



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTRUMENTACIÓN DEL PROYECTO
HIDROELÉCTRICO “EL CAJÓN”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELÉCTRICO Y
ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A:

CRISTIAN ARTURO JAIMES CÁZARES

DIRECTOR DE TESIS: ING. RODOLFO PETERS LAMMEL
ASESOR: ING. JUAN JACOBO SCHMITTER MARTÍN DEL CAMPO



México D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, y hermana,
Horacio Jaimes Cruz,
María del Carmen Cázares Romero
y Denisse Andrea Jaimes Cázares,
con amor y respeto...

DEDICATORIAS

A tí madre, con todo el cariño y agradecimiento, por toda la paciencia y comprensión que me has tenido; así como por todo el amor que me has dado.

A tí padre, por todo lo que me has enseñado y has aportado en mí vida.

A los dos por ser mis pilares en los momentos más difíciles y por inculcarme sus principios y valores que me han permitido alcanzar mis metas y objetivos.

A tí hermana, por ser mi amiga y compañera; pero sobre todo, por el apoyo y cariño que me has brindado.

A mis abuelos, Moisés Cázares y Guadalupe Romero, con todo el cariño y amor que me merecen, gracias por todas sus enseñanzas y experiencias, pero sobre todo por los principios y valores que me han inculcado.

A mi tío Moisés, con quien compartí los golpes y logros de mis estudios y por contribuir en mi formación integral.

En la memoria, Primitivo Cázares, pool over, + Firme + Enérgico + Unido = Hoy solo es honrado luchar.

A mi tío José Jaimes, por apoyarme para que siga adelante con mi desarrollo profesional y personal.

A mis grandes amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería, con los que conviví, compartí mis sueños y juntos superamos muchos obstáculos. Miguel Angel Rojas Silva, Isaac Barron Arellano, Hermilo Hernandez Noyola, Erika, Vianey, Polo, Manuel, Edgar, Chucho, Solís, Ricardo, Homero, Marco, Roberto, ..., y por haber hecho un gran equipo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas sus bendiciones.

Al Ing. Rodolfo Peters Lammel.

Por todo su apoyo y disposición en la realización de esta tesis y por transmitirme sus conocimientos y experiencias.

Al Ing. Juan Jacobo Schmitter Martín del Campo.

Por su guía, confianza y tiempo, en transmitirme sus experiencias y conocimientos para el desarrollo de esta tesis.

Al Ing. David Yañez Santillán, Anastacio Pérez Rivera y Gustavo García Ruíz, junto con todo el equipo de ingeniería y el departamento de instrumentación del P.H. "El Cajón". Profesionales, técnicos y ayudantes, amigos y compañeros todos, gracias por todas sus enseñanzas.

Al Ing. Sergio Macuil Robles, por su confianza, apoyo y amistad en el desarrollo de esta tesis.

Al Ing. Miguel Ángel Mendoza del Instituto de Ingeniería. Por su apoyo y amistad en el servicio social y en la realización de esta tesis.

Al Ing. Valdemar Carvajal y José Luis Zúñiga Terán, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Por todo el apoyo y la confianza que me brindaron.

A Ingenieros Civiles Asociados (ICA) y Fundación, ICA., Constructora "El Cajón" S.A. (CECSA). Por la beca y su apoyo otorgado en la materialización de este trabajo.

A mi Facultad de Ingeniería. Gracias por mi formación académica y por mantenerse siempre a la vanguardia educativa.

A mi Universidad Nacional Autónoma de México, a la cuál pertenezco con mucho orgullo, gracias por todas las satisfacciones que me ha brindado y a pesar de ser cuestionada y criticada, ha sido, es y seguirá siendo la máxima casa de estudios. Y como decía un profesor ¡Ay UNAM, que emoción es vivirla!...

A mis Profesores, gracias por que supieron sembrar en mí el deseo de superarme y aprender más; a los que hicieron, que aprender fuera una aventura divertida y digna de realizar, también por transmitirme sus conocimientos y experiencias y de lo cuál me siento orgulloso de ser ingeniero.

A mi Jurado, M.I. Luis Arturo Haro Ruiz, Ing. Gloria Mata Hernández, M.I. Rodolfo Lorenzo Bautista, M.I. Sergio Quintana Tierry, por su amable colaboración para mejorar esta tesis.

A Cesar Martínez Salazar, que por él libre el obstáculo del inglés.

A mis Entrenadores de Fútbol Soccer y Béisbol, Sergio, Calderón y Canseco, gracias por enseñarme a portar con orgullo los colores universitarios y a esforzarme por conseguir mis objetivos y metas, como el puma un felino autóctono de América, que reúne las características que se desea tengan los jugadores (agresivos, rápidos, valientes, fuertes e inteligentes) y aunque no se distingue por su gran tamaño, no obstante siempre sale airoso de la mayor parte de sus contiendas por su agilidad y astucia.

"2006, Año del Bicentenario del Natalicio del Benemérito de las Américas, Don Benito Juárez García"

OFICIO No. HMM/7A/ 751

México, D. F. a 12 SET. 2006

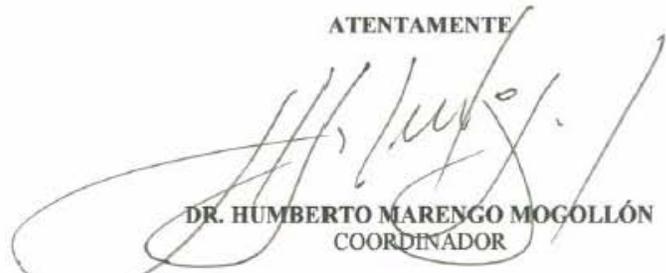
ING. DAVID YAÑEZ SANTILLÁN
GERENTE DE INGENIERÍA DE
CONSTRUCTORA INTERNACIONAL DE
INFRAESTRUCTURA S.A. DE C.V.
PRESENTE

En atención a lo solicitado con el oficio No. PHEC-ING-CEC-0034/06, de fecha 9 de agosto de 2006, recibido en la Jefatura del Proyecto el día de hoy, con el presente manifestamos nuestra aceptación para que los estudiantes que se citan a continuación puedan utilizar información del Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, para desarrollar sus respectivos temas de tesis, como parte del programa de aceptación de estudiantes para el desarrollo de prácticas profesionales establecido por Ustedes con la UNAM.

No.	Nombre	Tema
1	Carlos Rafael Rodríguez Méndez	Proceso constructivo de la cortina de enrocamiento con cara de concreto del P. H. El Cajón
2	Imelda Juárez Sevilla	Procedimiento de inspección de materiales de plantas de trituración en el Proyectos Hidroeléctrico El Cajón, Tepic Nayarit.
3	Astrid Rangel Ramos	Materiales para la zona de filtros en la cortina, utilizados en el P. H. El Cajón.
4	Raúl Zapatero Rodríguez	Anclaje y prueba de extracción de anclas en el P. H. El Cajón, Tepic Nay.
5	Cristian Jaimes Cazares	Instrumentación del Proyecto Hidroeléctrico El Cajón

Sin más por el momento quedo de Usted.

ATENTAMENTE



DR. HUMBERTO MARENGO MOGOLLÓN
COORDINADOR



C.c.p.- Ing. José A. Gracia García Sánchez.- Gerente Técnico de Proyectos Hidroeléctricos.
Ing. Daniel Farjeat Páramo.- Gerente de Construcción de Proyectos Hidroeléctricos.
Ing. J. Rodolfo Cervantes Avilez.- Jefe de Proyecto
Expediente
Minutario.

ÍNDICE

Antecedentes.....	1
a. Ubicación y descripción del P.H. “El Cajón”.....	1
b. Programa de construcción.....	5
Capítulo I. Objetivos de la instrumentación en presas.....	8
1.1. De la empresa contratista.....	8
1.2. Del sistema de auscultación de la CFE.....	9
1.3. Del ingeniero eléctrico y electrónico.....	9
1.4. Según la organización ICOLD (Comité Internacional de Grandes Presas).....	10
1.5. Factores que influyen de manera directa en el comportamiento de las estructuras.....	10
1.6. Conceptos que se miden para visualizar el comportamiento de las estructuras.....	12
1.6.1. En el cuerpo de la cortina.....	12
1.6.2. En la cara de concreto y parapeto.....	15
1.6.3. En las laderas.....	16
1.6.4. En el embalse.....	17
Capítulo II. Acondicionamiento físico para la instalación del equipo y responsabilidades del personal calificado.....	18
2.1. Instrumentación instalada en el P.H. “El Cajón”.....	19
2.2. Resultados de las mediciones.....	19
2.3. Análisis e interpretación de los resultados.....	20

Capítulo III. Extensómetros de placa con transductor eléctrico.22

3.1. Principio de funcionamiento.....	22
3.2. Instalación.....	29
3.3. Resultados.....	32
3.4. Interpretación.....	37

Capítulo IV. Celdas de presión total con transductor de cuerda vibrante.....41

4.1. Principio de funcionamiento.....	41
4.2. Instalación.....	42
4.3. Resultados.....	43
4.4. Interpretación.....	45

Capítulo V. Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante.....49

5.1. Principio de funcionamiento.....	49
5.2. Instalación.....	49
5.3. Resultados.....	52
5.4. Interpretación.....	54

Capítulo VI. Inclínómetros verticales.....57

6.1. Principio de funcionamiento.....	57
6.2. Instalación.....	57
6.2.1. Instalación de inclinómetros verticales de aluminio.....	57
6.2.1. Instalación de inclinómetros verticales de tubería ABS.....	61
6.3. Resultados.....	62
6.3.1. Desplazamientos verticales.....	63

6.3.2. Desplazamientos horizontales.....	68
6.4. Interpretación.....	73
6.4.1. Desplazamientos verticales.....	73
6.4.2. Desplazamientos horizontales.....	75
Capítulo VII. Niveles hidráulicos de asentamiento.....	80
7.1. Principio de funcionamiento.....	80
7.2. Instalación.....	81
7.3. Resultados.....	84
7.4. Interpretación.....	87
Capítulo VIII. Extensómetros de barra.....	89
8.1. Principio de funcionamiento.....	89
8.2. Instalación.....	90
8.3. Resultados.....	93
8.4. Interpretación.....	95
Capítulo IX. Líneas de convergencia.....	97
9.1. Principio de funcionamiento.....	97
9.2. Instalación.....	97
9.3. Resultados.....	98
9.4. Interpretación.....	100
Capítulo X. Acciones correctivas y preventivas, aplicadas.....	102
10.1. Excavación del talud izquierdo, en la zona de compuertas del vertedor de excedencias, desde la elevación 396msnm.....	102

10.2. Instalación de extensómetros de barra en la bóveda de los túneles de aspiración.....	104
10.3. Instalación de extensómetros de barra en el talud existente entre la subestación y el camino de construcción 7MD.....	105
Conclusiones.....	107
Apéndice.....	110
Bibliografía.....	116

ANTECEDENTES

a. Ubicación y descripción del P.H. "El Cajón".

La hidroeléctrica "El Cajón" se localiza en el estado de Nayarit, a 47km en línea recta al sureste de la ciudad de Tepic, en los municipios de la Yesca y Santa María del Oro, en los terrenos comunales del poblado Cantiles. Se ubica sobre el río Santiago aproximadamente a 60km aguas arriba de la C. H. Aguamilpa-Solidaridad, sus coordenadas geográficas son $+21^{\circ}25'41''$ de latitud norte y $-104^{\circ}27'14''$ de longitud oeste. Figura 1.

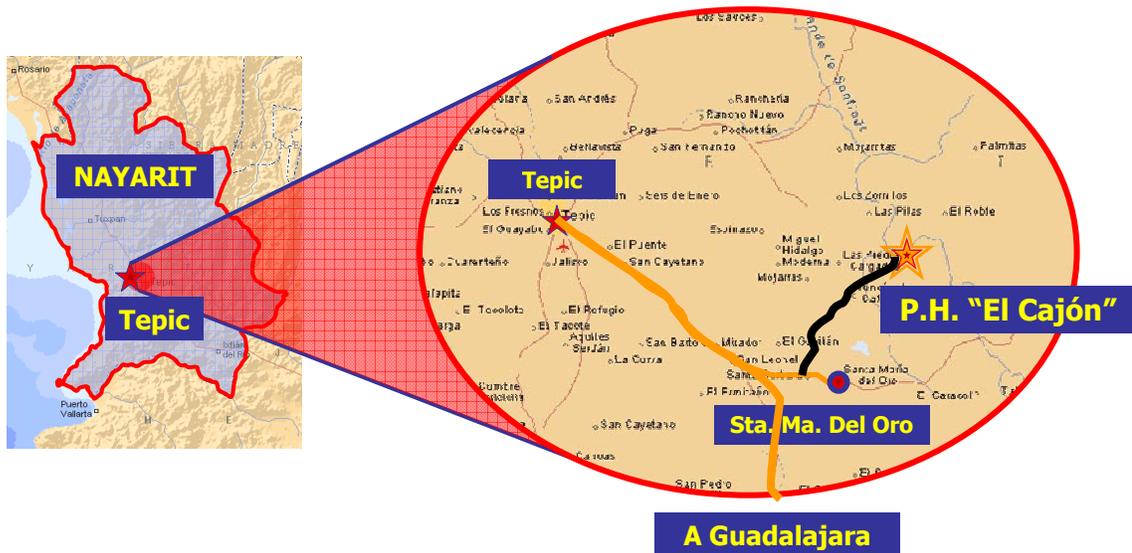


Figura 1. Localización del P.H. "El Cajón".

El Cajón forma parte del sistema hidrológico Santiago, que comprende los ríos Santiago, Huaynamota, Bolaños, Juchipila, Verde y el lago de Chapala con 27 proyectos y un potencial hidroenergético de 4,300MW, del cuál sólo se ha desarrollado el 32%, mediante la construcción de seis centrales. "El Cajón" ocupa el segundo lugar en potencia y generación dentro del sistema, después de la central de Aguamilpa-Solidaridad y está conceptualizado como una planta para suministrar energía de pico con una potencia total instalada de 750MW y

producción media anual de 1 228GWh. (Figura 2.). Beneficiará a la central hidroeléctrica Aguamilpa, incrementando la energía firme o estable, en el almacenamiento del embalse del Cajón.

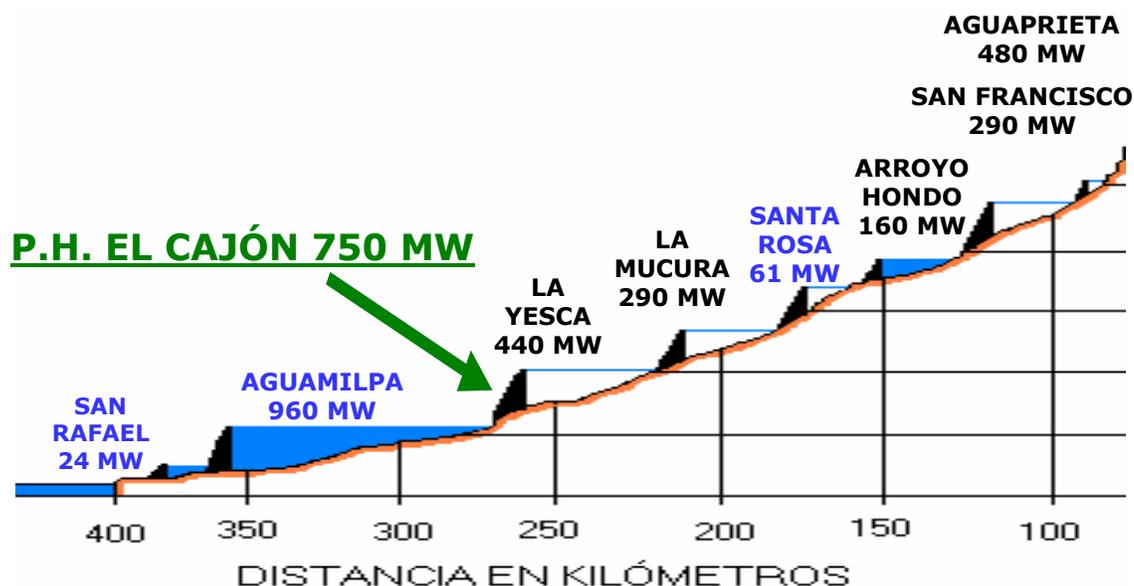


Figura 2. Sistema hidrológico Santiago.

Para darnos un panorama más general describiremos algunas características generales del financiamiento:

El Contratista es:

CIISA.- Es una Constructora Internacional de Infraestructura S.A., la cuál está formada por dos subsidiarias de ICA (Ingenieros Civiles Asociados) y Promotora e Inversora Adisa (PIADISA), además de las empresas: La Peninsular, compañía constructora y la rusa Energomachexport Power Machines. Ingenieros Civiles Asociados, es la empresa de ingeniería y procuración más grande de México. Fue fundada en 1947 y ha realizado obras de construcción e ingeniería en 21 países. Las principales unidades de negocios de ICA son construcción civil y construcción industrial. Energomachexport Power Machines es la empresa rusa líder en la venta de equipos para la producción de

energía eléctrica, así como para el bombeo de gas, equipo de transporte y de ferrocarril, con 35 años de experiencia, en el desarrollo de complejos proyectos de generación de energía, con operación a nivel mundial. La Peninsular, compañía constructora, S.A. de C.V. es una sociedad mexicana constituida en 1978, que aportará sus capacidades y experiencias en la parte civil del proyecto. CECSA, Constructora El Cajón, S.A. de C.V., es una empresa formada por las empresas, Ingenieros Civiles Asociados (ICA), Promotora e Inversiones Adisa (PIADISA) y la Compañía Constructora (PENINSULAR). Esta empresa celebró con CIISA un contrato mixto de obra para la ejecución de las obras civiles y obras asociadas del proyecto. Este contrato asciende a USD 381 Millones. ENERGO, Energomachexport Power Machines, es la empresa que celebró con CIISA un contrato para la ejecución de las obras electromecánicas, ingeniería, fabricación, transporte, montaje, pruebas y puesta en servicio de dos unidades turbogeneradoras equipadas, de 375MW de potencia nominal cada una. Este contrato asciende a USD 124 Millones. Su participación activa en el sitio del proyecto empezará en el año 2004 y su parte importante empezará en el año 2005.

Y el cliente es:

La Comisión Federal de Electricidad. El tipo de contrato es a precio alzado y precios unitarios. El monto de la oferta es de 748MDD. La fecha de inicio fue en abril del 2003 con un plazo de 54 meses. El tipo de cortina es de enrocamiento con cara de concreto de 186.50m de altura, con casa de máquinas subterránea, el vertedor de 2 canales de 96m de ancho y el equipamiento son dos turbinas de tipo Francis de 375MW.

Dada la importancia de la obra en la generación de energía eléctrica para nuestro país, la magnitud de la estructura, la gran derrama económica, el largo plazo de explotación esperado y por razones de seguridad, es necesario que durante toda su vida útil se observe el comportamiento de la presa, para lo cuál

se elaboró un proyecto de instrumentación que considera la instalación de varios instrumentos, con la finalidad de conocer diferentes comportamientos o parámetros en la construcción.

La instrumentación de la presa "El Cajón" se diseñó teniendo en cuenta el tipo de presa a construir. En nuestro caso se trata de una construcción de concreto tipo terraplén. (Figura 3.). Para ello consideramos los estudios geológicos, topográficos, geométricos e hidrológicos para el cauce del río, clima, impacto ambiental y social, pero sobre todo el análisis de esfuerzos y deformaciones en el comportamiento de las estructuras, las hipótesis y resultados del cálculo de diseño de la estructura, así como el comportamiento esperado de la misma.



Figura 3. Presa de concreto tipo terraplén.

También la instrumentación nos permite contabilizar la información obtenida y la rapidez con la que es procesada y analizada para tomar alguna decisión, siendo el tiempo un factor importante y para lograrlo es necesario contar con instrumentos sencillos y resistentes con la precisión, exactitud y una

adecuada repetibilidad de los eventos, así como contar con personal capacitado para supervisar las etapas de instalación, medición, proceso y análisis de datos, es por esto que para acelerar la toma de lecturas y el proceso de adquisición de datos más significativos, para evaluar el comportamiento de la presa, se implementó una instrumentación parcialmente automatizada, la cual considera el control continuo de los desplazamientos principales de las estructuras.

b. Programa de construcción.

Las etapas dentro del programa de construcción consisten en llevar a cabo la:

1. Obra de desvío.
2. Obra de contención.
3. Obra de generación.
4. Obra de excedencias.
5. Y obras asociadas.

La obra de desvío: Consiste en dos ataguías y dos túneles de 734.09 y 811.05m de longitud, cada túnel tiene sección portal de 14 x 14m. Para ello se cuenta con las compuertas para cierre provisional y cierre final de los túneles, estas estructuras se han utilizado en otros proyectos anteriores y sólo requieren restauración. Figura 4.

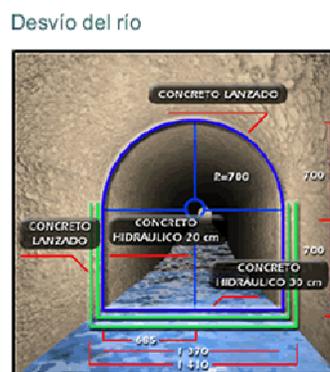


Figura 4. Túnel perteneciente a la obra de desvío.

La obra de contención: Es la cortina de materiales graduados o enrocamiento con cara de concreto, por su altura será la mas alta del mundo en su tipo, supera a la presa Aguamilpa-Solidaridad por un metro y se utilizarán 10.3Mm³ de roca. Figura 5.

Cortina

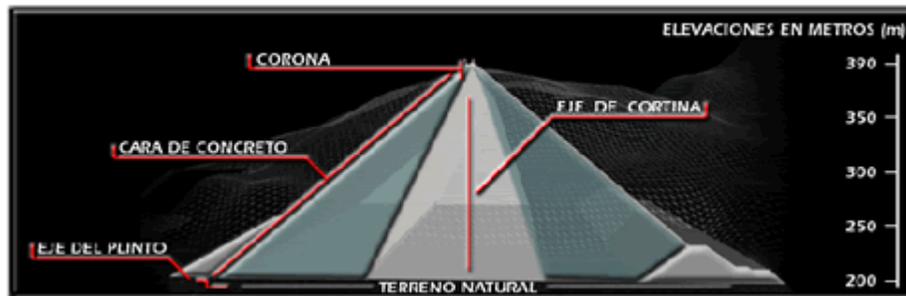


Figura 5. Cortina de enrocamiento con cara de concreto.

La obra de generación: Incluye la obra de toma de concreto reforzado y revestidos con camisa de acero, dos conductos a presión de 7.95m de diámetro para alimentar las turbinas de la casa de máquinas, que se encuentra en caverna o subterránea, ubicada en la margen derecha del río, con acceso por túnel vehicular equipada con dos turbogeneradores de 375MW cada uno, galería de oscilación y un sólo túnel de desfogue, así como la obra de control y se incluye una subestación encapsulada SF6 y se prevén 2 líneas de transmisión de 400kV para conducir la energía eléctrica y conectarla al sistema eléctrico nacional. Figura 6.

Casa de máquinas



Figura 6. Subestación encapsulada SF6 con 2 líneas de transmisión de 400 kV.

La obra de excedencias: Está integrada por un canal de llamada a cielo abierto sobre la margen derecha y una zona de control formada por cimacio y pilas de concreto con 6 compuertas metálicas radiales operadas con servomotores y un canal de descarga. Figura 7.

Vertedor



ESTRUCTURA DE DESCARGA
GASTO DE DISEÑO

Dos canales de eje recto
14,864m³/s

Figura 7. Canales de llamada a cielo abierto y zona de control con 6 compuertas.

Y las obras asociadas: en estas principalmente se encuentran los caminos para la construcción de las obras, edificios auxiliares, almacenes y bodegas. Figura 8.



Figura 8. Caminos asociados para la construcción.

CAPÍTULO I

OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACIÓN EN PRESAS

Es verificar la calidad de la construcción y asegurar el adecuado comportamiento durante la construcción, embalse y operación de las estructuras, permitiendo corregir con oportunidad las anomalías o desviaciones al comportamiento esperado, contar con información cuantitativa para inmediatamente introducir adecuaciones al diseño o a las especificaciones que nos permitan tener una estructura confiable y segura.

Es necesario considerar que en este tipo de construcciones existen objetivos ya establecidos por las dependencias a cargo del proyecto. Uno de ellos es el de la contratista o empresa a cargo de la construcción del proyecto y el sistema de auscultación de CFE, (sistema de exploración mediante instrumentos adecuados), elaborado por la Subdirección de Comportamiento de Estructuras (SCE), los cuales hay que considerar, para cumplir con las especificaciones de calidad.

1.1. De la empresa contratista.

Satisfacer las necesidades del cliente en este caso CFE, superando sus expectativas y que la satisfacción de los requerimientos del cliente quiere decir que cuando menos se debe cumplir con lo acordado en el contrato. Sin embargo se busca, más que tener clientes satisfechos, desarrollar clientes fieles y convencidos de que trabajar con la empresa les reditúa más valor que cualquier otro. Sin embargo debe entenderse que se debe superar las expectativas del cliente sin menoscabo económico a la empresa. No se trata de regalar trabajo al cliente, sino de hacerlo innovadoramente para redituarle en beneficios que no hubiera esperado normalmente.

1.2. Del sistema de auscultación de la CFE.

La instrumentación geotécnica es la herramienta que permite obtener información cuantitativa para adecuar y corregir las obras civiles de manera racional, obteniendo seguridad y eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad.

La instrumentación tiene como fin conocer el comportamiento de las estructuras, desde la etapa de construcción, para verificar hipótesis y criterios de diseño, para ajustar especificaciones de materiales y su colocación, durante la vida útil de la estructura, para detectar oportunamente cualquier anomalía que se presente.

Este conocimiento permite evaluar en todo momento las condiciones de seguridad de las estructuras y sobre todo, observar la tendencia de las variables que pueden indicar un comportamiento anormal y peligroso.

La CFE, ha establecido el control regular del comportamiento de sus grandes presas y otras estructuras de interés, desde la construcción, mediante la interpretación y el análisis oportuno de los resultados de la medición y proceso de datos de la instrumentación, aunado a inspecciones especializadas periódicas.

1.3. Del ingeniero eléctrico y electrónico.

Desarrollar e implementar la instrumentación geotécnica con dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos para conocer el comportamiento de las variables físicas que influyen de manera directa sobre las estructuras de una presa hidroeléctrica, optimizando la integración y funcionamiento de los sistemas constructivos y de seguridad, transformando la naturaleza para generar electricidad en bienestar de la sociedad a la que se debe.

1.4. Según la organización ICOLD (Comité Internacional de Grandes Presas).

Reconoce tres objetivos principales de la instrumentación, que la SCE de CFE ha hecho suyos:

- Verificar las hipótesis de diseño, conocer la influencia de diversos factores en el comportamiento y detectar anomalías durante la etapa de construcción, así como la necesidad de eventuales cambios en el diseño y su impacto en la seguridad, estableciendo un control durante la etapa de construcción.
- Conocer el comportamiento de las estructuras durante su operación bajo condiciones de carga normales o extraordinarias (como los sismos o primer llenado), con el fin de evaluar su seguridad y corregir con oportunidad las anomalías o deficiencias que se presenten.
- Obtener conocimientos que permitan mejorar el estado del conocimiento en diseño y construcción de presas, reduciendo costos sin demérito de la seguridad, de las estructuras térreas y cimentaciones que se construyan en el futuro.

1.5. Factores que influyen de manera directa en el comportamiento de las estructuras.

Son los principales factores que influyen de manera directa sobre la estructura de enrocamiento y cara de concreto, como los:

- Riesgos geológicos, la estabilidad en laderas y movimientos de bloques de roca.

- Las filtraciones y niveles de agua a través de la cimentación, laderas y el terraplén.
- Las deformaciones del terraplén y la cara de concreto.
- Los movimientos de las juntas de las losas de la cara de concreto.
- La ocurrencia de sismos moderados y fuentes cercanas.

Los cuáles debemos considerar y controlar para el diseño específico del tipo, número y selección de los aparatos de instrumentación, esto se estableció en función de los detalles del diseño de la cortina: geometría y materiales del terraplén, de la cara de concreto y el arreglo de juntas; así como de las características topográficas, geológicas y geotécnicas de los detalles del sitio.

En la etapa de diseño de la cortina se consideró que las estructuras geológicas en la cimentación de la presa no representarán un riesgo para la seguridad, después de que se realicen los tratamientos de estabilización, impermeabilización o mejoramiento de la roca, por lo que se considera suficiente instalar una red de piezómetros y vertedores de aforo en las galerías de tratamientos, para anticipar y corregir cualquier anomalía que pudiera presentarse a través de alguna estructura geológica, como son las fallas Playón y Fuertecitos. A medida que avance el diseño del proyecto y la construcción de la obra, se podrá ponderar mejor el riesgo geológico y modificar los alcances de la instrumentación requerida.

El sistema de auscultación propuesto para las estructuras civiles del P.H. "El Cajón", es parcialmente automatizado, en donde se incorporan instrumentos de vanguardia tecnológica. Los instrumentos automatizados permitirán obtener información de parámetros y zonas seleccionadas con la mayor oportunidad posible, reduciendo significativamente tiempos de lectura y proceso de datos, disminuyendo los costos asociados y reduciendo errores de medición, incrementando la confiabilidad de la información.

La instrumentación no automatizada obligará a realizar recorridos en sitios específicos de la obra para complementar la información con mediciones manuales y con inspecciones visuales frecuentes, lo que permitirá la identificación temprana de cualquier anomalía que se presente particularmente en zonas no instrumentadas.

