



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

“MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN DEL TÚNEL DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

TRUJANO CASTRO JUAN BERNABÉ

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. HÉCTOR SANGINÉS GARCÍA



México, D.F.

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.

DEDICATORIA

Al buen Pastor que me ha guiado durante estos años.

A mi Petite por la paciencia, apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia: Tere, Joel, Víctor

A mis padres y hermanos

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Al M. en I. Héctor Sanginés García

Al Departamento de Instrumentación de la línea 12 del metro



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DCG/SEAC/UTIT/004/11

M.I. HÉCTOR SANGINÉS GARCÍA
Presente

El señor JUAN BERNABÉ TRUJANO CASTRO de la carrera de INGENIERO CIVIL, me ha solicitado designar al profesor que le señale Tema de Tesis para su Examen Profesional.

En atención a esa solicitud ruego a usted se sirva formular el Tema solicitado y enviarlo a este Comité para comunicarlo oficialmente al interesado.

Doy a usted de antemano las más cumplidas gracias por su atención y le reitero las seguridades de mi consideración más distinguida.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 10 de Febrero del 2011.
EL PRESIDENTE

ING. RODOLFO SOLÍS UBALDO

RSU/MTH*gar.

ÍNDICE

Introducción

- Generalidades de la línea 12 de la ciudad de México
- Zonificación del trazo de la línea 12 de la ciudad de México
- Objetivos del trabajo

I. EQUIPOS DE MEDICIÓN

I.1 Generalidades de los equipos de medición.....	2
I.2 Celdas de presión.....	3
I.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado.....	4
I.4 Extensómetro magnético.....	7
I.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo.....	10
I.6 Extensómetro de barras.....	11

II. MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

II.1 Generalidades de las gráficas.....	15
II.2 Celdas de presión.....	16
II.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado.....	22
II.4 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.....	27
II.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo.....	38
II.6 Extensómetro de barras.....	42

III. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LAS DEFORMACIONES

III.1 Descripción general.....	46
III.2 Celdas de presión.....	46
III.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado.....	48
III.4 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.....	49
III.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo.....	53
III.6 Extensómetro de barras.....	53

IV. CONCLUSIONES

IV.1 Celdas de presión.....	56
IV.2 Sistema de convergencias y divergencias automatizado.....	56
IV.3 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.....	57
IV.4 Referencias superficiales sobre el eje del trazo.....	58
IV.5 Extensómetro de barras.....	59
IV.6 Comportamiento Suelo-estructura.....	60

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE IMÁGENES

LISTA DE GRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Introducción

La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes del suelo. El ingeniero civil investiga el suelo para determinar sus propiedades y la interacción suelo-estructura para poder diseñar las cimentaciones para edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles, carreteras, etcétera.

Debido a la naturaleza y diversidad de los suelos y a las condiciones de contorno o frontera desconocidas, la mecánica de suelos puede proporcionar soluciones para un determinado modelo matemático, pero puede ser que el modelo matemático no represente exactamente el problema real. Al avanzar la construcción, y a medida que se adquiere más información, las propiedades del suelo y las condiciones del contorno se pueden rectificar, modificando adecuadamente la solución del problema (William Lambe). Por otro lado, los resultados obtenidos de modelos matemáticos serán siempre una idealización de un problema mucho más complejo que se simplifica para fines prácticos, siendo necesario estar siempre atentos a los resultados que pueden ser “los esperados”, pero no necesariamente los que mejor representen el problema en cuestión.

La ciudad de México es un reto constante en cuanto al suelo se refiere, esto debido a que anteriormente gran parte de la ciudad fue un lago, sin embargo, la ingeniería mexicana ha provisto soluciones y técnicas novedosas para hacer del valle de México el mayor centro urbano del país y uno de los mayores del mundo. El ingeniero es el encargado de proveer la infraestructura necesaria para desarrollar las actividades diversas de una sociedad. El sistema de transporte colectivo metro forma parte de esta infraestructura en la ciudad de México, por lo que en la presente tesis se presenta el caso específico de un tramo del túnel excavado con escudo para la línea 12 del metro y la aplicación de la instrumentación geotécnica como apoyo en la construcción del mismo.

Generalidades de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

El sistema de transporte colectivo metro es el máximo ícono del transporte público en la ciudad de México. Desde los inicios de su operación a finales de la década de los sesentas y hasta la actualidad, este medio de transporte masivo sigue siendo la mejor opción de movilidad en la ciudad y en la zona urbana del valle de México. Casi 10 años habían pasado sin que se incrementara la cobertura de la red, sin embargo, el gobierno capitalino dio apertura a la nueva línea 12, también llamada del bicentenario.

Esta línea será la más larga no sólo del Distrito Federal, sino incluso de América Latina. Tendrá un recorrido de poniente-oriental y viceversa, uniendo la zona de Tláhuac con el centro y poniente de la ciudad, y desde la terminal Mixcoac permitirá el flujo de pasajeros hacia el oriente y centro de la capital. Además, es importante señalar que la parte oriente del valle de México es una de las más densamente pobladas del mundo, por lo que la ampliación de la cobertura hacia esa zona es de gran interés social.

Esta línea cruzará las demarcaciones políticas de Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Tláhuac y Álvaro Obregón, para de esta forma cubrir una longitud total de 25 kilómetros. Se tendrán estaciones de correspondencia en Ermita (línea 2), Zapata (línea 3), Atlalilco (línea 8), y en la estación terminal Mixcoac con correspondencia con la línea 7. Además de las estaciones de correspondencia existirán 15 estaciones de paso, y la estación terminal Tláhuac contará con una nave de depósito para talleres y mantenimiento de los diversos trenes que den servicio a la línea.

Otra característica distintiva de la línea 12 es que a lo largo de su recorrido contará con diferentes secciones constructivas, es decir, desde el intertramo de maniobras Mixcoac, llamado también cola Mixcoac, hasta la lumbrera de salida se construirá un túnel del tipo convencional; de la lumbrera de salida hasta la lumbrera de acceso en Mexicaltzingo se construirá bajo la modalidad de túnel con escudo para lo cual se utilizará una tuneladora de presión balanceada (EPB); de la lumbrera de acceso en dirección oriente y hasta antes de llegar a la estación pueblo Culhuacán, se construirá con una sección cajón subterráneo. El cuarto sistema constructivo corresponde al tramo elevado que irá desde un poco antes de la estación Pueblo Culhuacán y hasta el intertramo Zapotitlán-Tlaltenco, ya que es en este intertramo donde nuevamente vuelve a cambiar la modalidad de construcción para convertirse en una sección superficial que terminará hasta los talleres de mantenimiento en la estación terminal Tláhuac.

Zonificación del trazo Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

Como lo define el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del Reglamento del Distrito Federal, el suelo de la ciudad de México se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

a) Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.

b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la figura 1 se muestran las porciones del Distrito Federal cuyo subsuelo se conoce aproximadamente en cuanto a la zonificación anterior.

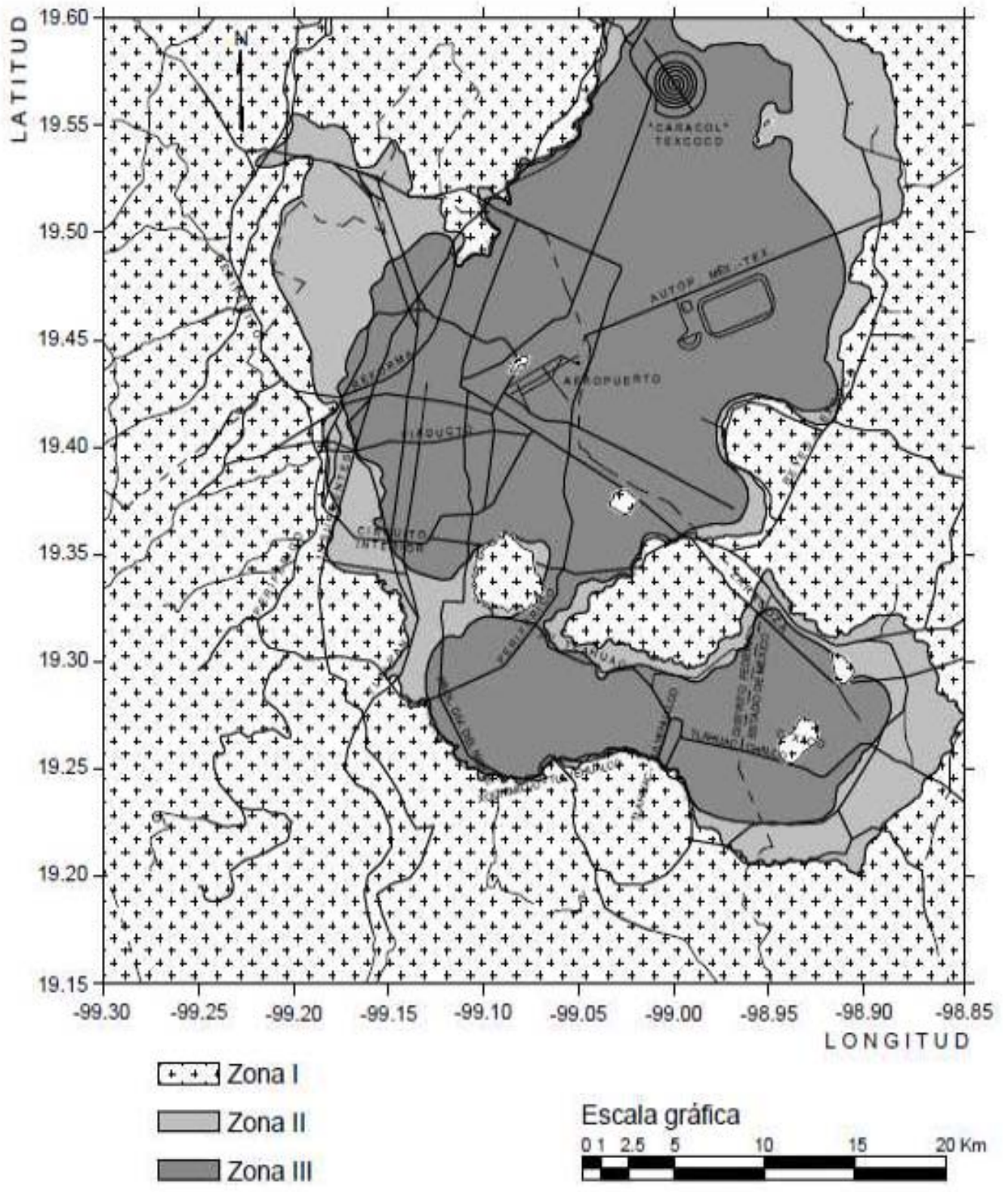














Fig. 1 Zonificación geotécnica de la ciudad de México.

