



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“PROCESO DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA
PARA TÚNELES CONSTRUIDOS EN SUELOS
BLANDOS”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA
JOSÉ DE JESÚS GONZÁLEZ SANTIAGO

DIRECTOR DE TESIS
M.I. CARMELINO ZEA CONSTANTINO



MÉXICO. DF

2011



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.

Las ovejas, sin embargo, le habían enseñado una cosa mucho más importante: que había un lenguaje en el mundo que todos entendían, y que el muchacho había usado durante todo aquel tiempo para hacer progresar la tienda. Era el lenguaje del entusiasmo, de las cosas hechas con amor y con voluntad, en busca de algo que se deseaba o en lo que se creía. Tánger ya había dejado de ser una ciudad extraña, y él sentía que de la misma manera que había conquistado aquel lugar, podría conquistar el mundo. «Cuando deseas alguna cosa, todo el Universo conspira para que puedas realizarla», había dicho el viejo rey.

(El alquimista. Paulo coelho)

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de Figuras.....	06
Índice de Tablas.....	10
Agradecimientos	11
Introducción.....	13
Capítulo 1.-Tuneles construidos en suelos blandos. Panorama general	17
1.1.- Desarrollo histórico de los túneles y necesidad de construcción	17
1.2.- Proceso constructivo	20
1.2.1.-Exploración Geotécnica	20
1.2.2.- Trazo y ubicación topográfica	24
1.2.3.- Diseño y construcción de Dovelas	28
1.2.4.- Construcción de Lumbreras	33
1.2.5.- Tipo de tuneladoras	39
1.2.6.- Excavación	41
1.2.7.- Revestimiento	44
1.3.- Parámetros a medir con la Instrumentación	47
1.4.- Lugares estratégicos a instrumentar	48
Capítulo 2.-Descripcion general de aparatos comúnmente empleados en túneles construidos en suelos blandos con ayuda de Escudo tipo EPB	49
2.1.- Tecnologías empleadas en la instrumentación Geotécnica	49
2.1.1.- Auscultación Geodésica	49
2.1.2.- Cuerda Vibrante	50
2.1.3.- Sistemas Micro electromecánicos.....	53
2.1.4.- Fibra Óptica	58
2.2.- Inclinómetros	59
2.3.- Extensómetros	61
2.3.1.- Extensómetros de barras	61
2.3.2.- Extensómetro con tubería para Inclinómetro	63
2.4.- Piezómetros	64
2.4.1.- Piezómetros Abiertos	64
2.4.2.- Piezómetros de cuerda vibrante	65

2.5.- Celdas de presión	66
2.6.- Deformímetros	68
2.7.- Sistema de convergencias y divergencias	69
2.8.- Multiplexores y datalogger.....	70

Capítulo 3.-Procedimiento de instalación de los diversos instrumentos utilizados en túneles construidos en suelos blandos con ayuda de escudo tipo EPB y los parámetros a obtener durante la etapa constructiva y operativa 73

3.1.- Interior del túnel.....	73
3.1.1.- Celdas de Presión en anillo de dovelas	73
3.1.2.- Deformímetros de acero	76
3.1.3.- Deformímetros de concreto	78
3.1.4.- Multiplexores y Datalogger	80
3.1.5.- Auscultación Topográfica	84
3.1.5.1- Deformaciones horizontales en excavación y revestimiento	84
3.1.5.2- Convergencias y Divergencias	85
3.2.- Exterior del túnel	91
3.2.1.- Inclínómetros	92
3.2.2.- Extensómetros	93
3.2.2.1- Extensómetros de barras.....	93
3.2.2.2- Extensómetros Magnético con tubería para Inclínómetros	97
3.2.3.- Piezómetros	100
3.2.3.1- Piezómetros abiertos.....	100
3.2.3.2- Piezómetros de cuerda vibrante.....	102
3.2.4.- Piezo-celdas	106
3.3.- Comunicación	107
3.3.1.- Programación y Automatización	107
3.4.- Instalaciones especiales	109
3.4.1.- Recintos de alojamientos (Casetas y registros)	110

Capítulo 4.-Interpretacion de la información generada por la instrumentación 113

4.1.- Almacenaje y procesamiento de los datos	113
4.2.- Graficas de comportamiento	123

4.3.- Interpretación de resultados	138
4.4.- Comparación de resultados experimentales contra análisis geotécnico	143
4.4.1.- Medidas preventivas	153
4.4.2.- Medidas correctivas	153
Capítulo 5.-Conclusiones.....	155
Bibliografía.....	157
Bibliografía.....	159

Índice de Figuras

Figura 1. Estudio y monitoreo de deslizamientos. FUENTE: Jaime Suarez. 2004	14
Figura 2. Instrumentación típica en un túnel. FUENTE: Geokon, Incorporated. 2010	15
Figura 3. Primer escudo, inventado por M. I. Brunel en el siglo XIX.....	19
Figura 4. Curva vertical Parabólica del perfil	25
Figura 5. Armado de Dovelas. Izquierda, derecha	28
Figura 6. Nomenclatura de un anillo	29
Figura 7. Colocación de sellos en dovelas	30
Figura 8. Componentes de una dovela	31
Figura 9. Proceso de montaje (Los números indican el orden de montaje de los segmentos ..	32
Figura 10. Movimiento radial del segmento K en la inserción	32
Figura 11 Análisis de supresión por falla de fondo	35
Figura 12. Proceso de Excavación, Técnica Solum	37
Figura 13. Tuneladora tipo TBM. FUENTE: Robbins. 2010.....	39
Figura 14. Esquema de Escudo de Presión de Tierra Balanceada (EPB)	40
Figura 15. Principales componentes de un Escudo de Presión de Tierra Balanceada (EPB)	40
Figura 16. Vista de un Hidroescudo	41
Figura 17. Inyección de mortero	42
Figura 18. Estación total típica	50
Figura 19. Esquema de un Piezómetro de cuerda vibrante	51
Figura 20. Diagrama de bloques simplificado de la arquitectura de un transmisor de cuerda vibrante	52
Figura 21. Componentes de los microsistemas (MEMS). FUENTE: Fujita. 1998.....	55
Figura 22. Esquema de sensor y unidad de lectura que utiliza tecnología de fibra óptica. FUENTE: IGME. 2003	58
Figura 23. Esquema típico de un sistema de Inclínómetro	60
Figura 24. Vista de un equipo para medir Inclínómetros	61
Figura 25. Ancla atornillada a la barra de acero, de un sistema de extensómetro	62
Figura 26. Ensamble de una cabeza de extensómetro de barras	63
Figura 27. Esquema de araña magnética	64
Figura 28. Bulbo poroso de Piezómetro abierto	64
Figura 29. Esquema de piezómetro de cuerda vibrante	65
Figura 30. Esquema de presión de tierra, colocada en un anillo de dovelas	67

Figura 31. Piezo-celda de cuerda vibrante	67
Figura 32. Componentes de deformímetro de cuerda vibrante para concreto	68
Figura 33. Componentes de deformímetro de cuerda vibrante para acero	68
Figura 34. Distribucion del cable de conexión de la bobina y el termistor	69
Figura 35. Esquema de los Tiltmeters	69
Figura 36. Diagrama de funcionamiento del Multiplexor	70
Figura 37. Parte interna del Multiplexor	70
Figura 38. Diagrama de tiempos de la señal de reset y reloj para el multiplexor	71
Figura 39 . Habilitado de insertos en dovela	72
Figura 40. Colocación y fijación de celdas en dovela	73
Figura 41. Maniobra de transportación de dovela instrumentada	74
Figura 42. Toma de lecturas de celda de presión de tierra	75
Figura 43. Empates del deformímetro de acero con la barra	76
Figura 44. Instalación en el acero de refuerzo de un deformímetro de acero	76
Figura 45. Convención de signos deformímetro de acero	77
Figura 46. Deformímetros de concreto	78
Figura 47. Instalación de deformímetros de concreto	78
Figura 48. Convención de signos deformímetro de concreto	79
Figura 49. Empalme de los cables de cuatro hilos con el cable 8023-5 de 10 hilos	80
Figura 50. Conexiones de sensores al multiplexor	81
Figura 51. Distribución de las terminales en el multiplexor	82
Figura 52. Recinto de Multiplexor	83
Figura 53. Medición de diámetro horizontal	84
Figura 54. Arreglo general de ubicación de clinómetros	85
Figura 55. Nivelación de clinómetro uniaxial	86
Figura 56. Colocación de cables de comunicación entre clinómetros	86
Figura 57. Vista interior de Datalogger	87
Figura 58. Programación de sistema de convergencia y divergencia	87
Figura 59. Ubicación de reflejantes y mini prismas para el sistema de convergencias y divergencias	88
Figura 60. Ubicación de estación total y referencias	89
Figura 61. Perforación de barreno para instalación de inclinómetro	90
Figura 62. Vista de tubería para inclinómetro	91
Figura 63. Registro de Inclinómetro.....	92

Figura 64. Unión de ancla y barra de acero inoxidable	93
Figura 65. Colocación de recubrimiento en barras de acero inoxidable	93
Figura 66. Barras de acero inoxidable identificadas en el cabezal	94
Figura 67. Tubo de protección unido al cabezal del extensómetro	94
Figura 68. Extensómetro de barras previo a la inyección de lodo fraguante	95
Figura 69. Registro de Extensómetro de barras	95
Figura 70. Elementos que conforman un Extensómetro Magnético	96
Figura 71. Ejemplo de distribución de arañas Magnéticas	97
Figura 72. Colocación de arañas magnéticas	98
Figura 73. Vista de poliducto de inyección y cables de acero adosados en tubería ABS	98
Figura 74. Liberación de arañas magnéticas	99
Figura 75. Preparación de bulbo para piezómetro abierto	100
Figura 76. Acoplamiento de tubería para piezómetro	100
Figura 77. Filtro protector del Piezómetro de cuerda vibrante	101
Figura 78. Toma de lectura cero del piezómetro de cuerda vibrante	102
Figura 79. Piezómetro de cuerda vibrante, antes de ser lastrado	103
Figura 80. Esquema de instalación piezómetro de cuerda vibrante	103
Figura 81. Colocación de materiales en piezómetro de cuerda vibrante	104
Figura 82. Filtro de geomalla en celda porosa	104
Figura 83. Habilitado de la tubería para Piezo-celda	105
Figura 84. Hincado de la Piezo-celda	106
Figura 85. Vista interna de un Datalogger CR-800.....	107
Figura 86. Datalogger de cuatro canales	108
Figura 87. Obra civil de las casetas de instrumentación	110
Figura 88. Esquema de registro de instrumentación	111
Figura 89. Identificación de tapas de registros de instrumentación	111
Figura 90. Unidades de lectura de cuerda vibrante	114
Figura 91. Hoja de calibración de un dispositivo de cuerda vibrante	115
Figura 92. Hoja de cálculo de un dispositivo de cuerda vibrante	116
Figura 93. Hoja de cálculo de un deformímetro de concreto	116
Figura 94. Convención de signos en un inclinómetro	117
Figura 95. Toma de lectura de un inclinómetro	118
Figura 96. Matrices de lecturas descargadas en un ordenador PC.....	118
Figura 97. Hoja de cálculo para procesar matrices de inclinómetro	119

Figura 98. Grafica típica de deformaciones horizontales contra profundidad	120
Figura 99. Procesamiento de datos en un extensómetro de barras.....	121
Figura 100. Gráfica de hundimiento de terreno medido con extensómetro de barras	121
Figura 101. Vista de sonda magnética	122
Figura 102. Ubicación de instrumentos geotécnicos en una estación real	123
Figura 103. Sección transversal de instalación de los piezómetros	124
Figura 104. Gráfica del comportamiento del piezómetro 1	125
Figura 105. Gráfica del comportamiento del piezómetro 2	125
Figura 106. Sección transversal de la instalación de las piezo-celdas	126
Figura 107. Gráfica del comportamiento la celda de presión de la piezo-celda 1.....	127
Figura 108. Gráfica del comportamiento de la presión piezométrica de la piezo-celda 1	127
Figura 109. Gráfica del comportamiento la celda de presión de la piezo-celda 2.....	128
Figura 110. Gráfica del comportamiento de la presión piezométrica de la piezo-celda 2	128
Figura 111. Sección transversal de la instalación del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro	129
Figura 112. Desplazamiento horizontal en el eje A	130
Figura 113. Desplazamiento horizontal en el eje B	131
Figura 114. Asentamiento acumulado por araña	132
Figura 115. Plano General de instalación de celdas de presión	133
Figura 116. Grafica de comportamiento en celda de presión 1 colocada en anillo de dovelas	134
Figura 117. Grafica de comportamiento en celda de presión 2 colocada en anillo de dovelas	134
Figura 118. Grafica de comportamiento en celda de presión 3 colocada en anillo de dovelas	135
Figura 119. Grafica de comportamiento en celda de presión 4 colocada en anillo de dovelas	135
Figura 120. Medición de referencias superficiales en el eje del túnel	136
Figura 121. Deformación del anillo de dovelas	137
Figura 122. Desplazamiento por piedra en el anillo de dovelas	138
Figura 123. Sentido y dirección del desplazamiento horizontal mas critica	141
Figura 124. Modelo Geotécnico de referencia	143
Figura 125. Distribución de la presión vertical sobre el eje vertical de simetría	144
Figura 126. Esquema del teorema de frontera inferior	145
Figura 127. Sensores de presión en la cámara del escudo EPB	147
Figura 128. Presiones frontales en clave de túnel	152
Figura 129. Presiones frontales en eje de túnel	152
Figura 130. Presiones frontales en cubeta de túnel	152

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros utilizados para diseño de Proyecto Geométrico	25
Tabla 2. Condiciones de cálculo Geométrico y alineaciones horizontales	28
Tabla 3. Técnicas de fabricación de MEMS	57
Tabla 4. Especificaciones de celda de presión de tierra, colocada en un anillo de dovelas	66
Tabla 5. Identificación de cables del cable 8032-5	79
Tabla 6. Medición de longitudes entre puntos del sistema de convergencias y divergencias ..	89
Tabla 7. Código de colores	109
Tabla 8. Clasificación de la Instrumentación y toma de lecturas	113
Tabla 9. Profundidad de instalación de arañas magnéticas	132
Tabla10. Asentamientos acumulados de arañas magnéticas.....	141

Agradecimientos.

Este trabajo es sin duda alguna un importante paso en mi vida, sin embargo este no sería posible sin la invaluable ayuda de las personas que han sido parte fundamental en mi desarrollo como profesionista y persona, el siguiente espacio está dedicado con mucho respeto a ellos.

Principalmente y de manera particular quiero agradecer a mi madre, Manuela Santiago Calderón y a su esposo Víctor Alpizar Casas por proporcionar el apoyo para realizar mis estudios y por darme un ejemplo de cómo ser una persona de bien, honesta y responsable. Agradezco el apoyo por parte de mis hermanos Francisco Javier Alpizar Santiago, Yatziri Alpizar Santiago, a mis primos y amigos de toda la vida Eduardo Santiago García, María Teresa Santiago García y Karla Verónica Santiago García por haber crecido conmigo y tener los mejores recuerdos de mi infancia, además de tenerles un gran afecto y profundo respeto.

Por otro lado agradecer a mi Abuela Maria de Jesús Calderón Hernández¹ por ser mi segunda madre, a mis Tíos Alfredo Santiago Calderón y su esposa Magdalena García Osorio, Anselmo Martínez Calderón y su esposa Blanca Gutiérrez, Ezequiel Calderón Hernández y su esposa Olivia Cruz Ruiz, Carlos Calderón Cruz, Ruth calderón Cruz, Eva González y familia; a mis primos Cindi Areli Martínez Gutiérrez, Jonathan Uriel Martínez Gutiérrez, Narey Martínez Gutiérrez, Moisés González Calderón, y Karen Herrera Calderón.

También agradecer a mis amigas Sandra Ramírez Herrera, Dulce Carolina Lovaton a las hermanas Edith, Mónica, Erika y Patricia Lujan González, a las M.I. Yolanda Alberto Hernández y a Lizbeth Mendoza Resendiz por su apoyo incondicional; a mis amigos Sergio Carreón López, Omar Moran Guzmán, José Luis Pérez Hernández, Alberto García Canseco, Emiliano Ramos, Lic. Luis Alberto Saba Miguel, a los ingenieros Jesús Odilón Vega Fernández, Luis Alanís Legaspi, Oscar Francisco Vega Zamorano, Carlos Arano Barrera y Cesar García; al M.I. Raúl Beltrán Martínez, a mis compañeros de equipo en la universidad Ing. Ángel Díaz Flores e Ing. Mario Eduardo González Flores por trabajar hombro con hombro a mi lado; Gracias a todos por sus consejos, por las aventuras vividas, todos son parte importante en mi vida y los llevo conmigo siempre.

Agradecer al M.I. Oscar Sergio Aguilar, M.I. Raúl Beltrán Martínez, M.I. Blanca Meza y Ing. Jesús Morelos Reyes por ser los primeros en brindarme la oportunidad de poder desarrollarme como profesional y además de marcar mis destinos dentro de la ingeniería, parte de este trabajo es consecuencia de su esfuerzo y dedicación, por lo cual les tendré siempre un profundo respeto tanto como profesionales y personas. Son un ejemplo a seguir.

A la UNAM por enseñarme el valor y el amor por las ciencias y las humanidades, además de enseñarme la responsabilidad que tenemos con México y por darme la educación y la formación la cual siempre acompañara mi vida.

A la Facultad de Ingeniería, por sentirme orgulloso de haber pertenecido a su comunidad y por crecer como persona dentro de ella.

A mis sinodales: Ing. Luis Zarate Rocha, Ing. Germán López Rincón, M.I. Sergio Macuil Robles y M.I. Hugo Hazz Mora.

Al M.I. Carmelino Zea Constantino por dirigir de manera desinteresada este trabajo y por sus consejos de la manera en que un ingeniero debe trabajar por México.

Gracias a todos.

Ciudad Universitaria. Enero de 2011.
José de Jesús González Santiago

Introducción

QUE ES LA INSTRUMENTACION.

Los suelos y rocas son materiales complejos, cuyo comportamiento está influenciado por muy diversos y numerosos factores, desde su origen y formación. Para el diseño de una estructura geotécnica usualmente se realizan ensayos de campo y de laboratorio para obtener los valores de las propiedades geotécnicas, pero los ensayos generalmente sólo proporcionan un rango de posibles valores y el ingeniero tiene usualmente que utilizar su criterio para seleccionar los más probables.

Si a esto añadimos las hipótesis, simplificaciones, incertidumbres y errores introducidos en los métodos de análisis y diseño, así como las variaciones en las propiedades de los materiales como resultado del proceso de construcción, tenemos que en todos los trabajos de ingeniería geotécnica existe una discrepancia entre la predicción obtenida del cálculo y el comportamiento real de las estructuras.

La instrumentación es una combinación de filosofía, conocimientos y actividades prácticas que requieren de perspicacia, experiencia, aparatos y técnicas de medición para obtener información cuantitativa y cualitativa necesaria para que el ingeniero pueda y balancear los diseños geotécnicos de manera racional, obteniendo tanto seguridad como eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad.

Tiene como finalidad principal conocer y evaluar 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; y durante la vida útil de la estructura, para detectar oportunamente cualquier anomalía que se presente.

Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el simple hecho de instrumentar no garantiza que los diseños sean buenos o las obras seguras, incluso puede darse el caso de que instrumentos inadecuados o instalados en sitios equivocados proporcionen información no útil, confusa o que distraigan la atención de los ingenieros impidiendo detectar anomalías que existan o se desarrollen en otras partes de la obra, por lo que se requiere determinar con claridad y visión los objetivos de todo proyecto de instrumentación, por simple que parece.

En general los principales objetivos de la instrumentación son los siguientes:

1. La validación o la adecuación del método de diseño, dependiendo de que se compruebe o no su aplicación en la práctica, contribuyendo en cualquier caso al avance del conocimiento.
2. La evaluación de las técnicas de construcción utilizadas, en cuanto a efectividad, seguridad, tiempo de ejecución y costo.
3. La protección del medio vecino, para tranquilidad tanto de la población como del dueño de la obra y, además, lograr la aceptación ciudadana.

PLANEACION DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACION.

Para llevarla a cabo es necesario tener un conocimiento aproximado de la estratigrafía y las propiedades del subsuelo del sitio, que permitan predecir el comportamiento de la estructura y a la vez definir los aspectos más importantes hacia los cuales deberá dirigirse el monitoreo.

En una falla por deslizamiento las situaciones típicas son la determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla, la determinación de los movimientos laterales, la velocidad del deslizamiento y los niveles de agua subterránea.

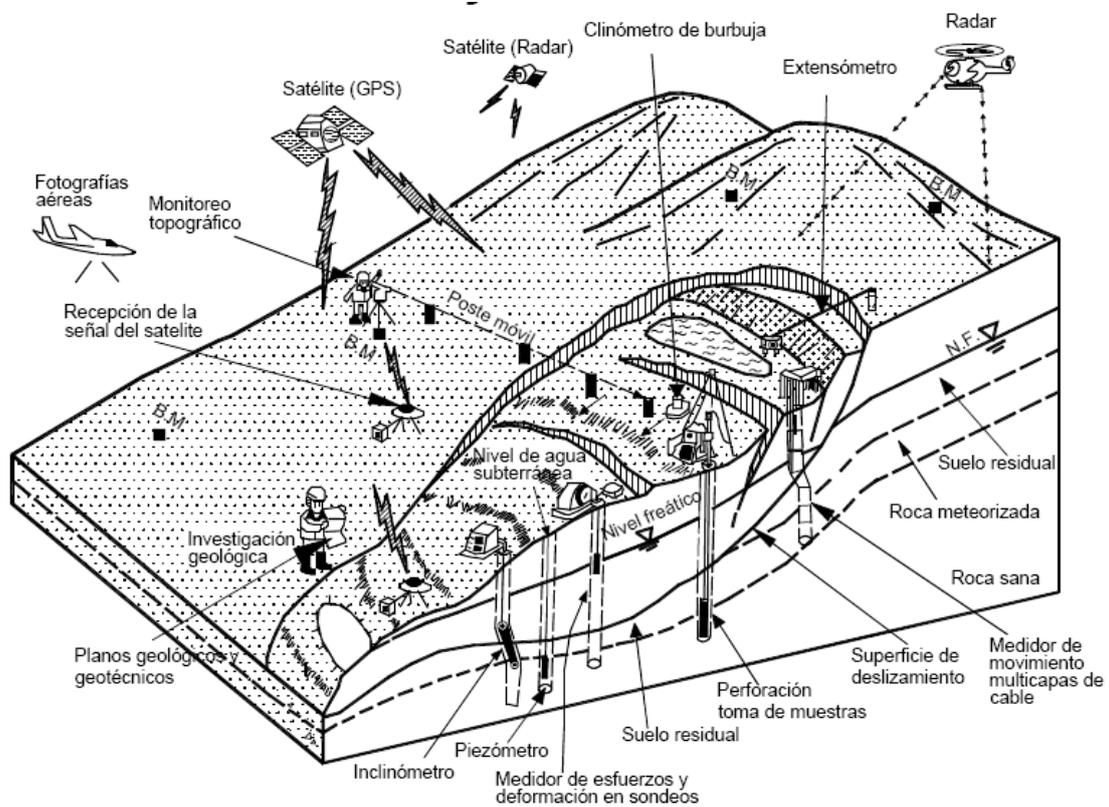


Figura 1. Estudio y monitoreo de deslizamientos. FUENTE: Jaime Suarez. 2004

Entre las variables que comúnmente interesan para un túnel son conocer la medición de deformaciones verticales y horizontales tanto en superficie como en el interior de un túnel o bien dentro de la propia masa del suelo, el cambio en el estado de esfuerzos y/o en la presión de agua del subsuelo y la eventual filtración de agua hacia el túnel.

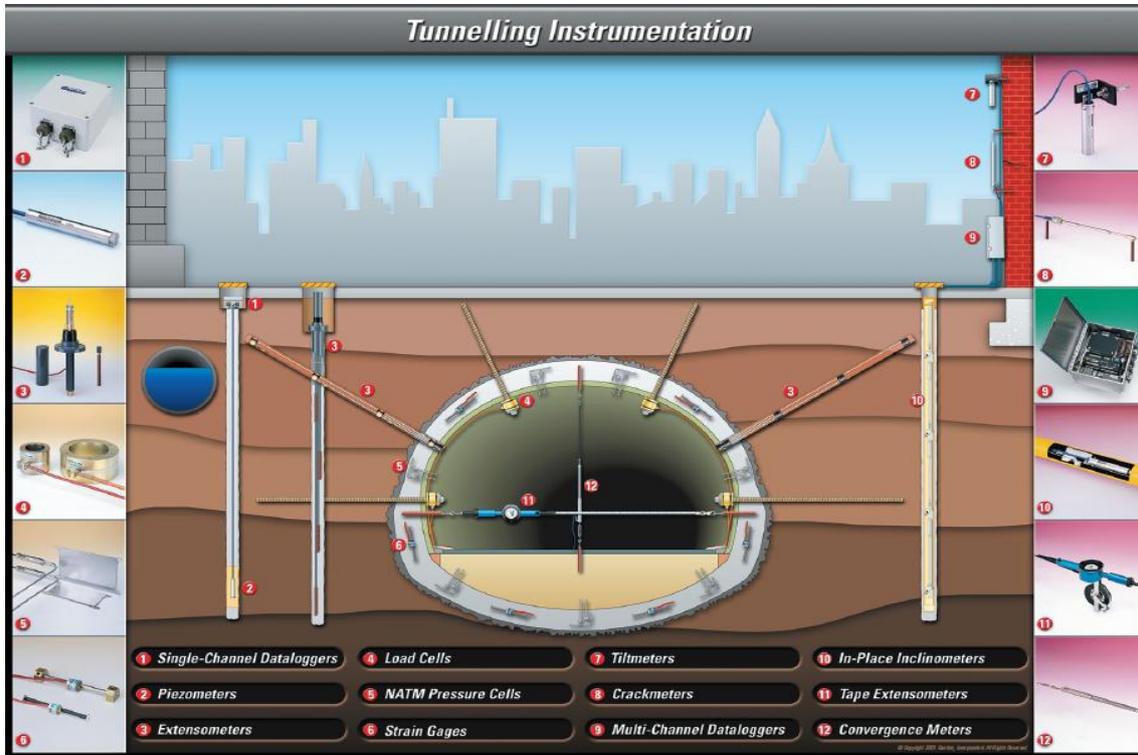


Figura 2. Instrumentación típica en un túnel. FUENTE: Geokon, Incorporated. 2010

En una presa, los principales parámetros son comúnmente: la temperatura, los niveles piezométricos y subpresiones, la abertura o cierre de juntas verticales (según sea el caso), filtraciones, desplazamientos y asentamientos superficiales, desplazamientos horizontales, precipitación pluvial y viento.

Cabe mencionar que la aplicación de la Instrumentación Geotécnica se adecua en otras obras como pueden ser la industria Minera, carreteras, excavaciones, construcciones de puentes, etc; con anterioridad se describieron algunos de los casos más típicos de Instrumentación Geotécnica.

Desde esta etapa de planeación debe existir una predicción del comportamiento esperado de la estructura, para identificar las variables que serán de mayor interés, además de definir el intervalo de medición y la precisión que se requerirá en los diferentes instrumentos.

Una vez seleccionadas las variables que deben ser monitoreadas, así como los rangos de medición, se puede plantear un programa de instrumentación para seleccionar el tipo y número de instrumentos más conveniente, con los cuales se pueda obtener la información deseada en forma confiable, sin perder de vista factores de costo y disponibilidad.

No necesariamente tiene que hacerse un programa demasiado elaborado para lograr los objetivos citados. A veces los sistemas más simples, aplicados adecuadamente, proporcionan información suficiente.

En esta etapa se establecen también los sitios propicios para la Instalación de los instrumentos, marcándolos en un plano, y teniendo en cuenta las implicaciones en los procedimientos constructivos.

En el capítulo uno de este trabajo se aborda de manera general un panorama acerca de la construcción de túneles construidos sobre suelos blandos, revisando y plasmando lo que es más comúnmente empleado para la construcción de dichas obras.

En el capítulo dos se realiza una descripción general de los aparatos de medición Geotécnica, que se están empleando con mayor frecuencia en la construcción de túneles sobre suelo blando, así como su forma de operación y principios básicos.

En el capítulo tres se aborda la forma de instalación detallada de los instrumentos de medición geotécnica más utilizados en la construcción de túneles sobre suelo blando, además de los preparativos y cuidados de dichos instrumentos.

En el capítulo cuatro, se describe una forma de poder interpretar los datos arrojados por la instrumentación, así como la manera de obtenerlos, también forma parte de este apartado la manipulación de los aparatos y sugerencias de cómo realizar los cálculos.

En el capítulo cinco, se refiere a las conclusiones de este trabajo, el beneficio que tendrá en los profesionistas y gente interesada en el tema y una reflexión de hacia dónde se dirige en los próximos años la instrumentación Geotécnica en nuestro país.

Capítulo 1. Túneles construidos en suelos blandos.

Panorama general

1.1.- DESARROLLO HISTORICO DE LOS TÚNELES Y NECESIDAD DE CONSTRUCCIÓN.

Se dice que los túneles son pasajes subterráneos construidos para comunicar directamente dos puntos, pasando por debajo de obstáculos, los cuáles pueden ser una ciudad, una montaña, un río, o el propio mar.

En general una obra u oquedad subterránea es un espacio ganado al subsuelo mediante la excavación y remoción sistemática de los materiales encontrados en el subsuelo, con el propósito de alojar alguna instalación de uso civil o militar.

La historia del tuneleo y de las obras subterráneas parece remontarse hasta la prehistoria, cuando los hombres primitivos adaptaban cavernas naturales o bien hacían cuevas, para protegerse del clima y de sus enemigos.

Según la información histórica disponible, el túnel más antiguo de que se tenga noticia, fue construido por la reina Semiramis bajo el río Éufrates en Babilonia, hace 4000 años, y sirvió para comunicar el palacio real con el templo de Jová.

Se menciona que su sección transversal era rectangular, de 4½ m de ancho por 3½ m de altura, y con longitud cercana a un kilómetro. Probablemente fue construido como “túnel falso”, formándose sus paredes con ladrillos unidos con mortero y su cubierta con un arco abovedado, para posteriormente ser cubierto con tierra.

En el año 700 AC, Hezekiah excavó los 528m del túnel Shiloh, atacando simultáneamente sus dos frentes.

En el año 600 AC, se excavó un túnel de 1.6km de longitud y 2.5m de diámetro, para conducir agua desde su manantial hasta la ciudad griega de Samos. Herodoto menciona que el constructor fue Eupalinos de Megara, quien años después construiría en Atenas un sistema para el abastecimiento de agua potable, mediante tubos de arcilla Hammond (1959).

En las civilizaciones antiguas, los túneles fueron la solución más frecuentemente utilizada para la conducción práctica del agua, a fin de evitar los obstáculos topográficos que se oponían a su conducción por gravedad.

Los Romanos construían túneles para sus caminos ubicados en terrenos montañosos, como es el caso del famoso túnel de la Vía Flaminia construido por el Emperador Vespasiano y del túnel Pausilippo entre Nápoles y Pozzouli, construido por Cocceius en el año 36 AC, el cual parece haber sido el más grande de su época, con 7.6m de ancho, 9.2m de altura y 1.5km de longitud Beaver (1973).

Los túneles construidos por las civilizaciones antiguas, tuvieron principalmente un propósito económico aunque no son pocos los ejemplos de uso religioso, y militar.

Las tumbas de la civilización egipcia fueron excavadas en roca y comunicadas con la superficie mediante túneles.

Las ciudades amuralladas fueron asaltadas mediante la construcción de túneles bajo sus muros, a través de los cuales se enviaron tropas que tomaban desprevenidos a los defensores, como ocurrió en Jericó. Posteriormente se destruían los muros, mediante la ampliación de los túneles subyacentes y el retiro o quema de sus ademes de madera Sandstrom, (1963).

Otro ejemplo del uso de túneles en el pasado, son los acueductos denominados “qanats” aún en uso en Irán, algunos de los cuales tienen casi 3000 años de antigüedad y han sido excavados manualmente a profundidades de 4 a 275 m Wulff, (1968).

Desde entonces muchos túneles y obras subterráneas han sido construidos en el mundo, y cada año se agregan numerosos ejemplos, sobre todo en los países de mayor desarrollo.

Entre los túneles mundiales más conocidos y recientes, están el Eurotúnel, utilizado para la comunicación ferroviaria entre Inglaterra y Francia, bajo el Canal de la Mancha, donde se utilizaron máquinas de tuneleo, y el Seikan en Japón, para la comunicación del “Tren bala” entre sus islas Honshu y Hokaido.

En México, la construcción de túneles de drenaje arranca desde las civilizaciones prehispánicas ubicadas en zonas de alta precipitación, cuando en sus centros ceremoniales fue necesario instalar importantes sistemas de drenaje.

Más adelante, en tiempos de la Colonia, la explotación minera subterránea, permitió adquirir valiosas experiencias que pronto fueron aplicadas en la construcción de los primeros túneles ferroviarios del País.

En la zona urbana de la ciudad capital, las sistemáticas inundaciones que desde tiempos prehispánicos la han aquejado, dieron lugar a la aplicación de soluciones de drenaje “en túnel”, para evacuar la abundante precipitación pluvial que periódicamente se presenta en la cuenca lacustre del Valle de México. Se excavan así el túnel de Nochistongo que por motivos inherentes a su retraso en la colocación de su revestimiento definitivo, pronto fue convertido en “tajo”, y más recientemente los túneles de Tequisquiac nuevo y viejo, que le dieron salida gravitacional al Gran Canal del Desagüe.

La traída del agua potable a la Ciudad de México, fue también motivo para la construcción en los años 40’ de otro gran túnel, el Acueducto de Lerma, que aún sirve a la Ciudad.

El desarrollo de los grandes proyectos hidroeléctricos del País, permitió a los Ingenieros Civiles Mexicanos, aplicar su rica experiencia tunelera, en la construcción de túneles de desvío, casas de máquinas subterráneas, túneles de conducción y tuberías de presión, desfogue y demás obras subterráneas que en tales proyectos se requieren

Con el tiempo, también se construyeron túneles para la conducción del agua utilizada en el riego, desde la presa de almacenamiento hasta el campo de sembrado.

Cuando en el subsuelo blando y arcilloso de la Ciudad de México, dejó de ser práctico construir drenajes mediante zanjas excavadas a cielo abierto, la solución “en túnel” se hizo

presente, empezándose a utilizar ese trascendente concepto de construcción denominado “Escudo”, inventado por el Ing. Brunel (Fig. 3), en la Inglaterra del siglo XIX, y que actualmente han tenido un importante desarrollo como se visualiza en el libro MECHANISED SHIELD TUNNELLING, escrito por Maidi B., M. Herrenknecht and L. Anheuser, (1996).

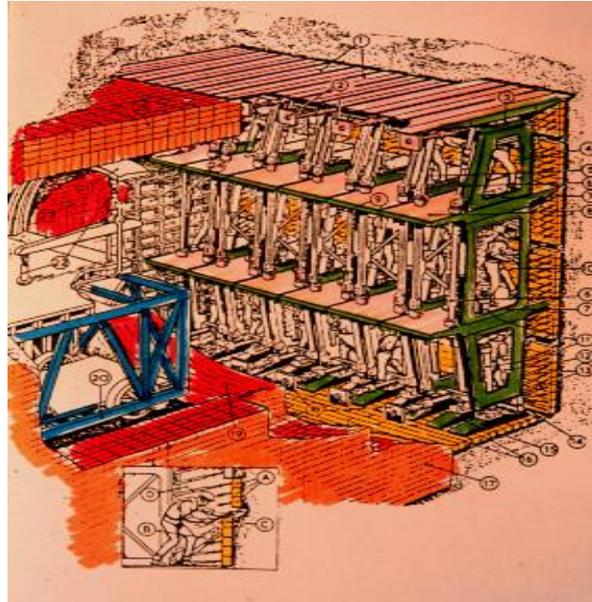


Figura 3. Primer escudo, inventado por M. I. Brunel en el siglo XIX.

El rápido desarrollo de los escudos para construir túneles en los suelos blandos de la Ciudad de México, principalmente en los sistemas urbanos de Drenaje, da un importante impulso a la materialización de un viejo sueño de la Ciudad, su Metro.

A la fecha, otras grandes ciudades del País como Guadalajara y Monterrey, ya han construido túneles para drenajes e importantes tramos subterráneos de sus propios Metros.

El último concepto de túnel en incorporarse es quizás el “carretero”, que hace su presentación formal en los años 70, en el camino de acceso al P.H. Chicoasén en el estado de Chiapas. Desde entonces nuevos túneles carreteros se han construido, por ejemplo en Puerto Vallarta Jalisco, en la Ciudad de Guanajuato, en las nuevas autopistas de México a Toluca y de Cuernavaca a Acapulco, y más recientemente en Acapulco, para su nuevo acceso en túnel.

1.2.- PROCESO CONSTRUCTIVO.

Un túnel es una obra de ingeniería que para su construcción, requiere de técnicas, productos, equipos especiales y de análisis geológicos, geotécnicos e hidráulicos; este se realiza por especialistas en el ramo, una vez que se ha definido el proyecto de construcción de un túnel.

Se conocen las condiciones y características del lugar, eligiendo el proceso constructivo que conviene para su construcción. Según las dimensiones del proyecto, se deben de considerar otros factores como son seguridad, economía y durabilidad de la obra.

A continuación se describirán las etapas más representativas en la construcción de un túnel en suelos blandos, emitiendo el comentario de que se trata de hacer lo siguiente en un orden cronológico, aunque se aclara que varias de estas etapas se realizan en forma simultánea.

1.2.1.- EXPLORACION GEOTÉCNICA.

Los principales factores que se deberán considerar en la planeación del proyecto son:

- Definir claramente el objetivo del proyecto.
- Identificar las acciones a seguir y las solicitaciones de las estructuras sobre el terreno.
- Obtener información previa disponible
- Definir las condiciones geológicas regionales y locales
- Identificar los accesos y características fisiográficas de la zona
- Seleccionar los métodos y volúmenes de investigación necesarios y adecuados
- Establecer el presupuesto y tiempos de entrega

Antes de iniciar la exploración de campo será necesario llevar a cabo los estudios previos del sitio, que tienen como objetivo el conocimiento geológico y geotécnico general de la zona del proyecto, del emplazamiento y del trazo.

Gran parte se basa en la revisión de la información disponible: es necesario hacer una revisión bibliografía de reconocimientos y estudios geológicos y geotécnicos previos; estos pueden ser informes internos de instituciones o empresas, informes sobre el proyecto, como de los alrededores, mapas y secciones geológicas y/o de otro tipo, fotografía aéreas, información de otros proyectos en las cercanías de la zona de interés, publicaciones periódicas de revistas, etc.

De los estudios previos se deberá hacer un análisis y la evaluación de los datos existentes y a partir de éstos, hacer una planificación adecuada de las investigaciones “in situ” a realizar. En esta etapa de estudio, también se realiza la fotointerpretación y teledetección de las áreas de interés. La información que se obtiene constituye una de las herramientas fundamentales para la cartografía geológica, el reconocimiento geológico del área, la identificación de litologías y estructuras geológicas y de posibles problemas que pudieran existir. Con la información disponible, se podrá hacer una valoración previa y planear los estudios subsecuentes de investigación geotécnicos “in situ” así como definir los posibles factores de riesgo geológicos que puedan condicionar la viabilidad del proyecto.

Sondeos

Los sondeos geotécnicos que se utilizan en la exploración de obras subterráneas se caracterizan por su diámetro pequeño y equipo de perforación ligero, versátil y de fácil desplazamiento en comparación de petroleros o hidrogeológicos que son pesados y voluminosos. Son equipos que pueden alcanzar los 150 m de profundidad y en caso de requerir de mayor profundidad son más pesados y de mayor dificultad para su movilización, pudiendo alcanzar los 1000 m.

Estos equipos están diseñados para poder atravesar cualquier tipo de materiales, sea suelo o roca y con la posibilidad de extraer núcleos para efectuarles ensayos y pruebas de laboratorio. Las perforaciones dependen de la naturaleza del terreno y del tipo de muestreo.

En geotecnia, los sondeos más utilizados son los de rotación, helicoidales o percusión pero para obras subterráneas son principalmente de tipo rotatorio. Para estas obras, la extracción de núcleos es generalmente continua con el fin de conocer la estratigrafía que se localiza por encima de la excavación, las estructuras geológicas y las características hidrogeológicas. También es importante obtener un muestreo continuo para identificar zonas de mala calidad y muestras, para practicarles ensayos y conocer sus propiedades físicas e ingenieriles. La perforación continua también permite calcular el porcentaje de recuperación de núcleos con respecto a la longitud perforada, que corresponde a un parámetro que da idea de la calidad del suelo atravesado.

La decisión del número de perforaciones a efectuar y a la profundidad de investigación, es una cuestión crítica, que depende de varios factores, sobre todo del tipo de proyecto a realizar, como de los objetivos a definir. Como guía, las perforaciones deben alcanzar el nivel del estrato más profundo que pueda ser afectado por acción de las obras del proyecto. El número de perforaciones a realizar depende de los objetivos y alcances de la investigación, así como de la representatividad de la zona investigada por cada sondeo. En el caso de túneles se debe, por lo general, tener información de la zona de accesos, en los extremos del túnel (portales) o a lo largo del trazo (lumbreras). Por lo tanto, el número dependerá de la longitud del túnel, de la complejidad de la estructura geológica y del encape entre otras cosas.

Además se deberán situar de tal forma, que aporten el mayor volumen de datos:

- Por lo que, se deberán colocar de tal forma que corte lo más perpendicular las estructuras geológicas
- Definir la estructura geológica e indicar dónde existen incertidumbres
- Siempre que sea posible, se tratará de investigar cuando menos 5m por debajo de la rasante o un diámetro del mismo
- En su interior se pueda realizar estudios y ensayos geofísicos, hidrogeológicos, de permeabilidad y de esfuerzo–deformación
- Definir problemas de estabilidad
- Identificar posibilidad de deslizamiento
- Filtraciones
- Espesores de zonas de alteración y meteorización, etc.

Los sondeos con recuperación continua de muestras alteradas mediante la herramienta de penetración estándar, sirven para evaluar la consistencia o compacidad de los materiales superficiales y de los estratos resistentes de los depósitos profundos. Este tipo de sondeo en arcillas blandas permite obtener un perfil continuo del contenido de agua y otras propiedades índice. No es aceptable realizar pruebas mecánicas usando especímenes obtenidos con dichos sondeos.

Cuando se quieren obtener datos sobre la consistencia de la arcilla en su estado original, se utilizarán tubos de acero de 4 pulgadas de diámetro, con paredes de 1,6 a 1,3 mm de espesor (tubo Shelby). Los tubos tienen comúnmente una longitud de 90 cm centímetros. Su extremo inferior será biselado, para formar un borde cortante, y su extremo superior se prepara para conectarlo a las barras de sondeo.

Los sondeos de penetración estática con cono eléctrico (Norma ASTM D 5778-95/00), son recomendados principalmente para la exploración preliminar, ya que permite definir con precisión los cambios de estratigrafía de cada estrato, y por correlación interpretar la clasificación del suelo y predecir su posible comportamiento mecánico. Para incrementar su confiabilidad los parámetros obtenidos deben de compararse con resultados de pruebas de corte en laboratorio y de campo.

Especificaciones para Sondeos Mixtos

Para el caso de los sondeos mixtos, si el número de golpes del muestreador SPT alcanza los 50 golpes, se retirará éste último y se realizará avance con broca tricónica, en cuanto el material lo permita se volverá a hincar el muestreador SPT para continuar con el sondeo. Esta secuencia se realizará en tramos del orden de 5.0m, y de manera intercalada y aproximadamente a cada 5.0m se hincará un tubo Shelby para la obtención de muestras inalteradas. Una vez recuperado el tubo Shelby, se continuará con el muestreo SPT de acuerdo a la secuencia antes mencionada, hasta cubrir una profundidad del orden de 60.0m con respecto al brocal del barreno.

En el caso de que durante la exploración las condiciones del terreno (materiales pétreos, rellenos heterogéneos) impidan realizar la toma de muestras se recurrirá a realizar avances con broca tricónica hasta encontrar materiales que permitan realizar dicha actividad.

Especificaciones para Cono Eléctrico

La prueba consistirá en hincar el cono eléctrico de acuerdo a la ubicación marcada, a una velocidad de 2.0cm/seg., registrando la carga aplicada a cada 10.0cm. Es muy importante que durante la prueba la velocidad de penetración se mantenga constante, ya que es inevitable que en las capas duras el cono pierda velocidad de penetración y que al pasarlas se acelere. En el caso de encontrar estratos de arena o materiales (rellenos heterogéneos) que impidan el hincado del cono, se utilizará avance con broca tricónica hasta encontrar nuevamente material blando, se lavará el barreno a esta profundidad para continuar con el hincado del cono y la toma de lecturas. La profundidad de exploración de cada sondeo de cono eléctrico será del orden de 60.0m. La ejecución de éste tipo de sondeos estará basada en la Norma ASTM D 5778-95/00.

Para la ejecución de éste tipo de sondeos, en algunas ocasiones, ante la presencia de suelos medianamente compactos, es necesario colocar una serie de muertos de concreto armado, que permitan anclar el equipo de perforación, con el fin de ganar peso que facilite la

penetración continua del cono eléctrico sin rebotes, esto sin exceder la capacidad de penetración del equipo.

Trabajos de laboratorio.

A partir de las muestras alteradas e inalteradas obtenidas de los sondeos mixtos se obtendrán en el laboratorio las propiedades índice y mecánicas de acuerdo a los criterios siguientes:

- A las muestras alteradas:
 - a) Clasificación del suelo (SUCS).
 - b) Contenido natural de agua, w (%).
 - c) Límites de consistencia, líquido (LL), y plástico (LP).
 - d) Granulometría por mallas.
 - e) Densidad de Sólidos (G_s).

- A las muestras inalteradas:
 - a) Compresión triaxial no consolidada-no drenada (UU).
 - b) Compresión triaxial consolidada-no drenada (CU), con medición de presión de poro.
 - c) Torcómetro.
 - d) Consolidación unidimensional.

De acuerdo al tipo de muestreo realizado, se determinarán las siguientes propiedades:

- Identificación o clasificación del suelo conforme el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La identificación se realizará conforme a la Norma ASTM D 2487-00, y en promedio se realizará a cada 0.60m de exploración.
- Contenido natural de agua, w (%). Esta prueba se realizará conforme a la Norma ASTM D 2216-98. Se realizará una determinación del contenido natural del agua en promedio a cada 0.30m de exploración, conforme el número de muestras lo permita.
- Límites de consistencia, líquido (LL) y plástico, (LP). Esta prueba se realizará únicamente en suelos finos, conforme a la Norma ASTM D 4318-00. Debido a la estratificación de la zona de exploración, en promedio se determinarán límites a cada 6.0 m de exploración.
- Granulometría por mallas. Esta prueba se determinará en suelos formados principalmente por gravas y arenas y conforme a la Norma ASTM D 422-63/98. Debido a las condiciones del subsuelo de la zona, se estima realizar pruebas de granulometría por mallas donde se encuentre la presencia de materiales granulares, por lo que se estima realizar de 3 a 4 pruebas por sondeo mixto.
- Peso específico relativo o densidad de sólidos (G_s). Esta prueba se determinará conforme a la Norma ASTM D 854-02. Las pruebas se realizarán en promedio a cada 10 metros de exploración en cada cambio de material.

- Compresión triaxial no consolidada-no drenada (UU). Estas pruebas se realizarán únicamente en materiales cohesivos conforme a la Norma ASTM D 2850-95/99, y en promedio una prueba por cada 10.0 m de exploración en cada cambio de material.
- Compresión triaxial consolidada-no drenada (CU) con medición de presión de poro. Estas pruebas se realizarán únicamente en materiales cohesivos conforme a la Norma ASTM D 4767-95. La selección de las muestras para esta prueba queda a criterio dependiendo de la recuperación de las muestras inalteradas.
- Torcómetro. Se realizará de manera sistemática en cada tubo Shelby, la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos finos mediante el uso del Torcómetro (Manual de Diseño Geotécnico, COVITUR ,1987 pags. 85-87). La prueba se realizará en promedio a cada 5.0m de exploración inalterada.
- Consolidación unidimensional. Se realizará una prueba de consolidación en promedio por cada 10.0m de exploración en cada cambio de material. La prueba se ejecutará únicamente en materiales cohesivos y conforme a la Norma ASTM D 2435-96.

1.2.2.- TRAZO Y UBICACIÓN TOPOGRAFICA.

El proyecto de trazo y ubicación topográfica de un túnel depende de muchas variables y sin lugar a dudas es muy importante el uso para el cual se requiere una obra de este tipo, en general a continuación se enlistarán algunas de las variables más importantes:

- Topografía del terreno
- Obras inducidas
- Geotecnia
- Condicionantes de operación
- Arqueología

A continuación se describirá la forma de calcular el trazo y el perfil de un Túnel que se empleará para ampliar la red del metro de la ciudad de México.

Proyecto de Perfil

El perfil definitivo del Túnel es el resultado de un análisis y estudio profundo de las diferentes condicionantes de diseño de una línea de metro y que anteriormente se enlistaron

Aparte de dichas condicionantes, el perfil debe cumplir ciertas especificaciones para cada uno de sus elementos. Los elementos del perfil son las pendientes y las curvas verticales de transición.

El perfil definido corresponde a la subrasante de la línea.

Las bases de la definición geométrica son los capítulos 2.01.01.004 “Especificaciones de Perfil” y 2.02.02 “Vías principales” de las “Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México”.

El enlace entre pendientes deberá de realizarse por medio de una curva vertical parabólica de transición definida por la siguiente ecuación.

$$Y = \frac{X^2}{2RY}$$

Donde Y.- es la elevación
 X.- es la distancia
 R.- es el radio

Dichas transiciones se deberán de realizar como se muestra en la figura siguiente:

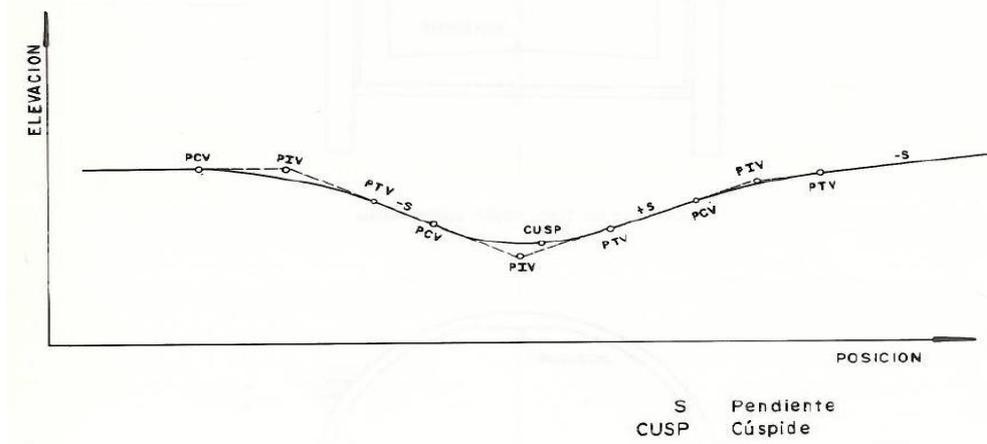


Figura 4. Curva vertical Parabólica del perfil.

A manera de resumen se especifican los parámetros que fueron utilizados en el proyecto geométrico de alineaciones verticales las cuales se resumen en la tabla siguiente:

PERFIL			Especificaciones	Bases de diseño	Valores aplicados
	Radio de curvatura vertical	R _{min} deseables [m]		2500 (v=80)	No existe
R _{min} casos especiales [m]			1250 (v=80)	1200	2500
a _v Aceleración vertical [m/s ²]			No existe	No existe	0.2
Longitud mínima	L _{min} Rampa con pendiente uniforme [m]		16	No existe	V _p /2
	L _{min} Acuerdo vertical [m]		No existe	No existe	V _p /2
Pendientes	S _{máx} [%]		4	4	2
	S _{min} Tramo interestación en túnel y cajón subterráneo o superficial [%]		0.2	No existe	0.2
	S _{min} Tramo interestación elevado [%]		0.3	No existe	0.3
	Estaciones [%]		0	No existe	0
	Vías de estacionamiento [%]		0	No existe	0
	Aparatos de vía [%]		2	No existe	0
	En talleres [%]		0	No existe	0

Tabla 1. Parametros utilizados para diseño de Proyecto Geométrico.

Cálculo Geométrico alineaciones horizontales

Proceso de cálculo de las curvas.

Para absorber la fuerza centrífuga consecuencia del tren pasando por una curva, se proporciona una sobreelevación como pendiente transversal al riel exterior de la vía. El valor de la sobreelevación depende tanto del radio recorrido como de la velocidad y se aplica un valor constante sobre toda la curva.

Debido a restricciones prácticas, de la construcción, del mantenimiento etc., se limita la sobreelevación máxima aplicable, en función del radio.

El elemento de la curva de transición tiene dos funciones: la primera es un cambio gradual de la curvatura entre la tangente y la curva circular. La segunda es la transición de la sobreelevación.

Para estimar la longitud de las clotoides se utiliza el proyecto de sobreelevaciones, reduciendo su complejidad al eje central del trazo. Para absorber la fuerza centrífuga, que crece a medida que disminuye el radio a lo largo de la clotoide, hasta llegar al radio real de la curva circular, se proporciona una sobreelevación como pendiente transversal al riel exterior de la vía. Esta sobreelevación se aplica gradualmente a lo largo de las clotoides, creciendo o disminuyendo dependiendo si se trata de clotoides de entrada o de salida.