El esquema es propuesto para mantener el control regular del comportamiento de la presa de manera confiable y ordenada, mediante el registro sistemático de datos y su comparación con el intervalo de valores obtenidos de los análisis y modelos matemáticos que se realicen.

1.6. Conceptos que se miden para visualizar el comportamiento de las estructuras.

Dentro de las variables a medir o parámetros a considerar y atendiendo a los objetivos y el comportamiento esperado, la instrumentación de la presa "El Cajón" se ha dividido en cuatro grupos: cuerpo de la cortina, cara de concreto, laderas y zona del embalse.

1.6.1. En el cuerpo de la cortina.

Desplazamientos del Terraplén.- Considerando la altura de la cortina de 186m y la deformabilidad del enrocamiento que será utilizado, se esperan desplazamientos importantes en el terraplén durante la construcción, primer llenado y la operación del proyecto.

Es importante cuantificar los movimientos que sufrirá el terraplén en superficie para evaluar la pérdida de bordo libre o la movilización incipiente de taludes y en diferentes puntos del interior; tanto para evaluar la estabilidad como para establecer su influencia sobre el comportamiento de la cara de concreto.

También se pretende establecer la influencia de la geometría de la boquilla sobre el terraplén en el plano de estanqueidad.

Las deformaciones que sufra el terraplén durante las etapas de construcción y primer llenado tendrán influencia fundamental en el comportamiento de la cara de concreto, que finalmente representa, junto con los sellos de las juntas, el plano de estanqueidad de la cortina. Deformaciones excesivas en el terraplén pudieran llegar a agrietar las losas o romper los sellos de las juntas.

Los Esfuerzos y Deformaciones.- son otro aspecto importante en la valoración del comportamiento de las cortinas de materiales térreos, consiste en determinar sus propiedades reales de deformabilidad, para ello la SCE-CFE se ha esforzado en aplicar los conceptos fundamentales de la teoría y ha instrumentado, con resultados positivos mediante celdas de presión y extensómetros, terraplenes de materiales de granulometría fina en arreglos que permiten obtener el estado de esfuerzos y deformaciones. Los resultados en materiales gruesos, como los enrocamientos, no han sido plenamente satisfactorios, aunque se considera que la interacción entre materiales ha sido un factor preponderante en ello. Con la finalidad de obtener el estado de esfuerzos y deformaciones en sitios seleccionados en el interior del terraplén y evaluar el módulo de deformabilidad del material 3B del terraplén considerando dicho estado, se ha dispuesto instalar sólo dos grupos de celdas y extensómetros eléctricos.

Filtraciones.- La magnitud de los caudales de filtración a través del plano de estanqueidad formado por las losas de la cara de concreto y las pantallas de inyección, permitirán evaluar de manera rápida la condición de la cortina y detectar la ocurrencia de posibles agrietamientos de las losas de la cara de concreto.

Dos parámetros principales para evaluar el comportamiento de la cortina son: el caudal que cruza el plano impermeable y la ubicación de los puntos de filtración, este último en el caso de requerir la aplicación de algún tratamiento de sellado.

Niveles Piezométricos.- Conjuntamente con los movimientos de las juntas de la cara de concreto, el caudal de las filtraciones y los niveles de agua representan los parámetros más relevantes para evaluar el comportamiento de una presa de enrocamiento con cara de concreto.

Las mediciones de niveles piezométricos en el terraplén y sus apoyos son importantes para evaluar la eficiencia del plano de estanqueidad al permitir conocer los niveles de agua en el interior de las estructuras, para introducir en los análisis y evaluación de su estabilidad. Además facilitan la ubicación de las posibles vías de flujo de agua.

Considerando el diseño de este tipo de presas y la permeabilidad del material de enrocamiento obtenida en los ensayos realizados en el terraplén de prueba, se espera que el nivel de agua dentro de la presa esté gobernado por el nivel del piso de la galería de drenaje y el de los puntos de ingreso de las filtraciones.

Aceleraciones Sísmicas.- La obra se localiza en una zona de alta sismicidad asociada a la subducción de la placa tectónica del Pacífico bajo la de Norteamérica, donde se pueden generar sismos de gran magnitud y actividad tectónica regional que pueden generar sismos medianos y pequeños frecuentes. Por lo anterior es necesario conocer tanto la magnitud de las aceleraciones sísmicas, como la respuesta de las estructuras ante estas cargas, para valorar su impacto en la seguridad. Para evaluar el comportamiento sísmico de la cortina se dispondrá de acelerógrafos tanto en diferentes puntos del terraplén, como de los empotramientos y desplante de la cortina.

1.6.2. En la cara de concreto y parapeto.

Movimientos de las juntas.- Por la experiencia previa en este tipo de presas, se esperan movimientos de abertura, asentamientos y corrimientos principalmente en la junta perimetral, de abertura y asentamientos en la junta losas-parapeto y de abertura en las juntas verticales cercanas a las laderas, con valores máximos del orden de 10cm.

Los mayores movimientos de abertura de la junta perimetral se esperan en la sección máxima o de mayor altura, aunque también se tendrán movimientos de zigzag importantes en las juntas verticales de las losas en la proximidad de las laderas.

La seguridad de la presa no depende exclusivamente del caudal de las filtraciones que se presente a través de las juntas o grietas de las losas, sino también del diseño del material y de los cuidados que se tengan durante su tendido y compactación. Sin embargo, un gasto considerable en las filtraciones se traduce en una pérdida económica importante del proyecto, de ahí la importancia de instrumentar las juntas y losas de la cara de concreto para detectar las juntas que potencialmente pueden tener problemas por la rotura de los sellos.

Se tiene previsto instalar extensómetros en la junta perimetral, en la junta de las losas con el parapeto y en algunas juntas verticales para medir los movimientos en una, dos o tres direcciones, según sea el caso.

Movimientos de las losas.- Como ya se ha indicado, el elemento impermeable de la presa lo constituyen las losas de concreto y los sellos instalados en el sistema de juntas que proporcionan a las losas la flexibilidad para seguir las deformaciones del terraplén.

Las losas de mayor longitud corresponden a las losas centrales y es de esperarse que éstas también presenten las mayores deformaciones. Se instalarán inclinómetros inclinados en el interior de tres losas para obtener la deformabilidad durante las etapas de construcción, primer llenado y operación en la sección máxima y en dos intermedias entre ésta y las laderas. Además, es de gran interés detectar grietas potenciales en las losas al permitir ubicar los sitios donde la geometría de las losas cambie abruptamente de pendiente al deformarse el terraplén.

La instalación de los instrumentos se realiza con base en referencias topográficas sobre el terraplén y la cara de concreto. Estos instrumentos serán de utilidad para conocer los movimientos superficiales de las losas durante la etapa de construcción y primer llenado, hasta que sean cubiertas las losas por el embalse.

Desplazamientos de la Corona.- Conocer los movimientos del parapeto también es importante para evaluar la seguridad de la estructura ya que, junto con los movimientos de las losas, se reflejarán en los desplazamientos de la junta, parapeto-losas, que estará expuesta y eventualmente sumergida y considerando las deformaciones a largo plazo y por sismos. Los sellos de esta junta podrán sufrir daños que implicarían riesgos por erosión superficial.

1.6.3. En las laderas.

Niveles Piezométricos.- En las laderas y galerías se dispondrán piezómetros abiertos para valorar la eficiencia de las pantallas de inyección y de drenaje, así como para conocer el valor de las subpresiones que actúan en los bloques de roca y las estructuras para evaluar su estabilidad. Aún no se cuenta con el arreglo definitivo de las galerías de tratamientos, pero se considera necesario cubrir las zonas con riesgo de inestabilidad y las estructuras geológicas principales como las fallas Playón y Puertecitos.

Filtraciones.- La medición del caudal de filtraciones a través de las laderas permitirá ubicar cambios en la permeabilidad aparente de la roca, lo que pudiera estar asociado a destapotamientos, agrietamientos o desplazamientos de discontinuidades, situaciones todas críticas para la seguridad de la obra.

Se instalarán dispositivos de aforo en diversos sitios de las galerías de inyección y drenaje que se construyan en las laderas, para cuantificar el caudal de las filtraciones.

Movimientos de Bloques o Cuñas.- Para evaluar la estabilidad de laderas, cortes y excavaciones, se requiere conocer los desplazamientos de los bloques o cuñas de roca que las pudieran afectar, así como auscultar sitios específicos para evaluar el desempeño de los tratamientos de estabilización que se realicen.

1.6.4. En el embalse.

Sismicidad Inducida.- Ante los riesgos sismotectónicos del sitio, se espera que la sismicidad natural del embalse se modifique, al menos temporalmente, por la actividad o activación de las estructuras geológicas del sitio durante el primer llenado y los siguientes años, generando sismos pequeños y moderados de epicentros cercanos a la cortina, pero sin descartar la posibilidad de uno grande aunque de corta magnitud. Por lo que es necesario establecer un programa que permita conocer la sismicidad local varios años antes del primer llenado y valorar su evolución con el tiempo, durante un periodo razonable.

CAPÍTULO II

ACONDICIONAMIENTO FÍSICO PARA LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO Y RESPONSABILIDADES DEL PERSONAL CALIFICADO

Para garantizar la implantación adecuada del sistema de auscultación es fundamental realizar las adecuaciones a los instrumentos y la preparación de los sitios donde serán instalados, las pruebas de funcionamiento, calibraciones y su instalación y medición de acuerdo a los procedimientos correctos, previamente adaptados al proyecto.

El éxito de la instalación dependerá de que se cuente con ingenieros y técnicos capacitados, con experiencia y responsabilidad comprobada para hacerse cargo de la instalación, medición y puesta en servicio de la instrumentación, así como de un adecuado trabajo de planeación, coordinación, ejecución y control por lo que el contratista deberá proporcionar personal capacitado y o disponer de los recursos necesarios para capacitar al personal en tiempo y forma, bajo la supervisión de la SCE de CFE.

Residente de Instrumentación.- Representante de la SCE y CFE, ante la residencia general del proyecto.

Auxiliar del Residente de Instrumentación.- Representante del contratista ante la residencia de instrumentación del proyecto.

Jefe de frete o de cuadrilla para instalaciones.- Responsable de todo el proceso de instalación de instrumentos desde la recepción, pruebas previas, procedimientos definitivos de instalación y puesta en servicio, instalación, levantamiento y elaboración de fichas de instalación, reportes del estado actual de la Instrumentación y compilación de documentos de instalación para la

memoria final de instrumentación, así como de todos los requisitos que requiera el sistema de gestión de calidad.

Instalación y puesta en servicio.- Instalación de todos los instrumentos que contempla el proyecto de instrumentación, así como su cableado, protecciones, señalamientos y conexiones.

Vigilancia de Instrumentos.- Vigilancia permanente de los instrumentos expuestos que contempla el proyecto de instrumentación, así como su cableado, protecciones, señalamientos y conexiones.

2.1. Instrumentación instalada en el P.H. "El Cajón".

El tipo, cantidad y ubicación de los instrumentos se definió en función de las dimensiones y geometría de las estructuras y de las particularidades de la geología y topografía del sitio, esto permitirá cubrir las zonas consideradas de mayor interés para evaluar el comportamiento y la seguridad de la estructura, obteniendo valores cuantitativos de los parámetros a medir.

El proceso de instalación se debe regir por el programa general de construcción, aprobado para el Proyecto Hidroeléctrico "El Cajón".

El procedimiento de instalación de cada instrumento en particular debe realizarse de acuerdo con los procedimientos específicos que elabore el contratista bajo un sistema de gestión de calidad, los cuales deben ser revisados y aprobados por la SCE de CFE antes de su implantación.

2.2. Resultados de las mediciones.

Las mediciones se realizan de acuerdo a un programa ya establecido, el cual define la frecuencia de las mediciones que dependerá de las condiciones en

las que se encuentre la obra y de las necesidades o anomalías que se presenten en algún momento. El proceso de medición se debe de realizar de acuerdo a los procedimientos y operación de los equipos según sea el fabricante, aplicándose los principios de un sistema de gestión de calidad, particularmente en cuanto a procedimientos, calibración y garantías. La información recabada de las mediciones consistirá en realizar todos los cálculos numéricos necesarios para obtener el valor de las variables que se controlan y elaborar las gráficas correspondientes para su análisis y consulta. Sin embargo la frecuencia de medición se ajustará en función del comportamiento de las estructuras y la evolución de las variables o fenómenos que se controlen.

2.3. Análisis e interpretación de los resultados.

El proceso de los datos consiste en realizar los cálculos numéricos necesarios para obtener el valor de las variables que se controlan, elaborar las gráficas y que se presenten con claridad los valores así como sus tendencias de acuerdo con los procedimientos elaborados para este fin, y emitir un informe oportuno para su análisis y consulta.

El procedimiento se indica en forma esquemática en la (figura 2.3-2.), e incluye las siguientes actividades; Introducir los datos en un programa llamado captura, realizar los cálculos correspondientes, revisar resultados, almacenar los datos en una base de datos local, generar envíos de datos con archivos electrónicos tipo bd (base de datos), exportar datos de campo para el control de la medición y generar informes de mediciones.

Proceso de Datos

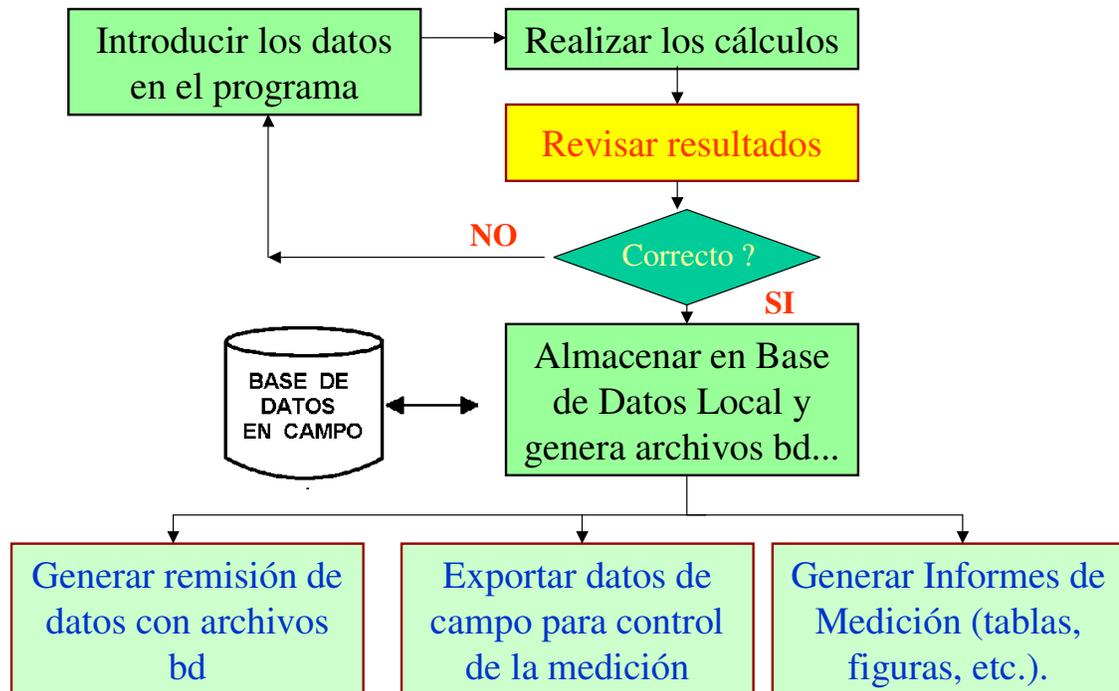


Figura 2.3-2. Diagrama de flujo para el proceso de datos.

CAPÍTULO III

EXTENSÓMETROS DE PLACA CON TRANSDUCTOR ELÉCTRICO

3.1. Principio de funcionamiento.

Es un instrumento que se instala para medir desplazamientos de discontinuidades geológicas y deformaciones de cuerpos térreos.

Estos son requeridos para el monitoreo de desplazamientos horizontales o grietas de tensión en estructuras térreas, los extensómetros de placa (figura 3.1-1.), emplean como sensor un potenciómetro eléctrico longitudinal con una flecha de acero inoxidable que al variar su posición induce un cambio de resistencia eléctrica que se registra mediante una unidad de medición, en donde se obtienen lecturas que se relacionan con los datos de calibración del sensor para traducir las variaciones de resistencia a unidades de longitud (mm).

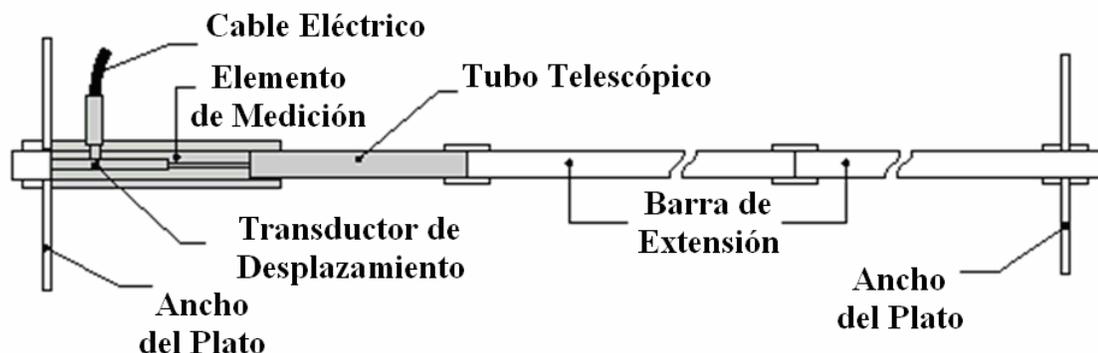


Figura 3.1-1. Extensómetro de placa con transductor de desplazamiento potenciométrico.

El transductor de desplazamiento potenciométrico, es un dispositivo relativamente simple. Un contacto deslizable (escobilla) se mueve sobre un

elemento resistivo. El contacto está ligado directamente a través de un mecanismo al eje del sensor. La palanca está eléctricamente aislada del eje sensor. Se encuentran transductores potenciométricos tanto de desplazamiento lineal como angular. (Figura 3.1-2.). En algunos transductores lineales una segunda escobilla puede corregir los problemas ocasionados por una flexión en los soportes. La salida es una fracción de tensión o diferencia de potencial, proporcional al desplazamiento, de la excitación. El elemento resistivo potenciométrico puede contar con uno o más contactos eléctricos en posiciones específicas, llamados divisores de voltaje.

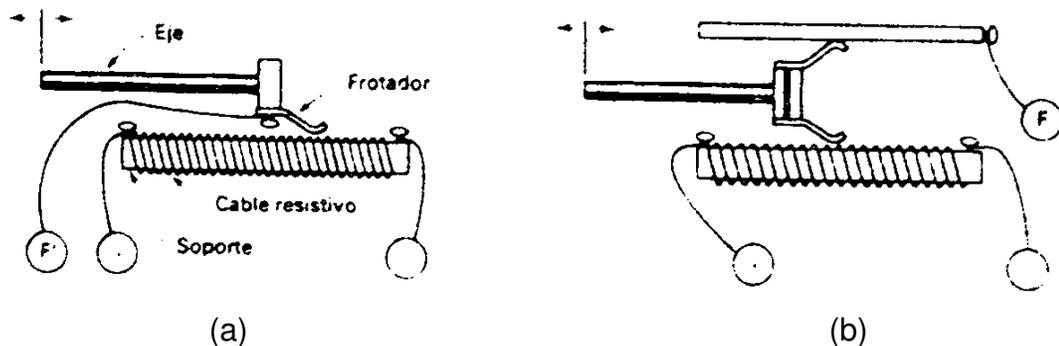


Figura 3.1-2. Tipos básicos de transductores de desplazamiento resistivos: a) Lineal básico. b) Lineal con barra de conexión.

Cuando el elemento potenciométrico es bobinado (típicamente de platino o níquel) la resolución viene dada por el número de vueltas por unidad de longitud. Para obtener la resolución alta se acostumbra a utilizar resistencias elevadas formadas con un hilo delgado. Esto sin embargo, puede ocasionar errores al variar la carga del transductor debido a la elevada impedancia de salida. Los elementos potenciométricos de resolución continua, están realizados de plástico conductor, película de carbón, película metálica o mezclas metal-cerámica. El eje alrededor del cual se bobina el hilo es de material aislante o metálico recubierto de aislante. Existen diversas formas de escobillas y son fabricadas, normalmente, de aleaciones de materiales preciosos con cobre. Para

minimizar los efectos de los golpes o vibraciones externas se utilizan muelles tensores o escobillas dobles.

La resistencia (R) es definida como la oposición al flujo de carga eléctrica. Aunque la mayor parte de los metales son buenos conductores de la electricidad, todos ofrecen alguna oposición al flujo de carga eléctrica que pasa a través de ellos. Por lo tanto, es independiente de la corriente y del voltaje. La resistencia de un alambre de área de sección transversal uniforme, se determina a partir de cuatro factores.

1. Tipo de material.
2. Longitud.
3. Área de la sección transversal.
4. Temperatura.

Ohm, descubrió que la resistencia de un conductor a cierta temperatura es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su área de sección transversal y depende del material del cuál está hecho. A determinada temperatura la resistencia de cierto conductor puede calcularse a partir de

$$R = \lambda \frac{l}{A}$$

Donde;

R = resistencia

l = longitud

A = área

En ocasiones especialmente en circuitos electrónicos resulta necesario desarrollar más de un nivel de voltaje a partir de un solo suministro de voltaje.

Una forma de hacerlo es por medio del uso de un circuito divisor de voltaje tal como el de la figura 3.1-3.

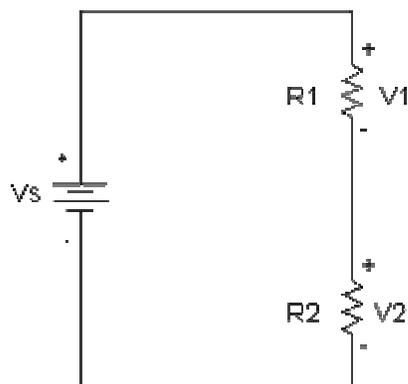


Figura 3.1-3. Circuito divisor de voltaje.

Se analiza este circuito aplicando directamente la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff. Para ayudar en el análisis, se introduce la corriente i como se muestra en la figura 3.1-4.

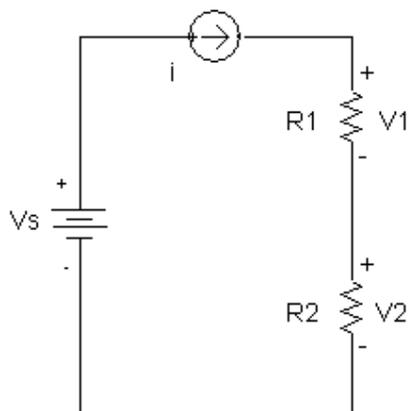


Figura 3.1-4. Circuito divisor de voltaje con la corriente i indicada.

De acuerdo con la ley de corriente de Kirchhoff, R_1 y R_2 conducen a la misma corriente. La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo cerrado produce

$$V_s = iR_1 + iR_2 \quad (1)$$

o bien,

$$i = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Es posible utilizar ahora la ley de Ohm para calcular V_1 y V_2 :

$$V_1 = iR_1 = V_s \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$V_2 = iR_2 = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) muestran que V_1 y V_2 son fracciones de V_s . Cada fracción es la proporción de la resistencia a través de la cual el voltaje dividido se define para la suma de las dos resistencias. Debido a que esta proporción siempre es menor que 1.0, los voltajes divididos V_1 y V_2 siempre son menores que el voltaje de la fuente V_s .

Si se desea un valor particular de V_2 y se especifica V_s , un número infinito de combinaciones de R_1 y R_2 producen la relación apropiada. Por ejemplo, suponga que V_s es igual a 15V y V_2 va a ser igual a 5V. Entonces $V_2/V_s = 1/3$ y de acuerdo con la ecuación (4) encontramos que esta proporción se satisface siempre que $R_2 = 1/2 R_1$. Otros factores que pueden entrar en la selección de R_1 y consecuentemente R_2 , incluyen las pérdidas de potencia que ocurren en la división del voltaje de la fuente y los efectos de conectar el circuito divisor de voltaje a otros componentes del circuito.

Considérese la conexión de un resistor R_L en paralelo con R_2 , como se muestra en la figura 3.1-5.

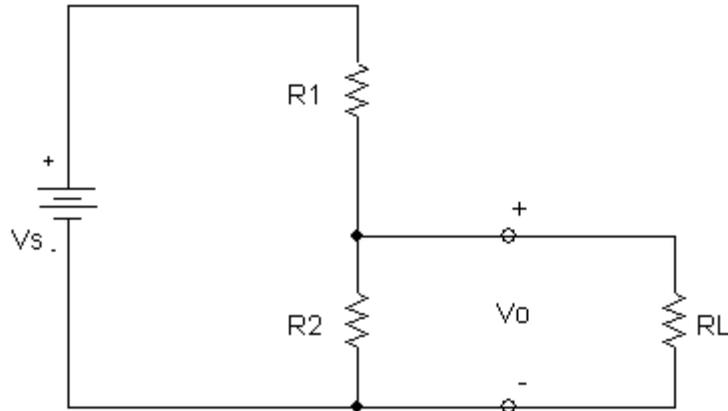


Figura 3.1-5. Divisor de voltaje conectado a una carga R_L .

El resistor R_L actúa como una carga en el circuito divisor de voltaje. Una carga de cualquier circuito consiste en uno o más elementos de circuito que consumen potencia del circuito. Con la carga R_L conectada a la expresión para el voltaje de salida se convierte en

$$V_o = \frac{R_{ec}}{R_1 + R_{ec}} V_s \quad (5)$$

donde

$$R_{ec} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \quad (6)$$

La sustitución de la ecuación (6) en la ecuación (5) produce

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 [1 + (R_2/R_L)] + R_2} V_s \quad (7)$$

Nótese que la ecuación (7) se reduce a la ecuación (4) cuando $R_L \rightarrow \infty$. La ecuación (7) muestra que, siempre que $R_L > R_2$, la relación de voltaje V_o/V_s no se altera por la adhesión de la carga en el divisor.

Otra característica de interés del circuito divisor de voltaje es la sensibilidad del mismo a las tolerancias de los resistores. Por tolerancia se entiende un intervalo de valores posibles. La resistencia de los resistores disponibles comercialmente siempre varía dentro de algún porcentaje de su valor establecido. El siguiente ejemplo ilustra el efecto de las tolerancias de los resistores en un circuito divisor de voltaje.

Ejemplo:

Los resistores que se utilizan en el circuito divisor de voltaje de la figura 3.1-6. Tienen una tolerancia de $\pm 10\%$. Encuéntrese el valor máximo y mínimo de V_o .

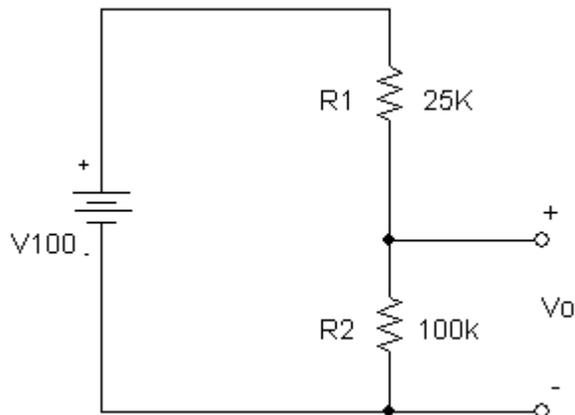


Figura 3.1-6. Circuito de ejemplo.

Solución:

De acuerdo con la ecuación (4) el valor máximo de V_o ocurre cuando R_2 es 10% más alto y R_1 es 10% más bajo y el valor mínimo de V_o ocurre cuando R_2 es 10% más bajo y R_1 es 10% más alto. Por lo tanto.

El 10% de 25k Ω es 2.5k Ω .

Para $V_o(máx)$, le restamos el 10% a $R_1 = 22.5k\Omega$.

$$V_o(máx) = \frac{(100)(110)}{110 + 22.5} = 83.02V$$

Por lo tanto para $V_o(min)$ a R_1 le sumamos el 10% y resulta 27.5k Ω .

$$V_o(mín) = \frac{(100)(90)}{90 + 27.5} = 76.60V$$

De tal modo, al tomar la decisión de usar resistores de 10% en este divisor de voltaje, se observa que el voltaje de salida sin carga se calculará en 76.60 y 83.02V.

3.2. Instalación.

Se procede a observar la estructura térrea, para determinar la posición del instrumento dentro de la misma y se define la longitud del tramo a auscultar, que corresponderá a la distancia entre las dos anclas (placas), que se incorporan una en el extremo de la flecha o serie de flechas (dependiendo de la longitud) y otra en el cuerpo del sensor. Cuando el conjunto está armado y posicionado, se confina en el interior de la estructura para que cualquier desplazamiento o

movimiento registrado en la zona comprendida entre las anclas sea detectado y medido por el instrumento. (Figura 3.2-1.). El proceso y análisis de las mediciones subsecuentes a la inicialmente obtenida indicarán la magnitud, sentido y velocidad de los desplazamientos registrados.



Figura 3.2-1. Instalación de un extensómetro eléctrico de placa sobre el terraplén.

Esto se realiza cuando el nivel del terraplén sea superior en 0.8m al nivel de instalación proyectado, se hará un trazo topográfico para realizar la excavación de la zanja que alojará los aparatos y los ductos para cables. La excavación se debe hacer con retroexcavadora, de acuerdo con los ejes de instrumentación proyectados.

Los extensómetros se instalarán en el fondo de la zanja en excavaciones realizadas a mano tratando de no alterar el material compactado a su alrededor, colocando sus placas en los puntos indicados en el proyecto.