Esta figura solamente podrá usarse para definir la zona a la que pertenece un predio dado en el caso de las construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras. En el caso particular de la línea 12, debido a su magnitud e importancia, las distintas zonas por las que cruzará, así como el tipo de suelo en que se ubicarán las estaciones se definieron a partir de exploraciones directas del subsuelo mediante estudios de campo y pruebas de laboratorio. Además la exploración se apoyó en el conocimiento geológico general y local que se tiene de la zona de interés y fue suficiente para definir de manera confiable los parámetros de diseño que permitan una buena interacción del suelo con la estructura.

Para la presente tesis, el intertramo de estudio está comprendido entre la lumbrera de entrada y la cabecera oriente de la estación Mexicaltzingo, ubicadas en los cadenamientos 20+344 y 20+875 respectivamente (figura 3). La exploración geotécnica permitió definir como zona III a la que corresponde a este intertramo (figura 2), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla, el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros. El sistema constructivo que se eligió para este tramo es a través de una tuneladora tipo escudo de presión balanceada (EPB).

La siguiente tabla muestra la simbología usada en la imagen correspondiente al perfil estratigráfico de la lumbrera de entrada a la estación Mexicaltzingo.

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	MATERIAL ARENO-LIMOSO CON FRAGMENTOS DE CONCRETO CORRESPONDIENTE AL RELLENO SUPERFICIAL DE LA ZONA.
	ARCILLA ARENOSA DE CONSISTENCIA DE MEDIA A FIRME, DE BAJA PLASTICIDAD CON FRAGMENTOS DE GRAVA CAFÉ OSCURO (DETRITO ALUVIAL).
	ARCILLA DE CONSISTENCIA DE MUY BLANDA A MEDIA, DE ALTA PLASTICIDAD, CON LENTES DE ARENA FINA Y GENIZA VOLCÁNICA, GRIS, CAFÉ ROJIZO Y VERDE OLIVO (ARCILLA LACUSTRE).
	ARENA LIMOSA POCO ARCILLOSA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ AMARILLO CON LENTES DE ARENA PUMÍTICA (SEGUNDA TOBA).
	ARENA LIMOSA POCO ARCILLOSA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ CLARO CON LENTES DE ARENA PUMÍTICA (PRIMER TOBA)
	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA LIMOSA, EN ESTADO MUY COMPACTO, GRIS OSCURO (SEGUNDO LAHAR).
	GRAVAS EMPACADAS EN ARENA LIMOSA, EN ESTADO MUY COMPACTO, GRIS OSCURO (PRIMER LAHAR)
	ARENA DE GRANO FINO A GRUESO, LIMOSA, CON FRAGMENTOS DE GRAVA Y GRAVILLA REDONDEADA, GRIS OLIVO Y CAFÉ AMARILLO (MATERIAL ALUVIAL)
	ARENA PUMÍTICA EN ESTADO MUY COMPACTO, CAFÉ OSCURO (MIEMBRO ARENOSO DE LA FORMACIÓN TARANGO)
	LIMO ARENOSO DE CONSISTENCIA FIRME A DURA GRIS VERDOSO
	CONTACTO INDEFINIDO
	FALLA NORMAL

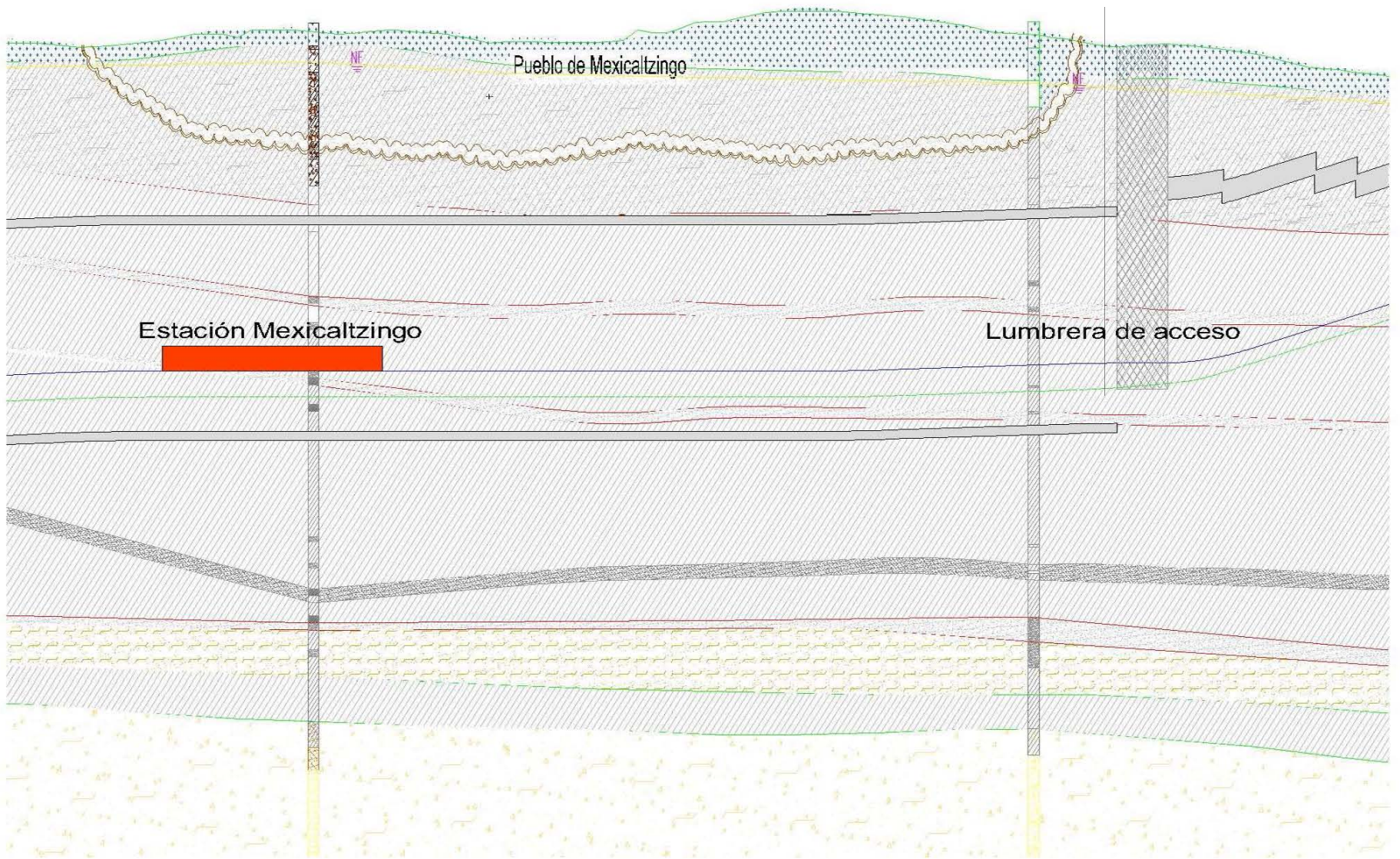


Fig. 2 Perfil estratigráfico correspondiente al intertramo.

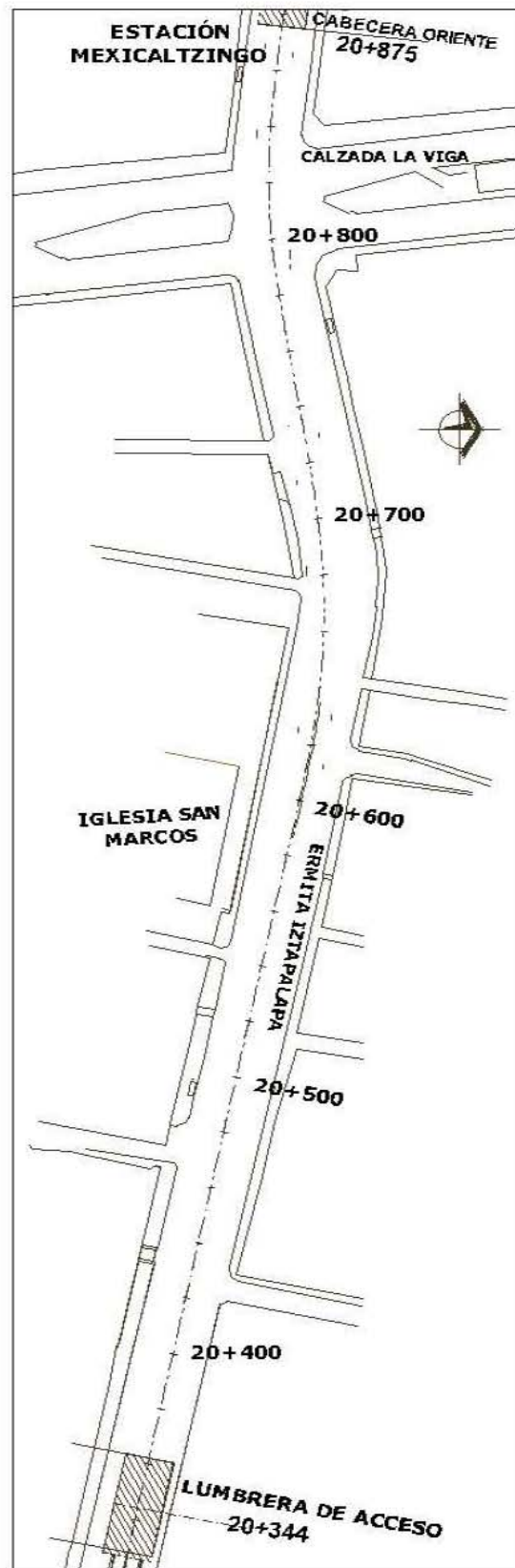


Fig. 3 Intertramo Estación Mexicaltzingo - Lumbra de acceso.

