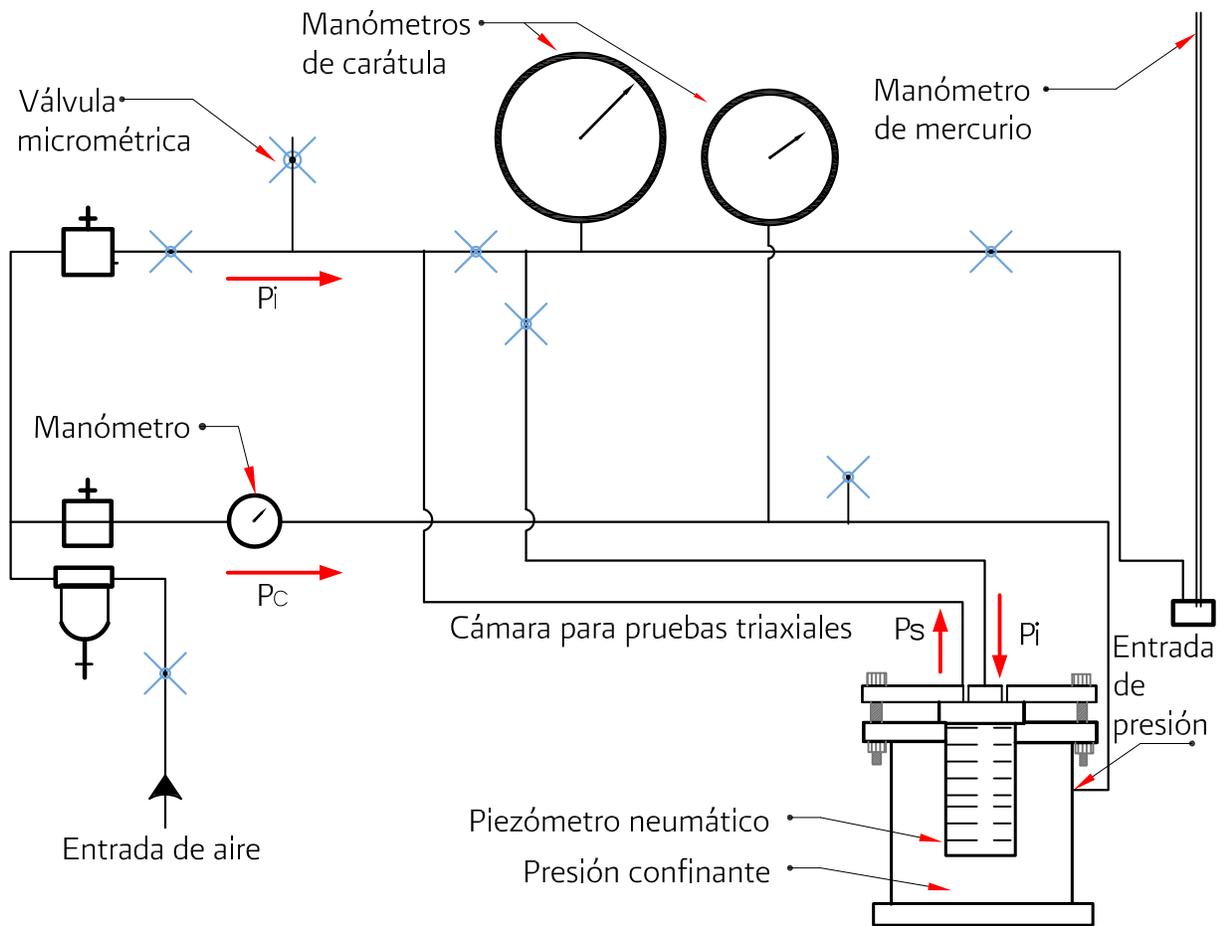
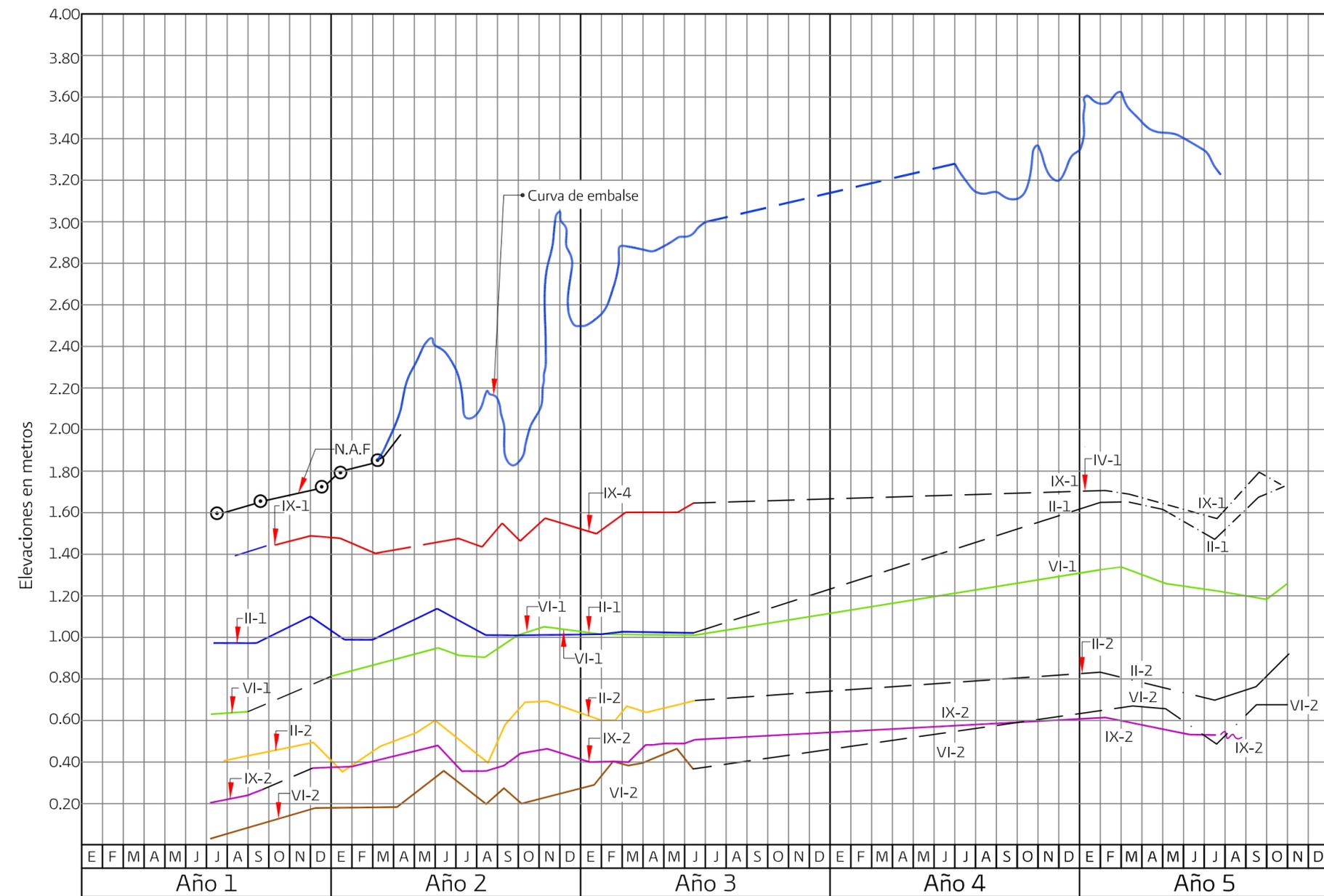
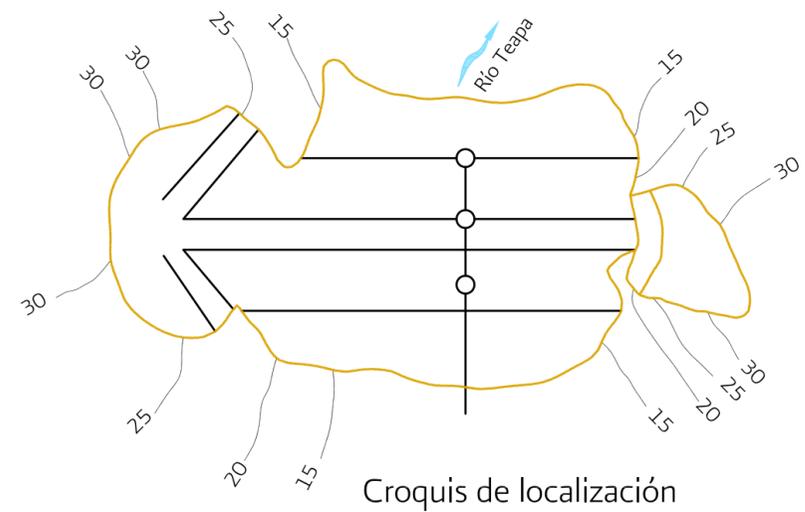


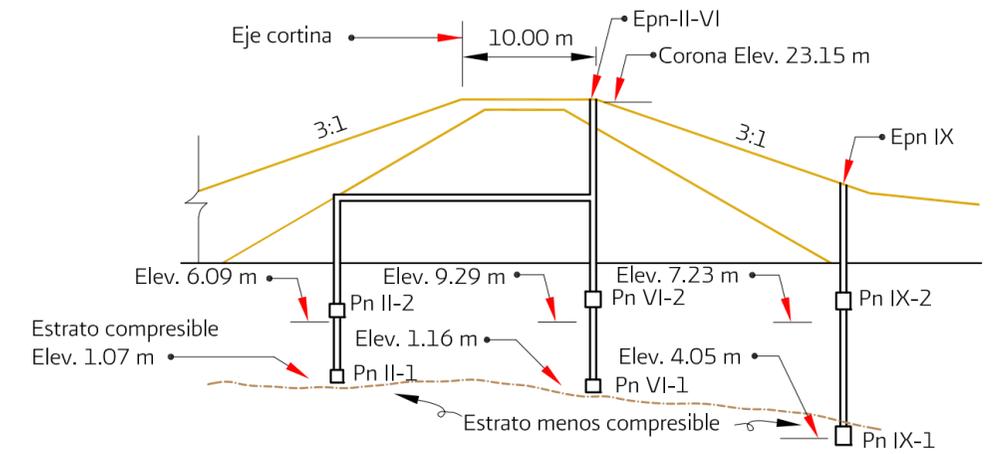
Figura 6.29 Diagrama del sistema de calibración de piezómetros neumáticos y gráfica resultante



Elevaciones en m.s.n.m.



Croquis de localización



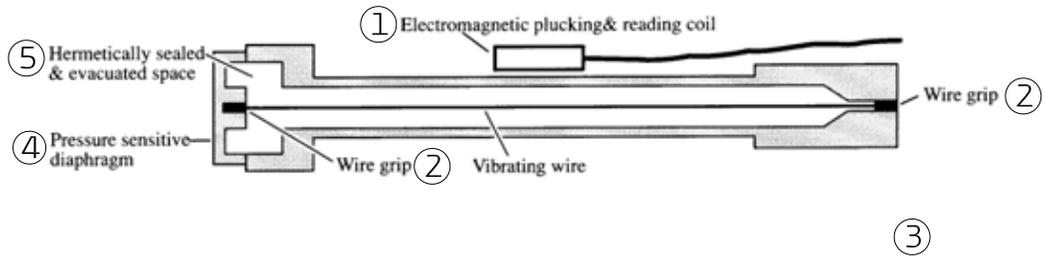
Sección estación 0+135

Piezómetros	
Numero	Elev. bulbo (m)
Pn-II-1	1.07
Pn-II-2	6.09
Pn-VI-1	1.16
Pn-VI-2	9.29
Pn-IX-1	-4.05
Pn-IX-2	7.23


COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA
 GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA

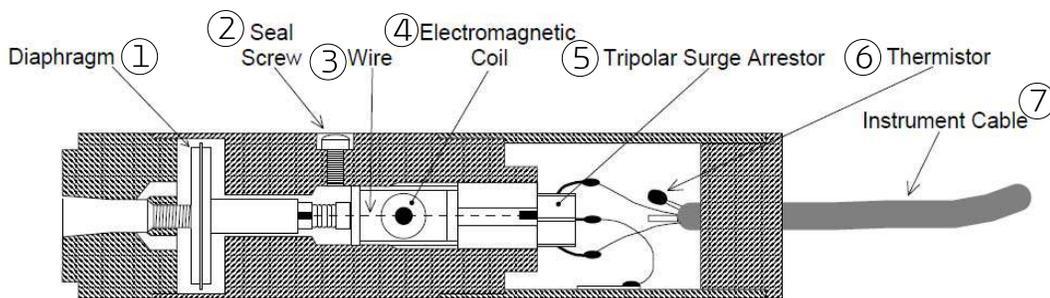
MANUAL DE MECÁNICA DE SUELOS
 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Figura 6.30 GRÁFICA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS LECTURAS EN PIEZÓMETROS NEUMÁTICOS, INSTALADOS EN DIFERENTES SECCIONES DE UNA PRESA



- 1 Bobinas electromagnéticas de excitación y lectura
- 2 Anclaje de la cuerda
- 3 Cuerda vibrante
- 4 Diafragma sensible a la presión
- 5 Cámara de vacío sellada herméticamente

(Cortesía de Geosense)



- 1 Diafragma
- 2 Tornillo de sello
- 3 Cuerda
- 4 Bobina electromagnética
- 5 Protector tripolar de cargas eléctricas
- 6 Semiconductor termómetro
- 7 Cable de señal

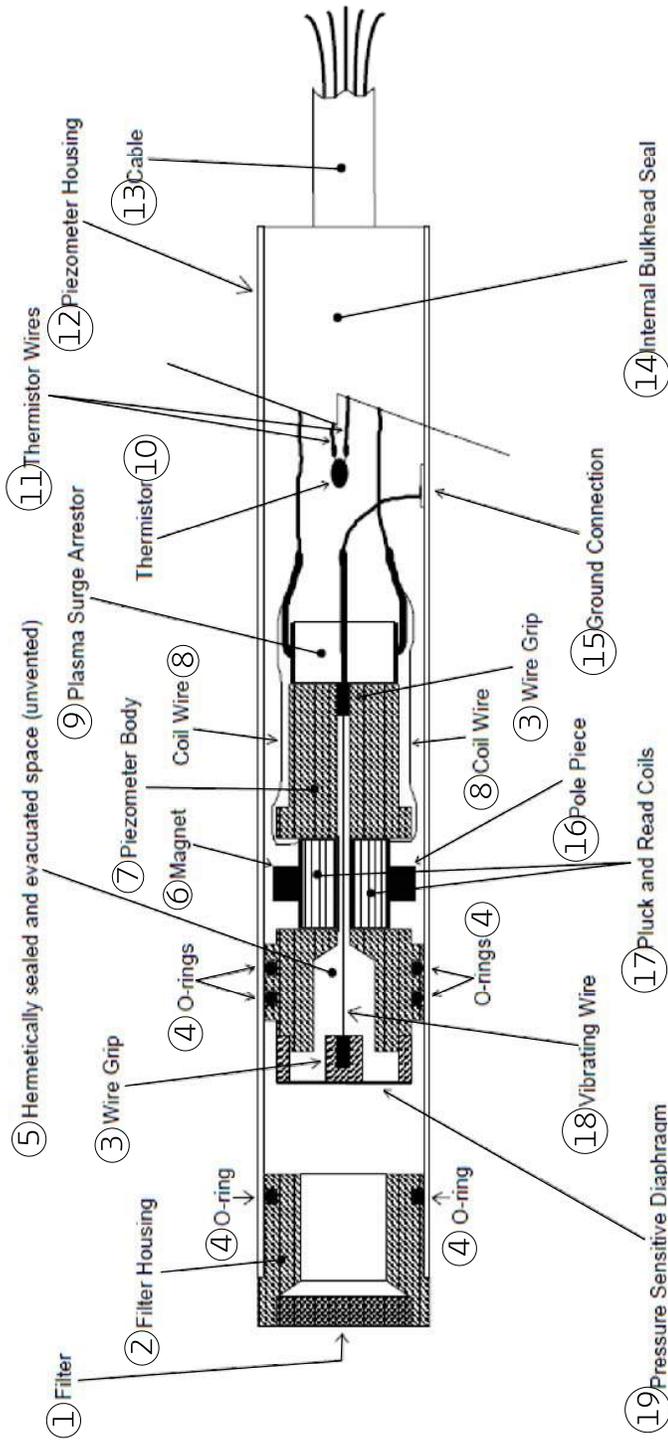
(Cortesía de Geokon)

Figura 6.31 Componentes del piezómetro de cuerda vibrante:

- a) Esquema del sensor diafragma-cuerda,
- b) Arreglo del transductor con sus accesorios en el interior de una cápsula cilíndrica de acero inoxidable