Todos los extensómetros se deben apoyar y proteger en una cama de material fino, material producto de la excavación con tamaño máximo de partículas de 5mm, posteriormente se debe colocar el relleno con el mismo material producto de la excavación, en capas de 25cm, compactándolo con equipo adecuado (bailarina), de tal manera que se logren los mismos grados de compactación de los materiales colocados con el equipo de construcción. Todas

las conexiones necesarias, cajas de extensión y unión con los tubos de protección, se deben instalar a cada 50m de la línea de conducción de cables. (Figura 3.2-2.). El contratista debe instalar una caja de extensión para evitar fallas por tensión en los cables de los instrumentos que llegan a las casetas de instrumentación.



Figura 3.2-2. Caja de extensión.

Cada parte del extensómetro que se instale debe ser localizado topográficamente con coordenadas X, Y y Z. Los grupos se localizarán en la sección transversal sobre el eje de la losa L-21 a la elevación 245msnm, el primero aproximadamente al tercio del respaldo de aguas arriba cad. 0+080 y el segundo en el cad. 0+020 cerca del eje de la presa. Ver apéndice, figura A.1.

Una vez que se haya instalado cada extensómetro, se debe verificar su funcionamiento antes de colocarle materiales y después de estar ya posicionado en el sitio conforme al proyecto de instrumentación y teniendo todo el relleno a su alrededor con la primera capa de protección de 0.3m de espesor y después de la segunda capa compactada con equipo de construcción. Todas estas mediciones son documentadas y analizadas mas adelante.

Todos los cables de los extensómetros se deben proteger con tubos telescopiables galvanizados, con sección transversal suficiente para soportar las presiones del material alojado sobre el tubo, además de tener la capacidad

necesaria para alojar la cantidad total de cables de aparatos que se instalarán en cada tramo. Figura 3.2-3.



Figura 3.2-3. Tubería de protección para los cables de los aparatos.

Los tubos se deberán instalar en tramos de 3m, unidos por coples de 60cm y dejando una separación de 30cm entre tramos. Todos los tubos se deben apoyar en una cama de arena con tamaño máximo de partículas de 1.5cm posteriormente, se debe colocar el relleno de la zanja con el material producto de la excavación en capas de 25cm, compactándolo con equipo adecuado. Las líneas de cables se deben llevar paralelos a los conductos de niveles hidráulicos, hasta la caseta de medición de concreto reforzado.

3.3. Resultados.

Los resultados los obtenemos a través del instrumento que se instaló para conocer los desplazamientos de grietas de tensión en estructuras térreas, desplazamientos de discontinuidades geológicas y deformaciones de cuerpos térreos. Tienen un rango de medición de 0 a 150mm o 15cm y una resolución de 0.01% de la escala total.

Para medir la magnitud de deformación del terraplén consideramos la expansión o compresión del vástago o varilla del extensómetro eléctrico o de placas y dependiendo de la posición del instrumento será la carrera del vástago identificando a esta carrera en porcentajes del 100%, 75% y 50%. Para determinar la longitud del vástago existen dos formas, una a través de las calibraciones y la otra a través del cálculo de impedancias. Entonces cuando hablamos del porcentaje de la escala total (%FS) por sus siglas en inglés full-scale, será la carrera del vástago o varilla del extensómetro eléctrico, si hablamos del 100% del porcentaje de la escala total (%FS), quiere decir que el vástago está a su máxima longitud fuera del encapsulado de protección y si decimos que el vástago se encuentra al 75% quiere decir que parte de la carrera total del vástago se encuentra parcialmente dentro del encapsulado de protección, por consiguiente al decir que el porcentaje de la escala total se encuentra al 50%, el vástago se encontrará a la mitad de su carrera nominal.

Dependiendo del porcentaje de carrera del vástago nos proporcionará una determinada impedancia la cual habrá que determinar en el laboratorio antes de su instalación para corroborarlas con las lecturas de campo durante la instalación y operación con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del equipo y también para cotejar las calibraciones que proporciona el fabricante. Cabe señalar que las mediciones de impedancia se realizan con el multímetro y se compararán con las del DataMate MP. Figura 3.3-1.



Figura 3.3-1. Mediciones de impedancia con el multímetro.

Para conocer estos desplazamientos se utilizó una unidad de medición llamada. DataMate MP (Unidad de Medición Multi-Propósito), el cual es un dispositivo electrónico, portátil, multiprocesos, compatible con sensores de extensómetros eléctricos, celdas de presión total y piezómetros eléctricos, despliega lecturas de 6 dígitos con decimales de punto flotante. Cuenta con un sistema de conexión rápida tipo militar para ser conectada a un tablero de conexiones. La temperatura de operación es del rango de -20 a 50°C . Figura 3.3-2.

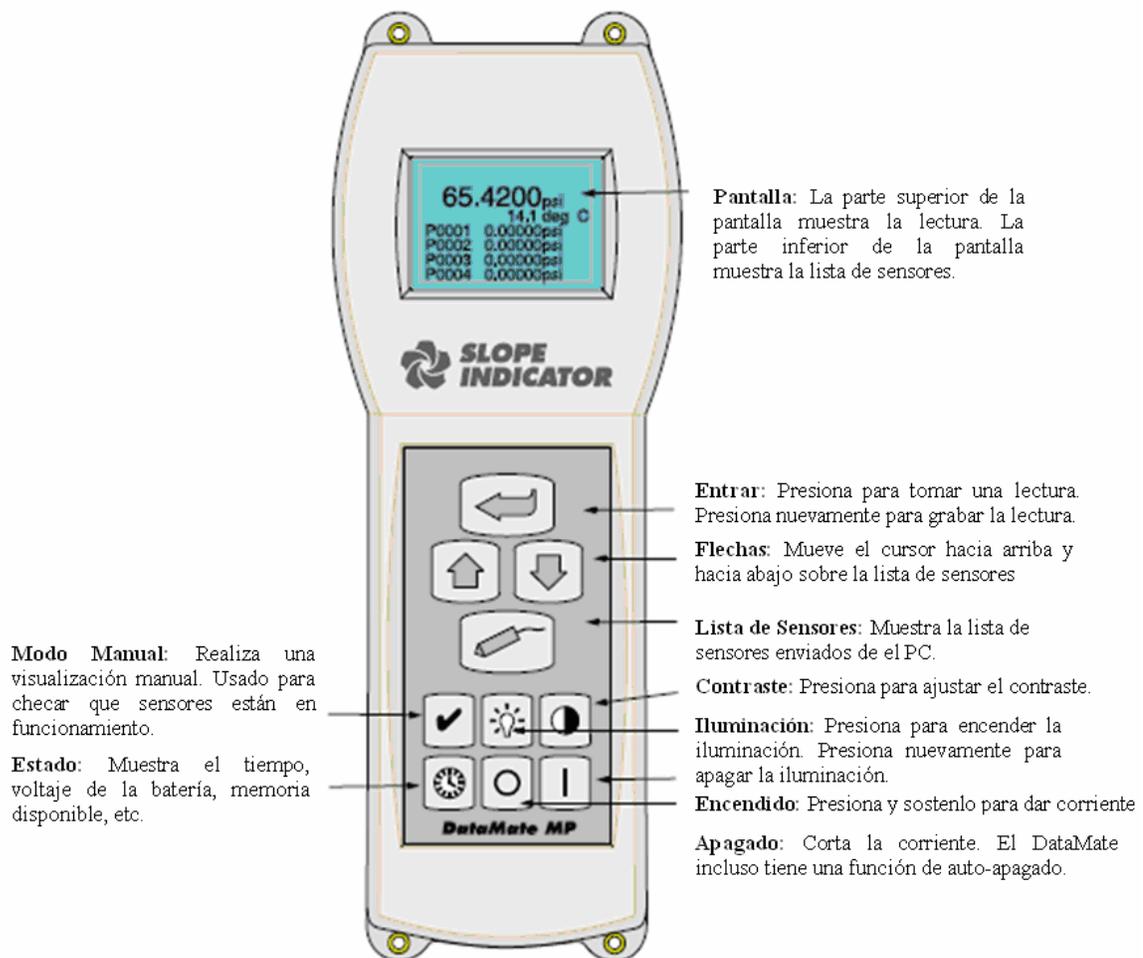
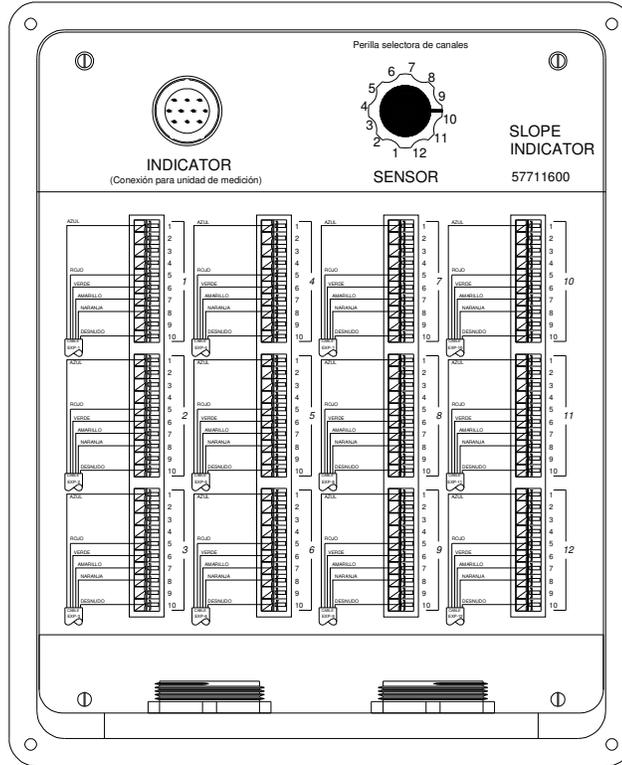


Figura 3.3-2. Unidad de Medición Multi-Propósito DataMate MP.

El tablero de conexiones, es un tablero colocado dentro de una caja terminal diseñado para conectar y controlar hasta 12 instrumentos, tiene una perilla de selección de canales para cada instrumento y está protegido contra eventos de voltaje transitorios en cada conexión. Figura 3.3-3.



Nota :
EXP (Nomenclatura de Extensómetro de Placa)

Figura 3.3-3. Tablero de conexiones.

Para medir las deformaciones en la estructura térrea, se determina la posición del instrumento dentro de la estructura y se define la longitud del tramo a auscultar o explorar y que corresponderá a la distancia entre las dos placas o entre un ancla fija y el sensor anclado también fijo. Como fue en el caso del dique o plinto.

El dique o plinto es la base, cimentación o muro grueso de la cortina de concreto de la presa, construido para contener la fuerza del agua o embalse. En este sitio se instalaron extensómetros eléctricos de ancla fija y sensor fijo, como

se muestra en la figura A.2 y A.3 del apéndice y figura 3.3-4. b). Nótese que este extensómetro no tiene placas, sin embargo se trata del mismo instrumento. En nuestros cálculos utilizaremos el extensómetro eléctrico instalado en el dique o plinto (EED-1).

Para armar un extensómetro se unen barras de acero con el potenciómetro según la longitud que se requiera del instrumento. (Figura 3.3-4.). Cuando el conjunto está armado se confina en el interior de la estructura para que cualquier desplazamiento o movimiento dentro de la longitud del instrumento sea detectado y medido. El proceso y análisis de las mediciones subsecuentes respecto a una lectura inicial indicará la magnitud, sentido y velocidad de los desplazamientos medidos.



(a)



(b)

Figura 3.3-4. a) Armado de un extensómetro eléctrico con barra de acero y potenciómetro. b) Confinamiento del extensómetro eléctrico dentro de la estructura del dique o plinto.

El procedimiento físico de medición de los extensómetros eléctricos, consiste en seleccionar el extensómetro a medir con la perilla selectora de acuerdo al número de extensómetro, se introduce el DataMate MP presionando la tecla de modo manual y seleccionamos del menú "Extensometer RO", presionamos la tecla enter para desplegar la lectura en % de la escala total de la carrera del vástago (%FS). Figura 3.3-5.



Figura 3.3-5. Medición de los extensómetros eléctricos.

Después comparamos la lectura obtenida con la lectura anterior, si se detecta alguna anomalía, se procede a realizar nuevamente la medición, registramos la lectura en la libreta de campo y seleccionamos el siguiente extensómetro a medir y repetimos el procedimiento anterior, apagamos la unidad de medición y desconectamos del tablero de conexiones.

3.4. Interpretación.

Los datos de la libreta de campo se capturan en una hoja de cálculo y se anota la fecha, los niveles de embalse y de terraplén correspondientes al día en que se realiza la medición. Figura 3.4-1.

HOJA DE CÁLCULO PARA EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS		
CAPTURA Y CÁLCULO DE MEDICIONES		
Fecha	Elevaciones (m)	
	Embalse	Terraplén
07/08/2004	362.98	371.17
08/08/2004	362.98	371.17
09/08/2004	362.98	371.17
10/08/2004	362.98	371.17

Figura 3.4-1. Datos para el cálculo de extensómetros eléctricos.

Cabe señalar que los datos de la figura 3.4-1., corresponden a cuatro lecturas o muestras. Esto se debe a que la información presentada en esta tesis comprende un periodo de tiempo de tres meses, comparado con 54 meses que duró la construcción de la presa, sin embargo son suficientes para nuestro análisis del comportamiento de la estructura de la presa hidroeléctrica "El Cajón".

Características generales del extensómetro eléctrico. Figura 3.4-2.

HOJA DE CÁLCULO PARA EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS			
DATOS GENERALES DEL EXTENSÓMETRO			
Extensómetro	EED-1	Lectura inicial (%FS)	25.215
No. Serie	3066	Sensibilidad	18.587
Elevación del sensor	245m	Zero Offsey	3.837
Posición	Izquierdo	Lectura inicial (mm)	29.214
Alcance (mm)	0 a 1500	Distancia entre anclas (mm)	1497

Figura 3.4-2. Características generales del extensómetro eléctrico.

Captura y cálculo de las mediciones. Figura 3.4-3.

HOJA DE CÁLCULO PARA EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS			
CAPTURA Y CÁLCULO DE MEDICIONES			
Lectura Actual		Diferencia Acumulada (mm)	Deformación Unitaria (%)
%(FS)	(mm)		
25.300	29.330	0.116	0.008
25.310	29.344	0.13	0.009
25.320	29.357	0.143	0.01
25.330	29.371	0.157	0.01

Figura 3.4-3. Cálculos de las mediciones.

Estos datos se complementan con los datos técnicos de la hoja de calibración del extensómetro eléctrico medido. Y la distancia entre anclas o placas de su ficha de instalación. Ver figura 3.4-2.

Para el cálculo de las deformaciones unitarias se realiza de la siguiente manera:

La sensibilidad y el Offset- Zero son constantes de calibración del instrumento y proporcionadas por el fabricante. Ver figura 3.4-2.

$$\text{Lectura} = [(\text{Lectura en \% de FS} - \text{Zero Offset}) / \text{Sensibilidad}]$$

Multiplicamos por el factor de conversión de 25.4mm y obtenemos.

$$\text{Lectura en mm} = [(\text{Lectura en \% de FS} - \text{Zero Offset}) / \text{Sensibilidad}] \times 25.4\text{mm}$$

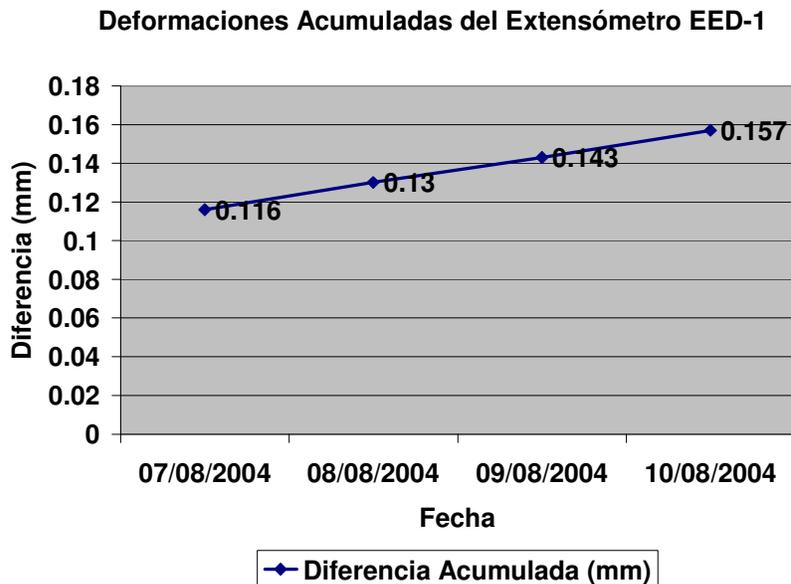
Así mismo calculamos la

$$\text{Diferencia Acumulada en mm} = [\text{Lectura actual} - \text{Lectura inicial}] (\text{mm}).$$

y la

$$\text{Deformación Unitaria en \%} = [(\text{Diferencia Acum.} / \text{Distancia entre placas})] \times 100$$

Finalmente graficamos la diferencia acumulada (mm) y la deformación unitaria (%), contra la fecha de cada medición como vemos a continuación. Figura 3.4-4.



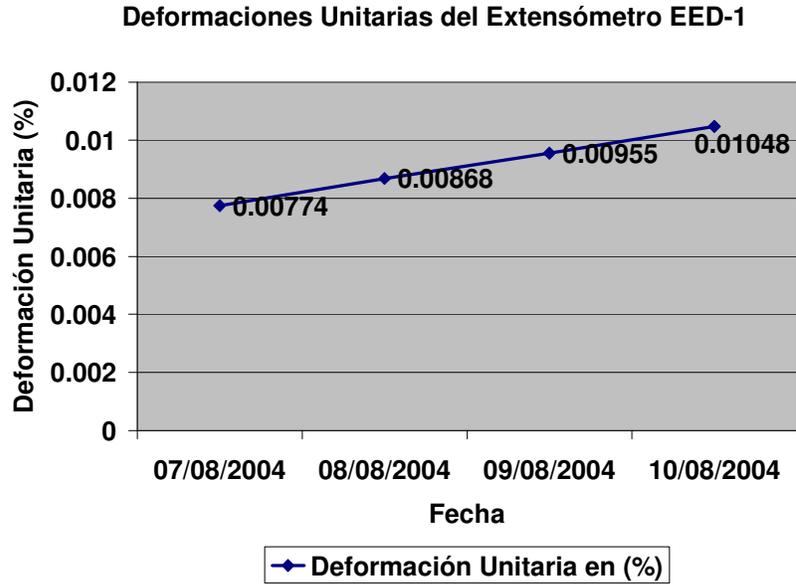


Figura 3.4-4. Gráficas. a) Diferencia acumulada (mm). b) Deformación unitaria (%).

En ambas podemos observar que existe un comportamiento lineal uniforme, con una pendiente para la primera gráfica del 2% y para la segunda del 1%. Por lo tanto existe una deformación considerada dentro de los parámetros normales debido al material que se está depositando sobre el terraplén.

CAPÍTULO IV

CELDA DE PRESIÓN TOTAL CON TRANSDUCTOR DE CUERDA VIBRANTE

4.1. Principio de funcionamiento.

Es un instrumento diseñado para conocer la presión que actúa sobre el terraplén. Su funcionamiento involucra a la presión ejercida en un diafragma y a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Se conforma de dos placas circulares de acero inoxidable soldadas por sus bordes creando una cavidad sellada, la cual se llena de fluido, esto forma el cuerpo de la celda al que se le acopla un transductor de presión con un sensor de cuerda vibrante VW (Vibrating Wire), el cual consta de un alambre de acero a una tensión específica unido a un diafragma en uno de sus lados, cuando la presión del fluido de la celda mueve el diafragma éste cambia la tensión del alambre y al cambiar la tensión del alambre se cambia la frecuencia de resonancia como en una guitarra (figura 4.1-1.). Para hacer vibrar el alambre se le aplica un pulso con una bobina y la misma bobina sirve para captar las vibraciones que generan una señal de frecuencia, la cual es transmitida al lector de salida para ser medido en Hz. La presión máxima de la celda es de $26\text{kg}/\text{cm}^2$, sus dimensiones son de 229mm de diámetro por 11mm de espesor, peso de 3.6kg+ y el intervalo de medición del sensor de temperatura es de -20 a 100°C .



Figura 4.1-1. Celda de presión total con transductor de cuerda vibrante.

4.2. Instalación.

Se instalarán 12 celdas de presión, en el cuerpo de la cortina en la elevación 245msnm, en dos grupos de seis cada uno. (Ver apéndice, figura A.1). Los grupos se localizarán sobre el eje de la losa 21, el primero aproximadamente al tercio del respaldo de aguas arriba cad. 0+080 y el segundo cerca del eje de la presa cad. 0+020.

La instalación de las celdas de carga se realizará una vez compactada la superficie en la zona donde se instalarán los grupos, se excavan pequeñas zanjas con la dimensión y profundidad mínima necesaria para insertar cada celda de carga. Se insertan en el cable las protecciones de PVC y de tubería galvanizada con coples de 45cm de longitud y niples de longitud variable, que protegerán el cable del sensor, desde la celda de carga hasta la caja de distribución. Se instala la celda de carga en la excavación, orientándola conforme al arreglo tridimensional, obteniendo los datos topográficos de ubicación final en el centro de la celda. (Figura 4.2-1.). En caso de ser requerido debido a la orientación de la celda de carga, se ajustará la geometría del tubo de acero que la une con el sensor, empleando un doblador de tubo. Se colocan las piezas de PVC cuya función es proteger el sensor del instrumento así como impedir la transmisión de descargas residuales a través de la tubería metálica.



Figura 4.2-1. Instalación de celdas de presión total con transductor de cuerda vibrante.

La instalación de la tubería de protección en la zona de los grupos, a los niples se les enrolla cinta poliken negra de 2.54cm (1") en cada extremo, con la finalidad de que se hagan telescopiables. En el ramal principal de coples 6.35cm (2 1/2") y niples de 5.08cm (2") se excavan 65cm de profundidad y 1.20m de ancho para poder arropar la tubería y las cajas. Con apoyo de la brigada de topografía se ubican en campo los puntos en donde se ubicará cada celda y cada caja, así como la ruta que tendrá la tubería telescopiable para las celdas. Se inicia la colocación de las celdas de presión en sus lugares y arropando la celda con material menor de 1.905cm o 3/4", compactando con pisón de mano, tender tubería hacia las cajas de 60x60cm. De estas cajas se continúa colocando cople y niple de 5.08 y 6.35cm (2" y 2 1/2") hasta las cajas de extensión, este proceso se realiza continuamente hasta llegar a la caseta de medición.

El relleno de las zanjas de la tubería de protección los primeros 25cm, será de grava-arena 1.905cm o 3/4" y se compacta con pisón de mano o con medios mecánicos como una bailarina. Posteriormente se coloca el material correspondiente al de la zona de relleno de la cortina y se compacta para seguir colocando materiales en la cortina.

4.3. Resultados.

La celda de presión es un instrumento diseñado para conocer la presión que actúa en el terraplén. Su funcionamiento involucra a la presión ejercida en un diafragma y a la temperatura en °C. Se conforma de dos placas circulares de acero inoxidable soldadas por sus bordes creando una cavidad sellada, la cual se llena de fluido, esto forma el cuerpo de la celda al que se le acopla un transductor de presión con un sensor de cuerda vibrante (VW), el cuál consta de un alambre de acero a una tensión específica unido a un diafragma en uno de sus lados, cuando la presión del fluido de la celda mueve el diafragma este cambia la tensión del alambre el cual es excitado por una bobina eléctrica y

comienza a vibrar, la vibración del alambre genera una señal de frecuencia sobre la bobina que se transmite al lector de salida, donde se analizan los datos y aplicando algunos factores de calibración muestra la información requerida en Hz. La presión máxima de la celda es de 26 kg/cm^2 , sus dimensiones son de 229mm de diámetro por 11mm de espesor, peso de 3.6kg y el rango de medición del sensor de temperatura es de -20 a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

La unidad de medición es el DataMate MP (Unidad de Medición Multi-Propósito) el cual es compatible con sensores de cuerda vibrante (VW), con decimales de punto flotante y unidades en Hz y $^\circ\text{C}$, el rango de temperatura de operación de la unidad es de -20 a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. (Figura 4.3-1.). El tablero de conexiones es el mismo descrito en el capítulo anterior, el cuál está diseñado para conectar y controlar hasta 12 instrumentos, con una perilla de selección de canales para cada instrumento y protegido contra eventos de voltaje transitorios.



Figura 4.3-1. Medición con el DataMate MP.

El procedimiento de medición se realiza con el DataMate MP, verificando la calibración de los instrumentos de medición y la frecuencia de medición, la cual será semanalmente. Los datos de las mediciones se anotarán en la libreta de campo, como el número de serie del instrumento, la elevación del sensor, el

código del instrumento, la ubicación y la fecha de instalación, complementándolos con los datos de calibración proporcionados por el fabricante. Ver figura 4.4-1.

En el tablero de conexiones seleccionamos la celda de presión a medir, presionamos en el DataMate MP el modo manual y en el menú seleccionamos "Vibrating Wire Hz" para desplegar la lectura en Hz, presionamos la tecla enter y registramos la lectura en la libreta de campo. Seleccionamos la opción "Thermistor" para la lectura de la temperatura en °C y también la registramos en la libreta de campo.

4.4. Interpretación.

Los datos de la libreta de campo se capturan en una hoja de cálculo y se complementan con los datos técnicos de la hoja de calibración de la celda de presión total como se muestra en la figura 4.4-1.

HOJA DE CÁLCULO PARA CELDAS DE PRESIÓN TOTAL						
Celda de Presión	G2-CYZ		Corrección por Presión Barométrica (psi)			
Nº. Serie	78619		Presión Barométrica del Sitio (BP sitio)	14.270983		
Longitud del Cable	253m		Presión Barométrica Estandar (BP calibración)	14.696		
Elevación del Sensor	246.783		Corrección por Presión Barométrica (B)	0.4250171		
Constantes de Calibración (psi)			Coeficientes de Temperatura			
A	0.00005328		m (psi/°C)	0.0084		
B	0.019463		Temperatura de Calibración	21.3		
C	477.34		Corrección por Temperatura (T) en °C	0.07		
Fecha	Elevación del Terraplén (m)	Peso Volumétrico del Material (kg/m ³)	Espesor de Capa sobre la Celda (m)	Esfuerzo de Referencia h (kg/cm ²)	Lectura (Hz)	Lectura (°C)
17-Sep-04	250.1	1972	3.32	0.65	3160.53	29.52
20-Sep-04	250.1	1909	3.32	0.63	3162.42	29.52
24-Sep-04	253.5	2026	6.72	1.36	3154.21	28.88
27-Sep-04	254.2	2026	7.42	1.5	3148.74	28.59
01-Oct-04	258.5	2148	11.72	2.52	3138.08	28.35
08-Oct-04	263	2009	16.22	3.26	3131.23	28.4

Figura 4.4-1. Datos para el cálculo de la presión o esfuerzos en la celda de presión total G2-CYZ.

Cabe señalar que nuestro estudio tomará solo un instrumento de los dos grupos instalados de 6 aparatos cada uno sobre la elevación 245msnm, esta celda es del G2 de coordenadas Y, Z (CYZ). Dicha celda muestra el análisis que determina la presión o esfuerzo que ejerce el terraplén sobre el instrumento y que se aplica para el resto de las celdas de presión total.

El cálculo de la presión se realiza de la siguiente manera:

$$P = [A(\text{Hz})^2 + B(\text{Hz}) + C] \text{ (psi)}$$

Donde;

P = Presión en (psi).

psi; se denomina psi del inglés (pounds per square inch) a una unidad de presión cuyo valor equivale a 1 libra por pulgada cuadrada y una equivalencia es libras/pulgada cuadrada (psi) x 0.00689 = MPa.

A, B y C; son constantes de calibración del instrumento.

Hz; es la lectura de frecuencia obtenida del instrumento con el equipo de medición.

$$P \text{ corregida} = [P - B - T] \text{ (psi)}$$

Donde;

P; es la presión calculada en (psi).

B; es la corrección por presión en (psi).

$$B = [BP \text{ sitio} - BP \text{ calibración}] \text{ (psi)}$$

$$T = [(Lectura \text{ en } ^\circ\text{C} - \text{Temp. de cal.}) \times m]$$

Además;

BP sitio; presión barométrica del sitio en (psi).

BP sitio = 14.27098295 (psi).

BP calibración; presión barométrica estándar en (psi).

BP = 14.696 (psi).

Lectura en $^\circ\text{C}$; es la lectura de temperatura obtenida del instrumento con el equipo de medición.

Temp. de cal.; es la temperatura de calibración del instrumento de las hojas de calibración en (°C).

m; es el coeficiente de temperatura del instrumento de las hojas de calibración en (psi/°C).