Objetivo del trabajo

El propósito de la presente tesis es presentar las mediciones de las deformaciones del túnel excavado con el escudo en zona III y las deformaciones del terreno adyacente al túnel, mediciones que fueron obtenidas in situ por medio de un sistema de instrumentación. Derivadas de dicha instrumentación se dan las conclusiones y recomendaciones pertinentes que puedan ser utilizadas en un futuro en el monitoreo durante la construcción de túneles excavados con escudo tipo EPB.

En principio, se introduce de manera breve un resumen de los instrumentos utilizados en la medición de las deformaciones del túnel y del suelo aledaño a este (Capítulo I), también se presentarán las mediciones obtenidas en campo realizadas por el departamento de instrumentación del consorcio de la línea 12 y que corresponden a la lumbrera de acceso y hasta la estación Mexicaltzingo (Capítulo II); se hacen la interpretación y observaciones del monitoreo realizado en el intertramo en estudio (Capítulo III). Por último, se dan las recomendaciones y conclusiones pertinentes derivadas de del análisis de los parámetros medidos por medio del sistema de instrumentación (Capítulo IV).

CAPÍTULO I

EQUIPOS DE MEDICIÓN

I. EQUIPOS DE MEDICIÓN

I.1 Generalidades

El ingeniero civil es el encargado de diseñar, planear, construir, operar y dar mantenimiento a obras de infraestructura; durante este proceso debe ser capaz de medir de manera cuantitativa los parámetros que servirán de referencia para tomar decisiones acerca del comportamiento real y teórico de las obras de ingeniería. Es precisamente la necesidad de medir y evaluar los procesos constructivos, así como los materiales utilizados en dichos procesos lo que ha hecho imprescindible la invención y adecuación de instrumentos y técnicas de monitoreo. En la actualidad existen infinidad de instrumentos diseñados para detectar, medir, determinar y monitorear la interacción de las estructuras y/o materiales utilizados en la ingeniería.

Basados en las teorías existentes y en la experiencia de años de trabajo en las diferentes áreas de la ingeniería, es imperativo buscar siempre medir los parámetros de comportamiento de las estructuras, ya que de esta manera estaremos en la capacidad de mejorar, ya que para fines prácticos, solo lo que se puede medir es lo que se puede cambiar. Debido a que el bienestar y seguridad de las personas, los intereses económicos y el progreso mismo de un país está estrechamente ligado a la infraestructura, no debemos escatimar al momento de instrumentar y monitorear las diferentes obras de ingeniería, ya que el costo de no hacerlo adecuadamente puede resultar excesivamente elevado en comparación con el costo total de la obra.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del túnel de la línea 12 durante el proceso constructivo al paso del escudo, se instaló un sistema de instrumentación que permitió medir la presión de confinamiento sobre las dovelas, los cambios de la geometría transversal de los anillos, así como los asentamientos y desplazamientos en la masa del suelo y en superficie. Dicho sistema está integrado por celdas de presión, convergencias y divergencias automatizados (Tilt meters), referencias superficiales, extensómetro de barras y extensómetro magnético con tubería para inclinómetro. En los siguientes subtemas se describen de manera breve cada uno de estos dispositivos; si se desea mayor información acerca de los instrumentos instalados en el tramo en cuestión, se podrán consultar en las referencias los datos de los proveedores y las direcciones electrónicas donde se pueden revisar manuales, especificaciones, y demás detalles de interés.

El diseño, instalación, monitoreo y procesamiento de información generada de los diferentes dispositivos enfocados al monitoreo de las obras y actividades correspondientes al proyecto fue realizado por el departamento de instrumentación de la línea 12 del metro. La información de las lecturas, mediciones y gráficas generadas fue proporcionada para esta tesis por el área de instrumentación geotécnica del consorcio de la línea 12 del metro de la ciudad de México.

1.2 Celdas de presión

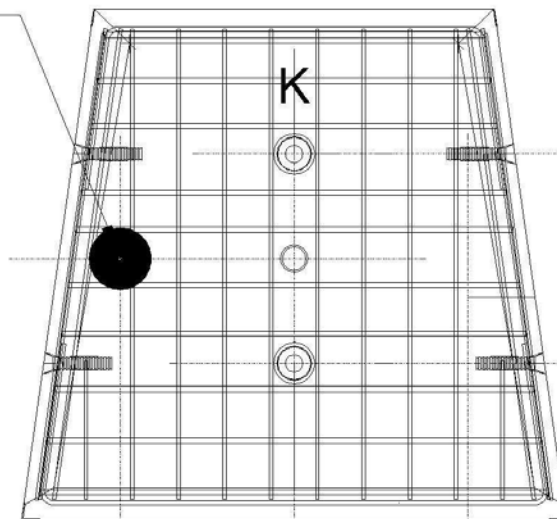
Para detectar la magnitud y distribución de los esfuerzos que el subsuelo ejerce sobre los anillos colocados en el túnel, se instalaron 4 celdas de presión en el anillo 188 ubicado en el cadenamamiento 20+641.600 del tramo en estudio. Las celdas de presión de tierra, en ocasiones llamadas también celdas 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. El tipo de la celda de presión de tierra utilizada es del tipo de cuerda vibrante, concepto desarrollado originalmente en el año 1958 en el Instituto Geotécnico Noruego (NGI) para la medición de la presión de tierra en tabla-estacados, muros de retención, túneles y presas de tierra.

Las celdas utilizadas consisten 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 y esta a su vez 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 a 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.

Ubicacion de Celda de Presion CP-01
No. de Serie: TP1104



VISTA DE CARA INTERIOR DE LA DOVELA "K"

Fig. 4 Esquema de Celda de presión en clave.



Fig. 5 Celda de presión colocada en dovela.

I.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado

Las dovelas que conforman el túnel de la línea 12 siguen los radios de un mismo centro, formando así un arco radial, estas dovelas a su vez forman un anillo compuesto de 8 dovelas, 7 de ellas son el soporte estructural del anillo, mientras que la octava forma la

clave del túnel. Las designaciones de cada dovela son: A1, A2, A3, A4, A5, B, C y la letra K corresponde a la ya mencionada clave. La presente tesis no tiene como objetivo la descripción detallada de las dovelas, sin embargo, se presenta de manera esquemática en la figura 8 el anillo instrumentado con la ubicación respectiva de las piezas que lo conforman. Si se requiere mayor información acerca de dovelas se puede consultar la bibliografía adicional de esta tesis.

Con el fin de observar el comportamiento del revestimiento primario a lo largo del túnel excavado con escudo de la línea 12 del metro, en el momento en que el túnel se encuentre en la zona de pórticos o carros del escudo excavador, se instaló un sistema a base de Tilt meters que permitió medir las deformaciones del revestimiento primario (anillo de dovelas) al interior del túnel, conforme el avance de excavación. Los Tilt meters son sensores micro eléctrico-mecánicos (MEMS) uniaxiales de sistema direccionable (sensores encadenados o en serie) los cuales se conectaron a un datalogger de un canal mediante el cual se automatizó la medición tomando lecturas cada 6 horas y se programó para poder coleccionar los datos en un PC de campo compatible.



Fig. 6 Tilt meter colocado en dovela.

Se instrumentaron 2 anillos con 6 Tilt meters cada uno, empotrados al paño interior de cada dovela y se ubicaron aproximadamente al centro de cada una. Los anillos instrumentados tienen una separación de 75 anillos, los cuales se colocaron conforme el avance de la excavación. Para la presente tesis, los anillos instrumentados que corresponden al tramo en estudio, son el anillo 28 y el 103, las mediciones obtenidas por el datalogger así como las gráficas generadas a través de los datos recabados serán analizadas en el capítulo II.

Debido a la longitud de 514 metros de la lumbrera de acceso a la cabecera oriente de la estación Mexicaltzingo, resulta imposible instrumentar la mayoría de los anillos que lo integran, empero, los dos anillos que se ubican en dicho intertramo servirán para presentar las mediciones obtenidas por el sistema de convergencias y divergencias automatizados. Es imprescindible destacar que la colocación del sistema de convergencias y divergencias en los anillos 28 y 103 no necesariamente podrían constituir el comportamiento de todo el intertramo, sin embargo, para los fines de esta tesis los dos anillos instrumentados se considerarán en inicio como representativos del conjunto, ya que en el capítulo IV se harán las observaciones y conclusiones pertinentes para justificar o desacreditar dicha suposición.



Fig. 7 Datalogger utilizado para la automatización de los tilt meters.