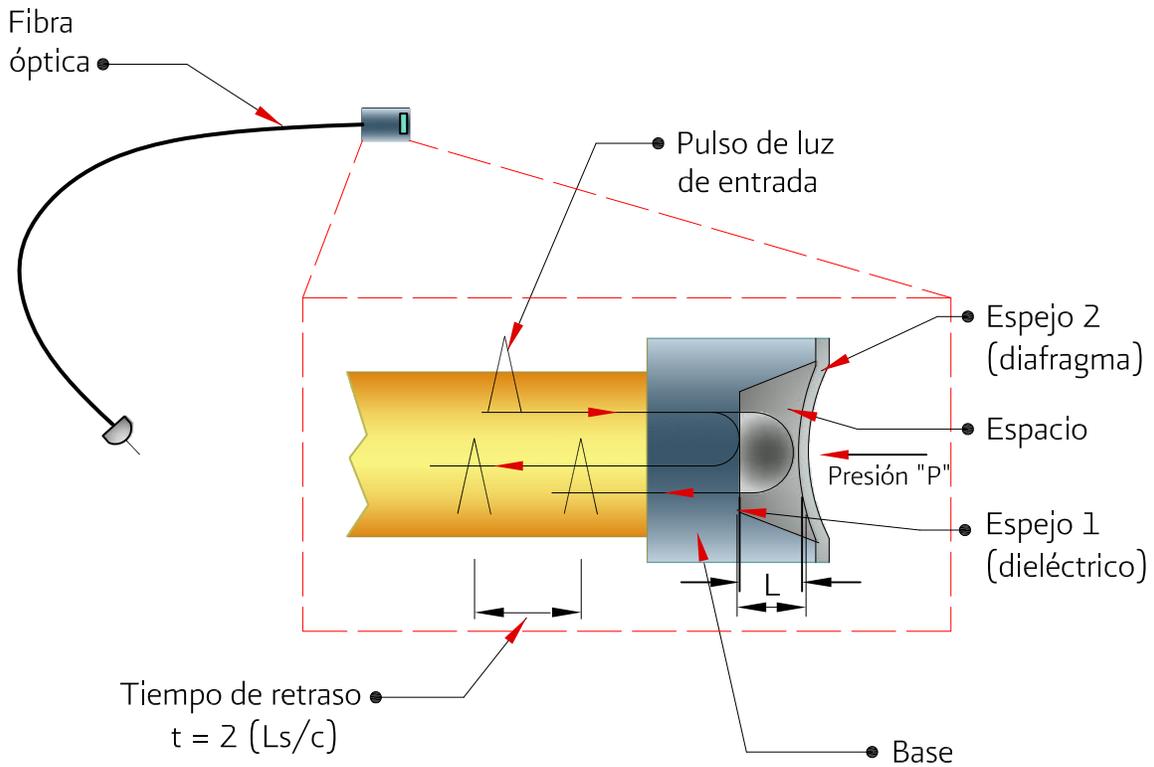


Figura 6.32 Piezómetros de cuerda vibrante existentes en el mercado



- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| 1 Filtro | 7 Cuerpo del piezómetro | 13 Cable de señal |
| 2 Soporte del filtro | 8 Cable de embobinado | 14 Sello aislante interno |
| 3 Anclaje de la cuerda | 9 Protección de plasma contra cargas eléctricas | 15 Conexión a tierra |
| 4 Arosello | 10 Semiconductor termométrico | 16 Polo magnético |
| 5 Cámara de vacío, sellada herméticamente | 11 Cables del semiconductor | 17 Bobina de excitación y lectura |
| 6 Imán | 12 Cubierta del piezómetro | 18 Cuerda vibrante |
| | | 19 Diafragma sensible a la presión |

Figura 6.33 Transductor de presión de cuerda vibrante y el arreglo interno de sus componentes (cortesía de Geokon)



a) Esquema de funcionamiento

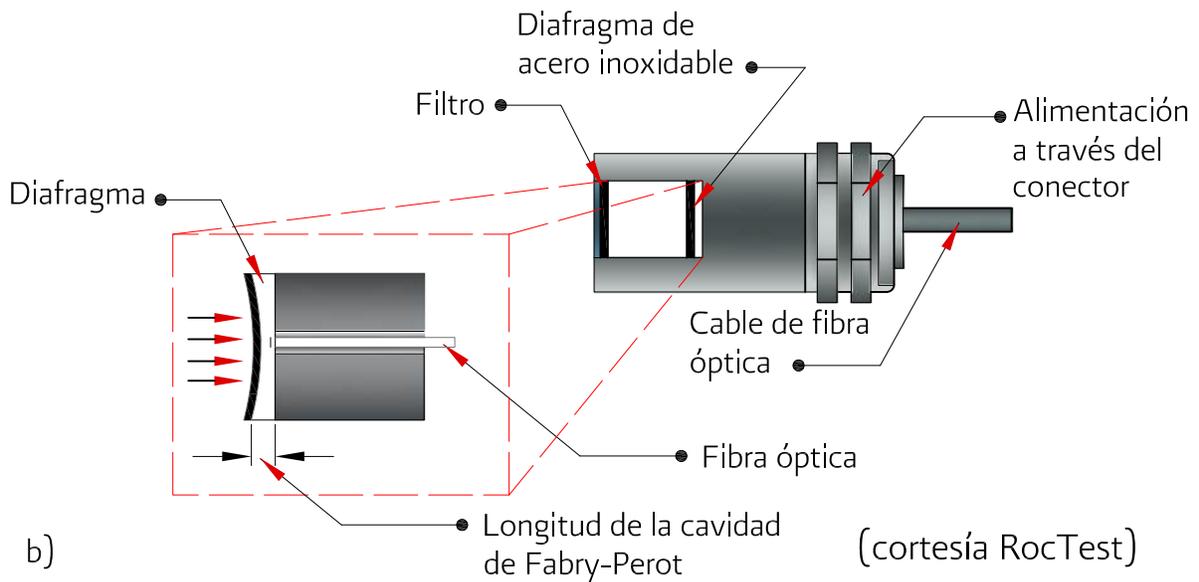


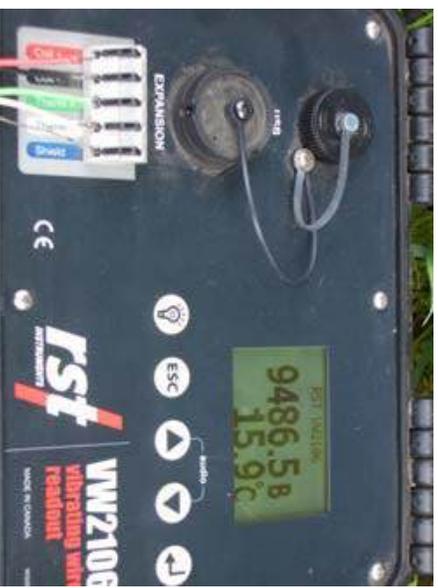
Figura 6.34 Sensor de fibra óptica



Figura 6.35 Piezómetro de cuerda vibrante con filtro (cortesía de Encardio Rite)



a) Piezómetro sumergido en agua potable limpia



b) Unidad de activación y lectura de la cuerda vibratoria

Figura 6.36 Determinación de lectura inicial o lectura base del piezómetro de cuerda vibrante (cortesía de Geosense)



Figura 6.37 Verificación y preparación de un piezómetro eléctrico (cortesía de Geosense)

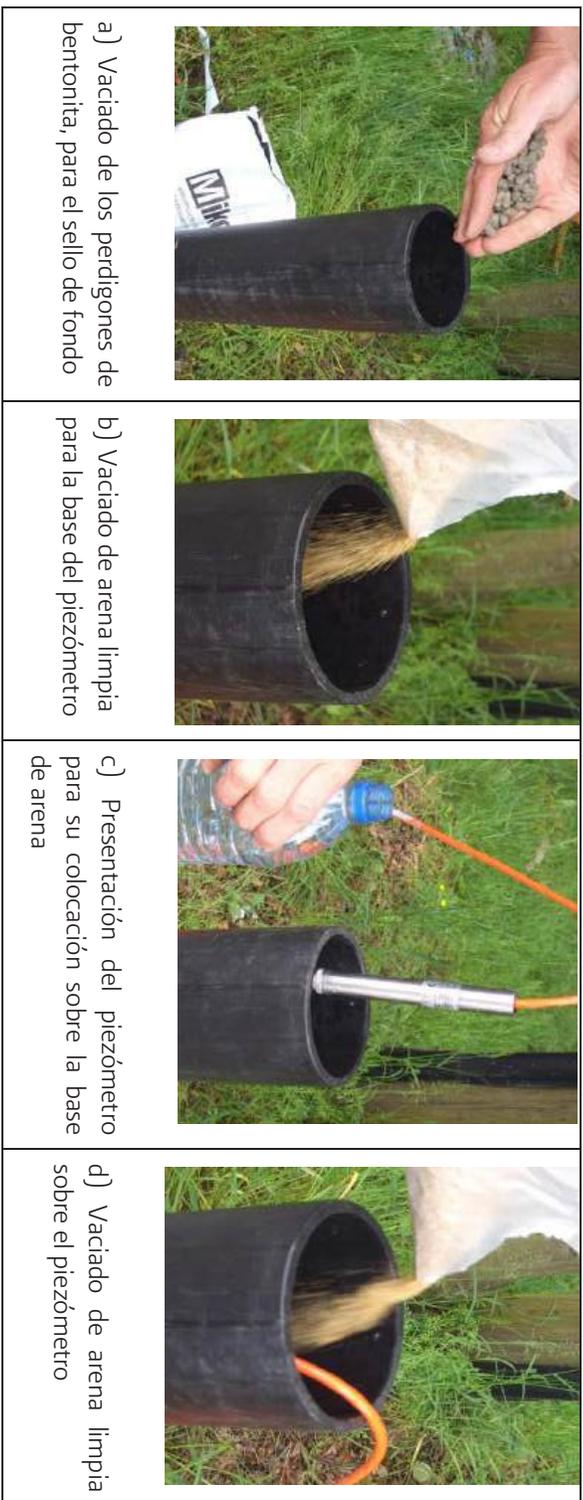


Figura 6.38 Vaciado de bentonita y arena limpia para la formación de la cámara piezométrica de doble sello
(cortesía de Geosense)

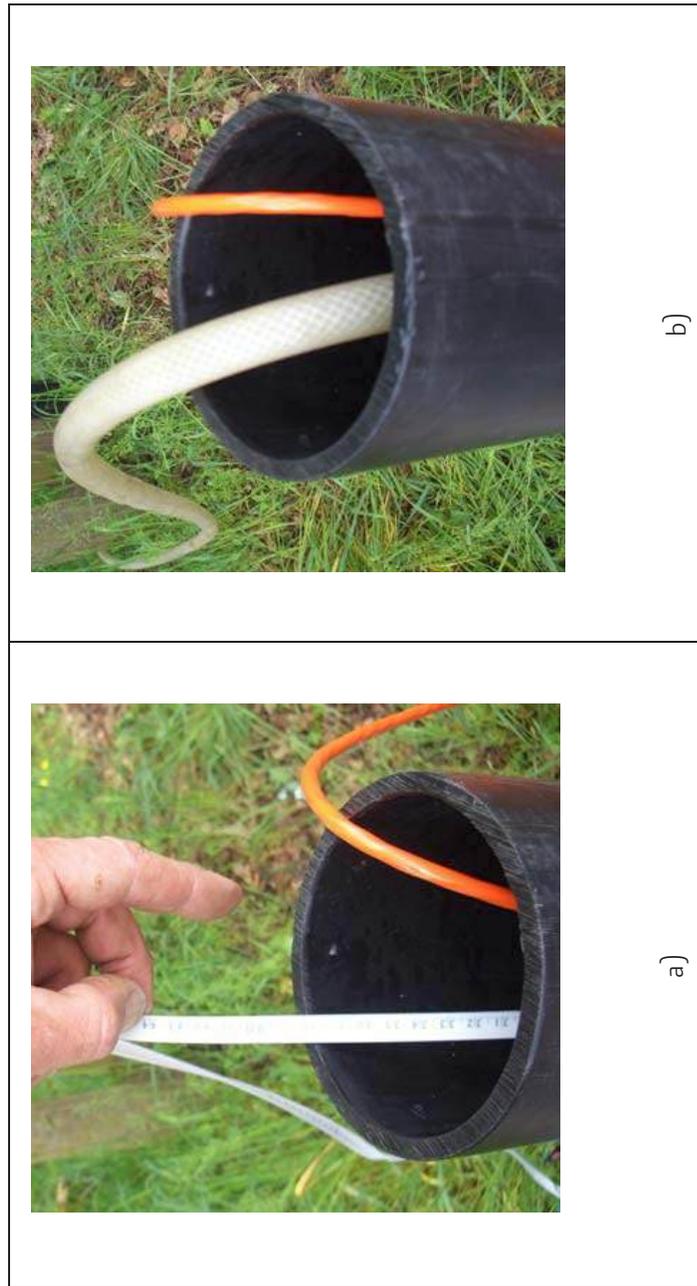


Figura 6.39 a) Verificación de los niveles de las capas de arena y de las capas de sello, b) relleno del barreno hasta la superficie con mortero bentonita-cemento

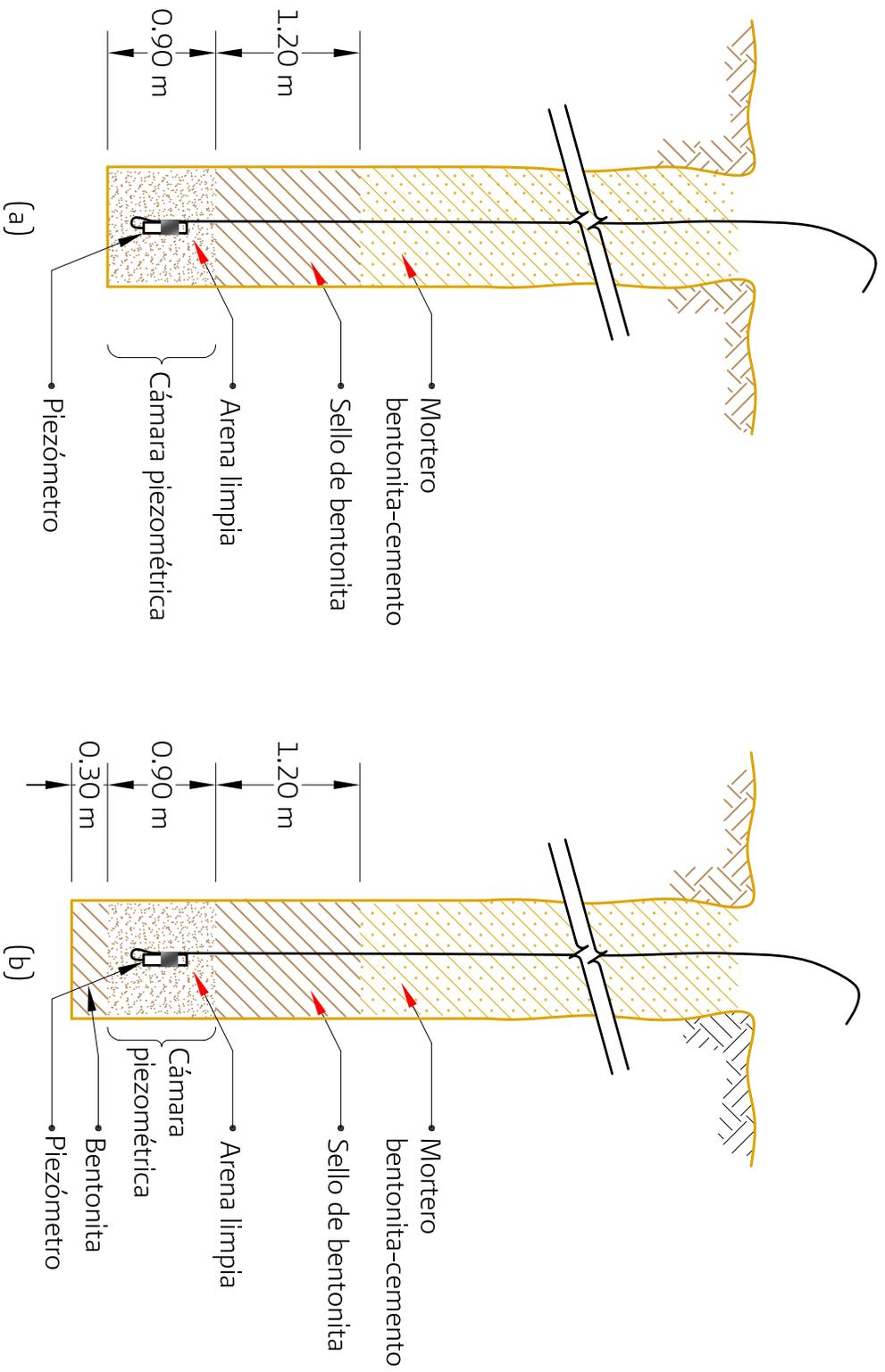
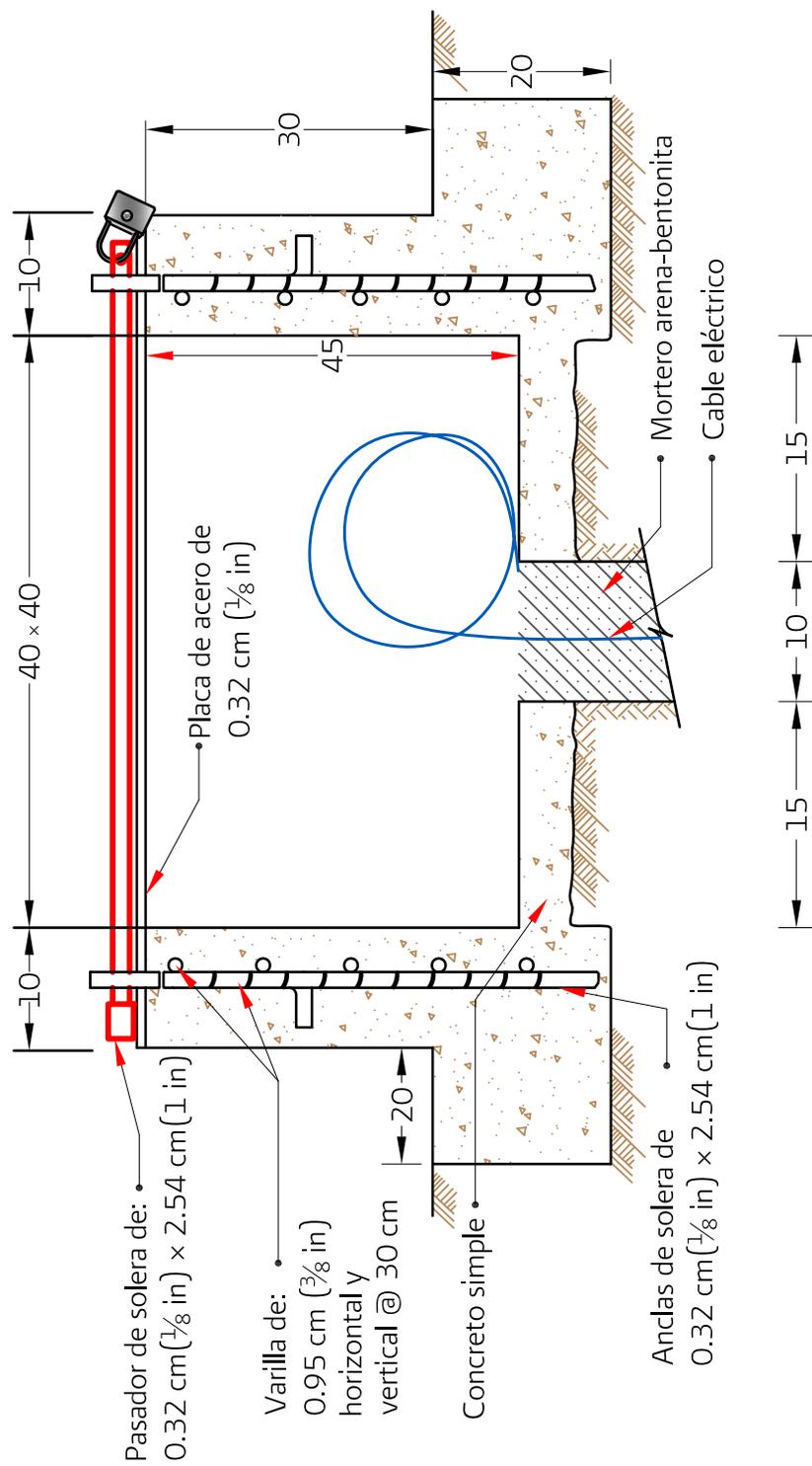