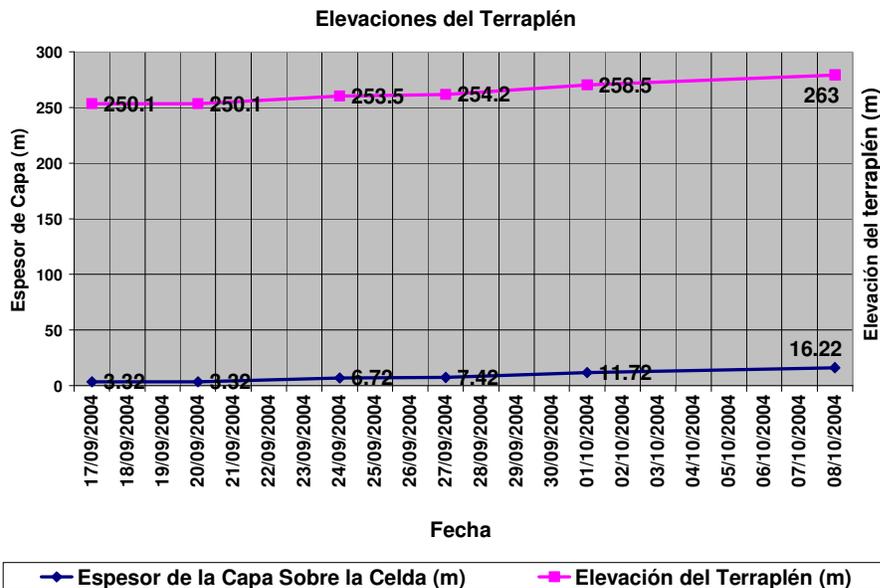
Y el factor de conversión de psi a kg/cm² = 0.070307

De los cálculos, obtenemos la siguiente tabla. Figura 4.4-2.

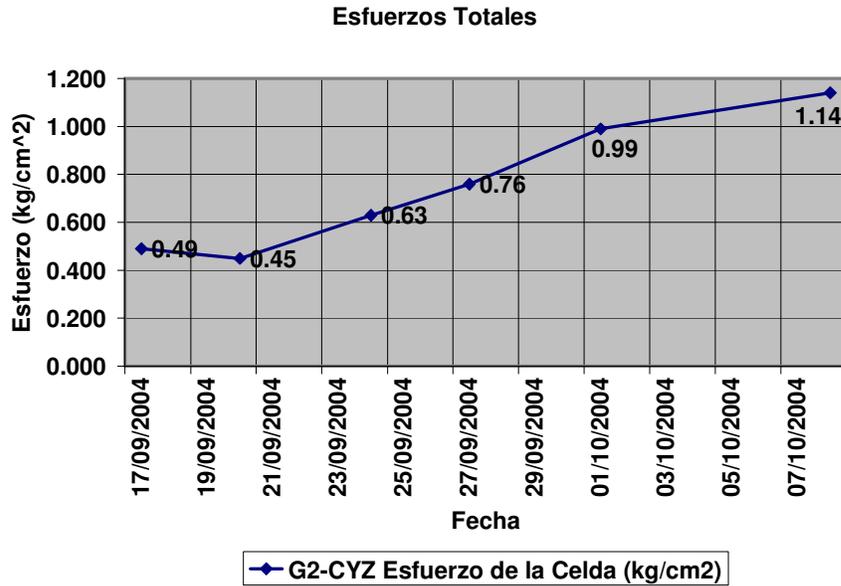
Fecha	Elevación del Terraplén (m)	Peso Volumétrico del Material (kg/m ³)	Espesor de Capa sobre la Celda (m)	Esfuerzo de Referencia ³ h (kg/cm ²)	Lectura (Hz)	Lectura (°C)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kg/cm ²)
17-Sep-04	250.1	1972	3.32	0.65	3160.53	29.52	6.66	0.49
20-Sep-04	250.1	1909	3.32	0.63	3162.42	29.52	6.06	0.45
24-Sep-04	253.5	2026	6.72	1.36	3154.21	28.88	8.67	0.63
27-Sep-04	254.2	2026	7.42	1.5	3148.74	28.59	10.4	0.76
01-Oct-04	258.5	2148	11.72	2.52	3138.08	28.35	13.76	0.99
08-Oct-04	263	2009	16.22	3.26	3131.23	28.4	15.91	1.14

Figura 4.4-2. Tabla de resultados del esfuerzo o presión sobre las celdas.

Y finalmente se grafican los esfuerzos totales o presión en (kg/cm²) y la altura del terraplén sobre la celda (m) contra la fecha de cada medición. Figura 4.4-3.



(a)



(b)

Figura 4.4-3. Gráficas. a) Elevación del terraplén y espesor de la capa sobre la celda. b) Esfuerzo o presión sobre la celda.

En la gráfica (a), podemos apreciar la elevación del terraplén con respecto al nivel del mar y la elevación de la capa que está sobre la celda de presión total a partir de la elevación 245msnm. En la gráfica (b), observamos la presión que existe sobre la celda, esta nos muestra que entre mayor sea el nivel de la capa o material, mayor será la presión sobre la celda.

CAPÍTULO V

PIEZÓMETROS ELÉCTRICOS DE CUERDA VIBRANTE

5.1. Principio de funcionamiento.

Es un instrumento diseñado para que la presión del agua ejercida en un diafragma cambie la tensión del alambre unido a este por el interior. Cuando el alambre es excitado por una bobina eléctrica, éste comienza a vibrar; esta vibración produce una señal de frecuencia en la bobina que se transmite al dispositivo de salida, el cual analiza los datos y aplicando algunos factores de calibración muestra la información requerida. El piezómetro tiene integrado en su interior un sensor de temperatura. Figura 5.1-1.



Figura 5.1-1. Piezómetro eléctrico de cuerda vibrante.

5.2. Instalación.

Para la instalación se realiza un recorrido para definir los sitios de instalación en función de las condiciones geológicas y topográficas en el sitio y conforme a los cálculos realizados por el método de elementos finitos. En la instalación se excava una zanja de 60cm de profundidad aproximadamente realizando un trazo topográfico, para instalar la tubería de protección y de cajas

de conexión y de extensión. La excavación debe hacerse con una retroexcavadora de acuerdo con los ejes de instrumentación del proyecto. Ver apéndice, figura A.4.

Los sensores (bulbos) de los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante (vibrating wire), deberán ser localizados topográficamente con coordenadas X, Y y Z, y se protegen con tubería, codos y uniones de PVC para que su orientación sea de 45° con respecto a la horizontal y para evitar cualquier tipo de transmisión de cargas eléctricas conducidas por la tubería galvanizada. Figura 5.2-1.

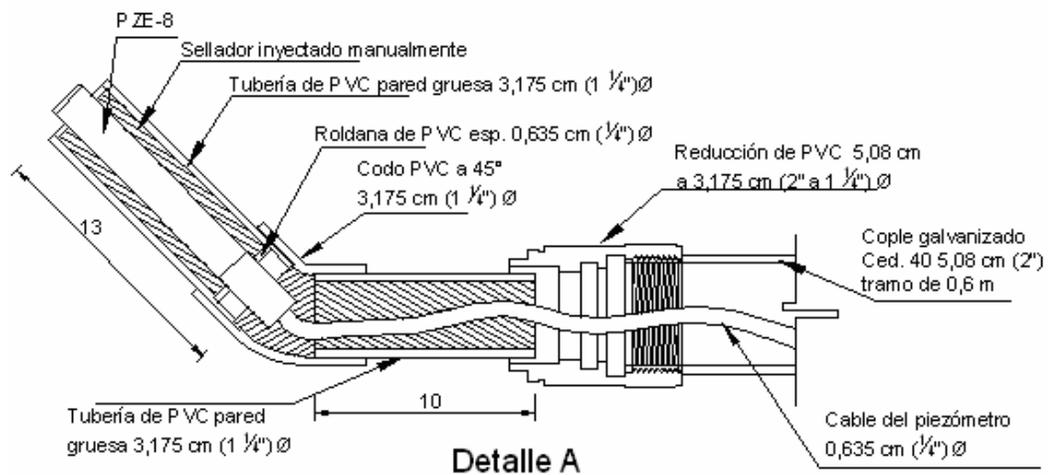


Figura 5.2-1. Protección de piezómetros eléctricos de cuerda vibrante.

La excavación se realiza colocando la primera capa de material tipo B que servirá como filtro, se instala el sensor del piezómetro eléctrico y una vez posicionado se verifica su funcionamiento, después se rellena con la primera capa de material tipo A de 0.3m de espesor y enseguida la segunda capa de material tipo B, compactadas con equipo de construcción. Figura 5.2-2.

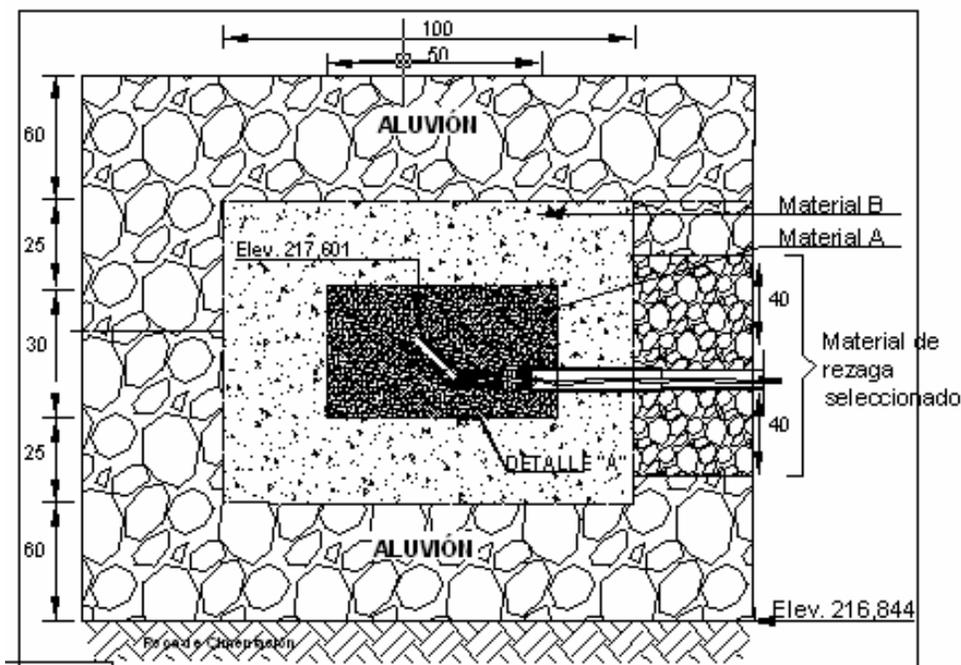


Figura 5.2-2. Instalación del piezómetro eléctrico y capas de material.

Se une el arreglo de tubería de PVC del sensor con un cople de fierro galvanizado de 5,08cm (2"). Se prolonga la tubería de protección con niples y coples teniendo un empalme de 15cm en cada extremo, hasta llegar a las cajas de conexión y extensión, se coloca cinta poliken negra en el diámetro exterior del niple de 2,54cm (1") de espesor.

Se introduce el cable con ayuda de una guía dentro de la tubería, los conductos deberán instalarse en tramos de 3m, unidos por coples de 0,6m, dejando una separación de 30cm entre los extremos de los tramos, si la actividad de tendido de tubería y cable no se puede continuar debido al avance de construcción, se colocan unas protecciones metálicas llamadas perreras para evitar que sea maltratado el cable. Todos los tubos se deben apoyar en una cama de grava arena con tamaño máximo de partículas de 1.5cm, posteriormente, se colocará el relleno de la zanja con el material producto de la excavación en capas de 25cm, compactándolo con equipo de construcción. Las líneas de cables de

celdas eléctricas y extensómetros y piezómetros eléctricos se llevarán paralelos a los conductos de niveles hidráulicos.

Se emplean las cajas de conexión, para unir el cableado de dos o más instrumentos instalados hasta llegar a la primera caja de extensión (figura 5.2-3.), a partir de ese punto se continúa la prolongación de tubería empleando ahora diámetro 5,08 y 6,35cm (2" y 2 1/2") para coples y nipples respectivamente, con el mismo arreglo de unión, orientados en una sola línea (tubería principal).

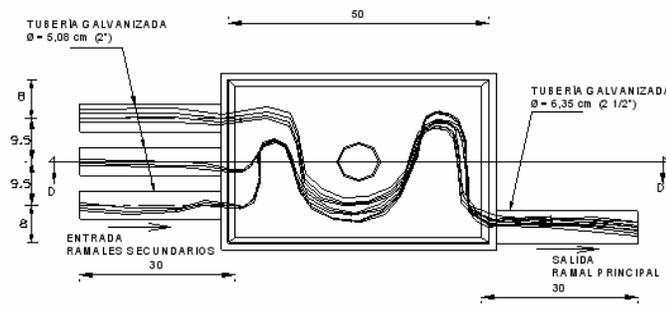


Figura 5.2-3. Caja de extensión.

El cableado de los 10 piezómetros eléctricos en la línea principal se une empleando cinta de aislar a cada metro aproximadamente con el objeto de facilitar su paso por la tubería de protección hasta llegar a la siguiente caja de extensión. Las cajas de extensión se colocan a cada 50m de distancia y se deja una longitud adicional de cable con el objeto de absorber los desplazamientos de la cortina. Terminado el paso anterior se llega a la caseta de medición, colocándose los cables para facilitar la medición con la unidad DataMate MP (Unidad de Medición Multi-Propósito) mientras se realiza la instalación adecuada al sistema automático de medición.

5.3. Resultados.

El piezómetro eléctrico es un instrumento diseñado para que la presión de agua ejercida en un diafragma cambie la tensión del alambre unido a este

diafragma por el interior. Cuando el alambre es excitado por una bobina eléctrica, este comienza a vibrar, esta vibración produce una señal de frecuencia en la bobina que se transmite al dispositivo de salida, el cual analiza los datos y aplicando algunos factores de calibración muestra la información requerida. El piezómetro tiene integrado en su interior un sensor de temperatura.

Los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante se instalaron al nivel del desplante del terraplén, para conocer el nivel y la distribución de agua de la cimentación y cuerpo de la cortina, para tal propósito se utiliza una unidad de medición DataMate MP, la cual es compatible con los sensores de cuerda vibrante (VW) y con unidades como Hz y °C. Figura 5.3-1.



Figura 5.3-1. Medición del nivel de agua de la cimentación y cuerpo de la cortina con la unidad de medición DataMate MP.

El procedimiento de medición se realiza de manera semejante al de los extensómetros eléctricos, verificando la calibración de los instrumentos y con una frecuencia diaria de medición de los niveles de agua, estos datos se anotarán en la libreta de campo tipo libreta de nivel topográfico, con la información básica de la instalación de cada instrumento, tales como el número de serie del instrumento, longitud del cable, fecha de instalación y por supuesto la lectura de frecuencia en Hz y la temperatura en °C.

La medición del nivel freático se realizó con la unidad DataMate MP, seleccionando el número de piezómetro a medir con la perilla selectora, presionando el modo manual y seleccionando del menú la opción "Vibrating Wire Hz", para desplegar la lectura en Hz, presionamos la tecla enter y registramos la lectura en la libreta de campo y para tomar la lectura de la temperatura en °C seleccionamos del menú la opción de "Thermistor". Ver figura 5.3-1.

5.4. Interpretación.

Los datos recolectados en la libreta de campo se capturan en una hoja de cálculo considerando la información básica del instrumento como la fecha, el número de serie, longitud del cable, fecha de instalación, la frecuencia en Hz y la temperatura en °C. (Figura 5.4-1.). Aunado a esto se complementan con los datos técnicos de la hoja de calibración del piezómetro eléctrico proporcionados por el fabricante como los factores de corrección por presión barométrica (psi), los coeficientes de temperatura y los factores de conversión en (psi).

HOJA DE CÁLCULO PARA PIEZÓMETROS ELÉCTRICOS					
No. Piezómetro:	PZE-8	Factores de Conversión (psi)		Coeficientes de Temperatura	
No. Serie:	78610	A	-0.000045164	m (psi/°C)	-0.0209
Longitud del cable:	482m	B	-0.028843	b (psi)	0.167
		C	505.47	Temp Offset (°C)	-0.3
Factor de Corrección por Presión Barométrica (psi)					
Presión Barométrica del Sitio (BP)				13.9955	
Presión Barométrica Estandar (BPS)				14.696	
Corrección por Presión Barométrica (BC)				0.7005	
	Fecha	Lectura de la Frecuencia (Hz)	Lectura de la Temperatura (°C)		
	24-Oct-04	3043.17	22.62		
	31-Oct-04	3037.27	30.97		
	07-Nov-04	3032.92	30.41		
	14-Nov-04	3028.5	30.47		
	21-Nov-04	3024.01	25.65		
	28-Nov-04	3019.5	24.25		

Figura 5.4-1. Datos para el cálculo de los piezómetros eléctricos.

El cálculo de la elevación del agua se realiza de la siguiente manera:

$$P = A(F)^2 + B(F) + C$$

Donde;

P; es la presión en (psi).

psi; se denomina psi del inglés (pounds per square inch) a una unidad de presión cuyo valor equivale a 1 libra por pulgada cuadrada y una equivalencia es libras/pulgada cuadrada (psi) x 0.00689 = MPa.

A, B y C; son constantes de calibración del instrumento.

F; es la lectura de la frecuencia en (Hz).

$$P \text{ corregida} = P + BC + T$$

BC; es la corrección por presión.

$$BC = BPS - BP \text{ sitio}$$

T; es la corrección por temperatura.

$$T \text{ corregida} = m \times (\text{Temp. Lec.} - \text{Temp. Offset}) + b$$

m, b y Temp. Offset; son los coeficientes de temperatura del instrumento.

BPS; es la presión barométrica estándar = 14.696 (psi).

BP; es la presión barométrica del sitio = 13.9955 (psi).

Factor de conversión de psi a $\text{kg/cm}^2 = 0.070307$.

Factor de conversión de kg/cm^2 a metros de columna de agua = 10.

Con base en estos cálculos obtenemos la siguiente tabla. Figura 5.4-2.

Temperatura Corregida (°C)	Presión (psi)	Presión Corregida (psi)	Presión Calculada (kg/cm^2)	Columna de Agua (m)
-0.31	-0.56	-0.17	-0.012	-0.12
-0.49	1.23	1.44	0.101	1.01
-0.47	2.55	2.77	0.195	1.95
-0.48	3.88	4.11	0.289	2.89
-0.38	5.24	5.57	0.391	3.91
-0.35	6.6	6.96	0.489	4.89

Figura 5.4-2. Cálculos de los piezómetros eléctricos.

Finalmente graficamos la elevación de agua en (m), contra la fecha de medición, generando una gráfica como la mostrada en la figura 5.4-3.

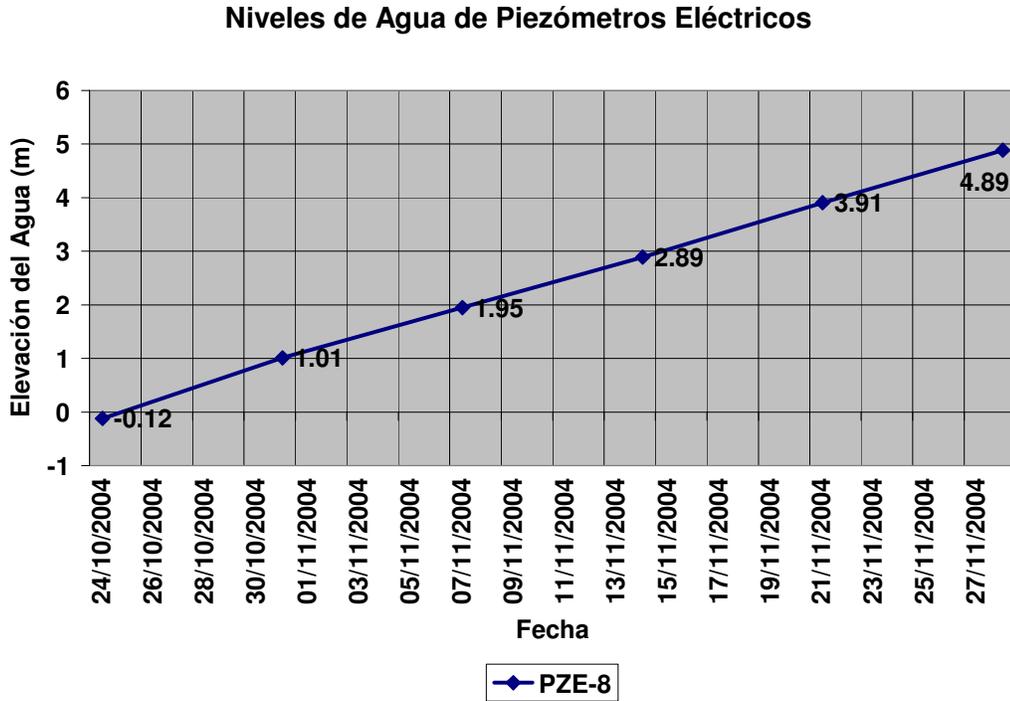


Figura 5.4-3. Gráfica de niveles de agua de piezómetros eléctricos de cuerda vibrante.

CAPÍTULO VI

INCLINÓMETROS VERTICALES

6.1. Principio de funcionamiento.

El proyecto de instrumentación contempla el uso de dos tipos de tuberías para los inclinómetros, de aluminio y de plástico tipo ABS.

Los de aluminio serán utilizados en el cuerpo de la cortina y los de plástico serán embebidos en las laderas o excavaciones exteriores.

6.2. Instalación.

6.2.1. Instalación de inclinómetros verticales de aluminio.

Están instalados en el cuerpo de la cortina para obtener los desplazamientos horizontales y los asentamientos del terraplén de manera continua. Figura 6.2.1-1.



Figura 6.2.1-1. Inclinómetro de aluminio.

Está contemplado instalar seis aparatos, dos en cada una de las secciones transversales al eje de la cortina, correspondientes a las losas L-16, L-21 y L-26. El inclinómetro número 1 (I-1), (I-3) e (I-5), estarán ubicados en la corona ligeramente desfasados paralelamente al eje de la cortina en 3.50m y el I-2, I-4 e I-6, en el respaldo de aguas abajo, en el eje de estación 0+426.755 con origen en el 0+000 situado cerca de los portales de entrada de los túneles de desvío. Ver apéndice, figura A.5.

El procedimiento de instalación de los 6 inclinómetros en el terraplén del cuerpo de la cortina, varía únicamente en la profundidad de desplante de cada estructura, comenzando por hacer un barreno o perforación en el suelo y roca, de 15.24cm o de 6" de diámetro con equipo de rotación o percusión, donde se empotrará el tubo de arranque del inclinómetro, sobre roca sana, a una profundidad de 7.5m. Figura 6.2.1-2.

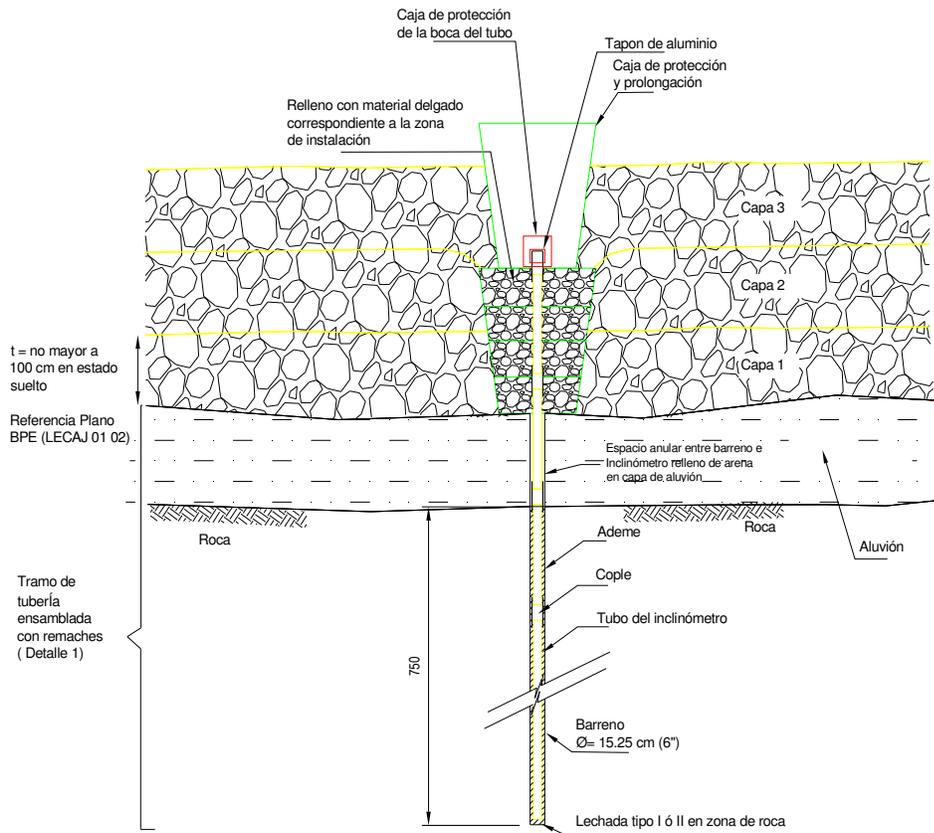


Figura 6.2.1-2. Instalación del tubo de arranque del inclinómetro y caja de protección para prolongar la tubería.

La ubicación del barreno se determinó tomando en cuenta referencias topográficas en dirección paralela al eje de la cortina usando coordenadas llamadas de estación, enseguida se realizará una inyección de lechada la cuál consiste en una mezcla de agua, cemento y un aditivo que se coloca en el espacio entre el barreno y la tubería de aluminio. Se emplearán dosificaciones de 50kg de cemento tipo 1, 30 litros de agua y 175g de intraplast o su equivalente de 50kg de cemento, 45 litros de agua y 673g de sikament nz.

La tubería de aluminio está compuesta principalmente por tramos de 1.52m de longitud, unidos mediante coples de 0.3m de longitud y son perfiles huecos de aluminio extruido aleación 6063 temple T5, con cuatro nervaduras longitudinales para guiar el paso de una sonda inclinométrica. Figura 6.2.1-3.

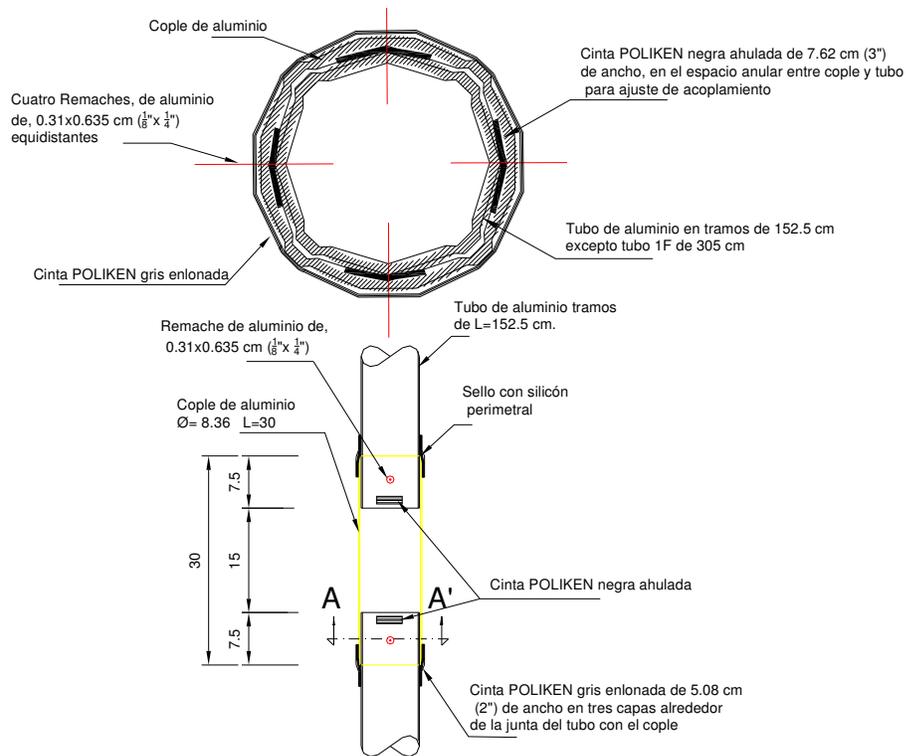


Figura 6.2.1-3. Tubería de aluminio y cople con 4 nervaduras.

Estos coples se instalan dejando 7.5cm empalmados en cada extremo y 15cm libres al centro permitiéndonos así medir los asentamientos. El diámetro

exterior nominal es de 8.26cm, con espesor de la pared de 0.24cm, anodizado color natural. Los coples son también de perfil hueco de aluminio extruido con cuatro nervaduras longitudinales, diámetro exterior nominal de 8.36cm, espesor de la pared de 0.24cm, anodizado color natural.

Cabe mencionar que la tubería de arranque llamada (1-F), tiene una ligera variación en la longitud a diferencia del resto de la estructura y se trata de 3.05m de longitud (figura 6.2.1-4.), con un tapón de fondo soldado, y un pasador de aluminio de 1.27cm o (1/2") de diámetro instalado a 2.0m del fondo del tubo.