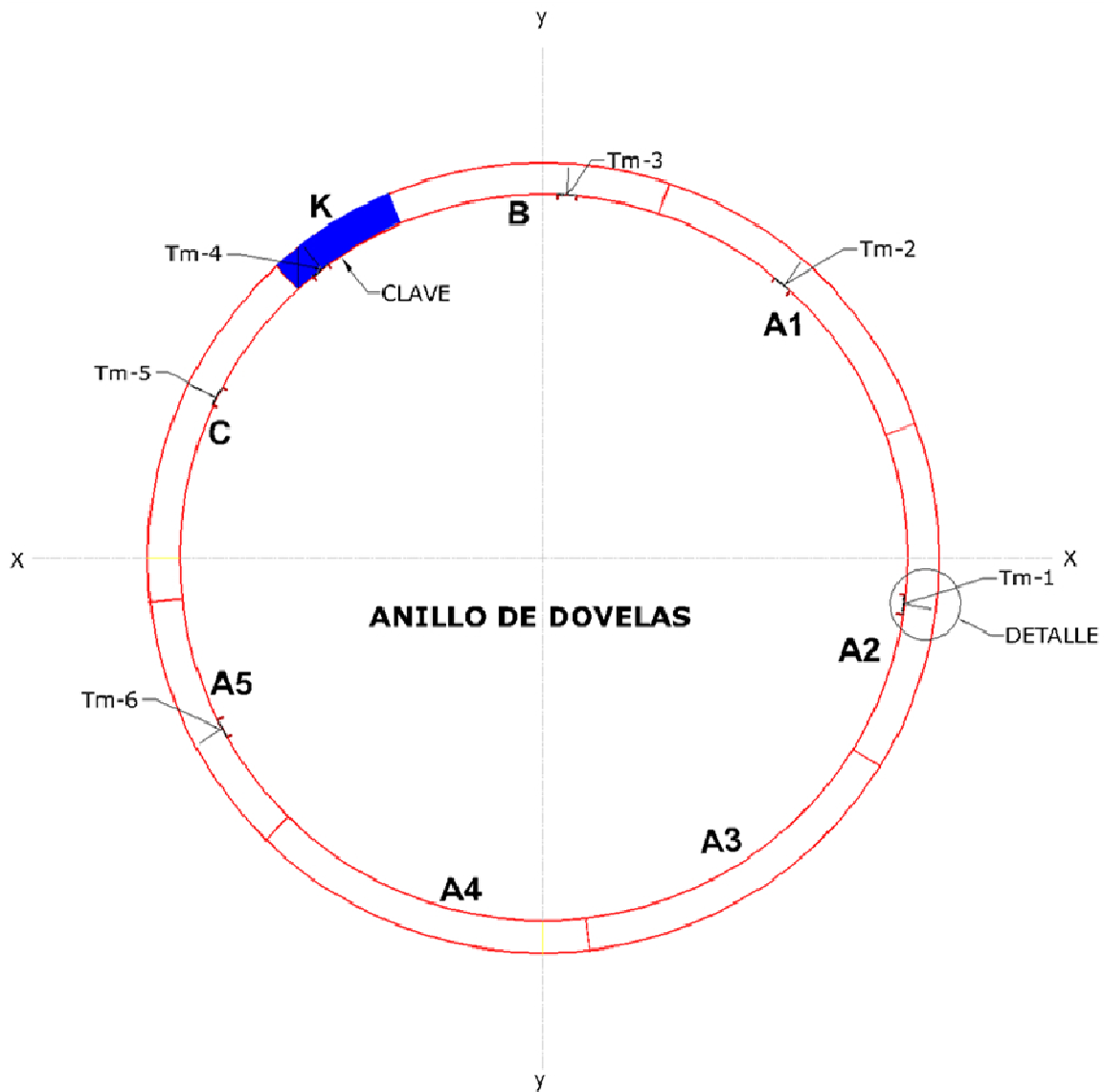


Fig. 8 Esquema del anillo instrumentado con tilt meters.

1.4 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro

El monitoreo del terreno adyacente al paso del escudo se tomó en cuenta debido a los empujes ejercidos sobre el suelo por el paso de la tuneladora y en particular los movimientos horizontales del terreno y los asentamientos durante el paso de dicha máquina. Los esfuerzos generados por los empujes activos y pasivos del suelo pueden dañar el anillo de dovelas e inclusive los edificios que se encuentran en superficie, por lo cual es imperativo determinar el comportamiento de la excavación y de la respuesta del suelo. Con el fin de observar el comportamiento de la excavación por medio del escudo de tipo EPB en el tramo de la lumbreira de acceso y la estación Mexicaltzingo se colocó un sistema de instrumentación denominado extensómetro magnético con tubería para inclinómetro para lograr el objetivo del monitoreo.

El extensómetro magnético con tubería para inclinómetro 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 sensores magnéticos denominados “arañas magnéticas” colocadas a distintas elevaciones, lo que permite medir con mayor precisión el movimiento vertical del suelo vecino. La tubería con 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 está compuesto por tramos de tubería tipo glue-snap de 3.05m de longitud, la cual contiene en su cara interior cuatro ranuras longitudinales alineadas en dos planos ortogonales, los tramos de tubería están unidos mediante coples telescópicos de 0.605m de longitud que podrán absorber los movimientos verticales del suelo. De manera esquemática la figura 10 muestra la instalación del aparato y algunas partes esenciales del mismo, ya que para la presente tesis el énfasis está en los datos generados por los dispositivos y no en los dispositivos en sí. Para mayores detalles acerca del extensómetro magnético se podrá consultar en las referencias la bibliografía y los sitios web donde se puede profundizar en el tema.

El extensómetro antes descrito se colocó en la Av. Ermita, en el cadenamamiento 20+662 y la profundidad de instalación fue de 33.10m, la distancia horizontal del extensómetro con respecto al hastial del túnel fue de aproximadamente 7.50m. Este dispositivo es el único que se colocó en el intertramo, por tanto, las mediciones y datos generados no podrán ser comparados con otro instrumento del mismo tipo en este intertramo, sin embargo, para la presente tesis los registros obtenidos son suficientes para poder dar las conclusiones y sugerencias respectivas (capítulo IV), ya que llegado el momento, se sentarán las bases del contexto y características peculiares de las mediciones in situ.



Fig. 9 Arañas magnéticas en tubería para inclinómetro.

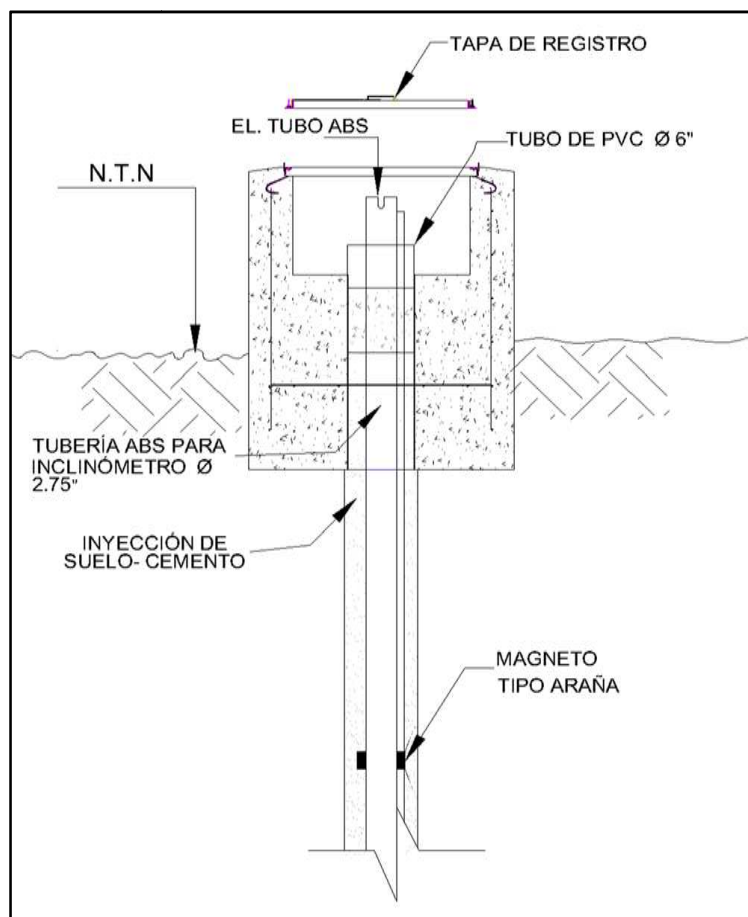


Fig. 10 Esquema de extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.

1.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo

A través de levantamientos topográficos periódicos se procedió a determinar los movimientos del suelo en la superficie sobre el eje del trazo del túnel, se colocaron bancos de nivel superficiales con una separación de 20m, con estos bancos se formaron líneas de colimación (la línea imaginaria definida por el punto donde se cruzan los hilos principales y el centro del ocular, es la visual principal con que se trabaja y se le denomina línea de colimación), estas sirvieron para medir las deformaciones verticales que sufrió cada uno de dichos bancos. Las líneas de colimación se colocaron en las calles principales que cruzan el eje de trazo; la distribución de los bancos fue a cada 5m, 10m y 15m respectivamente.

Los bancos de nivel en el pavimento están constituidos por un tornillo metálico de 5/8 x 4'', con cabeza semiesférica (cabeza de gota) y una línea grabada perpendicularmente a la ranura que el tornillo tiene en su cabeza, esta ranura servirá de guía a una regla metálica graduada. El tornillo está empotrado de manera firme en la carpeta asfáltica garantizando así su integridad. En áreas verdes los bancos de nivel están constituidos por un cilindro de concreto simple de 15cm de diámetro por 30cm de altura, en este cilindro de concreto se incrustará un tornillo de iguales características al que se usa en pavimento, de esta forma el sistema de bancos de nivel en área verde funciona igual al que se ubica en pavimento.



Fig. 11 Referencia superficial.

Es importante destacar que las nivelaciones tomadas de los bancos de nivel superficiales se hicieron durante la mañana, para de esta forma evitar errores por reverberación; además, los bancos de nivel superficiales que forman las líneas de colimación están referidos a su vez a bancos de nivel profundos, sin embargo, se omitirán las nivelaciones hechas con los bancos de nivel profundo, esto debido a que dichas nivelaciones sirven para medir el hundimiento regional, y este no es tema de estudio en la presente tesis. Para mayor información acerca

del hundimiento regional de la ciudad de México y el hundimiento regional medido durante el proceso constructivo de la línea 12 del metro consulte las referencias bibliográficas dadas al final de esta tesis. De manera esquemática se presenta en la figura 12 una parte del arreglo de los bancos de nivel en el tramo de estudio.