Figura 6.40 Instalación tradicional de piezómetro de cuerda vibrante:

- a) En cámara de presión con sello superior,
- b) En cámara de presión con sellos de fondo y superior



Acotaciones en centímetros

Figura 6.41 Caja de concreto armado para protección del cable y conectores de piezómetro de cuerda vibrante

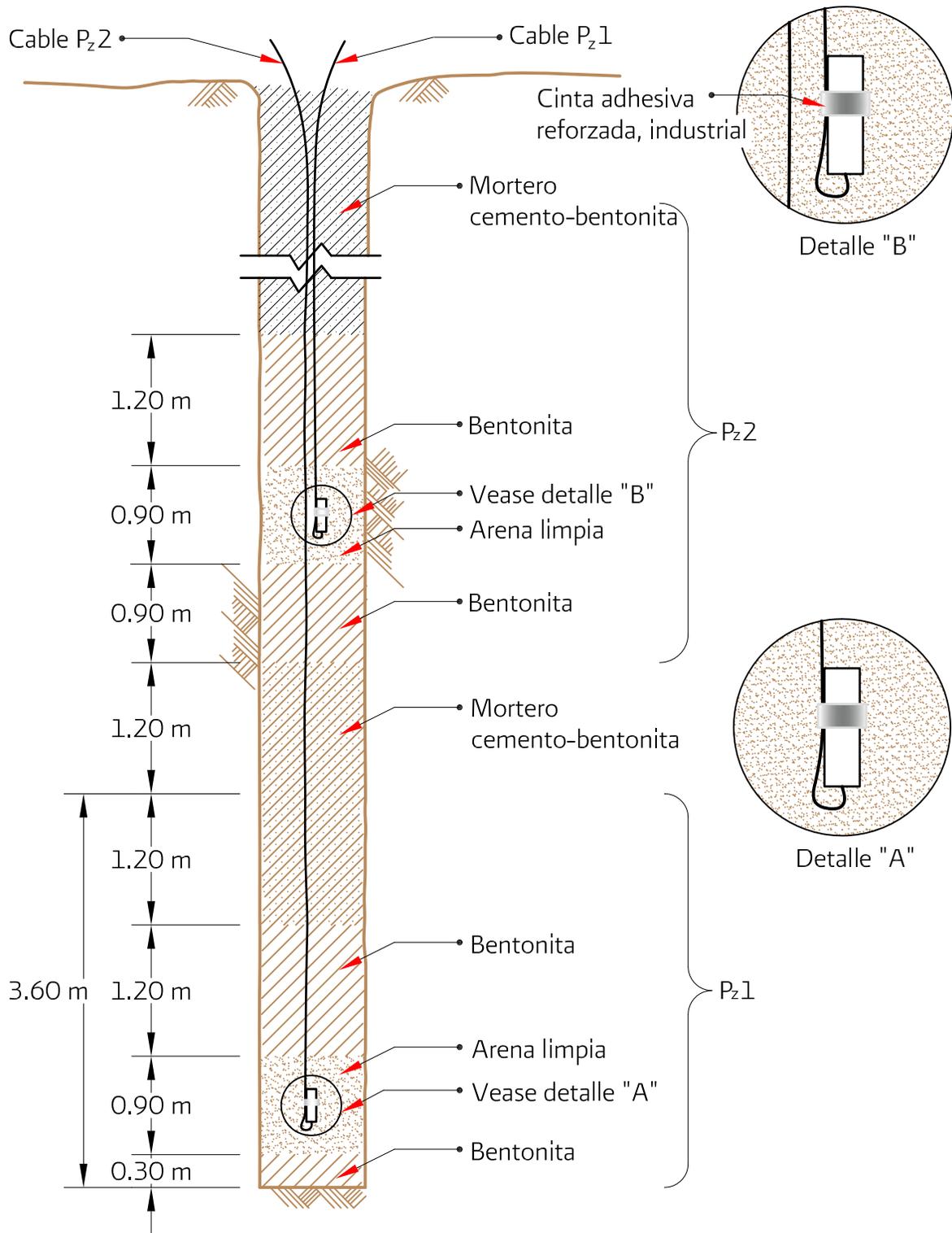


Figura 6.42 Instalación tradicional de dos piezómetros de cuerda vibrante

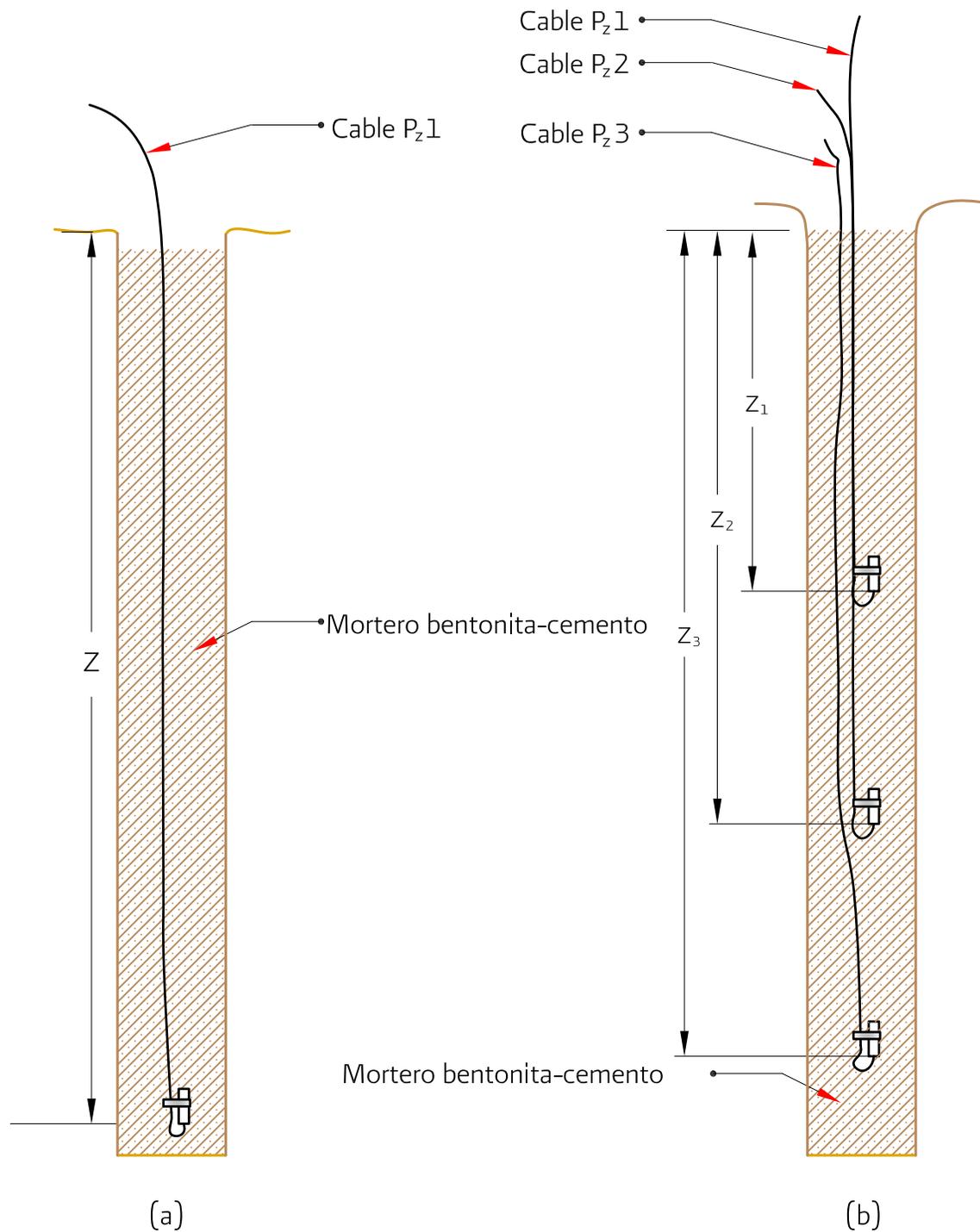


Figura 6.43 Piezómetro de cuerda vibrante instalado en un barreno sellado con mortero cemento-bentonita:
 a) Piezómetro sostenido con su cable de señal,
 b) Piezómetros individuales en diferentes elevaciones, suspendidos con sus respectivos cables de señal

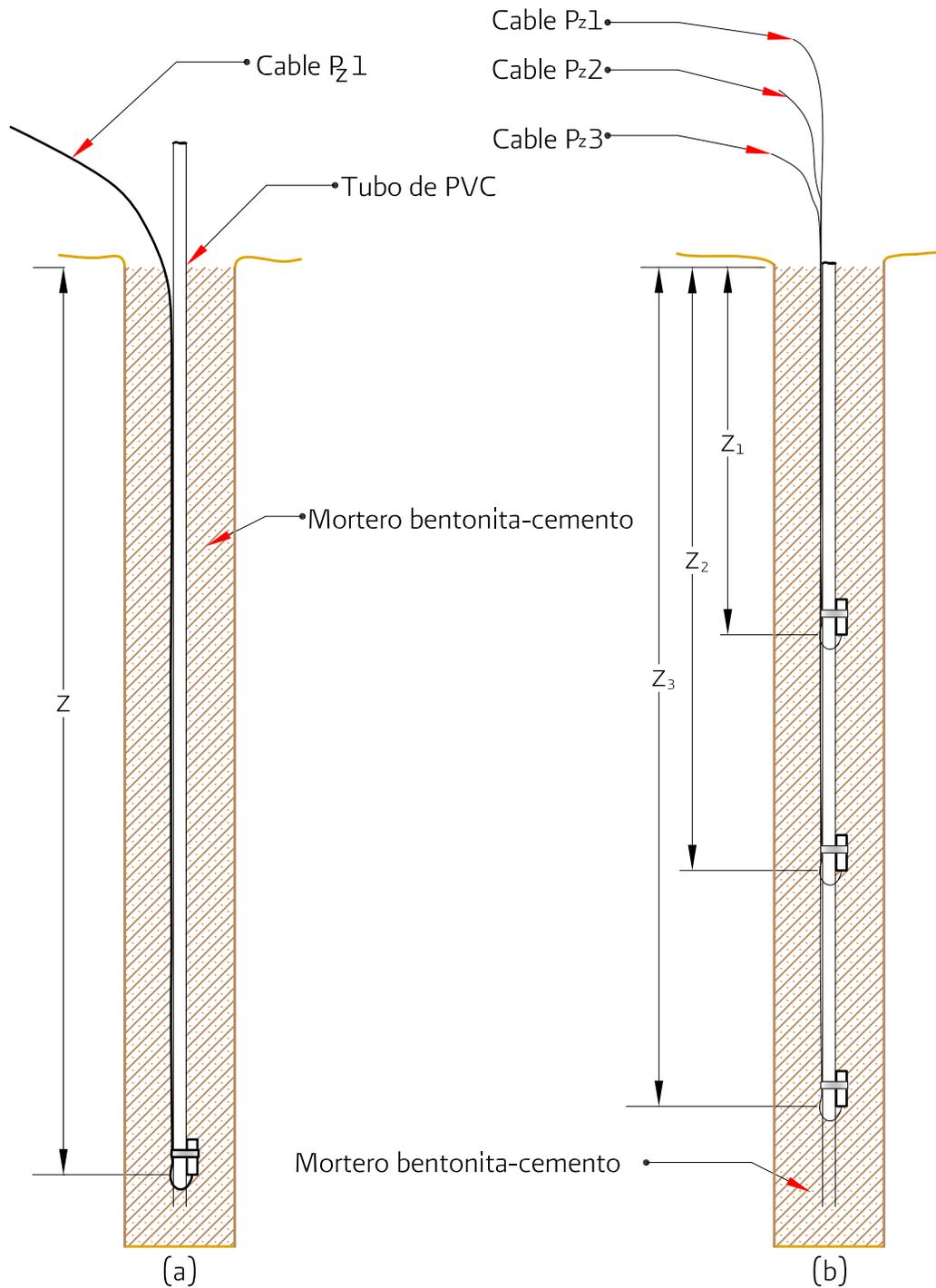


Figura 6.44 Piezómetros de cuerda vibrante soportados por una tubería de PVC de 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ in) en barreno sellado con mortero cemento-bentonita:
 a) un piezómetro individual en el extremo inferior de la tubería,
 b) varios piezómetros individuales soportados por la tubería



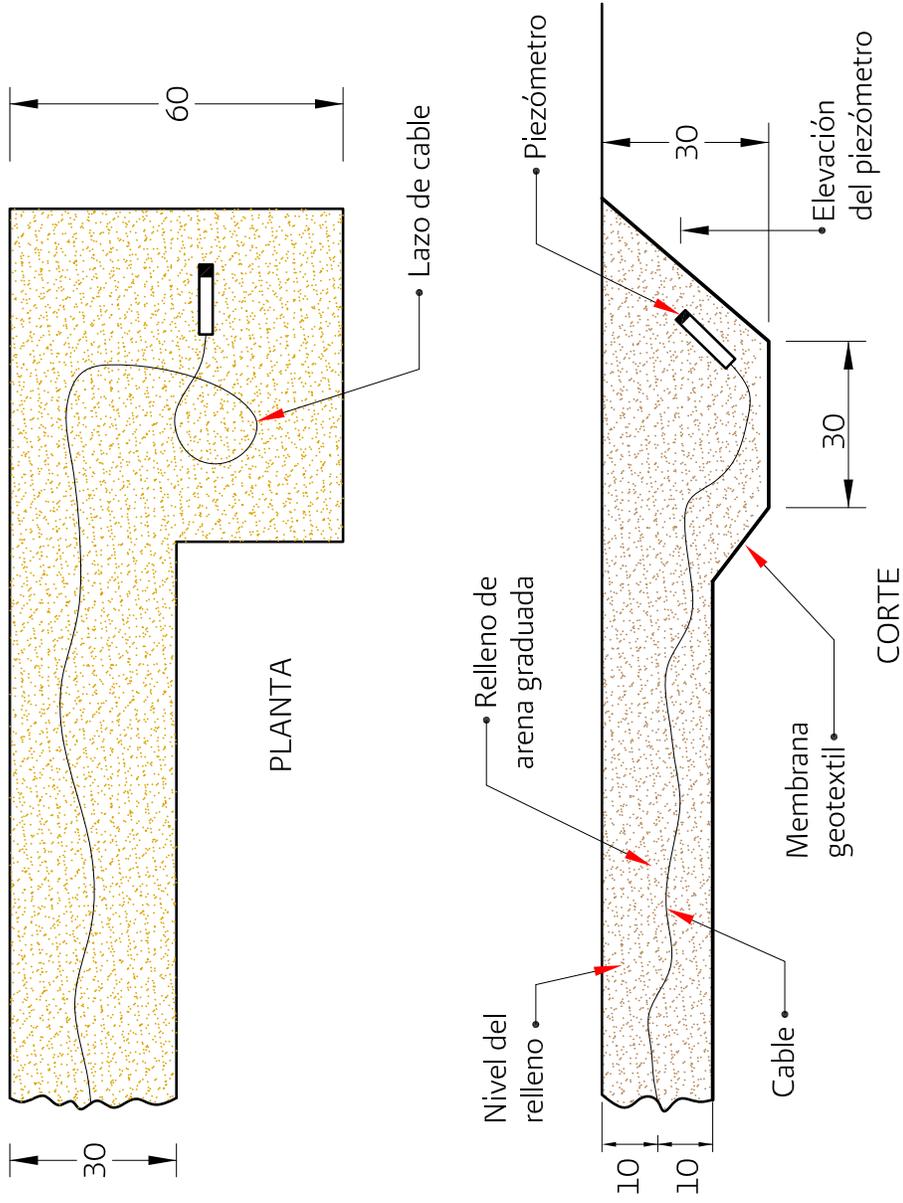
Figura 6.45 Mezclado de cemento-bentonita (Mikkelsen y Green 2003)



Figura 6.46 Piezómetro de cuerda vibrante para hincarse en suelos blandos (cortesía de Applied Geomechanics)

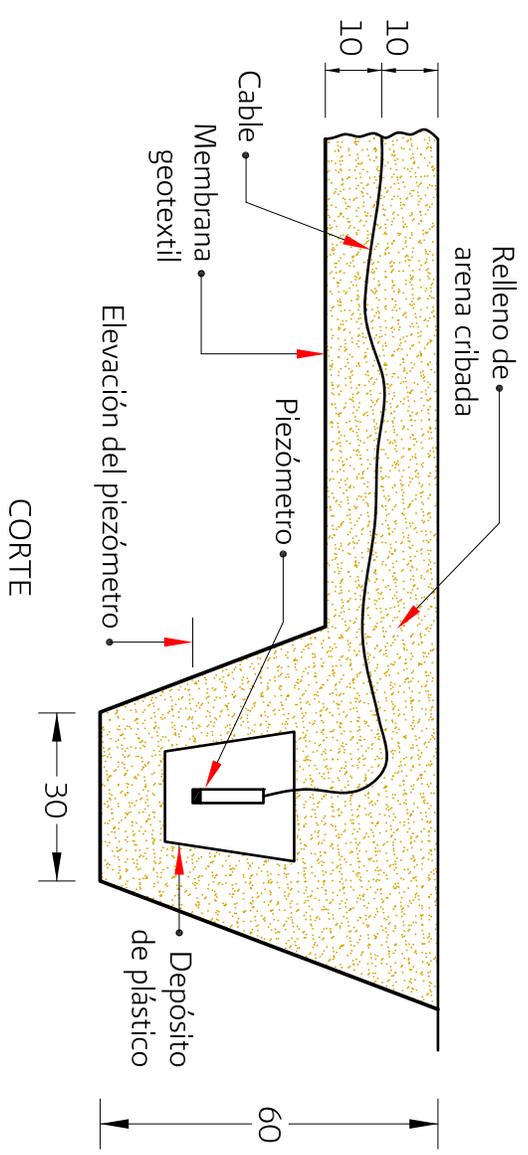
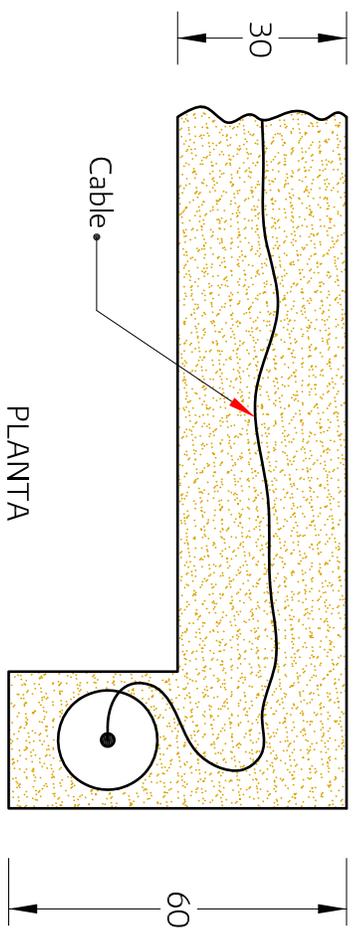