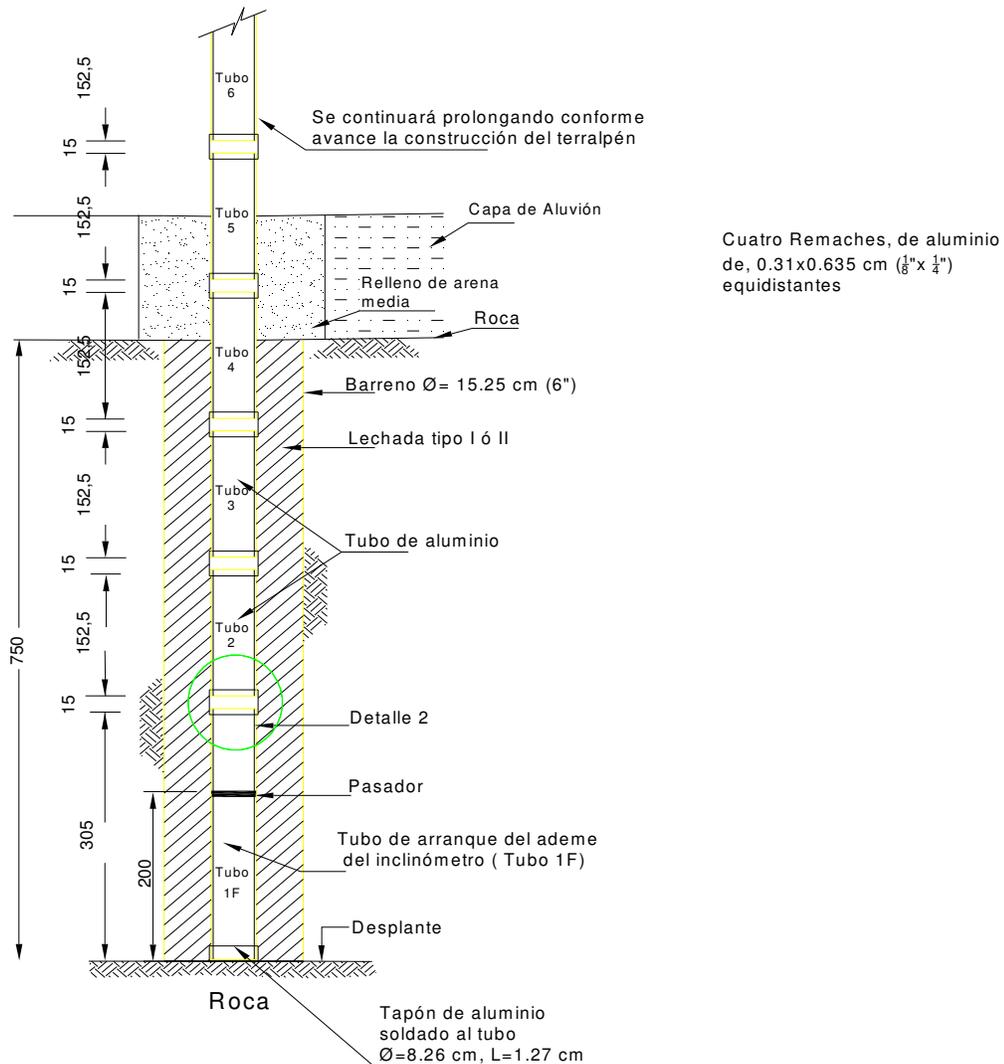


Figura 6.2.1-4. Tubería de arranque con tapón y pasador.

El tapón para la protección del brocal es de aluminio de 2cm de espesor aproximadamente, con las dimensiones adecuadas para embonar en la tubería de la estructura, sin embargo este tapón tiene un punto de referencia al centro para dar coordenadas X, Y y Z colocando un bastón con prisma a la boca del tubo y orientándolo al punto de topografía (ver figura 6.2.1-1.), también se utiliza para las ranuras de la tubería, las cuales deben de estar paralelas al eje de la cortina y perpendiculares sobre el eje A+ y A-. Figura 6.2.1-5.

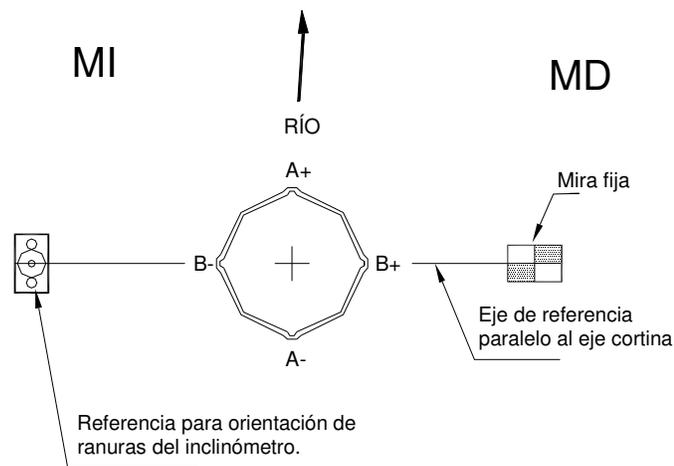


Figura 6.2.1-5. Orientación de las ranuras del tubo del inclinómetro paralelas al eje de la cortina.

Se habilitan cajas de protección en la boca del tubo fabricadas de acero, para contener las capas del terraplén y prolongar con seguridad la tubería. (Ver figura 6.2.1-2.). Estas prolongaciones se realizan con remaches, cinta poliken y silicón.

6.2.2. Instalación de inclinómetros verticales de tubería ABS.

Son también conocidos como inclinómetros de plástico flexible de ensamble rápido, estos se instalarán en laderas o excavaciones exteriores, como la obra de excedencias, que contempla los cortes del vertedor, obra de

toma y desfogue, donde se consideró necesario instalar dos inclinómetros, el I-7 e I-8, embebidos en el muro llamado alabeado, de la obra del vertedor. Figura 6.2.2-1.



Figura 6.2.2-1. Inclinómetros de tubería ABS.

Estos son empleados para medir desplazamientos horizontales en cortes de roca, el material plástico ABS ofrece la flexibilidad necesaria para soportar los movimientos de la estructura sin tener fracturas y están compuestos por tramos de 3.05m de longitud, el perfil es hueco de plástico, con cuatro nervaduras interiores longitudinales para guiar el paso de la sonda inclinométrica. El diámetro exterior es de 8.50cm, con espesor de la pared 0.50cm, color azul y en sus extremos para el ensamble tiene aro-sellos, para soportar presiones hasta de 12.4bar o 12.6kg/cm², el cuál al embonar no permite la separación una vez ensamblados. Aquí el tubo de desplante es de la misma longitud al resto de los tubos, es decir de 3.05m.

6.3. Resultados.

Una vez instalados los primeros tramos de tubería del inclinómetro se comienza con las lecturas con los equipos de medición de desplazamientos y asentamientos.

6.3.1. Desplazamientos verticales.

Los inclinómetros verticales son instrumentos geotécnicos empleados para medir desplazamientos o asentamientos sobre el plano vertical. Está compuesto por una columna de tubos de aluminio ranurados telescópicos que comienzan al inicio con un tubo de 3,05m de longitud y el resto de la tubería por tramos de 1,525m de longitud, unidos mediante coples de 0,3m de longitud que se instalan con una separación entre tubos de 0,15m.

La tubería de aluminio para el inclinómetro tiene cuatro nervaduras longitudinales para guiar el paso de la sonda y consta de dos perfiles huecos diferentes denominados tubos y coples. El diámetro exterior nominal del tubo es de 8,26cm, mientras que el diámetro exterior nominal del cople es de 8,36cm, ambos son fabricados con aluminio extruido aleación 6063, temple T5, pared uniforme de 0,24mm de espesor, con una resistencia a la torsión de la nervadura de 2° en 3,05m, anodizados color natural.

La sonda de asentamientos es un dispositivo mecánico que se utiliza para medir los desplazamientos verticales o asentamientos en la base de cada tubo del inclinómetro de aluminio. (Figura 6.3.1-1.). El cuerpo del instrumento tiene forma de torpedo con un diámetro exterior de 60mm. Cuenta con dos ruedas envueltas, una fija y otra móvil en la parte inferior para permitir encarrilarla en la columna de tubos del inclinómetro, además de un par de aletas retractiles en la parte superior con la tensión adecuada para que se adapten a la pared interior del tubo de aluminio y se inserten en el borde inferior de cada tubo para realizar la medición. La sonda tiene un dispositivo basculante para cerrar las aletas retractiles cuando se golpea contra el pasador del fondo del inclinómetro y así finalizar la medición.

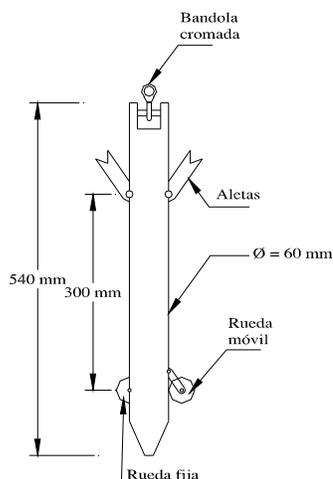


Figura 6.3.1-1. Sonda de asentamientos tipo CFE.

Para realizar con éxito nuestra medición utilizamos un adaptador para la sonda de asentamientos el cuál es un equipo auxiliar construido de aluminio básicamente de dos secciones ensambladas de tubos de ademe para inclinómetro de aluminio (tubo y cople) que se acopla a la boca de la tubería del inclinómetro. Esta integrado con carrete que permite mantener enrollada una cinta metálica graduada con longitud definida, además un sistema de poleas que permite deslizar a la cinta al momento de realizar la medición. En la parte frontal tiene una regla graduada al milímetro de 0,50m de longitud para realizar las lecturas del borde inferior de cada tubo de inclinómetro. El adaptador tiene un contrapeso para darle una tensión constante de 7,5kg a la cinta al momento de realizar cada lectura. Su diseño permite que el cero de la escala graduada se localice a 1m por encima de la boca del inclinómetro. Figura 6.3.1-2.

La cinta metálica laminar graduada en milímetros con marcas a cada 0,50m, se utiliza para controlar la profundidad de la sonda en la columna de tubos del inclinómetro.

El equipo en su conjunto requiere de unos ajustes para lograr una lectura exacta como la corrección "cero" del adaptador que es la distancia que hay entre

la parte superior de la boca del tubo del inclinómetro y el cero de la escala del adaptador, normalmente esta corrección es de un metro.

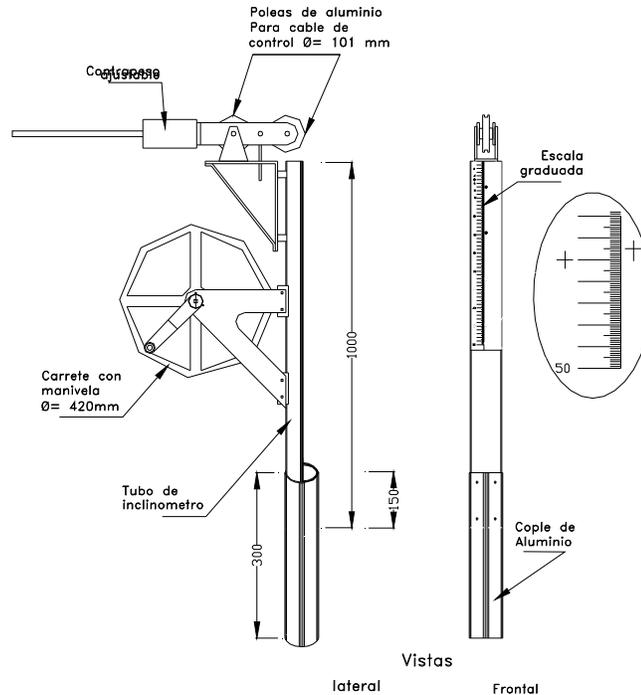


Figura 6.3.1-2. Adaptador para medición de asentamientos tipo CFE.

También existe corrección “cero” para la sonda y para el fondo de la tubería, entonces para la sonda es la distancia que hay entre la parte superior de las aletas retractiles de la sonda de asentamientos y la marca donde tiene cero metros la cinta metálica. Y la corrección “cero” del fondo es la distancia que hay entre el extremo inferior de la sonda de asentamientos y la marca donde tiene cero metros la cinta metálica.

La frecuencia de medición durante esta etapa de construcción es en la instalación de cada tubo guía o semanalmente y los datos necesarios que se registran para el cálculo de asentamientos son; la fecha, el número de inclinómetro, lecturas de la cinta en m, número de tubo, elevación de la boca del tubo en msnm, elevación “0” del adaptador en msnm, elevación “0” adaptador - corrección de la sonda, elevación “0” del adaptador – corrección fondo,

elevación del embalse en msnm, elevación de desfogue en msnm, longitud del adaptador en m, corrección "0" de la sonda en m, corrección "0" del fondo en m. Figura 6.3.1-4.

HOJA DE REGISTRO DE CAMPO PARA DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE INCLINÓMETROS			
DATOS VARIABLES		DATOS CONSTANTES	
Elevación de terráplen	231.910	Longitud adaptador en m	1
Elev. boca del tubo (msnm)	231.571	Correccion "o" sonda en m	0.217
Elev. "o" adaptador (msnm)	232.571	Correccion "o" fondo en m	0.566
Elev. "o" adap. - corr. sonda	232.354	Sonda No.	1
Elev. "o" adap. - corr. fondo	232.005	Adaptador No.	1
Elevación embalse (msnm)	232.970	Cinta No.	1
Elevacion de desfogue	224.310		
Tubo	Lecturas cinta en (m)		Elevación
No.	(1)	(2)	(msnm)
8	2.308	2.308	230.046
7	3.985	3.985	228.369
6	5.659	5.66	226.695
5	7.333	7.333	225.021
4	9.004	9.004	223.350
3	10.681	10.681	221.673
2	12.357	12.357	219.997
1F	13.207	13.207	218.798

Figura 6.3.1-4. Datos para el cálculo de desplazamientos verticales.

Previamente al proceso de medición se debe de realizar semanalmente en el laboratorio de instrumentación pruebas para inclinómetros, donde se tiene previsto un sitio con tubos y coples de aluminio instalados para comprobar el correcto acoplamiento del adaptador en la tubería, que la sonda de asentamiento tenga la sensibilidad adecuada levantándola 5cm y dejándola caer para cerrar las aletas retractiles. Verificar que la cinta metálica este calibrada y que la corrección del "cero adaptador" sea de 1m. Definir las correcciones de "cero sonda" y "cero fondo" para la sonda de asentamientos a utilizar.

De la siguiente manera, para obtener la corrección "cero sonda" se mide la longitud que hay en la base inferior del tubo donde está el 1er. cople a la boca del tubo, mas la longitud del adaptador y se le resta la lectura que da la cinta con la sonda en la escala del adaptador, esto es

Corrección “cero sonda” = [(longitud base del tubo + longitud del adaptador) - lectura de la cinta] (m).

Y para obtener la corrección “cero fondo” se mide la longitud que hay del fondo del inclinómetro (donde está el pasador) a la boca del tubo, más la longitud del adaptador y se le resta la lectura que da la cinta con la sonda en la escala del adaptador, esto es

Corrección “cero fondo” = [(longitud fondo del tubo + longitud del adaptador) - lectura de la cinta] (m).

Este proceso se realiza conjuntamente con el responsable de topografía para adquirir los datos de la elevación de la boca del tubo del inclinómetro a medir, la elevación de embalse y elevación de desfogue después de realizar el sondeo. Ver figura 6.3.1-4.

Para la medición se registra el número de tubos a auscultar y el sondeo se realiza de arriba hacia abajo midiendo la profundidad del borde inferior de cada tubo (excepto el del fondo), aplicando una tensión de 7.5kg a la cinta metálica del adaptador, la lectura de profundidad se determina leyendo con la visual horizontal y de frente a la regla graduada del adaptador. Para leer el fondo, la sonda debe tocar el pasador del tubo 1F probando al tacto de 2 a 3 veces hasta determinar la profundidad del fondo. Anotar las lecturas obtenidas de cada tubo y del fondo en la columna 2 de la hoja de registro de campo. (Ver figura 6.3.1-4.). Subir la sonda del tubo del inclinómetro levantándola aproximadamente 5cm y dejándola caer contra el pasador del tubo 1F para retraer sus aletas. Y girar la sonda 180° e introducirla de nuevo en el tubo del inclinómetro para realizar una segunda medición, repitiendo los pasos. Al terminar el sondeo, desenganchamos la sonda de la cinta metálica y se limpia con una franela, lubricándose si es necesario.

6.3.2. Desplazamientos horizontales.

El procedimiento para medir los desplazamientos horizontales es semejante al de los desplazamientos verticales sin embargo el instrumento de medición es totalmente diferente para medir esta variable, ya que se utiliza una sonda para obtener las deformaciones horizontales que presenta la tubería de aluminio instalada en el cuerpo de la cortina. (Figura 6.3.2-1.). Está constituida por un cuerpo de acero inoxidable y dos servo acelerómetros de fuerza balanceada en arreglo ortogonal, la distancia entre ruedas de medición es de 500mm, el intervalo de medición es de $\pm 53''$ de la vertical, resolución de 0.02mm y exactitud de ± 6 mm en 25m, con una temperatura de operación -20 a 50°C , para trabajar en tuberías de 85mm de diámetro.



Figura 6.3.2-1. Sonda para los desplazamientos horizontales y cable de control.

Se utiliza un cable de control para sonda de desplazamientos horizontales que se utiliza junto con la sonda y la unidad de medición para determinar la geometría de la tubería de aluminio del inclinómetro instalada en el cuerpo de la cortina a diferentes profundidades, con una longitud de 200m y aislamiento de neopreno, resistente a la abrasión y agentes químicos, construido con blindaje y alma de acero para soportar esfuerzos mecánicos y conductores de cobre de diferentes colores. (Ver figura 6.3.2-1.). Está graduado exteriormente con

marcas amarillas a intervalos de 0,5m, marcas rojas a intervalos de 1m y marcas numéricas a intervalos de 5m.

La unidad de medición para la sonda de desplazamientos horizontales, es un equipo con intervalo mínimo de medición de 0,5m, intervalo máximo de medición por prueba 1,000 puntos de datos. Capacidad de memoria de 10,000 datos de puntos distribuidos hasta en 40 inclinómetros diferentes, autonomía de operación de 16 horas, voltaje de operación del cargador de baterías de 115 volts a 60Hz y con una temperatura de operación de -20 a 50 °C. Figura 6.3.2-2.



Figura 6.3.2-2. Unidad de medición.

Tiene un adaptador para sonda de desplazamientos horizontales que es un equipo auxiliar construido de aluminio básicamente de dos secciones ensambladas de tubos de ademe para inclinómetro de aluminio (tubo y cople) que se acopla a la boca de la tubería del inclinómetro. (Figura 6.3.2-3.). Está integrado con un sistema de poleas que permite deslizar el cable de control al momento de realizar la medición.

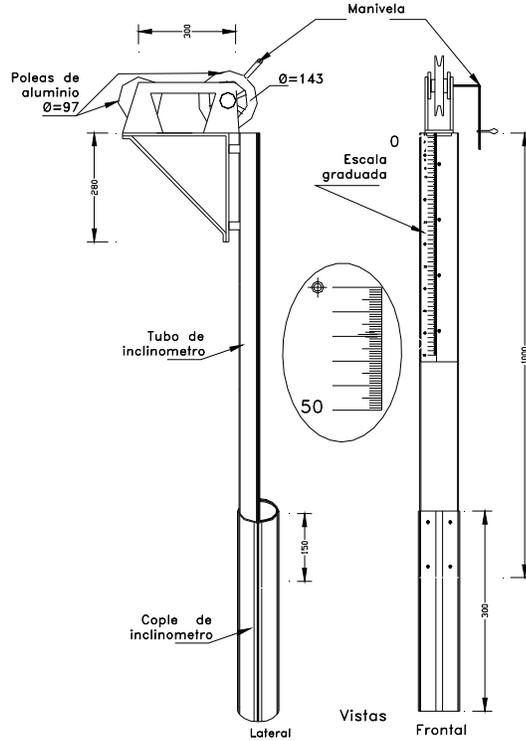


Figura 6.3.2-3. Adaptador para sonda de desplazamientos horizontales.

La frecuencia de medición es durante la etapa de construcción en la instalación de cada tubo guía o semanalmente y los datos de las mediciones en campo que se registran son; el número del inclinómetro, la fecha, ubicación, número de tubos, profundidad en metros y las lecturas del eje A en el sentido positivo y negativo (A+, A-) y también las del eje B, (B+, B-). Figura 6.3.2-4.

HOJA DE REGISTRO DE CAMPO DE MEDICIONES DE DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES									
Inclinómetro:	I-3		Ubicación:		Talud aguas abajo		Obs. No.	10	
Fecha:	11-Ago-04		Sensor:		N.S.29433		Puente:	20070	
Opero:	DHZ		Calculo:		JJR		Reviso:	JZA	
Hora inicio:	15:16		X=	556895.602	Y=	2369351.851	Z=	238.268	
			EST.		CAD.				
Tubo No.	Profund. (m)	EJE A		Suma de Verificación	Diferencias	EJE B		Suma de Verificación	Diferencias
		A+	A-			B+	B-		
12	1.43	-37	43	6	-80	27	-47	-20	74
	2.23	-83	90	7	-173	55	-74	-19	129
11	3.10	-88	97	9	-185	26	-44	-18	70
	3.90	-136	143	7	-279	24	-36	-12	60
10	4.78	-2	7	5	-9	-33	3	-30	-36
	5.58	13	-6	7	19	-48	15	-33	-63
9	6.46	-50	51	1	-101	-3	-15	-18	12
	7.26	-52	54	2	-106	20	-41	-21	61
8	8.14	-25	29	4	-54	-11	-3	-14	-8
	8.94	10	-7	3	17	19	-39	-20	58

7	9.81	54	-50	4	104	138	-163	-25	301
	10.61	50	-46	4	96	177	-204	-27	381
6	11.49	73	-71	2	144	185	-201	-16	386
	12.29	46	-42	4	88	139	-167	-28	306
5	13.16	279	-275	4	554	214	-231	-17	445
	13.96	270	-265	5	535	171	-196	-25	367
4	14.83	-75	80	5	-155	-174	153	-21	-327
	15.63	-116	122	6	-238	-110	96	-14	-206
3	16.50	195	-189	6	384	-371	347	-24	-718
	17.30	201	-197	4	398	-357	331	-26	-688
2	18.18	217	-212	5	429	-531	503	-28	-1034
	18.98	221	-219	2	440	-536	513	-23	-1049
1	19.85	319	-313	6	632	-604	577	-27	-1181
FONDO	20.54								

Figura 6.3.2-4. Medición de los desplazamientos horizontales.

Los cálculos que se deben realizar durante el sondeo consisten en determinar la suma de verificación y las diferencias en cada uno de los tubos como se indica a continuación.

Por ejemplo para la dirección A;

$$\text{Suma de verificación} = (A+) + (A-)$$

$$\text{Diferencias} = (A+) - (A-)$$

Una vez realizados los cálculos se capturan en la tabla de la figura 6.3.2-4. Y en el proceso inicial del sondeo se deberá marcar la orientación A+ con pintura en la boca del tubo del inclinómetro, esto es, la rueda superior alta en la dirección A+ como se muestra en la figura. 6.3.2-5.

Las mediciones se realizan insertando la sonda dentro del tubo con las ruedas superiores de ambos montajes en la dirección A+. Se baja la sonda lentamente hasta que toque el pasador del tubo 1F y dejarla en ese sitio de 5 a 10 minutos para que se ajuste a la temperatura ambiente dentro del tubo y tomar la lectura en esta posición. Posteriormente subir la sonda y tomar las lecturas para cada profundidad en las direcciones A+ y B+ hasta que la sonda llegue al tope del inclinómetro.

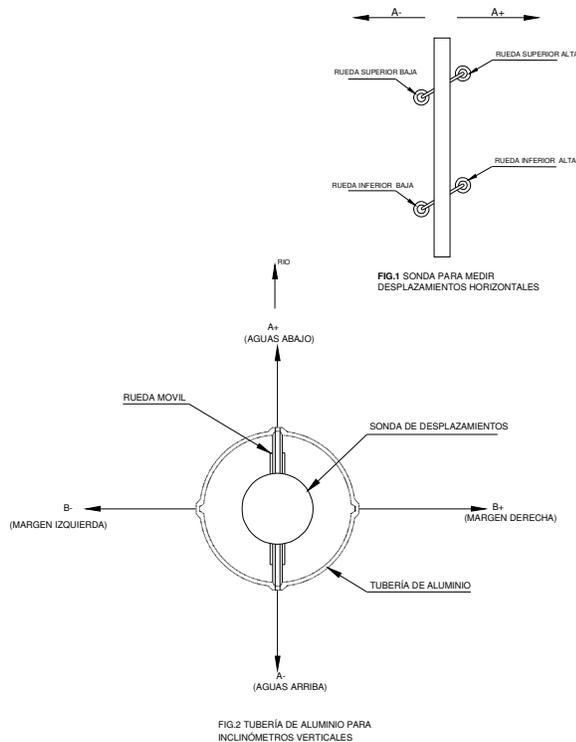


Figura 6.3.2-5. Orientación de la sonda en la boca del tubo para los desplazamientos horizontales.

Para cada lectura esperar a que la unidad de medición se estabilice y anotar los valores desplegados de la unidad de medición para ambas direcciones. Y se calcula la suma de verificación de cada tubo. Al terminar la medición en la dirección A+ y B+ se deberá sacar la sonda, girarla 180° e introducirla nuevamente en el tubo del inclinómetro, teniendo cuidado que las ruedas superiores queden orientadas en la dirección A-. Bajar la sonda lentamente hasta que toque el pasador del tubo 1F y realizar las mediciones para cada profundidad en las direcciones A- y B- siguiendo el mismo procedimiento que para las direcciones A+ y B+. El sondeo se debe de completar con la localización topográfica de la boca del tubo superior y anotar los datos en la hoja registro de campo. Ver figura 6.3.2-4.

Una vez terminado el sondeo, desconectar el cable de control de la sonda y de la unidad de medición y colocarles sus tapas protectoras. Limpiar la sonda y

guardarla en su estuche, colocar el tapón a la boca del inclinómetro y cerrar el registro.

6.4. Interpretación.

Sabemos que los inclinómetros verticales son instrumentos geotécnicos empleados para medir desplazamientos verticales o asentamientos. Está compuesto por una columna de tubos de aluminio ranurados telescópicos que comienzan al inicio con un tubo de 3,05m de longitud y el resto de la tubería por tramos de 1,525m de longitud, unidos mediante coples de 0,3m de longitud que se instalan con una separación entre tubos de 0,15m.

6.4.1. Desplazamientos verticales.

Todos los datos del registro de campo se capturan y complementan en una hoja de cálculo. Figura 6.4.1-1. Estos cálculos complementarios se muestran a continuación.

HOJA DE REGISTRO DE CAMPO PARA DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE INCLINÓMETROS					
DATOS VARIABLES			DATOS CONSTANTES		
Elevación de terráplen	231.910		Longitud adaptador en m	1	
Elev. boca del tubo (msnm)	231.571		Correccion "o" sonda en m	0.217	
Elev. "o" adaptador (msnm)	232.571		Correccion "o" fondo en m	0.566	
Elev. "o" adap. – corr. sonda = A (m)	232.354		Sonda No.	1	
Elev. "o" adap. – corr. fondo = B (m)	232.005		Adaptador No.	1	
Elevación embalse (msnm)	232.970		Cinta No.	1	
Elevacion de desfogue (msnm)	224.310				
Tubo	Lecturas cinta en (m)		Elevación Actual	Asentamientos Parciales	Asentamientos Totales
No.	(1)	(2)	(msnm)	(cm)	(cm)
8	2.308	2.308	230.046	0.000	0.000
7	3.985	3.985	228.369	0.100	0.100
6	5.66	5.66	226.695	0.150	0.250
5	7.333	7.333	225.021	0.200	0.200
4	9.004	9.004	223.350	0.100	-0.100
3	10.681	10.681	221.673	0.300	-0.200
2	12.357	12.357	219.997	0.100	-0.200
1F	13.207	13.207	218.798	0.100	-0.100

Figura 6.4.1-1. Datos del registro de campo y cálculos complementarios.

Elev. boca del tubo; es la cota topográfica de la boca del inclinómetro con aproximación al milímetro, en metros.

Elev. "0" adaptador = elev. boca del tubo (m) + long. adaptador (m).

A= elev. "0" adaptador – corrección "0" sonda, (m).

B= elev. "0" adaptador – corrección "0" fondo, (m).

Para el tubo del fondo (1F);

Elevación actual = (B – Lectura promedio del tubo 1F), (m).

Para los tubos restantes (2 en adelante);

Elevación actual_N = (A – Lectura promedio del tubo_N), (m).

Asentamiento parcial_N = (Elevación actual_N - Elevación anterior_N), (cm).

Asentamiento total_N = (Elevación actual_N - Elevación base_N), (cm).

Donde;

N; es el número de tubo del inclinómetro.

Elevación actual; es la última medición realizada.

Elevación anterior; es la elevación anterior respecto a la actual.

Elevación inicial; es la primera medición realizada.

Elevación base o de referencia; es la medición con la que se comparan las mediciones subsecuentes, no necesariamente es la primera medición.

Y finalmente los resultados serán presentados en gráficas de asentamiento total en (cm), contra la elevación (msnm). Figura 6.4.1-2.