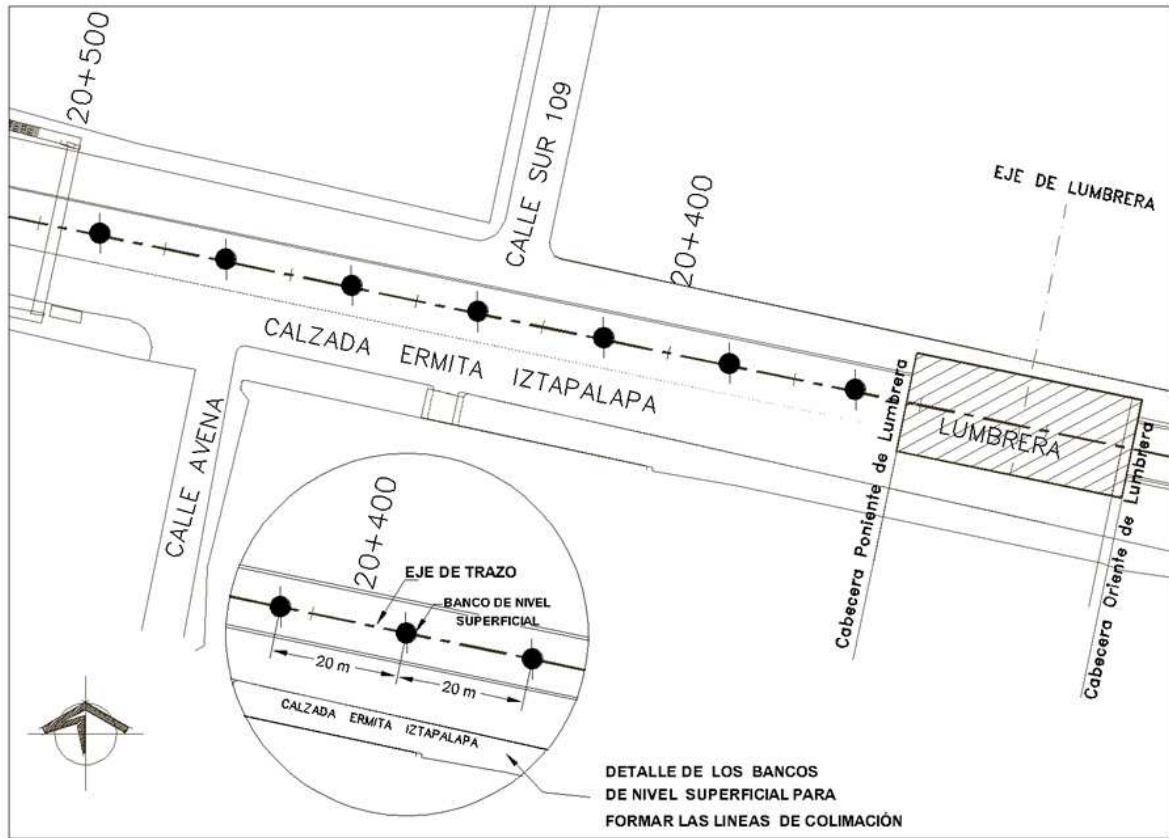


Fig. 12 Vista en planta de referencias superficiales sobre el eje de trazo.

1.6 Extensómetro de Barras

Con el propósito de observar el comportamiento del suelo en las etapas de excavación y construcción del túnel excavado con escudo, en el tramo de Mexicaltzingo a la lumbrera de acceso, se instaló un extensómetro de dos barras verticales en el cadenamiento 20+715.250. El principio de funcionamiento de dicho instrumento es simple, ya que se coloca una barra lisa de acero dentro de un tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro de cedula 40, esto con el fin de que el tubo le sirva a la barra como un resguardo para no entrar en contacto directo con el suelo y de esta manera poder deslizarse libremente dentro del ademe formado por el PVC. En la parte inferior del extensómetro se suelda una varilla del número 3 de 15 centímetros de longitud que a su vez es recubierta con pintura epóxica, dichas varillas funcionan como anclas para lograr la interacción entre el suelo y el extensómetro a la profundidad de instalación dada.



Fig. 13 Extensómetro de barras.

El extensómetro de barras se instala dentro de un barreno para medir las deformaciones entre el cabezal del instrumento por medio de levantamientos topográficos, cada una de las barras se ubica a diferentes profundidades (para el caso del extensómetro las profundidades correspondieron con la clave y el hastial del túnel). Para la instalación del extensómetro se realizó un barreno de 4 1/2" de diámetro, al término de la perforación del barreno, mediante un pisón acoplado a una sonda, se verificó la profundidad de la perforación y que el barreno estuviese limpio y libre de obstáculos que pudiesen impedir el descenso del extensómetro ensamblado previamente en la superficie.

Una vez que el extensómetro se coloca en el barreno, se inyectan lodos bentoníticos con una proporción tal que sea el peso volumétrico del lodo y el del terreno perforado sean lo mas cercanas posibles.

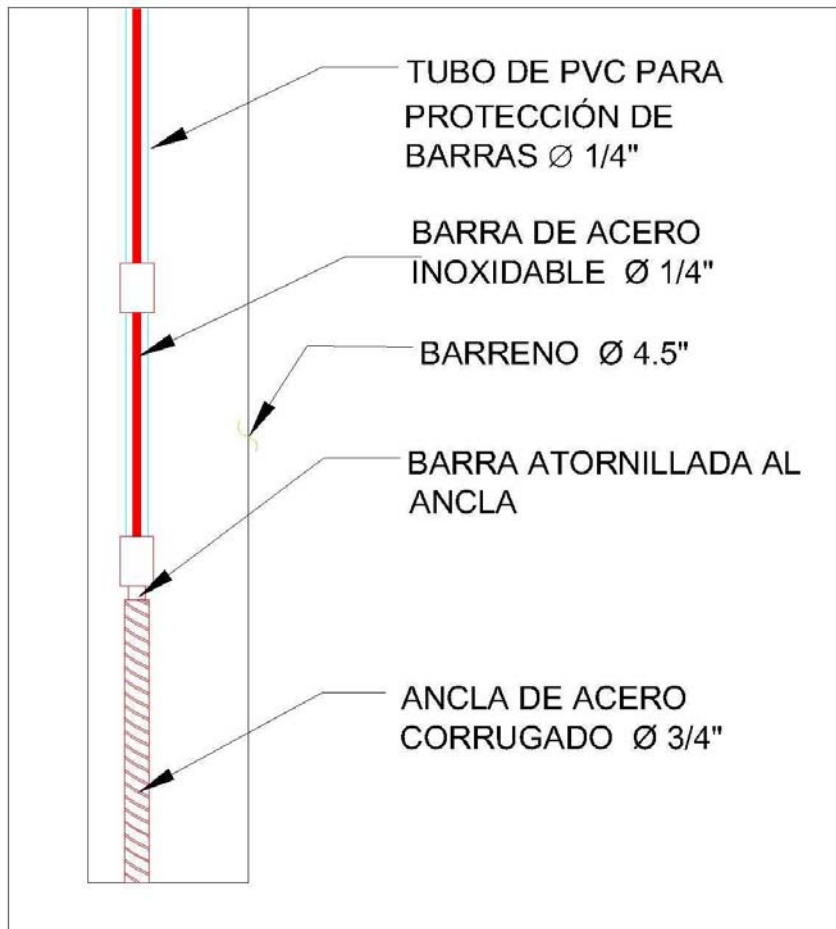


Fig. 14 Esquema de extensómetro de barras.

CAPÍTULO II

MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

II.1 Generalidades de las gráficas

En el capítulo anterior se describió el principio de funcionamiento de los dispositivos instalados para medir las deformaciones del túnel excavado con escudo y del comportamiento del terreno aledaño al mismo. El propósito de este capítulo es presentar las evidencias gráficas de los registros y de la información procesada de los distintos dispositivos de monitoreo en el tramo de la lumbrera de entrada hasta la estación Mexicaltzingo; el análisis y comparaciones, así como las conclusiones derivadas de dichos registros y datos se harán en capítulos posteriores.

La frecuencia de toma de lecturas está programada para hacerse dos veces a la semana, sin embargo, se podrá observar en las gráficas que las fechas en que se actualiza la información no necesariamente corresponde a esta programación, esto debido a que en todo momento se depende del avance de la obra para poder llevar a cabo el monitoreo, sin embargo, la cantidad de datos obtenidos proveen una vasta fuente de información acerca del comportamiento de las zonas instrumentadas.

Es difícil sensibilizarnos a simple vista con los datos obtenidos por las mediciones, esto debido a que la cantidad de datos numéricos es mucha y está dada de manera abstracta, sin embargo, el graficar estos datos con la ayuda de hojas de cálculo programadas para dicho fin nos provee una manera de visualizar el comportamiento de los registros en función del tiempo, y a su vez nos permite mirar los valores máximos y mínimos, la tendencia de algún valor e inclusive nos puede advertir de alguna anomalía en el monitoreo de los instrumentos.

Las gráficas presentadas en este capítulo cuentan con una explicación breve de los datos que están graficados en ellas. A pesar de que se cuenta con instrumentos de monitoreo con tecnología de punta y con mucha pericia en la toma de las lecturas de los instrumentos instalados, pueden existir errores en algún registro, errores que en su caso son milimétricos y que en la parte de las comparaciones y conclusiones serán discutidos a fondo.

Toda la información graficada que se expone en este capítulo está disponible en la página del departamento de instrumentación del consorcio de la línea 12 del metro, y esta información es propiedad de la empresa ICA.