Una vez definida la longitud de las curvas de transición se estima la velocidad de cada curva de forma iterativa con las siguientes limitaciones y ecuaciones en vigor:

Sobreelevación teórica

$$h = 11.8 * \frac{V^2}{R}$$

Con V : Velocidad en [km/h]
 h : sobreelevación aplicado en [mm]
 R : radio de la curva en [m]

Velocidad teórica

$$V = \sqrt{(h_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{a}x}) \cdot \frac{R}{11.8}}$$

Con V : Velocidad en [km/h]
 $h_{m\acute{a}x}$: sobreelevación máxima [mm]
 $I_{m\acute{a}x}$: Insuficiencia máxima
 R : radio de la curva en [m]

Velocidad de diseño

$$V_{dise\tilde{n}o} \leq 90km/h$$

En el caso de que la velocidad teórica supere la velocidad de proyecto se toma como valor de diseño la velocidad de proyecto. Cuando las condiciones geométricas de la curva no permitan obtener los valores máximos de diseño deseables, se disminuye la velocidad a los valores obtenidos.

Aceleración radial sin compensación

- La aceleración sin compensación se limita al valor: $a_q = 1 \text{ m/s}^2$

$$a_q = \frac{V^2}{12.96 \cdot R} - \frac{h}{153.62}$$

Con V : Velocidad en [km/h]
 h : sobreelevación aplicado en [mm]
 R : radio de la curva en [m]

Una vez definida la velocidad de diseño, se calcula la longitud mínima de las clotoides adyacentes para las curvas de radio menor a 2,000 m. Como datos de entrada se utiliza la sobreelevación máxima y la insuficiencia máxima.

Sobreelevación máxima: $h_{\max} = 160 \text{ mm}$

Insuficiencia máxima: $I_{\max} = 150 \text{ mm}$

Para garantizar tanto un máximo de confort del pasajero como un mínimo de desgaste de la vía, se limitan las fuerzas provocadas por el cambio de peralte y la curvatura. Se utilizan las siguientes limitaciones:

Máxima variación de peralte respecto a la longitud

- Pendiente máxima para alcanzar la sobreelevación

$$s_{\text{per}} = \frac{dh}{dL} = \frac{h}{L_{cl}} \leq 3 \text{ mm/m} \quad L_{cl} \geq h \cdot \left(\frac{dh}{dL} \right)^{-1}$$

Con h : sobreelevación aplicada en [mm]
 L_{cl} : Longitud de la clotoide aplicada en [m]

Máxima variación del peralte con el tiempo

$$\frac{dh}{dt} \leq \frac{h \cdot V}{3.6 \cdot L_{\text{Clotoide}}} \leq 50 \text{ mm/s} \quad L_{dh/dt} \geq \frac{h \cdot V}{3.6} \cdot \left(\frac{dh}{dt} \right)^{-1}$$

Máxima variación de la insuficiencia con el tiempo

$$\frac{dI}{dt} \leq \frac{I \cdot V}{3.6 \cdot L_{\text{Clotoide}}} \leq 75 \text{ mm/s} \quad L_{dI/dt} \geq \frac{I \cdot V}{3.6} \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^{-1}$$

Máxima variación de aceleración no compensada

$$\frac{da_q}{dt} \leq \frac{a_q \cdot V}{3.6 \cdot L_{\text{Clotoide}}} \leq 1 \text{ mm/s}^3 \quad L_{da_q/dt} \geq \frac{a_q \cdot V}{3.6} \cdot \left(\frac{da_q}{dt} \right)^{-1}$$

Las condicionantes del cálculo geométrico en planta se resumen en la siguiente tabla y se ajustan a lo establecido en “Especificaciones para el proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México”.

TRAZO			Especificaciones	Bases de diseño	Valores aplicados	
	Radio de curvatura horizontal	R_{\min} Vías principales [m]		150	200	250
		R_{\min} Vías secundarias [m]		60	70	70
	Longitud mín.	L_{\min} Tangente [m]		16	No existe	$V_p/2$
		L_{\min} Clotoide [m]		No existe	No existe	
	Sobreelevación	h_{\max} Peralte práctico [mm]		160	No existe	160
		h_{\max} Peralte teórico [mm]		310	No existe	310
		Insuficiencia [mm]		150	No existe	150
		Pend. Peralte máx [mm/m]		3	No existe	3
		Variación del peralte (mm/s)		No existe	No existe	50
Variación de la insuficiencia con respecto al tiempo (mm/s)			No existe	No existe	75	
a_q Aceleración sin compensar [m/s^2]			No existe	No existe	1.00	
Aparatos y estaciones			En tangente	No existe	En tangente	

Tabla 2. Condiciones de cálculo Geométrico y alineaciones horizontales.

1.2.3.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DE DOVELAS.

Las dovelas son elementos prefabricados de concreto armado que se atornillan entre sí formando un anillo troncocónico. La construcción del túnel con revestimiento por anillos prefabricados permite el trazado de curvas, tanto en planta como en alzado. Esto es debido a que los anillos son troncos de conos, y colocando las caras convergentes contiguas se consigue obtener una alineación curva. (Ver Fig. 5)

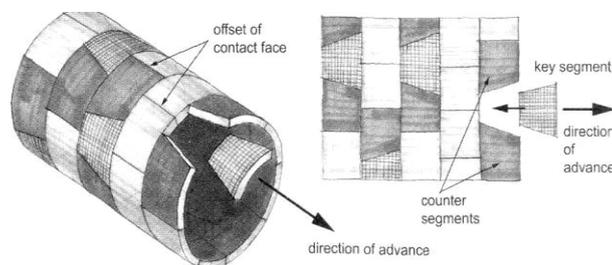


Figura 5. Armado de Dovelas. Izquierda, derecha.

La geometría de las dovelas de un anillo

Un revestimiento prefabricado montado dentro de la tuneladora de balance de tierras (EPB) es una secuencia de elementos, conocidos como dovelas, con dimensiones y formas prescritas (ver figura 6), a fin de garantizar:

1. La construcción de un revestimiento estable, tanto para el corto y largo plazo, teniendo en cuenta todas las cargas previsibles.
2. Cuidado con la continuidad respecto a la alineación del túnel.
3. Rápido y seguro montaje en la parte posterior de la tuneladora de balance de tierras (EPB) y bajo la protección del escudo.

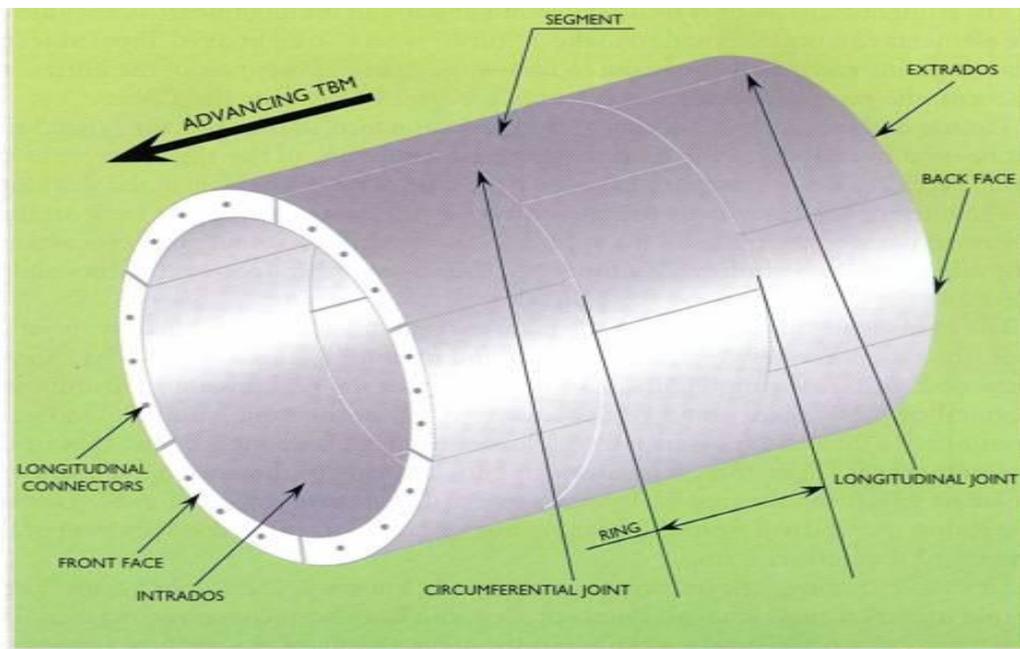


Figura 6. Nomenclatura de un anillo.

Tipos de anillos

Desde un punto de vista geométrico, los anillos son parte de cilindros con las superficies que pueden ser paralelas o no paralelas, se identifican a continuación:

Superficies Paralelas-----> Recta del anillo
Superficies no Paralelas -----> Anillo cónico Trapezoidal
Anillo cónico Universal

La diferencia entre los dos tipos (recto y cónico) de anillo, simplemente se refiere a la versatilidad en el montaje, pero no afecta a la función del anillo.

La recta del anillo sólo se puede utilizar directamente en las partes de la alineación: como una secuencia, estos elementos se utilizan para hacer un "tubo" con un eje recto. Los anillos cónicos trapezoidales, en cambio, permite que el revestimiento de las curvas

predefinidas de la alineación horizontal, el perfil y algunas desviaciones accidentales causados por la Tuneladora tipo EPB. El uso de estos dos tipos de anillo en la cara de excavación, que implica el anillo "derecho" debe ser utilizado en relación a las condiciones geométricas de la alineación o de la Tuneladora tipo EPB . Por lo tanto, es necesario contar con el tipo de anillos en el lugar de trabajo.

La tendencia actual es utilizar el anillo universal sistemáticamente tanto en las partes rectas como en las curvas del túnel. Este enfoque permite a la tendencia horizontal y vertical de la alineación que se ha de seguir sin el uso de otros elementos especiales y para corregir las desviaciones realizadas por la Tuneladora tipo EPB.

El radio de las curvas verticales es generalmente un orden de magnitud superior a la de las curvas horizontales. Por lo tanto, la referencia sólo puede hacerse respecto a la horizontal de radio.

En el caso en el que los dos radios tienen el mismo orden de magnitud, se hace referencia al radio que se deriva de la composición de las dos curvas para la definición de la geometría del anillo universal.

La universalidad de los anillos es una geometría que se conoce como "izquierda-derecha". Estos anillos son verdaderamente universales de todos los puntos de vista, pero se han concebido en parejas.

La geometría es igual para ambos, pero la disposición de los dovelas dentro del anillo "izquierdo" es diametralmente opuesta a la del anillo "derecho", de manera que una alternancia de izquierda-derecha anillos permite una alineación recta que seguido con el segmento clave siempre está en la parte superior.

A fin de contar con una línea recta usando anillos universal, es necesario girar el anillo cada 180 ° en referencia a la anterior, de forma alternativa con la llave del segmento (segmento k) tanto en la parte superior y la parte inferior .

Sistema de impermeabilización

En términos generales, la impermeabilización del anillo está garantizada por los siguientes factores, que son igualmente importantes:

- Colocación de sellos entre la unión de las dovelas; con dichos sellos se garantiza que una vez que la dovela queda en contacto con el terreno, dichos materiales se expanden creando un sello que impide filtraciones de agua hacia el interior del túnel. (Fig. 7).



Figura 7. Colocación de sellos en dovelas.

Las conexiones entre dovelas y anillos

Las conexiones entre dovelas y anillos pueden, en la actualidad, dividirse en 2 categorías:

Juntas con clavijas: los conectores, que están completamente cubiertos y ocultos, se insertan en el segmento durante el montaje y se inserta en el segmento de la última junta del anillo.

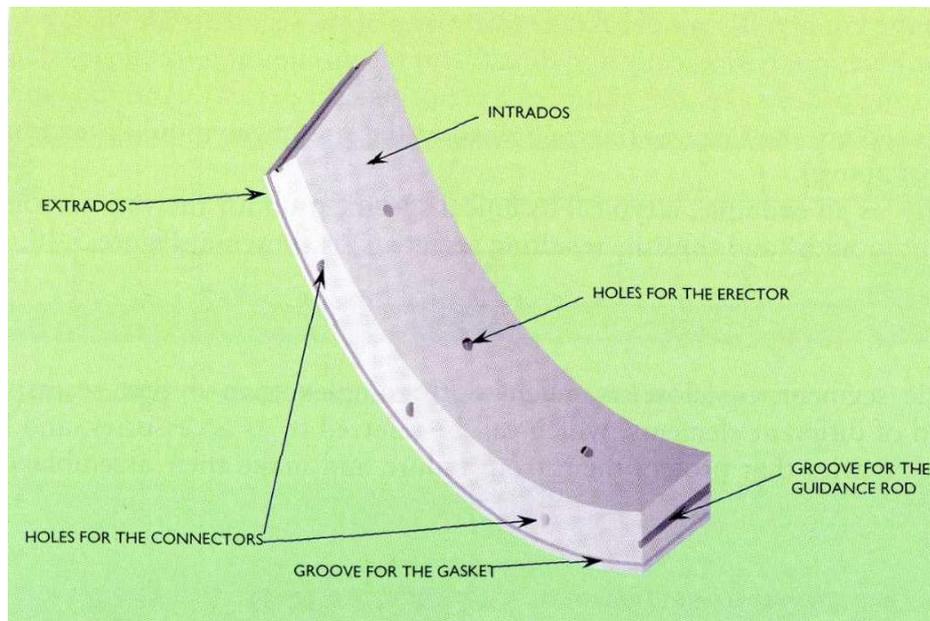


Figura 8. Componentes de una dovela.

Proceso de montaje

En un sentido estricto, el proceso de montaje se inicia con la entrega de las dovelas en el portal y se termina con la salida de los mismos de la cola de la Tuneladora tipo EPB.

Las dovelas son introducidas en el túnel, para ser transportadas por los vagones que se mueven en las ruedas o las orugas. Estos vagones llevan las dovelas hasta llegara a la zona llamada "sección de alimentación", que lleva a la erectores y las coloca en el interior del escudo.

El orden de llegada de las dovelas a los erectores debe ser programado para respetar la sección de montaje, por lo tanto, las primeras en llegar serán aquellas dovelas con la secuencia de construcción establecida. Para hacer este proceso fácil, los dovelas son marcados con letras y / o números que siguen claramente la secuencia de montaje

La figura 9 da una ilustración simplificada de este régimen para el montaje individual de los segmentos para formar el anillo. En resumen, el montaje del primer segmento es seguido por los demás, uno a la derecha y uno a la izquierda hasta llegar a la corona contra los elementos y, a continuación, la corona se instala.

También se puede observar que las juntas entre dos segmentos adyacentes de un anillo no son nunca en la misma posición angular como las juntas entre los anillos anteriores o posteriores.

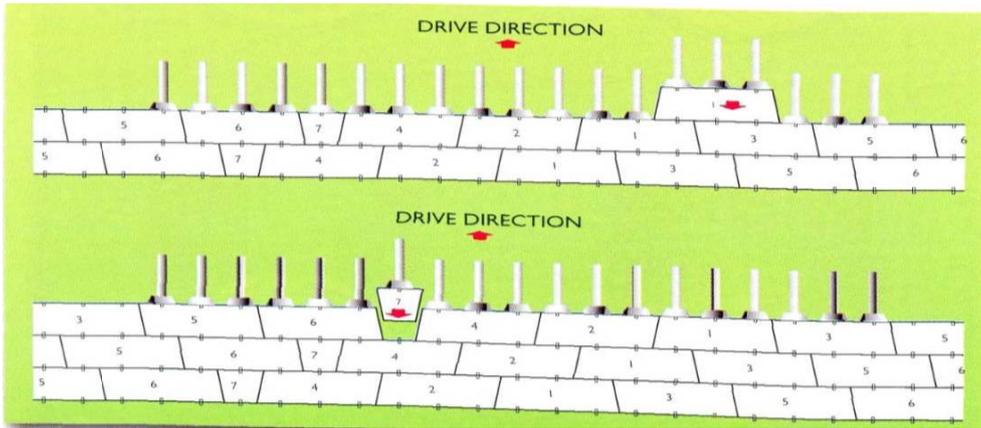


Figura 9. Proceso de montaje (Los números indican el orden de montaje de los segmentos).

Un análisis detallado de esta operación muestra:

1. La relación que existe entre la forma de los segmentos y su sistema de conexión.
2. Algunas limitaciones geométricas que existen entre la distancia recorrida por la presión de los pistones de la máquina y la inclinación oblicua de los lados de la corona necesaria para garantizar una correcta y segura inserción.

Ensamble de la Dovela "k"

El segmento k es el último que se inserta y, por tanto, el movimiento que lleva en su posición tiene que ser de un tipo longitudinal, es decir, paralelo al eje del túnel, después de que haya sido colocado en la posición radial correcta.

Dado que la geometría de las juntas que separan a los segmentos están orientados radialmente, es necesario que el ancho de la dovela sea de un tamaño determinado para permitir el espacio para el ensamble.

La figura 10 muestra el movimiento de los segmentos clave que se requiere para llevar a cabo la inserción. También ilustra el potencial de los principales vértices de colaboración con los lados de los dos segmentos clave. Para solucionar este problema, es necesario estudiar tanto la inclinación de los lados y el valor adicional de la carrera del pistón: cuanto mayor sea el ángulo de inclinación oblicua del conjunto, menor es el valor de los accidentes adicionales. La inserción del segmento k es obviamente una operación muy delicada y, por tanto, la atención y la capacidad del operador de los erectores son de gran importancia.

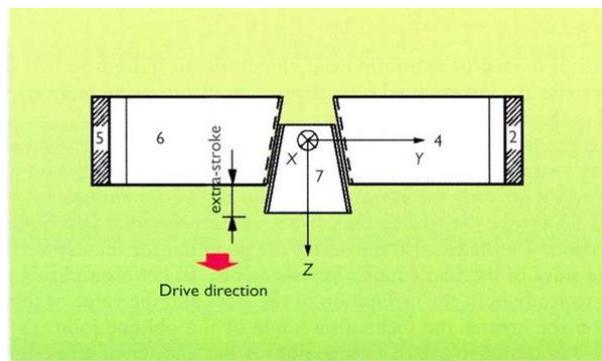


Figura 10. Movimiento radial del segmento K en la inserción.

1.2.4.- CONSTRUCCION DE LUMBRERAS.

La realización de este tipo de estructuras, es de vital importancia en la construcción de túneles y una parte esencial es el análisis Geotécnico.

El objetivo global del estudio geotécnico definitivo es la caracterización geotécnica del subsuelo a lo largo de la trayectoria del túnel y en los sitios de las lumbreras, así como la realización de los análisis geotécnicos correspondientes para proporcionar las recomendaciones de diseño y construcción enfocadas al diseño definitivo de las lumbreras y túnel del proyecto.

CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO

Los trabajos de campo que se realizan consisten en sondeos de cono eléctrico, combinando dos técnicas de exploración: penetración con cono eléctrico en suelos de baja resistencia y penetración estándar en estratificaciones arenosas con resistencias mayores a la capacidad del cono. A partir de los resultados obtenidos se realiza un sondeo de muestreo selectivo, extrayendo muestras inalteradas con tubo Shelby en los estratos de interés.

Con base en los resultados de la exploración geotécnica del sitio, se instalan bancos de nivel ubicados estratégicamente. Estas referencias permitirán detectar las deformaciones de las unidades estratigráficas compresibles del sitio.

Asimismo, se instalan estaciones piezométricas. Con estos piezómetros se monitorearán las variaciones de la presión de poro de los estratos arenosos seleccionados, uno en las paredes de la lumbrera y dos a profundidades mayores que la lumbrera.

Trabajos de laboratorio

Con las muestras obtenidas del sondeo, se ejecutarán las siguientes pruebas de laboratorio:

Pruebas índice:

- Contenido natural de agua
- Límites de consistencia líquido y plástico
- Porcentaje de finos
- Densidad de sólidos

Pruebas mecánicas:

- Compresión simple q_u
- Compresión triaxial UU
- Compresión triaxial CU con medición de presión de poro
- Consolidación unidimensional

Con los resultados de tales pruebas, se clasificaron los suelos con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y se determinaron las propiedades mecánicas de éstos, tales como la resistencia al esfuerzo cortante en condiciones no consolidadas - no drenadas, c_u , y en condiciones consolidadas – no drenadas con medición de presión de poro, el módulo de elasticidad, E, y la compresibilidad de los suelos.

ESTATIGRAFÍA Y PROPIEDADES DEL SUELO

De acuerdo con los resultados de los trabajos de exploración y ensayos de laboratorio ejecutados, se realiza la interpretación geotécnica del sitio, identificando unidades estratigráficas básicas, a saber.

ANÁLISIS GEOTÉCNICOS DE LA LUMBRERA

Estabilidad de la lumbrera

Basados en la estratigrafía comentada anteriormente y en el modelo estratigráfico indicado, se realiza el análisis de estabilidad de la lumbrera considerando su procedimiento constructivo.

Los análisis se hacen utilizando métodos de equilibrio límite y el método del elemento finito (MEF), considerando las etapas constructivas de la lumbrera.

Estados límite de falla.

Excavación de la zanja perimetral con sobrecarga

La estabilidad de la zanja perimetral se analiza con el MEF, considerando que el suelo retirado se sustituye por un lodo autofraguante con peso volumétrico de 10.5 kN/m^3 , un nivel de lodos hasta la superficie y una sobrecarga uniforme sobre la parte exterior de la excavación de 15 kPa . Tal procedimiento provoca un diferencial de esfuerzos horizontales en las paredes de la excavación y delimita un cilindro de suelo central (núcleo) pudiendo llegar a la falla de las paredes del suelo circundante o del núcleo.

Haciendo el análisis con el MEF y reduciendo monotónicamente las propiedades de resistencia de los materiales involucrados, se puede conocer el factor de seguridad para un mecanismo de falla cinemáticamente admisible, bajo una etapa específica. El programa obtiene el FS como el cociente de las resistencias originales entre las resistencias que producen una superficie de plastificación (falla). El criterio de falla utilizado para los materiales es Mohr-Coulomb con comportamiento elasto-plástico.

Excavación de la zanja anular interior con carga perimetral y estabilidad del núcleo

Asimismo, se realiza el análisis de estabilidad en la etapa de fraguado del lodo y excavación de la zanja anular interior, encontrando un factor de seguridad igual a $FS = 1.18$ para un mecanismo de falla en la base del núcleo.

Excavación completa con carga perimetral (falla de fondo)

Posterior a la zanja, se realiza la excavación del núcleo sustituyendo el suelo retirado por un lodo bentonítico. Para el análisis de estabilidad general del fondo (equilibrio límite), se emplea la siguiente expresión:

$$FS_f = \frac{s_u N_c + 2s_u \frac{H_p}{B} + \gamma_L H_L}{\gamma(H + H_p) + q_s}$$

Con s_u : es la resistencia no drenada promedio del suelo

N_c : es el coeficiente de estabilidad

γ y γ_L : son los pesos volumétricos del suelo y del lodo.

q_s : la sobrecarga en superficie

B y H : son el diámetro y profundidad de la lumbrera, respectivamente

H_p : la longitud de empotramiento de la pantalla perimetral

H_L : la altura del lodo.

Considerando un nivel de lodos superficial, el factor de seguridad resultante contra falla de fondo tiene ser como mínimo FS mínimo = 1.5.

Asimismo, se realiza un análisis con elemento finito en esta etapa para determinar los desplazamientos horizontales y verticales, además del factor de seguridad (procediendo de manera análoga como en la etapa anterior), determinando un FS con un mecanismo de falla en el pie de la pantalla perimetral.

Estabilidad del fondo de la excavación por supresión

La evaluación del factor de seguridad por supresión se realiza con la siguiente ecuación bajo equilibrio límite:

$$FS_s = \frac{\gamma(H_s + H_p) + \gamma_L H_L + 8 \frac{s_u}{\pi B} (H_s + 0.8H_p)}{H + H_s + H_p - H_w}$$

Donde s_u : es la resistencia no drenada del suelo entre el fondo de la excavación y el estrato drenante.

- γ y γ_L : son los pesos volumétricos del suelo y del lodo respectivamente
- B y H : son el diámetro y profundidad de la lumbrera, respectivamente
- H_p : la longitud de empotramiento de la pantalla perimetral
- H_L : la altura del lodo
- H_w : la altura de la columna de agua del estrato permeable

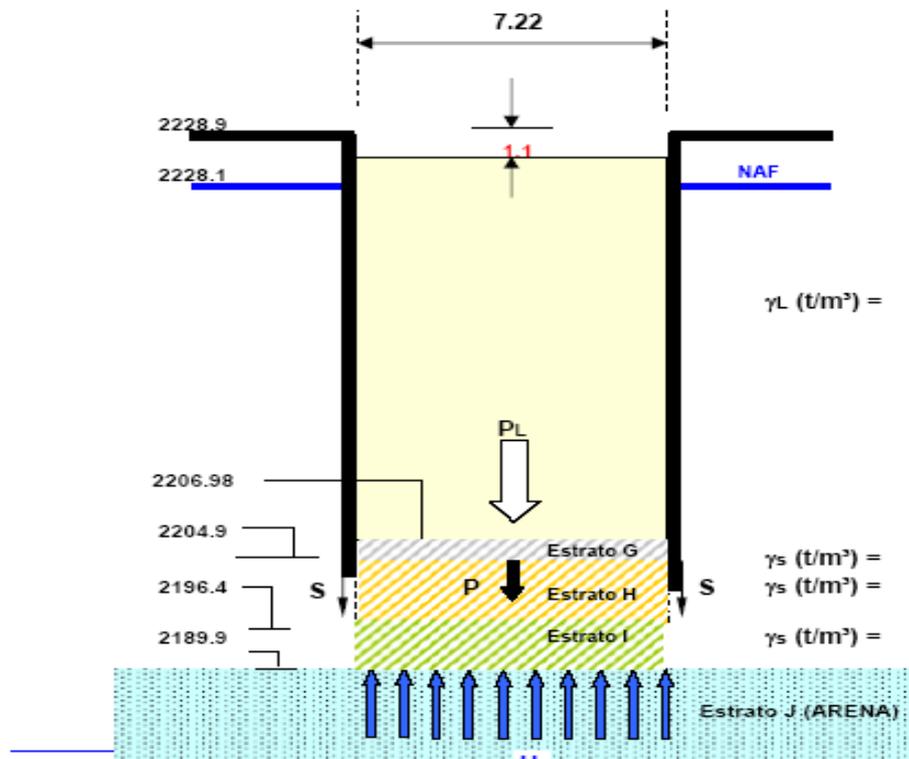


Figura 11. Análisis de supresión por falla de fondo

En este caso, considerando una altura H_w igual a la presión hidrostática. El FS mínimo aceptable es de 1.2 ya que es una etapa temporal.

Estabilidad por flotación de la estructura

Posterior a la inmersión de la estructura, se rellenan los espacios dejados con mortero (zanja anular interior y tanque flotador), teniendo una estructura monolítica. La flotación de la estructura se realiza con la expresión siguiente:

$$FS = \frac{\pi \cdot B_{ext} \cdot H_{est} \cdot s_u}{\gamma_w \cdot A_{ext} \cdot H_w - W_{est}}$$

Con s_u : es la resistencia media no drenada del suelo.

γ_w : es el peso volumétrico del agua.

B_{ext} : son el diámetro y profundidad de la lumbrera, respectivamente.

H_{est} : la altura total de la excavación.

A_{ext} : es el área en planta de la lumbrera hasta la pantalla perimetral.

W_{est} : el peso de la estructura.

El factor de seguridad de la expresión anterior debe ser por lo menos 1.5.

Presiones en el revestimiento de la lumbrera

En esta etapa, las presiones horizontales son obtenidas con el MEF para la última etapa considerada, donde se colocan la losa base y las paredes de la lumbrera.

Extrusión del material en el inicio del túnel

Al finalizar la construcción de la lumbrera, se realiza un corte circular en las paredes con el objetivo de posicionar la tunelera y comenzar con la excavación del túnel. Existe en esta etapa un momento en que la excavación está sin presiones horizontales y podría presentarse una extrusión del material.

Para conocer el factor de seguridad, recurrimos a la expresión propuesta por Alberro, donde la expresión utilizada es:

$$FS = \frac{s_u \cdot N_{ct}}{p_v + q}$$

Donde s_u : la resistencia al esfuerzo cortante del suelo inferior.

N_{ct} : el coeficiente de estabilidad para excavaciones.

p_v : la sobrepresión al nivel de excavación.

q : la sobrecarga superficial.

Considerando el mejoramiento de suelo que debe hacerse a la salida y entrada del túnel con las lumbreras. FS mínimo = 1.1 por ser transitoria.

EXCAVACION EN SUELOS BLANDOS

En general, se puede decir que los procedimientos de construcción para el ataque de lumbreras, se diferencian según el tipo de terreno donde están construidas, Se pueden subdividir en dos grandes grupos, abarcando uno de ellos, las lumbreras construidas en arcillas y limos, es decir, a lo largo de la Línea correspondiente a los interceptores Central y Oriente. El otro grupo lo formarían las lumbreras construidas en estratos más resistentes o roca, a lo largo de la Línea del Emisor Central y algunas del Interceptor del Oriente.

El primer grupo a continuación se mencionaran los dos procesos más utilizados. Las lumbreras construidas a lo largo de la línea del Emisor Central hasta la lumbrera 13, se puede decir que atraviesan estratos de materiales de origen sedimentario tales como; tobas, aluvi6n, conglomerados, bole6s, arenas limosas, etc., y que por lo mismo, el procedimiento de construcci6n es diferente.

T6cnica Solum

La t6cnica Solum consiste esencialmente en tres pasos:

- A. Una vez marcado en el terreno el centro de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, se subdividir6 el 6rea en seis partes iguales, cada una subentendi6 un 6ngulo de 60°, y se procede a hacer perforaciones de 0.60 m de di6metro hasta la profundidad requerida, en un sector anular. Las perforaciones estaban separadas entre s6 aproximadamente 0.60 m es decir, siempre dejando una parte del terreno de este sector sin perforar. Todo sera estabilizado por medio de bentonita, y una vez terminada la perforaci6n, se procede a la extracci6n del material remanentes por medio de una almeja, siempre reemplazando el material extra6ido por partes iguales de bentonita. Una vez terminado de excavar este primer sector anular, se procede a colar y se continuaba el procedimiento de excavaci6n y colado con el sector No. III, tal como muestra la figura 12, y despu6s con el No. V y as6 sucesivamente hasta terminar con la excavaci6n y revestimiento de las paredes de la lumbrera.

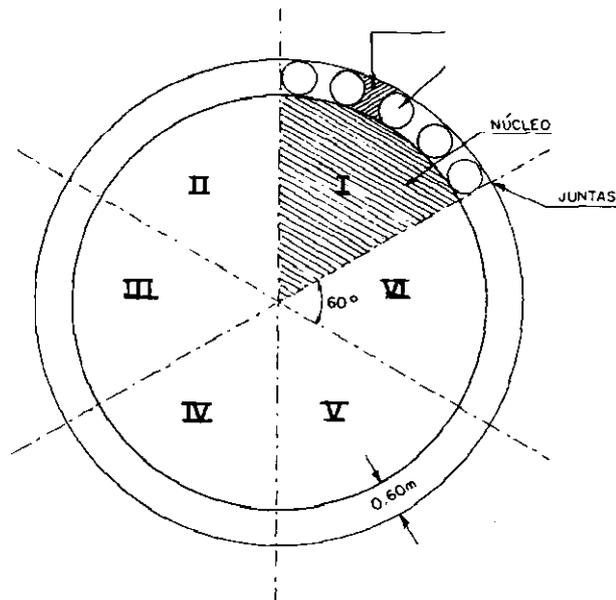


Figura 12. Proceso de Excavaci6n, T6cnica Solum.

- B. Para proceder al colado de los sectores anulares, previamente excavados, se hace bajando el armado e inyectando concreto desde el fondo a trav6s de un tubo tremie, el cual desplaza la bentonita por diferencia de densidades; posteriormente se excavaba el n6cleo con almeja hasta la profundidad que de acuerdo con los c6lculos de Mec6nica de Suelos no se presentaran expansiones en el fondo, debido a la descarga del suelo. Cuando se llegaba a este nivel se suspenden los trabajos y se reemplazaba el peso del material excavado por un volumen equivalente de agua,

para evitar el bufamiento; se continua la excavación del núcleo de la lumbrera extrayendo el material debajo del agua hasta llegar a la profundidad deseada.

- C. Inmediatamente después de terminar la excavación, se procede a colar un fondo de concreto a forma de tapón o plantilla y se dejaba fraguar. Posteriormente se limpia el azolve y se bajaba una parrilla de armado para colar un segundo fondo bajo el agua. Una vez hecho esto, se extrae el agua dentro de la lumbrera y se baja al personal para sellar (calafatear) el tapón de fondo y evitar la entrada de agua o de material. Después se procede a colar el fondo definitivo de concreto armado, perfectamente bien anclado a los muros de revestimiento de la lumbrera.

Técnica Soletanche

El procedimiento de construcción de lumbreras en arcillas con esta técnica, es muy similar a la anteriormente expuesta con dos variantes.

1. La excavación del sector es efectuada por un taladro barrenador guiado, colocado en la periferia de la lumbrera y montado sobre una vía; esta maquinaria extrae el material por medio de una broca rotatoria y de percusión.

Una vez comenzada la excavación del material, se inyecta bentonita por el exterior, y la broca, a la vez que licua el material, extrae la mezcla de rezaga y bentonita por medio de una tubería de succión interior a la misma, depositando el material en un tanque sedimentador colocado en la superficie, recuperándose la mayor parte de la bentonita para inyectarla nuevamente. La maquinaria, además de su movimiento vertical-rotatorio cuenta con movimiento horizontal, y por lo mismo, excava todo el sector anular.

Una vez terminada la excavación de este sector; se bajaban las parrillas de armado y se realiza el colado del muro de la lumbrera colocando concreto a través de un tubo tremie, desplazando este a la bentonita por la diferencia de densidades.

2. El mismo taladro hace una perforación de mayor diámetro en los extremos del sector anular, en donde se coloca una tubería, que es la que limitaba el sector, en ambos extremos para posteriormente, colar con el procedimiento anteriormente expuesto. Una vez que el concreto fragua lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector.

Después de haber colocado todo el muro de la lumbrera, se excava el núcleo de la misma por medio de una almeja, y no es necesario estabilizar el fondo con agua o bentonita.

Si a medida que avanza la excavación del núcleo de la lumbrera se encuentran escurrimientos fuertes por las juntas, se procede a hacer un barreno para inyección de lechada, taponando perfectamente bien cualquier fuga y llenando los huecos que pudieran existir dentro del revestimiento.

1.2.5.- TIPO DE TUNELADORAS.

Existen tres tipos básicos de tuneladoras: tuneladoras de roca dura, escudos de tierra e hidroescudos.

Tuneladoras de roca dura (TBM: Tunnel Boring Machine).

También llamadas topos, son máquinas robustas y relativamente simples, que funcionan empujando contra el terreno unos discos de metal duro que producen la rotura del terreno de tal forma que la roca se raja, y es extraída mediante cangilones en la cabeza de corte que vierten el escombro en una cinta que a su vez lo verterá sobre otra lateral hacia el exterior o sobre vagones. El sostenimiento suele hacerse con sistemas convencionales, es decir, bulones, cerchas y concreto lanzado. Para absorber la reacción de la cabeza de corte y hacer avanzar la tuneladora, las TBM se apoyan en el terreno mediante unos codales transversales (grippers).

Las características de la roca que limitan el funcionamiento de estas máquinas, son, como límite superior, la resistencia a compresión simple y el contenido de cuarzo, y como límite inferior, la sostenibilidad del terreno durante la excavación y su resistencia para que los grippers se puedan apoyar.

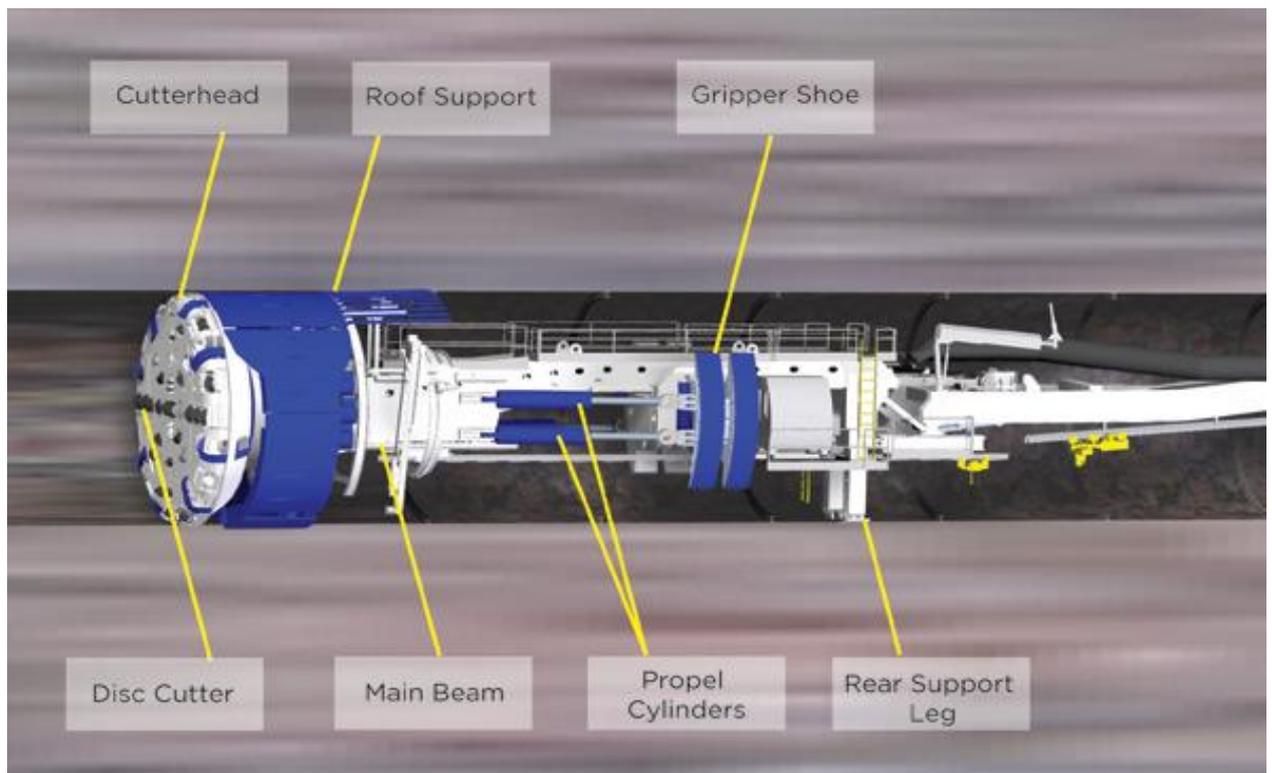


Figura 13. Tuneladora tipo TBM. FUENTE: Robbins. 2010

Escudo de Presión de tierras balanceadas (EPB: Earth Pressure Balanced) (Figura 14).

Se usan cuando el frente de la excavación no es estable. Estas máquinas están envueltas por un cilindro metálico que sostiene el terreno tras la excavación y permite colocar el sostenimiento en su interior (un anillo de dovelas de concreto) sin que exista ninguna interferencia. En el frente hay una cámara de excavación que se mantiene bajo presión, y en ella se amasan los terrenos excavados empujándolos contra el frente con unos cilindros hidráulicos. En algunas ocasiones, en función de la facilidad del terreno a ser amasado, se añaden agentes espumantes, polímeros o suspensiones de arcillas. La extracción del material se hace mediante un tornillo de Arquímedes estanco.

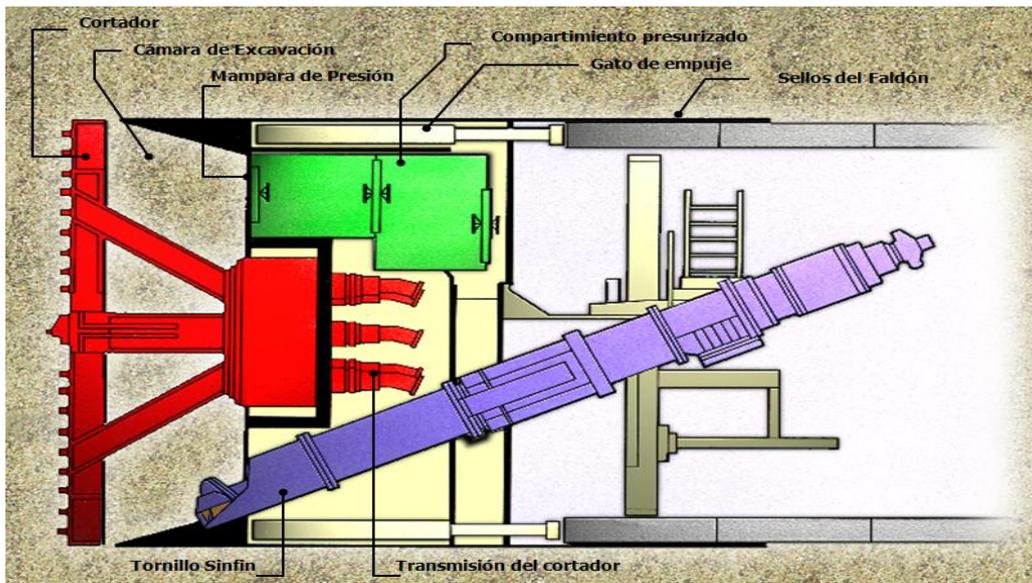


Figura 14. Esquema de Escudo de Presión de Tierra Balanceada (EPB).

La presión del frente se consigue controlando la entrada y salida de material de la cámara, mediante la regulación de la rotación del tornillo y la velocidad de avance. Como el cilindro exterior tiene un diámetro superior al del anillo de dovelas, una vez la máquina ha avanzado queda un hueco entre la excavación y el sostenimiento, de unos 15-20 cm, que debe ser rellenado rápidamente con mortero para evitar la subsidencia en superficie. Para evitar que el mortero entre en la zona del escudo y éste quede atrapado, se dispone en cola de las juntas de grasa, tres filas de cepillos de acero entre las que se inyecta grasa consistente para conseguir la estanqueidad.

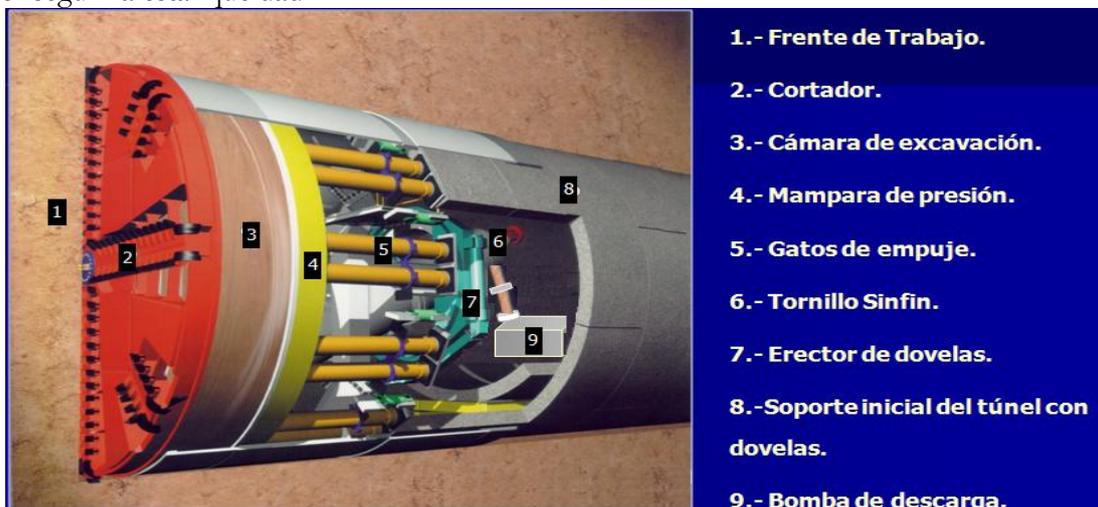


Figura 15. Principales componentes de un Escudo de Presión de Tierra Balanceada (EPB).

Hidroescudos.

Son adecuados para terrenos constituidos por arenas sueltas o gravas arenosas, que dificultan el amasado. Son similares a los escudos de presión de tierras, pero presentan dos grandes diferencias:

La presión de tierras en la cámara se logra mezclando el terreno excavado con un lodo de agua y arcilla (slurry). Consiguen un excelente control de la presión, y el coste energético es mucho menor. La extracción del material se hace mediante una tubería, bombeando la mezcla hacia el exterior. La desventaja de este tipo de máquinas es el tratamiento del terreno extraído, mezclado con los lodos, que exige plantas de gran superficie para la separación de las partículas más finas.



Figura 16. Vista de un Hidroescudo.

Con lo descrito con anterioridad, en la construcción de Túneles construidos en suelos blandos, las máquinas que se utilizan son del tipo EPB, que es el caso de construcción en el que se tratara con una mayor particularidad en los siguientes capítulos.

1.2.6.- EXCAVACIÓN.

Para poder realizar la excavación del túnel se emplea un escudo del tipo EPB este tipo de escudo conserva la estabilidad del terreno y permite colocar el soporte inicial (revestimiento primario) formado por dovelas prefabricadas de concreto armado. Para la estabilización aprovecha el mismo suelo en proceso de excavación el cual es convenientemente presurizado para tal fin.

El ciclo de la excavación inicia cuando el escudo avanza en dirección del trazo del proyecto, para lo cual se cuenta con un sistema de guiado automatizado. El avance se controla desde una cabina y es ahí donde se cuidan los distintos parámetros técnicos y mecánicos de funcionamiento.

El proceso constructivo de un túnel con escudo EPB se puede desglosar en una serie de procesos parciales que a continuación se enlistan:

- 1.- Avance de escudo.
- 2.- Evacuación del material producto de excavación.
- 3.- Inyección de mortero.
- 4.- Montaje de anillo.
- 5.- Suministro de insumos al frente.

- 6.- Guiado del escudo.
- 7.- Mantenimiento preventivo del escudo.
- 8.- Correlación del avance del escudo con el comportamiento del terreno.

A continuación y de manera muy general se describe cada uno de los procesos.

Avance de escudo.

Es propiamente el empuje de la máquina que se define como la fuerza aplicada al escudo por medio de cilindros hidráulicos (gatos), cuyo plano de reacción de dicha fuerza es el costado del último anillo colocado, el desplazamiento es horizontal y hacia el frente. La velocidad es variable pero generalmente esta del orden de los 40-50 mm/min y es regulada con el flujo hidráulico que controla la presión de los gatos de empuje del escudo. Al realizar el corte del suelo y este último entra a través de las ranuras del disco cortador al interior de la cámara frontal es de suma importancia el respetar los parámetros establecidos de presión frontal.

Evacuación del material producto de excavación.

La evacuación del material de rezaga alojado en la cámara frontal del escudo se realiza por medio de un tornillo sinfín así que de esa manera el material es transportado hasta la bomba de lodos dispuesta en el carro No. 1 y desde este punto el lodo es bombeado a través de una tubería de 8" hasta la superficie donde previamente se construye una mampara de recepción de lodos, una vez que el material se encuentra ahí es transportado en camiones hasta un sitio previamente autorizado para su disposición final.

Inyección de mortero.

Esta inyección tiene por objeto rellenar el espacio anular que existe entre el diámetro de la excavación y el diámetro exterior del anillo, con la finalidad de evitar movimientos del terreno que reflejen asentamientos en la superficie. Dicha inyección de mortero se realiza a través de los 4 ductos que tiene el faldón para dicho fin, y se realiza durante el tiempo que dura el avance del anillo.

Para la fabricación de la mezcla de inyección se instala en superficie una planta de inyección cuyos principales componentes son los siguientes:

- a) Agitador vertical
- b) Silos para almacenamiento de cemento
- c) Tolva-bascula para pesado de materiales
- d) Bomba de desplazamiento positivo 3L-10
- e) Recipiente para almacenamiento de agua
- f) Banda transportadora de arena final.

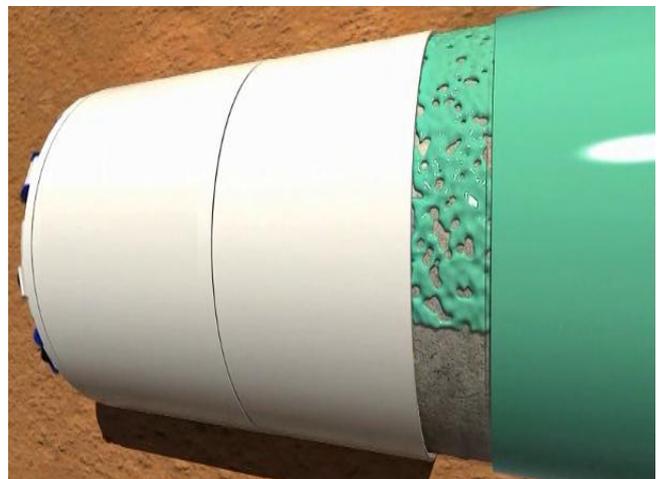


Figura 17. Inyección de mortero

Al término de la excavación de un anillo (1.5 m de avance) se verifican los datos del sistema de guiado, tales como las carreras de cilindros de avance, así como la separación que existe entre el diámetro exterior del anillo y el faldón (estrados), esto con el objeto de calcular el tipo anillo necesario y realizar su correcto montaje. Es importante comentar que existen diferentes posiciones que puede adoptar el anillo quedando definidas por la posición K y que también corresponden con los pares de gatos que tiene el escudo. La definición del tipo de anillo a ensamblar estará en función de los parámetros antes comentados y al trazo del túnel.

Previo al ensamble del anillo se revisa que el anillo no tenga daños (despostillamientos, o insertos de izaje y conexión defectuosos, etc., así como la correcta colocación del sello perimetral)

Para realizar el montaje se realiza lo siguiente:

Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se colocara la primera dovela. La dovela es tomada con el brazo erector y se alinean los pernos de unión con los insertos guía alojados en el anillo anterior de esta manera se lleva hasta su sitio. Una vez colocada la pieza se vuelven a accionar los gatos y se retira el brazo erector, dicha actividad se repite hasta colocar las 6 dovelas que conforman el anillo.

Durante todo montaje de anillo se busca que las dovelas se traslapen de acuerdo a su construcción geométrica para poder llevar correctamente la elevación, alineación y dirección del escudo y así evitar que se formen líneas de falla longitudinales por la posición repetitiva de los anillos.

Suministro de insumos al frente.

Paralelo al avance del escudo y al ensamble de los anillos se realiza la construcción de una vía conformada por durmientes de madera de 8" X 8" X 1.5 m dispuestos a cada metro y sobre ellos rieles de 60 lbs para el tránsito de una locomotora y bagones que permiten alimentar los materiales necesarios para continuar con el avance, dichos materiales son propiamente los anillos de dovelas, tubería de 2", 3" y 8", lona de ventilación, grasas para cepillos y transmisión del escudo, cable de 10kv y en general todo lo necesario para continuar con el avance del túnel. Adicionalmente se coloca el sistema de vía por la que se desplazan los 5 carros que conforman el tren de equipo del escudo.

Guiado del escudo.

El control topográfico del sistema de guiado del escudo EPB consiste en posicionar el equipo topográfico eléctrico y electrónico componentes de este sistema en el sitio adecuado para que conduzca la maquina por el eje del proyecto y al mismo tiempo se manifiesten las desviaciones horizontales y verticales que va presentando el escudo a medida que avanza.

Mantenimiento preventivo del escudo.

Los trabajos de mantenimiento deben llevarse a cabo para garantizar el funcionamiento seguro y confiable del escudo y reducir así los tiempos de parada.

Se puede prevenir un mal funcionamiento mediante su manejo adecuado mantenimiento con lubricantes apropiados y a través de la supervisión de la máquina durante su funcionamiento.

Los trabajos de mantenimiento están agrupados conforme a intervalos de tiempo y clasificados por grupos constructivos.

1.2.7.- REVESTIMIENTO.

Los criterios usuales por los que se puede recurrir al revestimiento son estructurales o de impermeabilización, en muchas ocasiones por ambos.

Regularmente, en la construcción de un Túnel en suelos blandos, dependiendo la función final de la obra se puede prescindir del revestimiento definitivo por ejemplo en la construcción de un sistema de transporte, sin embargo por ejemplo en una obra que sirva para conducir material en estado líquido como pueden ser un drenaje profundo, el revestimiento consta de una cubeta y una capa de concreto armado en el perímetro interior que en parte tiene funciones estructurales y principalmente la impermeabilización del interior del mismo túnel, como se mencionó anteriormente.

A continuación se describirán el proceso constructivo de la cubeta y por otro lado el revestimiento a través de concreto lanzado.

CONSTRUCCION DE CUBETA:

Preliminares

Identificación de zonas de cubeta de acuerdo a los planos ejecutivos.

Una vez definida la zona de cubeta se procede a realizar el trazo y nivelación con la cuadrilla de topografía, de acuerdo a la información plasmada en los planos.

Una vez definida la zona de cubeta, se procede a realizar en forma manual, la limpieza de la zona, retirando basura, alambre etc. Posteriormente se lava con agua a presión para retirar el lodo u otro tipo de material y por último se extrae el agua almacenada con una bomba neumática y/o eléctrica.

Una vez realizada la actividad anterior y con datos topográficos se procede a colocar el armado en dos lechos (interior y exterior) con varilla del No. 6 (3/4" Ø) como se debe especificar en los planos estructurales correspondientes.

Concluida la actividad anterior, se colocan cerchas de varilla del #6 a cada 2.0 m, soldadas a un ancla de varilla del # 4 (de 50 cm de longitud) que permiten definir el espesor de colado de la cubeta de acuerdo con los datos topográficos. Asimismo se colocan tapones de madera que nos delimita la longitud a colar, de acuerdo a un programa establecido previamente.

Producción de concreto Hidráulico

Para la producción de concreto se cuenta con una planta dosificadora con un rendimiento de 120 m³ / hora. De igual manera, se contará con las calibraciones necesarias y con las cantidades de materiales y aditivos para la correcta elaboración de las mezclas de diseño de concreto.

En cada dosificación de concreto se verificará que al vaciarlo en las ollas revolventoras, se esté incorporando todos los materiales requeridos de acuerdo a la dosificación de diseño y que se dé el tiempo de mezclado de acuerdo a las normas y especificaciones. Posteriormente se realizará en forma aleatoria las pruebas de revenimiento, que deben cumplir de acuerdo al tipo de concreto especificado en el proyecto.