Figura 6.47 Adaptador para barras de perforación para hincado de piezómetros
(cortesía de Slope Indicator)



Acotaciones en centímetros

Figura 6.48a Instalación de piezómetro en una cavidad de material permeable (cortesía de Geosense)



Acotaciones en centímetros

Figura 6.48b Piezómetro en un depósito con arena saturada colocado en una cavidad en un material permeable
 (cortesía de Geosense)

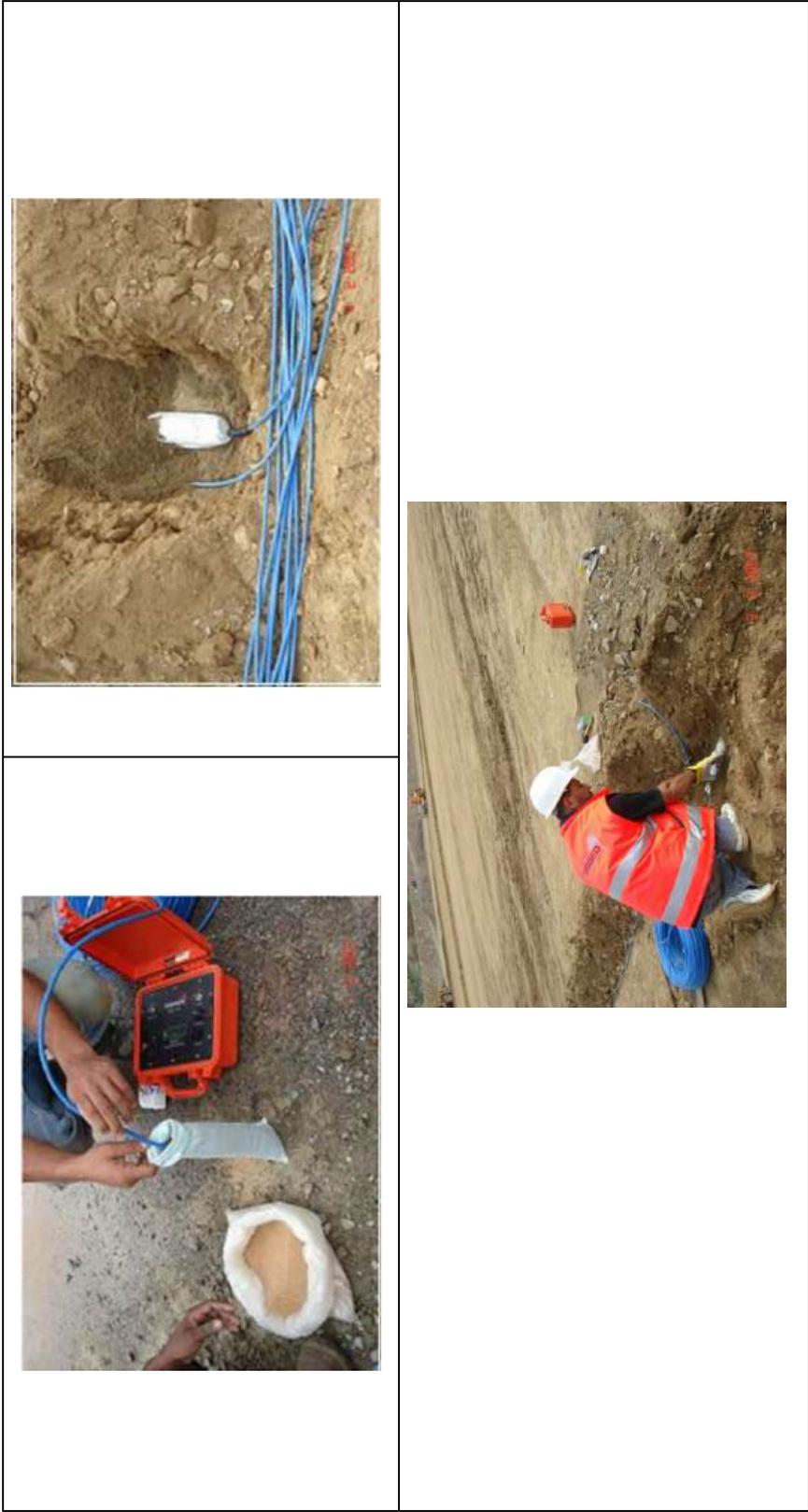


Figura 6.49. Verificación de funcionamiento de piezómetro de cuerda vibrante (cortesía de Sisgeo)

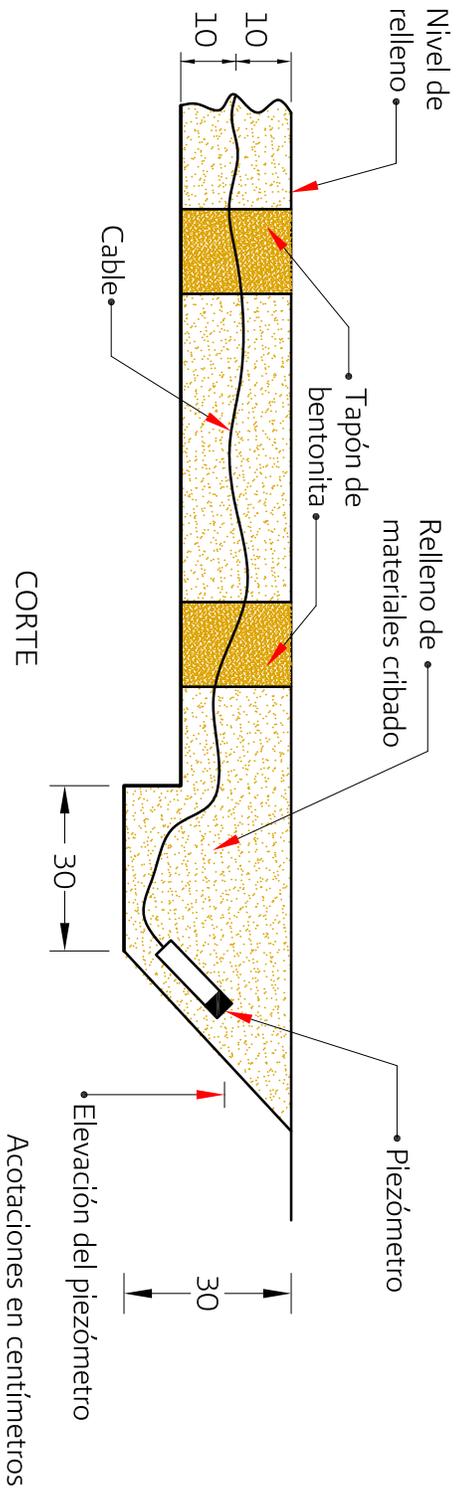
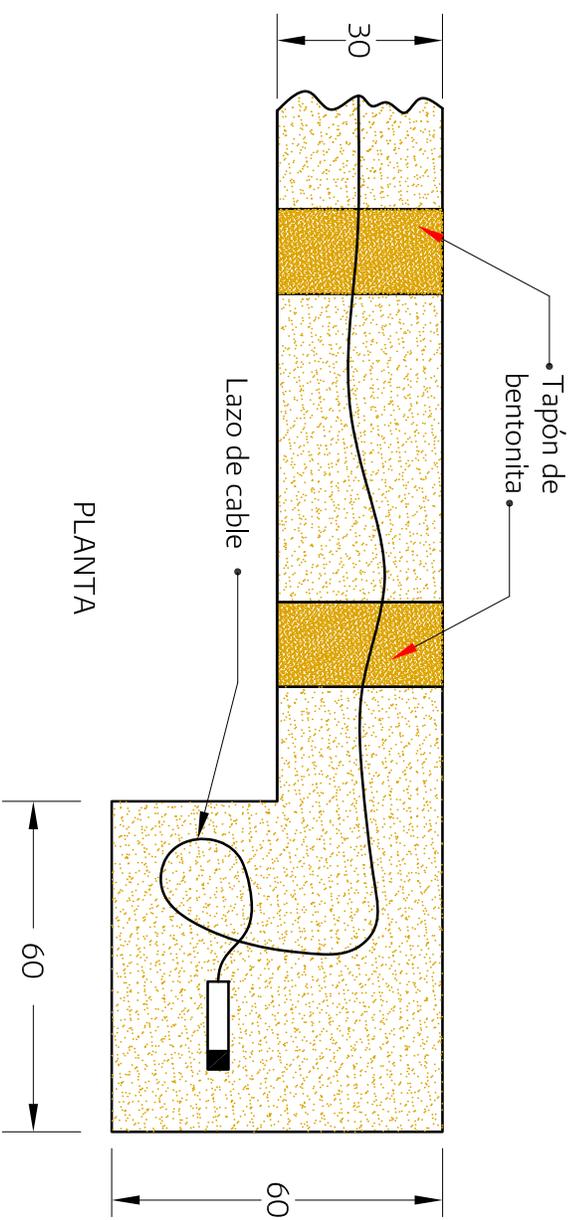


Figura 6.50a Piezómetro instalado en cavidad de material impermeable (cortesía de Geosense)

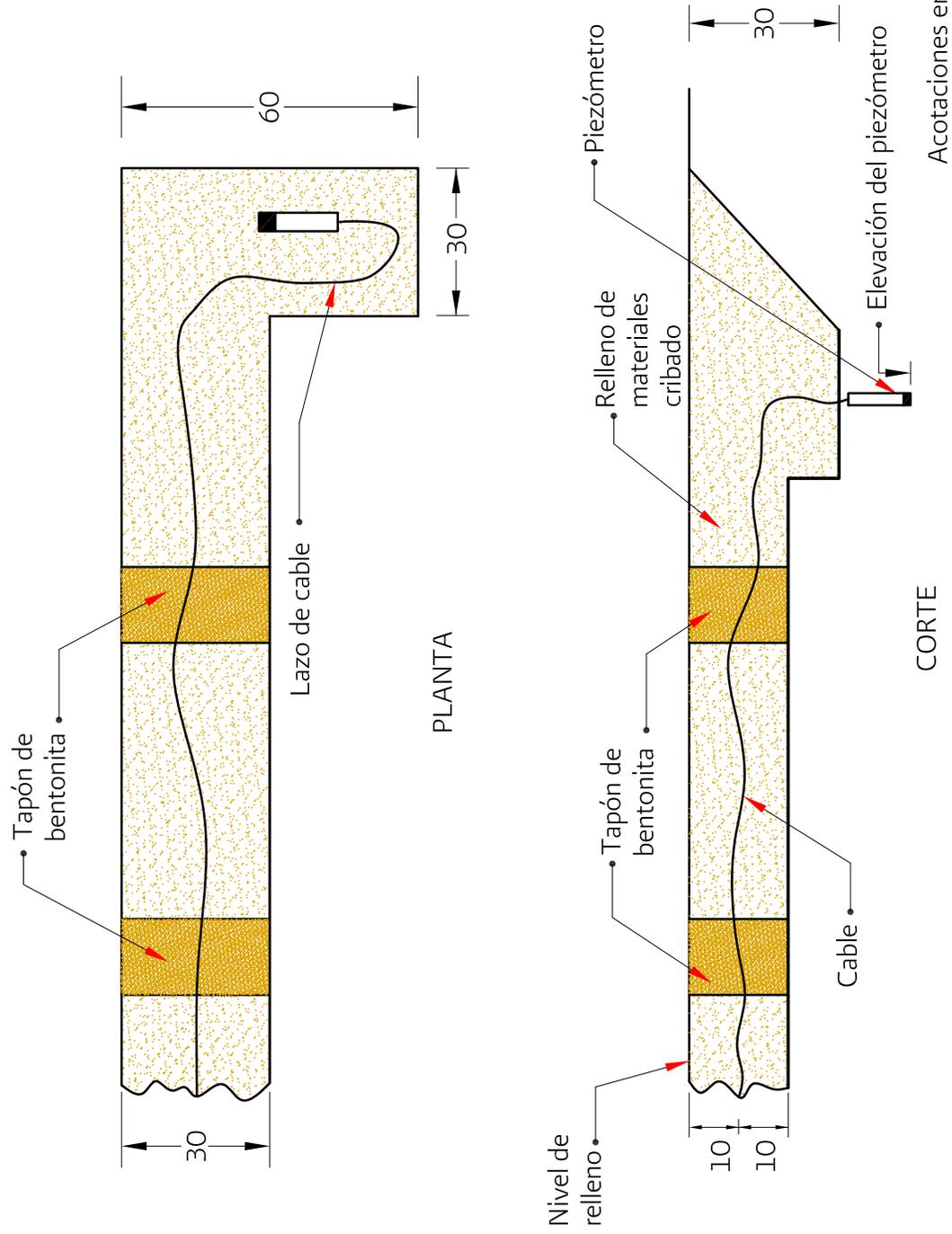
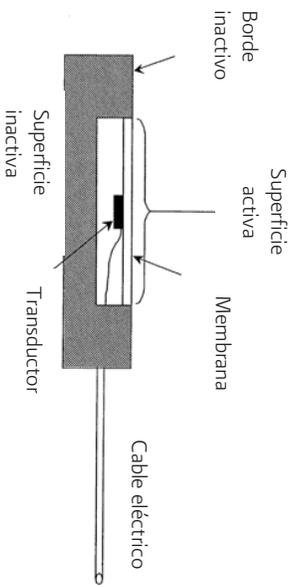
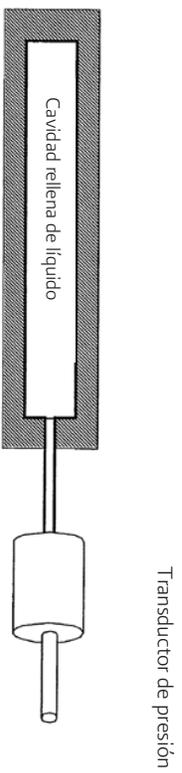


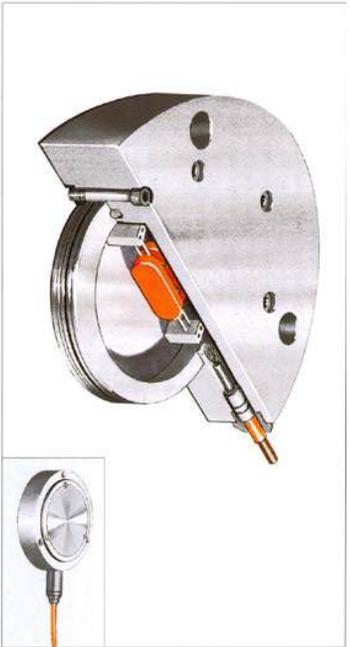
Figura 6.50b Piezómetro hincado bajo la superficie de un material impermeable (cortesía de Geosense)



Esquema de una celda de presión tipo diafragma
(cortesía Theroux y Labuz, 2000)



Esquema de una celda de presión tipo hidráulica
(cortesía Theroux y Labuz, 2000)



Celda de presión tipo diafragma (cortesía Geokon)



Celda de presión tipo hidráulica (cortesía Soil Instruments)

Figura 6.51 Celdas tipo diafragma e hidráulica

Tabla 6.7 Principios de operación de los tipos de transductores conectados a las celdas de presión		
TIPO DE TRANSDUCTOR	ESQUEMA	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
Neumático	<p>1 Retorno 3 Diafragma 2 Mangueras 4 Filtro</p>	La deformación del diafragma producida por la presión interna se compensa y equilibra con la contrapresión aplicada desde el exterior, contrapresión que se registra en un manómetro como el valor de la presión total aplicada por el suelo
Resistivo	<p>Tensión que incrementa la resistencia</p> <p>Medición de la resistencia entre dos puntos</p> <p>Insensible a las fuerzas laterales</p> <p>Composición que disminuye la resistencia</p> <p>Extremos de los lazos</p> <p>Rejilla</p> <p>Marcas de alineamiento</p> <p>Extremos de los lazos</p> <p>Remates de soldadura</p> <p>Longitud de la rejilla</p> <p>Respaldo y encapsulado</p>	La deformación del diafragma debido a la presión interna, se asocia con un cambio en la tensión de la cuerda y al cambio de su frecuencia natural de vibración.
Cuerda vibrante	<p>Bobina de excitación y medición</p> <p>Cuerda vibrante</p> <p>Fijación de la cuerda vibrante</p> <p>Membrana</p> <p>Espacio cerrado al vacío</p> <p>Fijación de la cuerda vibrante</p>	La deformación del diafragma debido a la presión interna, se asocia con un cambio en la tensión de la cuerda y al cambio de su frecuencia natural de vibración.