II.2 Celdas de presión

Las gráficas que a continuación se presentan son del anillo 188 instrumentado, localizado en el cadenamiento 20+641.600. En la planta de dovelas con ayuda de los técnicos que las construyen se colocaron cuatro celdas de presión en cuatro dovelas distintas, la designación de las dovelas con celda de presión es la siguiente:

Para la celda 1 la dovela A1, la celda 2 corresponde a la dovela A3, la celda 3 es la dovela A5 y la celda número 4 está ubicada en la clave K, en la figura 15 se muestra de forma esquemática el anillo 188 instrumentado.

Como se puede observar son cuatro las celdas de presión distribuidas en el anillo de manera ortogonal, por lo que se generaron 4 gráficas distintas designadas como Anillo 188-1, Anillo 188-2, Anillo 188-3 y Anillo 188-4. En las gráficas el eje de las abscisas corresponde a las fechas del monitoreo, mientras que en las ordenadas se localiza la presión del suelo ejercida sobre las celdas en toneladas sobre metro cuadrado. Se muestra una imagen correspondiente a la hoja de cálculo utilizada para graficar los datos medidos en las celdas.

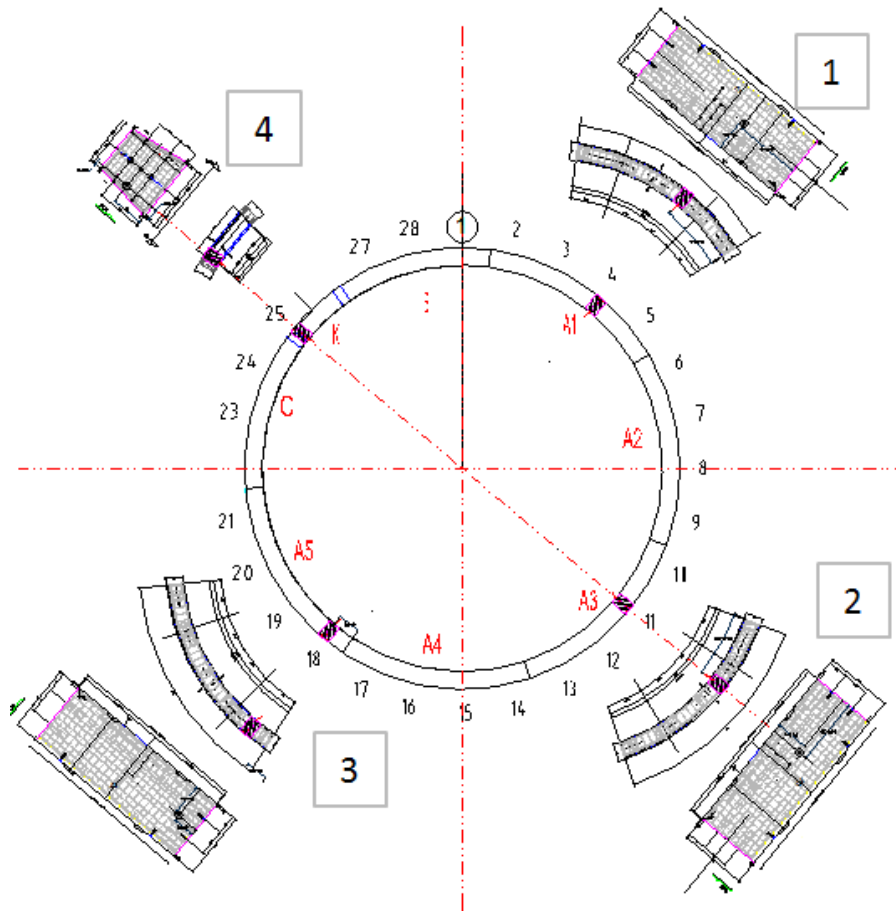


Fig. 15 Esquema de dovelas instrumentadas con celdas de presión.

La ecuación programada en la hoja de cálculo es:

$$P(KPa) = C.F. * (Li - Lc) + [0.1 (Bi - Bc)]$$

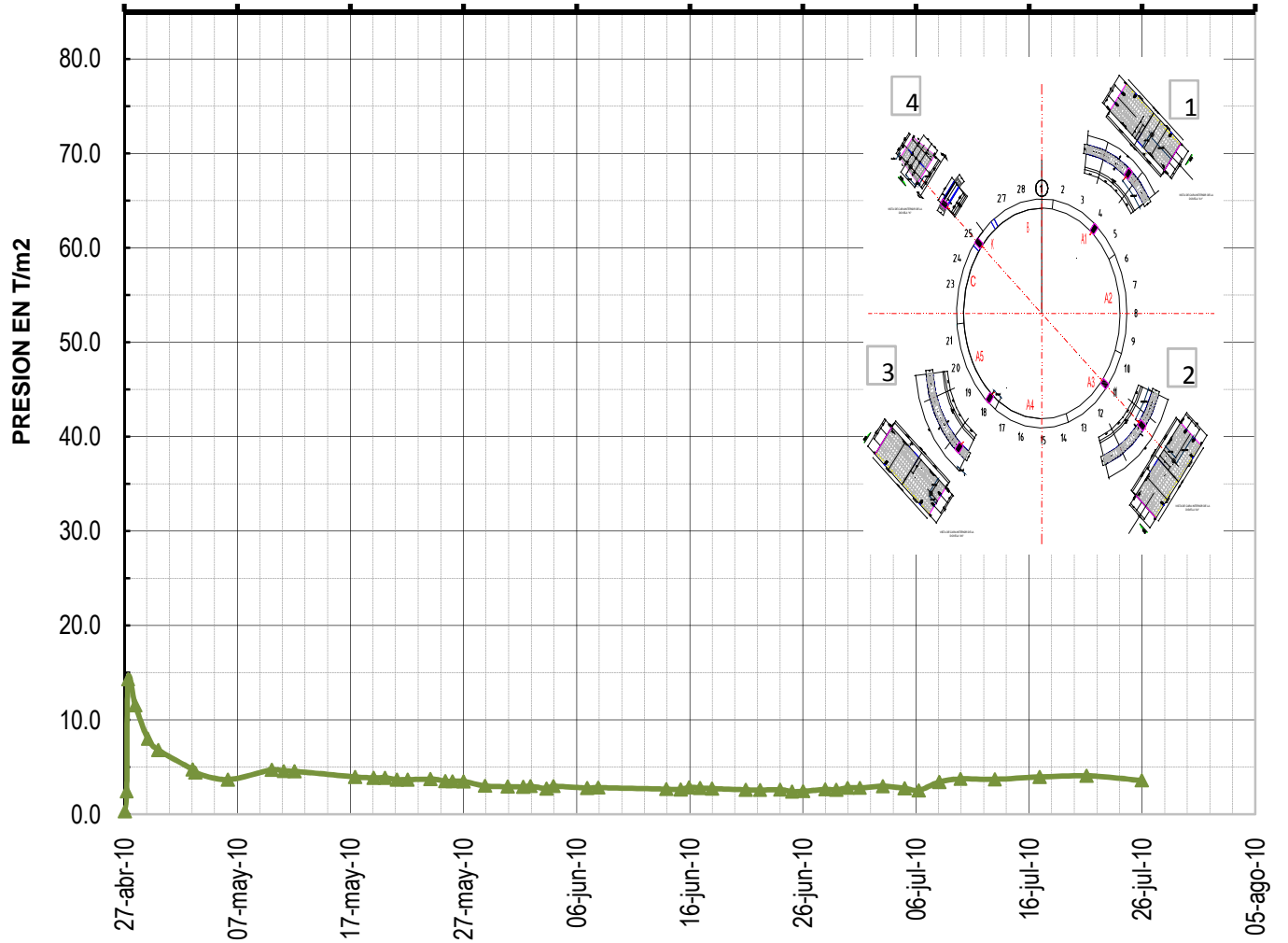
Li= Lectura inicial

PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA HOJA DE CALIBRACIÓN (Ajuste Lineal):				
BC =	1,023.90	mbar	mbar (Presión barométrica en fábrica)	
Bi =	1,027.00	mbar	(Presión barométrica en fábrica, despues de calibracion)	
Ti =	17.70	°C	(Temperatura en fábrica)	(Temperatura inicial °C) 23.50
Lc =	9,535.00	(B units)	(Lectura del instrumento en fábrica)	(Lectura Cero) 9,661.70
C.F=	0.1860	kPa/Bunits	(FACTOR DE CALIBRACION)	