Para el suministro a obra, se contará con las ollas necesarias para garantizar un suministro de acuerdo a la frecuencia requerida en el proyecto.

En cada envío de concreto se contará con las remisiones donde se detallen las características del producto que se esté enviando.

COLOCACION DE CONCRETO HIDRAULICO EN EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO:

Una vez definidas las zonas, se procederá a colocar acero de refuerzo de acuerdo a los planos de diseño, dando el recubrimiento necesario según el proyecto ejecutivo, el acero de refuerzo será colocado en sus dos lechos exterior e interior, posteriormente se realizará el lanzamiento de concreto vía húmeda hasta garantizar un espesor final, para ello se colocarán cerchas con varilla del # 4 a cada 2.0 m. y así garantizar el espesor indicado.

En la colocación de acero de refuerzo se colocará de forma radial anclas, habilitadas con acero de refuerzo para poder garantizar el posicionamiento y colocación del acero de refuerzo, con la separación indicada en los planos del proyecto.

Una vez colocado el acero de refuerzo, se retirará todo el material suelto de la zona, para posteriormente fijar los andamios o plataformas que sean necesarios para la colocación del concreto lanzado.

Se debe verificar que las líneas de suministro de concreto estén correctamente conectadas, para que el concreto se deposite en la tolva de la bomba del equipo de lanzamiento.

Se verificará que el equipo de lanzamiento por vía húmeda, tenga colocadas correctamente las líneas de mangueras, cuerpo de mezclado, y suministro de aire, para el inicio de lanzamiento.

Producción de concreto lanzado

Se contará con las calibraciones necesarias y con las cantidades de materiales y aditivos para la correcta elaboración de las mezclas de diseño de concreto.

En cada dosificación de concreto se verificará que al vaciarlo en las ollas revolventoras se estén incorporando todos los materiales requeridos de acuerdo a la dosificación de diseño y que el tiempo de mezclado este de acuerdo a las normas y especificaciones, posteriormente se realizará en forma aleatoria las pruebas de revenimiento, que deben cumplir de acuerdo al tipo de concreto especificado en el proyecto.

Se contará con las ollas necesarias para garantizar un suministro de acuerdo a la frecuencia requerida en el proyecto.

En cada envío de concreto se contará con las remisiones donde se detallen las características del producto que se está enviando.

Colocación de concreto lanzado vía húmeda.

Una vez que se ha liberado la zona por lanzar, se procede a suministrar la lechada y mortero suficiente de acuerdo a la longitud de tubería que haya hasta el lugar de recepción del equipo de lanzado, atrás de estos dos elementos se contará con una olla de concreto lanzado para poder garantizar una correcta conducción del concreto hasta el equipo de lanzado, las lechadas, morteros y concreto serán enviados con una bomba del tipo Putzmeister o similar que garanticen el envío de la mezcla a la distancia requerida.

Se debe tener una línea de comunicación desde túnel a superficie, y un sistema de radios o teléfonos de la planta de producción de concreto a la planta de bombeo ubicada en un pozo auxiliar o en las lumbreras.

Una vez recibido el concreto se realizará una verificación del revenimiento con el cual está llegando, ya que este debe estar en el orden de 16 ± 2 cm para que en la lanzadora se tenga un revenimiento de 12 ± 2 cm.

Al momento de lanzar la lechada y el mortero se aplica en la superficie por lanzar, durante el lanzado se procurara que la distancia entre la boquilla y la superficie se ajuste de acuerdo a la velocidad de descarga, para lograr un mínimo de rebote, en general la distancia debe estar dentro de los límites de 0.5 a 1.5 m y la boquilla debe permanecer con dirección normal a la superficie por tratar.

El concreto lanzado se aplicará en las capas que sea necesario hasta completar el espesor de proyecto.

La aplicación de concreto lanzado sobre capas de concreto previas, se deberá realizar una limpieza adecuada sin dejar material suelto, la uniformidad y continuidad del concreto colocado se valorará mediante la inspección visual de las muestras. El curado del concreto lanzado se hará con agua o con aditivo, a partir de las 8 horas posteriores a su aplicación y en caso de usar agua mantener la humedad durante un período mínimo de 7 días.

El concreto lanzado ya colocado, debe alcanzar la resistencia a la compresión especificada en el proyecto, el cual se verifica por medio de corazones de 3" de diámetro mínimo extraídas de una artesa de madera, conforme a las pruebas de laboratorio de acuerdo a las especificaciones del proyecto.

Para sacar muestras aleatorias de la calidad del concreto se utiliza una artesa de madera, para su llenado se mantiene firmemente sujeta a la superficie, la artesa se llena de concreto por el lanzador, conservando las condiciones normales de lanzado.

Para el desarrollo de estos trabajos se podrá contar con dos equipos de lanzado por vía húmeda, los cuales serán abastecidos con la bomba de concreto ubicada en superficie, ya que los equipos se colocaran de tal forma que una tolva de distribución este alimentando de concreto los dos equipos.

1.3.- PARAMETROS A MEDIR CON LA INSTRUMENTACION.

Para obtener parámetros dentro de la instrumentación de Túneles construidos en suelos blandos, se subdivide en dos grandes grupos. Estos grupos se refieren primeramente en cómo está afectando la obra al medio es decir en superficie o exterior al túnel; y el otro gran grupo es la revisión de las condiciones de la misma obra, es decir al interior del túnel.

Mediciones en superficie

Estas mediciones permiten detectar oportunamente el desarrollo de condiciones de inestabilidad, o bien deformaciones inadmisibles.

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

Para esta medición se pueden emplear referencias superficiales que consisten en puntos fijos marcados sobre la superficie del terreno colocados sobre el eje del trazo, en secciones transversales y sobre las fachadas de las construcciones vecinas.

- b) Deformaciones horizontales de la superficie del suelo y estructuras vecinas.
Para estas mediciones son útiles los mismos testigos superficiales de las secciones transversales, siendo conveniente que éstos se encuentren alineados, lo que permitirá definir líneas de colimación.

- c) Desplomes de estructuras vecinas.

- d) Deformaciones de la masa del suelo.
Es posible que interese conocer la distribución con la profundidad de la deformación vertical medida en superficie, sirven para medir movimientos horizontales a diferentes profundidades, con lo cual se podrá tener un modelo tridimensional del comportamiento del suelo.

- e) Presión de agua en el subsuelo
Cuando el túnel se encuentra bajo el nivel freático es bastante importante llevar a cabo observaciones de los niveles piezométricos en las áreas vecinas a diferentes profundidades, Estas mediciones sirven para definir el estado inicial de esfuerzos efectivos, así como los cambios que ocurran durante la construcción, sea porque interese valuar la presión de poro alrededor del túnel y el consecuente hundimiento del suelo por consolidación, o bien porque se tenga planeado abatir el nivel freático para evitar filtraciones de agua hacia el túnel, y sea necesario garantizar que esto se logre.

Mediciones en el interior del túnel

Los aspectos que interesa conocer en este caso son: la reducción de dimensiones de la sección del túnel, los esfuerzos actuantes sobre el revestimiento, la distribución de las deformaciones en la masa del suelo debido a la excavación, la extensión de la zona plastificada y la altura de la zona de alteración sobre la clave.

- a) Deformaciones del revestimiento del túnel

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

b) Medición de cargas en el revestimiento.

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

c) Medición de deformaciones en el revestimiento definitivo.

1.4.- LUGARES ESTRATEGICOS A INSTRUMENTAR.

Dependiendo la obra y su magnitud es que se determinan los lugares en donde se realizara la Instrumentación Geotécnica. Regularmente se divide en zonas Geotécnicas marcadas y se realizan estaciones tipo al exterior del túnel y se trata de correlacionar los instrumentos con los que se colocarán en el interior del mismo.

Sin embargo se tendrá un cuidado especial, cuando la excavación pase por lugares de vital importancia, como pueden ser Puentes, edificios relativamente altos (más de 10 metros, y dependiendo el tipo de terreno), cruces o intercepciones con instalaciones de tipo eléctrico, sanitario o petroquímico.

Y sin lugar a dudas, cuando la excavación cruce un cauce, es una zona delicada, ya que esta puede tener diversos problemas como pueden ser filtraciones, o fallas de la propia excavación.

De vital importancia es también la auscultación Topográfica, que de igual forma debe de tener unas zonas determinadas a monitorear, y por supuesto poder relacionar toda la información de manera que pueda cumplir los objetivos y razón de ser de la instrumentación Geotécnica; este objetivo es como se mencionó con anterioridad un rediseño de distintos componentes de la obra, así como la seguridad de la misma y en su momento la corrección o prevención de cualquier tipo de eventualidad.

Se debe de tener cuidado además de que la información generada sea de vital importancia y de utilidad para el proyecto, por lo que antes de tener algo definido, se realizan los siguientes pasos:

- Realizar una revisión del perfil estratigráfico y determinar las zonas Geotécnicas.
- Investigar si se cuenta con información que pueda ayudar a determinar puntos de interés para la colocación de instrumentación.
- Realizar una inspección en superficie para determinar estructuras o zonas de interés, que pudieran presentar algún problema o riesgo en la construcción de la obra.
- Con la información anterior determinar preliminarmente las zonas a instrumentar.
- Visita a campo para ver la factibilidad de las instalaciones, monitoreo y seguimiento.
- Proponer definitivamente los lugares a instrumentar.
- Realizar un plan de trabajo y realización de Proyecto ejecutivo o especificaciones, según el caso.

Capítulo 2. Descripción general de aparatos de medición comúnmente empleados en túneles construidos en suelos blandos con ayuda de escudo tipo EPB.

2.1.- TECNOLOGIAS EMPLEADAS EN LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.

Desde tiempos antiguos en las obras de infraestructura siempre se ha tenido la inquietud de tener un control acerca de la estabilidad de las estructuras, de los medios vecinos y las afectaciones en general. Es decir la instrumentación siempre ha tenido un papel importante, y siempre se han tenido claros los objetivos y los parámetros para lograr este objetivo; en realidad aquí lo interesante es la evolución que se ha tenido en el tiempo para lograr dichos objetivos.

La evolución de la tecnología nos permite en estos momentos poder determinar con mayor exactitud los parámetros que desde la planeación se establecieron y, por supuesto la información determinada debe de ser analizada de una manera responsable ya que dicha información es muy valiosa; pero sin duda alguna el criterio con el que se utilice es lo que realmente le da el valor para poder determinar los cambios en los diseños, o en su caso las medidas correctivas o preventivas.

A continuación se describen las tecnologías más comunes y utilizadas en el mundo, es de igual forma responsabilidad del Ingeniero utilizar la más conveniente para cada proyecto.

2.1.1.- AUSCULTACIÓN GEODÉSICA.

La auscultación topográfica se puede definir como un control geométrico intenso de alta precisión en una estructura. Control geométrico que se puede aplicar tanto al desplazamiento de una ladera como al provocado en el asentamiento de una estructura de un edificio. Los motivos que pueden provocar los movimientos pueden ser naturales o por la acción de la mano del hombre de forma directa o indirecta.

El principal y más importante objetivo es obtener la información necesaria para comprobar el comportamiento y detectar cualquier indicio sobre condiciones adversas en cuanto a motivos, así como hacer una valoración continua de la seguridad.

En particular la Auscultación Geodésica se realiza mediante un equipo topográfico preciso (estación total) y con una visual a puntos materializados mediante dianas, miras, prismas... colocadas estratégicamente, se obtienen lecturas sobre los puntos que nos informan del desplazamiento que sufre la estructura, ladera, etc.

Es recomendable que el punto o puntos sobre el que se realicen la colocación de la bases no sufran alteraciones de ningún tipo. Resulta evidente que siempre se debe colocar con la mayor precisión posible, la base de estación deberá permitir que en cada lugar donde se coloque, se reduzcan al máximo posible errores de estación, por lo que se debe materializar

la base mediante, por ejemplo, un bloque de concreto dispuesto para colocar la instrumentación, de esta forma se reducirá enormemente el error de estación.



Figura 18. Estación total típica.

La metodología a seguir en cada observación consiste en la medición de ángulos en las visuales a los puntos desde la base. Se puede apoyar de varios puntos fijos dependiendo de la estructura a auscultar, pues resultará difícil tener acceso visual de toda la obra en un solo punto. Hay que tener en cuenta que el número de estaciones ha de ser mínima para no acumular errores. La comparativa de los resultados obtenidos en cada visita a la obra arrojará el movimiento sobre la estructura sometida a estudio.

Se trata de operaciones lentas y tediosas, pues conllevan unas condiciones meteorológicas adecuadas que no excedan en temperaturas extremadamente altas y bajas que puedan descompensar ligeramente los equipos, a su vez la refracción atmosférica y la reverberación influyen de manera negativa. En el caso de utilizar una estación total el valor obtenido será en X, Y, Z.

2.1.2.- CUERDA VIBRANTE.

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

A diferencia de las galgas extensiométricos la frecuencia de vibración en un piezómetro de cuerda vibrante no se ve afectada por los cambios en la resistencia de la cuerda. Esto significa que la penetración de agua, o la variación de la temperatura no afectan la señal de salida.

Los sensores de cuerda vibrante están basados en la Teoría de cuerdas, los objetos básicos no son partículas que ocupan un solo punto en el espacio, sino cuerdas unidimensionales. Sus cabos pueden estar sueltos o unidos, formando bucles cerrados. Tal como las cuerdas de un violín, las de la teoría de cuerdas presentan ciertas figuras de vibración, o frecuencias resonantes, cuyas longitudes de onda se adaptan de forma precisa en ambos extremos.

Pero así como las diferentes frecuencias resonantes de un violín dan origen a diferentes notas musicales, las diferentes oscilaciones de una cuerda dan lugar a diferentes masas y cargas de fuerza, que son interpretadas como partículas fundamentales. En grandes líneas, cuanto menor es la longitud de onda de la oscilación, mayor es la masa de la partícula correspondiente.

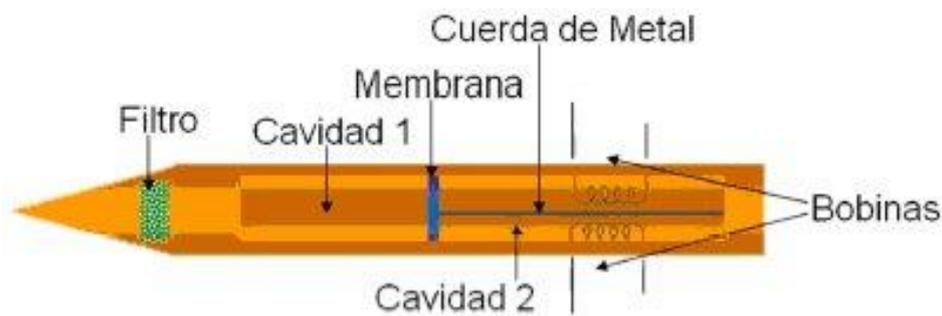


Figura 19. Esquema de un Piezómetro de cuerda vibrante.

El sensor está constituido por:

- Una cuerda de acero que está sujeta en un extremo a una pared inmóvil y en el otro a una membrana a través de la cual se percibe el cambio en la presión externa.
- Un filtro de cobre o cerámica que está instalado en el extremo o punta del sensor, por donde el agua entra a la membrana.
- Una o dos bobinas (dependiendo de la versión) que tienen como función excitar la cuerda mediante una frecuencia determinada, mientras la otra capta la frecuencia de vibración de la cuerda y convirtiéndola en corriente.

La menor frecuencia de oscilación transversal de una cuerda o hilo tenso vibrante viene dada por:

$$f = \frac{1}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{F}{m}}$$

Dónde:
l: es su longitud
F: la fuerza mecánica al que está sometido, y
m: la densidad longitudinal de masa (masa/longitud).

Si la posición de uno de los extremos se hace variable, un soporte móvil, el periodo de oscilación es directamente proporcional al desplazamiento. Si se aplica una fuerza, la frecuencia de oscilación resultante será directamente proporcional.

Un sensor instalado permitirá el paso de agua a la cavidad 1, a través de un filtro instalado en su punta (lo que impide el paso de partículas). Cuando el agua está en el interior, ejerce una presión sobre la membrana la cual se desplaza hacia la cavidad 2 en proporción a la presión ejercida, modificando la elongación de la cuerda. Vale mencionar que la cavidad 2 se encuentra sellada para evitar el paso de agua o de partículas que pudieran afectar las características de la cuerda.

En síntesis, el sensor está compuesto de un cuerpo, que puede tener diferentes formas y un elemento sensor. Este sensor tiene una cuerda vibrante unida a una membrana muy sensible a la presión, que sometida a la carga de la presión que va a medir, se comba, mediante la cual se destensa la cuerda vibrante pretensada. Las señales de frecuencia de la cuerda vibrante así creadas se pueden medir y son proporcionales a la presión aplicada. La frecuencia de la señal se trasmite por cable a las unidades de lectura, que pueden ser un modelo portátil o una estación automática de adquisición de datos.

No se puede hablar de los sensores de cuerda vibrante, como componentes electrónicos básicos, sin ver cómo se pueden adaptar a un sistema de adquisición y control. Estos adaptadores, como acondicionadores de señal, para estos sensores son los amplificadores industriales en sus diferentes estructuras de montaje, pasando por filtros o por procesadores analógicos, convirtiendo estas señales de analógico a digital para posteriormente ser procesados los datos con un Microcontrolador y actuando por medio de las salidas lógicas del procesador o por medio de un convertidor digital a analógico.

Para obtener las lecturas del sensor, producto de los cambios de presión, se emplea un dispositivo electrónico que envía una señal de baja frecuencia a través de la bobina 1 que por el efecto de inducción electromagnética (donde todo campo eléctrico variable induce un campo magnético sobre un conductor eléctrico inmerso, al mismo tiempo, todo campo magnético variable ejerce un campo eléctrico sobre un conductor eléctrico) produce sobre la cuerda de acero oscilaciones en su frecuencia de resonancia. Estas oscilaciones inducen sobre la bobina 2 una corriente eléctrica que es llevada al dispositivo electrónico a través de la bobina de lectura.

En los sistemas de excitación por frecuencia y lectura de la frecuencia de resonancia, normalmente se dispone de un sistema auto-oscilante en el que la señal detectada es amplificada y realimentada a un excitador electromagnético. A veces el propio excitador actúa alternativamente como detector, para que la frecuencia de oscilación no dependa de las características eléctricas del excitador, el factor de calidad Q del resonador mecánico debe ser del orden de 1000 o superior (alta fidelidad). El Circuito de acondicionamiento de señal consta de varias etapas:

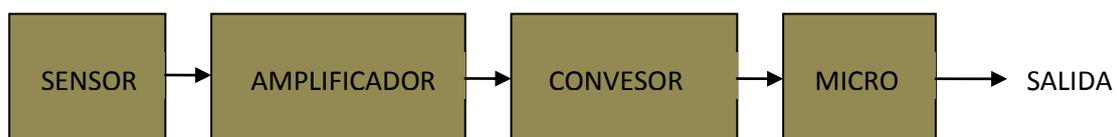


Figura 20. Diagrama de bloques simplificado de la arquitectura de un transmisor de cuerda vibrante

Etapa de Amplificación, Se utiliza generalmente el amplificador de instrumentación, ya que tiene como objetivo filtrar la señal de todo el ruido modo común que se le puede introducir al circuito y adecuar la señal necesaria para la entrada al conversor, normalmente se maneja una ganancia que esta entre 1y 10000. Otro modo de realizar esta etapa del acondicionamiento es diseñando un filtro que se considera como un selector de frecuencia, porque el permite elegir o pasar solo una determinada banda de frecuencias de entre todas las frecuencias que puede haber en el circuito, este circuito tiene una ganancia de 1 o 0dB, para la frecuencia resonante, para las frecuencias de corte superior o inferior la ganancia aumenta o disminuye en 0.707.

Circuito de conversión, Con el transcurrir de los años la transmisión 4-20mA, ha sido aceptada como una técnica ESTÁNDAR DE TRANSMISIÓN de información entre el punto del sensado y el área de control, esto como un medio análogo ya que emplea la variable corriente análoga para tal fin. Inicialmente los datos son extraídos del proceso mediante un examen analítico e interpretación, diseñado en función de una señal de entrada de 10mV y de alta ganancia para que la salida sea lo suficientemente grande. Al final se entrega una señal de pulsos cuadrados no bipolar con una amplitud de aproximadamente 4Volts, para que de esta manera sea leída en los niveles TTL. Luego de generarse una apropiada interpretación el siguiente paso es el tomar una decisión sobre la acción apropiada. Finalmente la acción necesaria podrá ser implementada.

La salida de esta etapa es una señal de pulsos cuadrados con la misma frecuencia de oscilación de la cuerda vibrante. La idea de digitalizar la señal y colocarla en valores de voltaje TTL, es para acondicionarla a la entrada de lectura (puerto) del microprocesador (PIC) que realizará el procesamiento de la data.

Procesamiento del microprocesador, en la actualidad, generalmente son empleados los PIC, por su versatilidad, economía y alto rendimiento. El puerto del PIC esta configurado de tal forma que lea los flancos de subida del pulso. Con esta etapa se garantiza que el acondicionamiento de la señal sea el idóneo para las etapas subsiguientes. Generalmente configurado para permitir la correcta visualización en el LCD (pantalla de cristal líquido) después de procesar los datos que le entrega la etapa de transmisión.

2.1.3.- SISTEMAS MICRO ELECTROMECANICOS (MEMS).

Los MEMS, también conocidos como microsistemas, son definidos típicamente como dispositivos microscópicos diseñados, fabricados, y utilizados para interactuar o producir cambios dentro de un ambiente controlado. Estos pequeños y más sofisticados dispositivos que piensan, actúan, miden y se comunican, están remplazando a los dispositivos actuales tradicionales en muchas aplicaciones.

El uso de microsistemas ofrece un menor consumo de potencia, alto desempeño, peso reducido y un costo más bajo que los dispositivos utilizados actualmente. La técnica de fabricación “batch” (Malshe et al, 1999) reduce los costos de ensamble y manufactura, reduce el tamaño y su peso lo que resulta en menos consumo de potencia e incrementa la flexibilidad del diseño de sistemas. Reduciendo el tamaño y peso de un dispositivo permite

que puedan usarse múltiples componentes en serie o paralelo para aumentar la funcionalidad, capacidad y fiabilidad del dispositivo.

Los microsistemas se pueden categorizar en seis distintos tipos:

Sensores son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios e interactuar con el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.

Actuadores son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostáticamente o térmicamente.

MEMS RF son una clase de dispositivos usados para transmitir alta frecuencia, es decir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores (switches), capacitores, antenas, etc.

MEMS ópticos son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.

MEMS para microfluidos son dispositivos diseñados para interactuar con fluidos. Dispositivos como bombas y válvulas se han diseñado para trabajar con pequeños volúmenes de fluido.

Bio MEMS son dispositivos que, como muchos de los MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Dispositivos como éstos son diseñados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc. y pueden usarse para suministrar medicamentos u otro análisis médico en sitio. Estas seis áreas representan aplicaciones totalmente diferentes de dispositivos MEMS que actualmente se encuentran en uso o en desarrollo para aplicaciones comerciales o gubernamentales.

Aunque no existe una definición estandarizada de MEMS, está comúnmente aceptado que se trata de un dispositivo de pequeñas dimensiones con cierto nivel de autonomía, compuesto de elementos activos y pasivos microfabricados y que realiza diferentes funciones (Trimmer, 1996). Estas funciones son esencialmente la percepción, el procesado de datos, la comunicación con el exterior y la acción sobre el entorno. La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluidica. La arquitectura del microsistema incorpora circuitos electrónicos y/u ópticos, generadores de señal y receptores, microsensores, microactuadores y microgeneradores.

Los circuitos electrónicos/ópticos realizan principalmente funciones inteligentes, entre las que se encuentran el procesado de señal, el análisis de datos y las tareas de decisión. A su vez, la acción conjunta de generadores de señal y receptores permite realizar las funciones de comunicación del microsistema. Los microsensores, por su parte, realizan funciones sensoriales de detección y de percepción, mientras que los microactuadores llevan a cabo funciones de adaptación y de acción/reacción. La autonomía del sistema está garantizada

por los microgeneradores que realizan funciones de suministro y de transformación de energía (Janson, 2000).

Como se observa en la Fig. 21, básicamente, MEMS es un sistema conformado por microestructuras, microsensores, microelectrónica y microactuadores. Las microestructuras constituyen el armazón del sistema, los microsensores detectan señales, la microelectrónica procesa la señal y da las órdenes al microactuador para reaccionar.



Figura 21. Componentes de los microsistemas (MEMS). FUENTE: Fujita. 1998

El advenimiento de la era de la microelectrónica avanzada hace dos décadas atrás, marcó el comienzo de una nueva era de la información y las comunicaciones. Se están desarrollando tecnologías multidisciplinarias con el objeto de satisfacer requerimientos cada vez más complejos. En particular, la experiencia en mecánica está siendo transferida, modificada y mejorada a fin de orientar nuevos desafíos. Las tecnologías de la información juegan hoy un rol de liderazgo, y el hardware necesario sigue siendo de naturaleza predominantemente mecánica. Los dispositivos CDROM, DVD-ROM y los discos duros entre otros, integran componentes mecánicos, electrónicos, magnéticos y ópticos, los que deben ser necesariamente ultra pequeños y livianos, a la vez que confiables y robustos (Trimmer, 1996).

A raíz de la significación de estas aplicaciones y del nivel de madurez de la microelectrónica, la investigación ha estado orientada en la última década al “mundo pequeño”, es decir, a las nuevas micro y nano tecnologías. El progreso paralelo de la mecánica y la electrónica ha creado una nueva tecnología, incorporando mecánica y electrónica bajo el nombre de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS), la que se está convirtiendo rápidamente en una de las tecnologías más promisorias, con un potencial aparentemente ilimitado para dominar los desarrollos tecnológicos futuros (Koester et al, 1996). La Mecánica jugará un rol de liderazgo en el desarrollo de nuevas aplicaciones de MEMS, incluyendo artefactos que realizan ya sea funciones básicas, tales como acelerómetros de airbag y micro interruptores de radio frecuencia para comunicaciones inalámbricas o tareas avanzadas, tales como micro giróscopos, visores digitales de micro espejo y pico satélites (Trimmer, 1996).

Estos nuevos sistemas con micro actuadores, micro sensores, y artefactos de control incrustados, pueden proveer evidencia experimental sobre fenómenos de pequeña escala y así verificar principios fundamentales en el microcosmos. Las aplicaciones en micro fluidica contribuyen al suministro eficiente de medicamentos mientras que los BioMEMS están ganando incesantemente el interés de la comunidad de ingenieros y científicos. Los nuevos productos MEMS incorporarán materiales inteligentes avanzados piezoeléctricos, ferroeléctricos o magnetostrictivos con funciones y aplicaciones particulares. Permitirán que micro máquinas “inteligentes” funcionen con desempeños inigualables (Fujita, 1996). En los casos en que la mecánica puede reemplazar a la electrónica, provee funcionalidad superior y no está sujeta a ruido electrónico no deseado. Por ejemplo, los componentes electrónicos clásicos de redes de fibra óptica están siendo reemplazados ahora por interruptores MEMS ópticos que permiten la creación de conjuntos de interruptores en miniatura de alta capacidad que jugarán un rol crítico en el desarrollo de interruptores ópticos de gran escala en redes de fibra óptica futuras (Petersen, 2000).

La producción masiva de MEMS con geometrías idénticas garantiza una funcionalidad consistente y una ejecución exacta de los estándares de diseño. Sin embargo, la confiabilidad de estos artefactos tiene que ser evaluada meticulosamente y este es un requerimiento vital para mayores mejoras y una adopción más general. Deben desarrollarse técnicas experimentales para medir propiedades mecánicas y de materiales para abordar las preguntas críticas y fundamentales de comportamiento constitutivo y de fractura en micro escalas reales de MEMS. El ensayo de materiales y el análisis de tensiones son partes claves de este desarrollo y los métodos experimentales existentes deben ser perfeccionados o rediseñados completamente para armonizar con los desafíos y requerimientos del nuevo tamaño (Trimmer, 1996). Las herramientas necesarias para la visualización de las deformaciones en una escala pequeña ya están disponibles.

Los microscopios de exploración electrónica son instrumentos de alta resolución, mientras que el microscopio de fuerza atómica recientemente desarrollado provee potencia de resolución sin precedentes y una flexibilidad sin paralelos para operar en virtualmente cualquier medio a fin de facilitar las pruebas de materiales bajo una variedad de condiciones (Malshe, 1999). La mecánica computacional y los métodos de elementos finitos han alcanzado el nivel de maduración necesario como para desarrollar nuevas capacidades de CAD (diseño asistido por computador) y modelado para micro artefactos y nuevas y mejores técnicas de fabricación.

Como en la fabricación de semiconductores, los dispositivos MEMS se fabrican habitualmente a partir de obleas de silicio o vidrio. Sin embargo, la tecnología MEMS ha superado sus orígenes en la industria de semiconductores al incluir otras técnicas de fabricación, como el micromecanizado de silicio superficial, micro-mecanizado de silicio en volumen, fotolitografía, deposición y moldeado de plástico (LIGA), y maquinado por electrodescarga (EDM) (Ehrfeld et al, 2000), (Petersen, 1982).

La fabricación específica de MEMS crea características físicas en las obleas quitando capas que se pueden sacrificar debajo de las estructuras mecánicas deseadas (Bustillo et al, 1998), (Kovacs, 1998). El procesamiento de MEMS habitualmente comprende grabados más

profundos y especializados y puede fusionar obleas en una pila para crear un dispositivo multicapa más grande (Ehrfeld et al, 2000). Los dispositivos MEMS suelen también tener características en ambos lados de la oblea. En algunos procesos, se requiere una serie de pasos de grabado para labrar las características deseadas. En otros procesos, múltiples capas de un material polisilicio, generalmente- se depositan en la superficie de una oblea y luego se graban selectivamente, dejando características complejas de múltiples capas en la superficie (Bustillo et al, 1998), (Griffin et al, 2000).

Micro mecanizado	Proceso	Aplicaciones
Substrato	Se "esculpe" el substrato con ataque químicos selectivos	espesor 10 μm Micro válvulas Bombas de fluido Inyectores de tinta Membranas
Superficie	Se añaden materiales sobre la superficie del substrato que son los que se "esculpen"	espesor 5-10 μm Microespejos Micromotores
Alta relación de aspecto	Se realizan moldes con un substrato que luego se rellenan con materiales (Técnica LIGA). Resolución horizontal Micrónica	espesor 1 cm Sensores de gas Acelerómetros Microengranajes

Tabla 3. Tecnicas de fabricación de MEMS

En la Tabla 1 se resumen las técnicas de fabricación más usadas en la tecnología MEMS, se muestran las técnicas de micromecanizado, el proceso de fabricación relacionado, así como algunas aplicaciones específicas desarrolladas para cada técnica.

Ventajas de los dispositivos MEMS

Los MEMS poseen una serie de ventajas frente a los sistemas de mayor tamaño, entre las cuales se encuentran:

- Posibilidad de fabricación masiva con bajo costo.
- Tamaño y peso reducido.
- Consumo de energía reducido.
- Alta precisión y biocompatibilidad.
- Partes mecánicas precisamente diseñadas, las cuales serán más eficientes y durables.
- Micro-materiales con propiedades que les permitan ser más fuertes y ligeros.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápidos, de mayor potencia y funcionalidad.
- Sistemas mecánicos y ópticos más rápidos y complejos. Mayor número de partes, mayor funcionalidad.

- Aprovechamiento de reacciones químicas resultantes de "nuevas propiedades" como es el reducir las dimensiones de trabajo (exposición de mayor número de electrones disponibles para la reacción).

2.1.4.- FIBRA OPTICA.

Durante la década de los 90 hubo varias líneas de investigación con la finalidad de poner a punto un sensor para medir deformaciones (concreto, roca, suelo, etc, ..) basado en las alteraciones que experimenta la transmisión de la luz cuando al atravesar una fibra óptica estándar, ésta sufre alguna alteración, tal como alargamientos, contracciones, etc.

La solución que es comentada a continuación cuenta con una experiencia práctica de más de 6 años en múltiples aplicaciones y empezó a desarrollarse desde 1992 en el laboratorio de materiales del Instituto Federal de Tecnología de Lausana (Suiza), al que posteriormente se incorporaron, que finalmente bajo la firma de Smartec ha dado lugar al desarrollo, fabricación y comercialización de toda una gama de sensores bajo dicha tecnología.

FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS:

De forma muy resumida el sistema de medida se basa en el principio de interferometría de baja coherencia. La luz emitida por un diodo emisor (LED) es lanzada en una fibra monomodo y dirigida hacia el sensor donde se divide a su vez en dos fibras, una de ella "activa" va unida a la estructura de la que se desea medir su deformación, la otra "pasiva" que sirve de referencia. Sendos espejos reflejan dichos haces de luz al final de ambas fibras que son conducidos hacia el analizador, en el cual un espejo móvil ajusta las diferencias de señal entre ambas fibras mediante comparación con las emitidas en la señal origen (Figura 22).

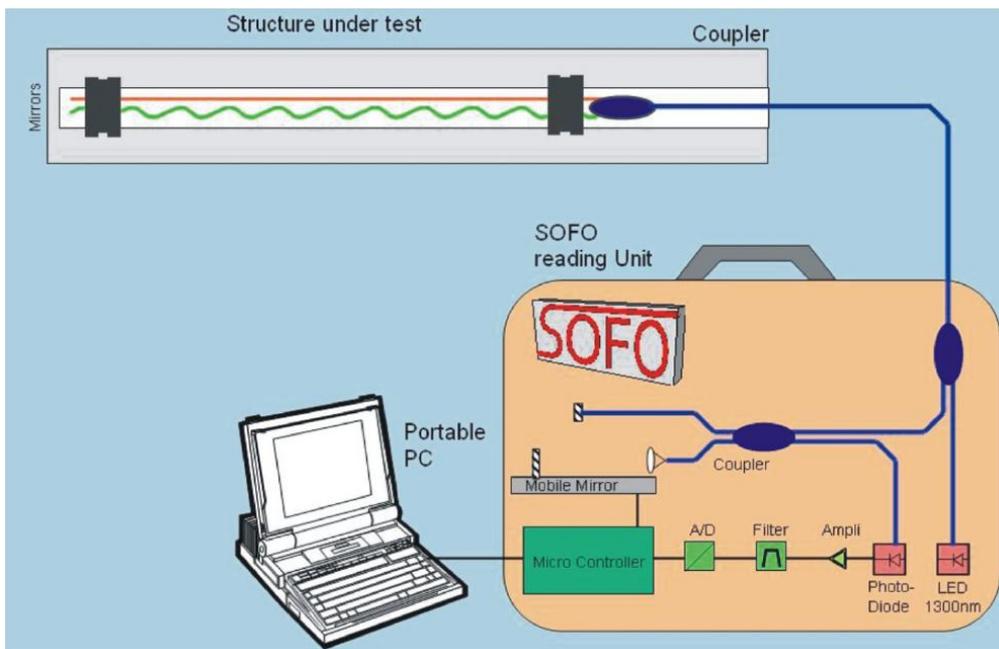


Figura 22. Esquema de sensor y unidad de lectura que utiliza tecnología de fibra óptica. FUENTE: IGME. 2003

Las razones por las que siempre ha sido atractivo desarrollar un sensor de estas características han sido:

- La insensibilidad a los campos de tipo electromagnético y frente a corrosiones de distinta naturaleza.
- Por tener muy poca masa soportan muy bien las vibraciones.
- En consecuencia tienen una gran estabilidad a largo plazo.

En particular la solución presentada se caracteriza además por:

- Autocorregir los cambios térmicos
- No precisar calibraciones
- Poder fabricar sensores desde 20 cm de longitud hasta varias decenas de metros.

Por todo ello puede afirmarse que existen aplicaciones en las que puede resultar muy conveniente su utilización en condiciones extremadamente ventajosas. En general, siempre que se trate de mediciones a largo plazo, en medios sometidos a alteraciones eléctricas o electromagnéticas, o con posibles alteraciones físico-químicas, se puede disponer de un sistema de medida altamente fiable y preciso.

Por otra las características más notables de esta familia de sensores son:

- Resolución: 2 micras.
- Independiente de la longitud del sensor.
- Precisión: superior al 0,2% de la deformación medida.
- Rango de medida: superior al 1% de la longitud del sensor en tracción.
- Tiempo de lectura: inferior a 10 segundos.
- Longitud del sensor: variable entre 20 cm y 10 m en medidas estándar.
- Distancia de lectura: hasta 5 Km.

Su utilización como sensor de medida de deformaciones puede ser muy amplia, pudiéndose emplear siempre que su rango precisión y resolución sean compatibles con el problema planteado. En particular, en todo tipo de medida de deformaciones estructurales en concreto, problemas de fisuración, etc. en puentes u obras de fábrica, presas, edificios, etc; así como en medios rocosos sujetos a estabilización mediante anclajes, bulonados, inyecciones o cualquier otra forma de mejora. Desde el punto de vista de puesta en obra son realmente ventajosos por su menor peso, tamaño y complejidad de instalación; su resistencia a vibraciones o a condiciones duras de puesta en obra, los hacen igualmente atractivos para determinadas aplicaciones.

2.2.- INCLINÓMETROS.

El inclinómetro mide el cambio de inclinación de un tubo que se coloca en una perforación y de esta manera se calcula la distribución de los movimientos laterales, En esta forma se puede determinar la profundidad de la superficie de falla y la dirección y magnitud de los desplazamientos.

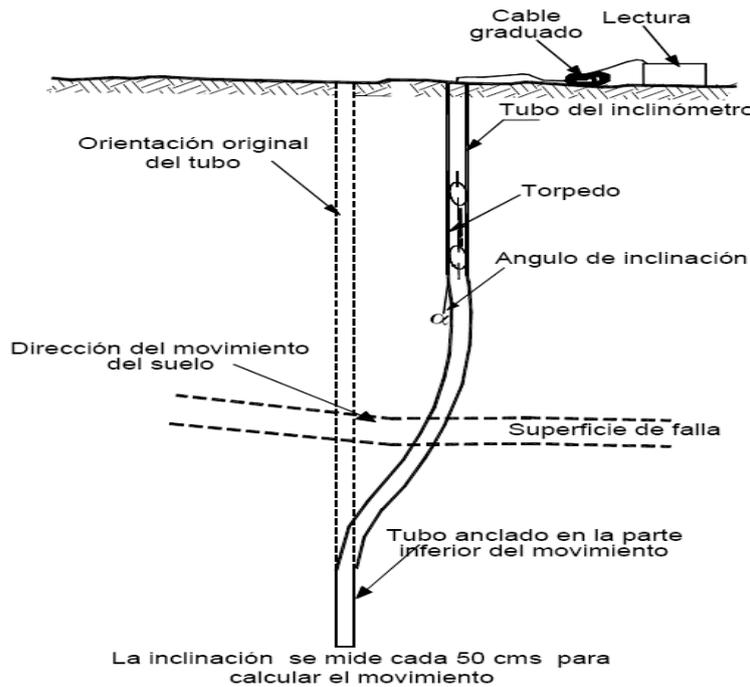


Figura 23. Esquema típico de un sistema de Inclinómetro.

Un sistema de Inclinómetro está compuesto por cuatro partes principales:

- Un tubo guía de plástico, acero o aluminio instalado dentro de una perforación. Este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora. Generalmente se utilizan diámetros de tubo entre 1.5 y 3.5 pulgadas.
- Un sensor portátil el cual está montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos acelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento.
- Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. Generalmente el cable está graduado para control superficial. El cable tiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones y los cables eléctricos se encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene unas marcas para medir profundidades. Estas medidas están relacionadas hasta la mitad de la altura del torpedo. Superficialmente el cable se maneja con una polea, el cual tiene unas tenazas para sostenerla.
- Un equipo de lectura en la superficie que sirve de proveedor de energía recibe las señales eléctricas.

El equipo de lectura es compacto y sellado contra la humedad. La unidad puede también realizar chequeos y revalidar la información. En oficina, los datos del inclinómetro se descargan a un computador.



Figura 24. Vista de un equipo para medir Inclinómetros.

Actualmente estos aparatos utilizan servo-acelerómetros con fuerzas balanceadas de tipo electromecánico (MEMS), las unidades de lectura, incorporan tecnología Bluetooth, para la comunicación con el servo-acelerómetro.

Comúnmente tienen un rango estándar de $\pm 53^\circ$, y una resolución de ± 0.025 mm/500 mm.

2.3.- EXTENSÓMETROS.

Los extensómetros o medidores de deformación vertical miden el aumento o disminución de la longitud de un sistema de sensores que conecta varios puntos que están anclados dentro de una perforación y cuya distancia de separación es aproximadamente conocida. Generalmente el fondo debe estar en suelo o roca dura y estable.

Los extensómetros son muy útiles para determinar movimientos de la superficie de falla. El sistema es simple y permite mediciones frecuentes con facilidad.

2.3.1.- EXTENSÓMETROS DE BARRAS.

El extensómetro de barras es un sistema de medición empleado para registrar movimientos verticales del subsuelo vecino. Está compuesto principalmente por barras de acero inoxidable de diferentes longitudes protegidas con tubería de PVC, con anclas en su extremo inferior y con un dispositivo de lectura en el extremo superior, éste último está compuesto de un cabezal cuya superficie plana metálica sirve como referencia fija para medir los desplazamientos de las barras empleando un micrómetro de precisión.

Se componen de tres elementos básicos:

- Perforación a. El tipo de anclaje groutable. Y un equipo especial se requerirá para la perforación. Por lo general, el número de anclajes se encuentra entre uno y seis.
- Bielas y la tubería. La barra estándar está hecha de barras de $\frac{1}{4}$ de pulgada de acero inoxidable, recubierto con tubos de PVC CED 40. Las secciones de tubo de acero inoxidable son unidas para formar una cadena continua. varillas de fibra de vidrio también se puede utilizar, pero su módulo de más alto puede conducir a una reducción de precisión en aplicaciones en alta resolución, ($> 0,1$ mm). El ancla está diseñada para ser expuesta durante la excavación de túneles para que la posición de la parte inferior de anclaje en relación con la clave del túnel pueda determinarse con precisión.

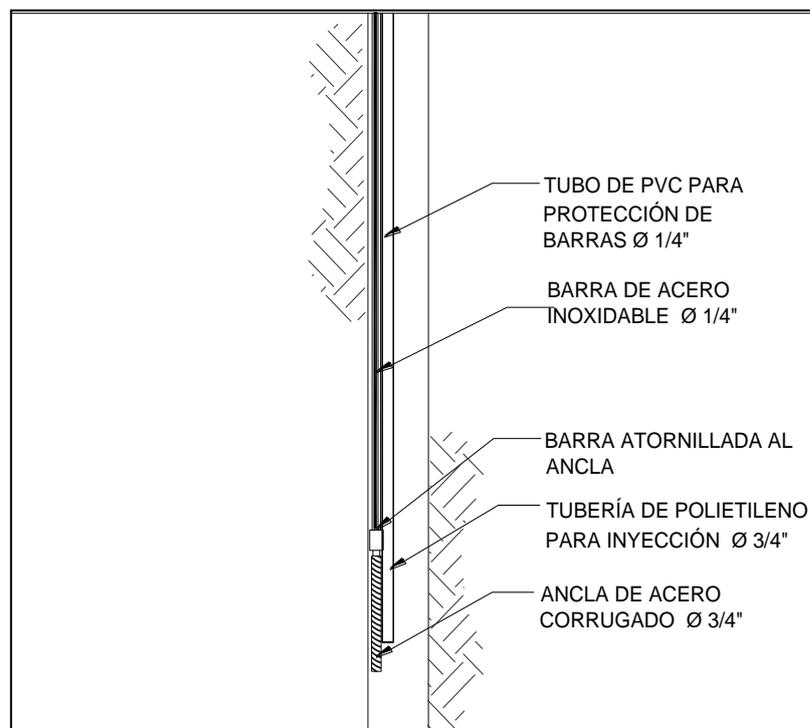


Figura 25. Ancla atornillada a la barra de acero, de un sistema de extensómetro.

- Cabeza ensamblada del Extensómetro. La cabeza puede ser diseñado para empotrar en una sección ampliada del pozo, o generalmente, tendrá una brida o de acoplamiento para la colocación de una columna de lechada en la boca del barrenos. Podrá establecerse para la lectura manual o electrónica, o ambas. La lectura manual tendrá un rango de 50 mm.



Figura 26. Ensamble de una cabeza de extensómetro de barras.

2.3.2.- EXTENSÓMETRO CON TUBERIA PARA INCLINOMETRO.

También conocido como Extensómetro Magnético, es un sistema que permite medir tanto movimientos verticales como horizontales en un mismo barreno, del subsuelo vecino al mismo.

El sistema doble se compone de un extensómetro el cual consta de un anillo magnético de referencia localizado en la parte inferior de la tubería, así como de un juego de sensores magnéticos denominados “arañas magnéticas” colocadas a distintas elevaciones y por lo regular a la mitad de la longitud de cada tramo de tubería, éstas se anclan al suelo, lo que permite medir con mayor precisión el movimiento vertical del suelo vecino.

La tubería en la cual se sujetan las “arañas magnéticas”, es la correspondiente a la utilizada en los sistemas de inclinómetros convencionales, lo que permite la medición de los desplazamientos horizontales.

De esta manera, el inclinómetro estará compuesto por tramos de tubería tipo Glue- Snap ABS de 3.05 m de longitud, la cual contiene en su cara interior cuatro ranuras longitudinales alineadas en dos planos ortogonales, los tramos de tubería estarán unidos mediante coples telescópicos de 0,605m de longitud que podrán absorber los movimientos verticales del suelo.

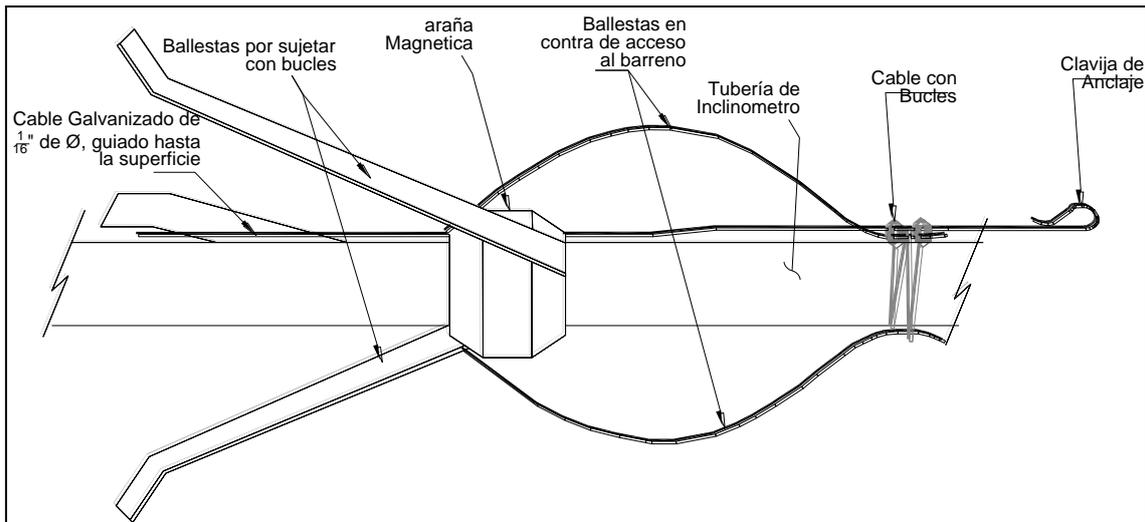


Figura 27. Esquema de araña magnética.

2.4.- PIEZOMETROS.

La presión de poros se puede monitorear utilizando excavaciones de observación o piezómetros, los cuales pueden ser de tubo abierto, o de cable vibratorio. El tipo de piezómetro a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y su precisión.

2.4.1.- PIEZÓMETROS ABIERTOS.

Los Piezómetros son aparatos cuya función es medir la presión neutral en el suelo en un punto determinado, a una cierta profundidad. El principio con el que trabajan es, simplemente, el hecho conocido según el cual la presión que pueda existir en el agua en el extremo inferior de un tubo puede equilibrarse con una cierta columna de agua actuante en el tubo.



Figura 28. Bulbo poroso de Piezómetro abierto.

Un Piezómetro es, pues, un tubo con extremo inferior poroso que se coloca en el suelo a la profundidad que se desea medir la presión en el agua. Este sistema consta de una celda porosa que está constituida por un sistema de dos tubos perforados que en medio de ellos tiene arena silica que sirve como filtro, y una tubería sanitaria que servirá para medir la presión hidrostática del Piezómetro. La profundidad del nivel de agua se mide por medio de una sonda que consta de un cable y un elemento detector.

2.4.2.- PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE.

Están diseñados principalmente para mediciones a largo plazo de líquidos y / o presiones de poro en pozos, diques, gasoductos y recipientes a presión.

El instrumento utiliza un diafragma de acero inoxidable y un sensor está conectado a un hilo de cuerda vibrante. En el uso, el cambio de las presiones en el diafragma hace que exista un cambio en la tensión y este se mide con la frecuencia de vibración del elemento de cuerda vibrante. El cuadrado de la frecuencia de vibración es directamente proporcional a la presión aplicada al diafragma.

Dos bobinas, una con un imán, otro con una pieza de tipo polo, se encuentran cerca de la cuerda vibrante. En uso, un pulso de frecuencia variable (barrido por frecuencia) se aplica a las bobinas y esto hace vibrar todo el cable, en su frecuencia de resonancia. Cuando termina la etapa anterior de excitación, continúa la vibración y la señal sinusoidal AC eléctrica, en la frecuencia de resonancia, se induce en las bobinas. La presión del agua en el suelo causa un cambio en la deflexión de la membrana, lo que provoca a su vez un cambio en la tensión de la cuerda que puede ser medido a través de su frecuencia de vibración, para lo cual se utiliza una unidad de lectura.

Para evitar daños en la membrana sensible se utiliza un filtro para impedir la entrada de partículas sólidas. Los filtros estándar son de 50 micras de acero inoxidable

Todos los componentes expuestos son de acero inoxidable resistente a la corrosión y, si las técnicas apropiadas de instalación se utilizan, el dispositivo debe tener una vida ilimitada. En agua salada puede ser necesario el uso de materiales especiales para el diafragma. Las unidades portátiles de lectura están disponibles para proveer la excitación, acondicionamiento de señales y la lectura del instrumento.

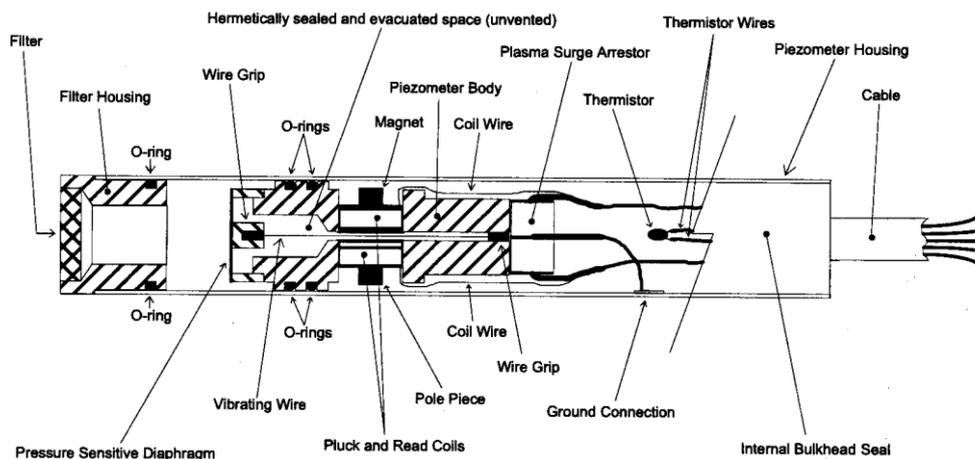


Figura 29. Esquema de piezómetro de cuerda vibrante.

2.5.- CELDAS DE PRESIÓN.

Las celdas de presión de tierra, en ocasiones llamadas también celdas de “presión total” o celdas de “esfuerzo total”, están diseñadas para medir los esfuerzos en el suelo o las presiones ejercidas por el suelo sobre las estructuras. Las celdas de este tipo responden no solamente a las presiones del suelo, sino también a las presiones del agua en el terreno o a las presiones de poro, de ahí el término “presión total” o “esfuerzo total”.

Una celda de presión de tierra típica, consiste generalmente en un par de membranas metálicas circulares de acero inoxidable, flexibles, adosadas a un bastidor circular rígido, dejando entre ellas un espacio estrecho que, durante la fabricación, se rellena luego con un fluido hidráulico. Cuando se aplica una presión exterior en la celda, las membranas se deforman generando una presión similar al fluido hidráulico en el interior de la celda.

Un tubo de acero inoxidable conecta la cavidad de la celda rellena con el fluido, a un transductor de presión, de cuerda vibrante, que convierte la presión del fluido en una señal eléctrica que se transmite por un cable a la unidad de lectura.

En el interior del transductor, una cuerda metálica se sujeta en dos de sus extremos la tapa en el remate de cuerpo metálico del transductor, el otro extremo se fija a un diafragma flexible que es solicitado por la presión del fluido hidráulico en el interior de la celda. La cuerda metálica está sujeta a una tensión inicial de fábrica. La cuerda metálica es excitada mediante un pequeño electroimán al que se le aplica una pequeña corriente eléctrica durante la toma de lecturas, provocando que la cuerda vibre con una determinada frecuencia que depende de la magnitud de la tensión a la que está sometida. Al deformarse el diafragma, la tensión de la cuerda se altera, modificando en consecuencia su frecuencia de oscilación, parámetro que es registrado por la unidad de lectura.

En el interior de la cubierta del transductor de cuerda vibrante, se localiza además un sensor para la medición de la temperatura en la ubicación de la celda (“termistor”), de manera que es posible efectuar correcciones en el cálculo de las presiones, ante los cambios de temperatura ambiental.