P. H. EL CAJÓN, NAY.
ASENTAMIENTOS EN INCLINÓMETRO I-3

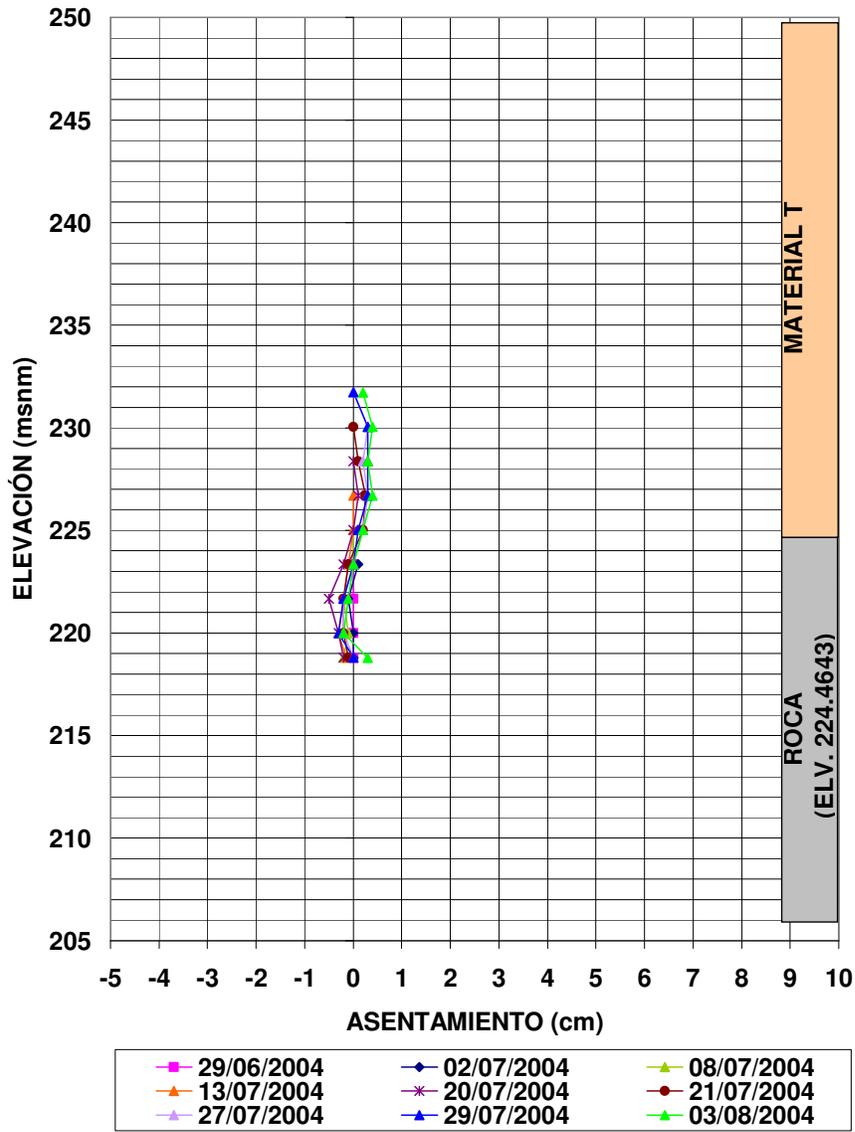


Figura 6.4.1-2. Gráfica de desplazamientos verticales o asentamientos totales.

6.4.2. Desplazamientos horizontales.

Los cálculos que se deben realizar durante el sondeo consisten en determinar la suma de verificación y las diferencias en cada uno de los tubos como se indicó en el apartado anterior (figura 6.3.2-4.), sin embargo, la descripción de los cálculos complementarios se muestra a continuación.

Donde N ; es el número de tubo.

Profundidad $real_N = Profundidad\ obtenida_N - 1m$ que es la longitud del adaptador.

Distancia horizontal $_N = (Profundidad\ real_N - Profundidad\ real_{N-1}) \times 100.$

Constante $_N = Distancia\ horizontal_N / 50,000.$

Desplazamiento parcial en $A_N = Diferencia\ en\ A_N \times Constante_N.$

Desplazamiento parcial en $B_N = Diferencia\ en\ B_N \times Constante_N.$

Geometría en $A_N = Geometría\ A_{N-1} + Desplazamiento\ parcial\ en\ A_N.$

Geometría en $B_N = Geometría\ B_{N-1} + Desplazamiento\ parcial\ en\ B_N.$

Estos cálculos complementarios se capturan en las siguientes tablas, figura 6.4.2-1.

CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS DEL INCLINÓMETRO						
Inclinómetro:	I-3	Ubicación:	Talud aguas abajo	Obs. No.	10	
Fecha:	11-Ago-04	Sensor:	N.S.29433	Puente:	20070	
Opero:		Calculo:		Reviso:		
Coordenadas:	X=	556895.602	Y=	2369351.851	Z=	238.268
	Est.		Cad.			
Tubo	Profund. Real (m)	Elevación (msnm)	Geometría (cm)		Desplazamiento total (cm)	
			A	B	A	B
12	0.43	237.84	3.9111	-4.0913	0	0
	1.23	237.04	4.0391	-4.2097	0	0
11	2.1	236.17	4.2892	-4.4823	0.0509	0.0481
	2.9	235.37	4.582	-4.5239	0.0541	-0.0223
10	3.78	234.49	5.1108	-4.7424	0.0163	0.0906
	4.58	233.69	5.1188	-4.6176	0.0227	0.0234
9	5.46	232.81	5.0927	-4.4729	0.0154	-0.0104
	6.26	232.01	5.2511	-4.5193	0.0186	0.0168
8	7.14	231.13	5.6496	-4.1122	-0.1933	-0.4977
	7.94	230.33	5.5952	-4.3874	-0.0525	-0.2097
7	8.81	229.46	5.6359	-4.6919	-0.1228	-0.0061
	9.61	228.66	5.3831	-5.1703	-0.0364	-0.0093
6	10.49	227.78	5.1797	-5.9005	-0.002	0.0503
	11.29	226.98	4.9957	-6.4253	-0.0484	-0.0425
5	12.16	226.11	4.5045	-7.2241	0.2897	0.2239
	12.96	225.31	3.8213	-7.8225	0.0865	0.1103
4	13.83	224.44	2.9187	-8.1456	0.0582	-0.2052
	14.63	223.64	3.1843	-7.6256	0.0406	-0.202
3	15.5	222.77	3.5944	-7.2806	0.0447	-0.1885
	16.3	221.97	2.9688	-6.1542	0.0559	-0.1661
2	17.18	221.09	2.2577	-4.9468	0.0664	-0.1626
	17.98	220.29	1.5713	-3.2988	0.0664	-0.1562
1	18.85	219.42	0.8128	-1.5014	0.0594	-0.1283
FONDO	19.54	218.73	0	0	0	0

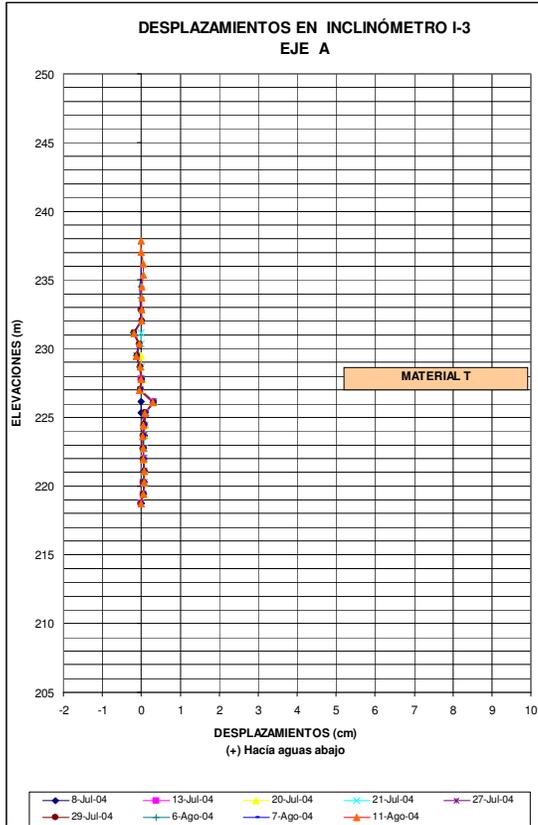
(a)

CÁLCULO DE GEOMETRÍAS DEL INCLINÓMETRO									
Inclinómetro:		I-3		Ubicación:		Talud aguas abajo		Obs. no.	10
Fecha:		11-Ago-04		Sensor:		N.S.29433		Puente:	20070
Opero:				Calculo:				Reviso:	
Hora inicio:		15:16		X=	556895.602	Y=	2369351.851	Z=	238.268
				Est.		Cad.			
Tubo	Profund. Real (m)	Elevación (msnm)	DH	Factor	Posición (cm)		Geometría (cm)		
					A	B	A	B	
12	0.43	237.84	80	0.0016	-0.128	0.1184	3.9111	-4.0913	
	1.23	237.04	87	0.0017	-0.301	0.2245	4.0391	-4.2097	
11	2.1	236.17	80	0.0016	-0.296	0.112	4.3401	-4.4342	
	2.9	235.37	88	0.0018	-0.491	0.1056	4.6361	-4.5462	
10	3.78	234.49	80	0.0016	-0.0144	0.0576	5.1272	-4.6518	
	4.58	233.69	88	0.0018	0.0334	0.1109	5.1416	-4.5942	
9	5.46	232.81	80	0.0016	-0.1616	0.0192	5.1081	-4.4833	
	6.26	232.01	88	0.0018	-0.1866	0.1074	5.2697	-4.5025	
8	7.14	231.13	80	0.0016	-0.0864	0.0128	5.4563	-4.6099	
	7.94	230.33	87	0.0017	0.0296	0.1009	5.5427	-4.5971	
7	8.81	229.46	80	0.0016	0.1664	0.4816	5.5131	-4.698	
	9.61	228.66	88	0.0018	0.169	0.6706	5.3467	-5.1796	
6	10.49	227.78	80	0.0016	0.2304	0.6176	5.1777	-5.8501	
	11.29	226.98	87	0.0017	0.1531	0.5324	4.9473	-6.4677	
5	12.16	226.11	80	0.0016	0.8864	0.712	4.7942	-7.0002	
	12.96	225.31	87	0.0017	0.9309	0.6386	3.9078	-7.7122	
4	13.83	224.44	80	0.0016	-0.248	0.5232	2.9769	-8.3508	
	14.63	223.64	87	0.0017	-0.4141	0.3584	3.2249	-7.8276	
3	15.5	222.77	80	0.0016	0.6144	1.1488	3.639	-7.4691	
	16.3	221.97	88	0.0018	0.7005	1.2109	3.0246	-6.3203	
2	17.18	221.09	80	0.0016	0.6864	1.6544	2.3242	-5.1094	
	17.98	220.29	87	0.0017	0.7656	1.8253	1.6378	-3.455	
1	18.85	219.42	69	0.0014	0.8722	1.6298	0.8722	-1.6298	
FONDO	19.54	218.73			0	0	0	0	

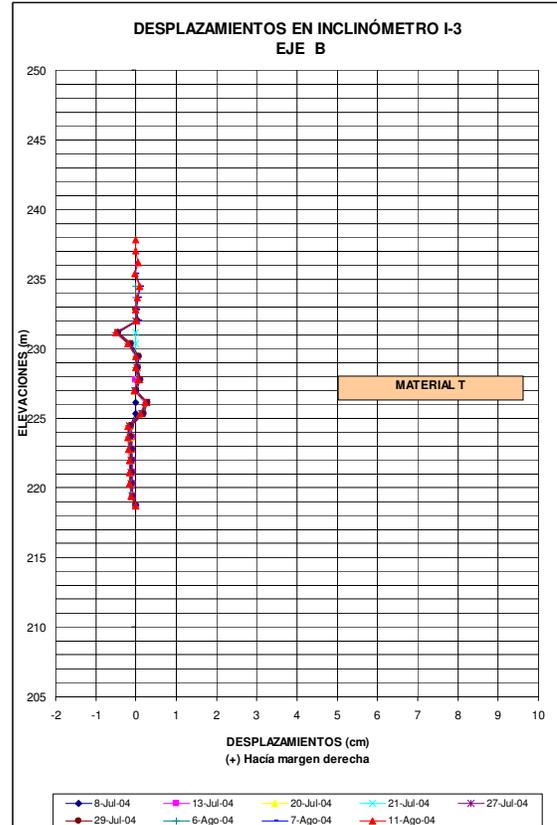
(b)

Figura 6.4.2-1. Tablas de los cálculos complementarios. a) De los desplazamientos horizontales. b) De la geometría del inclinómetro.

Y se grafica la elevación en (m), contra desplazamientos en (cm), para los desplazamientos sobre el eje A y B como se muestra en las siguientes gráficas. Figura 6.4.2-2.



(a)



(b)

Figura 6.4.2-2. Graficas de desplazamientos horizontales. a) Sobre el eje A y b) Sobre el eje B.

Finalmente se grafican las elevaciones en (m) contra las deformaciones en (cm), como se muestra en las siguientes graficas de geometría. Figura 6.4.2-3.

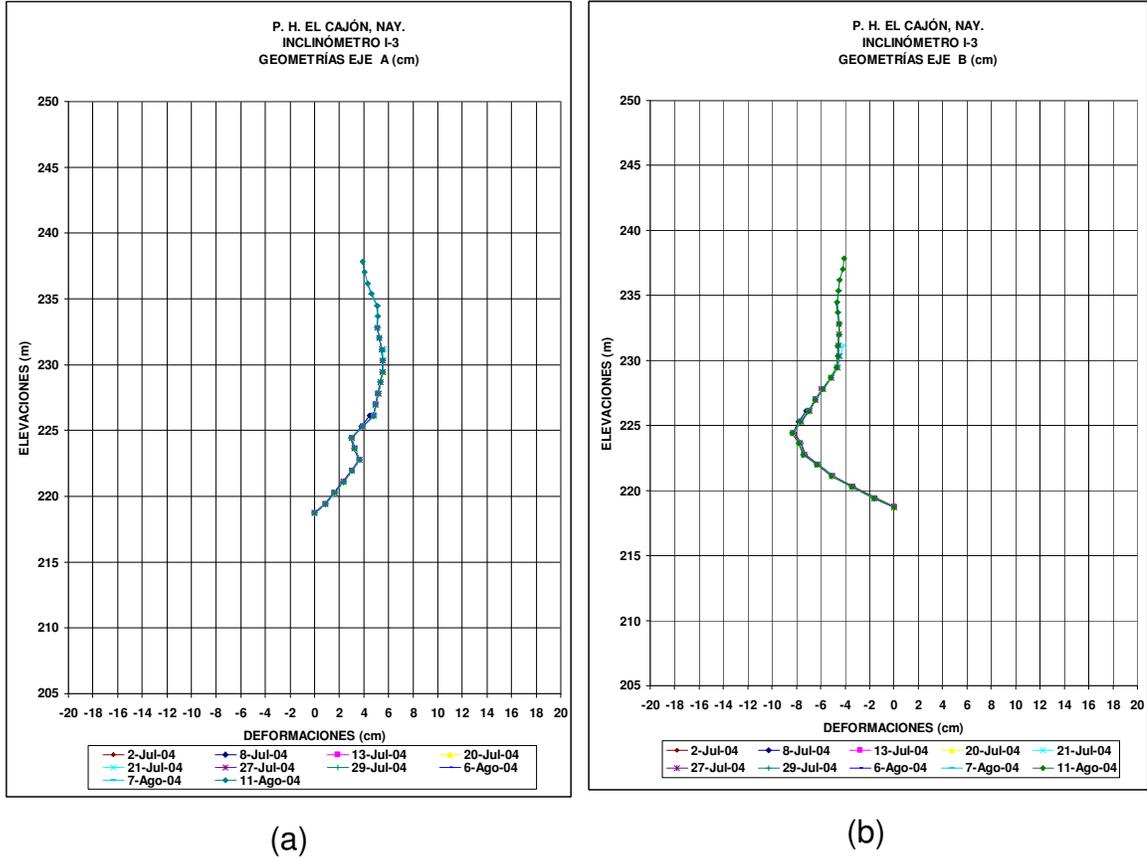


Figura 6.4.2-3. Gráfica de la geometría de los desplazamientos horizontales o deformaciones. a) Sobre el eje A y b) Sobre el eje B.

CAPÍTULO VII

NIVELES HIDRÁULICOS DE ASENTAMIENTO

7.1. Principio de funcionamiento.

Se instalarán niveles hidráulicos de asentamiento (NHA), para medir desplazamientos verticales en el interior del terraplén de la cortina y evaluar los módulos de deformabilidad vertical y normal a la cara de concreto, sobre los ejes de las losas L-21 y L-26, instalándose a una elevación de 245msnm, instalándose 26 niveles hidráulicos o vertedores, de la siguiente manera, del vertedor uno (V-1), al V-13 sobre el eje de la losa 21 y del V-14 al V-25, sobre el eje de la losa 26. Ver apéndice, figura A.6.

Existen dos modelos diferentes que serán instalados, los niveles hidráulicos tipo tee y de tipo monten, sin embargo este estudio se limitará a los del tipo monten. Figura 7.1-1.

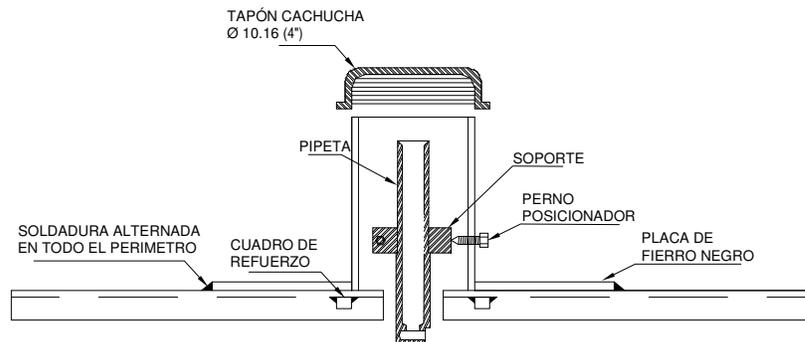


Figura 7.1-1. Nivel hidráulico tipo monten.

Los niveles hidráulicos tipo monten consisten en un niple galvanizado de 10.16cm (4"), que lleva una pipeta de PVC dentro de un mecanismo nivelador sujeto a un canal tipo monten. La manguera del circuito de medición es protegida en el interior del mismo canal al cual se le coloca una tapa.

La tubería que es de tipo telescópica hermética es de perfil hueco cuya hermeticidad permitirá soportar una presión de 0.49MPa (5kg/cm²), que alojará la manguera del circuito de medición de la tubería tipo monten.

7.2. Instalación.

El procedimiento de instalación consiste desde recibir en el almacén los niveles hidráulicos tipo monten para verificar que se encuentren en buen estado las piezas y sus pipetas, la tubería de protección (niples, coples, y piezas especiales), asimismo la tubería telescópica hermética, revisando que se puedan realizar los ensambles correctamente y se verifica su hermeticidad mediante pruebas con agua a presión, también las mangueras tipo nylaflo de 0,95cm (3/8") de diámetro, apiladas en un máximo de 25 rollos y verificando que no existan fugas mediante pruebas con aire a presión, identificando cada manguera colocando etiquetas con la nomenclatura del nivel correspondiente, en los extremos y en sitios intermedios. En el taller se habilitan cajas de extensión de 60 x 40cm y 20cm de altura, para su posterior galvanizado, también se habilita una estructura temporal para alojar un depósito de agua y ejecutar las pruebas y mediciones durante la instalación y hasta la construcción de la caseta de instrumentación correspondiente.

El equipo, material y brigadas empleadas son las siguientes: para la ubicación se requiere al equipo de topografía y las referencias topográficas provisionales para la localización de los niveles hidráulicos y las cajas de extensión. El material y equipo necesario para la instalación, son los niveles hidráulicos de asentamiento, manguera nylaflo, múltiples de acrílico y múltiples de PVC, válvulas de paso, aditamentos especiales como conectores tubo a tubo, conector pipeta a tubo y conexiones para el múltiple provisional y el de acrílico, recipiente para agua o tinaco, cinta teflón, herramienta menor como pico, pala, llaves, pinzas, etc. Agua potable de garrafón y las brigadas de instalaciones y topografía.

Para excavar las zanjas se localiza topográficamente y se traza en campo los sitios donde se colocarán los niveles hidráulicos de asentamiento y sus cajas de extensión, así como la ruta de la tubería y mangueras, conforme a los datos indicados en los planos.

En coordinación con el frente de construcción, se excavará la zanja con las dimensiones necesarias para alojar los instrumentos y los tubos de protección de las mangueras. (Figura 7.2-1.). La profundidad de la zanja será variable debido a la pendiente de las capas de material pero se recomienda tener al menos 0,6m de profundidad con una pendiente longitudinal descendente del 2% (2cm por 1m), en dirección hacia aguas abajo. Una vez excavada la zanja, se colocan en el interior referencias topográficas para afinar el fondo de la excavación empleando grava arena con tamaño máximo 1,91cm (3/4”).



Figura 7.2-1. Zanja para alojar los instrumentos y tubos de los NHA.

Los niveles hidráulicos se instalan en el interior de la zanja, verificando con equipo topográfico la correcta elevación de la pipeta de cada nivel. Se nivela el instrumento con nivel de burbuja en sentido transversal a la zanja conectándose la manguera al vertedor empleando una unión tipo B-600-1-6, swagelok. (Ver figura 7.3-1.). El tendido de la tubería monten se realiza uniendo coples y niples. También se colocan las cajas de extensión a cada 50 metros adecuando la longitud de los tramos de tubería adyacentes a dichas cajas. Se

coloca la cimbra y se cuela el monumento de concreto que fijará el NHA. La pipeta del nivel hidráulico de asentamiento se nivela en el sentido longitudinal con respecto al eje de la zanja empleando los tornillos de nivelación del propio instrumento. Las uniones entre mangueras se realizan con los conectores, apretando las roscas con la mano hasta donde sea posible y posteriormente con herramienta adecuada girar una vuelta. Una vez que se haya instalado cada nivel hidráulico se verifica su funcionamiento hidráulico, de tal forma que la elevación topográfica del nivel del agua de la celda coincida con la elevación del agua en la escala de medición, con una tolerancia de $\pm 5\text{mm}$. (Ver figura 7.3-2. b).). En las cajas de extensión se acomodan las mangueras formando gasas para que se tenga holgura para absorber movimientos y desplazamientos del material de la cortina (figura 7.2-2.), posteriormente se colocan las tapas y se fijan con fleje en cada extremo de tubería y cople.



Figura 7.2-2. Caja de extensión con gasas de manguera.

Al término de la colocación del monten se vierte una primera capa de material hasta cubrir los registros, instrumentos y tubería, compactándose con pisón de mano. Posteriormente se coloca una capa de 40cm de espesor de material con tamaño máximo de 7,62cm (3"), compactándose con equipo mecánico y en caso de ser necesario se construirá una estructura provisional para medición de los niveles, la cual debe tener un tubo múltiple de PVC con sus conexiones adecuadas y se coloca un recipiente para almacenamiento de agua,

conectándose las mangueras de cada instrumento a los múltiples de acrílico, el cual debe estar alimentado por agua potable de garrafón almacenada en un tinaco.

7.3. Resultados.

Los niveles hidráulicos de asentamiento son un sistema para medir desplazamientos verticales en el interior del terraplén de la cortina y evaluar los módulos de deformabilidad vertical y normal a la cara de concreto basado en el principio de vasos comunicantes.

El nivel hidráulico tipo monten sabemos que consiste en un niple galvanizado de 10.16cm (4"), que lleva una pipeta de PVC dentro de un mecanismo nivelador sujeto a un canal tipo monten. La manguera del circuito de medición es protegida en el interior del mismo canal al cual se le coloca una tapa. Figura 7.3-1.



(a)



(b)

Figura 7.3-1. a) Niple galvanizado con pipeta de PVC. b) Manguera del circuito.

El procedimiento de medición se realiza en el interior de la caseta provisional de instrumentación, donde se encuentran instalados dos múltiples de acrílico transparente, un estadal de aluminio con una bureta graduada en mm

cuya longitud es de 11m para poder medir el nivel hidráulico más lejano del grupo instalado (figura 7.3-2.), dos crucetas con válvulas, un tinaco de plástico con tapa roscada con utilización de agua limpia para llenar las mangueras de los niveles hidráulicos con las que se establece el circuito de medición.



(a)



(b)

Figura 7.3-2. a) Múltiples de acrílico transparentes. b) Estadal de aluminio de 11m de longitud con bureta graduada en mm.

La frecuencia de esta medición se realiza semanalmente, anotando los datos en la libreta de campo con la siguiente información, el código del instrumento, ubicación, coordenadas, fecha de instalación, elevación inicial de la pipeta, la lectura en metros, la elevación a partir del "0" de la escala en (m), nivel de embalse y desfogue en (m) y elevación del terraplén en (m). Figura 7.3-3.

REGISTRO DE CAMPO PARA NIVELES HIDRÁULICOS DE ASENTAMIENTOS					
Instrumento:	V-1	Est.:	0+075	Elevación inicial:	499.7218
Fecha:	07-Abr-01	Cad.:	0+0584	Cálculo:	x,y,z.
Fecha	Embalse (m)	Desfogue (m)	Lectura (m)	Elevación "0" de la escala (m)	Elevación del terraplén (m)
18-Abr-01	325.04	325.03	0.327	499.394	500.12
19-Abr-01	326.06	326.03	0.328	499.402	500.12
20-Abr-01	324.01	324.5	0.328	499.395	500.12
21-Abr-01	326.1	326.25	0.328	499.394	501.05

Figura 7.3-3. Datos del instrumento y sus lecturas.

Una vez en sitio, abrimos la caseta de los niveles hidráulicos a medir y realizamos una inspección física del mismo revisando el estado actual del equipo instalado para realizar la medición, posteriormente se procede a abrir la válvula de bola del tinaco para bajar el agua y llenar el múltiple de acrílico donde se encuentran las válvulas de los niveles hidráulicos (figura 7.3-4.), se abre la válvula del vertedor o nivel hidráulico a medir y se cierra la válvula de bola del tinaco después de 5 minutos. Lentamente se abre la válvula de aguja de la bureta observando que no queden burbujas dentro de la manguera, donde se estabilice la gota de agua en la bureta se toma la lectura directamente con las graduaciones de la escala graduada al milímetro, se anota en la libreta de campo la lectura de agua medida de dicho nivel hidráulico, cerramos la válvula del vertedor medido y la de la bureta, abrimos la válvula de bola del tinaco y enseguida abrimos la válvula del siguiente vertedor a medir, cerramos la válvula de bola del tinaco después de 5 minutos y finalmente repetimos estos pasos para los otros vertedores o NHA. Terminadas las mediciones cerramos la válvula de bola del tinaco y las de los niveles hidráulicos medidos.

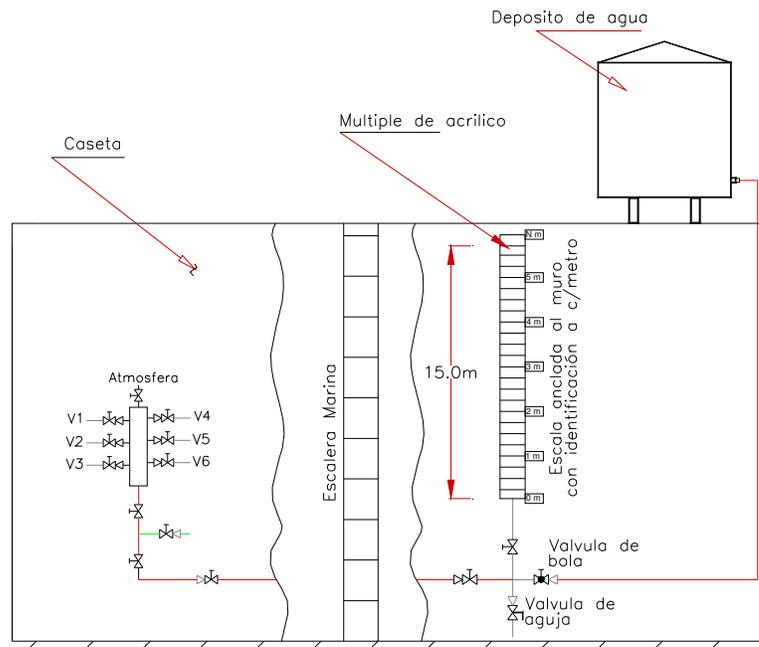


Figura 7.3-4. Diagrama esquemático del equipo de medición de NHA.

7.4. Interpretación.

Los datos de la libreta de campo se capturan en una hoja de cálculo y se anota la fecha, la cota topográfica del nivel hidráulico medido, lectura del agua medida y los niveles de embalse y desfogue correspondientes al día en que se realiza la medición, como se mostró en la figura 7.3-3.

Para calcular la elevación del nivel hidráulico se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Elevación} = [\text{Elevación "0" Escala} + \text{Lectura en la Escala}] \text{ (m)}$$

Para el espesor de la capa del terraplén sobre el instrumento con la siguiente fórmula:

$$\text{Espesor de la capa sobre el instrumento} = [\text{Elevación del terraplén} - \text{Elevación del nivel}] \text{ (m)}$$

Y finalmente calculamos el asentamiento con;

$$\text{Asentamiento} = [\text{Elevación} - \text{Elevación inicial}] \text{ (m)} \times 100 \text{ (cm)}$$

En la siguiente tabla se muestran los cálculos obtenidos con base en los datos de la figura 7.3-3. Figura 7.4-1.

HOJA DE CÁLCULO PARA NIVELES HIDRÁULICOS DE ASENTAMIENTOS		
Elevación del nivel hidráulico (m)	Espesor de la capa sobre el instrumento (m)	Asentamiento (m)
499.721	0.399	-0.08
499.73	0.39	0.82
499.723	0.397	0.12
499.722	1.328	0.02

Figura 7.4-1. Cálculos de niveles hidráulicos de asentamiento.

Finalmente se grafica la elevación del nivel hidráulico (m), embalse (m), desfogue (m) y terraplén (m) contra la fecha, como se muestra a continuación. Figura 7.4-2.