No.	Fecha	LECTURA		PROMEDIO POR DIA			Presión (Ajuste Polinomial)		Observaciones
		Lc (Bunits)	T (°c)	FECHA	Lc (Bunits)	T (°c)	P (kPa)	P (t/m2)	
1	27/04/2010 10:16	9,661.60	23.50						
2	27/04/2010 10:16	9,661.90	23.50						
3	27/04/2010 10:17	9,661.60	23.50	27/04/2010 10:16	9,661.70	23.50	0.00	0.00	Lectura cero
4	27/04/2010 11:50	9,644.40	23.30						
5	27/04/2010 11:51	9,644.40	23.40						
6	27/04/2010 11:51	9,644.50	23.40	27/04/2010 11:51	9,644.43	23.37	3.21	0.33	
7	27/04/2010 15:23	9,553.40	24.20						
8	27/04/2010 15:23	9,524.80	24.30						
9	27/04/2010 15:24	9,522.40	24.30	27/04/2010 15:23	9,533.53	24.27	23.84	2.43	
10	27/04/2010 18:33	8,907.30	25.80						
11	27/04/2010 18:34	8,906.40	25.90						
12	27/04/2010 18:35	8,906.30	25.90	27/04/2010 18:34	8,906.67	25.87	140.41	14.31	
13	28/04/2010 10:13	9,051.10	34.00						
14	28/04/2010 10:14	9,053.90	34.10						
15	28/04/2010 10:15	9,052.40	34.10	28/04/2010 10:14	9,052.47	34.07	113.30	11.55	
16	29/04/2010 12:28	9,238.80	36.80						
17	29/04/2010 12:29	9,240.00	36.80						
18	29/04/2010 12:30	9,240.00	36.80	29/04/2010 12:29	9,239.60	36.80	78.50	8.00	
19	30/04/2010 11:00	9,302.70	37.70						
20	30/04/2010 11:01	9,303.00	37.70						
21	30/04/2010 11:02	9,302.70	37.70	30/04/2010 11:01	9,302.80	37.70	66.74	6.80	
22	03/05/2010 11:50	9,411.00	33.20						
23	03/05/2010 11:51	9,411.00	33.30						
24	03/05/2010 11:52	9,410.80	33.30	03/05/2010 11:51	9,410.93	33.27	46.64	4.75	
25	03/05/2010 17:43	9,428.50	32.80						
26	03/05/2010 17:44	9,429.10	32.90						
27	03/05/2010 17:45	9,429.20	32.90	03/05/2010 17:44	9,428.93	32.87	43.29	4.41	
28	06/05/2010 14:25	9,467.90	30.80						
29	06/05/2010 14:26	9,467.90	30.90						
30	06/05/2010 14:27	9,467.60	30.90	06/05/2010 14:26	9,467.80	30.87	36.06	3.68	
31	10/05/2010 11:59	9,413.00	28.70						
32	10/05/2010 12:00	9,412.90	28.80						
33	10/05/2010 12:01	9,413.00	28.80	10/05/2010 12:00	9,412.97	28.77	46.26	4.72	
34	11/05/2010 12:52	9,420.20	28.40						
35	11/05/2010 12:53	9,419.90	28.50						
36	11/05/2010 12:54	9,420.90	28.50	11/05/2010 12:53	9,420.33	28.47	44.89	4.58	
37	12/05/2010 11:47	9,421.60	28.30						
38	12/05/2010 11:48	9,421.60	28.30						
39	12/05/2010 11:49	9,421.70	28.30	12/05/2010 11:48	9,421.63	28.30	44.85	4.55	
40	17/05/2010 20:26	9,452.70	27.30						
41	17/05/2010 20:27	9,453.60	27.30						
42	17/05/2010 20:28	9,453.40	27.30	17/05/2010 20:27	9,453.23	27.30	38.77	3.95	
43	19/05/2010 11:55	9,457.70	27.00						
44	19/05/2010 11:56	9,457.70	27.00						
45	19/05/2010 11:57	9,457.50	27.00	19/05/2010 11:56	9,457.63	27.00	37.95	3.87	
46	20/05/2010 12:02	9,457.20	27.00						
47	20/05/2010 12:03	9,457.50	27.00						
48	20/05/2010 12:04	9,457.30	27.00	20/05/2010 12:03	9,457.33	27.00	38.01	3.87	

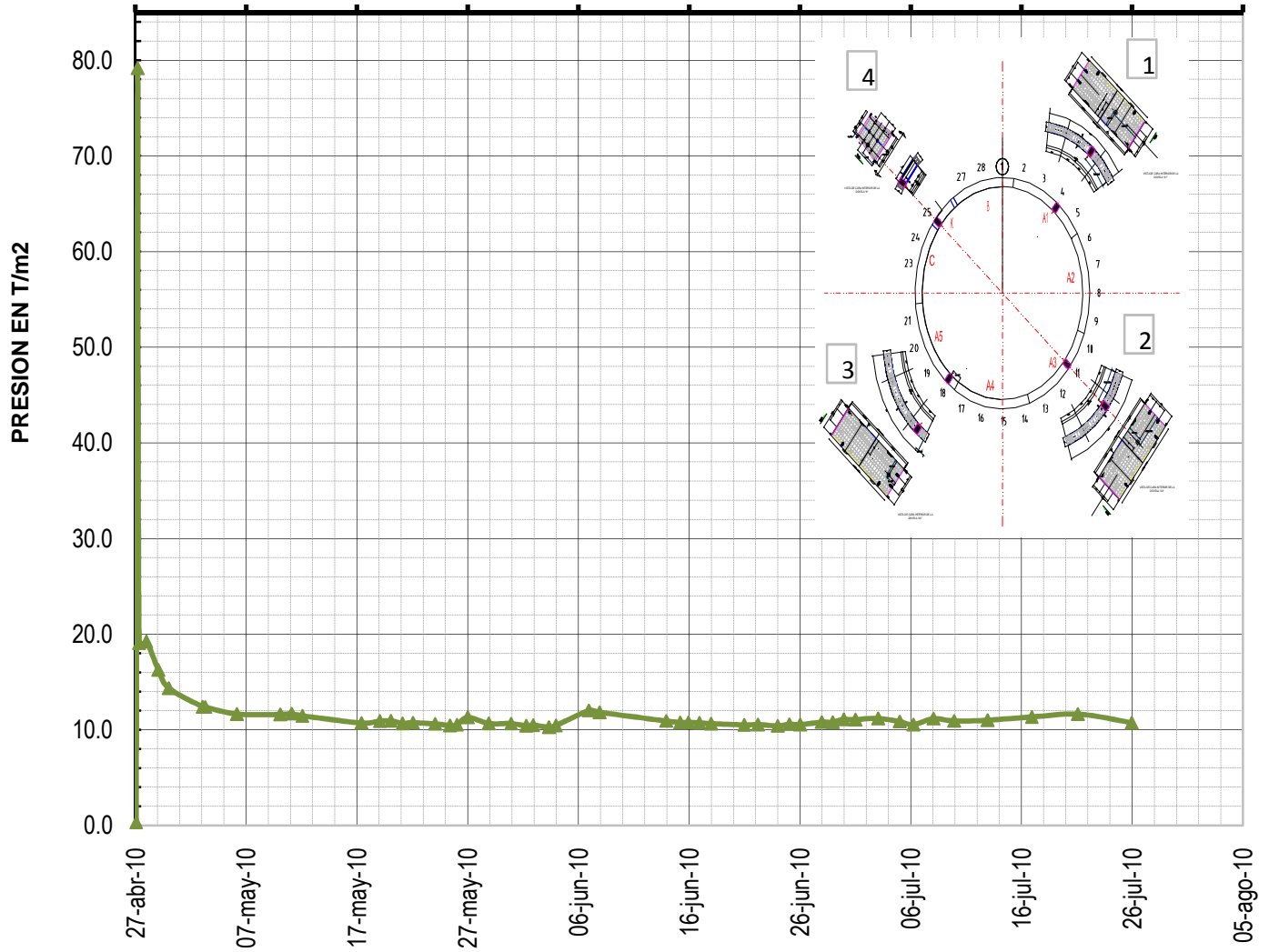
Imagen 1 Datos procesados para obtener presiones.