Típicamente en la instrumentación Geotécnica de Túneles construidos en suelos blandos se utilizan dos tipos de celdas de presión de tierra, que a continuación se describen:

Celdas de presión de tierra colocadas en un anillo de dovelas

Para el caso de la instrumentación de un anillo de dovelas, las celdas de presión de tierra de cuerda vibrante utilizadas utilizan un rango de medición de 0 a 700 kPa (100 psi).

Las dimensiones de las celdas son:

Diámetro exterior del plato de la celda	150 mm
Altura del plato de la celda	12 mm
Diámetro del transductor	25 mm
Altura del transductor	150 mm

Tabla 4. Especificaciones de celda de presión de tierra, colocada en un anillo de dovelas.

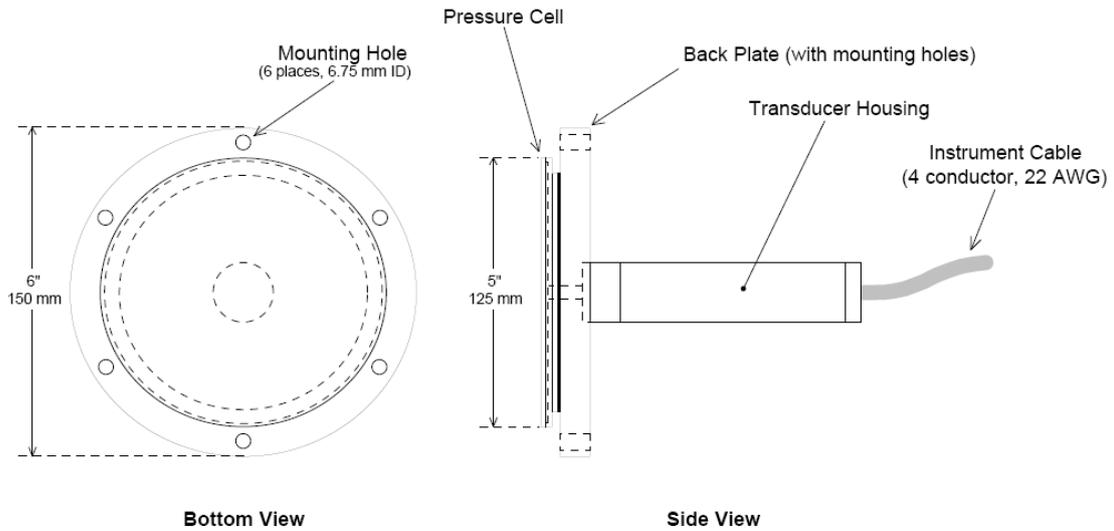


Figura 30. Esquema de presión de tierra, colocada en un anillo de dovelas.

Piezo-celda

La piezo-celda es un instrumento que está diseñado para ser hincado en suelos blandos, permite medir tanto las presiones del suelo vecino como la presión del agua en el suelo, esto para un plano perpendicular al punto de aplicación de la carga o presión. Por lo regular este tipo de dispositivo se hinca de manera vertical, lo que permite medir el esfuerzo horizontal. Este dispositivo está equipado tanto con un piezómetro, como de una celda de presión de tierra, ambos de cuerda vibrante.



Figura 31. Piezo-celda de cuerda vibrante.

2.6.- DEFORMIMETROS.

Deformímetros de cuerda vibrante para concreto

Los deformímetros de concreto son dispositivos que constan de una cuerda vibrante y de una bobina que sirve para obtener la frecuencia de resonancia de la cuerda vibrante; y a partir de esta se obtiene la deformación a la que está sujeto el tubo protector en sus extremos. Junto con la bobina se tiene un “termistor” para medir la temperatura ambiente a la que está la cuerda vibrante, y con la cual se hacen correcciones por temperatura a las lecturas de deformación que se obtengan.

El tubo que contiene la cuerda vibrante está cubierto por un plástico de recubrimiento y a los extremos se aprecia las tapas en forma circular. Mientras que las bobinas y el termistor están cubiertos por una resina de color café y en la que sale el cable de color rojo de cuatro hilos que permite leer la señal de la cuerda vibrante y del termistor, ver figura 32.

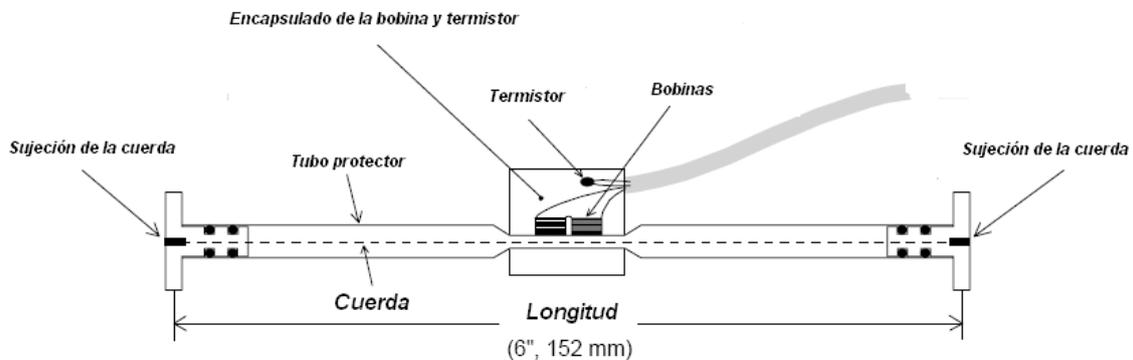


Figura 32. Componentes de deformímetro de cuerda vibrante para concreto.

Deformímetros de cuerda vibrante para acero

El funcionamiento de estas cuerdas vibrantes es igual a las cuerdas vibrantes de los deformímetros para el concreto. La diferencia es el montaje de la cuerda vibrante y la bobina. La cuerda vibrante junto con su bobina, son introducidas en un cuerpo de acero barrenado en dos puntos. El primero barrenado sirve para introducir la cuerda vibrante y el segundo para la bobina con el termistor y su cable de salida. En la figura 33 se muestra como está constituida la cuerda vibrante para acero. La cual se selecciona para la instrumentación del refuerzo de acero del revestimiento definitivo.

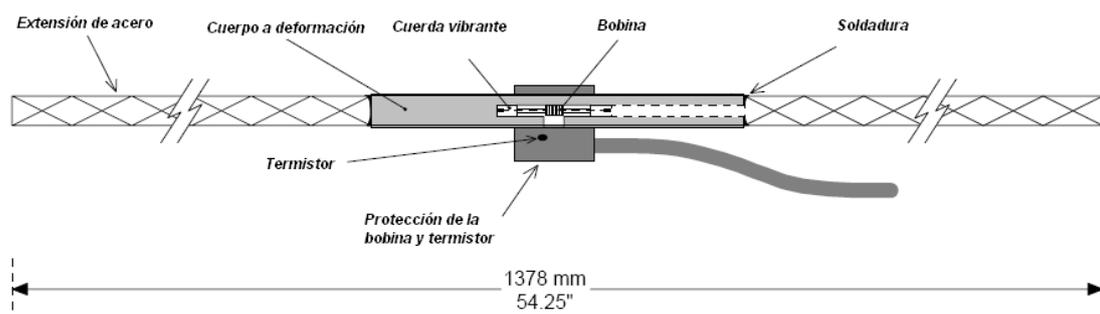


Figura 33. Componentes de deformímetro de cuerda vibrante para acero.

El cuerpo de acero, donde se introduce la cuerda vibrante, tiene soldado a los extremos unas extensiones de varilla. Las extensiones son las que se fijan al acero; ya sea soldando estas partes a las varillas de refuerzo o solamente realizando un amarre. Al fijar las extensiones al acero de refuerzo se busca que sufran la misma deformación que el acero de refuerzo al que fueron fijadas. El cuerpo de acero que contiene la cuerda vibrante evitara los esfuerzos que pudiera ocasionar el concreto y solamente se medirá el efecto de la elongación o contracción del acero de refuerzo.

Para los dos casos anteriores:

El cable que sale de la resina tiene cuatro cables de diferente color y una tierra. En la figura 34 se muestra la distribución de los cables y su correspondencia a la conexión con la bobina y el termistor.

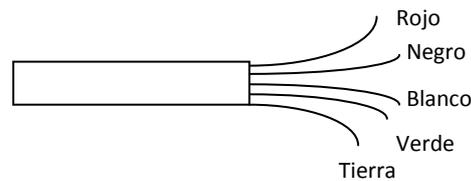


Figura 34. Distribución del cable de conexión de la bobina y el termistor.

2.7.- SISTEMAS DE CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS.

El sistema de convergencias es un sistema que consta básicamente de 6 piezas de sensores de inclinación denominadas Tiltmeters y un Datalogger modelo. Estos sensores de inclinación funcionan mediante un sistema Microelectromecánico (MEMS), Este sistema es una herramienta muy confiable y muy sensible a las deformaciones que se presentan en el anillo que se coloca dicho sistema, dicho sistema se utiliza para medir el ángulo diferencial en la dirección "x" y consta además de un soporte de montaje para que el sistema pueda ser instalado en el anillo de concreto del túnel.

El Datalogger es una memoria física que sirve como almacenadora y procesadora a través de un interfaz digital y que está conectada al sistema de sensores de inclinación, este Datalogger de dimensiones 472 x 431 x 263 (mm), este se colocó aproximadamente a 5 m del sistema de convergencias.

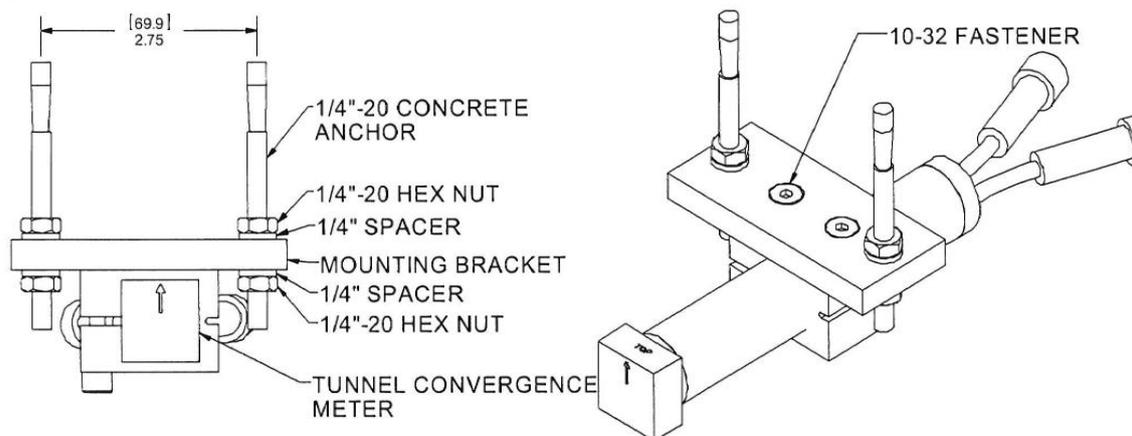


Figura 35. Esquema de los Tiltmeters.

El sistema eléctrico es diseñado por Campbell Scientific y es protegido por una carcasa de fibra de vidrio, el multiplexor Integrado tiene capacidad para la lectura de 16 termistores y 16 medidores de cuerda vibrante. La energía de este sistema es proporcionada por una pila de 12 volts integrada en un extremo del Datalogger.

2.8.- MULTIPLEXORES Y DATALOGGERS.

Multiplexores

La función del multiplexor es ser el medio por el cual se conectan hasta 16 cuerdas vibrantes y sus respectivas señales de deformación y temperatura o 32 señales de deformación a un equipo lector que tenga el medio de generar las señales de control para el multiplexor. En la figura 36 se muestra el diagrama de funcionamiento del multiplexor y en la figura 37 una fotografía de la parte interna del multiplexor.

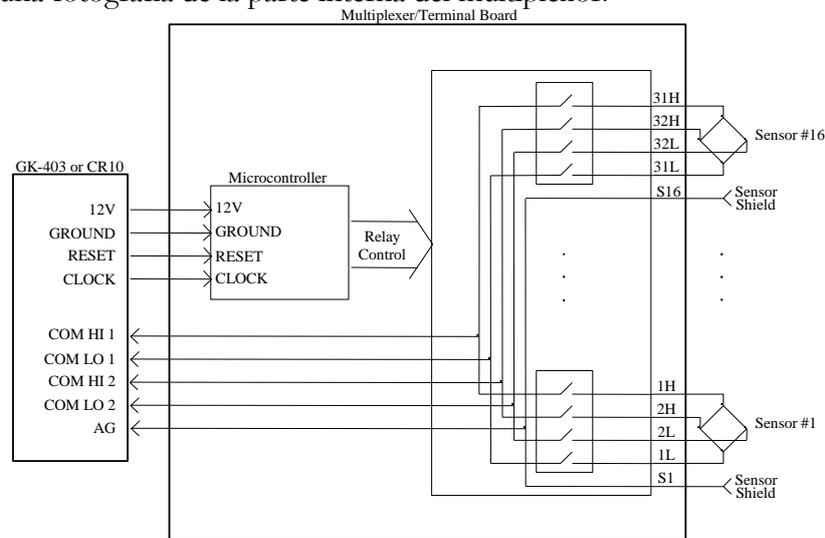


Figura 36. Diagrama de funcionamiento del Multiplexor.

El multiplexor cuenta con 16 terminales de conexión para cinco cables. Donde cuatro son de señal y uno de tierra. Las 16 terminales se utilizan para conectar hasta 16 sensores de cuerda vibrante con termistor o 32 señales de cuerda vibrante o termistores independientes.



Figura 37. Parte interna del Multiplexor.

Como se aprecia en el diagrama de funcionamiento, el multiplexor necesita que el equipo de lectura le proporcione la alimentación para que opere la electrónica interna del multiplexor y que permita seleccionar una de las diferentes terminales con que cuenta.

Además, debe generar las señales de reset y reloj que le permiten al micro controlador generar la señal de selección de la terminal.

Por ejemplo, si se desea seleccionar la terminal 1 del multiplexor, el equipo de lectura debe activar la señal de reset y simultáneamente generar una señal de reloj que genere un pulso que corresponde al canal 1 (terminal 1), ver figura 38. Si se quiere seleccionar el canal dos se deben generar dos pulsos en la señal de reloj mientras sigue activa la señal de reset.

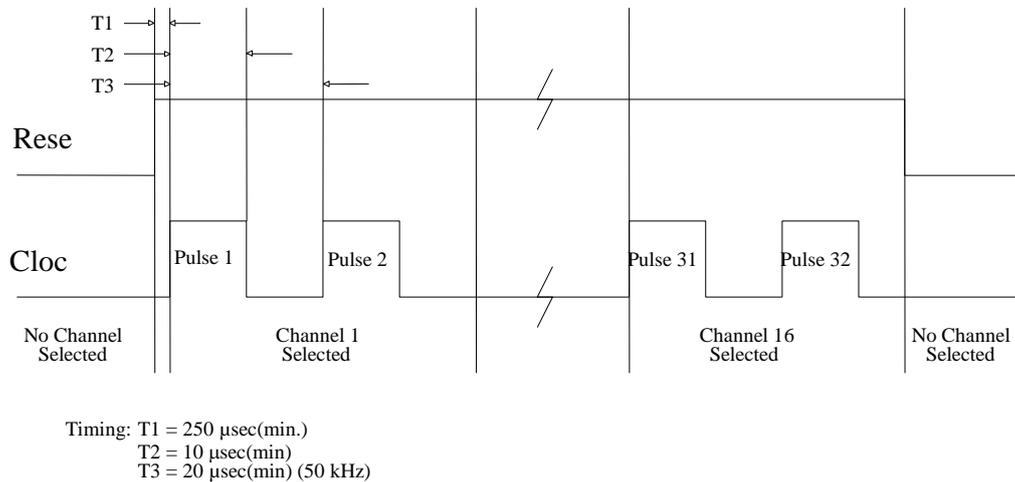


Figura 38. Diagrama de tiempos de la señal de reset y reloj para el multiplexor.

El multiplexor no alimenta a los sensores que tiene conectados, así que se puede utilizar para conectar sensores distintos a las cuerdas vibrantes, pero siempre se deberá cuidar que el equipo lector pueda generar las señales de reset y reloj que necesita el multiplexor para seleccionar las diferentes terminales.

Datalogger

Un registrador de datos (Datalogger) es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación ya sea con una construida en instrumento o sensor o a través de instrumentos y sensores externos. Cada vez más, pero no del todo, se basan en un procesador digital (o equipo). Por lo general son pequeños, con pilas, portátiles, y están equipadas con un microprocesador, memoria interna para almacenamiento de datos y sensores. Algunos registradores de datos con interfaz de un ordenador personal y utilizar el software para activar el registrador de datos y ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y puede ser utilizado como un dispositivo independiente.

Los registradores de datos varían entre los tipos de uso general para una serie de aplicaciones de medición a los productos muy específicos para la medición en un entorno o aplicación únicamente. Es común que los tipos de uso general para ser programables, sin embargo, muchos siguen como máquinas estáticas con un número limitado o nulo parámetros modificables.

Capítulo 3. Procedimiento de instalación de los diversos instrumentos utilizados en túneles construidos en suelos blandos con ayuda de escudo tipo EPB y los parámetros a obtener durante la etapa constructiva y operativa.

3.1.- INTERIOR DEL TÚNEL.

Mediante una planeación adecuada y como se mencionó con anterioridad, se determina los parámetros a obtener por medio de la instrumentación Geotécnica, y los aparatos de medición adecuados. A continuación se describen los procedimientos de instalación de los instrumentos Geotécnicos que se están convirtiendo en un uso común en México.

3.1.1- CELDAS DE PRESIÓN EN ANILLO DE DOVELAS.

Preparativos para el colado del anillo instrumentado

Para la instalación de las celdas de presión, previamente al colado de cada una de las dovelas en la planta de producción de estos elementos, se habilitan sendos insertos conformados con tubos, coples y tapas de PVC, a modo de proceder el espacio en el que se alojan los instrumentos. Se utilizan tapas de PVC de 6" de diámetro, para albergar los platos de las celdas. A dichas tapas se les realiza una perforación para encajar en ellas un cople y un tramo corto de tubería de 2" de diámetro para el alojamiento del cuerpo transductor de presión de cuerda vibrante de la celda.



Figura 39. Habilitado de insertos en dovela.

El ensamble final de los insertos, igual al espesor de las dovelas, y se remata su extremo superior mediante un cople y un tapón de PVC de 2" de diámetro.

En el interior del tapón de 6" de diámetro, se coloca una placa labrada de poliestireno de 2" de espesor, a manera de asegurar que el concreto fresco durante el colado, no invadiera el espacio destinado al alojamiento de la celda.

Luego de haber sido habilitados los insertos y cuando las parrillas que conforman el acero de refuerzo están colocadas en los moldes de las dovelas, dichos insertos se fijan a las armaduras en su posición final, mediante amarres con alambre recocido.

Una vez efectuados los colados y el desmolde de las dovelas a ser instrumentadas, estas se almacenan por separado en el patio de la planta de dovelas, en espera de ganancia de resistencia del concreto, de conformidad con las especificaciones del proyecto.

Instalación de celdas de Presión de tierra en dovelas.

Inicialmente las dovelas son colocadas "de canto", apoyándolas en el terreno con el auxilio de polines de madera dispuestos en sus caras inferiores después de haber sido coladas. Con las dovelas en esa posición vertical, se procede al retiro de excedentes de concreto en las ubicaciones de los insertos, removiendo también los vestigios del material de relleno de poliestireno en el tapón de 6" para alojar los platos de las celdas.

Luego, los tapones de 2" de diámetro en la superficie de "intradós" de las dovelas, son perforadas mediante un taladro eléctrico, procurando orificios de 3/8" para el paso de las cables de las celdas.

Luego de haber sido limpiados los "nichos" de alojamiento de las celdas, el proceso continua haciendo pasar los cables de las celdas, de longitudes variables, a través de los orificios en los tapones de 2" de diámetro en la superficie de "intradós" de las dovelas, enrollando los cables nuevamente en los carretes suministrados por el fabricante.

Con una operación muy cuidadosa para no dañar los cables y de las celdas, de las dovelas se maniobran de nuevo, para dejarlas sobre el terreno, sobre polines de madera, con sus suficientes "trasdós" hacia arriba. A continuación en el laboratorio de control de calidad del proyecto, se prepara una cantidad suficiente de mortero tixotrópico, para efectuar la colocación y fijación de las celdas en sus nichos. Cabe señalar, que este mortero, es el mismo producto utilizado para la reparación de las eventuales imperfecciones de las dovelas almacenadas en la planta, previamente a su liberación final hacia el frente de excavación.



Figura 40. Colocación y fijación de celdas en dovela.

Para culminar la instalación de las celdas en las dovelas, se vierte un poco del mortero fresco en los nichos de las celdas, procurando el relleno total de los huecos. Inmediatamente después, los cables de las celdas son deslizados a través del orificio en el tapón de PVC de 2" de diámetro, y las celdas son introducidas en sus respectivos nichos, presionándolas manualmente contra el mortero fresco, provocando su extrusión y el relleno total de las oquedades quedando un acabado aparente en su superficie.

Para evitar daños en las celdas durante las maniobras de transportación de las dovelas del anillo instrumentado y durante su erección y fijación en el túnel, se procura que las superficies de las celdas sensibles a las presiones del subsuelo, queden ligeramente por debajo de la superficie de trasdós de las dovelas, cubriéndolas con una delgada capa del mortero.



Figura 41. Maniobra de transportación de dovela instrumentada.

Cabe señalar que durante todo el proceso de instalación descrito en los párrafos precedentes, periódicamente se toman lecturas de las celdas, a modo de verificar constantemente la operación correcta de los instrumentos.

Ensamble del anillo instrumentado en el faldón del escudo.

Una vez descargadas las dovelas de la plataforma de transporte, son colocadas en el patio para colocar la junta de neopreno, nuevamente las dovelas son diligentemente maniobradas hasta aproximarlas a mecanismo erector del escudo de presión de la tierra balanceada (EPB). También en todo este proceso, se tomaran lecturas periódicas de los instrumentos para verificar su correcta funcionalidad.

Se considera un arreglo de dovelas para la colocación del anillo instrumentado en el revestimiento primario, el cual sufre modificaciones al momento de diseñar el anillo en el frente, ya que el sistema de guiado propone arreglos para evitar desviaciones que permiten conservar la trayectoria del túnel de acuerdo trazo de proyecto. Al colocar el anillo diseñado por nosotros para conservar la posición de las celdas puede provocar desviaciones en el túnel, por tal razón se dificulta saber que arreglo le corresponde de los 16 diferentes que existen para ese cadenamiento y estación durante el avance del escudo, por esta razón el anillo instrumentado con las celdas de la presión modifica.

Antes de reiniciar un nuevo ciclo de excavación y empuje del escudo, se toman las lecturas “cero” de las celdas, estando el anillo instrumentado erguido dentro del faldón del escudo, sin que el anillo experimentara en ese momento a través de los instrumentos, ninguna presión exterior.



Figura 42. Toma de lecturas de celda de presión de tierra.

Parámetros a medir.

El parámetro a medir con estos instrumentos es detectar la magnitud y distribución de los esfuerzos de confinamiento que el subsuelo ejerce sobre el endovelado del túnel.

3.1.2- DEFORMIMETROS DE ACERO.

Previo a la instalación del deformímetro de acero se verifica su funcionamiento, para tal propósito se conecta directamente a la unidad de lectura portátil, uno a uno los hilos de señal “rojo y negro” y los de temperatura “blanco y verde” y el hilo “azul” a tierra. La verificación se realizara con base a la hoja de calibración del instrumento proporcionada por el proveedor.

Colocación

El deformímetro de acero usualmente es instalado empatándolo al acero estructural usando alambre recosido. Normalmente este empate se realiza cerca del fin de la barra y en el tercio de la longitud de cada barra cuando está siendo empatado en una sección horizontal o vertical del acero estructural (figura 43) En este caso la instalación del deformímetro de acero se realiza en la sección circular de acero estructural del revestimiento definitivo, lo cual implica que las barras del instrumento se fueran empatando siguiendo la curvatura de dicha sección.

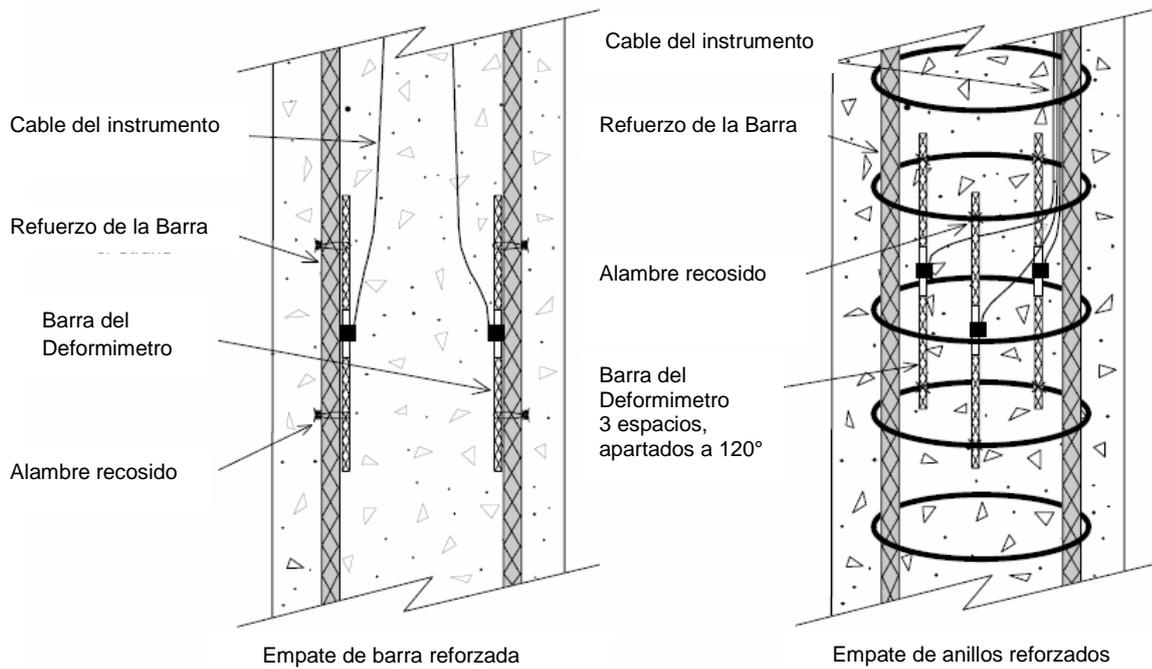


Figura 43. Empates del deformimetro de acero con la barra.

La ubicación de los deformímetros se realiza en un ángulo de 60° hacia la derecha e izquierda del eje del túnel en la zona de cubeta así como en la zona de clave, esto para evitar que sufran daños al paso constante por la zona de cubeta al realizar las actividades de revestimiento.



Figura 44. Instalación en el acero de refuerzo de un deformimetro de acero.

El cable de señal se fija al acero estructural mediante cinturones de plástico, la sujeción se realiza a una distancia no mayor de 1 metro, quedando protegido mediante la canaleta TMK 1720/135 para evitar que se dañe durante el proceso constructivo.

Se registró del número de serie de cada deformímetro de acero, ubicación en la sección para su posterior identificación y obtención de datos

Parámetros a medir.

El parámetro a medir con estos instrumentos es el esfuerzo generado en el acero de refuerzo, que forma parte del revestimiento secundario.

Generalmente la convención de signos que se utiliza en las mediciones de estos aparatos, es la que se muestra en la figura 45.

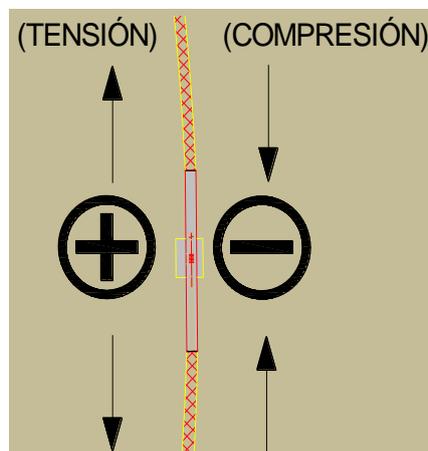


Figura 45. Convención de signos deformímetro de acero.

3.1.3- DEFORMIMETROS DE CONCRETO.

Previamente se realiza la verificación preliminar del funcionamiento del deformímetro previo a su instalación, para tal efecto se conecta directamente a la unidad de lectura de acuerdo al código de colores del cable de señal. Así mismo, se comprobó la resistencia entre los dos hilos de señal (generalmente rojo y negro), así como la verificación de la lectura de temperatura con la del medio ambiente.

Colocación de deformímetro en concreto

El deformímetro de concreto, se puede colocar de dos maneras: ya sea colocándolo de manera indirecta al acero estructural con unos bloques de madera o neopreno de tal forma que el instrumento quede ajustado al acero. Cuando sea colocado de esta manera se debe

tener cuidado de evitar la aplicación de esfuerzos excesivos al realizar el amarre con los bloques de madera o neopreno.



Figura 46. Deformímetros de concreto.

La otra manera de colocar el deformímetro es dejándolo suspendido entre el acero estructural colocando protecciones de neopreno en el cuerpo del instrumento para realizar la sujeción con alambre recocido. La capa neopreno sirve como un amortiguador de las vibraciones del sistema en suspensión.

A veces, sin capas neopreno, como la sujeción directa en el cuerpo del instrumento interfiere con la frecuencia resonante del mismo.



Figura 47. Instalación de deformímetros de concreto.

Parámetros a medir.

El parámetro a medir con estos instrumentos es la deformación generada en el concreto, que forma parte del revestimiento secundario.

Generalmente la convención de signos que se utiliza en las mediciones de estos aparatos, es la que se muestra en la figura 48.

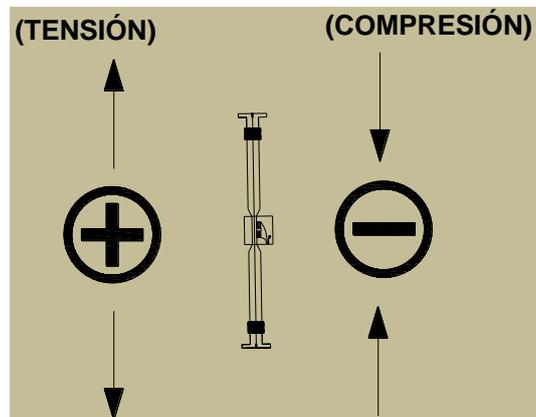


Figura 48. Convención de signos deformímetro de concreto.

3.1.4- MULTIPLEXORES Y DATALOGGER.

Conexión entre el Datalogger y el Multiplexor.

Se utilizan dos cables con cuatro hilos interiores, la señal restante es la correspondiente a la tierra analógica que en este caso se usará la maya de uno de los cables. En la tabla 5 se muestra la identificación de cada uno de los cables que tiene el cable 8032-5 y la conexión que se hará para utilizar dos cables de cuatro hilos con tierra y hacer un cable de hasta 240 metros para conectar el datalogger con el multiplexor.

10 Pin Bendix	Descripción	Cable 8032-5	Dos cables de 4 hilos con tierra
A	Selector 1 - Hi	Blanco	Rojo cable 1
B	Selector 1 - Lo	Negro del blanco	Negro cable 1
C	Selector 2 - Hi	Rojo	Verde cable 1
D	Selector 2 - Lo	Negro del rojo	Blanco cable 1
E	AG	Azul y negro del azul	Tierra cable 1
F	+12 VDC	Amarillo	Rojo cable 2
G	GND	Negro del amarillo	Negro cable 2
H	RESET	Verde	Verde cable 2
J	CLOCK	Negro del verde	Blanco cable 2
K	GND	Tierras de rojo y blanco	Tierra cable 2

Tabla 5. Identificación de cables del cable 8032-5.

En la figura 49 se muestra el armado del cable de 240 m para conectar el multiplexor y datalogger. El hacer el cable durante las pruebas del equipo es con el motivo de verificar que con un cable de 240 m se podrían tener lecturas confiables; ya que por experiencias y recomendaciones del fabricante no todos los equipos de lectura de cuerdas vibrantes pueden manejar distancias de cable en su conexión al multiplexor mayores a 250m.



Figura 49. Empalme de los cables de cuatro hilos con el cable 8023-5 de 10 hilos.

Para probar el buen funcionamiento del cable se recomienda realizar dos pruebas, la primera consiste en utilizar el cable armado para conectar la unidad de lectura portátil a uno de los multiplexores y verificar los cambios de canal y que se pueda leer con estabilidad la temperatura de las cuerdas vibrantes conectadas al multiplexor.

Este cable de señal se guía y protege con un tubo de PVC hidráulico de 1" llevándose la señal desde el multiplexor hasta la superficie donde se conectara con el DataLogger.

Instalación y conexión de sensores de concreto, acero, celdas de presión y multiplexor.

Terminadas las pruebas de funcionamiento de sensores, equipo de captura y cables se procede a su instalación en el anillo instrumentado que corresponde a la estación, donde se procede a la instalación de los equipos y a la realización de pruebas de funcionamiento.

Una vez que el acero de refuerzo del revestimiento definitivo se encuentra colocado al 100% se procede a la instalación de los deformímetros de concreto, acero y multiplexor. Para guiar y proteger el cableado de señal de cada sensor al Multiplexor, se realiza la instalación de canaletas en sentido transversal del anillo instrumentado, las cuales se fijan al revestimiento primario, posteriormente se fija el multiplexor en alguno de los hastiales del túnel en sentido de excavación.

Los siguientes trabajos consisten en la conexión de los sensores de presión al Multiplexor. Posteriormente se verifica que el Multiplexor esté funcionando correctamente y que las conexiones se hayan realizado de forma correcta para la lectura de los sensores de presión. La figura 50 muestra la conexión de los sensores al multiplexor.

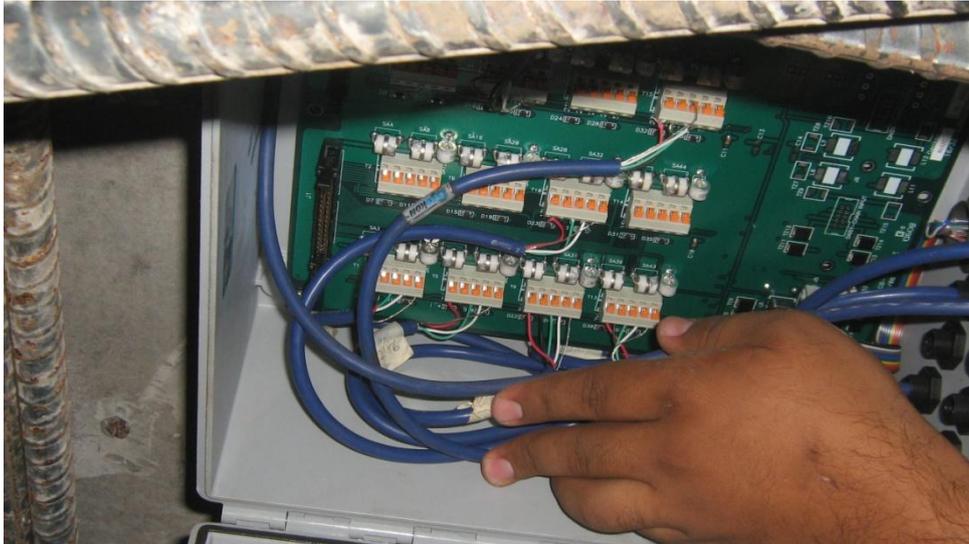


Figura 50. Conexiones de sensores al multiplexor.

Los sensores de presión son los primeros en conectarse al multiplexor, debido a que ya están instalados. La colocación de estos sensores se hace con la longitud necesaria para su conexión al multiplexor. Después se verifica utilizando la unidad de lectura, que las lecturas de cada una de las celdas de presión sea igual a una lectura previa que se realizó antes de conectarlos al multiplexor.

Generalmente las celdas de presión se conectan a los terminales 1, 5, 9 y 13 del multiplexor que corresponden a los canales 1 a 4, en la figura 51 se muestra la distribución de las terminales en la tarjeta del multiplexor.

Durante estos trabajos de instalación se realizan las siguientes actividades:

- Sellar las conexiones del multiplexor para evitar en lo posible la humedad en la tarjeta del multiplexor y esto lleve a problemas de lectura en un futuro.
- Conexión de tierra física en superficie; para evitar que en un futuro se tengan problemas por diferencias de tierra entre el DataLogger y el multiplexor.
- Proteger los conectores del cable de 240 m para que no se mojen.

Los sensores de concreto se conectan en las terminales T2, T6, T10 y T14, que corresponden a los canales 5 a 8.

Los sensores de acero se conectan en las terminales T3, T7, T11 y T15 que corresponden a los canales 9 a 12.

Cabe mencionar que las conexiones de los sensores anteriores es de forma sugerida, es decir se pueden colocar de la forma que sea más cómoda para la persona que realice la instalación, siempre y cuando llevando un estricto orden y cuidado a la hora de identificar los canales de comunicación.

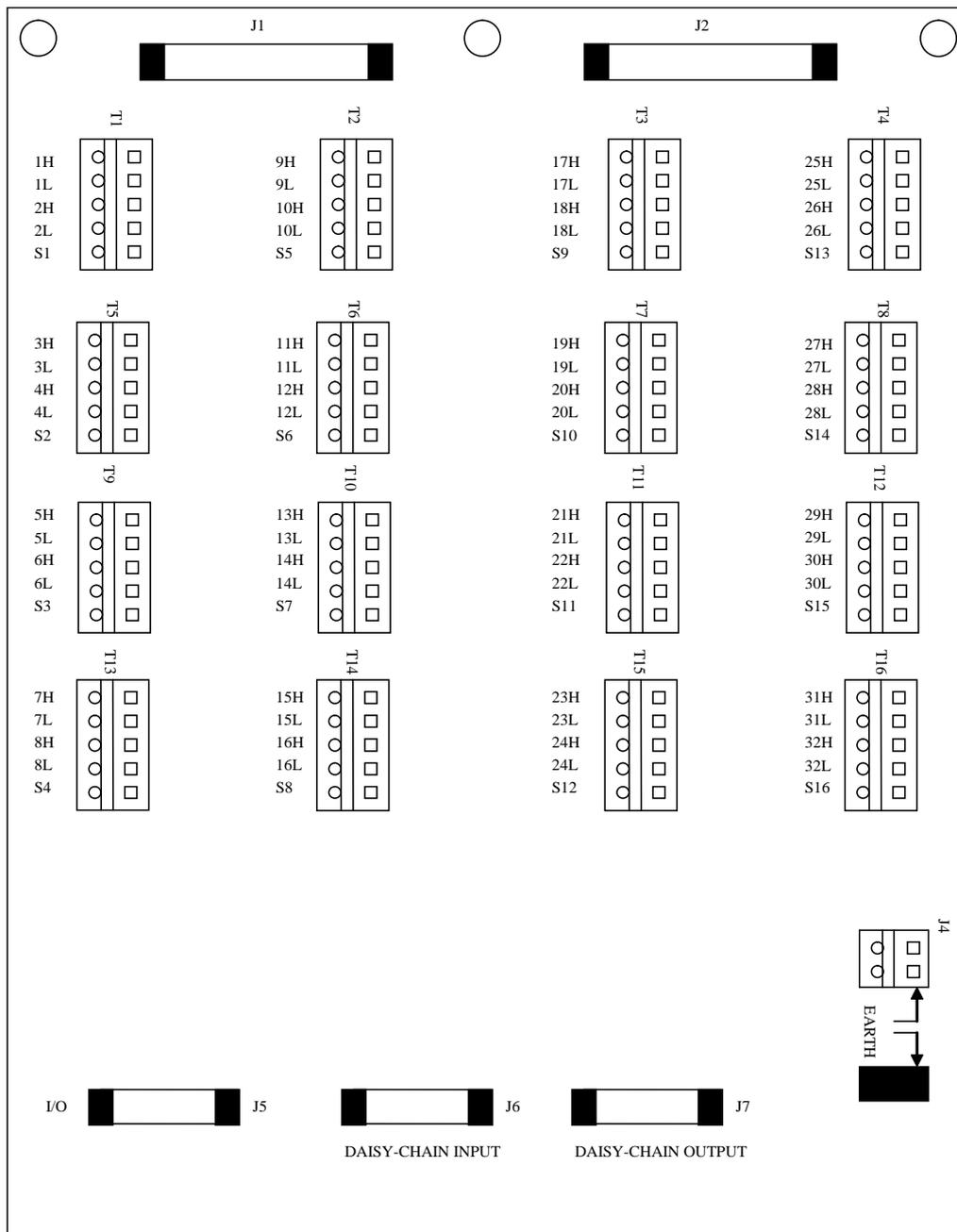


Figura 51. Distribución de las terminales en el multiplexor.

Instalación de Multiplexor y conexión de dispositivos.

Para efectuar la instalación del MULTIPLEXOR, primeramente se ubicó el recinto en uno de los hastiales del túnel en posición vertical, sobre el paño interior de la dovela donde se realizara el montaje con ayuda de los agujeros ubicados en las pestañas en la parte superior e inferior de la caja Ver Figura 52.

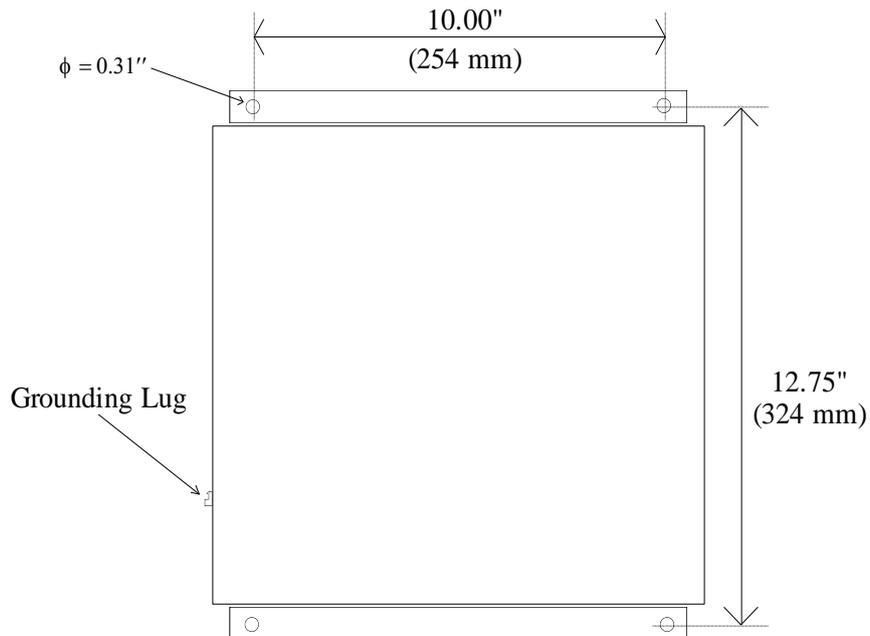


Figura 52. Recinto de Multiplexor.

Una vez plenamente identificados por número de serie los cables de los instrumentos se pasa uno por uno por las terminales del multiplexor las cuales están habilitadas con sellos para minimizar la entrada de humedad u otro agente, los cables de señal de cada instrumento se conectan en orden de acuerdo al tipo de señal que emiten ver fig. 48, cada instrumento se conectó de acuerdo a las tiras terminales T1 a T12 ver fig. 49.

Una vez conectados todos los dispositivos al Multiplexor, con ayuda de la unidad de lectura, se realizan lecturas de verificación y estabilización para ratificar el correcto funcionamiento de los instrumentos, para posteriormente cerrar y sellar por completo la caja del multiplexor garantizando que se impida la entrada de agua u otros contaminantes.

3.1.5-AUSCULTACION TOPOGRÁFICA.

Para poder registrar y controlar los posibles movimientos, tanto en superficie como en profundidad, producidos por la excavación del túnel, se realiza un conjunto de instrumentación a la largo de toda la traza del túnel. A continuación se describen los procedimientos más comunes en la auscultación topográfica en túneles.

3.1.5.1-DEFORMACIONES HORIZONTALES EN EXCAVACION Y REVESTIMIENTO.

Con el fin de monitorear las deformaciones al interior del túnel, se colocan marcas de pintura en hastiales las cuales sirvan de referencia para medir el diámetro horizontal en cada uno de los anillos (es decir @ 1.50 m centro a centro entre anillos) como se muestra en la figura 53.

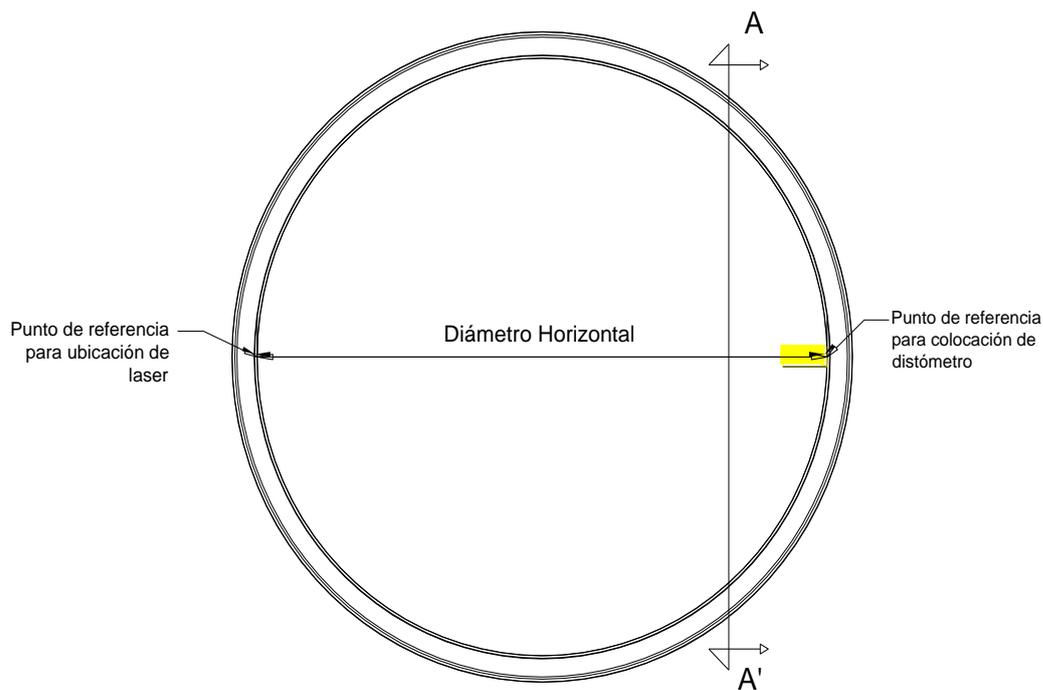


Figura 53. Medición de diámetro horizontal.

Las marcas de pintura se colocarán con ayuda de una plantilla la cual se utilizará para ambos hastiales, adicionalmente se colocará al centro de la cruz un punto que servirá de referencia o como punto de centraje para el distómetro laser.

Las lecturas se realizarán con un distómetro laser con precisión de 1.0 mm, tomando como base o referencia las marcas de pintura de centraje. La longitud se tomará a partir de la base de dicho equipo, colocándolo siempre de manera perpendicular a la dovela.

Un procedimiento similar se realiza en el revestimiento definitivo.

Parámetros a medir.

Con los datos o mediciones se elaborarán graficas tiempo Vs deformación. Para el caso de la deformación se tomará como dato para la gráfica la diferencia entre la lectura inicial y la lectura media correspondiente.

3.1.5.2-CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS.

Automatizado

Con el fin de observar el comportamiento del revestimiento primario a lo largo del túnel excavado con escudo, en el momento en que el túnel se encuentre en la zona de pórticos o carros del escudo excavador, se instala un sistema a base de clinómetros que nos permitirá medir las deformaciones del revestimiento primario (anillo de dovelas) al interior del túnel, conforme el avance de excavación, el clinómetro es un micro-sensor eléctrico-mecánico (MEMS) uniaxial de sistema direccionable (sensores encadenados o en serie) los cuales se

conectarán a un Datalogger de un canal mediante el cual se automatizará la medición y se programará y coleccionarán datos con una PC de campo compatible. Una vez localizada topográficamente la ubicación y la posición del anillo en el cual se coloca el sistema se procedió a lo siguiente:

Pruebas preliminares:

Antes de la instalación, los sensores se verifican que su funcionamiento sea correcto. Para cada sensor de inclinación se suministra por parte del fabricante una hoja de calibración, que muestra la relación entre la tensión de salida y de inclinación. Se verifica que la lectura estuviera cerca de lectura vertical de fábrica. La temperatura indicada por el termistor, de igual forma se verifica que estuviera cerca de la temperatura ambiente, posteriormente se procedió a la instalación en campo.

Colocación de los sensores de inclinación:

Una vez ubicados los puntos donde se colocaran los instrumentos se procede a realizar dos barrenos, estos orificios para las anclas de concreto son de $2\frac{1}{4}$ ". La Distancia entre las 2 anclas es de 2.75" (69.9mm). Inmediatamente en dichos barrenos se coloca un taquete expansivo de $\frac{1}{4}$ " de diámetro, después se procede a fijar la base de los sensores con la mayor precaución para lograr una buena estabilidad, lo anterior se realiza con ayuda de una tuerca hexagonal y una rondana en cada anclaje hasta alcanzar la posición deseada

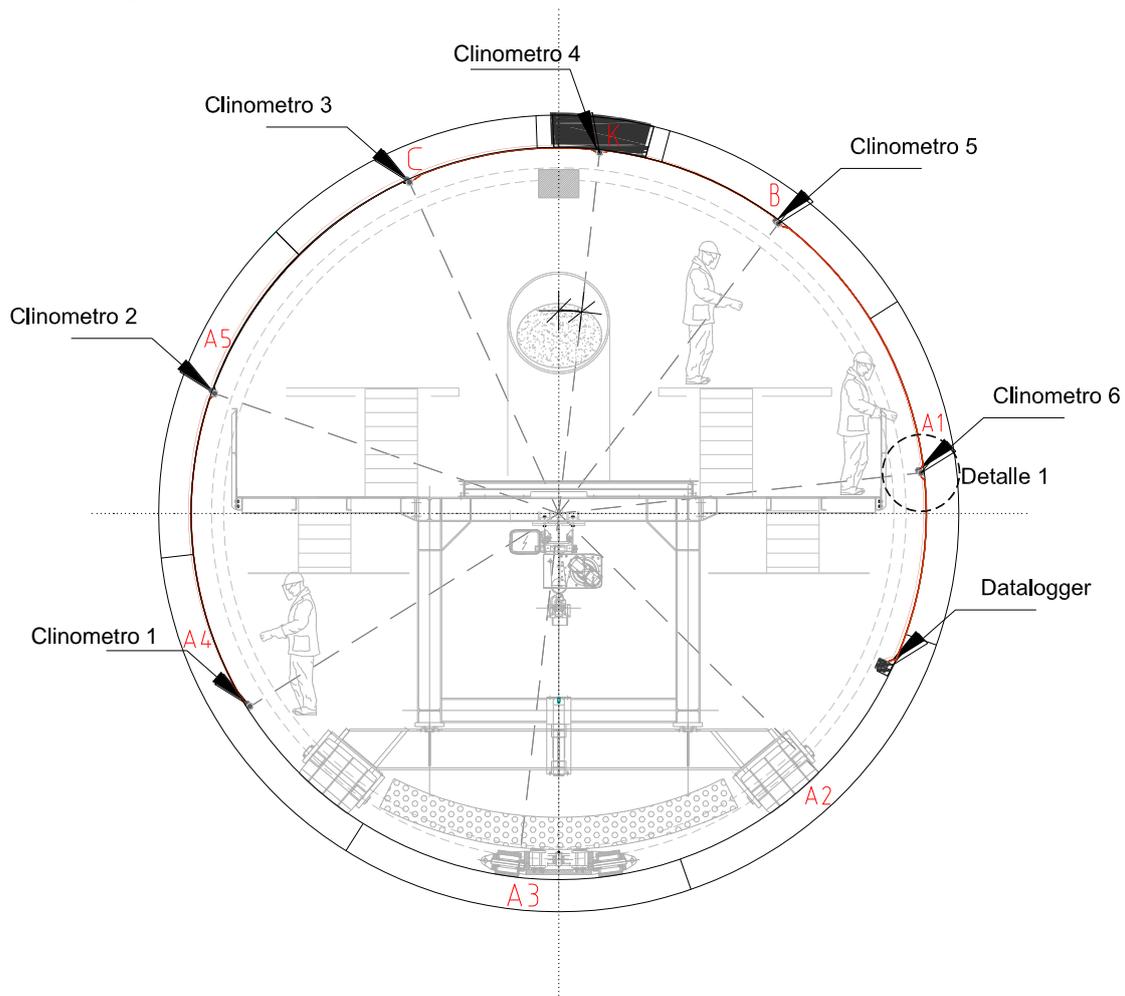


Figura 54. Arreglo general de ubicación de clinómetros.

Dirección:

Con ayuda de un destornillador especial se afloja el sensor de inclinación de su base, inmediatamente después se orienta el sensor en forma horizontal, por último se verifico con un nivel de mano su correcta orientación, y se procedió inmediatamente al ajuste a la base.



Figura 55. Nivelación de clinómetro uniaxial.

Comunicación:

Después de verificar la correcta orientación de los sensores de inclinación se procede a la colocación de los cables de comunicación entre los diferentes sensores formando así un arreglo en serie que posteriormente es comunicado al Datalogger, los cables de señal son protegidos por un polducto flexible de $\frac{3}{4}$ " y fijados al anillo por medio de abrazaderas en su perímetro.



Figura 56. Colocación de cables de comunicación entre clinómetros.

Verificación del sistema:

Una vez que se realizó la fijación en la dovela, el sistema de comunicación es guiado hacia un Datalogger que se encuentra aproximadamente a 5 m del anillo que aloja el sistema de convergencias, se procede a la verificación del funcionamiento de los sensores de inclinación mediante el software correspondiente.



Figura 57. Vista interior de Datalogger.

Programación:

Después de verificar el correcto funcionamiento del sistema se realiza la programación del mismo mediante el software correspondiente, en el cual se determina el rango de lecturas.



Figura 58. Programación de sistema de convergencia y divergencia.

Topográfico.