<p>Piezoeléctrico</p>		<p>La deformación del diafragma piezoeléctrico debido a la presión que recibe, genera energía eléctrica que se mide en resistencia o voltaje; los cambios de esta energía se asocian a los cambios de presión del subsuelo.</p>
<p>Fibra óptica</p>		<p>Se trata de dos espejos paralelos separados una distancia Ls; el primero, interno, fijo, es semi-reflector y el segundo, externo, flexible (diafragma) es reflector expuesto a la presión y hace variar la distancia Ls. La luz incidente en el primer espejo se refleja parcialmente, se divide en dos pulsos, y la luz remanente, refractada, se refleja en el segundo espejo. El retardo de retorno del segundo pulso respecto al primero es $t = 2Ls/c$. Las variaciones de los tiempos de retorno, se relacionan con las variaciones de la presión aplicada</p>

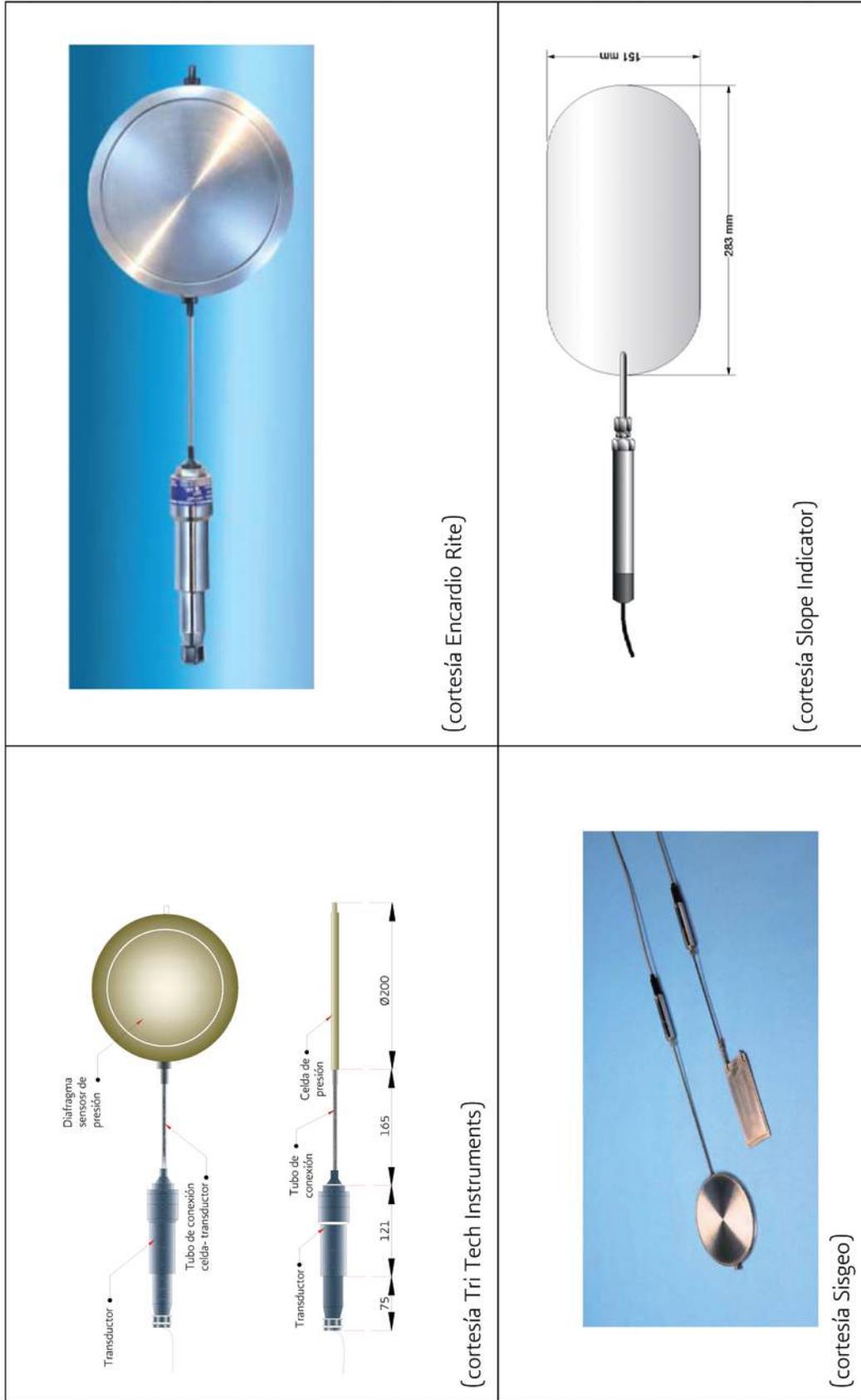
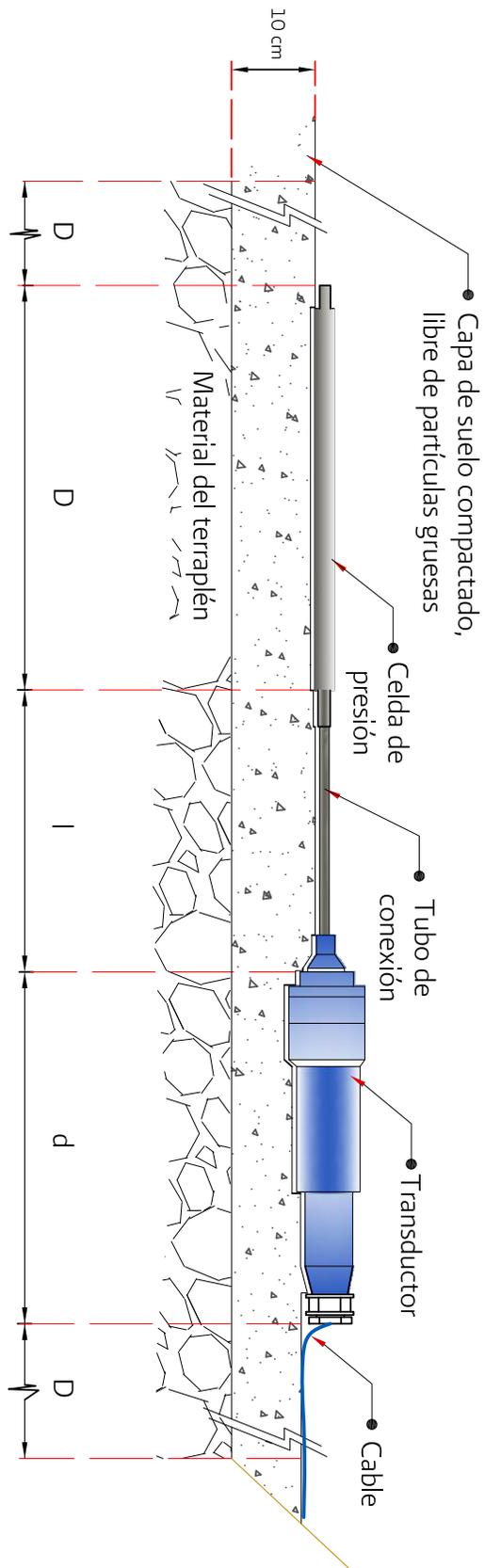
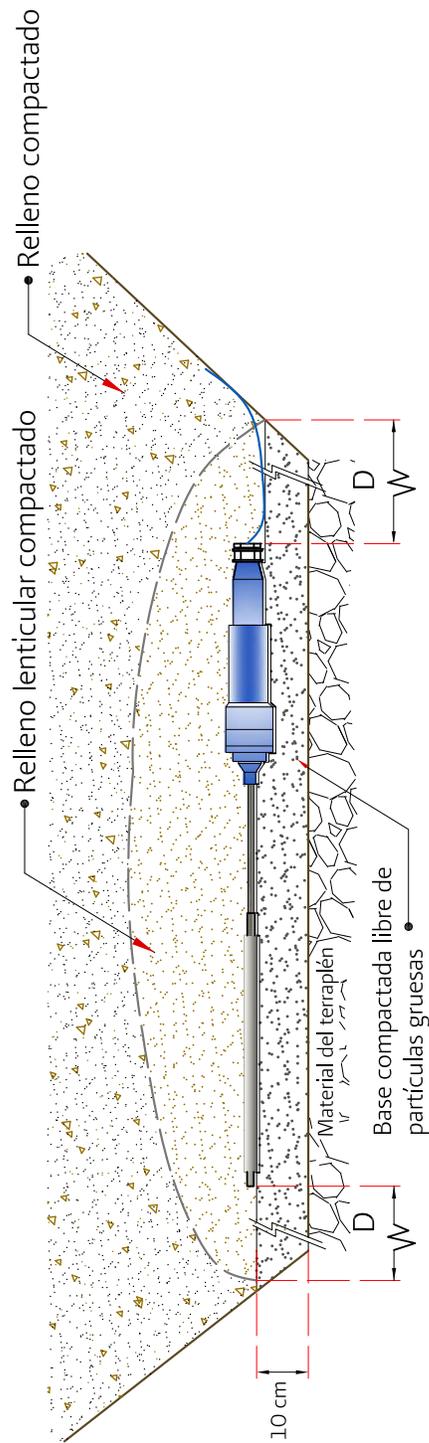


Figura 6.52. Celdas de presión total, tipo hidráulica de forma circular y rectangular

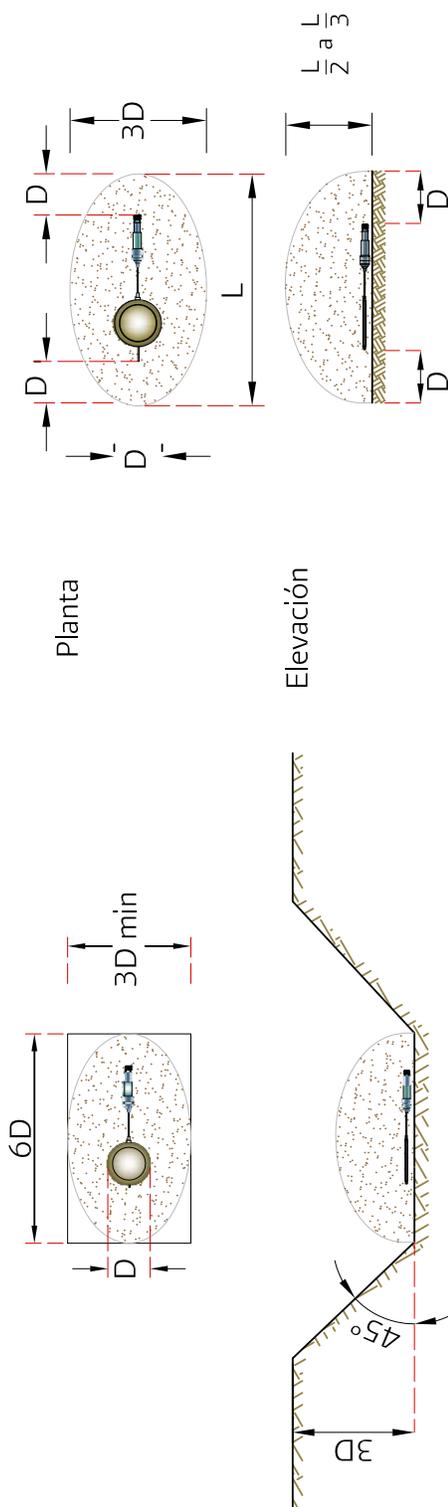


D: diámetro de la celda
 l: longitud de tubo metálico
 d: longitud del transductor

Figura 6.53 Asiento de placa, tubo y transductor sobre una superficie compactada y plana



(A) Conformación de celda de presión sobre su base



(B) Dimensiones del nicho de instalación

(C) Dimensiones del relleno lenticular de material libre de partículas gruesas

Figura 6.54 Celda de presión instalada en cavidad y con protección lenticular de suelo sin partículas gruesas

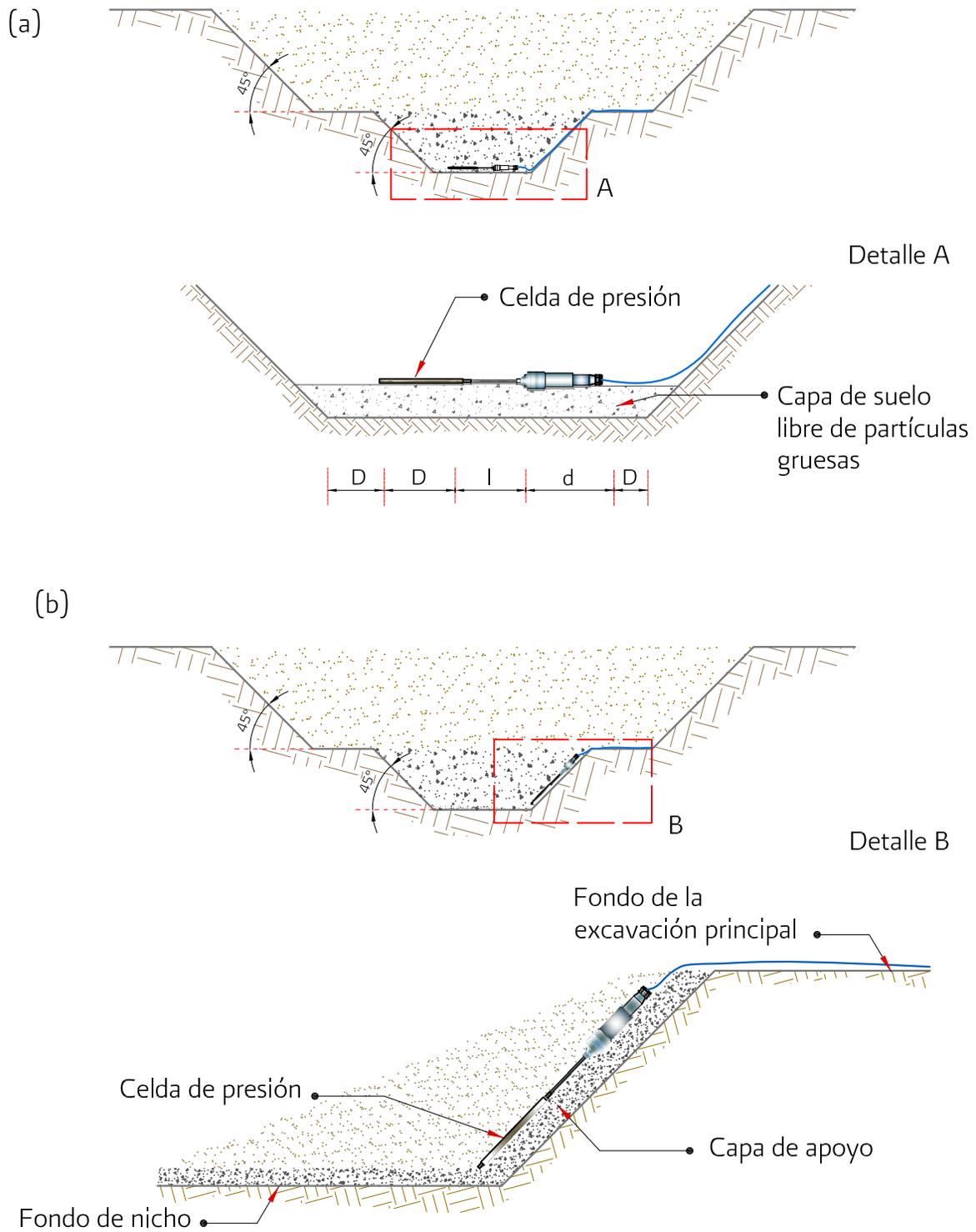


Figura 6.55 Instalación de celda de presión en cavidad con arreglo horizontal e inclinado

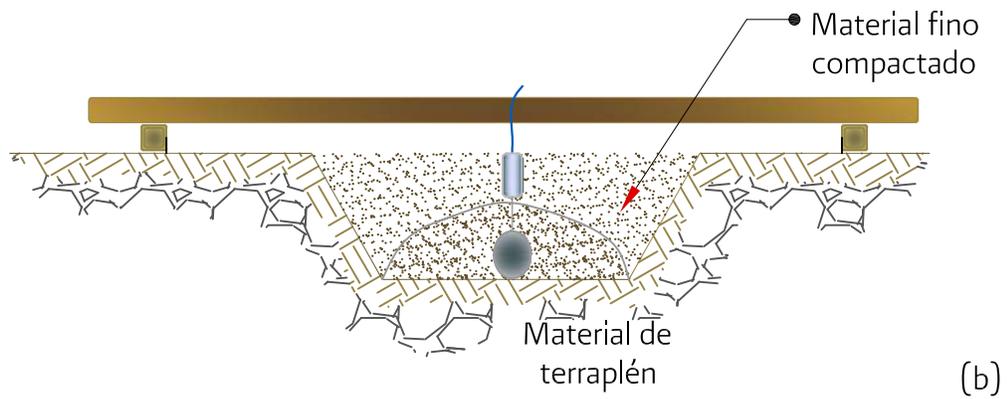
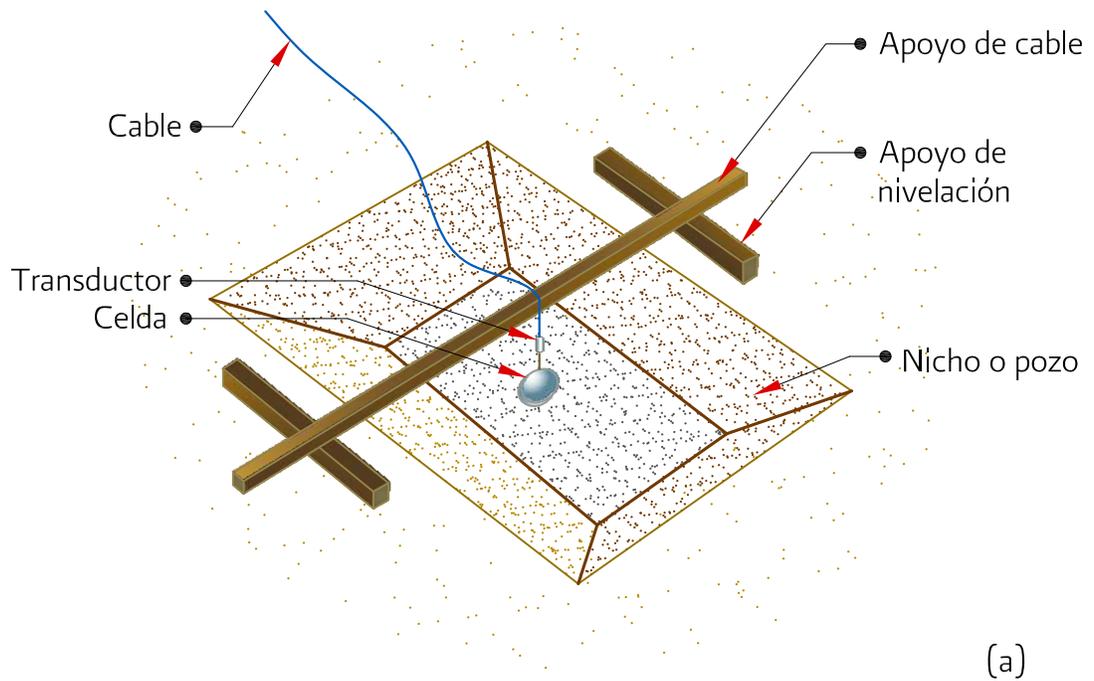