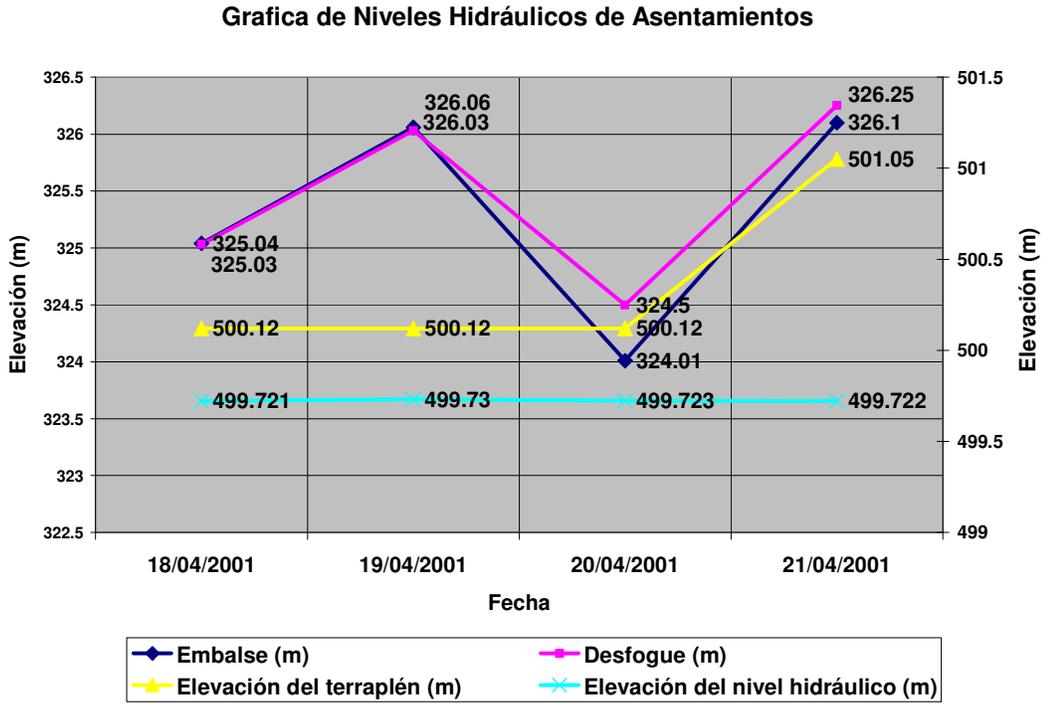


Figura 7.4-2. Gráfica de niveles hidráulicos de asentamiento.

CAPÍTULO VIII

EXTENSÓMETROS DE BARRA

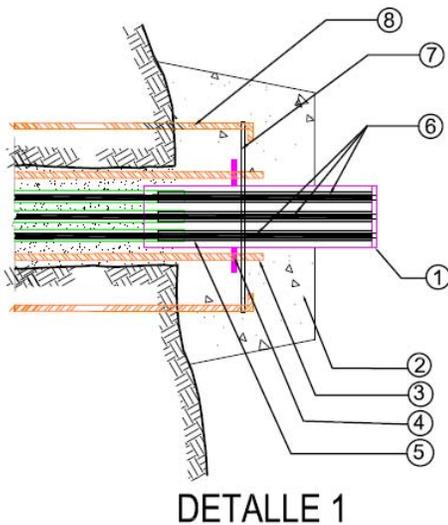
8.1. Principio de funcionamiento.

En las excavaciones y cortes que se realizarán en el interior del macizo rocoso para las obras de generación y en las excavaciones abiertas, se efectuarán tratamientos para asegurar la estabilidad de los taludes, lo que depende de las condiciones de la roca y los grupos de rocas con fallas o discontinuidades que definen bloques con posibilidades de salida o desprendimiento. Para auscultar esos bloques y vigilar la eficiencia de los tratamientos se instalarán grupos de extensómetros, cada uno con tres barras de longitud aproximada de 15, 9 y 3 metros.

La ubicación final de esta instrumentación se hará en conjunto con el departamento de mecánica de rocas a medida que el diseño geotécnico y la construcción de la obra avancen.

El extensómetro de barra es un sistema de medición empleado para registrar desplazamientos de bloques de roca en excavaciones. Está compuesto principalmente por barras de diferentes longitudes protegidas con tubería de PVC, con anclas en un extremo y con un dispositivo de lectura en el otro extremo. Figura 8.1-1.

El cabezal del extensómetro es un dispositivo de lectura que se coloca en el extremo del extensómetro de barra, cuya superficie metálica plana sirve como referencia fija para medir los desplazamientos de las barras, empleando un micrómetro de profundidades de precisión.



- 1.- Cabezal metálico diám. = 7,3 cm
- 2.- Base de concreto $f'c > 100 \text{ kg/cm}^2$
- 3.- Ancla de varilla corrugada diám. = 1,27 cm (1/2"), 1,5 m de long.
- 4.- Amarre de alambre recocido.
- 5.- Tubo de PVC diám. = 0,95 cm (3/8"), tramos de 6 m long.
- 6.- Barras de acero inoxidable diám. = 0,63 cm (1/4"), longitud definitiva por CFE.
- 7.- Parrilla de alambón o malla.
- 8.- Varilla de acero $\varnothing = 1.5875 \text{ (5/8")}$.

DETALLE 1

Figura 8.1-1. Extensómetro de barra.

8.2. Instalación.

Para instalar el extensómetro se realiza la perforación del barreno empleando equipo de percusión o de rotación en el sitio especificado (figura 8.2-1.), el diámetro de la perforación dependerá de la cantidad de barras a instalar en cada barreno, pero se emplean generalmente barrenos de 7.6cm (3") para instalar de 3 a 4 barras, la limpieza de la perforación se realizará con aire o agua a presión.



Figura 8.2-1. Perforación del barreno con equipo de percusión.

Para armar el cuerpo del extensómetro se coloca un ancla en el extremo posterior de la barra de acero inoxidable, uniéndose con soldadura de acero inoxidable, el ancla se compone de un tramo de varilla corrugada, de 19mm (3/4") de diámetro y de 36.5cm de longitud. (Figura 8.2-2.). Se unen las demás barras de acero inoxidable de 6.4mm (1/4") de diámetro y 3.05m (10") de longitud, con soldadura para acero inoxidable en el caso de excavaciones abiertas o subterráneas de gran diámetro. Se instala la funda de protección de las barras de acero inoxidable, integrada por tubería hidráulica de PVC o similar, de 9.5mm (3/8") de diámetro y 3.05m (10") de longitud, unida con coples y y pegamento apropiado.



Figura 8.2-2. Anclas soldadas a las barras de acero inoxidable.

La junta que se forma entre la tubería de PVC y el ancla se sella empleando silicón y/o cinta de aislar, con el objeto de evitar que la lechada o el mortero de inyección se introduzca dentro de la funda de protección. Se alinea cada barra conforme a la profundidad establecida y se coloca la tubería de plástico o poliducto de 1/2" de diámetro a lo largo de la barra de mayor longitud, por donde se inyectará el barreno con mortero o lechada. Se coloca un tubo de purga, de 1m de longitud, en el extremo donde se colocará el cabezal. Se unen las barras y la tubería de inyección fijándolas con cinta de aislar, alambre o cintas plásticas ajustables, con lo cual se integra el cuerpo del extensómetro.

Para la instalación del cuerpo del extensómetro en el barreno, se introduce el cuerpo del mismo en el barreno hasta la profundidad especificada y el sistema de fijación del cabezal, en el caso de excavaciones subterráneas, se introducen en la perforación dos varillas corrugadas de 1.5m de longitud, de 1.27mm de diámetro, dejando al menos 10cm de la varilla fuera de la perforación. Cuando se trate de excavaciones exteriores, se colocarán anclas cortas para fijar el cabezal al terreno firme. Se emplea madera para centrar el cuerpo del extensómetro y se tapa la boca de la perforación colocando mortero de cemento-yeso-arena o calafateada. (Figura 8.2-3). Una vez que haya fraguado el calafateo, se inyecta el barreno hasta que la mezcla inyectada derrame por el tubo de purga. Se cierra el tubo de purga para aumentar la presión de inyección y al finalizar se dejan cerradas ambas tuberías.



Figura 8.2-3. Instalación del extensómetro en el barreno, tapado con calafateada.

Para instalar el cabezal una vez que haya fraguado la mezcla inyectada, se recortan las tuberías de inyección y de purga. Se retira el material del calafateo y se prepara la superficie para alojar el cabezal del extensómetro. Las barras de acero inoxidable del extensómetro y las tuberías de PVC que las protegen se recortan a la longitud necesaria para la instalación del cabezal. Se instala el cabezal de referencia, centrando cada barra en los sitios donde se tomarán las lecturas con el micrómetro de profundidades de precisión. En el caso de excavaciones subterráneas, se fija el cabezal a las varillas corrugadas

empleando alambre recocido y se coloca mezcla de cemento-arena hasta el nivel del concreto lanzado. En el caso de excavaciones exteriores se construye un monumento de concreto fijado al terreno firme con anclas cortas. Se coloca una identificación en el cabezal, con la nomenclatura del extensómetro y se numeran las barras instaladas. Figura 8.2-4.



Figura 8.2-4. Monumento de concreto fijo al terreno y toma de la primera lectura con el micrómetro.

Una vez terminada la instalación del extensómetro y una vez que haya fraguado el concreto o mortero que se ha empleado para fijar el cabezal, se toma la primera lectura en cada extremo de las barras empleando el micrómetro con 0.01mm de resolución y 150mm de alcance de medición. Esta lectura inicial se incluye en el formato de registro de lecturas de campo.

8.3. Resultados.

Sabemos que los extensómetros de barra son un sistema de medición empleado para registrar desplazamientos de bloques de roca en excavaciones y el cabezal del extensómetro es un dispositivo que se coloca en el extremo del extensómetro de barra, cuya superficie metálica plana sirve como referencia fija para medir los desplazamientos de las barras, empleando un micrómetro de profundidades de precisión. Figura 8.3-1.



Figura 8.3-1. Micrómetro de medición de profundidades de precisión.

La frecuencia de medición durante la etapa de construcción será semanal, anotando los datos en la libreta de campo como la fecha de instalación, código del instrumento, ubicación, lectura en (mm) de la barra 1, barra 2 y barra 3 y la temperatura en °C. Figura 8.3-2.

Para medir las deformaciones se verifica que la lectura coincida aproximadamente con la lectura anterior (en la escala del micrómetro), se toman las lecturas de cada una de las barras, fijando firmemente la base del micrómetro sobre el cabezal metálico del extensómetro de barra, con la orientación que debe tener el instrumento de medición, se anotan las lecturas en la libreta de campo, incluyendo la temperatura del ambiente. Es importante incluir en la columna de observaciones cualquier evento que pueda influir en el comportamiento de la estructura, tales como voladuras cercanas, colocación de marcos metálicos o concreto lanzado, etc.

LECTURAS DEL EXTENSÓMETRO DE BARRA	
Fecha de Instalación:	08-May-04 al 12-May-04
Código del instrumento:	170698
Ubicación:	Vertedor (loma oriente)
Coordenadas:	x=556 783.299 y=2 369 573.514 z=377.476

Fecha	Hora	Temperatura (°C)
11-May-04	09:55	36.1
08-Jun-04	09:25	37.1
06-Jul-04	11:30	37.5
03-Ago-04	10:45	35.7
31-Ago-04	16:40	36.8
28-Sep-04	09:25	28.8
26-Oct-04	10:10	33.1
23-Nov-04	14:00	37.3
21-Dic-04	11:20	37.6

BARRA-1 Longitud: 2.85m		BARRA-2 Longitud: 8.90m		BARRA-3 Longitud: 18.54m	
Lectura (mm)	Diferencia acumulada (mm)	Lectura (mm)	Diferencia acumulada (mm)	Lectura (mm)	Diferencia acumulada (mm)
13.583	(inicial)	14.327	(inicial)	14.505	(inicial)
13.615	0.032	14.401	0.074	14.608	0.103
13.655	0.072	14.481	0.154	14.705	0.2
13.644	0.061	14.7	0.373	14.681	0.176
13.77	0.187	14.675	0.348	14.966	0.461
13.715	0.132	14.681	0.354	14.955	0.45
13.722	0.139	14.719	0.392	14.971	0.466
13.784	0.201	14.765	0.438	15.099	0.594
13.772	0.189	14.781	0.454	15.11	0.605

Figura 8.3-2. Lecturas del extensómetro de barra.

8.4. Interpretación.

La ubicación de este extensómetro de barra es en el vertedor (loma oriente), sobre las coordenadas:

$$X= 556\ 783.299$$

$$Y= 2\ 369\ 573.514$$

$$Z= 377.476$$

En estas tablas (figura 8.3-2.), podemos observar las lecturas realizadas del extensómetro de barras, desde la inicial y considerando a cada barra por su longitud, con diferencia acumulada, la cual nos ayudará a conocer con mayor precisión el desplazamiento que sufre la barra, dentro del macizo rocoso y conocer su comportamiento.

Estos datos se capturan en una hoja de cálculo y se grafican. Figura 8.4-1.

Como podemos observar. El comportamiento de las tres barras que conforman el extensómetro, línea azul, corresponde a la barra 3 de 18.54m de longitud, con un desplazamiento de 2.8mm, comparada con la gráfica verde correspondiente a la barra 2 y desplazamiento de 1.959mm, y la gráfica roja de la barra 1 que tiene un desplazamiento de 0.729mm, todas en expansión. Por lo tanto podemos determinar que el macizo rocoso se está expandiendo en la

profundidad de 18.54mm de la barra 3, con 2.8mm, lo que no representa un peligro para esta zona y se encuentra dentro de los parámetros esperados.

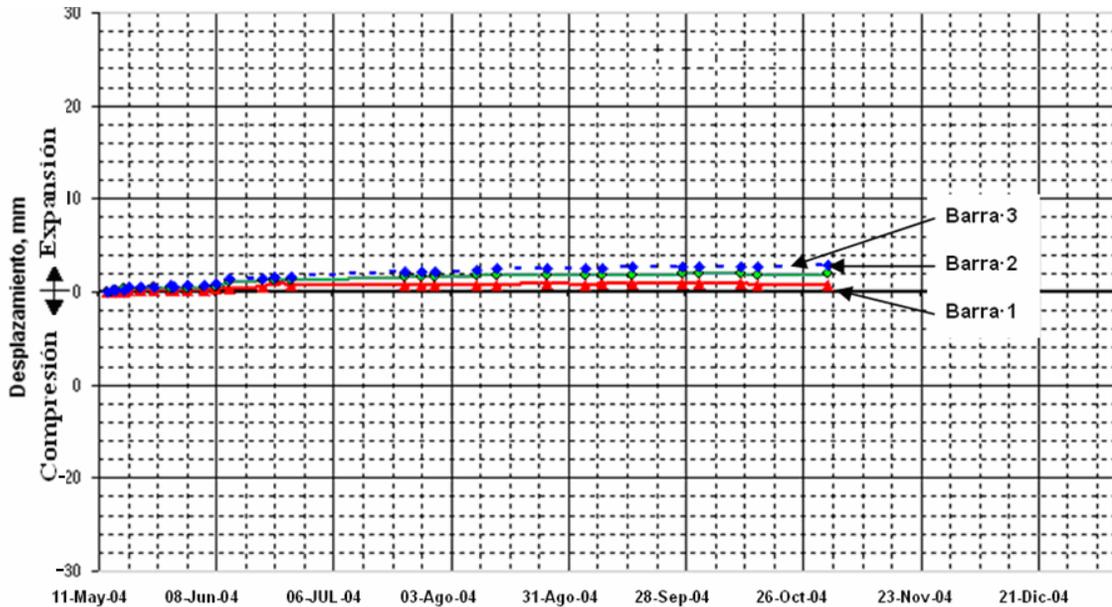


Figura 8.4-1. Gráfica de desplazamientos de extensómetros de barra.

La temperatura es importante considerarla al realizar las mediciones por que afecta de manera directa en la dilatación de las barras, las cuales son de acero inoxidable y en las condiciones del macizo rocoso, cabe señalar que la hora influye de manera directa en esta variable, pero es necesario realizar la toma de lecturas en horas diferentes para conocer el comportamiento de la roca. Figura 8.4-2.

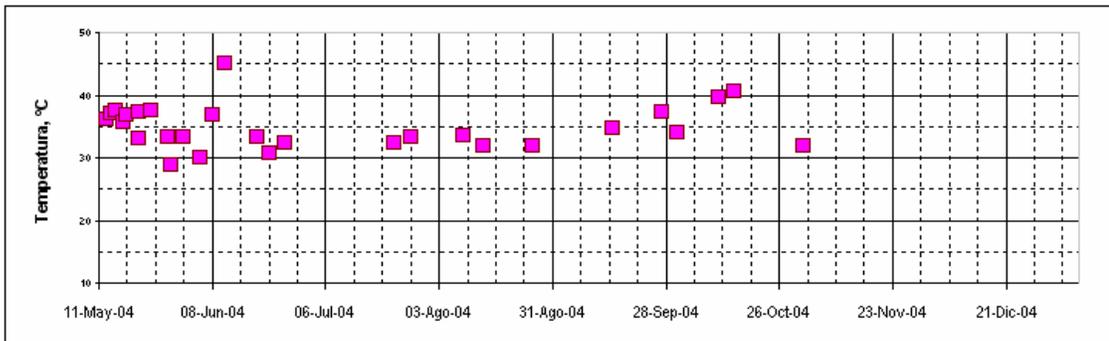


Figura 8.4-2. Gráfica de temperatura en el momento de la toma de lecturas.

CAPÍTULO IX

LÍNEAS DE CONVERGENCIA

9.1. Principio de funcionamiento.

Las líneas de convergencia son un sistema de medición empleado para registrar magnitud y dirección de movimientos en excavaciones subterráneas, mediante la instalación de puntos de referencia fijos. (Figura 9.1-1.). Estos puntos de referencia fijos consisten en una armella cerrada, galvanizada, de 0.64mm (1/4") de calibre.

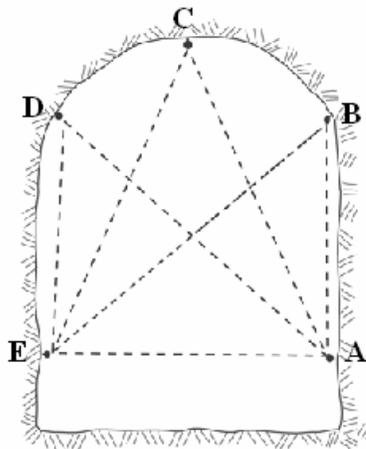


Figura 9.1-1. Líneas de convergencia con puntos de referencia fijos.

Este tipo de instrumentación se instaló en los portales de entrada y salida, a cada 100m de túnel excavado inmediato a la excavación, en los túneles de casa de máquinas y en zonas de anomalías geológicas.

9.2. Instalación.

Para la instalación de las referencias fijas marcamos 3 puntos, en un mismo plano transversal al eje del túnel, el departamento de instrumentación en

geotecnia de la empresa contratista determinará si las condiciones superficiales de la roca, de la excavación, permiten instalar las referencias directamente en la roca, o bien, ubicarlas sobre los marcos de acero. Cuando se fijen en roca, se realiza un barreno corto de 0.5m de longitud aproximadamente, para instalar una varilla corrugada que servirá como ancla, con una armella soldada en su extremo. Se introduce la varilla en el barreno y se calafatea, se inyecta con mortero de arena-cemento, o bien, se puede emplear resina epóxica y finalmente se protege la armella con un tramo de tubería galvanizada, de 5cm de diámetro, se identifica cada punto de referencia instalado (armella) con una letra, iniciando del lado derecho con la letra "A" y siguiendo el sentido contrario de las manecillas del reloj como se observó en la (figura 9.1-1).

Terminada la instalación y una vez que haya fraguado la inyección o la resina, se toma la primera lectura empleando el extensómetro de cinta. Figura 9.2-1.

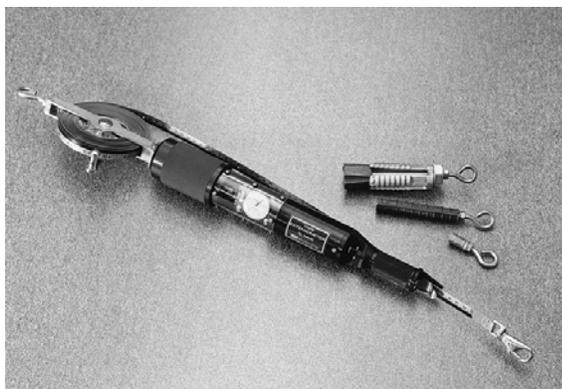


Figura 9.2-1. Extensómetro de cinta.

9.3. Resultados.

Sabemos que las líneas de convergencia son un sistema de medición empleado para registrar magnitud y dirección de movimientos en excavaciones subterráneas, mediante la instalación de puntos de referencia fijos y también

sabemos que estos puntos de referencia fijos consisten en una armella cerrada, galvanizada, de 6.35mm = 1/4" de calibre.

Para medir esta variable se utiliza un equipo que tendrá las siguientes características. La unidad de lectura será el extensómetro de cinta, con un alcance de medición de 20m y una resolución de 0.5mm. La frecuencia de medición durante la etapa de construcción será semanal y los datos de las mediciones se anotarán en las libretas de campo con la siguiente información, código del instrumento, ubicación, fecha de instalación, temperatura, hora y la lectura en (m), (cm) y (mm). Figura 9.3-1.

REGISTRO DE CAMPO DE LECTURAS DE LINEAS DE CONVERGENCIA			
Fecha de instalación:		03/10/2004	
Código del instrumento:		P/N 51811510, S/N 13152	
Ubicación:		Túnel de acceso a casa de máquinas	
Cadenamiento:		0+008.44	
No.	Fecha	Hora	Temperatura (°C)
1	07/10/2004	11:50	31.9
2	14/10/2004	08:50	29.3
3	26/10/2004	12:25	31.7
4	02/10/2004	10:35	27.3
A-C			
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	
9.650	1.000	8.300	
9.650	1.000	8.600	
9.650	1.000	8.100	
9.650	1.000	8.350	
B-D			
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	
10.550	3.000	5.250	
10.550	3.000	6.050	
10.550	3.000	6.000	
10.550	3.000	6.350	
A-D			
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	
9.050	1.000	8.100	
9.050	1.000	8.200	
9.050	1.000	7.700	
9.050	1.000	7.700	

Figura 9.3-1. Registro de campo de lecturas de líneas de convergencia.

El procedimiento para medir las deformaciones consiste en asegurar el extremo de la cinta en el punto de referencia superior y se toman las lecturas en los puntos de referencia laterales de la siguiente forma; Se engancha el

extensómetro en el punto de referencia lateral y se inserta la cinta por la ranura que se ubica en el extremo opuesto a la armella.

Se extiende la cinta y se inserta el seguro en la perforación más cercana, se gira el collar de tensión, el cual tensa la cinta, hasta que llegue al tope y se unen los dos indicadores de medidas, ubicadas en la punta, lo cual indica que se tiene la tensión estándar de medición (figura 9.3-2.) y se registran 3 lecturas, la de la cinta (en metros), la de la escala móvil (en cm) y la del disco de medida (en mm), como se mostró en la tabla de la figura 9.3-1.

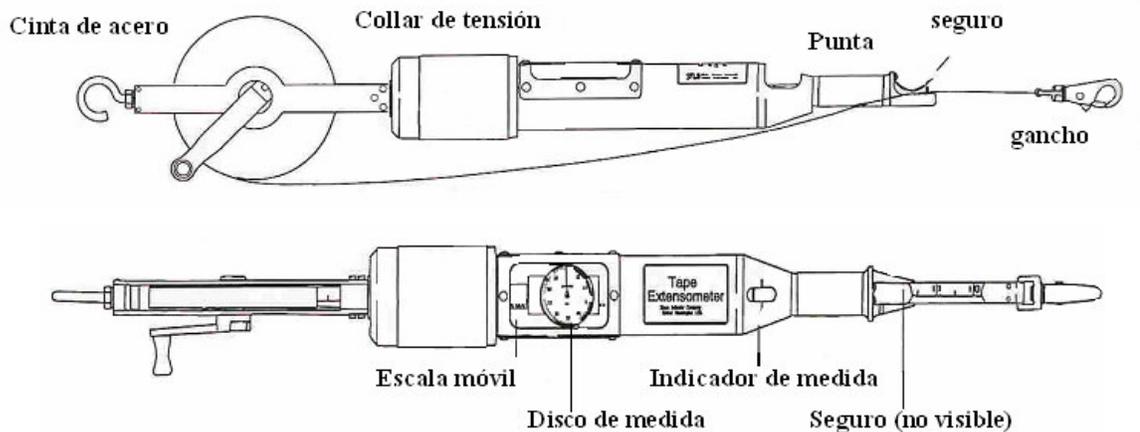


Figura 9.3-2. Divisiones del extensómetro de cinta para la medición de líneas de convergencia.

Para retirar el equipo de medición, se destensa la cinta girando el collar de tensión en sentido contrario, posteriormente se retira la cinta del seguro y se enrolla evitando que se ensucie o moje y finalmente se miden las siguientes líneas, entre dos puntos de referencia fijos, repitiendo estos pasos.

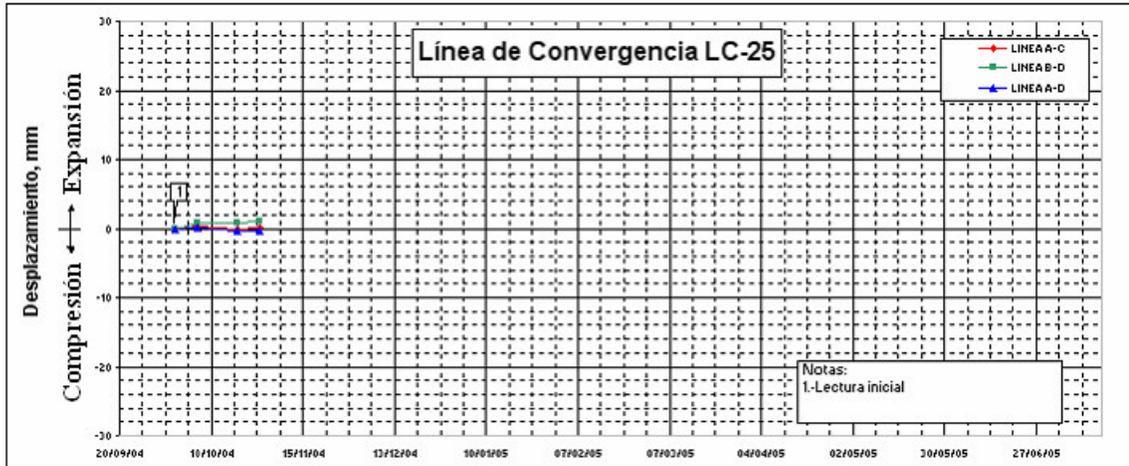
9.4. Interpretación.

Los datos registrados en la libreta de campo se capturan en una hoja de cálculo, en la cual se suman las 3 lecturas de las divisiones del extensómetro y calculamos la diferencia que determina el desplazamiento ocurrido en un periodo

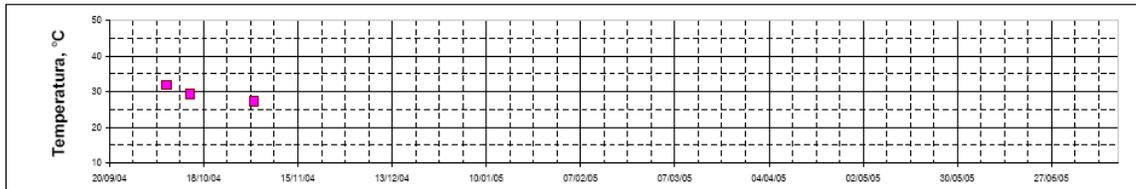
de tiempo (figura 9.4-1), enseguida graficamos para analizar el comportamiento del talud. Figura 9.4-2.

A-C				
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	Suma (m)	Diferencia (mm)
9.650	1.000	8.300	9.668	(inicial)
9.650	1.000	8.600	9.669	0.300
9.650	1.000	8.100	9.668	-0.500
9.650	1.000	8.350	9.668	0.250
B-D				
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	Suma (m)	Diferencia (mm)
10.550	3.000	5.250	10.58525	(inicial)
10.550	3.000	6.050	10.58605	0.800
10.550	3.000	6.000	10.58600	-0.050
10.550	3.000	6.350	10.58635	0.350
A-D				
Cinta (m)	Escala (cm)	Lectura (mm)	Suma (m)	Diferencia (mm)
9.050	1.000	8.100	9.06810	(inicial)
9.050	1.000	8.200	9.06820	0.100
9.050	1.000	7.700	9.06770	-0.500
9.050	1.000	7.700	9.06770	0.000

Figura 9.4-1. Cálculos de las lecturas de líneas de convergencia.



(a)



(b)

Figura 9.4-2. a) Gráfica de desplazamientos de líneas de convergencia y b) gráfica de temperatura en el túnel de acceso a casa de máquinas.

CAPÍTULO X

ACCIONES CORRECTIVAS Y PREVENTIVAS, APLICADAS

10.1. Excavación del talud izquierdo, en la zona de compuertas del vertedor de excedencias, desde la elevación 396msnm.

Con el objetivo de investigar la razón de las deformaciones registradas en la masa rocosa a partir de la instrumentación instalada en la zona del muro alabeado y talud izquierdo del vertedor de excedencias (plataforma a la elevación 396msnm) (figura 10.1-1.), la subgerencia de geotecnia y materiales de la CFE, recomendó realizar la excavación de zanjas a la elevación 396msnm, para la exploración geológica respectiva.



Figura 10.1-1. Muro alabeado y talud izquierdo del vertedor de excedencias.

Conviene mencionar, que en la parte superior de la plataforma 396msnm, siguiendo la traza de la falla geológica "arroyo" (detectada por el grupo de geología presente en el proyecto), desde el límite de excavación de retiro de material del muro alabeado y hasta aproximadamente el cadenamiento 0+026 de la zona de estructuras, se observaron fisuras en el terreno de un espesor del orden de 1cm, lo cual indicaba deformaciones en la masa rocosa con tendencia

de desplazamiento del talud izquierdo hacia la excavación de la zona de estructuras del vertedor de excedencias. Figura 10.1-2.