Con el fin de medir las convergencias y divergencias al interior del túnel, estas se medirán generalmente a cada 20 metros a lo largo del túnel, de la siguiente manera.

Se colocarán dos mini prismas en hastiales sujetando la base del mini prisma a la dovela con ayuda de un taquete, adicional a estos se colocarán tres reflejantes fijados a la dovela con pegamento epóxico, uno en clave y los otros dos a 1/6 del hastial aproximadamente, dependiendo del espacio disponible en el túnel, es decir, en función de las instalaciones al interior del túnel, ver figura 59.

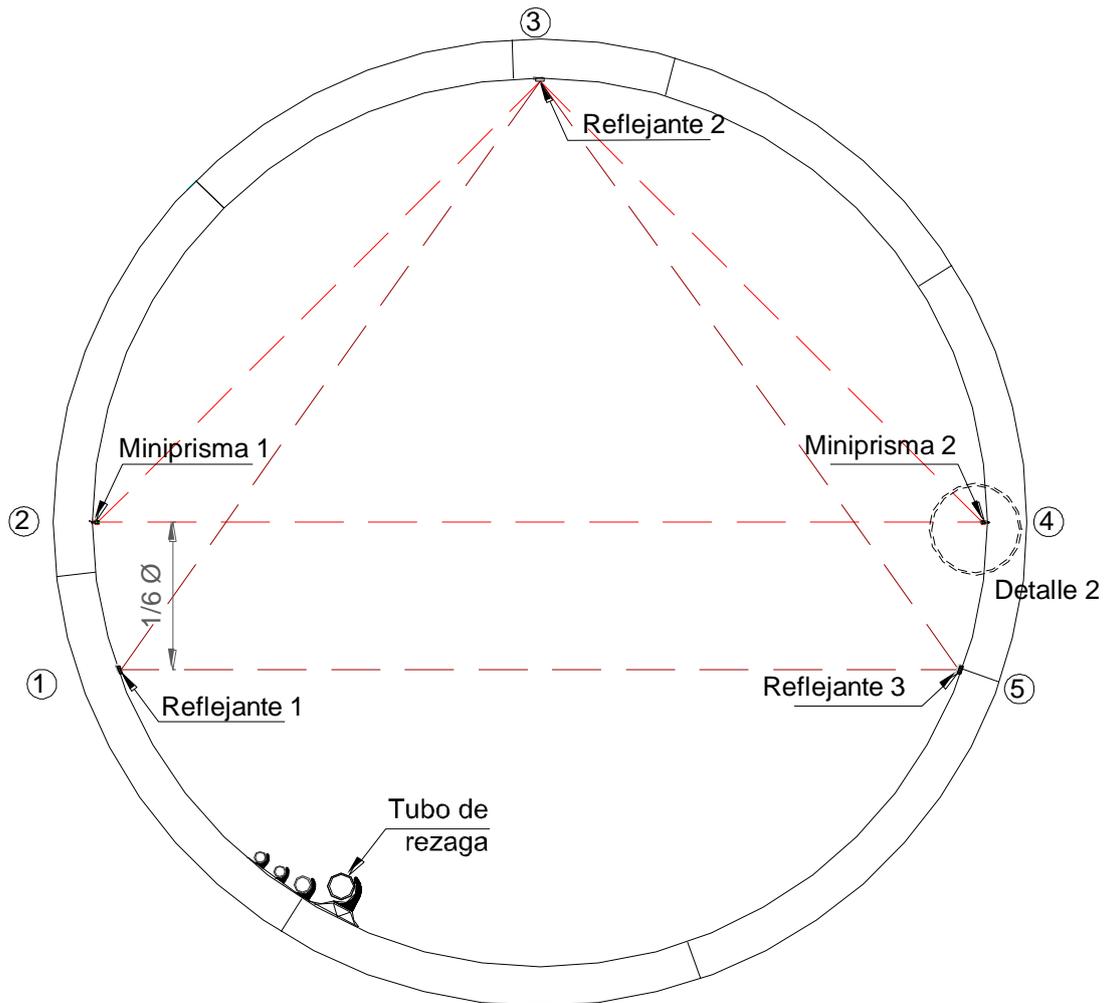


Figura 59. Ubicación de reflejantes y mini prismas para el sistema de convergencias y divergencias.

Las mediciones de convergencias y divergencias se realizarán con una estación total servoasistida con precisión de 3", la estación total tomará las lecturas en un punto medio en un rango aproximado de 100m (50m y 50m a cada lado) ver figura 56 y se medirán las longitudes como se muestra en la tabla No. 2 y en la figura 55 por lo que se requerirán 12 mini prismas para realizar las lecturas y se estarán trasladando a otros puntos para continuar con las mediciones en otras zonas.

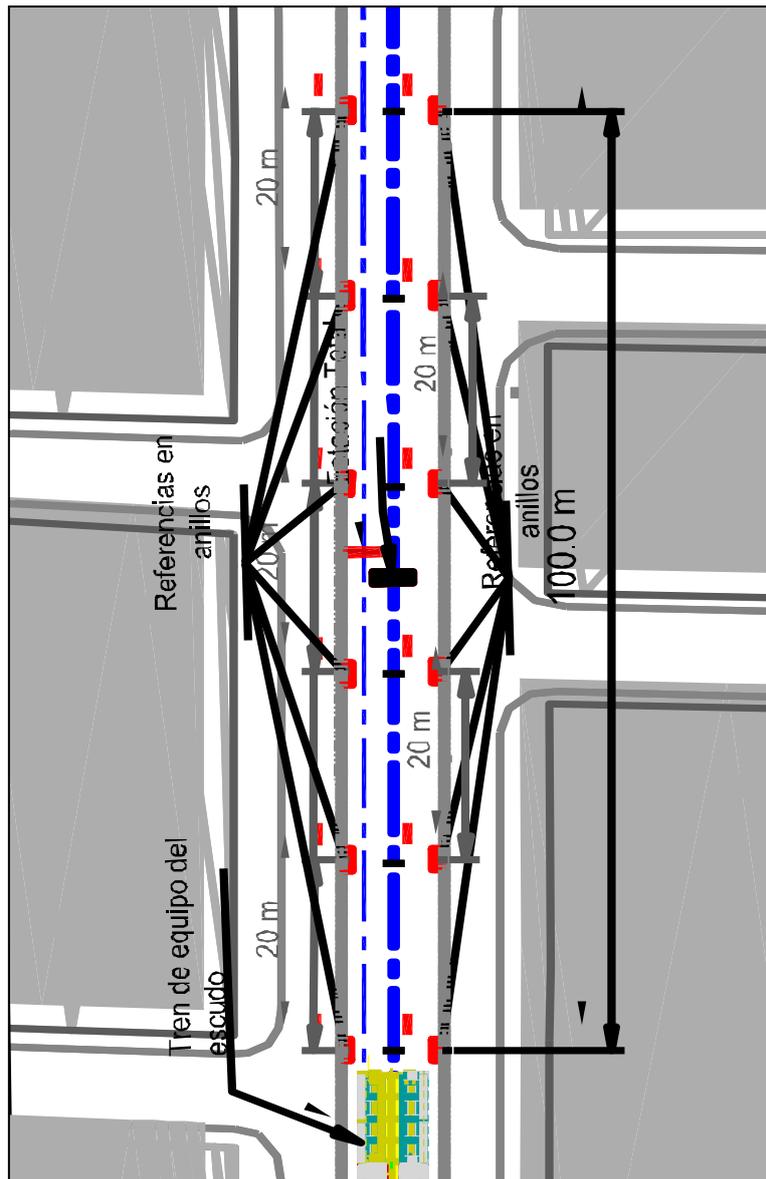


Figura 60. Ubicación de estación total y referencias.

No. DE SECCIONES	MEDICIÓN DE LONGITUDES ENTRE LOS PUNTOS*
1	2-3
2	3-4
3	2-4
4	1-3
5	3-5
6	1-5

Tabla 6. Medición de longitudes entre puntos del sistema de convergencias y divergencias.

3.2.- EXTERIOR DEL TÚNEL.

El control y las afectaciones provocadas por la excavación del túnel, se lleva a cabo mediante instrumentación Geotécnica colocada al exterior del túnel y que nos sirve para medir el comportamiento de las estructuras y el suelo vecino a la obra, a continuación se describen los procesos de instalación de los diversos aparatos de medición que se ocupan para llegar a este fin.

3.2.1.- INCLINÓMETROS.

Una vez localizada topográficamente la ubicación del inclinómetro, se procederá conforme a lo siguiente:

Perforación:

Se realiza con ayuda de una máquina Long Year, un barreno de 6" de diámetro, el cual es dos metros mayor a la profundidad de instalación correspondiente, esto con el fin de evitar problemas de azolve. Durante el proceso de barrenación se emplea agua limpia como fluido de perforación.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificará la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso de la tubería. Posteriormente se procederá a lavar el barreno con agua limpia.



Figura 61. Perforación de barreno para instalación de inclinómetro.

Colocación de la tubería:

Una vez verificada la profundidad y limpieza de la barrenación, se procederá al acoplamiento de la tubería Glue-Snap ABS. La tubería se armara en tramos, de tal manera que se facilite su colocación en el barreno, durante esta actividad, al primer tramo por introducir, se le colocará un tapón inferior. En el extremo inferior del primer tramo de tubería por colocar, se le adosa un muerto o lastre de mortero o concreto simple.

Los tramos de tubería son acoplados mediante los coples telescópicos, a modo de que éstos absorban los movimientos verticales de la tubería por el efecto de los movimientos del subsuelo vecino. Durante ésta actividad, se debe tener especial cuidado en la preparación de los coples telescópicos, garantizando que estos coples queden en las ranuras, para permitir el libre movimiento de la tubería una vez que ésta inicie la interacción con el suelo vecino.



Figura 62. Vista de tubería para inclinómetro.

Así mismo, a los tramos de la tubería ABS, se les adosa con cinta plástica una manguera de poliducto de 3/4" de diámetro la cual permitirá colocar la inyección de lodo fraguante. Para evitar el efecto de flotación de la tubería durante su descenso, ésta es lastrada con agua limpia en su interior.

Durante el proceso de colocación de la tubería ABS en el barreno, con auxilio de un equipo topográfico, se orientarán las ranuras interiores, de tal forma que uno de los ejes quede orientado de forma perpendicular al eje del Túnel. Así mismo, durante este proceso se cuida la verticalidad de la tubería.

Posteriormente a través del poliducto se inyectará lodo fraguante a baja presión (0.05 Kg/cm² como mínimo y 0.50 Kg/cm² como máximo).

Al final de la instalación de la tubería, frecuentemente la dirección de las ranuras presentan una desviación angular. Este efecto es atribuible al proceso de cementación o inyección de la tubería, para corregir las desviaciones, en las hojas de cálculo se considerarán estos desplazamientos, los cuales son medidos topográficamente en campo.

Una vez terminadas las actividades anteriores, se deja pasar un lapso suficiente para que la inyección fraguara (del orden de 24 horas), y posteriormente se realizarán las lecturas iniciales.

Construcción de registros. Finalmente como medida de protección se construye un registro, regularmente de 0.4m x 0.4m en planta.



Figura 63. Registro de Inclinómetro.

Parámetros a medir.

El inclinómetro tiene la función de medir desplazamientos horizontales en el terreno o de una estructura como puede ser un muro milan.

3.2.2.- EXTENSÓMETROS

Los extensómetros son sistemas muy ocupados en la instrumentación Geotécnica, existen gran variedad de extensómetros; hay extensómetros horizontales y verticales, en este trabajo se describen los extensómetros horizontales mas prácticos y comunes en la construcción de túneles.

3.2.2.1.- EXTENSÓMETROS DE BARRAS.

Una vez localizada topográficamente la ubicación de los extensómetros de barras, se procederá conforme a lo siguiente:

Perforación:

Realizar con ayuda de una maquina Long Year 38 o similar, un barreno de 4 1/2” de diámetro. La profundidad del barreno deberá ser dos metros mayor a la profundidad de instalación correspondiente, esto con el fin de evitar problemas de azolve. Durante el proceso de barrenación se podrá utilizar agua limpia como fluido de perforación y estabilización, o en su caso de ser necesario lodo bentonítico o polímero.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificara la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de

obstáculos que pudiesen impedir el descenso de la tubería. En caso necesario se deberá lavar el barreno con agua limpia.

Colocación de las barras:

A partir de los arreglos de las barras de acero inoxidable de 1/4" de diámetro, indicados en la documentación del fabricante, se procederá a efectuar en superficie la unión de dichas barras, así como de sus anclas mediante niples diseñados exprofeso, asegurando las uniones con pegamento para acero.



Figura 64. Unión de ancla y barra de acero inoxidable.

Cada uno de los acoplamientos antes señalados serán protegidos con tubería de PVC de 1/4" de diámetro, efectuando las uniones mediante coples y pegamento para este material. La función del recubrimiento de PVC es garantizar que las barras metálicas en su interior queden totalmente aisladas del suelo vecino a la misma en toda su longitud.



Figura 65. Colocación de recubrimiento en barras de acero inoxidable.

Posteriormente en superficie se unirán los tramos de barras anteriores, al cabezal múltiple identificando la profundidad de cada extensómetro.

La secuencia de los números de identificación corresponderá con el ordenamiento creciente de las longitudes de las barras, de tal manera que al extensómetro más somero le corresponderá el número 1, al extensómetro intermedio el número 2 y para el más profundo el número 3.



Figura 66. Barras de acero inoxidable identificadas en el cabezal .

Al ensamble del conjunto de barras y cabezal de referencia, se le adosará una manguera de poliducto de $\frac{3}{4}$ " de diámetro para efectuar la cementación posterior de los extensómetros dentro del barreno. El extremo inferior de la manguera de inyección se unirá con el ancla más profunda, mientras que el extremo superior va ser pasado a través del orificio provisto en el cabezal de referencia. La manguera de inyección será adosada al conjunto del ensamble de las barras de los extensómetros, en toda su longitud, mediante anillos de cinta plástica adhesiva.

Posteriormente se colocará el tubo de protección de PVC de $2 \frac{1}{2}$ " de diámetro, el será unido al cabezal, y que permite la protección de las barras de los extensómetros.



Figura 67. Tubo de protección unido al cabezal del extensómetro.

Una vez realizado lo anterior, el cuerpo del extensómetro será introducido en el barreno, e inmediatamente se podrá iniciar la inyección de lodo fraguante hasta provocar el derrame

de la misma por la boca del barreno con lo cual se garantiza su total cementación. Posteriormente se limpiara el cabezal retirando los excedentes de la mezcla.



Figura 68. Extensómetro de barras previo a la inyección de lodo fraguante.

La instalación continuara con el reemplazo de las placas metálicas provisionales dispuestas en el cabezal, por las placas definitivas maquinadas en acero inoxidable, respetando la nomenclatura de identificación de las barras. Estas placas servirán para dar un apoyo liso y adecuado del micrómetro de profundidad durante la toma de lecturas del instrumento.

Terminada la instalación del extensómetro y una vez fraguada la mezcla de inyección (pasadas 24 horas), se procediera a tomar las lecturas iniciales en cada una de las barras, empleando un micrómetro de profundidad con 0.01 mm de precisión.

Construcción de registros:

Finalmente como medida de protección se construirá un registro generalmente de 0.4m x 0.4m en planta.



Figura 69. Registro de Extensómetro de barras.

3.2.2.2.- EXTENSÓMETROS MAGNÉTICOS CON TUBERÍA PARA INCLINOMETRO.

Una vez localizada topográficamente la ubicación de los extensómetros magnéticos, se procederá conforme a lo siguiente:

Perforación:

Realizar con ayuda de una maquina Long Year 38 o similar, un barreno de 6 1/2" de diámetro. La profundidad del barreno deberá ser dos metros mayor a la profundidad de instalación correspondiente, esto con el fin de evitar problemas de azolve. Durante el proceso de barrenación se deberá emplear agua limpia como fluido de perforación.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificara la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso de la tubería. En caso necesario se deberá lavar el barreno con agua limpia.

Colocación de la tubería:

Una vez verificada la profundidad y limpieza de la barrenación, se procederá al acoplamiento de la tubería ABS. La tubería se armará en tramos que faciliten su colocación en el barreno, durante esta actividad al primer tramo por introducir se le colocará un tapón inferior, así como el magneto tipo anillo, el cual será sujetado a la tubería mediante los tornillos de ajuste y apriete.



Figura 70. Elementos que conforman un Extensómetro Magnético.

La posición del anillo magnético de referencia será aproximadamente 0.50 m por arriba del tapón inferior. En el extremo inferior del primer tramo de tubería por colocar, se le adosará un muerto o lastre de mortero o concreto simple.

Algunos de los tramos subsecuentes de tubería, se le adosará una araña magnética a longitudes estratégicas, un ejemplo de esto se muestra en la figura 69 donde se muestra la colocación de arañas en estratos previamente seleccionados. Los tramos de tubería serán acoplados mediante los coples telescópicos, a modo de que éstos permitan absorber los movimientos verticales de la tubería por el efecto de los movimientos del subsuelo vecino. Durante ésta actividad, se deberá tener especial cuidado en la preparación de los coples telescópicos, garantizando que los tornillos en los extremos queden en las ranuras, para permitir el libre movimiento de la tubería una vez que ésta inicie la interacción con el suelo vecino.

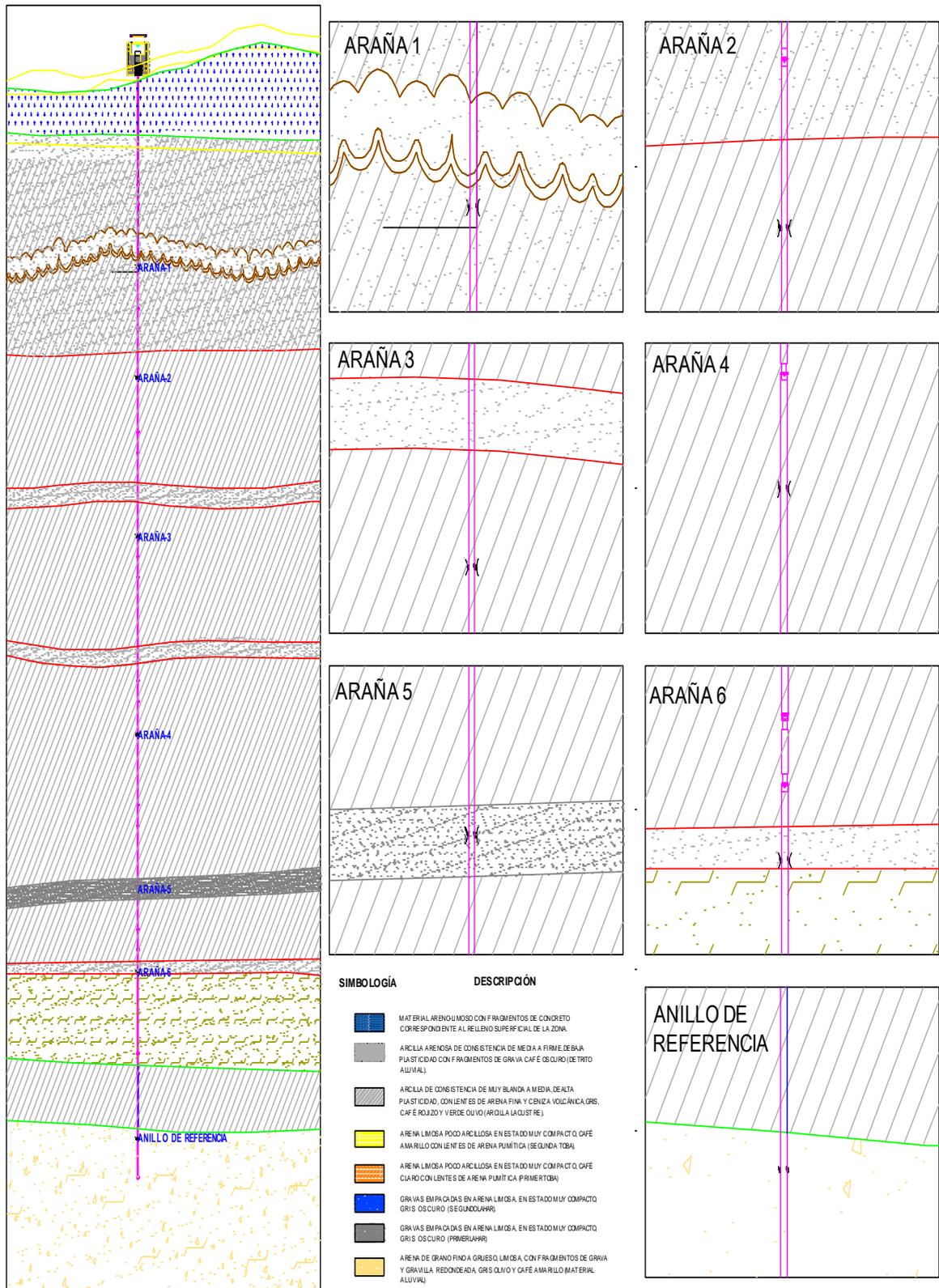


Figura 71. Ejemplo de distribución de arañas Magnéticas

Las arañas magnéticas, serán colocadas cuidadosamente mediante las anclas y cables con bucles que las sujetaran y comprimirán. Posteriormente, su liberación será mediante los cables de acero galvanizado de 1/16" de diámetro que se guiaran a lo largo de la tubería

hasta el exterior del barreno. Las arañas magnéticas se liberarán una vez que la tubería este colocada a la profundidad de instalación.



Figura 72. Colocación de arañas magnéticas.

Así mismo, a los tramos de la tubería, se les adosará con cinta plástica una manguera de poliducto de 3/4" de diámetro la cual permitirá posteriormente efectuar la inyección de lodo fraguante. Para evitar el efecto de flotación de la tubería durante su descenso, ésta será lastrada con agua limpia en su interior.



Figura 73. Vista de poliducto de inyección y cables de acero adosados en tubería ABS.

Durante el proceso de colocación de la tubería ABS en el barreno, con auxilio de un equipo topográfico, se orientaran las ranuras interiores, de tal forma que uno de los ejes quede orientado de forma perpendicular al eje del Túnel. Así mismo, durante este proceso se verificara la verticalidad de la tubería.

Una vez terminado el hincado de la tubería a la profundidad correspondiente, se liberaran las arañas magnéticas, mediante las anclas de acero galvanizado, para lo cual se extraerá el cable anclado en el bucle hasta la superficie. Posteriormente a través del poliducto se colocará a gravedad el lodo fraguante, diseñado previamente en el laboratorio y que tenga unas condiciones similares a las del suelo.



Figura 74. Liberación de arañas magnéticas.

Al final de la instalación de la tubería, frecuentemente la dirección de las ranuras presentan una desviación angular. Este efecto es atribuible al proceso de cementación o inyección de la tubería, para corregir las desviaciones, en las hojas de cálculo se consideraran estos desplazamientos, los cuales son medidos topográficamente en campo.

Una vez terminadas las actividades anteriores, se dejara pasar un lapso de tiempo suficiente para que la inyección fragüe (del orden de 24 horas), y posteriormente poder realizar las lecturas iniciales.

Construcción de registros:

Finalmente como medida de protección se construirá un registro generalmente 0.4m x 0.4m en planta.

Parámetros a medir.

Los extensómetros es un sistema de medición empleado para registrar movimientos verticales del subsuelo vecino al túnel.

3.2.3.- PIEZÓMETROS.

Regularmente se realizan estaciones piezométricas conformadas por uno, dos, tres y en algunos casos más de tres piezómetros, todo dependiendo de la estratigrafía del lugar y el tipo de obra para la cual se realicen. Regularmente la información arrojada por dichas estaciones es de vital importancia para el diseño de cimentaciones.

3.2.3.1- PIEZÓMETROS ABIERTOS.

Una vez localizada topográficamente la ubicación de los Piezómetros abiertos tipo Casagrande, se procederá con lo siguiente:

Perforación:

Realizar con ayuda de una maquina Long Yesar 38, un barreno de 4 1/2" de diámetro. La profundidad del barreno será dos metros mayor a la profundidad de instalación correspondiente, esto con el fin de evitar problemas de azolve. Durante el proceso de barrenación se deberá emplear agua limpia como fluido de perforación.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificara la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso de la tubería.

Preparación de la celda porosa:

Con un tubo de PVC sanitario de 3" se realiza con ayuda de una sierra de diente fino tres ranuras en el perímetro correspondiente al tubo de PVC; estas ranuras con una separación igual a 2 cm y tendrán una longitud total de 1.5 m, paralelamente en un tubo de 1" de diámetro se repite el mismo procedimiento que consta en la realización de ranuras; en el espacio anular entre dichos tubos se colocara arena sílica que sirve como filtro, y en su extremo que está en contacto con el terreno se colocará una protección con malla para evitar la entrada de agentes que puedan contaminar el sistema. En el tubo inferior se colocará un tapón tipo campana, dicho tapón entrando a presión garantizando la fijación a la tubería y en la parte superior de la celda porosa se coloca una reducción que servirá como tapón y fijador con la tubería que se colocó posteriormente.



Figura 75. Preparación de bulbo para piezómetro abierto.

Los tramos de tubería regularmente son de 3 metros, por lo que se acoplaron módulos que permitan una fácil manipulación; la unión de coples se realiza con pegamento de PVC de alta resistencia y refuerzo con cinta de tela amarrada con alambre recocido.



Figura 76. Acoplamiento de tubería para piezómetro.

Una vez verificada la profundidad y limpieza de la barrenación, se procede al acoplamiento de los módulos previamente preparados, este acoplamiento se realizara por medio de coples de tubería pvc de 1“, y fijándolos con pegamento PVC de alta resistencia.

Una vez colocados los módulos de tubería, se coloca a gravedad gravilla hasta alcanzar una profundidad de 2 m, esto con la finalidad que sirva de filtro, posteriormente se colocaron capas de 50 cm de arenas graduadas e inmediatamente después se colocó un tapón de bolitas de bentonita de 50cm, este tapón se realizó por medio de bentonita expansiva.

Una vez colocados los filtros correspondientes se inyecta lodo fraguante a baja presión, 0.05 Kg/cm² como mínimo y 0.50 Kg/cm² como máximo.

Una vez terminadas las actividades anteriores, se dejará pasar un lapso de tiempo suficiente para que el nivel de agua se estabilice (del orden de 24 horas), y posteriormente realizaron las lecturas iniciales.

Construcción de registros. Finalmente como medida de protección se construyen registros de 0.30 m, por debajo del nivel del terreno natural, y de 0.3m x 0.3m en planta.

3.2.3.2- PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE.

Previó a la instalación en campo de los piezómetros, se deberá verificar su correcto funcionamiento. En esta etapa se colocarán los piezómetros en un recipiente con agua, verificando las lecturas de la presión del agua con los resultados de las hojas de calibración respectivas.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de cada piezómetro, se les colocara una bolsa de Geotextil fabricada en obra de aproximadamente 20x12 cm y rellena de gravilla, la cual tiene como objetivo funcionar como filtro protector del piezómetro de cuerda vibrante.



Figura 77. Filtro protector del Piezómetro de cuerda vibrante.

Una vez localizada topográficamente la ubicación de los piezómetros, se procederá conforme a lo siguiente:

Perforación:

Realizar con ayuda de una maquina Long Year 38 o similar, un barreno de 4 1/2” de diámetro. La profundidad del barreno deberá ser dos metros mayor a la profundidad de instalación correspondiente, esto con el fin de evitar problemas de azolve. Durante el proceso de barrenación se deberá emplear agua limpia como fluido de perforación, esto con el fin de no afectar la permeabilidad de los estratos atravesados durante la perforación.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificara la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso del instrumento. En caso necesario se deberá lavar el barreno con agua limpia.

Una vez verificado que el barreno este limpio, se deberá localizar la posición del nivel de aguas freáticas, e inmediatamente se introducirá granzón hasta alcanzar una altura equivalente a la profundidad de instalación del piezómetro.

Verificación en campo del piezómetro:

Con el auxilio de la unidad de lectura, y de un recipiente con agua en el cual se sumerge el piezómetro, se deberá verificar el correcto funcionamiento de éste previo a su instalación en el barreno. Durante este proceso, se dará un lapso de tiempo suficiente para garantizar que las lecturas inicial y subsecuentes, tomadas con el auxilio de la unidad de lectura, sean estables, determinando así las lecturas iniciales o “cero”.



Figura 78. Toma de lectura cero del piezómetro de cuerda vibrante.

Instalación del piezómetro. Una vez verificado el correcto funcionamiento en campo del piezómetro, se procederá a introducirlo en el barreno. En esta actividad el cable de señal del piezómetro se introduce en un poliducto que lo protegerá, éste último se adosara a una tubería de PVC sanitario de 2 “de diámetro, la cual servirá como guía y lastre para la colocación del piezómetro a la profundidad de instalación correspondiente.



Figura 79. Piezómetro de cuerda vibrante, antes de ser lastrado.

Filtro:

Una vez introducido el piezómetro, se añadirá granzón hasta alcanzar una profundidad equivalente de 50cm por arriba del borde superior del piezómetro. Posteriormente se colocara arena media.

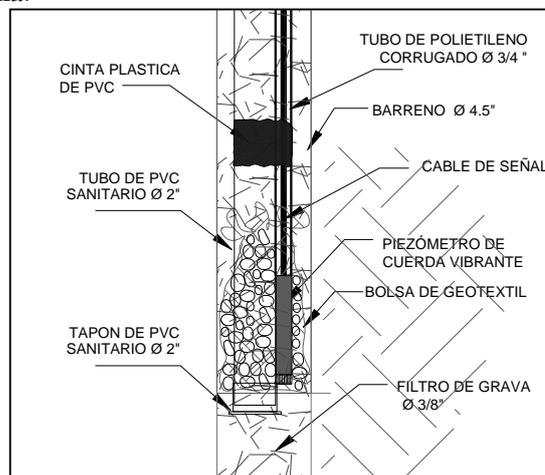


Figura 80. Esquema de instalación piezómetro de cuerda vibrante.

Sello:

Una vez colocado el filtro, se colocará el sello superior de la zona permeable, mediante la introducción de bolas plásticas de bentonita mezclada con agua, verificando periódicamente el ascenso de la superficie superior del sello mediante el uso de la sonda con pisón. Una vez colocado el sello de bentonita, se rellenará el resto del barreno con material granular.

Una vez terminadas las actividades anteriores, se dejara pasar un lapso de tiempo (del orden de 24 horas), con el fin de que el piezómetro se estabilice para poder tomar las lecturas subsecuentes.

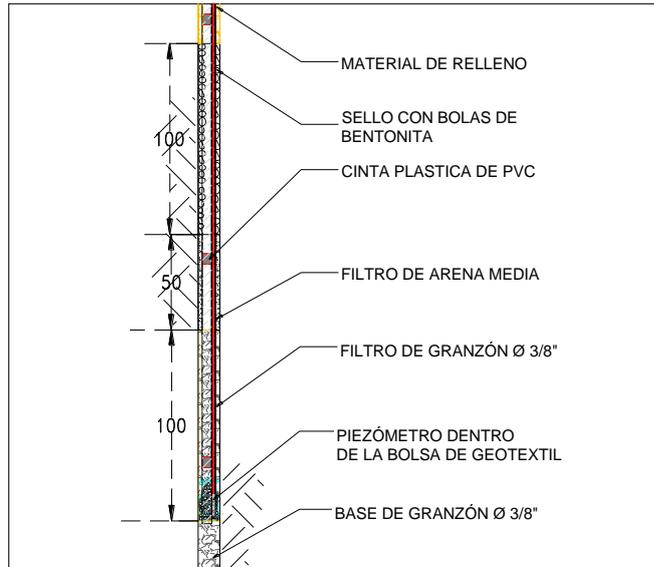


Figura 81. Colocacion de materiales en piezómetro de cuerda vibrante.

Construcción de registros:

Finalmente como medida de protección se construirá un registro generalmente de 0.4m x 0.4m en planta.

3.2.4.- PIEZO-CELDAS.

Previo al traslado al sitio de instalación de la Piezo-Celda, a ésta última se le colocará un filtro de geomalla que envuelva la zona donde se localiza la piedra porosa del piezómetro. La malla se deberá sujetar en ambos extremos mediante cinchos de plástico, verificando su correcta sujeción.



Figura 82. Filtro de geomalla en celda porosa.

Una vez localizada topográficamente la ubicación, se procederá conforme a lo siguiente:

Perforación:

Realizar con ayuda de una maquina Long Year 38 o similar, un barreno de 4 1/2" de diámetro. La profundidad del barreno será 50cm por arriba de la profundidad de

instalación correspondiente, esto con el fin de evitar alterar lo menos posible el estado de esfuerzos del suelo, garantizando la presión horizontal sobre la celda. Durante el proceso de barrenación se deberá emplear agua limpia como fluido de perforación, esto con el fin de no afectar la permeabilidad de los estratos atravesados durante la perforación.

Una vez terminada la perforación, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificará la profundidad del barreno, así como la limpieza del mismo, verificando que esté libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso de la tubería. En caso necesario se deberá lavar el barreno con agua limpia.

Instalación de la Piezo-Celda. Al término de la perforación, en superficie se protegerá el cable de señal de la piezo-celda en toda su longitud, mediante poliducto flexible de $\frac{3}{4}$ " de diámetro. El poliducto se introducirá por dentro del adaptador AW/LHT, el cual sujeta la piezo-celda, así como por el primer tramo de la tubería galvanizada de 2" de diámetro, que se adosa a dicho adaptador. Posteriormente se continuará con la colocación de los tramos subsecuentes de la tubería, utilizando coples, esto hasta llegar a una longitud equivalente a la profundidad de instalación requerida.

Una vez habilitada la tubería a la piezo-celda, se procederá a la introducción de ésta en el barreno de 4 1/2" de diámetro, llevando con cuidado la piezo-celda hasta el fondo del barreno. Una vez alcanzado lo anterior, se procederá al hincado de la piezo-celda, dentro del terreno natural, esto en una longitud de 50cm.



Figura 83.Habilitado de la tubería para Piezo-celda.

El hincado se deberá realizar con cuidado, de tal manera que la parte inferior de la piezo-celda que contiene la celda de presión, quede interactuando directamente con el suelo vecino. De forma similar, la parte media superior del cuerpo de la Piezo-Celda, en donde se aloja el piezómetro, deberá quedar por arriba de la parte hincada, es decir sin penetrar en el terreno, esto con el fin de colocar desde el fondo del barreno y con una altura de 1.0m, un filtro a base de arena fina que permita el paso y registro de la presión del agua en el piezómetro.

Una vez terminado lo anterior, por encima del filtro de arena, se colocará un sello con una altura de 50 cm, a base de bolitas de bentonita.

Una vez realizado lo anterior, se colocará por encima del sello de bentonita, la inyección de lodo fraguante a gravedad, esto en el espacio anular comprendido entre el barreno y la tubería de acero galvanizada.

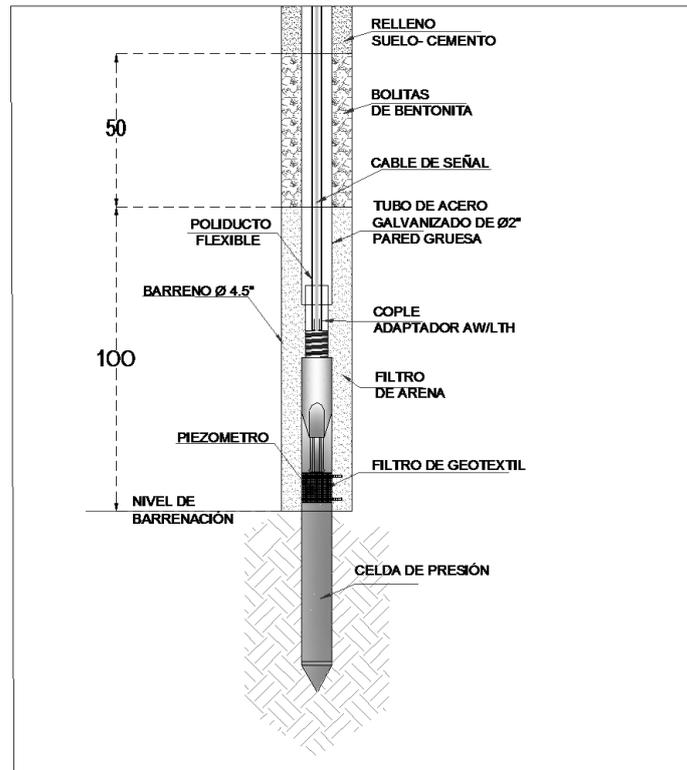


Figura 84. Hincado de la Piezo-celda.

Construcción de registros:

Finalmente como medida de protección se construirá un registro generalmente con dimensiones de 0.4m x 0.4m en planta.

3.3.- COMUNICACIÓN.

La comunicación es un complemento de la Instrumentación Geotécnica y es muy similar a lo utilizado en el interior del túnel, es decir consta de Multiplexor y datalogger que permiten la automatización de una estación que cuente con diferentes aparatos de medición de cuerda vibrante.

3.3.1.- PROGRAMACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN.

Un sistema de automatización de dispositivos de cuerda vibrante, es un sistema electrónico a través del cual se permite la conexión de los diferentes instrumentos de cuerda vibrante, garantizando la continuidad y calidad de la señal, de tal manera que en superficie se pueda establecer un monitoreo automático de medición.

La automatización de los instrumentos de cuerda vibrante, se realizara mediante transductores que permiten amplificar y transmitir las señales de los sensores manteniendo comunicación mediante un cable de señal de cuatro hilos con tierra, conectado temporalmente a una unidad de lectura durante su instalación, y posteriormente a la unidad periférica de control para su operación. Los datos almacenados en la unidad periférica (Datalogger), mediante una interface podrán ser transmitidos a un equipo de cómputo portátil, para su almacenamiento, evaluación y análisis, esto con la ayuda de un software.

En las estaciones, conviene utilizar el dispositivo Datalogger Micro-800, el cual tiene incorporado un Multiplexor con una capacidad de medición de 16 señales de cuerda vibrante y 16 termistores. Su capacidad de memoria interna es de 4MB la cual permite un almacenaje de aproximadamente 500.000 puntos de referencia de alta resolución o de 1.000.000 puntos de referencia de baja resolución.

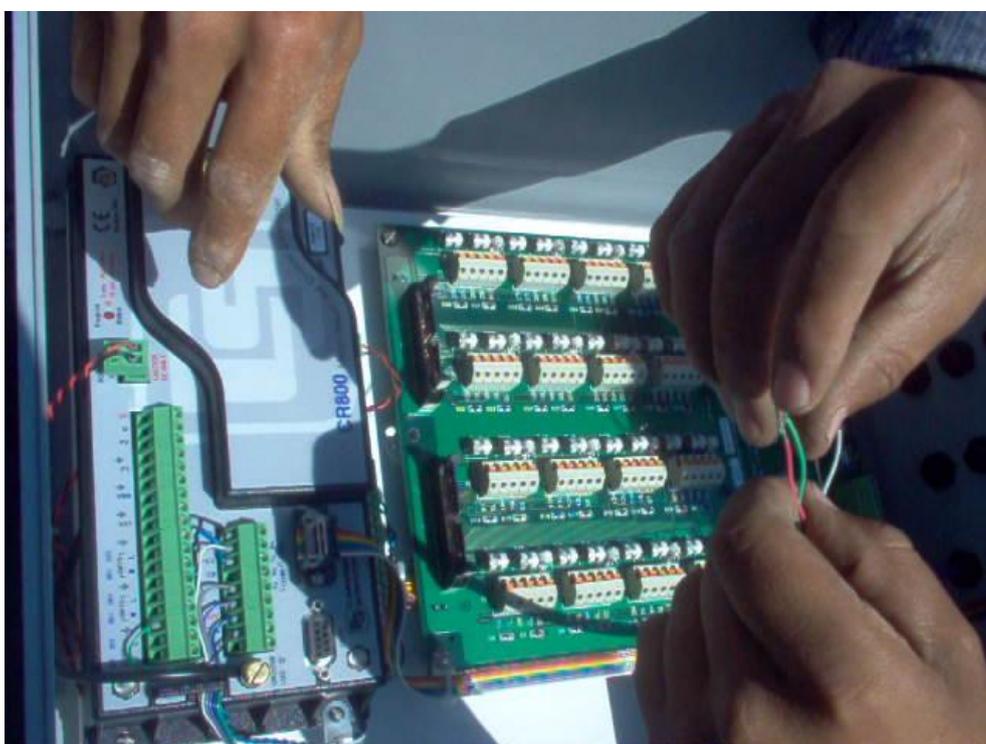


Figura 85. Vista interna de un Datalogger CR-800.

La obtención de la información del Datalogger será a través de una conexión directa a una PC portátil, esto mediante una interfaz RS-232. A su vez, el Datalogger mantendrá comunicación permanente con los piezómetros de cuerda vibrante mediante un cable de señal con cuatro hilos y una tierra, y con las Piezo-celdas a través de un cable de señal con ocho hilos y una tierra.

El Datalogger contiene una batería interna la cual deberá ser alimentada con una energía de 12V a través de un cargador con eliminador que será conectado a la corriente alterna o algún tipo de corriente alternativa. La conexión de los instrumentos de cuerda vibrante se realizara en las terminales de la tarjeta interna del multiplexor integrado al Datalogger.

Cada bloque de terminal de la tarjeta del multiplexor, cuenta con cinco conexiones, en las cuales se conectaran los cables provenientes de los instrumento de cuerda vibrante.

Comúnmente cuando se tiene uno y hasta cuatro dispositivos se utilizan dataloggers de menor capacidad y se utilizará para la automatización un Datalogger, de 4 canales, el cual tiene una capacidad de medición de 4 señales de cuerda vibrante y 4 termistores. Su capacidad de memoria estándar es de 320KB, la cual permite un almacenaje de aproximadamente 10666 órdenes de datos.

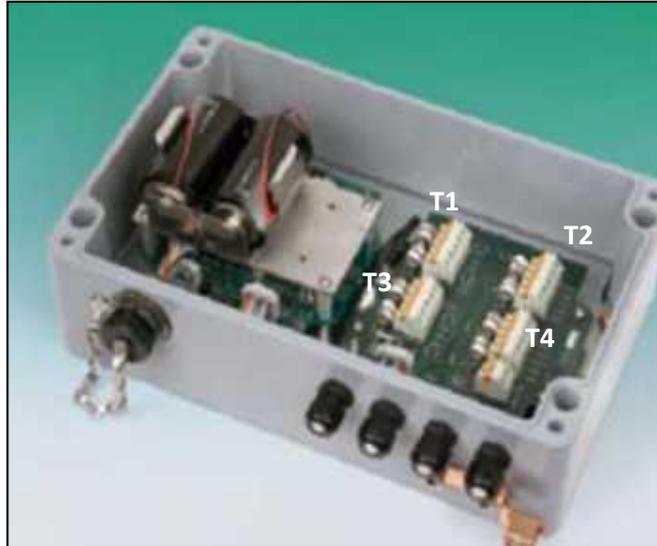


Figura 86. Datalogger de cuatro canales.

La obtención de la información del Datalogger será a través de una conexión directa a una PC portátil, esto mediante una interfaz RS-232.

El Datalogger se programara mediante el uso de la terminal “Emulador” de Microsoft Windows Hyperterminal. Cada bloque de terminal de la tarjeta del multiplexor, cuenta con cinco conexiones, en las cuales se conectaran los cables provenientes de los instrumento de cuerda vibrante.

3.4.- INSTALACIONES ESPECIALES.

Las instalaciones especiales son esenciales en la Instrumentación Geotécnica, ya que ellas garantizan la seguridad y el correcto funcionamiento de las instalaciones y sería absurdo pensar en un sistema integral de Instrumentación sin estas.

Regularmente las instalaciones son registros en los cuales se realizo una perforación y posterior instalación de algún instrumento, o una caseta de automatización que son las más importantes y comunes.

3.4.1.- RECINTOS DE ALOJAMIENTO (CASSETAS Y REGISTROS).

Casetas de instrumentación.

Las caseta es una construcción de concreto armado, en la cual se aloja en su interior el sistema electrónico de monitoreo y automatización (Datalogger).

La caseta de instrumentación contará con alimentación eléctrica distribuida a través de un tablero general, el cual alimentará los diversos sistemas de instrumentación, debiendo contar con una barra de neutros y una de tierras, así como con contactos polarizados en la caseta.

En la caseta de instrumentación, se instalarán interruptores termo magnéticos, de manera independiente, uno para la corriente de los UPS, y otro para el sistema de alumbrado. Los conductores utilizados para la instalación eléctrica deberán estar codificados por colores de la siguiente manera:

CONDUCCION	COLOR
TIERRA	VERDE
NEUTRO	GRIS O BLANCO
FASE	ROJO

Tabla 7. Código de colores.

Alrededor de la caseta de instrumentación, se instalará un sistema de tierras, el cual constará de cuatro electrodos de cobre, de tal manera que la medición de la diferencia de potencial entre el neutro y la tierra no sea superior a 1.2 VCA.

Las casetas de instrumentación contarán con un sistema de protección eléctrica integral que consta de lo siguiente:

- Instalación de red de tierra física que garantice la suficiente disipación de energía al terreno (resistividad menor de 2 OHMS).
- Instalación de protectores especiales entre los diferentes sistemas de tierras, para evitar retornos de corriente por diferencias de potencial.
- Instalación de protectores contra transitorios y sobrevoltajes en las líneas de datos y señalización de los equipos de medición.

La obra civil de las casetas de instrumentación se presenta a continuación en la figura 87.

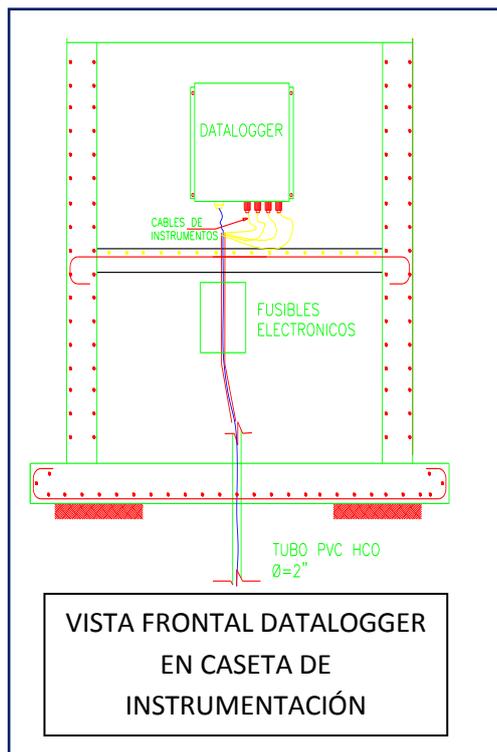
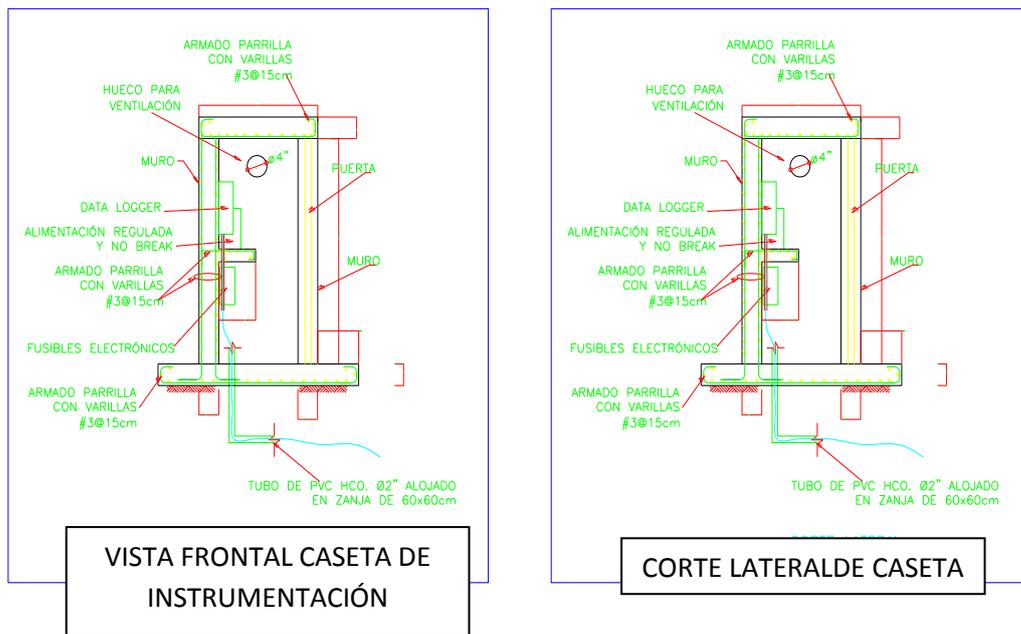


Figura 87. Obra civil de las casetas de instrumentación.

Registros de instrumentación.

Los registros de instrumentación son construcciones de concreto armado, que tiene como propósito la protección de la instalación de un instrumento de medición que previamente fue instalado en un barreno.

Los registros de concreto armado regularmente quedan a nivel de terreno natural y las tapas son metálicas y que solo pueden abrirse con herramientas especiales, cabe mencionar que estas tapas son debidamente pintadas e identificadas.

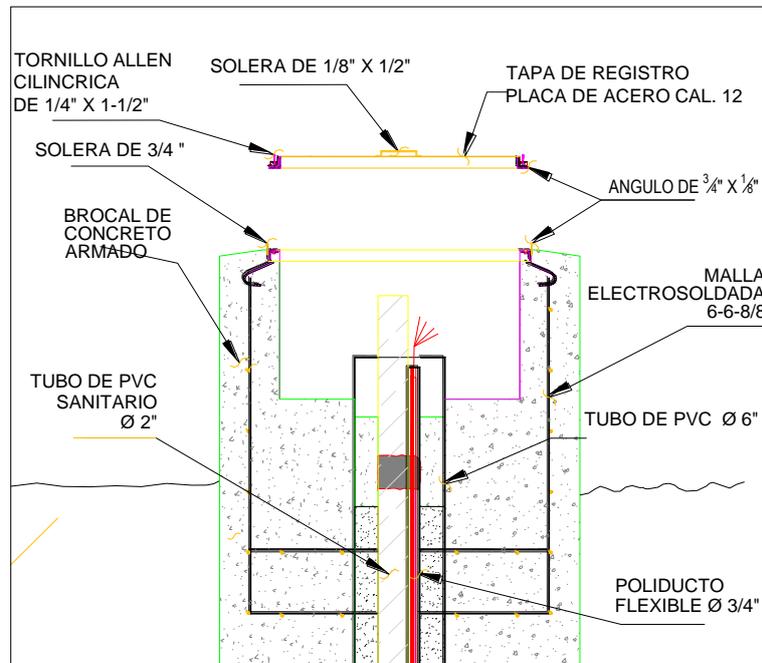


Figura 88. Esquema de registro de instrumentación.

<p>ESTACION</p> <p>CAD.: _____</p> <p>ESTACION-INST-No.</p> <p>PROF.: ____ m.</p> <p>FECHA DE INST.: DIA/MES/AÑO.</p> <p>N/S: _____</p>	<p>ESTACION</p> <p>PINSTRUMENTO No. _____</p>
--	--

Figura 89. Identificación de tapas de registros de instrumentación.

Capítulo 4. Interpretación de la información generada por la instrumentación.

En este capítulo se aborda la parte medular de la instrumentación Geotécnica y esta es la parte de los resultados; no hay que perder de vista los objetivos principales de estos trabajos, uno de ellos es prevenir alguna anomalía en la obra; además estos datos sirven para rediseñar estructuras y mejorar procesos constructivos. En resumen poner este tipo de resultados a servicio y mejora de la obra.

Para este capítulo es importante hacer referencia a un sistema de instrumentación real, de esta forma se podrá analizar la información y de manera general en algún momento poder extrapolar esta información y poder aplicarla a otra situación.

Para poder ejemplificar los resultados se toma como base los resultados arrojados por una estación de instrumentación Geotécnica que consta de dos piezómetros de cuerda vibrante, dos Piezo-celdas de cuerda vibrante y un extensómetro Magnético con tubería para inclinómetro y cuatro celdas de Presión de tierra colocadas en dovelas; lo anterior sirve para monitorear un túnel construido sobre suelos blandos y con ayuda de un escudo tipo EPB, con un diámetro de excavación de 10.20 m, con una estratigrafía igual a la mostrada en la figura 69.

4.1.- ALMACENAJE Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

Habitualmente dentro de un sistema de Instrumentación Geotécnica la forma de tomar lecturas se explica en el siguiente cuadro:

INSTRUMENTACIÓN

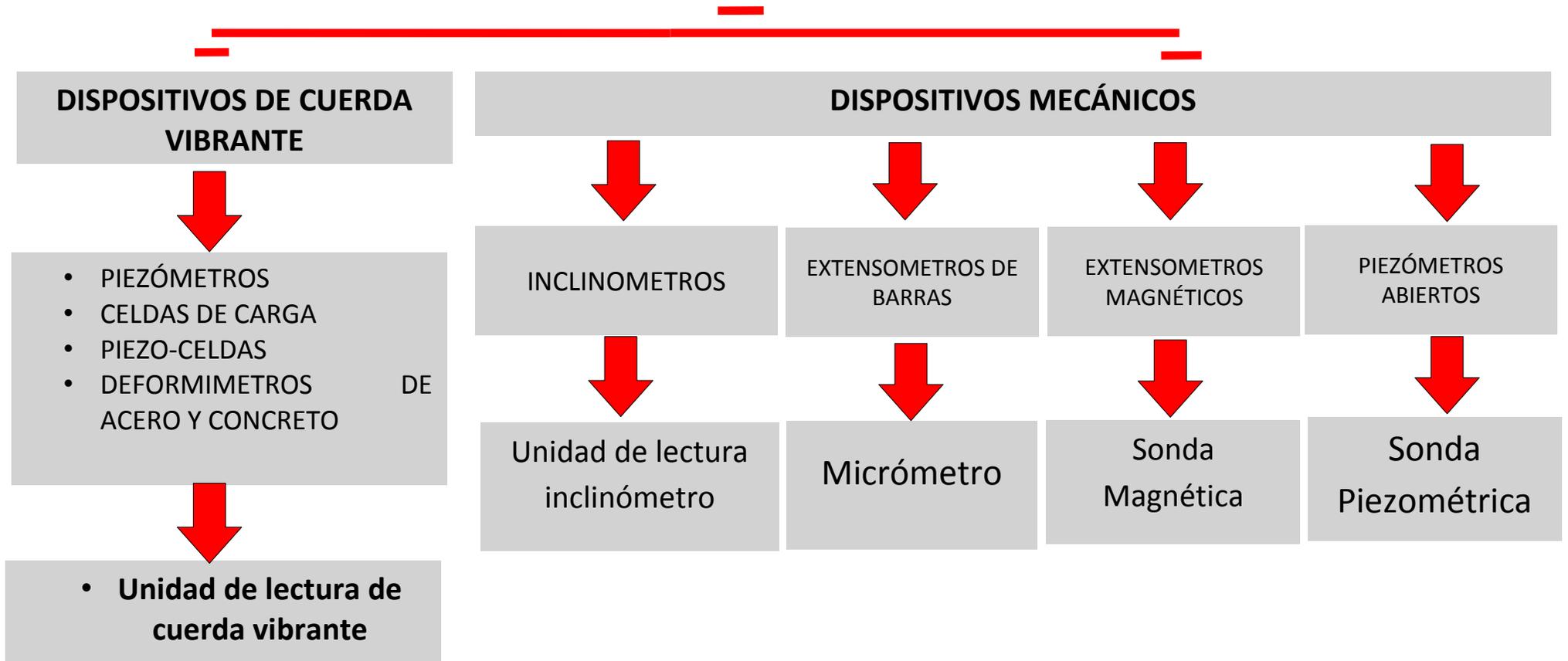


Tabla 8. Clasificación de la Instrumentación y toma de lecturas.