Figura 6.56 Instalación de celda de presión en cavidad en posición vertical

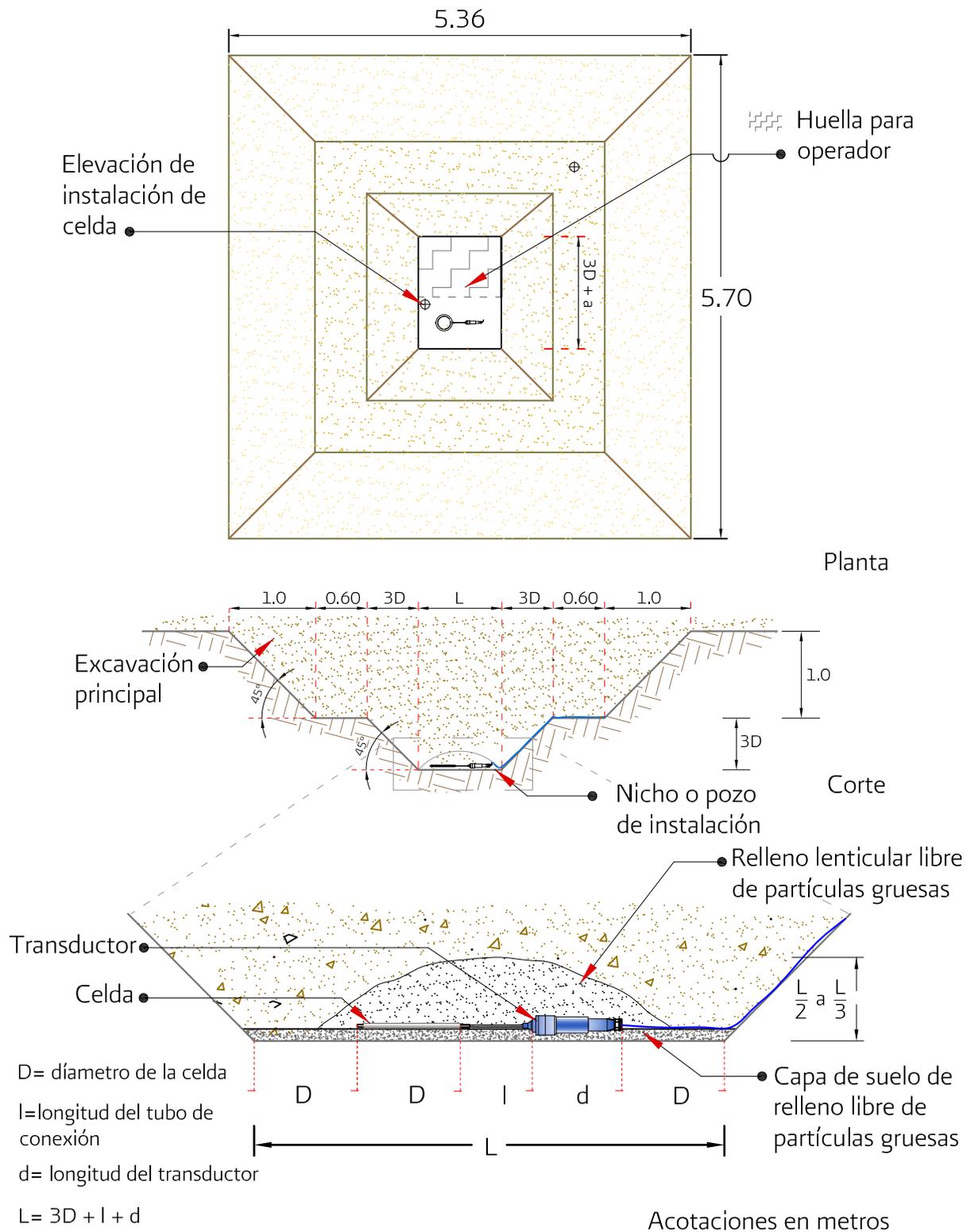


Figura 6.57 Dimensiones del fondo de la excavación para la instalación de la celda de presión

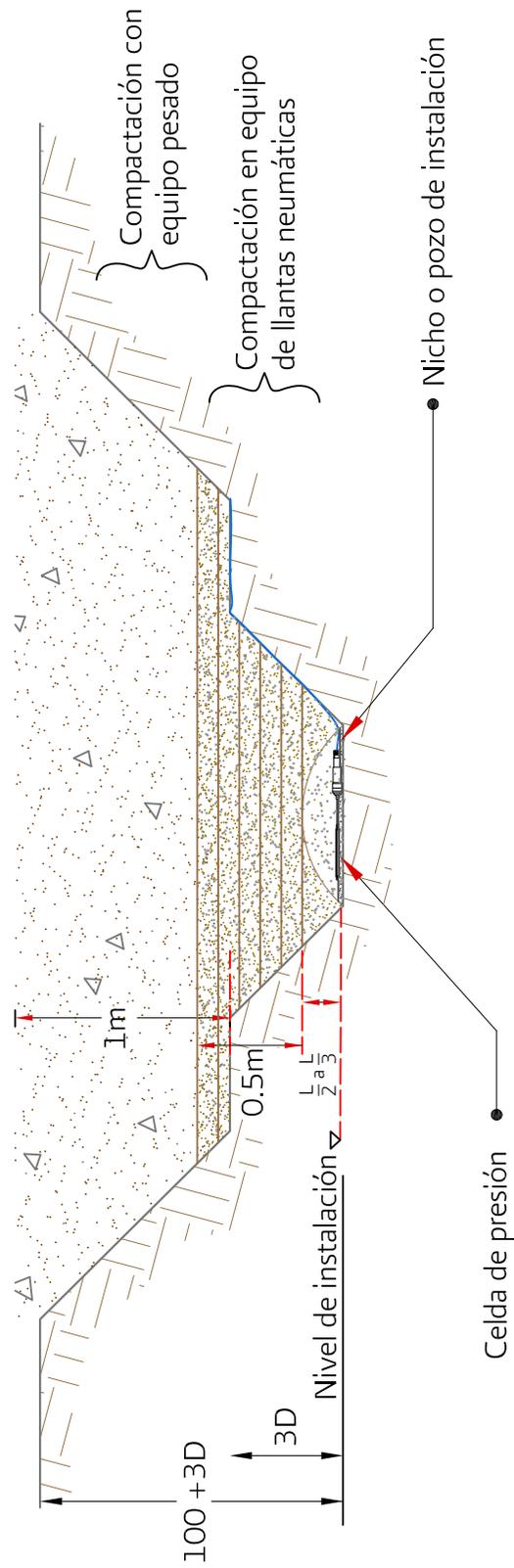
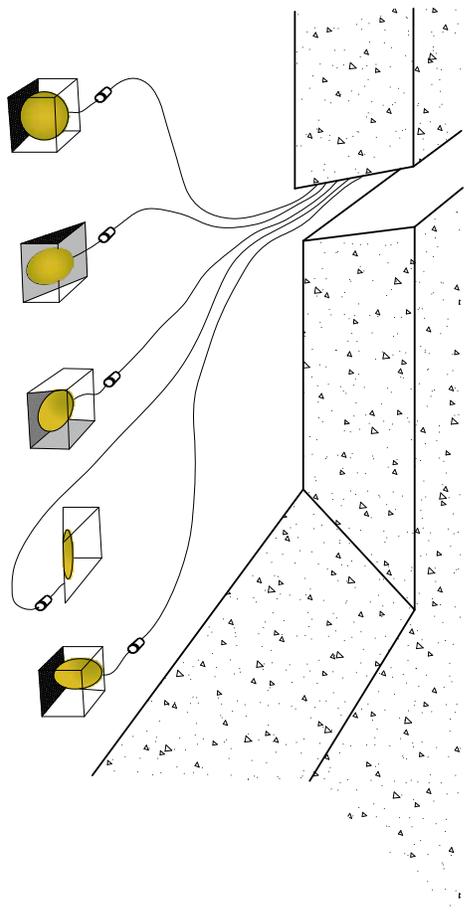


Figura 6.58 Relleno de la cavidad con la celda de presión y su protección lenticular



Figura 6.59 Instalación de grupo de celdas



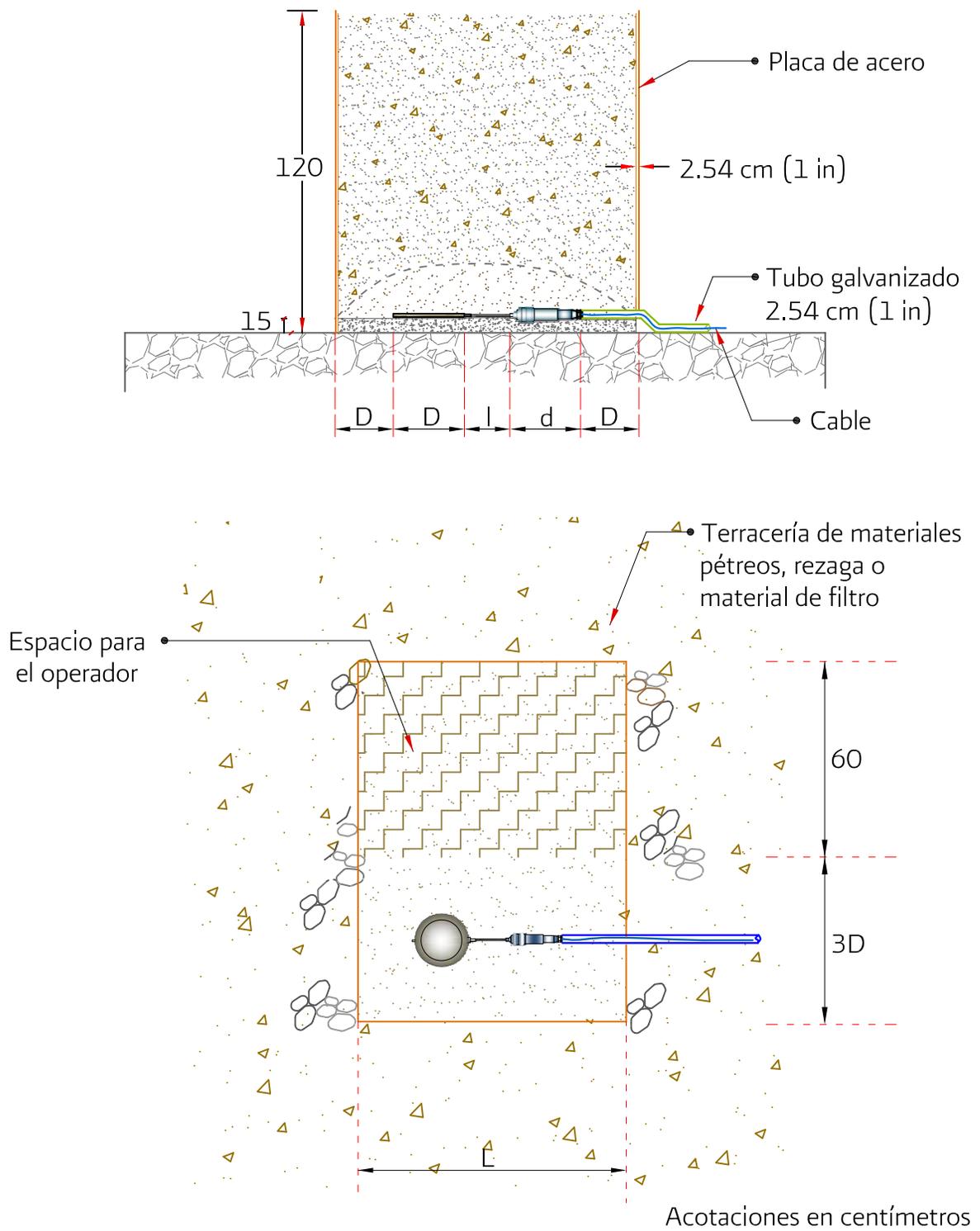
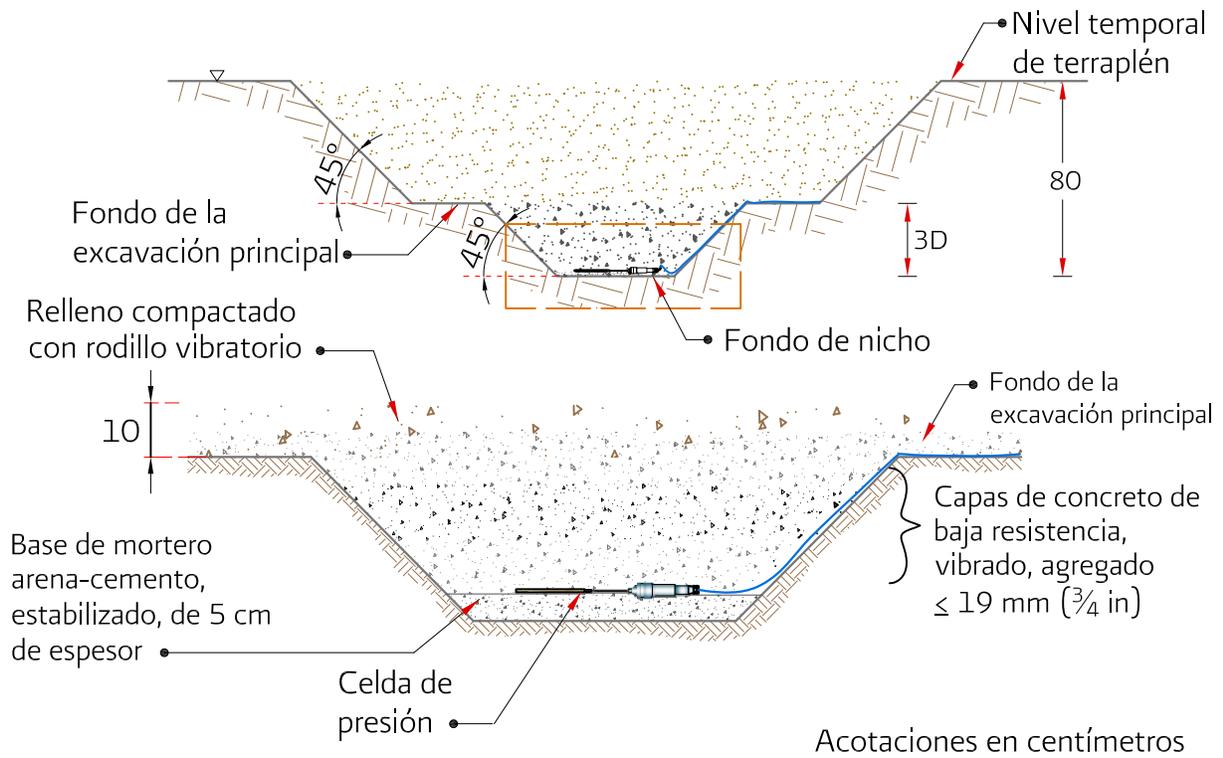


Figura 6.60 Instalación de celda de presión en materiales pétreos



(Cortesía Sisgeo)

Figura 6.61 Instalación de celdas de presión sobre una base de mortero y cubierta con concreto de baja resistencia