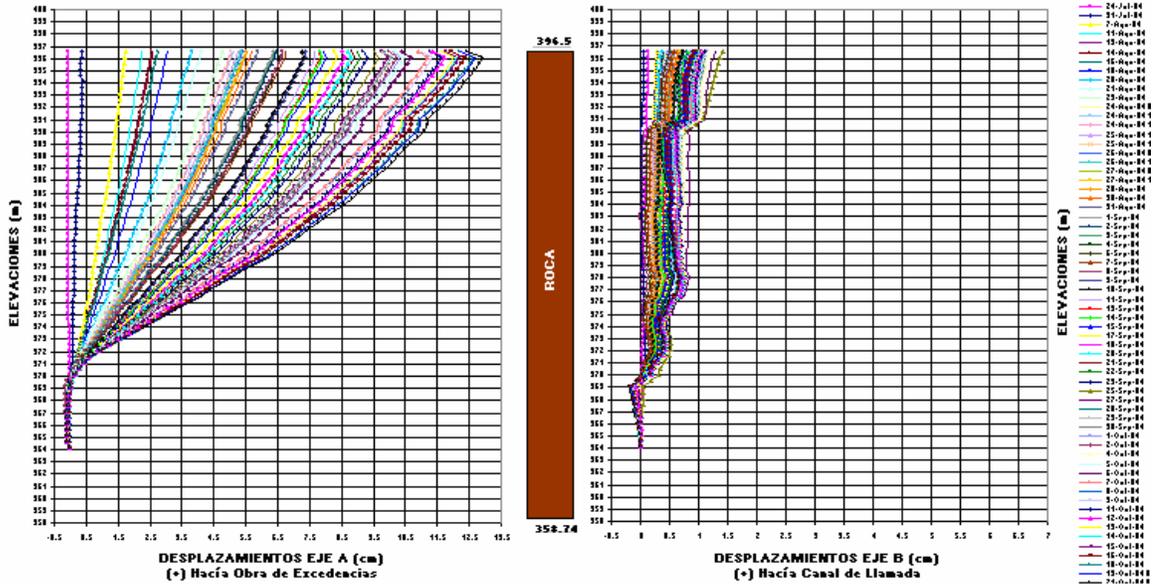


Figura 10.1-2. Gráfica donde se observa la fisura del terreno con un espesor de 1cm aproximadamente y tendencia de desplazamiento.

Las figuras nos muestran a partir de la instrumentación instalada de inclinómetros con tubería ABS, la fisura en el eje A y B del talud izquierdo con un espesor de 1cm aproximadamente y tendencia de desplazamiento hacia la excavación del vertedor de excedencias.

Posteriormente se realizó la excavación de dichas zanjas y después de haberse concluido éstas, fue posible observar con detalle la estructura geológica de la masa rocosa, comprobando que las fisuras en el terreno siguen la traza de la falla geológica "arroyo", la cual tiene un espesor variable del orden de 3 a 8m, desde el límite de excavación de retiro de material del muro alabeado y hasta aproximadamente el cadenamiento 0+026 del talud izquierdo de la zona de estructuras, de material triturado de falla y roca sumamente alterada y fracturada.

Con base en lo anterior y con el objeto de ayudar a la estabilidad de este talud izquierdo, se definió directamente en campo, retirar todo el material de mala calidad correspondiente a la falla arroyo y el espesor de masa rocosa comprendido entre ésta y dicho talud izquierdo, llegando en la parte inferior hasta la elevación 388msnm. Figura 10.1-3.



Figura 10.1-3. Retiro de material de mala calidad correspondiente a la falla arroyo en el muro alabeado y talud izquierdo del vertedor de excedencias.

10.2. Instalación de extensómetros de barra en la bóveda de los túneles de aspiración.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la masa rocosa de la bóveda de los túneles de aspiración, se realizaron dos barrenos de 15m de longitud para la colocación de dos extensómetros de barra de 15, 9 y 6m de longitud respectivamente (uno por cada túnel).

Debido a la geometría desfavorable y para lograr la estabilidad de los taludes, se diseñó este sistema de instrumentación que nos permite conocer la magnitud de las deformaciones que se presentan, ayudándonos a tomar las medidas correctivas necesarias en caso de que se requiera.

10.3. Instalación de extensómetros de barra en el talud existente entre la subestación y el camino de construcción 7MD.

Derivado de una falla de talud, que se presentó en el talud comprendido entre la subestación a la elevación 340msnm y el camino de construcción 7MD (7 margen derecha) (figura 10.3-1.), la compañía constructora CIISA ejecutó un sistema de soporte a la masa rocosa constituido por, anclaje de concreto lanzado y drenaje, para asegurar la estabilidad de dicho talud.



Figura 10.3-1. Talud sobre la subestación y el camino de construcción 7MD.

Posteriormente CFE, solicitó a CIISA instrumentara dicho talud, con el objetivo de vigilar su comportamiento con el tiempo. En respuesta a lo anterior CIISA, propuso la instalación de dos extensómetros de barra de 18, 12 y 6m de longitud a la elevación 320msnm y en los cadenamientos 0+360 y 0+400 del camino 7MD (7 margen derecha).

Tomando en cuenta lo anterior y como resultado de la revisión de la información geológica levantada en este talud, se considera que para tener un control eficiente del comportamiento de éste talud, se deben instalar un total de cuatro extensómetros de barra, también de 18, 12 y 6m de longitud, a la elevación 330msnm, en posición horizontal. Figura 10.3-2.



Figura 10.3-2. Extensómetro de barra a la elevación 330msnm, en posición horizontal.

CONCLUSIONES

El diseño de las presas de enrocamiento con cara de concreto está calculado y está basado en las experiencias ganadas del análisis y del comportamiento de las predecesoras, sobre todo de la adquirida con Aguamilpa que ha sido aplicada al diseño de "El Cajón" e influyendo de manera directa el sistema de auscultación de CFE, el cual es semiautomatizado y se diseñó basándose en las características específicas del proyecto, como los rasgos geológicos, topográficos y geométricos del lugar, además de que estas presas de enrocamiento con cara de concreto, son seguras y con imperfecciones que se reflejan en pérdida de agua, como las filtraciones, que pueden solucionarse rápida y económicamente. Bajo esta filosofía "El Cajón" es una presa segura y eficiente y lo demuestran las mediciones realizadas a la fecha que indican que el comportamiento de la presa es de acuerdo con lo esperado, destacando la baja deformabilidad de los materiales con que es construida.

La instrumentación geotécnica ha demostrado su gran utilidad al permitir conocer fenómenos como la interacción entre materiales y laderas, la respuesta ante cargas dinámicas, el agrietamiento interno, la evolución del estado de esfuerzos y deformaciones y otros fenómenos que afectan el comportamiento y seguridad de las estructuras. También nos ha permitido verificar hipótesis y criterios de diseño, para mejorar en general el conocimiento del comportamiento de las presas.

Las investigaciones por desarrollar tanto en el campo experimental como teórico son innumerables y el análisis del comportamiento de las presas ya construidas o en proceso de construcción, ha sido y seguirá siendo fuente de inspiración para que surjan nuevos campos de investigación, impulsar diseños más seguros y resolver deficiencias pasadas. Aquí es donde la instrumentación geotécnica continuará siendo una herramienta de gran utilidad.

En particular la experiencia adquirida al implementar la instrumentación demuestra la gran facilidad y eficiencia con que son instalados y operados los instrumentos automatizados dentro de las estructuras de la presa hidroeléctrica "El Cajón". Esto lo demuestran las calibraciones que realicé de los extensómetros eléctricos antes de ser instalados en el plinto para ajustar y verificar su funcionamiento. Las mediciones antes, durante y después de su instalación, demuestran la versatilidad del instrumento y la rapidez con que son obtenidos los datos de las variables físicas que queremos conocer. Cabe señalar que durante la instalación de los instrumentos, pueden presentarse accidentes sobre estos, debido a las máquinas de construcción, por alguna falla humana o por improvisación en la instalación de algún aparato. Por ejemplo, se reubicó un piezómetro en el dique y era insuficiente el cable para prolongar dicho aparato, en este caso lo que hice fue soldar un tramo de cable mayor para lograr la reubicación y conocer así la variable física que deseamos del lugar.

A menudo es necesario instalar rápidamente los instrumentos, por lo que es necesario en ocasiones improvisar y salirse un poco de los parámetros de tiempo y diseño, esto me ocurrió en la obra de toma donde se iba a realizar otra operación de construcción, sin embargo era necesario y urgente, antes instalar un extensómetro de barra. Por lo tanto, tomé la decisión de ejecutar la instalación del instrumento en el sitio correspondiente.

Estas acciones y otras, como la adquisición de las mediciones de manera continua de los instrumentos mostrados en esta tesis, la captura y el procesado de datos que como ya vimos era para obtener gráficas con base en las lecturas arrojadas por los instrumentos, del comportamiento de los fenómenos físicos para su posterior análisis y en consecuencia tomar alguna decisión y ejecutarla, en ocasiones provoca también un efecto físico sobre la operación del sistema en su conjunto de la presa hidroeléctrica, como fué el caso del muro alabeado donde se tomó la decisión de retirar el material de mala calidad para su posterior

relleno de concreto. Conjuntamente a estos hechos, también realicé el desarrollo de esta tesis.

Quiero mencionar que para lograrlo, debo agradecer de manera particular a todas mis compañeras y compañeros que contribuyeron para facilitarme sus conocimientos, experiencias y consejos, además de sus aportaciones para realizar este trabajo y llevarlo a buen término. Pero sobre todo quiero agradecer de manera especial, a mi familia, por su apoyo incondicional ya que sin él, sería imposible mi desarrollo profesional.

APÉNDICE

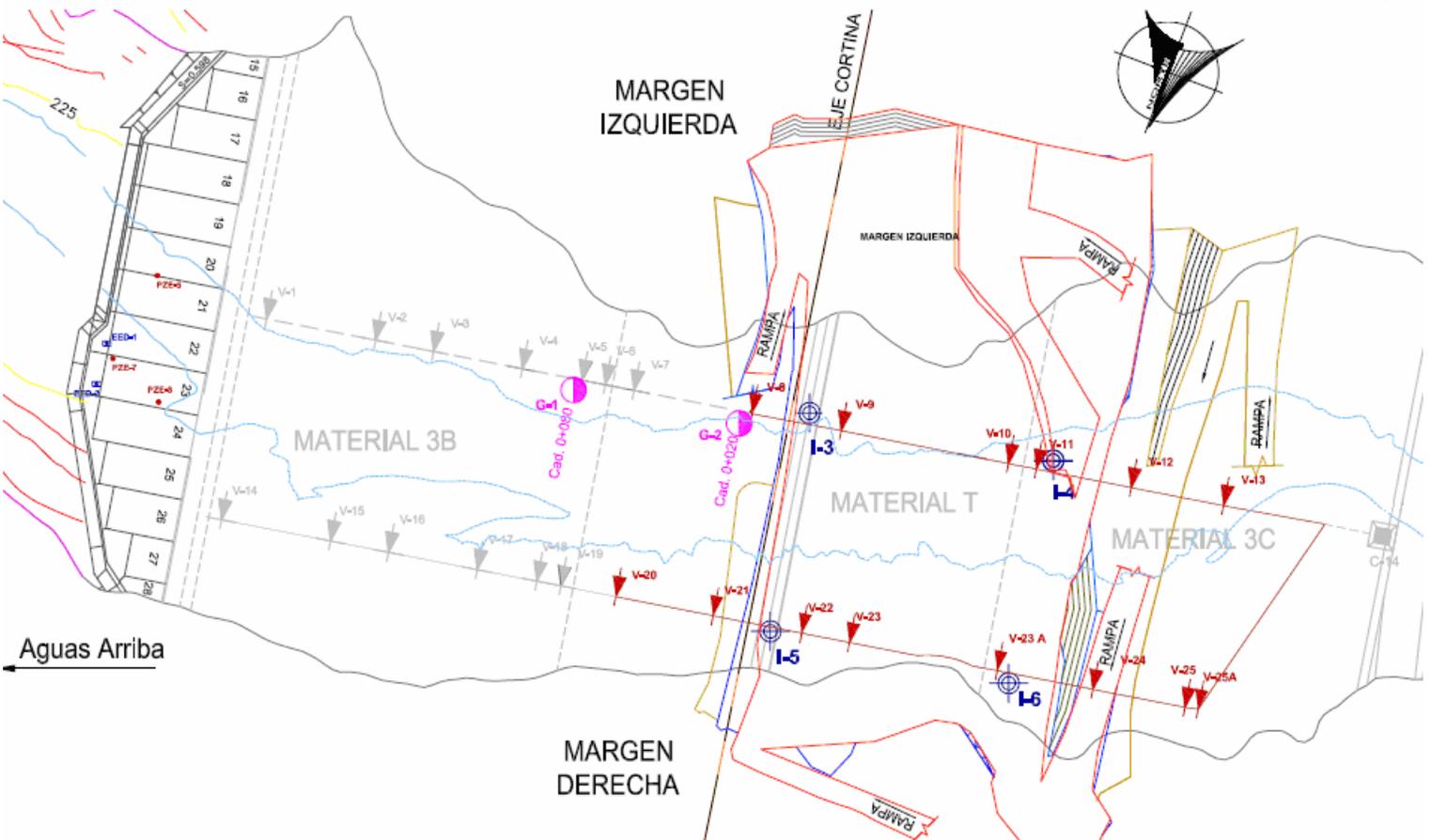


Figura A. 1. Ubicación en el terraplén del G1 y G2 de los extensómetros eléctricos. Y celdas de presión total, sobre el eje de la losa L-21 a la elevación 245msnm.

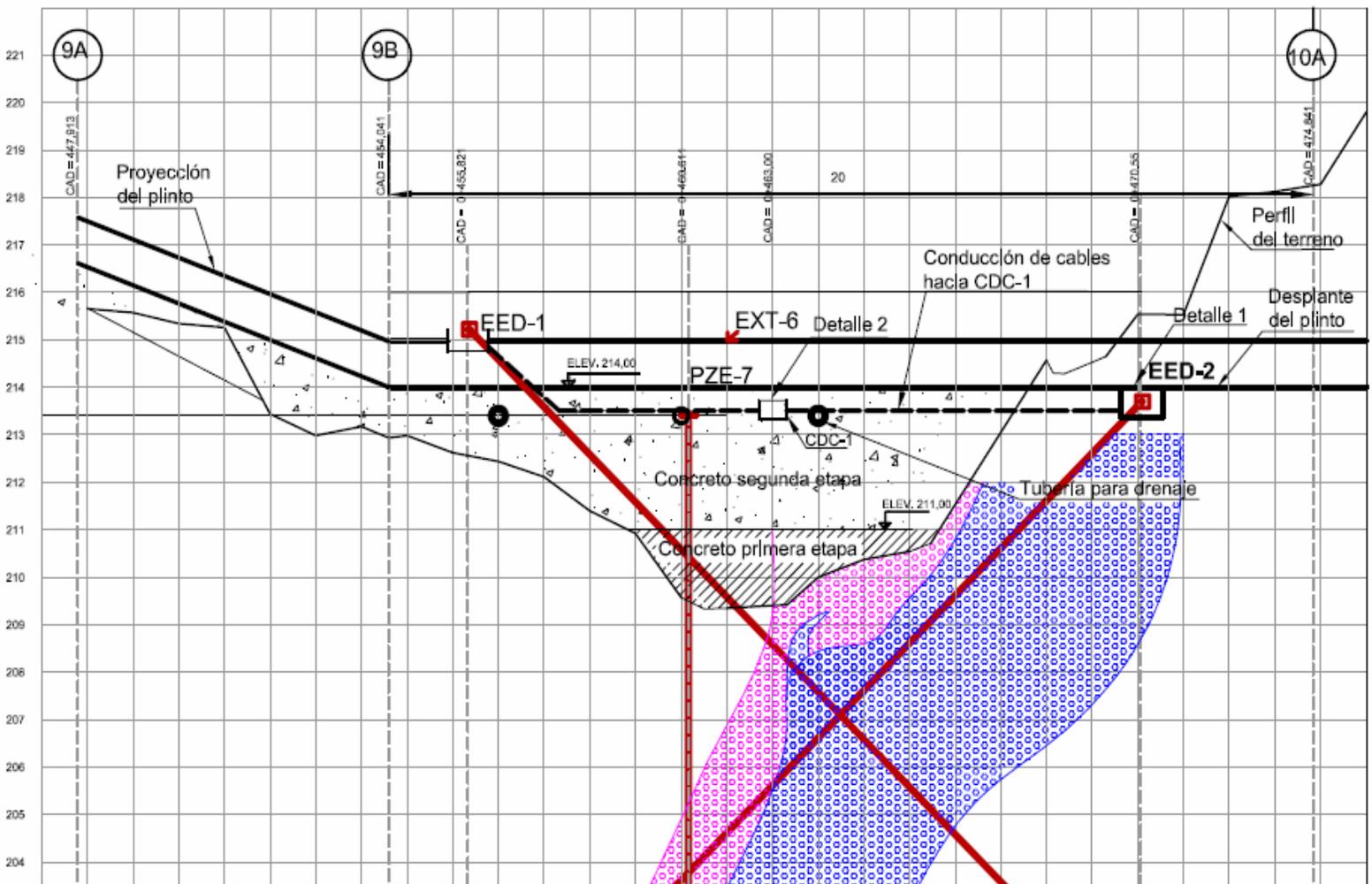


Figura A.2. Instalación de los extensómetros eléctricos en el dique o plinto. (EED-1 y EED-2).

EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS DETALLE 1

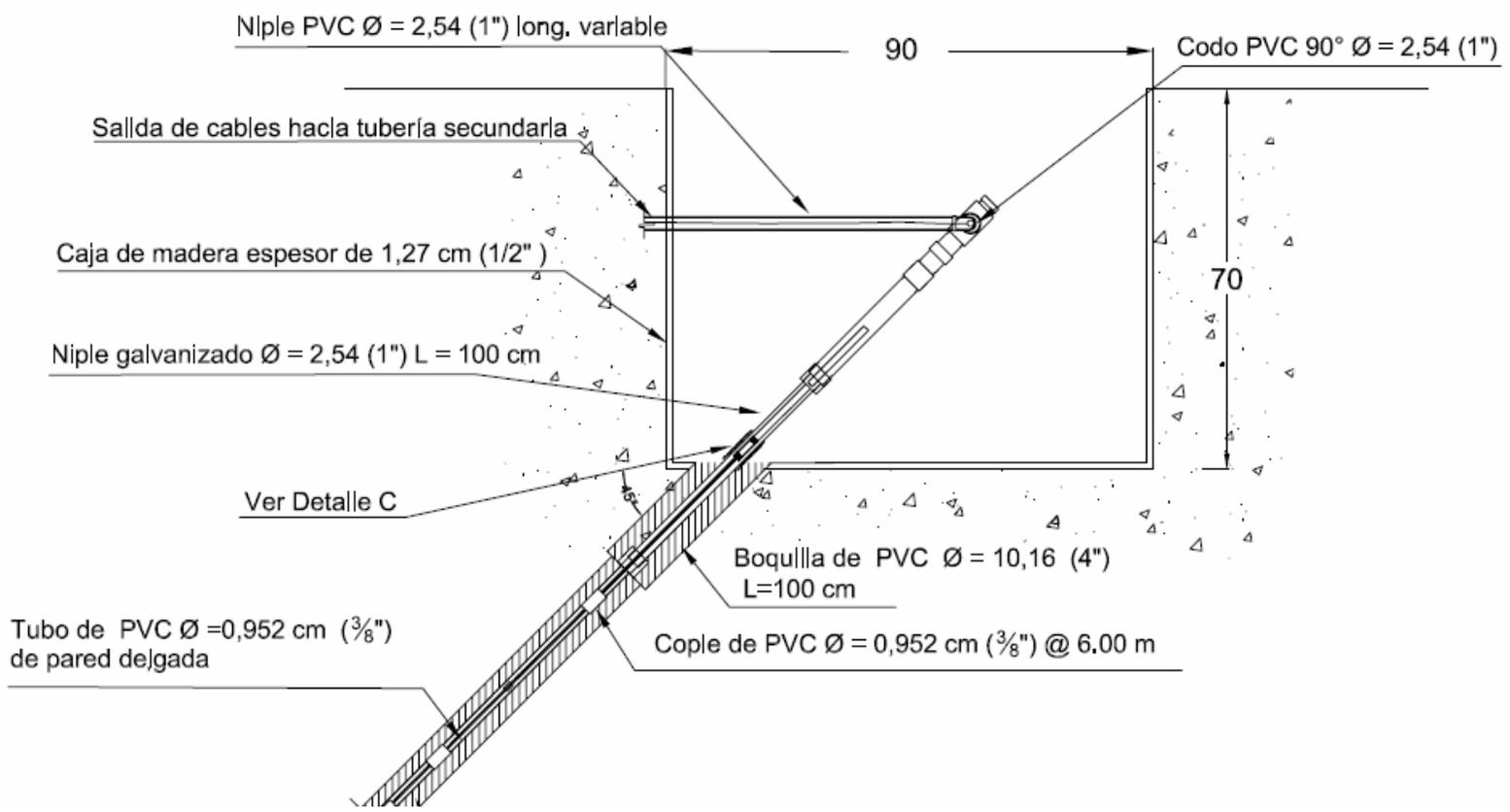


Figura A.3: Detalle de instalación del extensómetro eléctrico (EED-1) en el dique o plinto.

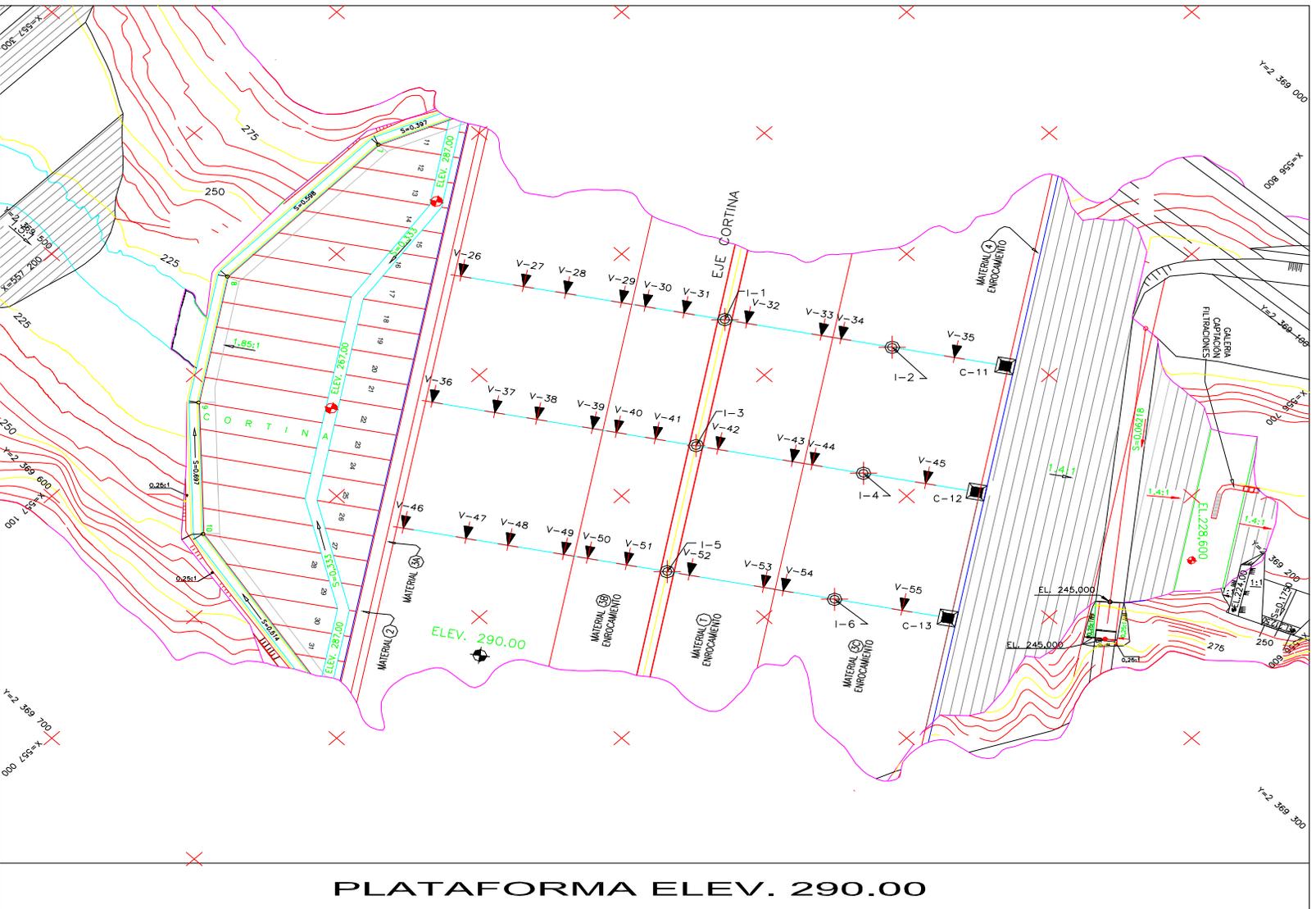


Figura A.5. Ubicación de los inclinómetros I-1, I-2, I-3 e I-2, I-4 e I-6.

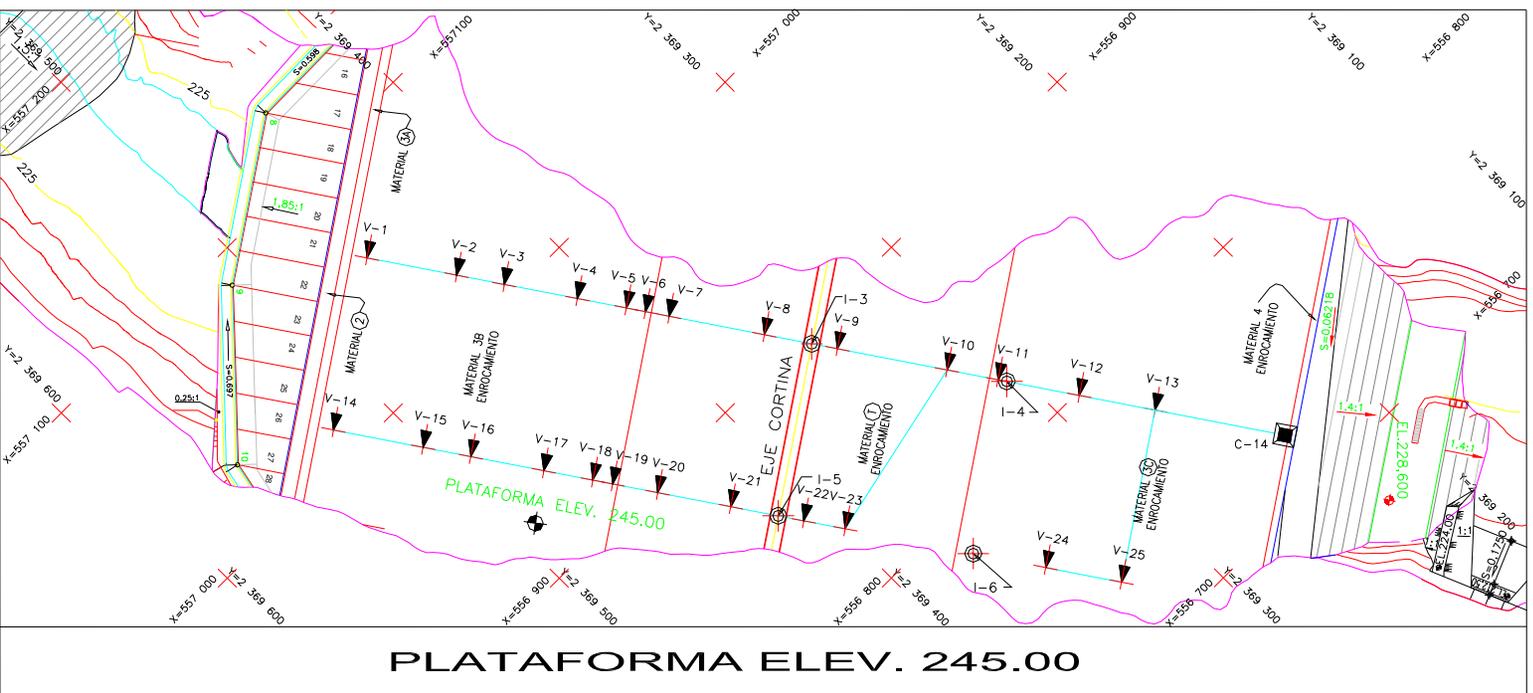


Figura A.6. Instalación de niveles hidráulicos en el interior del terraplén, sobre el eje de la losa 21 y 26.

BIBLIOGRAFÍA

- Enrique Mena Sandoval. **“Proyecto de instrumentación”**. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Comportamiento de Estructuras, C.F.E. México, 2003.

- Gustavo García Ruíz. **“Procedimientos de instalación, medición y proceso de datos de los instrumentos”**. Constructora Internacional de Infraestructura, S.A. de C.V., Proyecto Hidroeléctrico “El Cajón”, Sistema de Gestión, México, 2004.

- José Francisco González Valencia. **“Instrumentación geotécnica para presas de materiales térreos”**. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, 2004.

- Gloria Mata Hernandez. **“Prácticas de laboratorio de medición e instrumentación”**. División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Departamento de Ingeniería de Control, U.N.A.M.

- Eduardo Badillo Ceh, Miguel Angel Mendoza García. **“Instrumento virtual para la medición de vibración ambiental”**. Tesis, Facultad de Ingeniería, 1997.

- James W. Nilsson, Susan A. Riedel. **“Circuitos eléctricos”**. 6a. ed., Pearson Educación, México, 2001.

- Paul E. Tippens. **“Física conceptos y aplicaciones”**. 3a. ed., McGraw-Hill, México, 1989.