Dispositivos de cuerda vibrante.

Los dispositivos de cuerda vibrante como se puede observar en el cuadro 9, su obtención de datos es con ayuda de una unidad de lectura de cuerda vibrante.

La unidad de lectura de cuerda vibrante es un aparato de medición el cual realiza un barrido de un espectro de frecuencias, con el cual hace que la cuerda vibrante comienza a resonar en una frecuencia, la cual es captada por un oscilador de cristal de cuarzo de alta precisión y mediante un transductor la convierte en una señal digital.



Figura 90. Unidades de lectura de cuerda vibrante.

Las unidades de lectura realizan una medición en una unidad dígitos que es igual a:

$$\text{Digitos} = \left(\frac{1}{\text{periodo}} \right)^2 \times 10^{-3}$$

Cabe mencionar que mediante una programación, algunas unidades de lectura pueden dar automáticamente unidades de Ingeniería, estas lecturas se guardan en una memoria física que está incluida dentro de dichas unidades de lectura, dependiendo el modelo y la marca de estas, hay diferentes formas de descargar información en un ordenador PC, la más común es por un software específico y cada vez menos utilizado mediante una hyperterminal Windows.

Al obtener estos datos, se descargan en archivos con extensión .DAT, que se pueden abrir con una hoja de cálculo de Microsoft Excel, cuando se tienen los datos sin procesar, se dice que se tiene una matriz pura de datos. Regularmente los dispositivos de cuerda vibrante son proporcionados por el fabricante con una hoja de calibración en la cual se indica la forma de transformar. En la figura 89 se puede ver una hoja de calibración típica de un dispositivo de cuerda vibrante.

Vibrating Wire Pressure Transducer Calibration Report

Type: S Date of Calibration: October 11, 2006
 Serial Number: _____ Temperature: 22.3 °C
 Pressure Range: 700 kPa †Barometric Pressure: 995.5 mbar
 Cal. Std. Cntrl. #(s): 524, 529, 511, 506, 069, 309, 428, 028 Calibration Instruction: VW Pressure Transducers Rev-B
 Technician: _____

Applied Pressure (kPa)	Gage Reading 1st Cycle	Gage Reading 2nd Cycle	Average Gage Reading	Calculated Pressure (Linear)	Error Linear (%FS)	Calculated Pressure (Polynomial)	Error Polynomial (%FS)
0.0	8963	8963	8963	0.976	0.14	0.015	0.00
140.0	8089	8089	8089	139.8	-0.03	140.0	0.00
280.0	7211	7211	7211	279.2	-0.11	280.0	0.00
420.0	6330	6330	6330	419.2	-0.12	419.9	-0.01
560.0	5444	5444	5444	559.9	-0.02	560.1	0.01
700.0	4556	4556	4556	700.9	0.13	700.0	-0.01

(kPa) Linear Gage Factor (G): 0.1588 (kPa/ digit) Regression Zero: 8969
 Polynomial Gage Factors: A: -3.723E-07 B: -0.1538 C: 1408.4
 Thermal Factor (K): -0.1043 (kPa/ °C)

(psi) Linear Gage Factor (G): 0.02304 (psi/ digit)
 Polynomial Gage Factors: A: -5.40037E-08 B: -0.02231 C: 204.27
 Thermal Factor (K): -0.01513 (psi/ °C)

Calculated Pressures: Linear, $P = G(R_0 - R_1) + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)**$
 Polynomial, $P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)**$
 †Barometric pressures are absolute. Barometric compensation is not required with vented and differential pressure transducers.

Factory Zero Reading:
 GK-401 Pos. B or F(R₀): 8973 Temp(T₀): 23.0 °C †Baro(S₀): 980.5 mbar Date: October 23, 2006

Figura 91. Hoja de calibración de un dispositivo de cuerda vibrante.

Realizando la programación que se sugiere en la hoja de calibración de los instrumentos, se puede tener una tabla de resultados de la siguiente forma:

LECTURAS DE MEDICIÓN DE PIEZOMETRO									
PIEZOMETRO (NVS: _____)									
Fecha de instalación en la estación:									
Número de Serie:									
Longitud de cable:		45.00 m							
PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA HOJA DE CALIBRACIÓN (Ajuste Lineal):					PARÁMETROS DURANTE SU INSTALACIÓN EN LA ESTACION				
Bi =	993.00	mbars	(Presión barométrica en fábrica)						
Bs =	1,024.40	mbars	(Presión barométrica en fábrica, despues de calibración)						
Ti =	17.00	°C	(Temperatura en fábrica)		17.60	(Temperatura inicial °C)			
Lc =	9,940.00	(B units)	(Lectura del instrumento en fábrica)		9,912.00	(Lectura Cero)			
CF =	0.272460	MPa/unit	(FACTOR DE CALIBRACION)						
Tk =	0.8235	MPa/°C rise	(FACTOR DE CALIBRACION DE TEMPERATURA)						
$P(kPa) = C.F. \times (Lc - Lc) - [Tk(Ti - Tc)] + 0.1(Bi - Bs)$									
No.	Fecha	Lc (Bunits)	T (°c)	FECHA	Lc (Bunits)	T (°c)	P (kPa)	P (tm2)	Observaciones
1	02/02/2010 17:17	9,912.00	17.70						
2	02/02/2010 17:18	9,912.30	17.60						
3	02/02/2010 17:19	9,911.70	17.50	02/02/2010 17:18	9,912.00	17.60	0.00	0.00	Lectura cero
4	02/02/2010 17:57	9,635.50	20.60						
5	02/02/2010 17:58	9,617.00	20.70						
6	02/02/2010 17:59	9,600.50	20.80	02/02/2010 17:58	9,617.00	20.70	82.67	8.43	
7	02/02/2010 18:07	9,542.50	20.80						
8	02/02/2010 18:08	9,540.50	20.90						
9	02/02/2010 18:09	9,538.40	21.00	02/02/2010 18:08	9,540.50	20.90	103.91	10.58	
10	03/02/2010 15:58	9,646.40	22.10						
11	03/02/2010 15:59	9,646.40	22.20						
12	03/02/2010 16:00	9,646.40	22.20	03/02/2010 15:59	9,646.40	22.17	76.13	7.76	

Figura 92. Hoja de cálculo de un dispositivo de cuerda vibrante.

Regularmente en la práctica se realiza una serie de tres lecturas a modo de tener una certeza de que los registros son correctos y no se tiene una variación de frecuencias. En la figura 92 se encierra en una elipse los parámetros que se obtienen en la hoja de calibración del fabricante y en cuadro naranja se muestra la fórmula empleada para obtener los resultados en unidades de Ingeniería. Un ejemplo más se muestra a continuación, en donde se puede observar la hoja de cálculo de un deformímetro de concreto mostrando el uso de la convención de signos, en el resultado obtenido.

SENSORES DE CONCRETO:
 Fecha de instalación en el túnel: 02/09/2008
 Número de Serie:
 Longitud de cable: _____ m

PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA HOJA DE CALIBRACIÓN (Ajuste Lineal):

G = 3.3040 (Gage Factor) (µε / dígito)

K = 1.80000 (Constante de temperatura) (µε / °C)

T₀ = _____ (Temperatura en fábrica)

(TENSION)

(COMPRESION)

PARÁMETROS DURANTE SU INSTALACIÓN EN EL TÚNEL

G = 3.3040 (Gage Factor) (µε / dígito)

K = 1.8000 (Constante de temperatura) (µε / °C)

T₀ = 30.80 (Temperatura inicial °C)

R₀ = 884.73 (Lectura Cero)

$\Delta L(mm) = \text{Lectura en } \mu\epsilon \times \text{Longitud de la cuerda en } mm \times 10^{-4}$

No.	Fecha	LECTURA 1		LECTURA 2		LECTURA 3		PROMEDIOS		Deformación (Ajuste Lineal)				Observaciones				
		Hora (24 hrs)	R ₁	T ₁ °C	Hora (24 hrs)	R ₂	T ₂ °C	Hora (24 hrs)	R ₃	T ₃ °C	R _{prom}	T _{prom} °C	G(R ₀ - R _i)		K(T ₁ - T ₃)	Def (µε)	ΔL(mm)	
1	20/09/2008	11:17	884.60	30.80	11:18	885.30	30.80	11:19	884.30	30.80	11:18	884.73	30.80	0.00	0.00	0.000000	Lectura cero	
2	23/09/2008	11:13	810.60	50.00	11:14	810.50	50.00	11:15	810.50	50.00	11:14	810.53	50.00	245.16	34.56	279.72	0.042517	Lectura tomada en fraguado de lanzado
3	29/09/2008	15:23	954.80	27.10	15:24	954.70	27.10	15:25	954.70	27.10	15:24	954.73	27.10	-231.28	-6.66	-237.94	-0.036167	Lectura 2
4	07/10/2008	13:11	988.20	23.20	13:12	988.00	23.20	13:13	988.00	23.20	13:12	988.07	23.20	-341.41	-13.68	-355.09	-0.053974	

Figura 93. Hoja de cálculo de un deformímetro de concreto.

Inclinómetro.

Este tipo de instrumentos Geotécnicos, se miden a través de una sonda magnética que consta de dos acelerómetros MEMS y una unidad de lectura portable, que se comunica vía bluetooth con los acelerómetros.

La lectura inicial o de referencia, es indispensable ya que las subsecuentes lecturas se harán de la misma forma, antes que nada se debe de elegir los ejes en los cuales se realizara la medición, la figura 94 muestra la convención de signos que se utilizara y la forma en que se coloca la sonda (Torpedo) para lograr este objetivo.

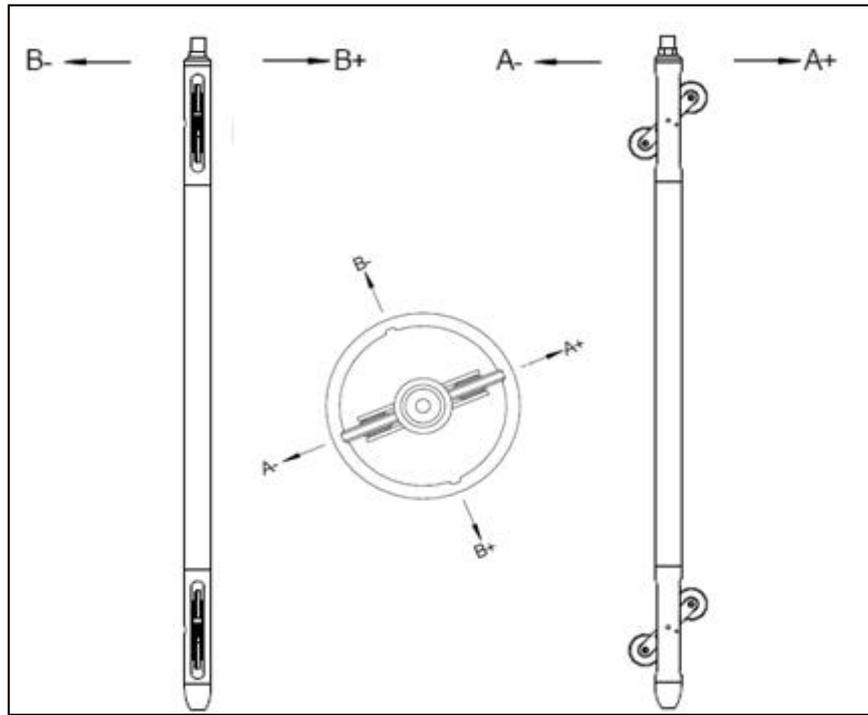


Figura 94.Convención de signos en un inclinómetro.

Ya elegida la convención a utilizar, se conecta el torpedo a un carrete de cable de señal, el cual esta graduado a cada 0.5 m. Posteriormente se baja el torpedo dentro de la tubería para inclinómetro previamente instalada (ver sección 4.2.1), a la profundidad deseada.

Una vez que la profundidad deseada ha sido alcanzada, preferentemente en la base de la tubería, colocar el cable de señal en la base de la tubería, tomar la lectura después de observar cierta estabilización en la pantalla, para posteriormente tomar las subsecuentes cada 0.5 m y hasta realizar un barrido de toda la tubería.

Después de que el torpedo salga a la superficie se gira 180°, se profundiza hasta el fondo de la perforación y se obtienen las mediciones en las direcciones A y B. La suma de las dos mediciones debe ser cercana a 0.0, aunque se presentan generalmente algunas diferencias.

Las mediciones en un mismo sitio deben realizarse siempre con el mismo torpedo, el mismo cable y el mismo operador, para minimizar los errores de manejo.



Figura 95. Toma de lectura de un inclinómetro.

Cuidados que se deben tener en el proceso de medición y se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

- El torpedo no debe golpearse contra superficies duras para evitar que se dañen los sensores. Si accidentalmente se golpea el torpedo este debe chequearse realizando mediciones de comprobación.
- No permita que le entre humedad a las conexiones eléctricas. Nunca deben conectarse los cables al torpedo en presencia de lluvia o humedad excesiva.
- El cable debe transportarse en tal forma que no se doble.
- El torpedo debe limpiarse, secarse y aceitarse suavemente antes de colocarlo en su caja. La caja debe colocarse sobre la silla de un vehículo y nunca sobre las áreas duras.

La información se registra en la memoria interna de la unidad de lectura y es descargada en un ordenador PC.

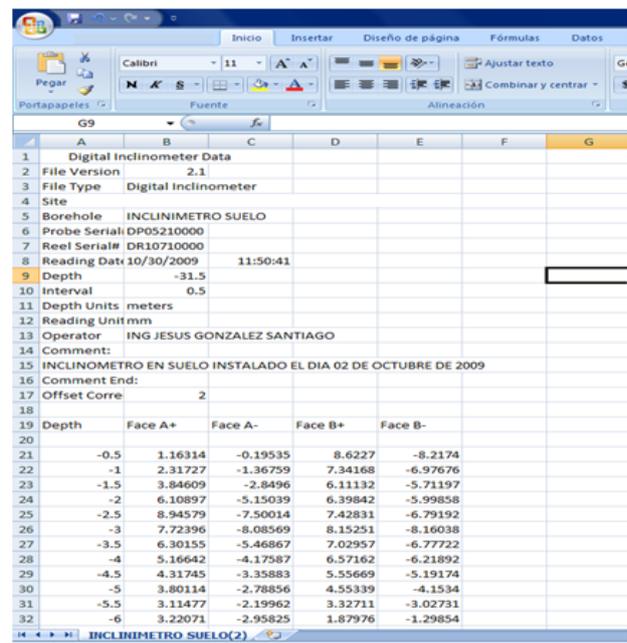
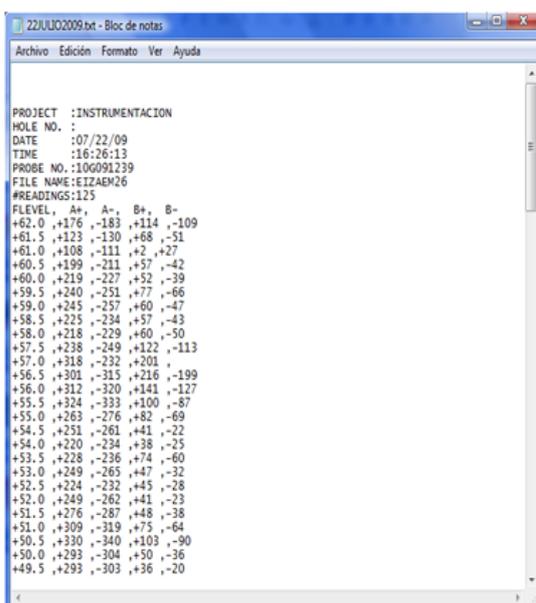


Figura 96. Matrices de lecturas descargadas en un ordenador PC.

Ya descargadas las matrices en el ordenador PC, hay dos formas de procesar los datos, una mediante un software proporcionado por el fabricante o la otra es realizarlo mediante operaciones y gráficas auxiliadas con una hoja de cálculo. A continuación se describirá la forma de procesar los datos y llegar a la gráfica del desplazamiento horizontal.

Antes de procesar los datos es altamente recomendable, realizar varias lecturas “cero”, esto con el objeto de verificar que el funcionamiento sea correcto.

Posteriormente conocer el Angulo de desviación de las ranuras guías de la tubería del inclinómetro con respecto al trazo perpendicular al túnel. Este efecto es atribuible al proceso de cementación o inyección de la tubería, para corregir las desviaciones, en las hojas de cálculo se consideran estos desplazamientos, los cuales son medidos topográficamente en campo.

La lectura “cero” será pues nuestra referencia universal, las subsecuentes lecturas serán siempre referidas a esta. Y estamos en el supuesto que las deformaciones horizontales son nulas y que a partir de este momento se empezaran a monitorear.

A continuación y como se puede observar en la figura 94, se obtienen cuatro lecturas producto de las dos direcciones de movimiento y de los dos barridos con el torpedo. A continuación se restan los valores que corresponden a cada una de las direcciones (es decir $[A+] - [A-]$ y $[B+] - [B-]$), esta resta es denominada diferencia actual de las lecturas.

Posteriormente esta diferencia es referenciada a la lectura inicial de referencia o “cero”, ahora se realiza una resta de la diferencia actual de lecturas con respecto a la lectura inicial, para de esta forma obtener una corrección por eje, esta corrección debe de ser multiplicada por 0.5 que es la longitud de medición, para de esta forma obtener una deflexión a las distintas profundidades. Posteriormente de obtener la deflexión se realiza un acumulado de esta para posteriormente realizar la corrección angular y así determinar la deflexión acumulada corregida. A continuación se muestra una hoja de cálculo con la programación antes mencionada, en la cual se observa con claridad cada uno de los pasos anteriormente descritos

					CORRECCIÓN POR														
					ÁNGULO DE DESVÍO =		2.86111111111111		GRADOS										
					0.0499358091				RAD										
5	Borehole																		
6	Probe Serial#																		
7	Reel Serial#																		
8	Reading Date(n	11/03/2009	16:14:40																
9	Depth	-31.5																	
10	Interval	0.5																	
11	Depth Units	meters																	
12	Reading Units	mm																	
13	Operator	ING JESUS GONZALEZ SANTIAGO																	
14	Comment																		
15	Comment End:																		
16	Offset Correctio	0																	
17																			
					DIFERENCIAS EN LA LECTURA ACTUAL				I.M.A										
18	Depth	Face A+	Face A-	Face B+	Face B-	[A+] - [A-]	[B+] - [B-]	Corr. (EJE A)	Corr. (EJE B)	DEFLEXION	DEFLEXION ACUM.	DEFLEXION ACUM. CORREGIDA	DEFLEXION	DEFLEXION ACUM.	DEFLEXION ACUM. CORREGIDA	DEFLEXION	DEFLEXION ACUM.	DEFLEXION ACUM. CORREGIDA	
19	-31.5	-8.11457	9.13314	-4.84285	5.14126	=B20-C20	=D20-E20	=G20*10-28-2009*IG20	=H20*10-28-2009*IH20	=I20*0.5	=K20	=(L20*COS(SHS77))+(O20*SENO(SHS77))	=J20*0.5	=N20					
20	-31	-6.88245	8.19688	-2.12706	2.28389	=B21-C21	=D21-E21	=G21*10-28-2009*IG21	=H21*10-28-2009*IH21	=I21*0.5	=L20+K21	=(L21*COS(SHS77))+(O21*SENO(SHS77))	=J21*0.5	=O20					
21	-30.5	-5.8203	6.82902	-3.855	4.26391	=B22-C22	=D22-E22	=G22*10-28-2009*IG22	=H22*10-28-2009*IH22	=I22*0.5	=L21+K22	=(L22*COS(SHS77))+(O22*SENO(SHS77))	=J22*0.5	=O21					
22	-30	-4.19321	5.10131	-3.09881	3.47045	=B23-C23	=D23-E23	=G23*10-28-2009*IG23	=H23*10-28-2009*IH23	=I23*0.5	=L22+K23	=(L23*COS(SHS77))+(O23*SENO(SHS77))	=J23*0.5	=O22					
23	-29.5	-3.77811	4.91828	-0.96484	1.37319	=B24-C24	=D24-E24	=G24*10-28-2009*IG24	=H24*10-28-2009*IH24	=I24*0.5	=L23+K24	=(L24*COS(SHS77))+(O24*SENO(SHS77))	=J24*0.5	=O23					
24	-29	-5.0151	4.42078	2.72597	-1.93328	=B25-C25	=D25-E25	=G25*10-28-2009*IG25	=H25*10-28-2009*IH25	=I25*0.5	=L24+K25	=(L25*COS(SHS77))+(O25*SENO(SHS77))	=J25*0.5	=O24					
25	-28.5	-5.60082	7.27992	9.97701	-9.74326	=B26-C26	=D26-E26	=G26*10-28-2009*IG26	=H26*10-28-2009*IH26	=I26*0.5	=L25+K26	=(L26*COS(SHS77))+(O26*SENO(SHS77))	=J26*0.5	=O25					
26	-28	-12.32907	13.3011	3.09048	-2.82544	=B27-C27	=D27-E27	=G27*10-28-2009*IG27	=H27*10-28-2009*IH27	=I27*0.5	=L26+K27	=(L27*COS(SHS77))+(O27*SENO(SHS77))	=J27*0.5	=O26					
27	-27.5	-15.79092	16.87042	2.23016	-1.87605	=B28-C28	=D28-E28	=G28*10-28-2009*IG28	=H28*10-28-2009*IH28	=I28*0.5	=L27+K28	=(L28*COS(SHS77))+(O28*SENO(SHS77))	=J28*0.5	=O27					
28	-27	-12.53689	13.65707	0.99434	-0.70919	=B29-C29	=D29-E29	=G29*10-28-2009*IG29	=H29*10-28-2009*IH29	=I29*0.5	=L28+K29	=(L29*COS(SHS77))+(O29*SENO(SHS77))	=J29*0.5	=O28					
29	-26.5	-10.5778	11.80693	-0.93907	1.24831	=B30-C30	=D30-E30	=G30*10-28-2009*IG30	=H30*10-28-2009*IH30	=I30*0.5	=L29+K30	=(L30*COS(SHS77))+(O30*SENO(SHS77))	=J30*0.5	=O29					
30	-26	-10.76324	11.80718	-3.49234	3.90914	=B31-C31	=D31-E31	=G31*10-28-2009*IG31	=H31*10-28-2009*IH31	=I31*0.5	=L30+K31	=(L31*COS(SHS77))+(O31*SENO(SHS77))	=J31*0.5	=O30					
31	-25.5	-7.97288	8.99014	-5.84572	6.18601	=B32-C32	=D32-E32	=G32*10-28-2009*IG32	=H32*10-28-2009*IH32	=I32*0.5	=L31+K32	=(L32*COS(SHS77))+(O32*SENO(SHS77))	=J32*0.5	=O31					
32	-25	-5.75147	5.96562	-2.39708	3.74013	=B33-C33	=D33-E33	=G33*10-28-2009*IG33	=H33*10-28-2009*IH33	=I33*0.5	=L32+K33	=(L33*COS(SHS77))+(O33*SENO(SHS77))	=J33*0.5	=O32					
33	-24.5	-1.99162	3.122	-1.00268	1.25696	=B34-C34	=D34-E34	=G34*10-28-2009*IG34	=H34*10-28-2009*IH34	=I34*0.5	=L33+K34	=(L34*COS(SHS77))+(O34*SENO(SHS77))	=J34*0.5	=O33					
34	-24	-0.58814	1.70101	-0.2954	0.62608	=B35-C35	=D35-E35	=G35*10-28-2009*IG35	=H35*10-28-2009*IH35	=I35*0.5	=L34+K35	=(L35*COS(SHS77))+(O35*SENO(SHS77))	=J35*0.5	=O34					
35	-23.5	-0.97685	2.09968	-0.16327	0.44009	=B36-C36	=D36-E36	=G36*10-28-2009*IG36	=H36*10-28-2009*IH36	=I36*0.5	=L35+K36	=(L36*COS(SHS77))+(O36*SENO(SHS77))	=J36*0.5	=O35					
36	-23	-2.96389	4.07172	-0.69516	1.00348	=B37-C37	=D37-E37	=G37*10-28-2009*IG37	=H37*10-28-2009*IH37	=I37*0.5	=L36+K37	=(L37*COS(SHS77))+(O37*SENO(SHS77))	=J37*0.5	=O36					
37	-22.5	-5.26908	6.29652	-0.16327	0.44009	=B38-C38	=D38-E38	=G38*10-28-2009*IG38	=H38*10-28-2009*IH38	=I38*0.5	=L37+K38	=(L38*COS(SHS77))+(O38*SENO(SHS77))	=J38*0.5	=O37					
38	-22	-6.70303	7.77917	1.20237	-0.8695	=B39-C39	=D39-E39	=G39*10-28-2009*IG39	=H39*10-28-2009*IH39	=I39*0.5	=L38+K39	=(L39*COS(SHS77))+(O39*SENO(SHS77))	=J39*0.5	=O38					
39	-21.5	-8.17878	9.42411	3.08624	-2.88263	=B40-C40	=D40-E40	=G40*10-28-2009*IG40	=H40*10-28-2009*IH40	=I40*0.5	=L39+K40	=(L40*COS(SHS77))+(O40*SENO(SHS77))	=J40*0.5	=O39					
40	-21	-12.43586	11.76599	4.93797	-2.04418	=B41-C41	=D41-E41	=G41*10-28-2009*IG41	=H41*10-28-2009*IH41	=I41*0.5	=L40+K41	=(L41*COS(SHS77))+(O41*SENO(SHS77))	=J41*0.5	=O40					
41	-20.5	-15.69662	16.20414	3.2591	-2.4377	=B42-C42	=D42-E42	=G42*10-28-2009*IG42	=H42*10-28-2009*IH42	=I42*0.5	=L41+K42	=(L42*COS(SHS77))+(O42*SENO(SHS77))	=J42*0.5	=O41					
42	-20	-14.86684	15.8914	1.97799	-1.72547	=B43-C43	=D43-E43	=G43*10-28-2009*IG43	=H43*10-28-2009*IH43	=I43*0.5	=L42+K43	=(L43*COS(SHS77))+(O43*SENO(SHS77))	=J43*0.5	=O42					
43	-19.5	-14.67429	15.99989	0.77674	-0.91646	=B44-C44	=D44-E44	=G44*10-28-2009*IG44	=H44*10-28-2009*IH44	=I44*0.5	=L43+K44	=(L44*COS(SHS77))+(O44*SENO(SHS77))	=J44*0.5	=O43					
44	10-E	10-28-2009	11-03-2009	11-05-2009	11-11-2009	11-12-2009	11-17-2009	11-19-2009	11-24-2009	11-30-2009									

Figura 97. Hoja de cálculo para procesar matrices de inclinómetro.

Obtenidos los resultados anteriores se grafican con respecto a la profundidad y en ambos ejes, como se muestra a continuación:

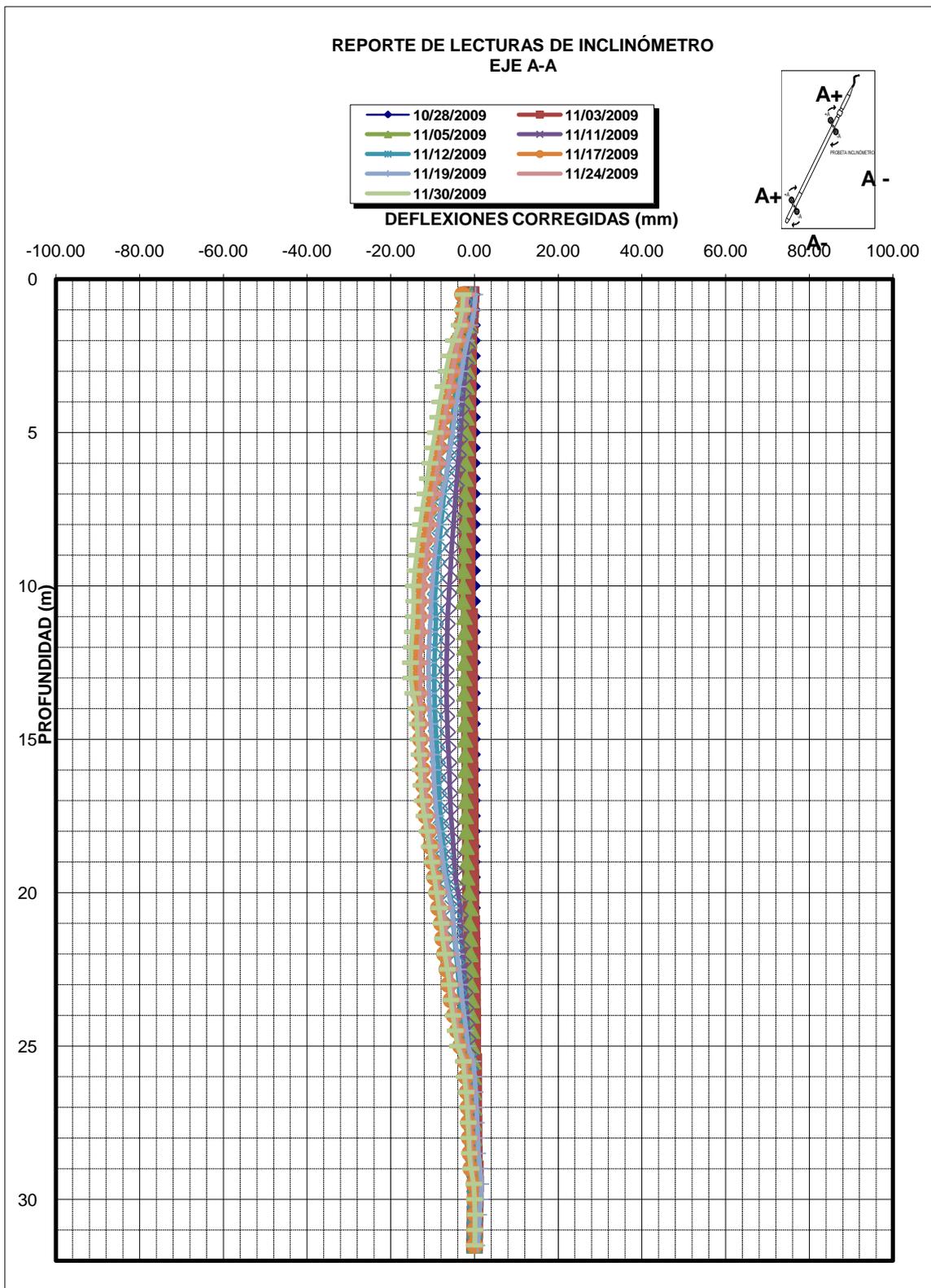


Figura 98. Grafica típica de deformaciones horizontales contra profundidad.

Extensómetro de barras.

Regularmente el extensómetro de barras cuenta con tres sistemas de varillas de acero galvanizado instalados a diferentes profundidades; la forma de realizar la medición es colocando un micrómetro en cada uno de los huecos que se encuentran en el cabezal, estos huecos por conveniencia se encuentran identificados del 1 al 3, siendo el 1 el sistema de varillas mas somero y el 3 el más profundo.

Se realiza una serie de tres lecturas por cada sistema, esto con la finalidad de reducir lo menos posible la sensibilidad del operador y de tener certeza de que las lecturas tomadas sean correctas.

Para la lectura inicial es recomendable realizar varios eventos para tener una confianza plena, cabe recordar que desde este momento se empezaran a monitorear los asentamientos del terreno. En los siguientes eventos se obtendrá un promedio de las lecturas realizadas y este promedio se descontara con la lectura inicial (resta de valores absolutos), con lo que se obtendrá el asentamiento a cierta profundidad y en un periodo de tiempo determinado, es decir podemos obtener una velocidad promedio de un asentamiento regional. A continuación se ilustra una forma de procesar los datos:

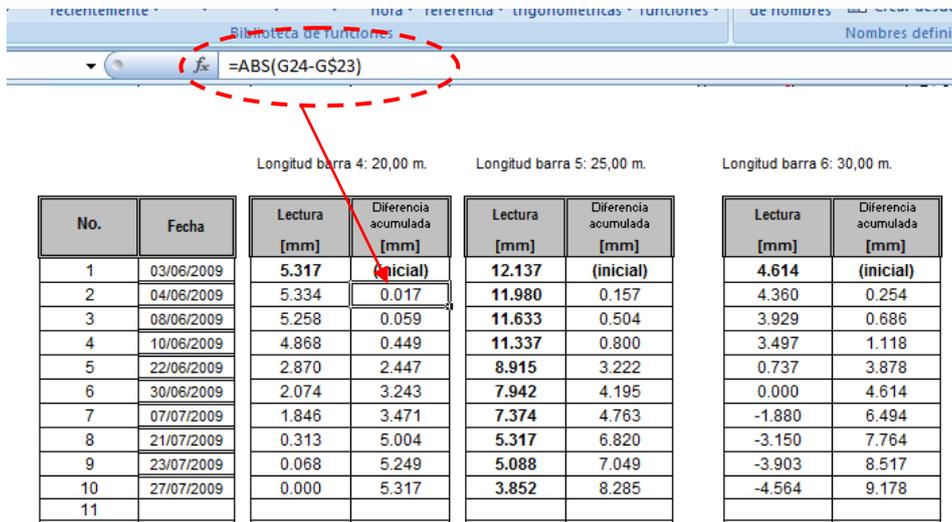


Figura 99. Procesamiento de datos en un extensómetro de barras.

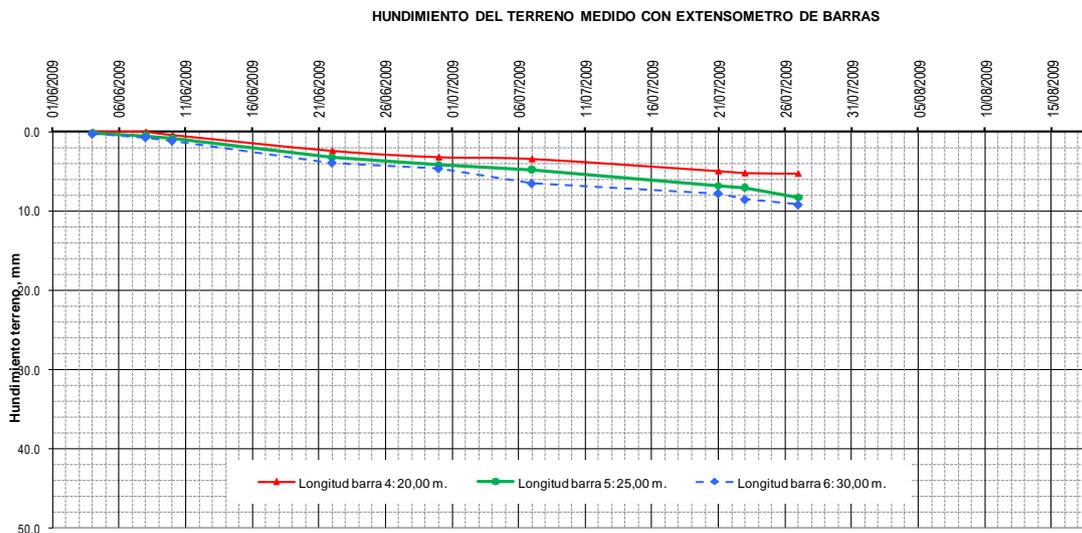


Figura 100. Grafica de hundimiento de terreno medido con extensómetro de barras.

Extensómetro Magnético.

Este sistema como anteriormente fue descrito consta de sensores magnéticos incrustados en estratos estratégicos, para conocer hundimientos en los mismos.

La forma de obtener información es mediante una sonda magnética equipada con una cinta plástica graduada, con una sensibilidad de un milímetro, la sonda genera un campo magnético con los imanes incrustados en el sensor incrustado en las paredes del barreno y denominada “Araña magnética”, se emite un pequeño sonido y se prende un foco rojo colocado en la carcasa de la sonda cuando se tiene la ubicación exacta del sensor.



Figura 101. Vista de sonda magnética.

En una bitácora se lleva el registro de las lecturas realizadas y posteriormente se procesan en una hoja de cálculo, en esta hoja se recomienda programar la siguiente fórmula:

$$Z[m] = ABS\{[(L_0 - H_0) - (L - H)] - [(L - L_0) - (H - H_0)]\} * 1000$$

Dónde:

Z= Hundimiento por araña en [m].

L_0 = Profundidad de anillo de referencia inicial en [m].

H_0 = Profundidad inicial de la araña magnética en [m].

L= Profundidad actual del anillo de referencia en [m].

H= Profundidad actual de la araña magnética en [m].

Piezómetro abierto

La forma de procesar los datos de un instrumento de este tipo se realiza por medio de la siguiente fórmula:

$$P_{piez} = \gamma_{ag}(H_{med} - H_{Inst})$$

Dónde:

P_{piez} = Presión piezometrica a una profundidad conocida en $[\frac{t}{m^2}]$.

γ_{ag} = Peso volumétrico del agua en $[\frac{t}{m^3}]$.

H_{med} = Profundidad a la que se encuentra el tirante de agua en [m].

H_{Inst} = Profundidad de instalación en [m].

4.2.- GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO.

Como se había mencionado antes, tanto para realizar el análisis, como para mostrar las gráficas típicas de comportamiento se tomara un ejemplo real para ilustrarlo, a continuación se muestra una estación típica, la ubicación de cada uno de los instrumentos se muestran en la figura 100 y posteriormente se mostraran los comportamientos antes del paso del escudo, al pasar el escudo y posterior a su paso, así como las condiciones en las que se instalaron.

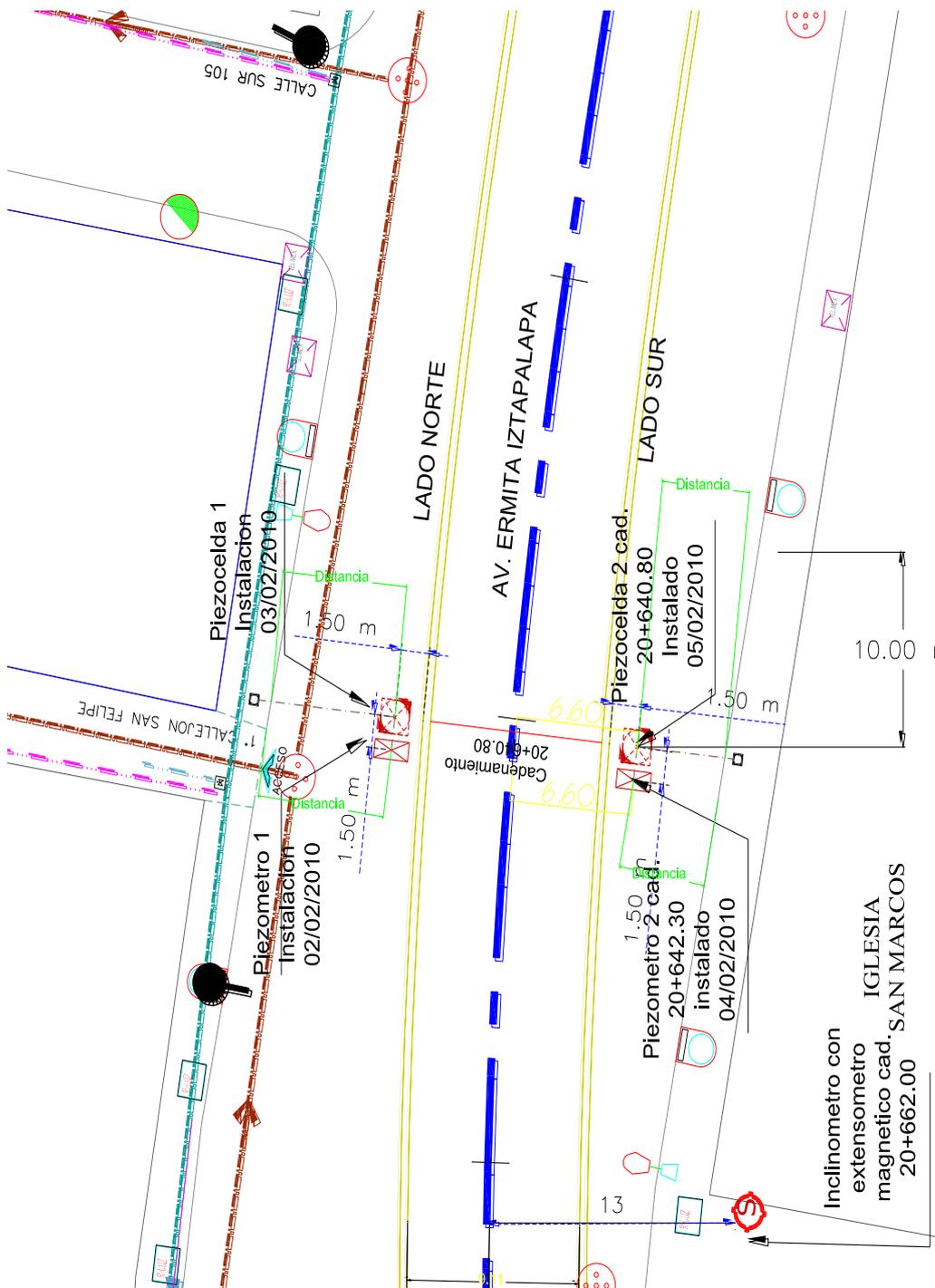


Figura 102. Ubicación de instrumentos geotécnicos en una estación real.

a) Piezómetros de cuerda vibrante:

Con el fin de observar la variación de la presión de agua en el subsuelo se instalaron dos piezómetros a 1.50m del paño exterior del túnel, situándose uno en clave y otro en cubeta (figura 101).

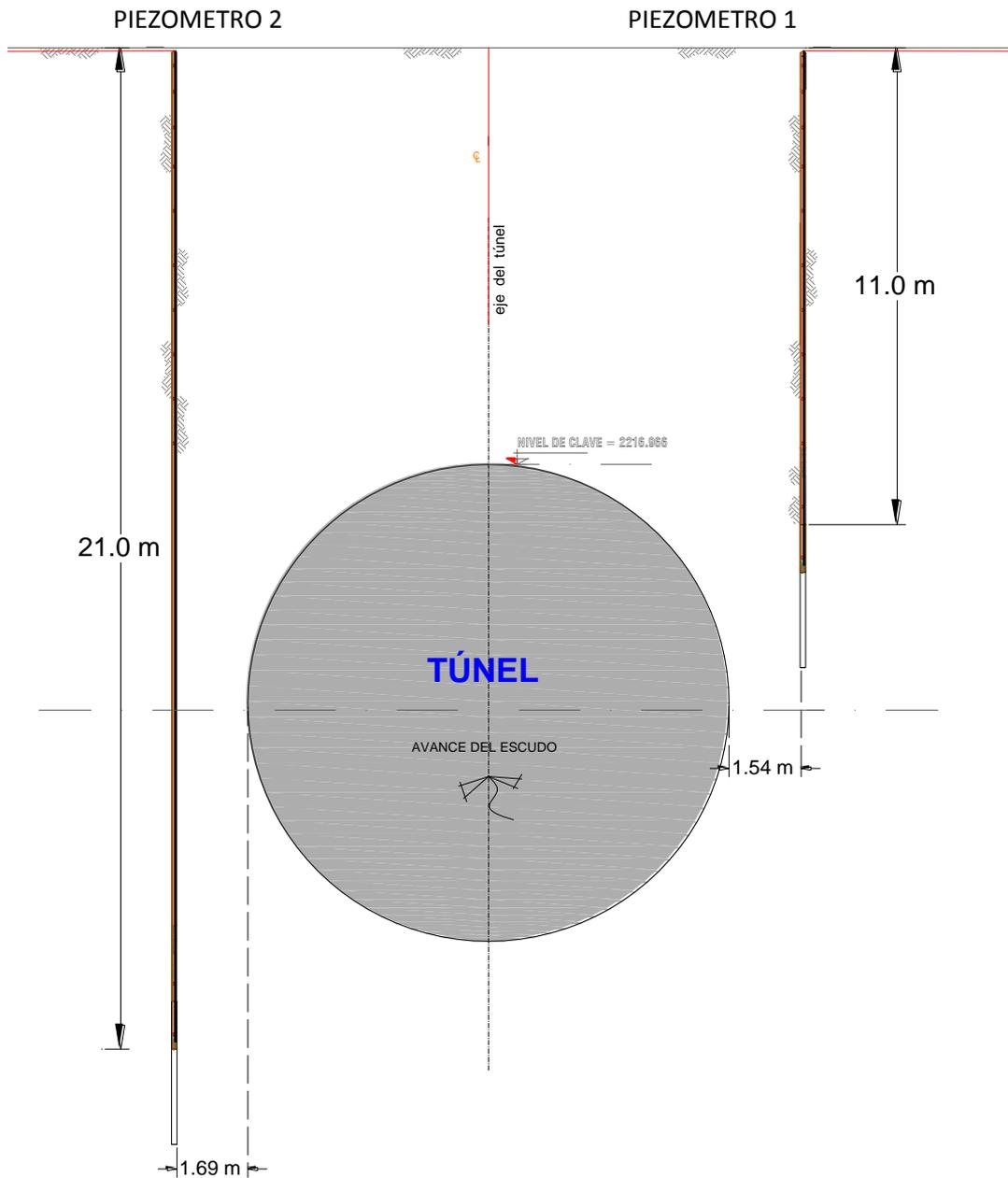


Figura 103. Sección transversal de instalación de los piezómetros.

A continuación se mostrarán las gráficas de comportamiento y se identificarán con barras de colores los eventos importantes.

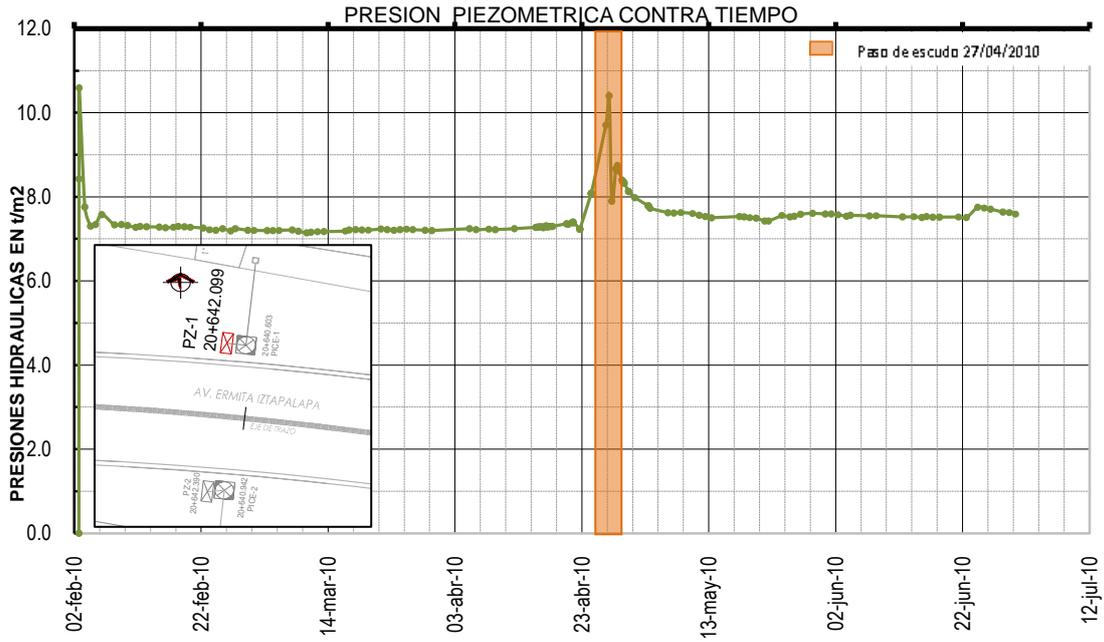


Figura 104. Grafica del comportamiento del piezómetro 1.

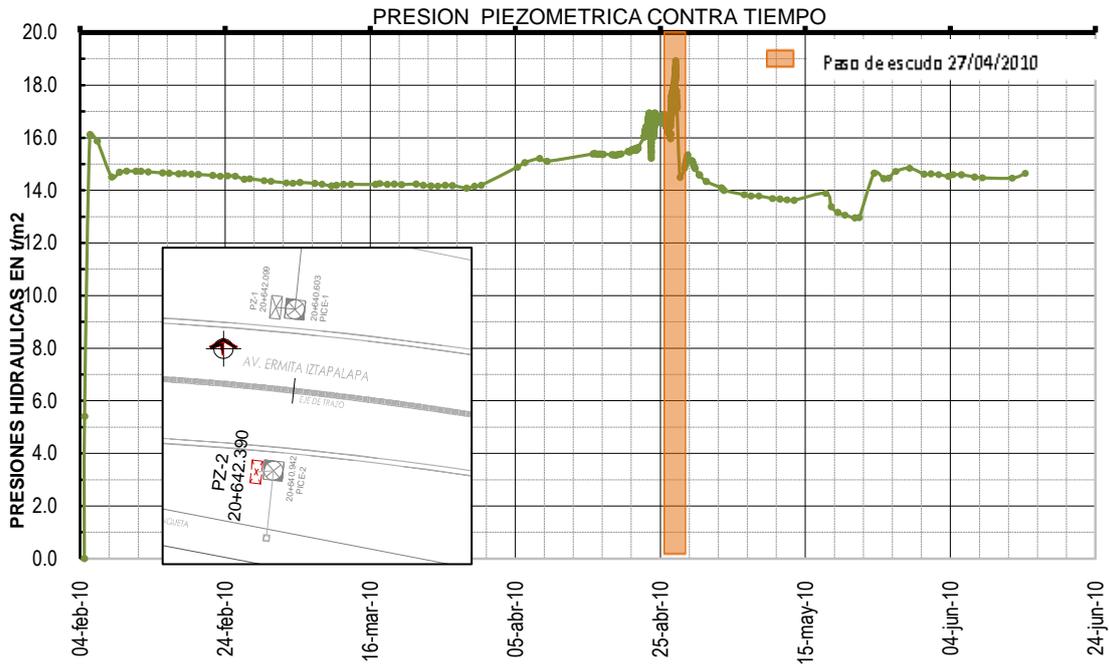


Figura 105. Grafica del comportamiento del piezómetro 2.

b) Piezo-celdas de cuerda vibrante:

Con el objetivo de observar la variación de la presión de agua y totales en el subsuelo se instalaron dos piezo-celdas a 1.50m del paño exterior del túnel del anillo instrumentado, situándose uno en cada hastial (figura 104).

Para medir la presión de agua en el suelo y el esfuerzo horizontal se utilizaran piezo-celdas, la cual es un dispositivo que está integrado por un piezómetro y una celda de presión que se instalan hincándolas en el suelo de manera vertical, en un plano perpendicular a la aplicación de la carga o presión.

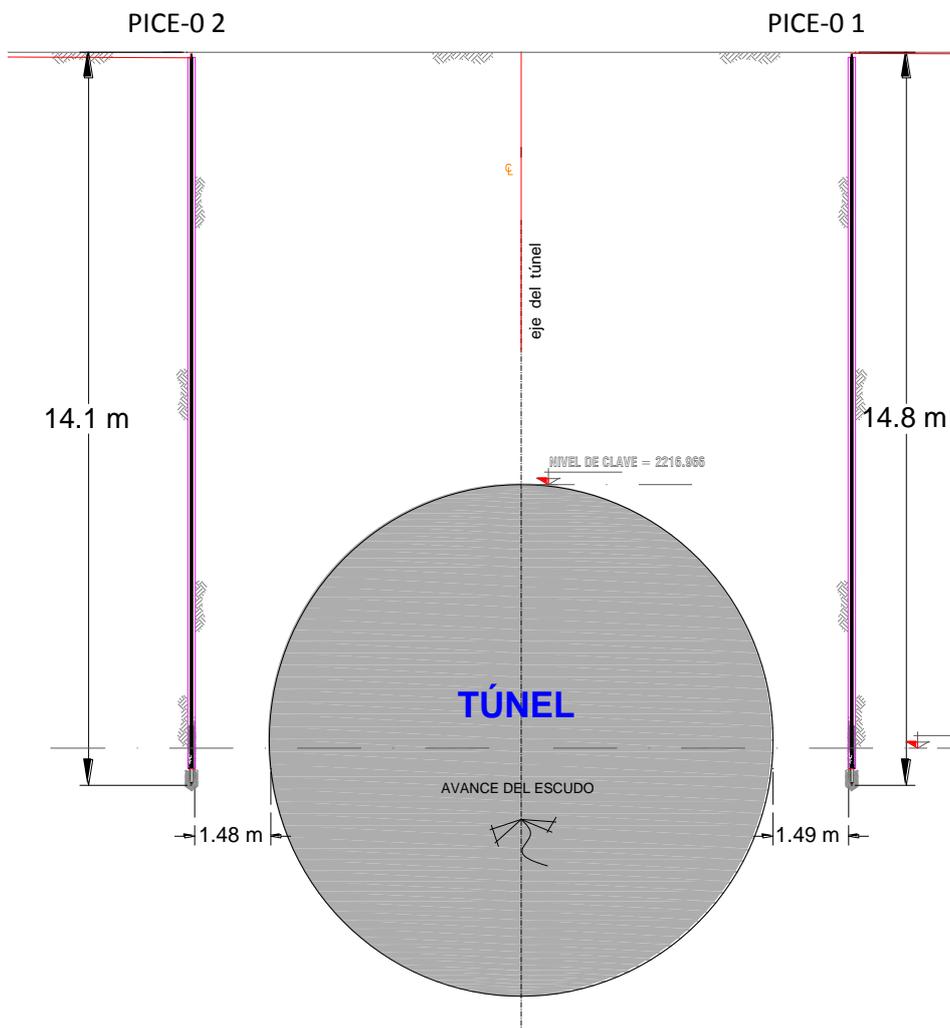


Figura 106. Sección transversal de la instalación de las piezo-celdas.