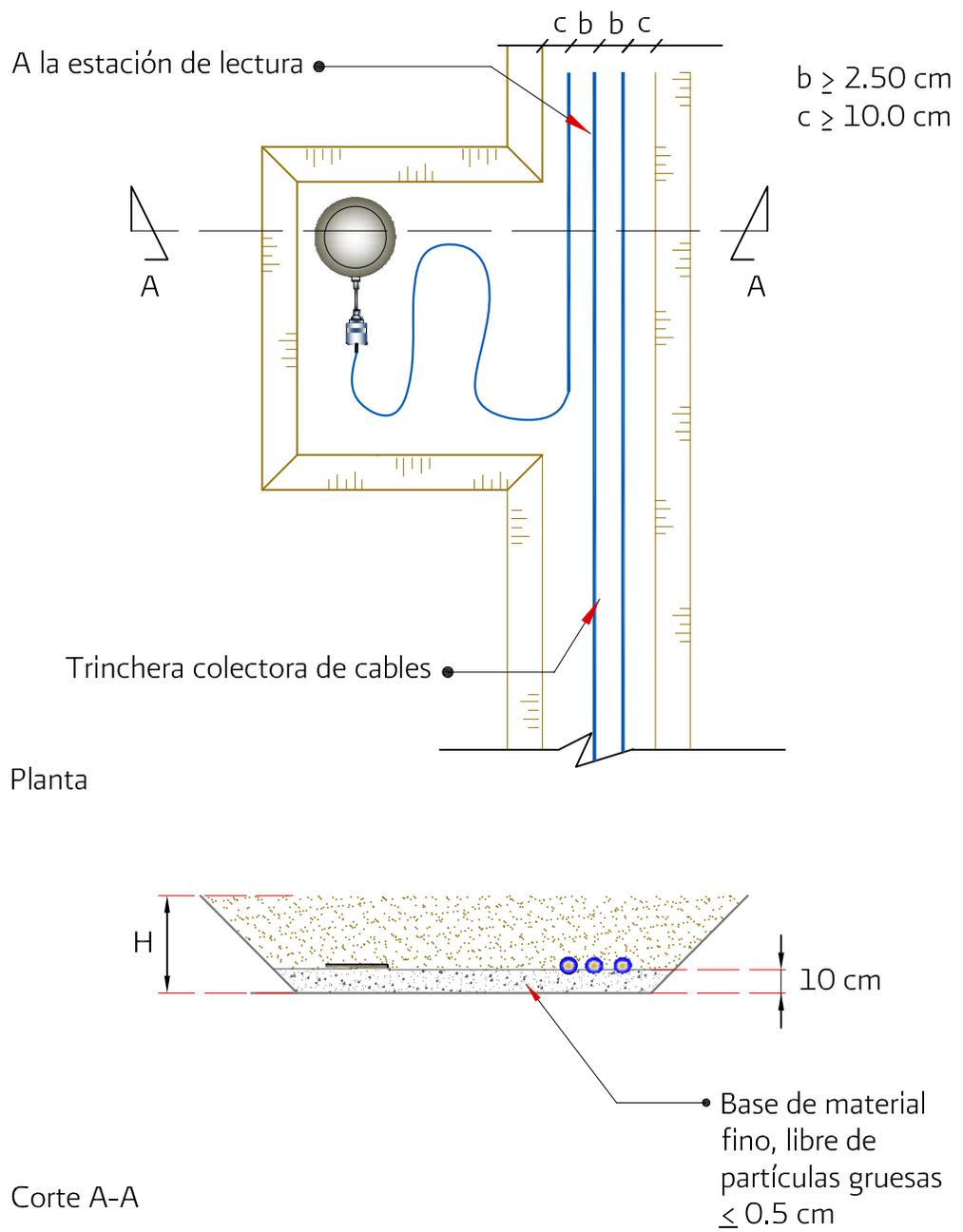
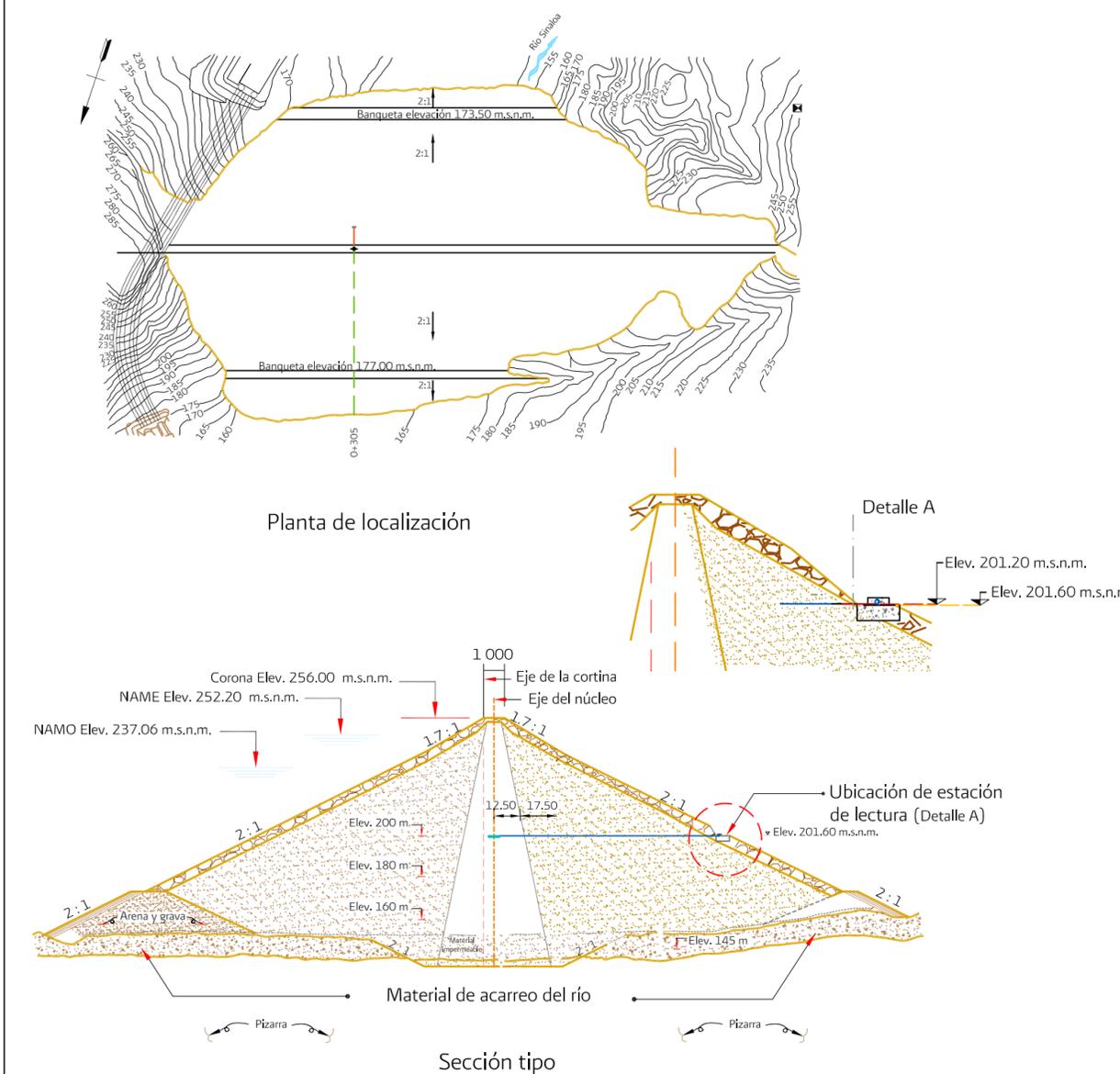


Figura 6.62 Arreglo de un conjunto de cables de señal en una sola trinchera

Proyecto:
 Obra:
 Presa:

Observaciones generales:

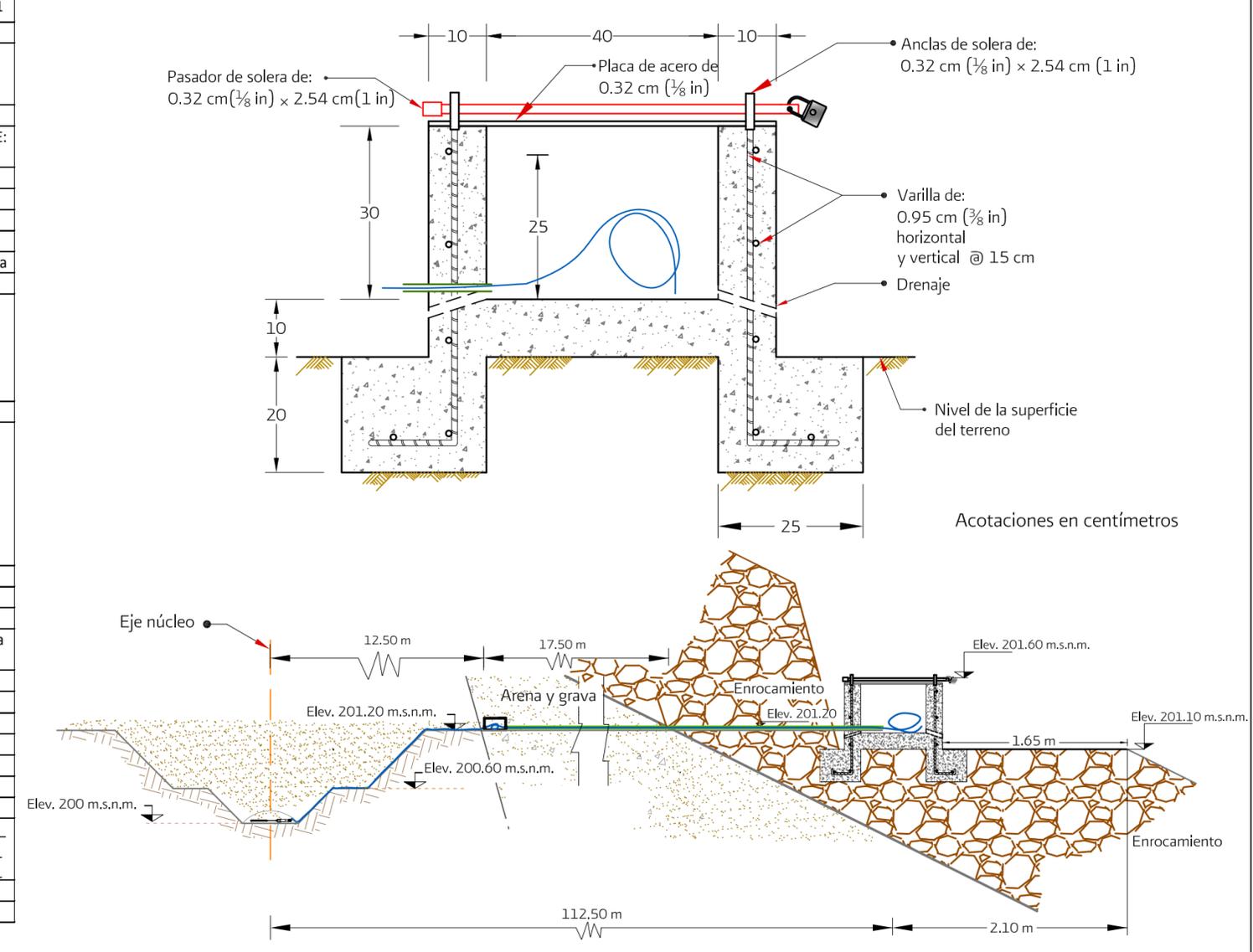
Figura 6.63 FICHA DE INSTALACIÓN DE CELDA DE PRESIÓN TOTAL



FORMATO DE PARA REGISTRO DE INSTALACIÓN. CELDA DE PRESIÓN TOTAL

INSTRUMENTO:	CELDA DE PRESIÓN		CODIGO: CPT-II-1
DATOS DE LA LOCALIZACIÓN			
X = _____ m;	Elevación base de trinchera principal; $Z_1 =$ _____ m		
Y = _____ m	Elevación asiento de celda; $Z_c =$ _____ m		
	Elevación asiento de cables: _____ m		
DATOS DEL INSTRUMENTO			
Fabricante:	Modelo:	NÚMERO DE SERIE: xxxxx	
Celda	Diámetro: 20 cm ;	Esesor: 0.7 cm ;	Relación de aspecto: 20/0.7 > 20
Transductor	Cuerda Vibrante; Rango: 1500 kPa		
Cable	Calibre:	Longitud:	
DATOS DE INSTALACIÓN			
Posición	Horizontal	Vertical	Inclinada
Dimensiones del fondo del nicho de instalación:		Dimensiones del fondo de la trinchera principal ;	
a_c : _____ m	a_r : _____ m	Trinchera de tendido de cables	
b_c : _____ m	b_r : _____ m	Ancho: _____ m	
d_c : _____ m	d_r : _____ m	Longitud: _____ m	
		Profundidad: _____ m	
Rellenos de protección			
Celdas		Cables	
Nichos		Base de tendido	
Material:		Material:	
Espesor = _____ m		Espesor = _____ m	
Trinchera principal		Recubrimiento	
Material:		Material:	
Espesor = _____ m		Espesor _____ m	
Fecha de instalación _____ día/mes/año			
LECTURAS DEL TRANSDUCTOR			
Factores de calibración:			
Etapa	Lectura	Presión kPa	Temperatura °C
Antes de la instalación			
Asentamiento en nicho			
Después de relleno de nicho,			
Después de relleno de trinchera madre			
Después de primera capa de terraplén			
PROTECCIÓN DE LA INSTALACIÓN			
Estación de lecturas: Caja de concreto reforzado, con tapa y candados especiales			
Observaciones:			
Instaló:		Midió:	
Medición topográfica:		Supervisó:	

Estación de lectura





(Cortesía Geokon)



(Cortesía Geokon)



(Cortesía Rst Instruments)

Figura 6.64 Unidades comerciales de activación y lectura de transductor de cuerda vibrante

REFERENCIAS

- Brinker, R. C. y Wolf, P. R. (1982). "Topografía Moderna", Ed. Harla, 542 pp.
- Cst/Berger (2009). Instruction Manual & Catalogs. Watseka Illinois, USA.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (1998). "Normas técnicas para lavantamientos geodésicos", 27 de abril.
- Dunnicliff, J. (1993). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. Ed John Wiley & Sons, New York, USA.
- Encardio-Rite Company (2011) Manuals of Instructions
- Geokon (2009). Instruction manual & catalogs. Lebanon New Hampshire, USA.
- Handfelt, L. D., Koutsoftas, D. C. y Foot, R. (1987). "Instrumentation for test fill in Hong Kong. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 113(2): 127-146.
- Ingram, J. K. 1968. Development of a free-field soil stress gage for static and dynamic measurements. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report No. 1-814.
- Leica-Instop, Omni (2009). Instruction Manual & Catalogs. Barcelona España.
- Manual del Departamento de la Armada (1995)
- Mikkelsen P.E., Green, G.E (2003). "Piezometers in Fully Grouted Boreholes". Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM, Oslo, Norway, September.
- Nichols, T. A. et al, (1987). A Stress State Transducer for Soil. Power and Machinery Division of ASAE. Paper No.84-1592. Alabama Agricultural Experiment Station Journal No. 2-84729. Transactions of the ASAE, Vol. 30(5): 1237-1241.
- Pentax (2010). Instruction manual & catalogs. Tokyo, Japón.
- Roctest (2009). Instruction manual & catalogs. Saint-Lambert, Quebec, Canadá.
- Rst Instruments (2010). Instruction manual & catalogs. Coquitlam, B.C., Canadá.
- Sistema Intermunicipal para los Servicios del Agua Potable y Alcantarilado de Jalisco (SIAPA) (2007). "Lineamientos técnicos SIAPA".
- Sisgeo (2010). Instruction manual & catalogs. Masate, Italia.
- Slope Indicator (2010). Instruction manual & catalogs. Mulkiteo, Washington, USA.
- Soil Instruments (2009). Instruction manual & catalogs. Bell Lane, Uckfield, U. K.

- Topcon (2009). Instruction manual & catalogs. Livermore, CA, USA.
- Weiler, W. A. and Kulhawy, F. H. (1982). Factors Affecting Stress Cell Measurements in Soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 108, GT2, : 1529-548.
- Weber, D. S., Hall, D. G., Keay, T. K., Thomasson, M. J. and Lyle A. Davis, L. A. (2003). "Using fully-grouted nested piezometers for deep aquifer characterization" National Ground Water Association (NGWA)

Bibliografía

- Contreras, I. A., Grosser A. T., and Ver Strate, R. H. (2008). "The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation Part 1". Geotechnical News, pp 30 - 37, Vol 26..
- Contreras G. R., Choquet, P., Rivera C. I. (2010). "Instalación de piezómetros múltiples con inyección de grout en el Valle de México". XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Doyle, J. and Poole, G. (2006). "The Use of Downhole Presometers Implications for Modern Underground Mines". Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy: 151-154.
- McKenna, G. T. (1995). "Grouted-in installation of piezometers in boreholes". Canadian Geotechnical Journal, 32:(2) 355-363, 10.1139/t95-035
- Medina-Peralta, M. (1986). "Introducción a la geodesia geométrica y técnicas de operación de campo". Ed. Limusa.
- Mikkelsen, P. E. and Slope Indicator (2000). Grouting-in Piezometers. In Technical Note at www.slope.com.
- Mikkelsen, P. E. (2002). "Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments". Geotechnical News, December: 38-42.
- Peck, R.B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Géotechnique 19 (2): 171-187.
- (1970). Field measurements—underground structures. Soil Mechanics Lectures series, No. 123. Chicago: American Society of Civil Engineers.
 - (1972). Observation and instrumentation—some elementary considerations. Highways Focus 4, (2): 1-5.
- Vaughan, P. R. (1969). "A note on sealing piezometers in boreholes". Geotechnic 19, No. 3: 405-413.

ANEXO A

Tabla 4.5 Asentamientos (verticales) y movimientos horizontales en testigos superficiales



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Fecha:
Cálculo:Elevación del embalse:
Gráfico:Observador:
Revisó:

No. (1)	Estación		Punto VISADO	Asentamientos			Desplazamientos horizontales				Dirección del desplazamiento $\tan^{-1} = (x_2 - x_1) / (y_2 - y_1)$		
	Coordenadas			Elevación actual	Elevación inicial	Asentamientos cm (7) = (5) - (6)	Coordenadas iniciales		Coordenadas actuales	Desplazamiento observado $D = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{cm}$ (12)			
	X (2)	Y (3)		Z (5) m.s.n.m.	Z (6) m.s.n.m.		X (8)	Y (9)				X (10)	Y (11)
BN-RS1	100	15	1	2206.139	2206.087	0.052							
	100	50	2	2206.327	2206.203	0.124							
	100	75	3	2206.437	2206.268	0.169							
	100	100	4	2206.307	2206.143	0.164							
	100	125	5	2206.192	2206.060	0.132							
	100	150	6	2206.077	2205.999	0.078							
	100	170	7	2206.998	2206.950	0.048							
	100	190	8	2206.063	2206.048	0.015							
	200	15	9	2206.055	2205.890	0.165							
	200	50	10	2200.893	2200.757	0.136							
	200	75	11	2195.872	2195.728	0.144							
	200	100	12	2190.979	2190.857	0.122							
	200	125	13	2186.282	2186.205	0.077							
	200	150	14	2181.290	2181.254	0.036							
	200	170	15	2175.746	2175.730	0.016							
	200	190	16	2206.207	2206.041	0.166							

Notas:
(-) Asentamientos
(+) Expansiones

Observaciones:

Tabla 4.6 Registro de nivelación



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Trabajo:
Lugar:

Observador:
Aparato:

Fecha:

Punto observado (P.O.)	+	COTA APARATO		LECTURAS (-) BN y PL	PUNTOS (-)	COTAS
		m	m			
No.	m	(2)	(3)	m	m	m
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(6)
BN1	2.950	52.950				50,000.000
0					2.668	50.282
1				(-)	2.391	50.559
2				(-)	1.955	50.995
3				(-)	1.447	51.503
4				(-)	1.582	51.368
PL1	1.666	54.224	0.392			52.558
5			(-)	0.590	(-)	53.634
6					0.591	53.633
7					0.912	53.312
8					1.235	52.989
etc.						
PL2			3.699			50.525
BN2						Cota BN2
	$\Sigma (+)$			$\Sigma (-)$		

Anotaciones en la 1a. posición del aparato

Anotaciones en la 2a. posición del aparato

Observaciones:

Tabla 5.8 Desplazamientos horizontales en inclinómetros



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Inclinómetro no.: 2 Lectura en el eje: Río Elevación del brocal:
 Fecha: 4 de julio Elevación del embalse: Observador: N. Caballero
 Calculó: M. Flores Graficó: M. Flore Revisó: A. Alvarado
 Hoja: 1 de 1

DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN INCLINÓMETROS

Tramo	L E C T U R A	Lectura A+	Lectura A-	Suma (A+)+(A-)	Diferencia (A+)-(A-)	Diferencia por constante $\frac{[(A+)-(A-)]}{c}$	Desplazamiento actual	Desplazamiento inicial	Desplazamiento observado
							cm	cm	cm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) + (4)	(6) = (3) - (4)	(7) = (6) x c	(8) = $\Sigma(7)$	(9)	(10) = (8) - (9)
1	a	524	575	1099	-51	-0.70	-9.05		
	b	526	576	1102	-50	-0.69			
	c	529	576	1105	-47	-0.65			
2	a	529	577	1106	-48	-0.66	-7.01	-5.4	-1.61
	b	522	581	1103	-59	-0.81			
	c	520	588	1108	-68	-0.94			
3	a	525	577	1102	-52	-0.72	-4.6	-2.99	-1.61
	b	529	575	1104	-46	-0.63			
	c	532	573	1105	-41	-0.57			
4	a	518	583	1101	-65	-0.90	-2.68	-1.09	-1.59
	b	518	588	1106	-70	-0.97			
	c	519	583	1102	-64	-0.88			
5	a	536	574	1110	-38	-0.52	0.07	0.48	-0.41
	b	539	562	1101	-23	-0.32			
	c	546	561	1107	-15	-0.21			
6	a	556	548	1104	8	0.11	1.12	1.41	
	b	556	547	1103	9	0.12			
	c	556	545	1101	11	0.15			
7	a	567	540	1107	27	0.37	0.73	0.8	-0.07
	b	566	540	1106	26	0.36			
	c								

Sonda No.: Constante "c" de la sonda: 0.0138

Nota: En cada tramo del tubo guía se toman tres lecturas (a, b y c) a diferente profundidad
 Lectura "A" con ruedas fijas hacia la mergen derecha o hacia aguas arriba
 Lectura "B" con ruedas fijas hacia la mergen izquierda o hacia aguas abajo
 Inclinómetro de fondo:

Observaciones:

Tabla 5.9 Asentamientos para inclinómetros



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Inclinómetro No. : 2 Elevación del brocal: 1 977.221 m Distancia al cero de la escala: 1.092 m
 Fecha: 18 de marzo Localización:
 Elevación actual del terraplén: Elevación del embalse:
 Calculó: J. Morales Graficó: D. Peña Observador: A. Alvarado
 Revisó: D. Tinoco
 Hoja: 1 de 1

Tramo	Primera lectura en la cinta	Segunda lectura en la cinta	Promedios de lecturas en la cinta	Elevación actual del brocal más distancia al cero de la escala	Elevación actual de los extremos inferiores de los tramos	Elevación inicial de los extremos inferiores de los tramos	Diferencia algebraica entre la elevación actual e inicial del tramo	Distancia actual entre tramos (diferencia de renglones en (6))
No.	m	m	m	m.s.n.m.	m.s.n.m.	m	m	m
(1)	(2)	(3)	(4) = ((2)+(3))/2	(5)	(6) = (5) - (4)	(7)	(8) = (6) - (7)	(9)
1	2.262	2.261	2.262	1978.313	1976.052	1976.181	-0.130	
2	3.920	3.921	3.921	1978.313	1974.393	1974.523	-0.130	1.659
3	5.575	5.575	5.575	1978.313	1972.738	1972.867	-0.129	1.655
4	7.240	7.242	7.241	1978.313	1971.072	1971.204	-0.132	1.666
5	8.903	8.905	8.904	1978.313	1969.409	1969.541	-0.132	1.663
6	10.647	10.645	10.646	1978.313	1967.667	1967.807	-0.140	1.742
7	12.300	12.298	12.299	1978.313	1966.014	1966.149	-0.135	1.653
8	13.963	13.963	13.963	1978.313	1964.350	1964.487	-0.137	1.664
9	15.613	15.611	15.612	1978.313	1962.701	1962.833	-0.132	1.649
10	17.262	17.259	17.261	1978.313	1961.053	1961.184	-0.131	1.649
11	18.904	18.905	18.905	1978.313	1959.409	1959.539	-0.130	1.644
12	20.551	20.551	20.551	1978.313	1957.762	1957.895	-0.133	1.646
13	22.175	22.172	22.174	1978.313	1956.140	1956.263	-0.123	1.623
14	23.815	23.813	23.814	1978.313	1954.499	1954.625	-0.126	1.640
15	25.440	25.442	25.441	1978.313	1952.872	1952.999	-0.127	1.627
16	27.061	27.058	27.060	1978.313	1951.254	1951.375	-0.121	1.619
17	28.691	28.689	28.690	1978.313	1949.623	1949.742	-0.119	1.630
18	30.314	30.311	30.313	1978.313	1948.001	1948.118	-0.117	1.622
19	31.951	31.950	31.951	1978.313	1946.363	1946.481	-0.118	1.638
20	33.586	33.583	33.585	1978.313	1944.729	1944.848	-0.119	1.634
21	35.208	35.205	35.207	1978.313	1943.107	1943.223	-0.116	1.622
22	36.839	36.836	36.838	1978.313	1941.476	1941.590	-0.114	1.631
23	38.461	38.458	38.460	1978.313	1939.854	1939.964	-0.110	1.622
24	40.058	40.055	40.057	1978.313	1938.257	1938.362	-0.105	1.597
25	41.643	41.641	41.642	1978.313	1936.671	1936.768	-0.097	1.586
26	43.240	43.258	43.249	1978.313	1935.064	1935.165	-0.101	1.607
27	44.820	44.819	44.820	1978.313	1933.494	1933.573	-0.080	1.571
28	46.438	46.435	46.437	1978.313	1931.877	1931.954	-0.077	1.617
29	48.041	48.039	48.040	1978.313	1930.273	1930.343	-0.070	1.603
30	49.634	49.633	49.634	1978.313	1928.680	1928.742	-0.062	1.593
31	51.228	51.227	51.228	1978.313	1927.086	1927.141	-0.055	1.594
32	52.847	52.849	52.848	1978.313	1925.465	1925.508	-0.043	1.620
33	54.487	54.486	54.487	1978.313	1923.827	1923.875	-0.048	1.639
34	56.117	56.115	56.116	1978.313	1922.197	1922.241	-0.044	1.630
35	57.734	57.735	57.735	1978.313	1920.579	1920.618	-0.039	1.619
36	59.345	59.347	59.346	1978.313	1918.967	1918.998	-0.031	1.611
37	60.994	60.997	60.996	1978.313	1917.318	1917.353	-0.035	1.649
38	62.020	62.020	62.020	1978.313	1916.293	1916.336	-0.043	1.024

Notas: (+) Expansión
 (-) Asentamiento

Observaciones:

Tabla 5.16 Extensómetro interno de placas en terraplenes



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Presa:

Extensómetros internos de placas:

Fecha: 25 de noviembre
C. Ruiz

Elevación del embalse:
Gráfico:

2 334.32 m
J. Morales

Observador:
Revisó:
Hoja:

J. Lima
D. Tinoco
1

Extensómetro No.	1a. Lectura	2a. Lectura	Lectura actual	Lectura inicial	Diferencia	Factor de conversión	Deformación observada
	Unidad de puente (2)	Unidad de puente (3)	Unidad de puente (4) = ((2) + (3))/2	Unidad de puente (5)	Unidad de puente (6) = (4) - (5)	(7)	cm $\Delta = (8) = (6) / (7)$ $\epsilon = (8) / ((5)/(7))$
EIP-1	345.40	345.40	345.40	291.32	54.08	13.80	Δ 3.919 ϵ 0.186
EIP-2	215.60	215.60	215.60	252.38	-36.78	14.30	Δ -2.572 ϵ -0.146
EIP-3	398.20	398.20	398.20	306.12	92.08	13.80	Δ 6.672 ϵ 0.301
EIP-4	370.20	370.20	370.20	288.00	82.20	13.80	Δ 5.957 ϵ 0.285
EIP-5	260.10	260.10	260.10	278.93	-18.83	14.30	Δ -1.317 ϵ -0.068
EIP-6	220.00	220.00	220.00	220.46	-0.46	14.30	Δ -0.032 ϵ -0.002
EIP-7	353.40	353.40	353.40	303.70	49.70	13.80	Δ 3.601 ϵ 0.012

NOTAS:

(+) Tensión

(-) Compresión

(Li) Longitud inicial entre placas

(Δ) Deformación observada

(ϵ =D/Li) Deformación unitaria

Observaciones:

En el extensómetro No. 5 oscila la aguja por humedad en el cable.

Tabla 5.18 Lecturas del extensómetro interno de barras



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Extensómetro interno de barras No.:

Localización:

Fecha:

Elevación actual del terraplén:

Estación o cadenamiento:

Observador:

Elevación actual del embalse:

Hoja:

Fecha	Barra 1 (3.0 m) mm	Diferencia Barra 1 mm	Barra 2 (8.0 m) mm	Diferencia Barra 2 mm	Barra 3 (12.0 m) mm	Diferencia Barra 3 mm	Barra 4 (18.0 m) mm	Diferencia Barra 4 mm	Barra 5 (25.0 m) mm	Diferencia Barra 5 mm	Barra 6 (35.0 m) mm	Diferencia Barra 6 mm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
16-Ene	2.577		2.693		2.553		2.722		2.737		2.900	
14-Feb	2.576	-0.001	2.693	0.000	2.553	-0.001	2.721	-0.001	2.736	-0.001	2.897	-0.003
13-Mar	2.572	-0.005	2.691	-0.002	2.550	-0.005	2.722	0.000	2.729	-0.008	2.886	-0.014
15-Abr	2.564	-0.013	2.683	-0.010	2.546	-0.013	2.715	-0.007	2.724	-0.013	2.881	-0.019
14-May	2.543	-0.034	2.663	-0.030	2.523	-0.034	2.705	-0.017	2.709	-0.028	2.861	-0.039
16-Jun	2.541	-0.036	2.662	-0.031	2.524	-0.036	2.695	-0.027	2.708	-0.029	2.860	-0.040
15-Jul	2.539	-0.038	2.664	-0.029	2.523	-0.038	2.689	-0.033	2.697	-0.040	2.855	-0.045

NOTAS:
(+) Extensión
(-) Compresión

Observaciones:

Tabla 5.19 Extensómetro interno de barras (cálculo inverso)



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Extensómetro interno de barras No.:

Localización:

Fecha:

Elevación actual del terraplén:

Estación o cadenamiento:

Observador:

Elevación actual del embalse:

Hoja:

Fecha	Referencia barra 6 (35 m)	Diferencia barra 6	Barra 1 (3 m)	Diferencia barra 1	Diferencia barra (6-1)	Barra 2 (8 m)	Diferencia barra 2	Diferencia barra (6-2)
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6) = (3)-(5)	(7)	(8)	(9) = (3)-(8)
16-Ene	2.900		2.577			2.693		
14-Feb	2.897	-0.003	2.576	-0.001	-0.002	2.693	0.000	-0.003
13-Mar	2.886	-0.014	2.572	-0.005	-0.009	2.691	-0.002	-0.012
15-Abr	2.881	-0.019	2.564	-0.013	-0.006	2.683	-0.010	-0.009
14-May	2.861	-0.039	2.543	-0.034	-0.005	2.663	-0.030	-0.009
16-Jun	2.860	-0.040	2.541	-0.036	-0.004	2.662	-0.031	-0.009
15-Jul	2.855	-0.045	2.539	-0.038	-0.007	2.664	-0.029	-0.016

Fecha	Barra 3 (12 m)	Diferencia barra 3	Diferencia barra (6-3)	Barra 4 (18 m)	Diferencia barra 4	Diferencia barra (6-4)	Barra 5 (25 m)	Diferencia barra 5	Diferencia barra (6-5)
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
(1)	(10)	(11)	(12) = (3)-(11)	(13)	(14)	(15) = (3)-(14)	(16)	(17)	(18) = (3)-(17)
16-Ene	2.553			2.722			2.737		
14-Feb	2.553	0.000	-0.003	2.721	-0.001	-0.002	2.736	-0.001	-0.002
13-Mar	2.550	-0.003	-0.011	2.722	0.000	-0.014	2.729	-0.008	-0.006
15-Abr	2.546	-0.007	-0.012	2.715	-0.007	-0.012	2.724	-0.013	-0.006
14-May	2.523	-0.030	-0.009	2.705	-0.017	-0.022	2.709	-0.028	-0.011
16-Jun	2.524	-0.029	-0.011	2.695	-0.027	-0.013	2.708	-0.029	-0.011
15-Jul	2.523	-0.030	-0.015	2.689	-0.033	-0.012	2.697	-0.040	-0.005

NOTAS: Diferencia en la barra (+) Extensión (-) Compresión

Diferencia con respecto a la barra más profunda (-) Extensión (+) Compresión

Observaciones:

Tabla 5.23 Hoja de registro de deformómetro magnético



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PRESA:

Deformómetro magnético No.:

Localización:

Observador:

Elevación actual del terraplén:

Nivel de referencia (tubo de acceso):

Cabezal

Hoja:

Elevación del embalse:

Estación o cadenamiento:

Cálculo:

a) Captura de lecturas

Fecha	05-May	06-Jun	07-Jul	06-Ago	05-Sep	07-Oct
Imán (placa o araña)	Profundidad inicial	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
	m	m	m	m	m	m
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
8-5	6.17	6.17	6.15	6.10	6.08	6.08
8-4	7.69	7.68	7.67	7.60	7.58	7.58
8-3	9.19	9.18	9.16	9.09	9.07	9.06
8-2	10.68	10.67	10.64	10.56	10.54	10.53
8-1	12.19	12.17	12.15	12.06	12.04	12.03
Nivel de referencia	13.67	13.66	13.64	13.54	13.52	13.51

b) Cálculos con respecto al datum (nivel de referencia)

Fecha	05-May		06-Jun		07-Jul		06-Ago		05-Sep		07-Oct	
	Diferencia con respecto al datum inicial	Diferencia con respecto al datum	Cambio	Diferencia con respecto al datum	Cambio	Diferencia con respecto al datum	Cambio	Diferencia con respecto al datum	Cambio	Diferencia con respecto al datum	Cambio	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
(1)	(8)	(9)	(10) = (9) - (8)	(11)	(12) = (11) - (8)	(13)	(13) = (13) - (8)	(14)	(16) = (15) - (8)	(17)	(18) = (17) - (8)	
8-5	7.50	7.49	-0.01	7.49	-0.01	7.44	-0.06	7.44	-0.06	7.43	-0.07	
8-4	5.98	5.98	0.00	5.97	-0.01	5.94	-0.04	5.94	-0.04	5.93	-0.05	
8-3	4.48	4.48	0.00	4.48	0.00	4.45	-0.03	4.45	-0.03	4.45	-0.03	
8-2	2.99	2.99	0.00	3.00	0.01	2.98	-0.01	2.98	-0.01	2.98	-0.01	
8-1	1.48	1.49	0.01	1.49	0.01	1.48	0.00	1.48	0.00	1.48	0.00	

NOTAS: (+) Expansión
(-) Asentamiento

Observaciones:

Tabla 5.26 Cálculo de celdas de asentamientos



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Presa:

Celda de asentamiento No.:

Fecha: 20 de enero

Observador: J. Lima

Hoja: 1

Calculó: J. Morales

Graficó: D. Peña

Revisó: D. Tinoco

Presión barométrica:

1 027.87 mb

Temperatura: 21°

Altura del terraplén (m.s.n.m.):

Celda	Estación	Primera lectura	Segunda lectura	Lectura actual	Lectura inicial	Desplazamiento vertical
No.	km	m	m	m	m	m
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = ((3) + (4))/2	(6)	(7) = (5) - (6)
CA-1	0+178.00	2290.306	2290.306	2290.306	2290.490	-0.184
CA-2	0.194.50	2289.059	2289.059	2289.059	2289.610	-0.551
CA-3	0+202.75	2288.740	2288.740	2288.740	2289.262	-0.522
CA-4	0+210.80	2288.508	2288.508	2288.508	2288.920	-0.412
CA-5	0+152.00	2301.807	2301.807	2301.807	2302.664	-0.857
CA-6	0+178.00	2302.301	2302.301	2302.301	2302.899	-0.598

NOTA: (-) Asentamientos
(+) Expansiones

Observaciones:

La lectura inicial se toma el 25 de octubre.

Tabla 6.2 Formato para el registro de lecturas del piezómetro tipo Casagrande o abierto

	COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA	
	Proyecto: _____	
	Obra: _____	
Instrumento: Piezómetro abierto		
Número de serie: _____		Código de identificación _____
Sitio: _____	Coordenadas: X = _____ Y = _____ Z = _____	Fecha de instalación: _____
Elevación del bulbo (Z_{pz}): _____		Elevación del brocal (Z_{br}): _____

CARACTERÍSTICAS DEL INSTRUMENTO

Modelo: _____	Longitud del filtro: _____
Lectura inicial después de la instalación: _____	

UNIDAD DE LECTURA

Tipo: _____	Número de serie: _____
-------------	------------------------

1	2	3	4	5	6	7
Fecha	Hora	Lectura nivel de agua d	Elevación del nivel del agua en Piezómetro $Z_w=(Z_{br}-d)$	Columna de agua $h_w=(Z_w-Z_{pz})$	Presión de poro $p_w = h_w \gamma_w$	Elevación del nivel del embalse
d/m/a	h/m	m	m	m	kPa	m

	Midió: _____	Calculó: _____
	Revisó: _____	
	Observaciones: _____	
	Notas: d, distancia del brocal a la superficie libre del agua en el tubo de PVC; h_w , carga hidráulica; $\gamma_w = 9.807 \text{ kN/m}^3$, peso volumétrico del agua; p_w , presión de poro.	

Tabla 6.3 Formato para el registro de lecturas de piezómetro neumático

 <p>CONAGUA Comisión Nacional del Agua</p>	COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA GERENCIA DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA HIDROAGRÍCOLA					
	Proyecto: _____					
	Obra: _____					
Instrumento: <i>Piezómetro neumático</i>						
Número de serie: _____			Código de identificación _____			
Sitio: _____ _____ _____		Coordenadas: X = _____ Y = _____ Z = _____		Fecha de instalación: _____ _____ _____		
Elevación del bulbo: _____			Elevación del brocal: _____			
CARACTERÍSTICAS DEL INSTRUMENTO						
Rango: _____		Factor de sensibilidad: _____		Lectura cero o inicial: _____		
Lectura antes de la instalación: _____			Lectura inicial después de la instalación: _____			
UNIDAD O GABINETE DE LECTURA						
Tipo: _____			Número de serie: _____			
1	2	3	4	5	6	7
Fecha	Hora	Primera lectura	Segunda lectura	Tercera lectura	Presión promedio	Elevación embalse
d/m/a	h/m	kPa	kPa	kPa	kPa	m
Midió: _____		Calculó: _____		Revisó: _____		
Observaciones: _____ _____ _____ _____						

Este libro fue creado en InDesign e Ilustrador CSS, con la fuente tipográfica PRESIDENCIA en sus diferentes pesos y valores y se publicó en julio de 2012, México, D.F.