A continuación se mostraran las gráficas de comportamiento de las piezo-celdas y se identificarán con barras de colores los eventos importantes.

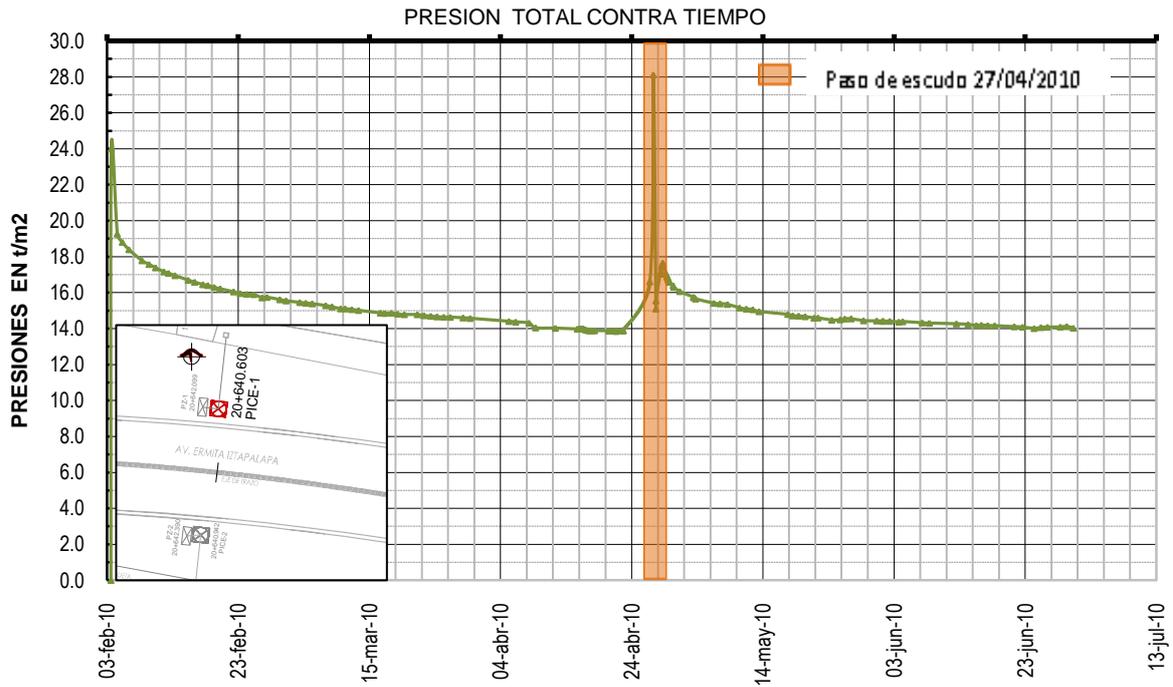


Figura 107. Grafica del comportamiento la celda de presión de la piezo-celda 1.

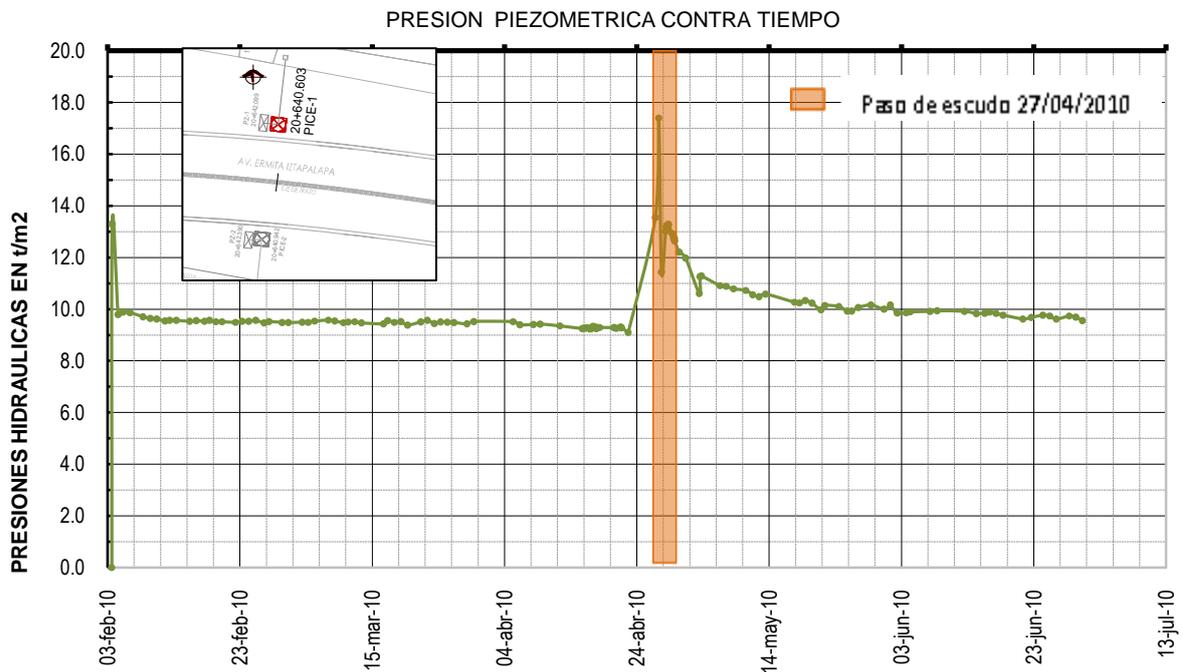


Figura 108. Grafica del comportamiento de la presión piezometrica de la piezo-celda 1.

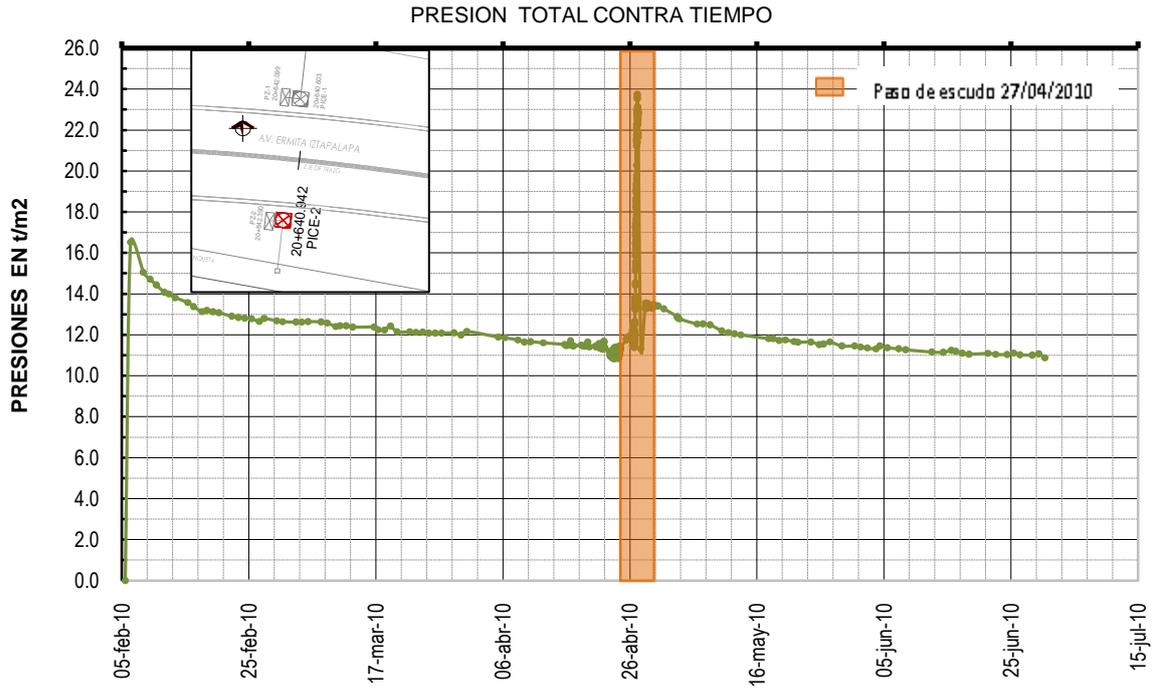


Figura 109. Grafica del comportamiento la celda de presión de la piezo-celda 2.

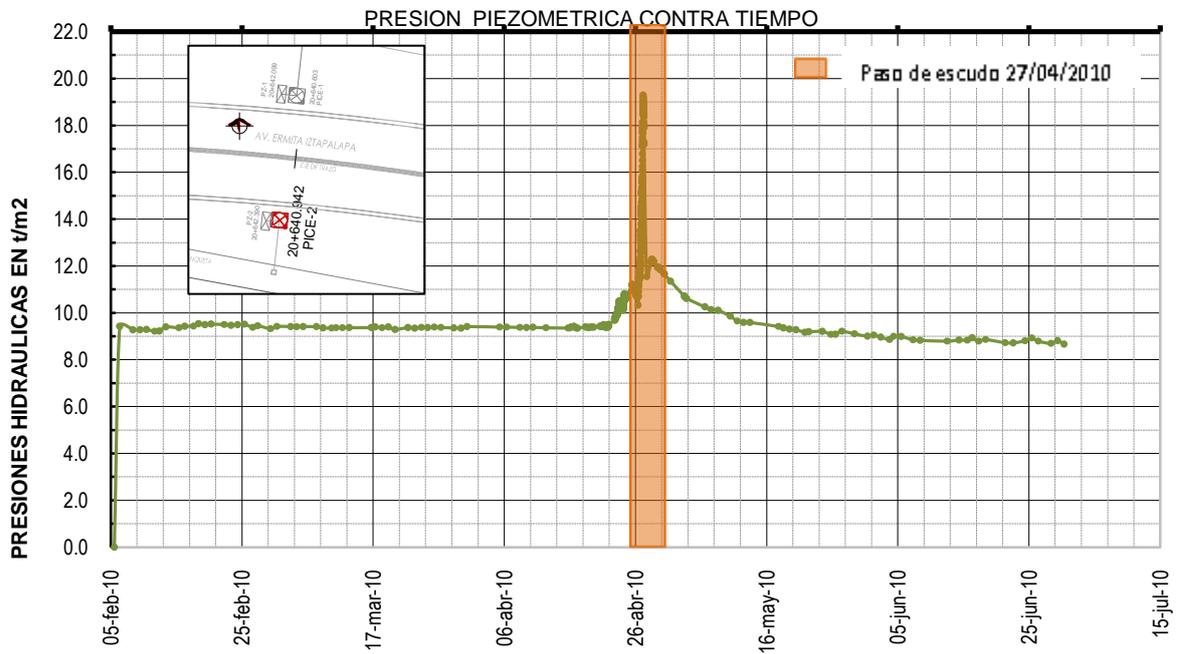


Figura 110. Grafica del comportamiento de la presión piezométrica de la piezo-celda 2.

c) Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro:

Con el objetivo de determinar los movimientos horizontales y hundimientos que se pudieran presentar durante la excavación y construcción del túnel se instaló un inclinómetro a 7.5m del paño del diámetro exterior del túnel.

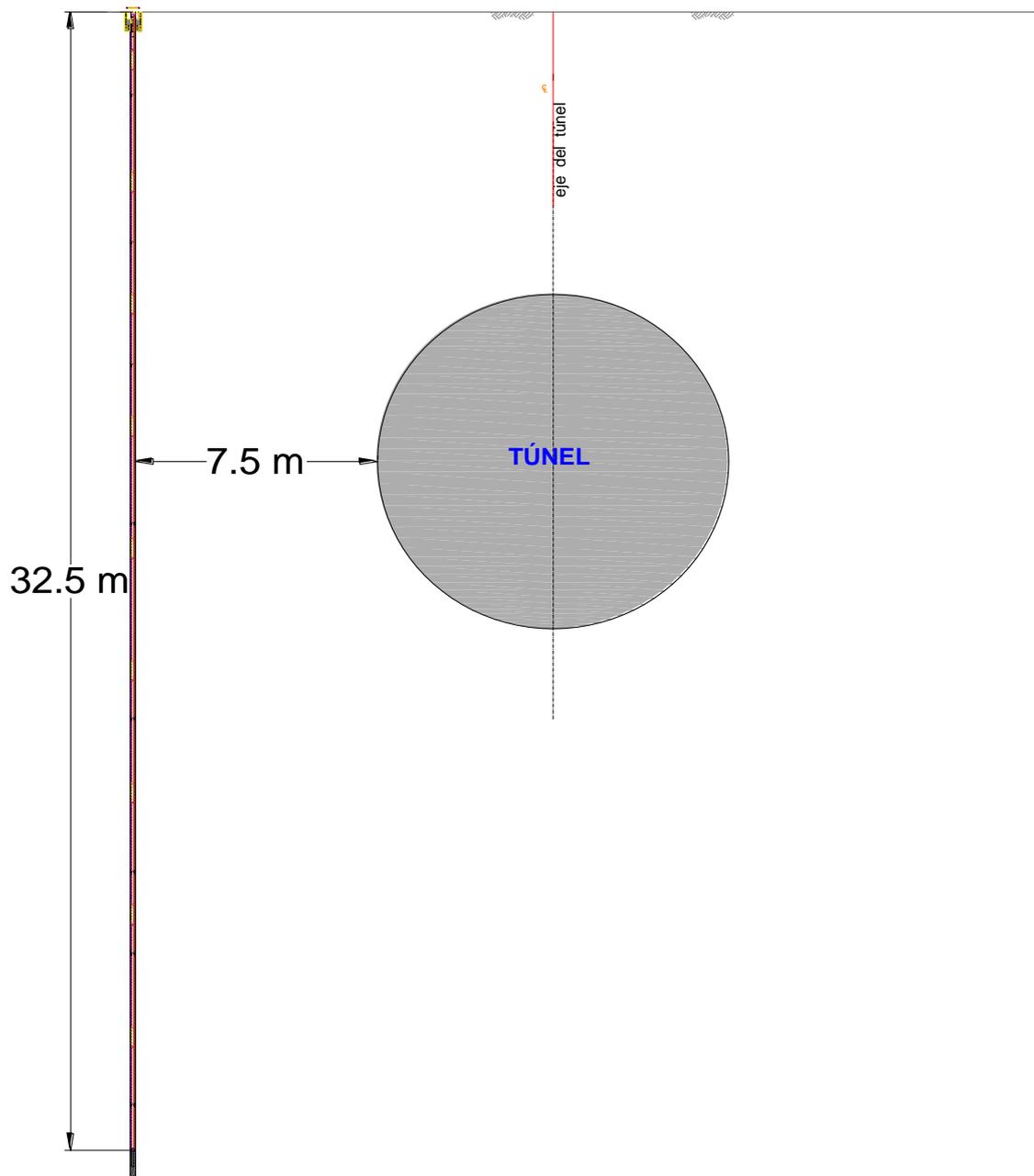


Figura 111. Sección transversal de la instalación del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.

A continuación se muestra las gráficas del desplazamiento horizontal medido a través del inclinómetro en ambos ejes.

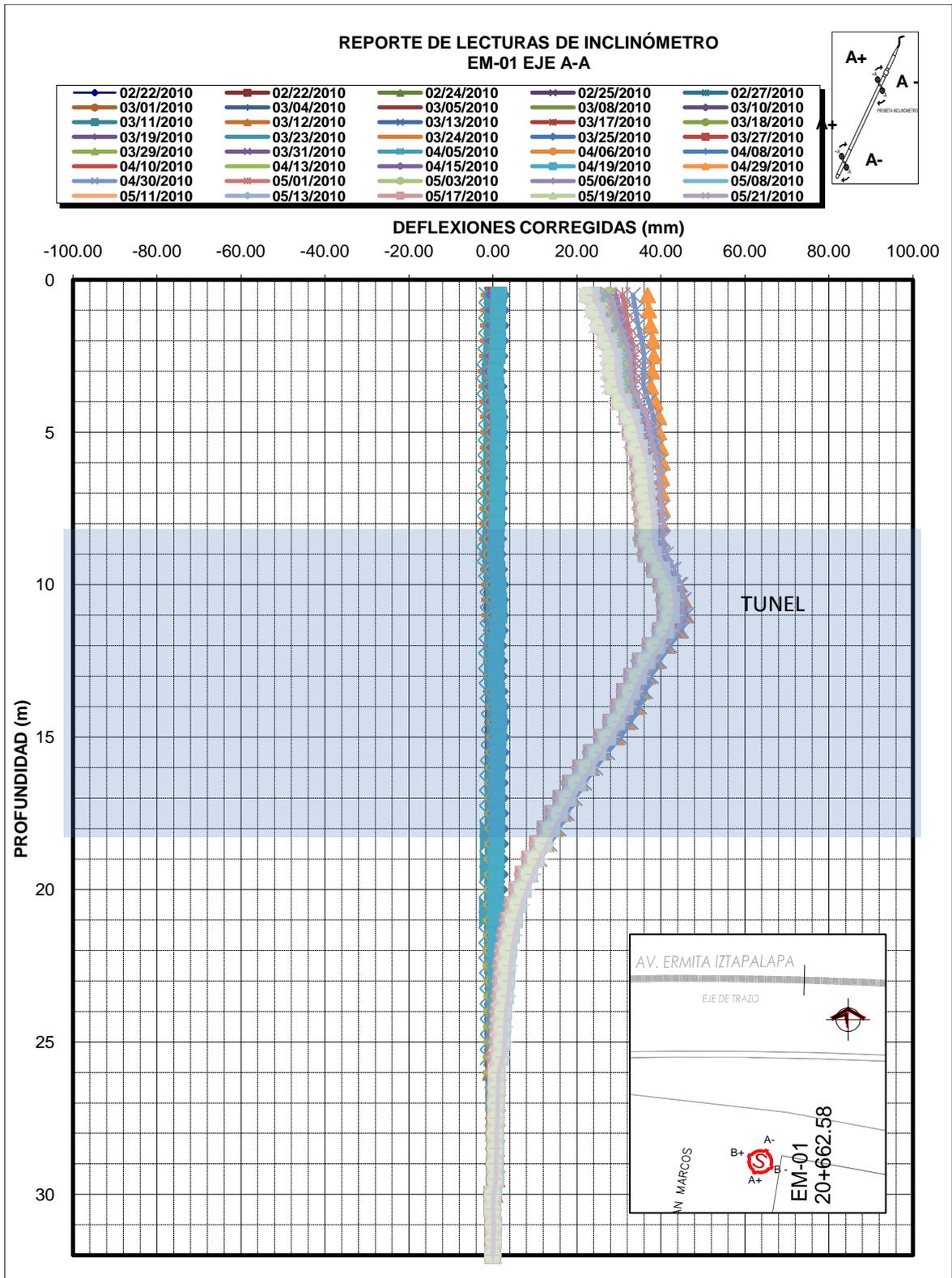


Figura 112. Desplazamiento horizontal en el eje A.

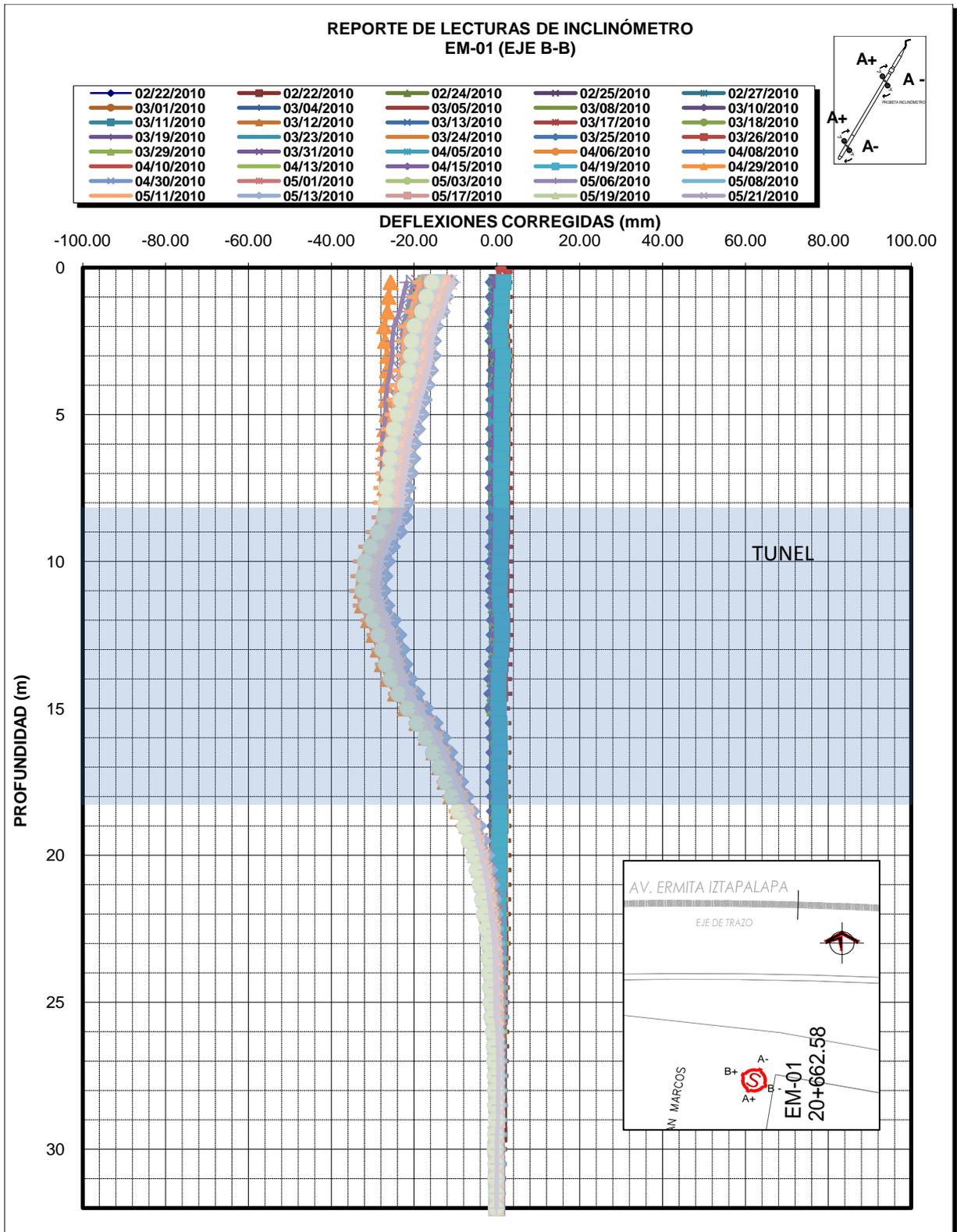


Figura 113. Desplazamiento horizontal en el eje B.

Recordar que el extensómetro magnético con tubería para inclinómetro, mide además los hundimientos por lo cual se presenta a continuación las gráficas del extensómetro magnético, la estratigrafía y su ubicación se pueden observar en la figura 69.

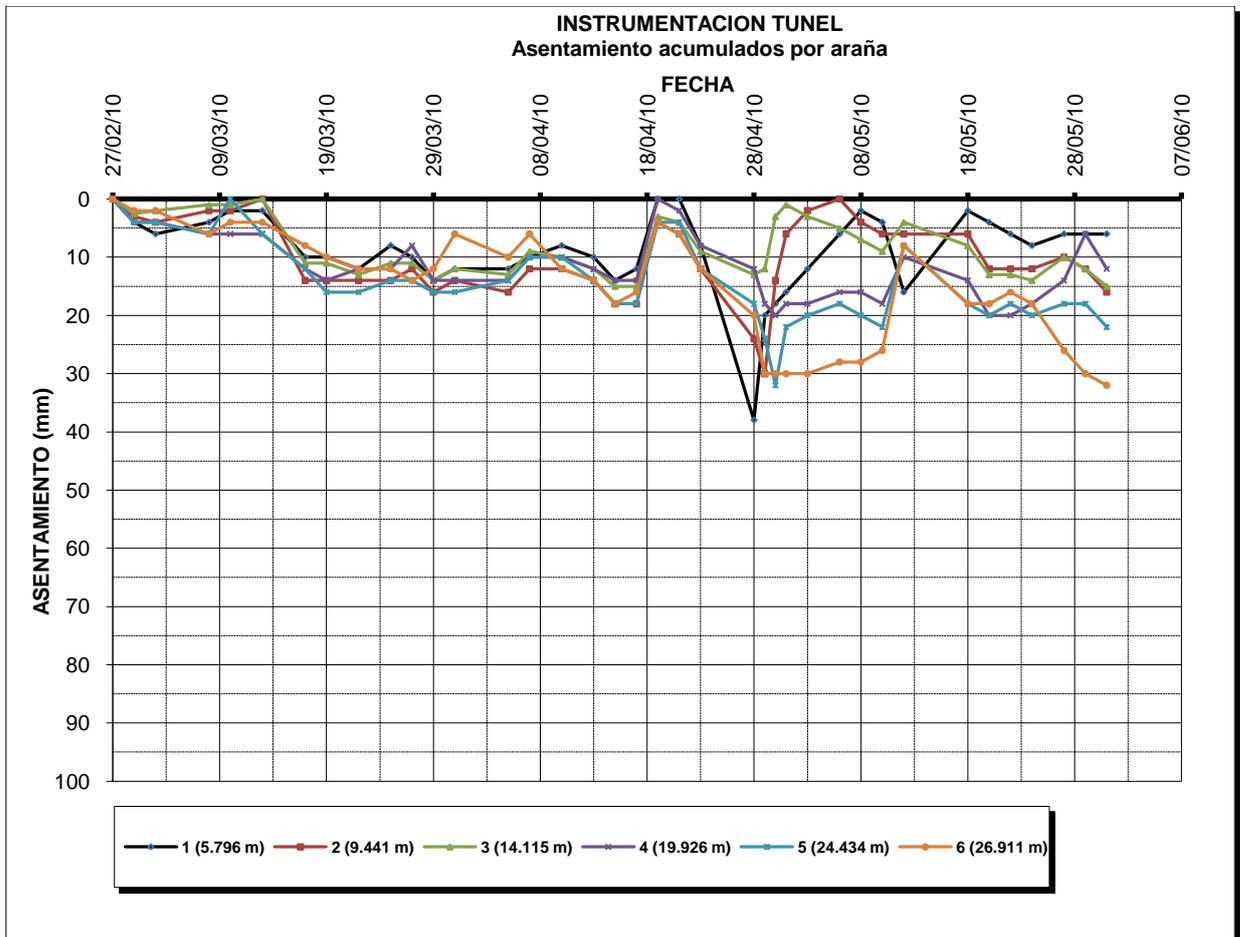


Figura 114. Asentamiento acumulado por araña.

Las profundidades de instalación de las arañas son las siguientes:

ANILLO	PROFUNDIDAD DE INSTALACION
1	5.796
2	9.441
3	14.115
4	19.926
5	24.434
6	26.911
ANILLO DE REFERENCIA	31.813

Tabla9. Profundidad de instalación de arañas magnéticas.

d) Celdas de presión en dovelas:

Para detectar la magnitud y distribución de los esfuerzos de confinamiento que el subsuelo ejerce sobre el endovelado del túnel, se instrumenta un anillo de dovelas, la instalación final quedo de la siguiente forma:

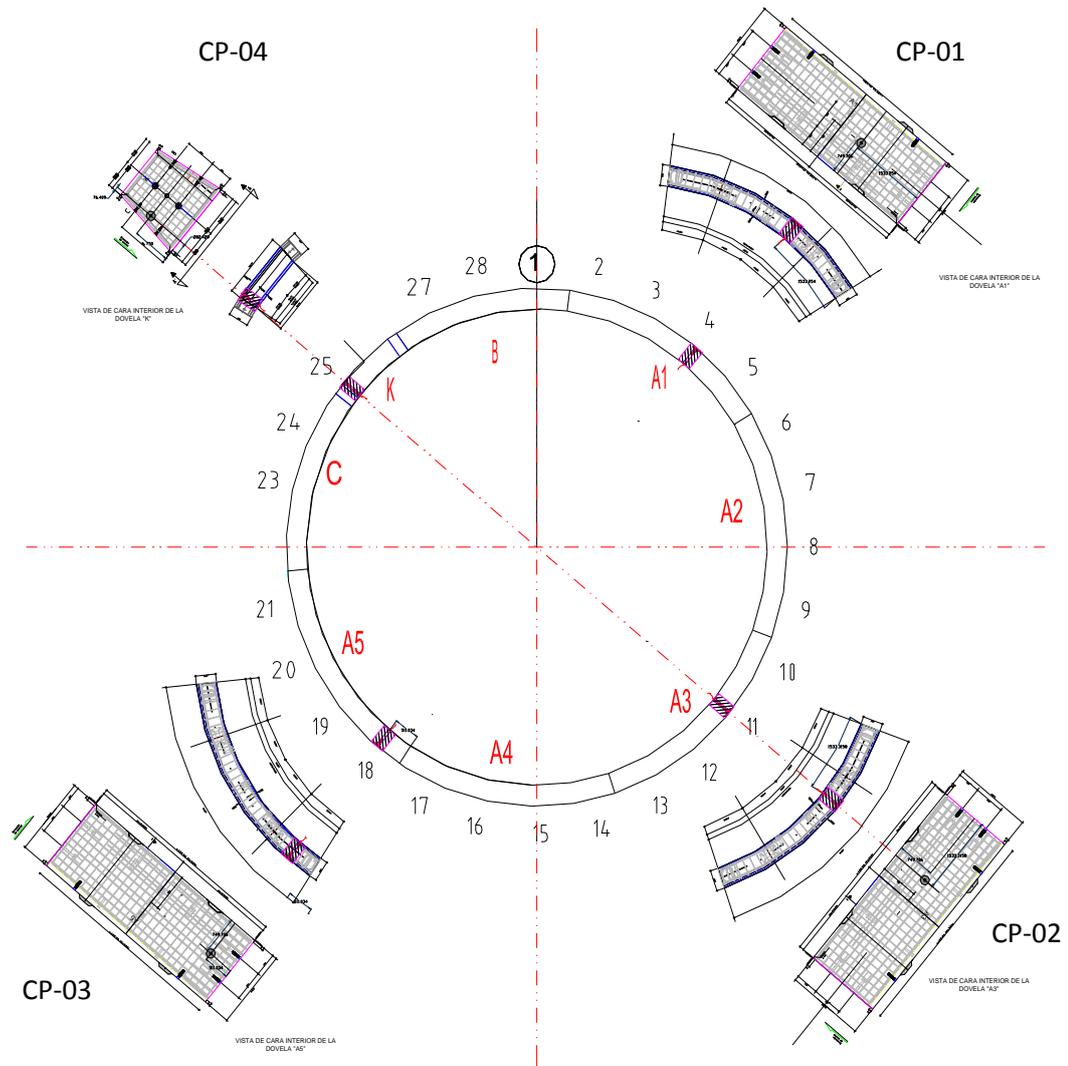


Figura 115.Plano General de instalación de celdas de presión.

Una vez instrumentado el anillo de dovelas. Las gráficas de comportamiento obtenidas son las que se muestran a continuación:

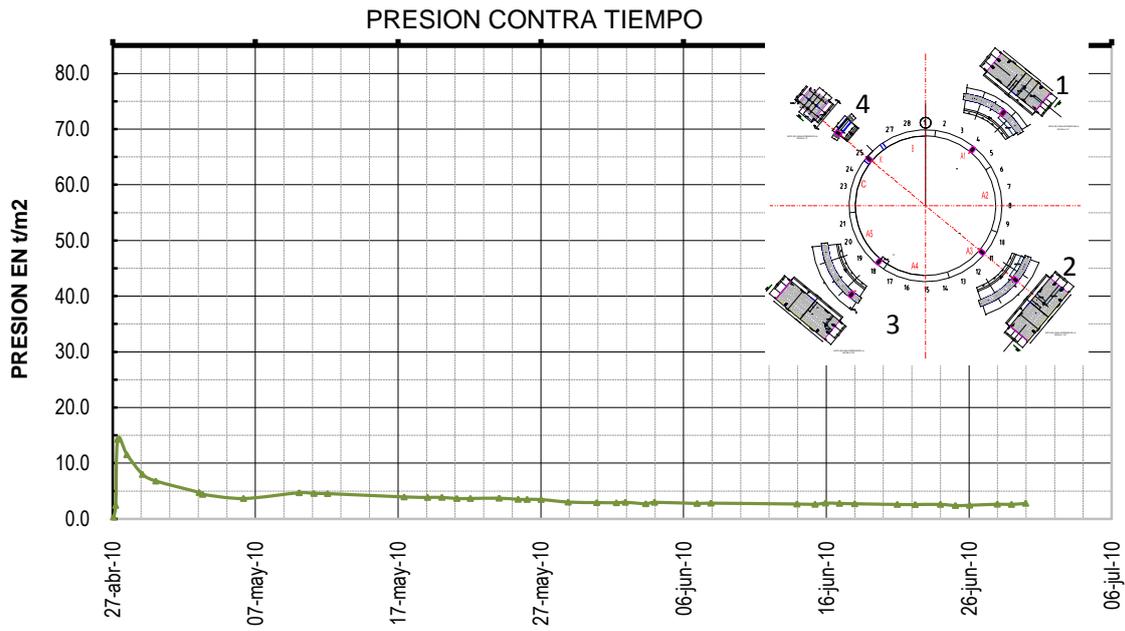


Figura 116. Grafica de comportamiento en celda de presión 1 colocada en anillo de dovelas.

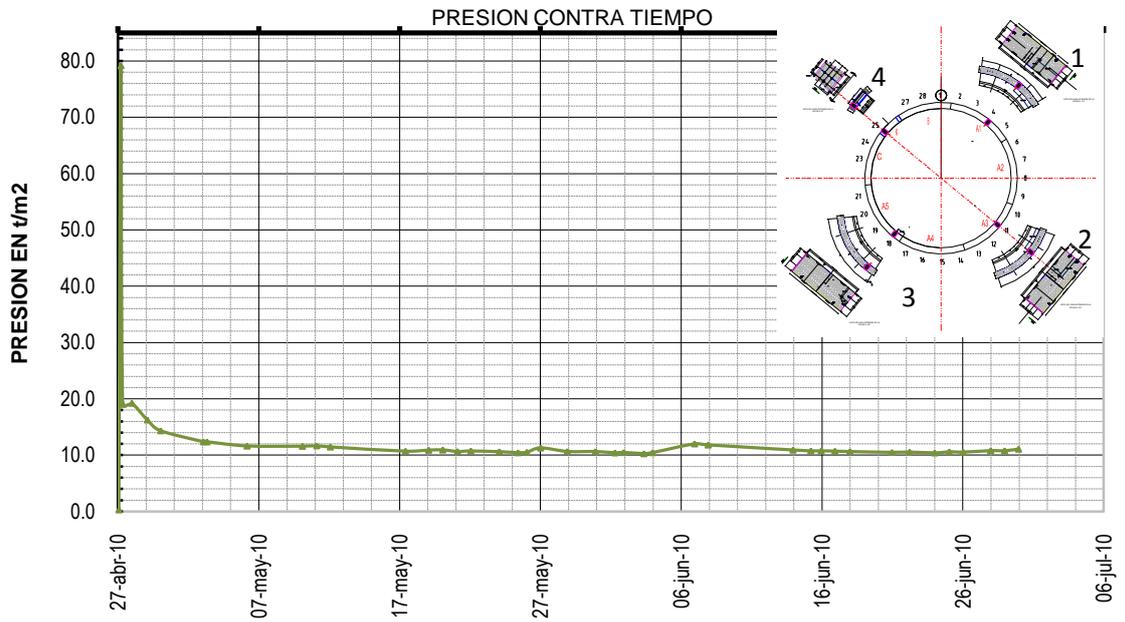


Figura 117. Grafica de comportamiento en celda de presión 2 colocada en anillo de dovelas.

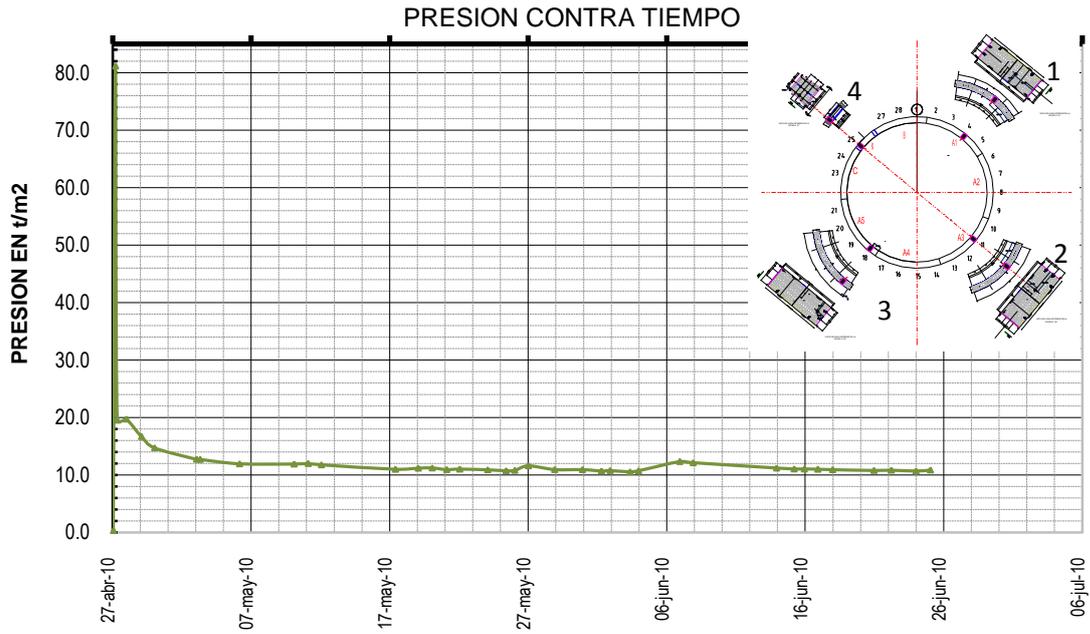


Figura 118. Grafica de comportamiento en celda de presión 3 colocada en anillo de dovelas.

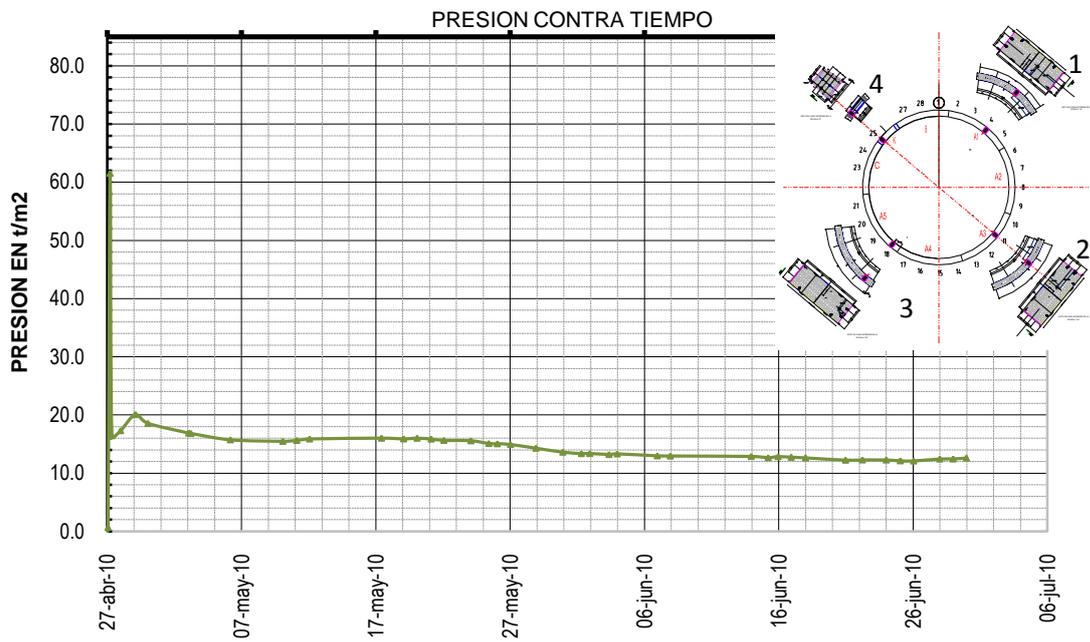


Figura 119. Grafica de comportamiento en celda de presión 4 colocada en anillo de dovelas.

e) Referencias superficiales:

A continuación se muestran las lecturas de las referencias superficiales colocadas en el trazo del túnel sobre el eje del mismo:

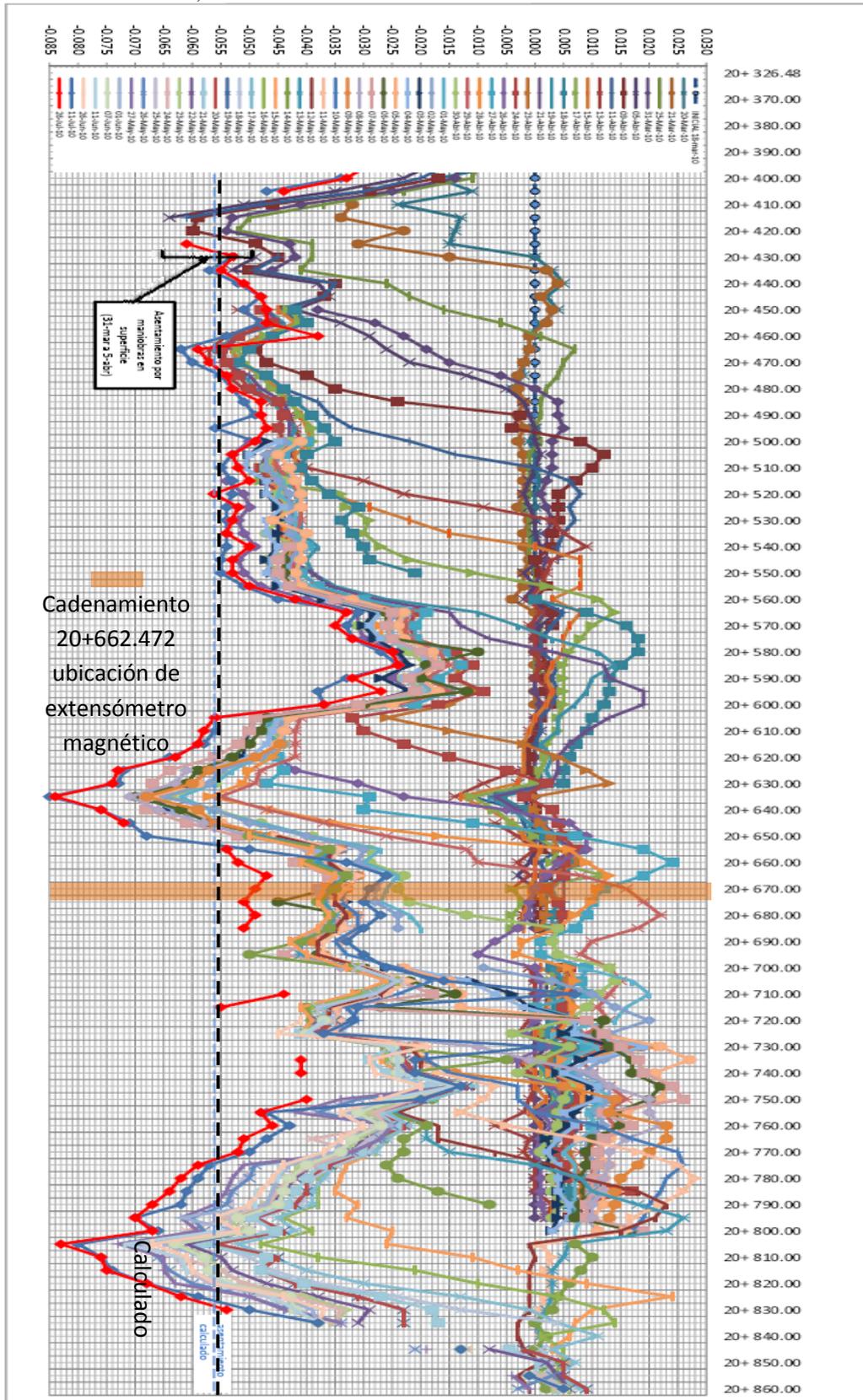


Figura 120. Medición de referencias superficiales en el eje del túnel.

f) Sistema de convergencias automatizado:

El sistema de convergencias automatizado es una herramienta muy útil para conocer la deformación de un anillo de dovelas, este sistema para el caso que se está analizando se colocó cuando el anillo de dovelas salió del faldón del escudo y se retiró cuando las lecturas se habían estabilizado, a continuación se presentan las gráficas de deformación del anillo completo y otra donde se puede apreciar el desplazamiento por dovela:

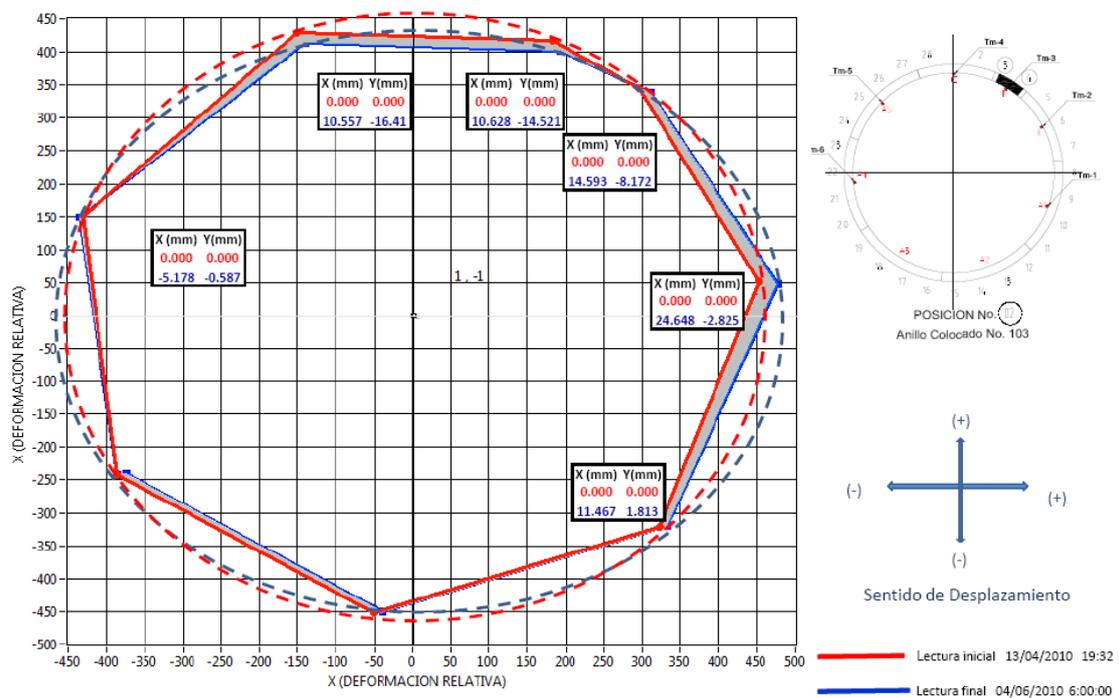


Figura 121. Deformación del anillo de dovelas.

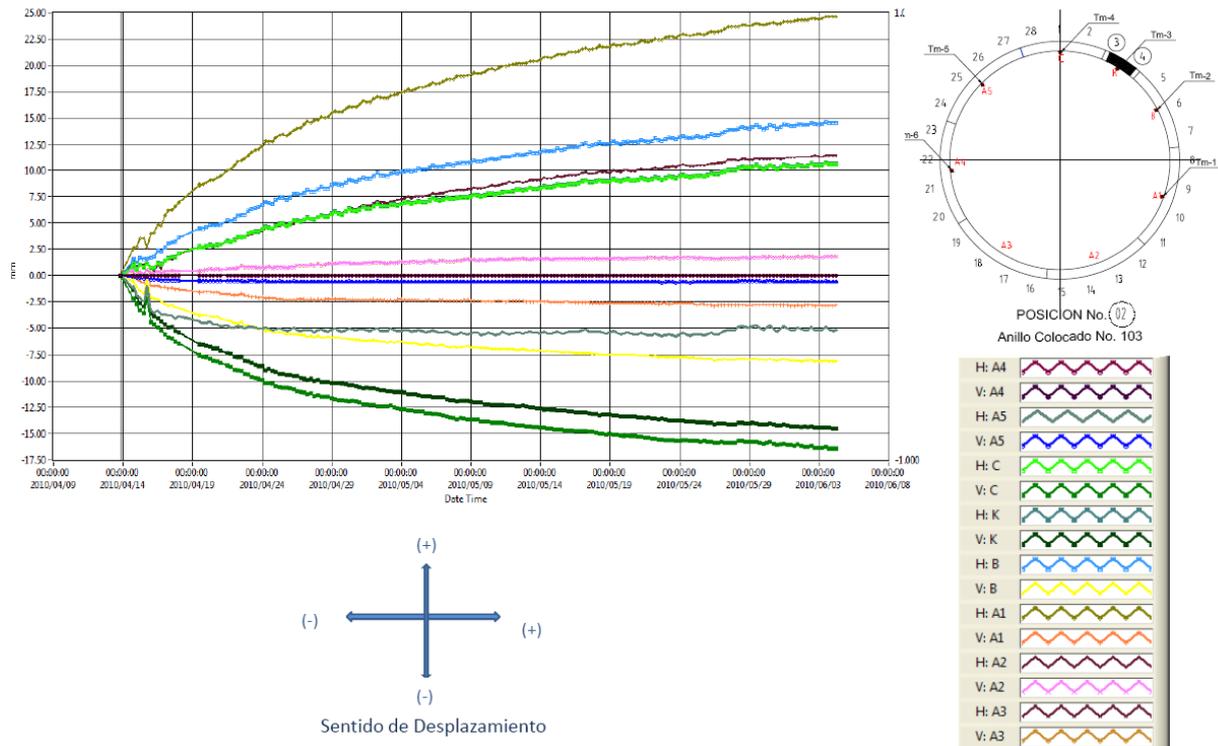


Figura 122. Desplazamiento por piedra en el anillo de dovelas

4.3.- INTERPRETACION DE RESULTADOS.

a) Piezómetros de cuerda vibrante:

Como se describió anteriormente se colocaron 2 piezómetros de cuerda vibrante, el PZ-01 a la altura de la clave y con una profundidad de 11m y el PZ-02 a la altura de la cubeta y a una profundidad de 21 m.

Previo al paso de la tuneladora por la estación de instrumentación, las presiones piezométricas se mantuvieron en un rango que se podía considerar constante. Para el PZ-01 la presión piezométrica promedio fue de 7.250 t/m^2 entre el 04/02/2010 (Fecha en la cual se estabilizan las lecturas) y el 18/04/2010; para el PZ-02 la presión piezométrica promedio fue de 14.467 t/m^2 entre el 06/02/2010 (Fecha en la cual se estabilizan las lecturas) y el 18/04/2010. El 18/04/2010 la tuneladora se encontraba aproximadamente a 90 m y es en este momento las presiones piezométricas aumentaban conforme se acercaba la maquina tuneladora.

Cabe mencionar que el PZ-02 se automatizo con un datalogger de 5 canales con una frecuencia de lectura de 5 min. A partir del 18/04/2010 las presiones aumentaron de una manera gradual, llegando a un máximo de 10.399 t/m^2 para el PZ-01 en una lectura tomada a las 7:11 am del día 27/04/2010, sin embargo para el PZ-02 se tiene la presión máxima a las 3:18 am del mismo día con una lectura de 18.925 t/m^2 . Además comentar que la instalación del anillo 188 que corresponde al cadenamamiento de la estación de instrumentación se comenzó a ensamblar a las 9:11 am del día 27/04/2010.

A partir de lo anterior las presiones piezométricas comenzaron a decrecer hasta alcanzar cierta estabilidad en el PZ-01 a partir del 03/05/2010 con una presión promedio de 7.572 t/m^2 , no así el PZ-02 el cual presenta tres periodos diferentes después del paso de la máquina tuneladora el primero de ellos a partir del 03/05/2010 al 17/05/2010 con una presión promedio de 13.824 t/m^2 , cuando se esperaba la estabilización de las lecturas se presenta una concavidad en la gráfica de comportamiento, en la cual se puede observar un decrecimiento de la presión piezométrica, teniendo su punto de inflexión el día 21/05/2010 presentando una presión de 12.950 t/m^2 y una posterior recuperación para mostrar una tendencia de estabilización el día 14/06/2010 con una presión de 14.638 t/m^2 .

Con lo anterior se puede concluir que:

- Tanto PZ-01 como PZ-02 antes del paso de la tuneladora su comportamiento fue casi constante.
- Con lo anteriormente expuesto se puede asegurar que la influencia para el aumento de las presiones piezométricas es de 90 m, para un diámetro de excavación de 10.20 m.
- Se detecta que en el PZ-01 la diferencia que existe entre las presiones piezométricas promedio antes del paso de la tuneladora y después de estar fuera de la zona de influencia es de 0.277 t/m^2 , es decir la presión de poro aumento en este punto.
- En el PZ-02 se presenta una peculiaridad que es una caída de presiones durante un periodo, sin embargo si tomamos las ultimas lecturas, donde se aprecia una estabilización, se puede decir que la diferencia de presiones piezométricas antes de la excavación y después de colocar el anillo de dovelas es de 0.171 t/m^2 . También la presión de poro aumento.
- Los picos en las gráficas de presiones piezométricas que se alcanzan apreciar en las figuras 102 y 103, cuando la máquina tuneladora se encuentra en la zona de influencia se deben a que la excavación no se realiza de una manera continua y que cotejando con los registros de campo correspondientes a la colocación de los anillos de dovelas corresponden a paradas en las cuales se le daba mantenimiento a la máquina.

b) Piezo-celdas de cuerda vibrante

Las dos piezo-celdas colocadas en la estación piezométrica miden presiones totales de forma perpendicular al eje del túnel, y quedaron instaladas tal y como se muestra en la figura 104. Mencionar además que la PICE-02 se automatizo de la misma forma que el piezómetro 2.

Se puede apreciar el comportamiento típico de las presiones totales medidas con la celda de presión, también se puede visualizar que las lecturas de las presiones totales dibujan una casi perfecta media hipérbola abierta de norte a sureste con una ecuación del tipo

$r^2 = a \csc 2\theta$, con una línea asintótica en 14 t/m^2 y 11 t/m^2 para el PICE-01 y para el PICE-02 respectivamente. Se puede observar además que de igual forma la zona de influencia es de aproximadamente 90 m, donde las presiones totales empiezan a crecer de una forma exponencial hasta alcanzar una presión máxima de 28.116 t/m^2 en la PICE-01 el 27/04/2010, y de 23.105 t/m^2 para la PICE-02, exactamente cuando la cabeza de corte de la tuneladora se encuentra en la estación de instrumentación. Posteriormente se vuelve a observar la misma tendencia y la misma geometría de los puntos dibujando la hipérbola previamente descrita.

La parte de las presiones de poro tienen un comportamiento muy similar a los piezómetros de cuerda vibrante analizados previamente. La PICE-01 presentó una presión promedio casi constante entre el 08/02/2010 (Fecha en la cual se estabilizan las lecturas) y el 18/04/2010 de 9.462 t/m^2 . La PICE-02 presentó una presión promedio en este mismo periodo de 9.389 t/m^2 .

Durante el paso de la tuneladora la presión máxima, fue de 17.399 t/m^2 para la PICE 01, a las 07:15 am del día 27/04/2010. La PICE-02 como se menciona anteriormente estaba automatizada y tomando lecturas a cada 5 min. En dicha toma de lecturas se registra una máxima el mismo 27/04/2010 a las 05:53 am de 18.924 t/m^2 .

Pasando la zona de influencia de la excavación las lecturas promedio se encuentran La PICE-01 en 9.860 t/m^2 , es decir 0.398 t/m^2 por encima previo al paso de la maquina tuneladora. Referente a la PICE-02 el promedio de las lecturas se encuentra por el orden de 9.138 t/m^2 , es decir la presión es menor 0.251 t/m^2 que la presentada antes de que la maquina se encontrara en la zona de influencia de la excavación.

Con lo anterior se puede se puede resaltar que:

- Las piezo-celdas en las lecturas de presión de poro comprueban el comportamiento de los piezómetros ya que presentan una gráfica con gran similitud, es decir son de manera casi constante. La presión total se manifiesta como una media hipérbola y en este sentido se puede concluir que la asíntota que se empezaba a marcar sería la constante que se mediría en un medio no alterado.
- Además se comprueba que el área de influencia efectiva de la maquina tuneladora es de aproximadamente 90 m anteriores y posteriores a su cabeza de corte.

c) Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro

Recordar que este tipo de instrumento tiene dos funciones la primera es medir desplazamientos horizontales con el inclinómetro y el segundo es medir el hundimiento a través del extensómetro magnético y la ubicación de las anclas tipo arañas.

Por lo tanto como se puede observar en las figuras 110 y 111 el desplazamiento según la convención utilizada el desplazamiento que se genera es en el sentido del eje A positivo y en el sentido del eje b negativo, tal como se ilustra en la figura 121. El desplazamiento mayor ocurre a una profundidad de 11 m con respecto al nivel de terreno natural, es decir aproximadamente en la clave del túnel.

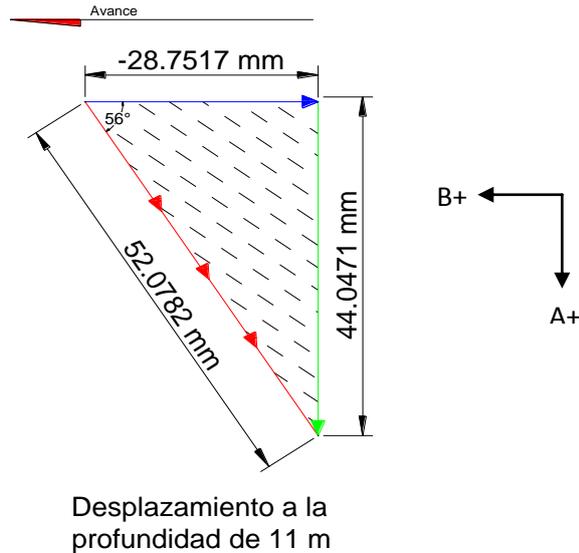


Figura 123. Sentido y dirección del desplazamiento horizontal más crítica.

A continuación se mostrara la tabla de los asentamientos acumulados históricos por araña, la profundidad de cada araña se puede observar en la tabla 10. El extensómetro magnético con tubería para inclinómetro como se puede observar en la figura 100, se encuentra aproximadamente 20 m delante de la estación de instrumentación Geotécnica.

ASENTAMIENTOS ACUMULADOS							
Diferencias en mm	NUMERO DE ARAÑA						
FECHA	1	2	3	4	5	6	ANILLO DE REFERENCIA
27/02/2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
01/03/2010	4.000	3.000	2.500	4.000	4.000	2.000	0.000
03/03/2010	6.000	4.000	2.000	4.000	4.000	2.000	0.000
08/03/2010	4.000	2.000	1.000	6.000	6.000	6.000	0.000
10/03/2010	2.000	2.000	1.000	6.000	0.000	4.000	0.000
13/03/2010	2.000	0.000	0.000	6.000	6.000	4.000	0.000
17/03/2010	10.000	14.000	11.000	12.000	12.000	8.000	0.000
19/03/2010	10.000	14.000	11.000	14.000	16.000	10.000	0.000
22/03/2010	12.000	14.000	13.000	12.000	16.000	12.000	0.000
25/03/2010	8.000	14.000	11.000	12.000	14.000	12.000	0.000
27/03/2010	10.000	12.000	11.000	8.000	14.000	14.000	0.000
29/03/2010	14.000	16.000	14.000	14.000	16.000	12.000	0.000
31/03/2010	12.000	14.000	12.000	14.000	16.000	6.000	0.000
05/04/2010	12.000	16.000	13.000	14.000	14.000	10.000	0.000
07/04/2010	10.000	12.000	9.000	10.000	10.000	6.000	0.000
10/04/2010	8.000	12.000	10.000	10.000	10.000	12.000	0.000
13/04/2010	10.000	14.000	12.000	12.000	14.000	14.000	0.000
15/04/2010	14.000	18.000	15.000	14.000	18.000	18.000	0.000
17/04/2010	12.000	18.000	15.000	14.000	18.000	16.000	0.000
19/04/2010	0.000	4.000	3.000	0.000	4.000	4.000	0.000
21/04/2010	0.000	6.000	4.000	2.000	4.000	6.000	0.000
23/04/2010	8.000	12.000	9.000	8.000	12.000	12.000	0.000
28/04/2010	38.000	24.000	13.000	12.000	18.000	20.000	0.000
29/04/2010	20.000	30.000	15.000	18.000	24.000	30.000	0.000
30/04/2010	18.000	14.000	3.000	20.000	32.000	30.000	0.000
01/05/2010	16.000	6.000	1.000	18.000	22.000	30.000	0.000
03/05/2010	12.000	2.000	3.000	18.000	20.000	30.000	0.000
06/05/2010	6.000	0.000	5.000	16.000	18.000	28.000	0.000

Tabla10. Asentamientos acumulados de arañas magnéticas.

En la tabla 10 se pueden observar los asentamientos máximos históricos por arañas, y que corresponden a la fecha en la cual la maquina tuneladora se encuentra en la zona de influencia, el día 28/04/2010 la cabeza de corte se encontraba este punto.

El comportamiento de la tierra previo de la llegada del EPB al punto donde se encuentra el extensómetro magnético, de manera general se había comportando con una cierta estabilidad y midiendo el hundimiento regional, desde la lectura inicial el 27/02/2010 y hasta el 18/04/2010, momento en el cual la tuneladora entra en la zona de influencia y se presenta una expansión en la cual se puede apreciar hundimientos similares al inicio de las lecturas, posteriormente se tiene un asentamiento súbito, en el cual se alcanza a la profundidad de 5.796 m un hundimiento acumulado de 38 mm. Posterior al paso de la tuneladora se observa otra expansión de tierras, después se observan comportamientos diferentes en los estratos donde están ubicadas las arañas, sin embargo se observa una cierta tendencia a la estabilización y posterior comportamiento al hundimiento típico, el cual previamente se había monitoreado.

d) Celdas de presión en dovelas

Las presiones de confinamiento que se pueden leer en las gráficas de comportamiento de las celdas de presión, son muy similares y hasta la fecha tienen un comportamiento casi constante, sin embargo la presión reportada por la CP-01 es de 3.265 t/m^2 , es muy baja y no corresponde la orden de las otras 3 celdas de presión que en promedio son 11.579, 11.233 y 14.058 t/m^2 , para CP-02, CP-03 Y CP-04 respectivamente.

Por lo anterior y a pesar de que las lecturas son puntuales, se entiende que la presión de confinamiento en esta zona es de entre 11 y 14 t/m^2 .

e) Referencias superficiales

Las referencias superficiales que se pueden apreciar en la figura 118, muestran el comportamiento del terreno en la superficie durante el proceso de excavación; regularmente el suelo se comporta de la siguiente manera:

- 1) Antes del paso de la maquina tuneladora en un punto, en el terreno existe el hundimiento regional
- 2) Cuando la tuneladora se encuentra en la zona de influencia (aproximadamente 100 m), el terreno experimenta una expansión, tal y como sucede con el extensómetro magnético.
- 3) Inmediatamente al paso por el punto de estudio, el suelo tiene un hundimiento muy acelerado y de manera súbita.
- 4) Durante el periodo en que se encuentra la tuneladora en la zona de influencia posterior al punto de estudio los asentamientos son menores.
- 5) Después del paso de la tuneladora por la zona de influencia, existe una cierta estabilización.
- 6) Posteriormente los hundimientos corresponden solo al hundimiento regional.

f) Sistemas de convergencia automatizado

El sistema de convergencia, es sin duda uno de los instrumentos mas fáciles de interpretar, en este caso se puede observar que el anillo de dovelas se deforma en forma de elipse, es decir su diámetro horizontal incrementa y tiende a formar una elipse, en la cual se observa una estabilidad.

La figura 120 es una de las mas interesantes, ya que en ella se puede ver el desplazamiento horizontal y vertical de cada una de las piedras que componen el anillo de dovelas y el mayor desplazamiento ocurre en la piedra A1 en su desplazamiento horizontal.

4.4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CONTRA ANALISIS GEOTÉCNICO.

A continuación se presenta el análisis para calcular de manera teórica y experimental de una manera muy practica las presiones frontales dentro de la excavación del túnel, para este procedimiento y con el fin de tener una mejor ilustración del fenómeno se toma el avance de la excavación y las presiones frontales reportadas experimentalmente a lo largo de la zona de influencia, donde se encuentra la estación de instrumentación.

Calculo de Presiones frontales

El túnel pasa por suelos arcillosos que se caracterizan por su consistencia blanda y su alta plasticidad, intercalados por lentes de arena y ceniza volcánica. Por encima de estas arcillas blandas se encuentra un estrato de arcilla arenosa de consistencia firme y más arriba la costra o relleno superficial de materiales areno-limosos. Bajo el estrato arcilloso en el que corre el túnel se encuentran los depósitos profundos de limos arenosos y arenas con gravas aisladas.

Relleno de arena y limo con fragmentos de concreto	NAF	1
Arcilla arenosa de consistencia media a firme, de baja plasticidad		2
Arcilla muy blanda a media, de alta plasticidad		3
Lente de arena		arena
Arcilla muy blanda a media, de alta plasticidad		4
Lente de arena		arena
Arcilla muy blanda a media, de alta plasticidad		5
Arena limosa, poco arcillosa, en estado muy compacto		6

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Para la evaluación de las presiones de sostenimiento del frente no se cuenta con normas o expresiones que puedan aplicarse indistintamente a todas condiciones o tipos de suelo. Existen, sin embargo, varias metodologías recomendadas que van desde los métodos analíticos hasta los numéricos con base en un modelado del túnel.

Los criterios analíticos a pesar de su menor complejidad de ejecución resultan satisfactorios de acuerdo con el tipo de suelo y condiciones de excavación en que se les aplique y pueden ser utilizados para la verificación y calibración de los modelos numéricos. Sin embargo, debe tenerse especial cuidado en elegir aquel método que describa mejor el comportamiento del suelo en estudio.

El presente cálculo está basado en varios criterios analíticos según se menciona a continuación:

SOLUCION APROXIMADA PARA SUELO CON PESO PROPIO (Kolymbas, 2008)

Considera que la distribución del esfuerzo vertical entre la superficie y la clave del túnel puede aproximarse por medio de una parábola y asume que la resistencia del suelo se moviliza completamente en la clave del túnel. La derivación se hace inicialmente para la clave del túnel, pero puede extenderse para el frente.

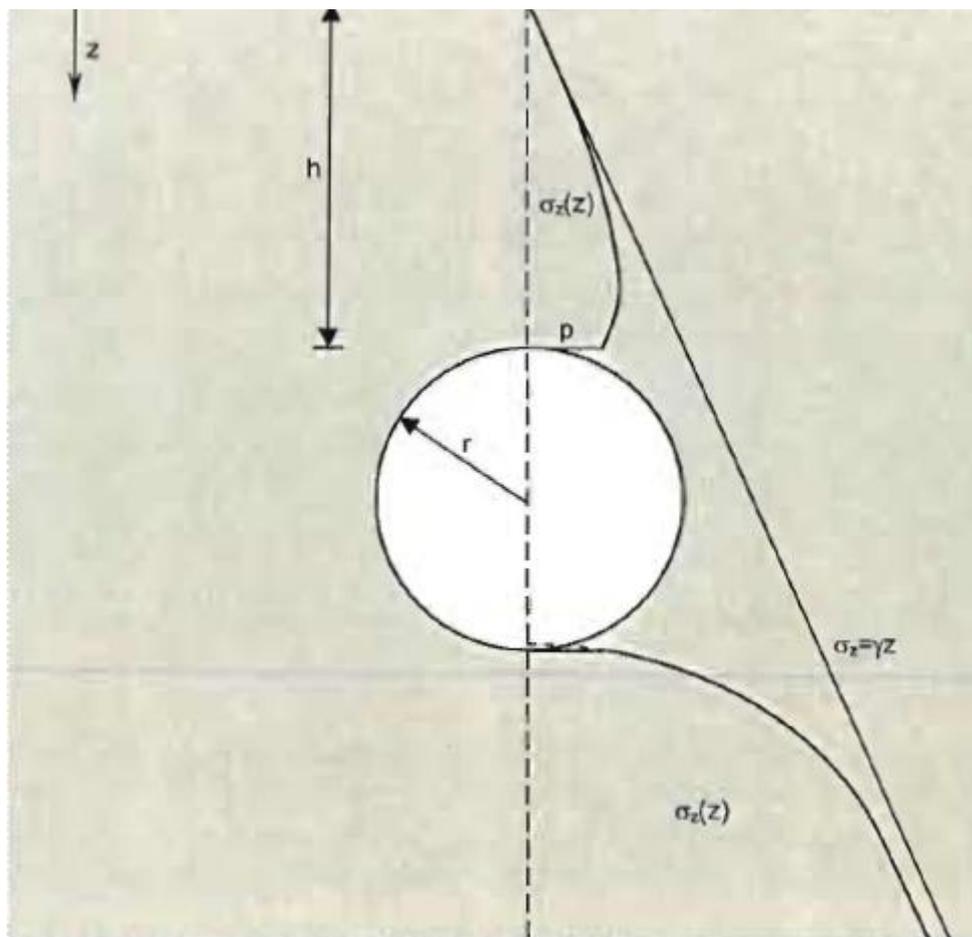


Figura 125. Distribución de la presión vertical sobre el eje vertical de simetría.

Se puede obtener entonces la presión de sostenimiento p por medio de la expresión:

$$P = \gamma H \left(1 - \frac{c}{\gamma r} \right)$$

Donde: p = presión de sostenimiento del frente
 γ = peso volumétrico del suelo
 h = profundidad al punto de interés
 c = cohesión del suelo
 r = radio del túnel

Si sobre la superficie actúa una sobrecarga q , por ejemplo de tránsito, esta se incluye en el cálculo de la siguiente forma:

$$P = \gamma H \left(1 - \frac{c}{\gamma r} \right) + q$$

CRITERIO DE LOS TEOREMAS DE FRONTERA, FRONTERA INFERIOR (Kolymbas, 2008)

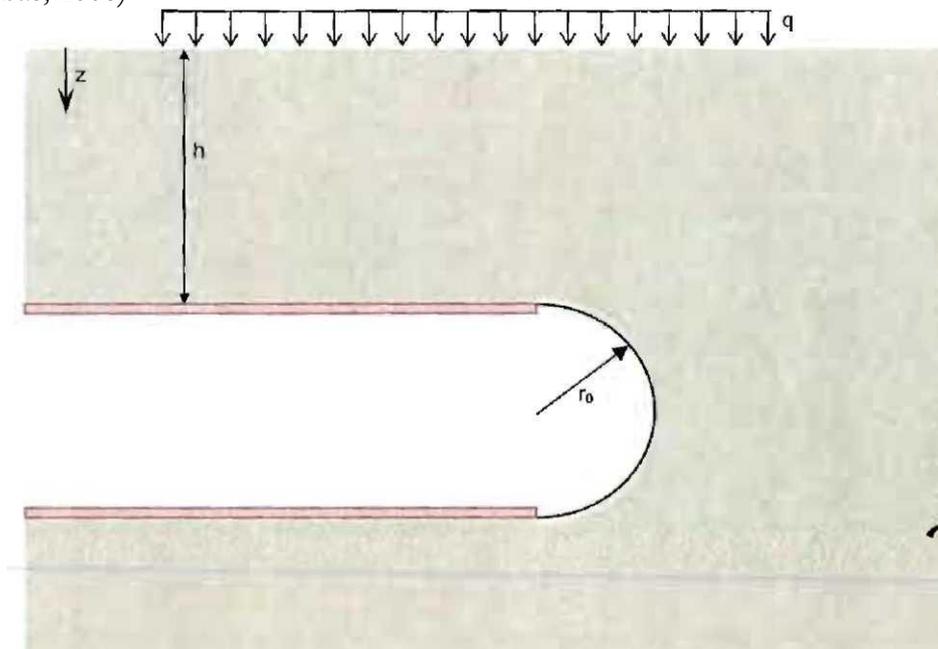


Figura 126. Esquema del teorema de frontera inferior.

El teorema de la frontera inferior proporciona una estimación simple, pero conservadora, de la presión de sostenimiento p necesaria en el frente de excavación. Esta metodología considera un túnel de sección circular y longitud infinita (estado de deformación plana). La presión de sostenimiento p aumenta linealmente con la profundidad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P = \gamma z + q - 2c \ln \left(1 + \frac{h}{r_0} \right)$$

dónde:
 P = presión de sostenimiento del frente
 γ = peso volumétrico del suelo

- $z =$ profundidad al punto de interés
- $q =$ profundidad al punto de interés
- $c =$ cohesión del suelo
- $b =$ cobertura del túnel
- $r_0 =$ radio del túnel

CRITERIO DEL EMPUJE EN REPOSO

En condiciones normales de tuneleo, el valor inicial objetivo de presión de sostenimiento del frente puede considerarse como el de la presión activa del suelo. Sin embargo, para túneles someros o en suelos altamente sensitivos, dicho valor objetivo debe ser mayor que para condiciones normales. En ese caso se considera que las presiones en el frente pueden determinarse como el empuje del suelo en reposo.

El coeficiente de presión de tierras en reposo K_0 puede expresarse como:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\varphi$$

Siendo φ Angulo de fricción del suelo.

La presión de sostenimiento del frente p se calcula entonces como:

$$P = k_0 \gamma z = (1 - \text{sen}\varphi) \gamma z$$

dónde:

- $P =$ presión de sostenimiento del frente
- $\gamma =$ peso volumétrico del suelo
- $z =$ profundidad al punto de interés
- $k_0 =$ Coeficiente de tierras en reposo
- $\varphi =$ Ángulo de fricción del suelo

Los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso volumétrico del suelo utilizado en la estimación de presiones de sostenimiento del frente son los promedios ponderados, los cuales se calculan como sigue:

$$\gamma_{pond} = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sum h_i}$$

$$c_{pond} = \frac{\sum c_i h_i}{\sum h_i}$$

$$\varphi_{pond} = \frac{\sum \varphi_i h_i}{\sum h_i}$$

dónde:

- $\gamma_{pond} =$ peso volumétrico ponderado del suelo
- $c_{pond} =$ cohesión ponderada del suelo
- $\varphi_{pond} =$ ángulo de fricción ponderado del suelo
- $\gamma_i =$ peso volumétrico del suelo del estrato i
- $c_i =$ cohesión del suelo del estrato i
- $\varphi_i =$ ángulo de fricción del suelo del estrato i
- $h_i =$ espesor del estrato i

El cálculo de las presiones teóricas se llevo a cabo para las profundidades que corresponden a la clave, eje y cubeta del túnel, así como para las profundidades a las cuales se ubican de manera aproximada los sensores de presión en la cámara del escudo EPB. La posición de los sensores se muestra en la siguiente figura.

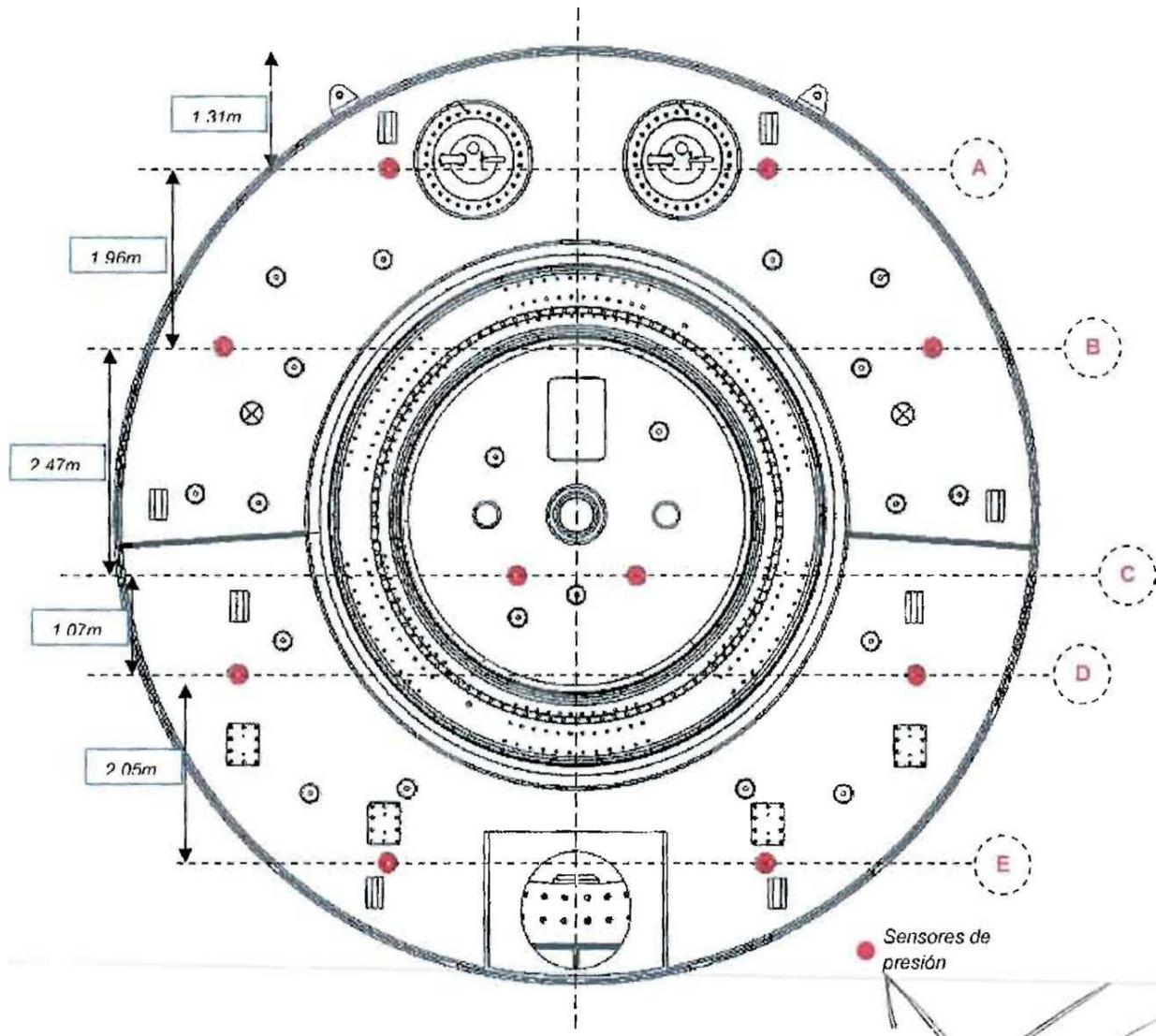


Figura 127. Sensores de presión en la cámara del escudo EPB.

Cad. 20+370					
NAF	1.82				
Cobertura	7.05				
Estrato	Espesor (m)	Prof. Lecho inferior (m)	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)
1.00	1.49	1.49	1.65	2.50	10.00
2.00	6.00	7.49	1.42	4.00	14.00
arena	3.84	11.33	1.08	1.80	0.00
3.00	0.65	11.98	1.80	0.00	34.00
4.00	4.12	16.10	1.13	2.80	0.00
arena	0.41	16.51	1.80	0.00	34.00
5.00	0.74	17.25	1.16	4.00	0.00

Valores ponderados hasta la maxima

Profundidad de excavación:

γ_{pond}	1.31	t/m ³
c_{pond}	2.85	t/m ²
ϕ_{pond}	7.82	°

SOLUCION APROXIMADA PARA SUELO CON PESO PROPIO Kolymbas, 2008

	r =	5.10	m
	q =	1.50	t/m ²
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.36	7.76
	Linea C	12.79	11.07
	Linea E	15.91	13.41

CRITERIO DE LOS TEOREMAS DE FRONTERA, FRONTERA INFERIOR Kolymbas, 2008

	h =	7.05	
	r0 =	5.1	
	q =	1.50	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.36	7.48
	Linea C	12.79	13.27
	Linea E	15.91	17.35

CRITERIO DEL EMPUJE EN REPOSO

		0.13610651	
	$K_0 =$	0.86389349	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.36	9.44
	Linea C	12.79	14.44
	Linea E	15.91	17.97

Cad. 20+600					
NAF	2.93				
Cobertura	8.93				
Estrato	Espesor (m)	Prof. Lecho inferior (m)	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)
1.00	2.58	2.58	1.65	2.50	10.00
2.00	6.24	8.82	1.49	3.90	10.00
arena	4.05	12.87	1.06	2.40	3.00
3.00	0.60	13.47	1.80	0.00	34.00
4.00	3.87	17.34	1.07	3.40	0.00
arena	0.48	17.82	1.80	0.00	34.00
5.00	1.31	19.13	1.13	5.60	0.00

Valores ponderados hasta la maxima Profundidad de excavación:		
γ_{pond}	1.33	t/m ³
c_{pond}	3.19	t/m ²
ϕ_{pond}	7.17	°

SOLUCION APROXIMADA PARA SUELO CON PESO PROPIO Kolymbas, 2008			
	r =	5.10	m
	q =	1.50	t/m ²
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	10.24	8.70
	Linea C	14.67	11.82
	Linea E	17.79	14.01

CRITERIO DE LOS TEOREMAS DE FRONTERA, FRONTERA INFERIOR Kolymbas, 2008			
	h =	8.93	
	r0 =	5.1	
	q =	1.50	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	10.24	8.65
	Linea C	14.67	14.53
	Linea E	17.79	18.68

CRITERIO DEL EMPUJE EN REPOSO			
		0.1241/3008	
	$K_q =$	0.87526962	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	10.24	11.91
	Linea C	14.67	17.06
	Linea E	17.79	20.68

Cad. 20+800					
NAF	1.33				
Cobertura	7.60				
Estrato	Espesor (m)	Prof. Lecho inferior (m)	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)
1.00	0.91	0.91	1.65	2.50	10.00
2.00	6.53	7.44	1.49	3.90	10.00
arena	4.11	11.55	1.06	2.40	3.00
3.00	0.60	12.15	1.80	0.00	34.00
4.00	3.64	15.79	1.07	3.40	0.00
arena	0.48	16.27	1.80	0.00	34.00
5.00	1.53	17.80	1.13	5.60	0.00

Valores ponderados hasta la maxima Profundidad de excavación		
$\gamma_{ponderado}$	1.30	t/m ³
$c_{ponderado}$	3.29	t/m ²
$\phi_{ponderado}$	6.94	°

SOLUCION APROXIMADA PARA SUELO CON PESO PROPIO Kolymbas, 2008			
	r =	5.10	m
	q =	1.50	t/m ²
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.91	7.34
	Linea C	13.34	10.25
	Linea E	16.46	12.30

CRITERIO DE LOS TEOREMAS DE FRONTERA, FRONTERA INFERIOR Kolymbas, 2008			
	h =	7.6	
	r0 =	5.1	
	q =	1.50	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.91	7.09
	Linea C	13.34	12.85
	Linea E	16.46	16.91

CRITERIO DEL EMPUJE EN REPOSO			
	$K_0 =$	0.87924993	
	Posición	Profundidad H(m)	P (t/m ²)
	Linea A	8.91	10.19
	Linea C	13.34	15.26
	Linea E	16.46	18.83

RESUMEN:

Resumen criterio de peso propio			
POSICIÓN	20+370	20+600	20+800
	t/m ²	t/m ²	t/m ²
Línea A	7.76	8.70	7.34
Línea C	11.07	11.82	10.25
Línea E	13.41	14.01	12.30

Resumen criterio de frontera inferior			
POSICIÓN	20+370	20+600	20+800
	t/m ²	t/m ²	t/m ²
Línea A	7.48	8.65	7.09
Línea C	13.27	14.53	12.85
Línea E	17.35	18.68	16.91

Resumen de criterio del empuje en reposo			
POSICIÓN	20+370	20+600	20+800
	t/m ²	t/m ²	t/m ²
Línea A	9.44	11.91	10.19
Línea C	14.44	17.06	15.26
Línea E	17.97	20.68	18.83

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron directamente en campo:

PRESIONES FRONTALES MEDIDAS CON LOS SENSORES DE LA CABEZA DE CORTE						
CADENAMIENTO	Línea A		Línea C		Línea E	
	P (bar)	P (t/m ²)	P (bar)	P (t/m ²)	P (bar)	P (t/m ²)
20+375	0.95	10.4234	1.4	15.3608	1.7	18.6524
20+425	0.9	9.8748	1.45	15.9094	1.75	19.201
20+475	1.05	11.5206	1.47	16.12884	1.76	19.31072
20+525	1.07	11.74004	1.45	15.9094	1.8	19.7496
20+575	1.05	11.5206	1.55	17.0066	1.76	19.31072
20+625	1.03	11.30116	1.55	17.0066	1.75	19.201
20+675	1.05	11.5206	1.55	17.0066	1.74	19.09128
20+725	1.07	11.74004	1.45	15.9094	1.7	18.6524
20+775	1	10.972	1.39	15.25108	1.65	18.1038
20+825	0.9	9.8748	1.35	14.8122	1.64	17.99408

La comparación de los resultados experimentales y teóricos se muestra a continuación

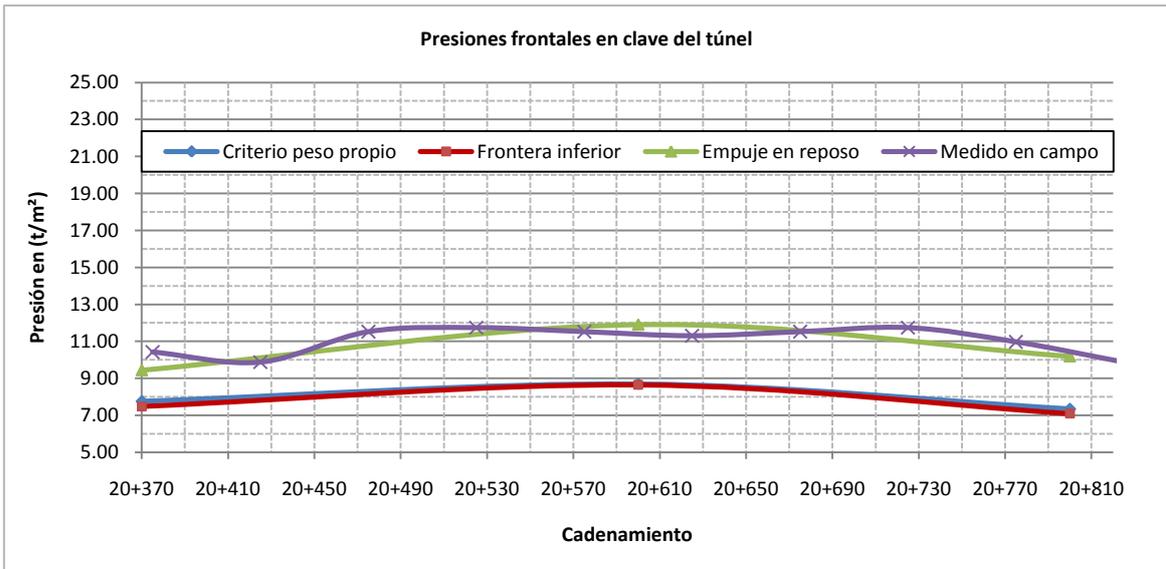


Figura 128. Presiones frontales en clave de túnel.

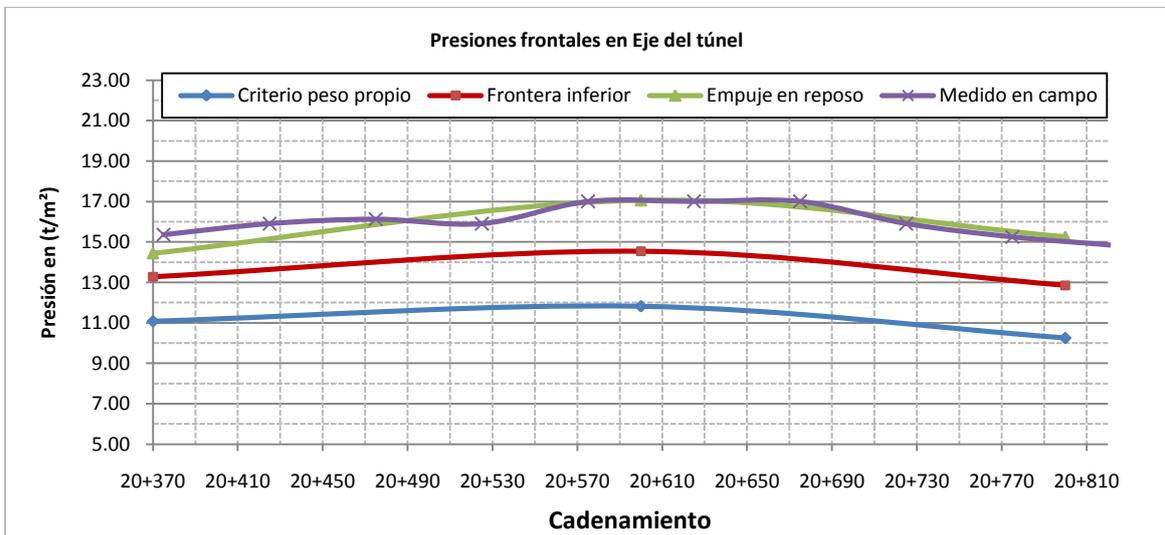


Figura 129. Presiones frontales en eje de túnel.

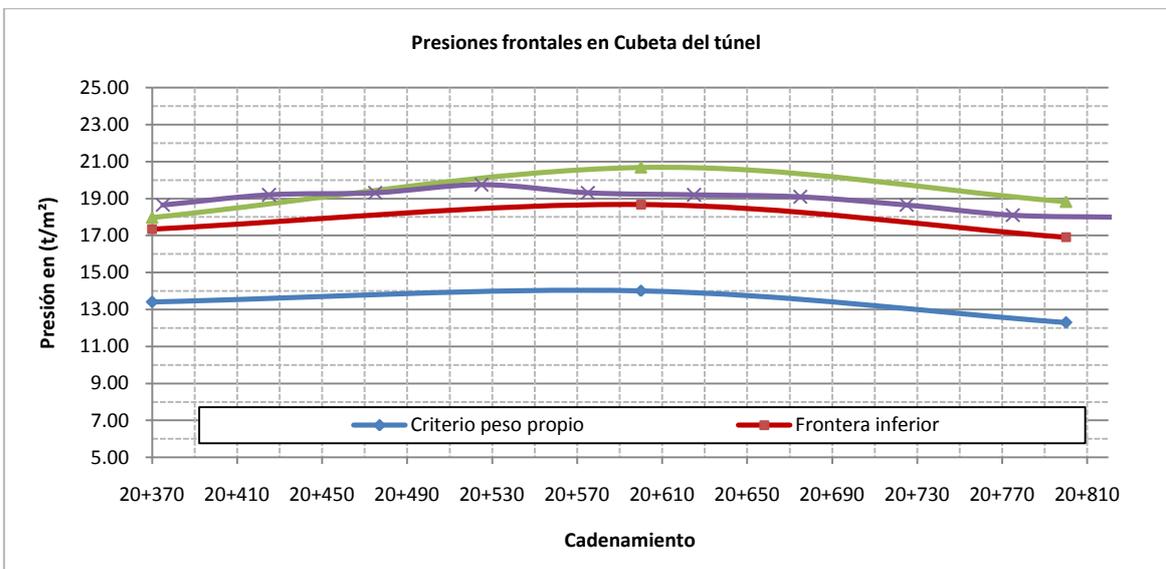


Figura 130. Presiones frontales en cubeta de túnel.

4.4.1- MEDIDAS PREVENTIVAS.

Si al analizar la información adquirida con la instrumentación se rebasan las presiones o desplazamientos límites pronosticados, se podría adoptar un nuevo procedimiento constructivo para tratar de cubrir dichas anormalidades.

La instrumentación por si sola sólo es una herramienta que nos sirve para obtener una clara conciencia de lo que ocurre físicamente a la obra para lo cual el ingeniero de diseño será el encargado de tomar los nuevos parámetros y así se pueda dar una retroalimentación del proyecto.

4.4.2- MEDIDAS CORRECTIVAS.

Desde la planeación debe existir una predicción del comportamiento esperado del túnel, para identificar las variables que serán de mayor interés monitorear, además de definir el intervalo de medición y la precisión que se requerirá en los diferentes instrumentos.

La instrumentación puede detectar anomalías en la obra y presentar los parámetros claros para poder actuar ante una eventualidad. Sin duda alguna, en un túnel como el que se ha venido planeando y por lo somero que este se encuentra, existen afectaciones en el panorama urbano, como puede ser el fracturamiento del pavimento, ya que este tipo de materiales no resiste el tipo de asentamientos generados, por lo cual la sustitución inmediata es una alternativa.

En las estructuras vecinas las afectaciones pueden provocar agrietamientos y desplomes, que sin duda alguna deben considerarse en una partida especial en el costo total de la obra.

Con respecto al sostenimiento de la propia obra las medidas correctivas más recurrentes son:

- Refuerzo con Anclas
- Uso de marcos de acero
- Uso de cajones de concreto reforzado colado in situ
- Uso de segmentos precolados

Capítulo 5. Conclusiones

Desde hace muchos años los túneles han tenido un lugar privilegiado dentro de las obras de ingeniería; sin duda alguna su contribución en el desarrollo de la infraestructura y la tecnología de un País es determinante. En este sentido la instrumentación en este tipo de obras ha sido incorporada de manera gradual, cada vez más, para llevar a buen puerto estas obras.

La instrumentación es un conglomerado de poderosa información que se tiene que elegir de una manera adecuada para poder tener elementos para poder cumplir los objetivos antes expuestos, y es aquí cuando se puede visualizar un potencial mercado y un potencial campo de trabajo, es ahí cuando surge la pregunta ¿En México estamos preparados para poder desarrollar este tipo de trabajos?.

La respuesta es que en México los Ingenieros no tienen aún el potencial necesario para poder desarrollar estas tecnologías y poder comercializarlas, pero eso no significa que no se tengan las aptitudes y conocimientos necesarios para manipular esta tecnología y sobre todo para aprovecharla de manera talentosa y adecuada en Pro del desarrollo de la tecnología.

Estamos en un momento crítico donde debemos de subir en el tren de la vanguardia, a los procesos nuevos y además innovar y estar a la altura de la elite mundial de la ingeniería. La instrumentación Geotécnica nos brinda esa oportunidad de despuntar; ahora hay proyectos en túneles que están en marcha y seguramente existirán mas obras de infraestructura que se necesita para el desarrollo nacional, la instrumentación obviamente no es exclusiva de túneles o de presas, sino de un sinnfín de obras en las cuales se requiere un estricto control de obra que asegure la confianza plena en su desarrollo.

La instrumentación Geotécnica siempre ha sido una parte indispensable en este desarrollo, sin embargo, ahora está tomando mayor relevancia y eso se debe a la tecnología que se está empleando en la actualidad.

Sin duda alguna los principales objetivos de la instrumentación Geotécnica son en primer lugar la validación o la adecuación del método de diseño; este es un gran aporte. La instrumentación, entonces, sirve como un respaldo para el constructor y como una tranquilidad de que la obra está bien hecha para el cliente en virtud de que se tiene un estricto control y cuidado en su desarrollo, construcción y operación del proyecto.

El segundo objetivo es la evaluación de las técnicas de construcción, es decir, medir si lo que se está realizando efectivamente cumple con la calidad requerida, y si no es así innovar en técnicas constructivas que optimicen el trabajo y que sin duda tengan un impacto en la economía, en la eficacia y la rapidez de los métodos constructivos, para poder lograr una evaluación satisfactoria.

El tercer objetivo es la protección al medio vecino. Aunque toda obra de ingeniería, por su naturaleza de transformar a favor de la conveniencia de la sociedad, realiza una afectación; con este objetivo se trata de que ésta sea mínima y poco perceptible para las personas, animales y medio ambiente en general que forman parte del medio vecino.

Otro aspecto importante es tener claros los objetivos de la instrumentación Geotécnica, que desde el diseño del sistema tiene que tener los objetivos claros y una predicción del comportamiento esperado del suelo para, de esta manera, tener un objetivo claro de las variables de mayor interés y de esta forma determinar el intervalo de mediciones y la precisión que cada aparato de medición requiere.

La selección y la operación de los instrumentos en general deben de cumplir ciertos requisitos como son la simplicidad de operación, la resistencia al medio ambiente y que su calibración sea satisfactoria durante mucho tiempo, o bien que sea fácil el restablecimiento de éstos.

Para que la operación de la instrumentación pueda desarrollarse adecuadamente debe existir un acuerdo y una relación mutua de trabajo entre el personal encargado de la instrumentación y el encargado de la construcción.

Los resultados de los trabajos desarrollados en varios proyectos fueron muy alentadores, sin embargo, se debe de seguir investigando en este campo de la instrumentación donde sin duda alguna la experiencia por adquirir será muy significativa.

¿Hacia dónde va el conocimiento de la instrumentación y cuáles son los retos por delante? la respuesta a esta interrogante es que en estos momentos la instrumentación Geotécnica se está ganando un lugar y una credibilidad dentro del ámbito de la ingeniería, sin embargo esto se lograra trabajando en equipo ya que este conocimiento es de tipo multidisciplinario y sin duda alguna es una de sus fortalezas. Por otro lado, los retos son conglomerar profesionistas capaces de desarrollar sistemas que sirvan para la toma de decisiones importantes dentro de las obras de ingeniería y como se mencionó antes, esto se trata de crecer y ampliar la instrumentación a otro tipo de obras donde ciertamente siempre ha existido un control de calidad, sin embargo lo que se ofrece es realizar los mismos trabajos pero con una precisión, sensibilidad y una confianza plena.

Se espera que este trabajo sirva como un manual de instrumentación de túneles en suelos blandos, tanto para los profesionales del ramo, coma para estudiantes, profesores y gente en general interesada en el tema.

Glosario

BROCAL: Borde de piedra, ladrillo o algún otro material que se coloca alrededor de la boca de una lumbrera, el brocal sirve para evitar el peligro de caer dentro de una lumbrera.

CLAVE: Parte superior de una excavación

CUBETA: Parte baja de una excavación.

DISTÓMETRO: Este equipo mide distancias con tecnología láser, con una precisión de error de 3mm, y un alcance de hasta 50m. Para realizar la medición se envía un haz de láser visible que indica el punto hasta el que se va a tomar la medida, mientras que en la pantalla digital del propio equipo se obtiene la distancia existente.

DOVELA: La dovela, en ingeniería civil, es un elemento constructivo que conforma un arco y que puede ser de diferentes materiales, como ladrillo o piedra. Actualmente se elaboran en concreto armado o pretensado. En arquitectura clásica, la dovela es una pieza, normalmente de piedra, en forma de cuña que componen el arco o la bóveda y se caracterizan por su disposición radial.

GAP: Holgura entre el trasdós de las dovelas y la parte exterior del escudo.

HASTIAL: Partes laterales de una excavación.

LUMBRERA: Abertura que proporciona luz y ventilación, en la obra también se utiliza para la entrada de materiales y personal que se requiera a un túnel.

MURO MILAN: El muro Milán es una estructura de concreto armado, colado en sitio. Sirve principalmente como apoyo a las cimentaciones o para contener cortes verticales en excavaciones. Sus aplicaciones en las construcciones civiles son muchas, y entre ellas podemos mencionar obras subterráneas y túneles urbanos (Metro), sótanos y cajones de cimentación de edificios, estacionamientos subterráneos, muelles, presas, silos, canales de gran sección y cárcamos de bombeo de gran capacidad.

TUNEL: Un túnel es una obra subterránea de carácter lineal, cuyo objeto es la comunicación de dos puntos, para realizar el transporte de personas, materiales entre otras cosas. Normalmente es artificial. Un túnel puede servir para peatones o ciclistas, aunque generalmente sirve para dar paso al tráfico, para vehículos a motor, para ferrocarril o para un canal. Algunos son acueductos, construidos para el transporte de agua (para consumo, para aprovechamiento hidroeléctrico o para el saneamiento). También hay túneles diseñados para servicios de telecomunicaciones. Incluso existen túneles para el paso de ciertas especies de animales. Algunos conectan zonas en conflicto o tienen carácter estratégico, ya que sirven como refugio como la Montaña Cheyenne. En las grandes ciudades el transporte se realiza mediante una red de túneles donde se mueve el metro. La posibilidad de soterrar ahorra espacio e impide el cruce al mismo nivel del tren con los peatones o los vehículos.

TUNELADORA: Una tuneladora, o minador a sección completa es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva. La excavación se realiza normalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos (alimentados a su vez por motores eléctricos, dado que la alimentación general de la máquina se realiza con energía eléctrica), aun cuando también existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabeza giratoria. El empuje necesario para adelantar se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado o en zapatas, accionados también por gatos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se obtiene un punto fijo desde donde empujarán. Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa el denominado "equipo de rezaga" de la tuneladora, constituido por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que, a menudo, ruedan sobre rieles que la misma tuneladora coloca, donde se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

TUNELADORA EPB: Tuneladora EPB (Earth Pressure Balance) que en español significaría mantenimiento de la presión del frente (escudo de presión de tierras). Es decir, las tuneladoras EPB utilizan el escombros de la excavación ubicado en la cámara de extracción para mantener la presión sobre el frente con el fin de evitar subsidencias en la superficie. La extracción del material de la cámara de extracción se realiza mediante un tornillo sin fin. Actuando sobre la velocidad del mismo y sobre la fuerza de los cilindros de empuje podemos mantener una presión constante sobre el frente que permita construir un túnel sin incidencias en las infraestructuras colindantes de la superficie.

TUNELADORA TBM: También llamadas topos, son máquinas robustas y relativamente simples, que funcionan empujando contra el terreno unos discos de metal duro que producen la rotura del terreno de tal forma que la roca se laja, y es extraída mediante cangilones en la cabeza de corte que vierten el escombros en una cinta que a su vez lo verterá sobre otra lateral hacia el exterior o sobre vagones. El sostenimiento suele hacerse con sistemas convencionales, es decir, bulones, cerchas y concreto lanzado. Para absorber la reacción de la cabeza de corte y hacer avanzar la tuneladora, las TBM se apoyan en el terreno mediante unos codales transversales (grippers).

TUNELADORA HIDROSTÁTICA: Son máquinas tuneladoras con un sistema de conducción del escombros por vía húmeda mediante bombeo, que son aplicables en casi todo tipo de geología, principalmente arena, grava y roca. Son las tuneladoras más apropiadas para trabajar bajo niveles freáticos.

En la cámara de extracción se inyecta agua o bentonita que se mezcla con el material excavado y se extrae mediante potentes bombas a la planta de separación ubicada en la superficie. En esta planta de separación se separa el material excavado del lodo bentonítico para que vuelva a inyectarse en el circuito de lodos.

REVESTIMIENTO PRIMARIO: Revestimiento formado por dovelas prefabricadas de concreto armado para la estabilización, aprovecha el mismo suelo en proceso de excavación el cual es convenientemente presurizado para tal fin.

Bibliografía

1. Beaver P., 1973, "A HISTORY OF TUNNELS", The Citadel Press Seacaucus, New Jersey.
2. Charles P. Poule 2007, Frank J. Owens. "Introducción a la nanotecnología".
3. Hammond R., 1959, "TUNEL ENGINEERING", The MacMillan Company, New York, N.Y.
4. Maidi B., M. Herrenknecht and L. Anheuser, 1996, "MECHANISED SHIELD TUNNELLING", Ernst & Sohn, Berlin.
5. Moreno A. and Schmitter J., (1981). "FAILURES OF SHAFTS AND TUNNELS IN SOFT SOILS". *Soft Ground Tunneling Failures and Displacements*, editado por D. Reséndiz N. y M. P. Romo O., A.A. Balkema Rotterdam.
6. Sandstrom G.E., 1963 "THE HISTORY OF TUNNELLING", Barrie and Rockliff, London, England.
7. Schmitter J.J., (1987). "BEHAVIOR OF MEXICO CITY TUNNELS". *International Symposium on Soft Ground Geotechnical Engineering*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México D.F.
8. COVITUR DDF, 1987. *Manual de Diseño Geotécnico, Volúmenes 1 y 2*
9. CFE, *Manual de Diseño de Obras Civiles, tomos 8.2.5 (Instrumentación en Suelos)*
10. Herrera C.S. 1997, *Instrumentación de túneles, Curso Víctor Hardy, AMITOS.*
11. *Memoria técnica de las obras del drenaje profundo del D.F. TUSA, S.A. de C.V.*
12. *Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 27, No. 3, pp. 109-117, agosto-noviembre, 2006. Universidad de los andes, Facultad de Ingeniería.*
13. Juárez Badillo y Rico Rodríguez 2006, *Mecánica de Suelos Tomo 1. Fundamentos de Mecánica de los suelos.*
14. Choquet, P., Juneau, F., Dadoun, F. 1999. *New Generation of Fiber-Optic Sensors for Dam Monitoring, Proceedings of the 1999 International Conference on Dam Safety a Monitorin.*
15. Belleville, C., Duplain, G. 1993. *White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor, Optics Letters, vol. 18, no. 1.*
16. ASTM (1965). *Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, Pub. No. 65-28198, American Society of Testing for Materials. Baltimore, USA.*
17. CFE (1983). "Instrumentación en suelos." *Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotecnia, B.2.5., Comisión Federal de Electricidad. México.*

18. Gonzalez-Valencia, F. (1996). "Diseno, instrumentación y seguridad de presas", XVIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Morelia Michoacán, noviembre, México.
19. Hanna, T. H. (1985). *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering*, Trans Tech Publications, Federal Republic of Germany.
20. Jaime Suarez. 2004, DESLIZAMIENTOS - ANALISIS GEOTECNICO.
21. http://www.madrid.org/metro/tecnologia/especificaciones_2.htm
22. Geokon Inc.2007. *Instruction Manual Model 1900. Magnetic Extensometer.*
23. Geokon Inc.2007. *Instruction Manual Model 6400. Glue snap Inclinator Casing.*
24. Geokon Inc.2005. *Instruction Manual Model 4500. Vibrating Wire Piezometer.*
25. Geokon Inc.2006. *Instruction Manual Model GK-403. Vibrating Wire Readout.*
26. Geokon Inc.2007. *Instruction Manual Models 4800, 4810, 4815 and 4820. VWir Earth Pressure Cells.*
27. RST Inc.2006. *VW2106 VW Readout Instruction Manual.*
28. RST Inc.2004. *Total Earth Pressure Cell, Installation Manual.*
29. RST Inc.2009. *Tunnel Convergence Meter, Installation Manual.*
30. Inavdid. 1997 "Fiber Optic Sensor Network for the monitoring of civil engineering structure". Swiss Federal Institute of Technological.
31. *Vías principales de las "Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México".*
32. *Revisión general de las técnicas de análisis y construcción de lumbreras. 2003. Dr. Gabriel Auvinet y M.I. Juan Felix Rodriguez. Instituto de Ingeniería UNAM.*