PRESION CONTRA TIEMPO



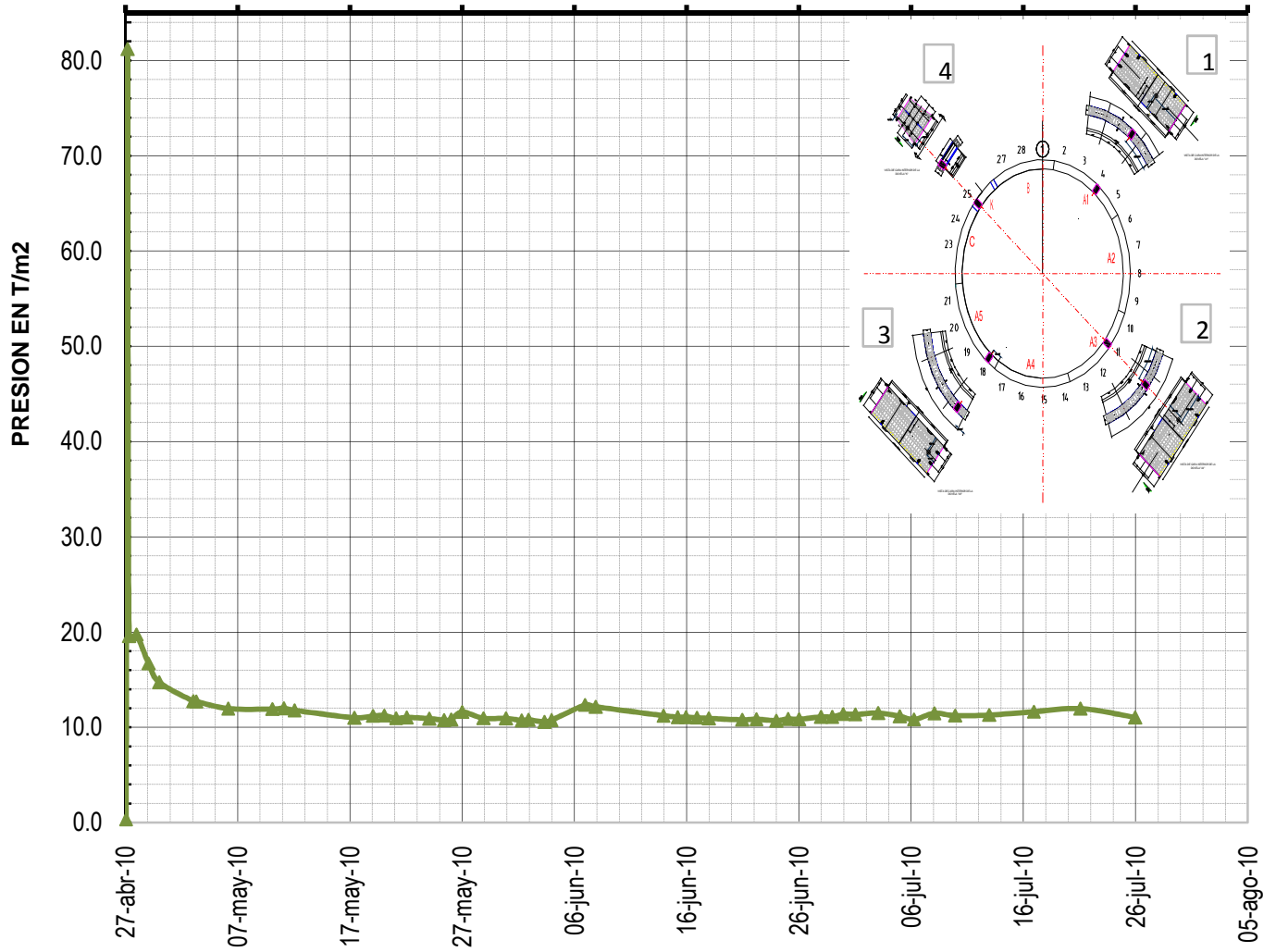
Gráfica 1 Anillo 188, dovela A-1

PRESION CONTRA TIEMPO



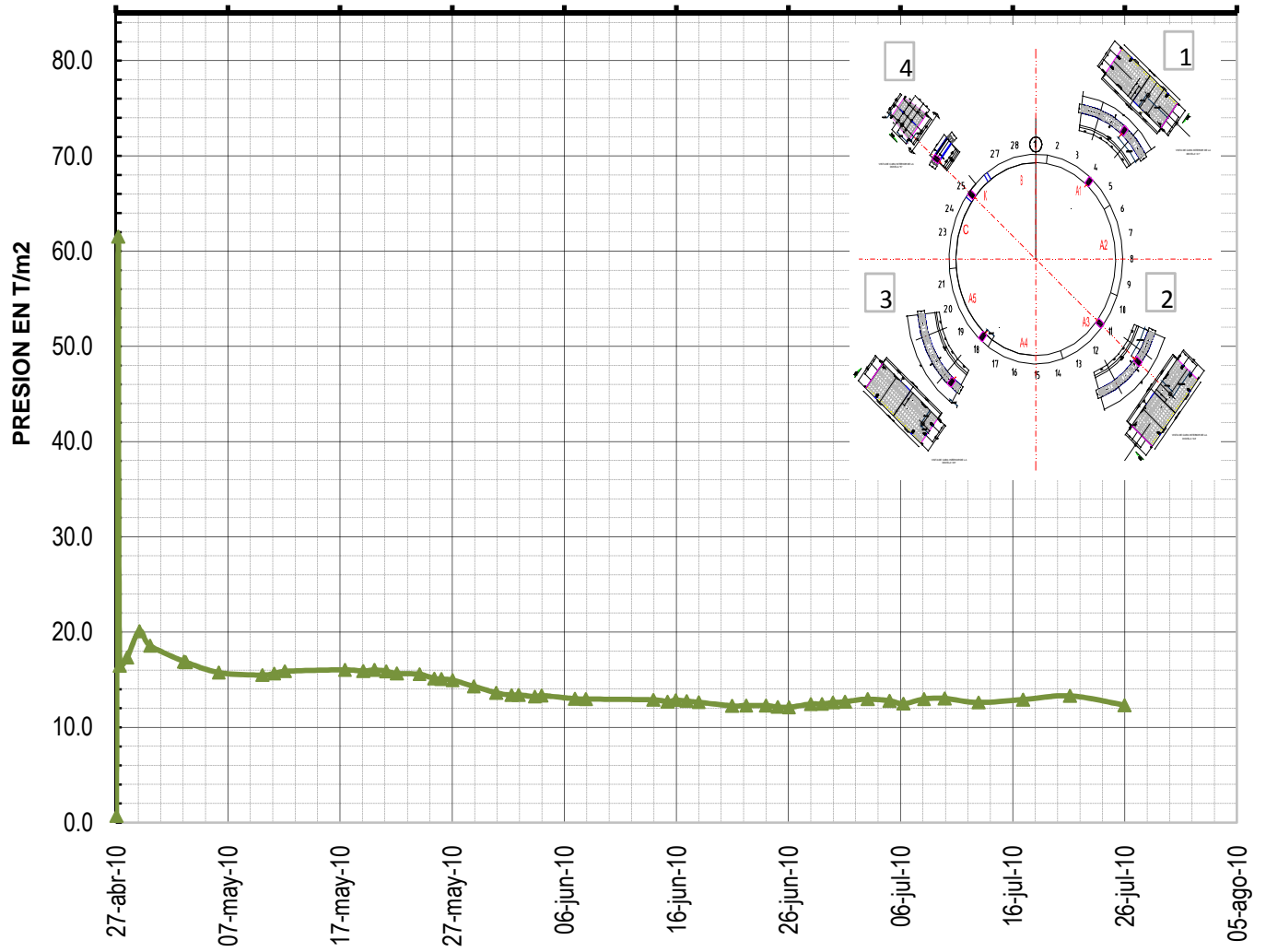
Gráfica 2 Anillo 188, dovela A-3

PRESION CONTRA TIEMPO



Gráfica 3 Anillo 188, dovela A-5

PRESION CONTRA TIEMPO



Gráfica 4 Anillo 188, dovela K

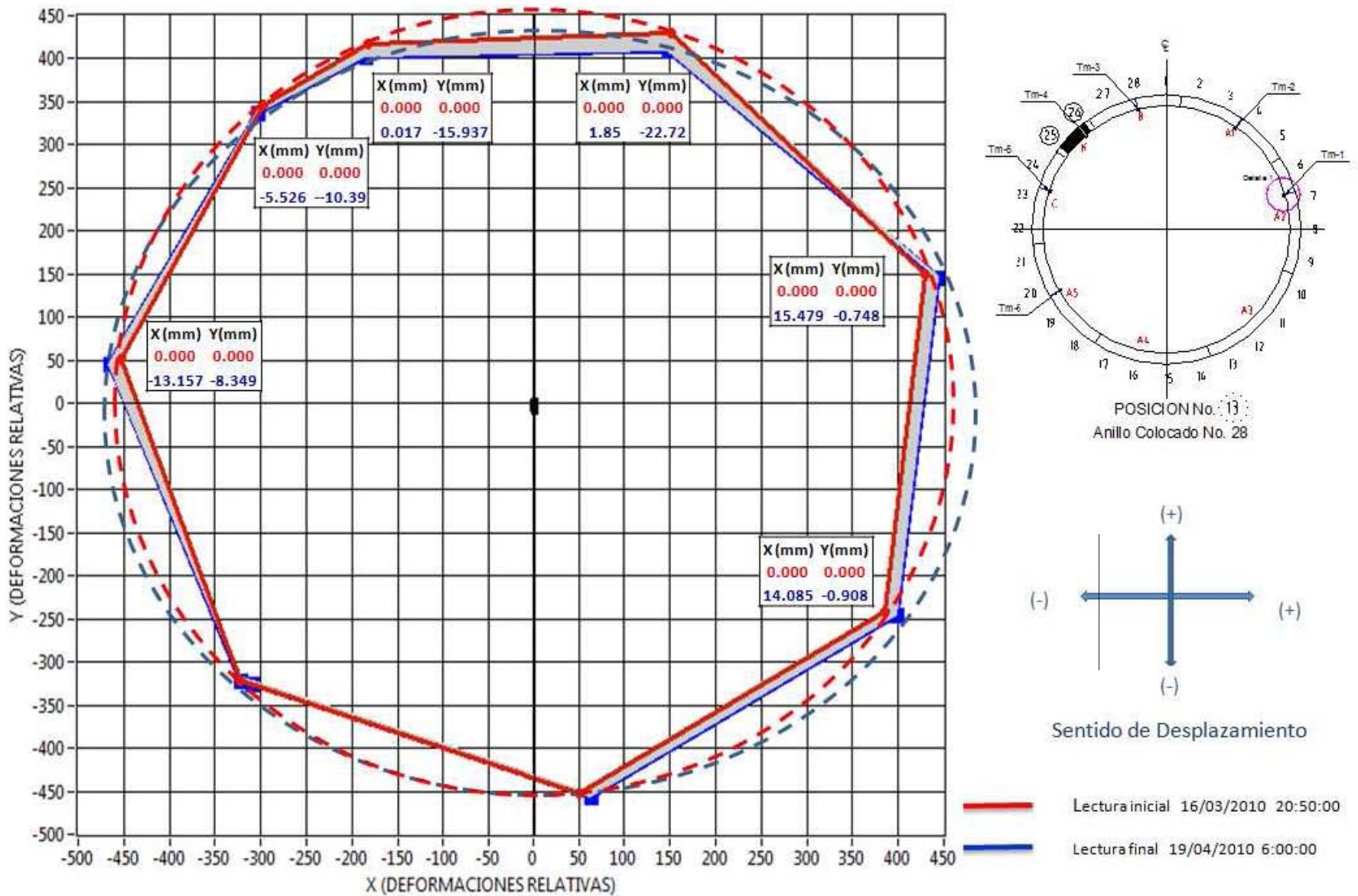
II.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado

En ciertos sectores con una especial importancia se requieren las medidas de las deformaciones generadas en el túnel excavado con escudo. Las convergencias y divergencias se miden generalmente a través de levantamientos topográficos a todo lo largo del túnel excepto en la zona de carros o pórticos, esto debido a que los equipos que transporta el tren y los propios carros dificultan la visualización para la toma de lecturas topográficas, es por esto que se propuso como solución alternativa, el monitoreo automatizado de anillos instrumentados en diversas zonas del túnel.

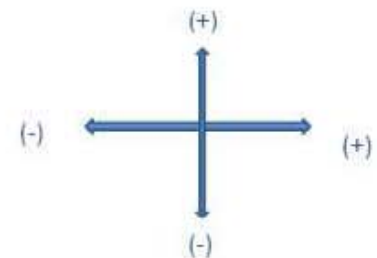
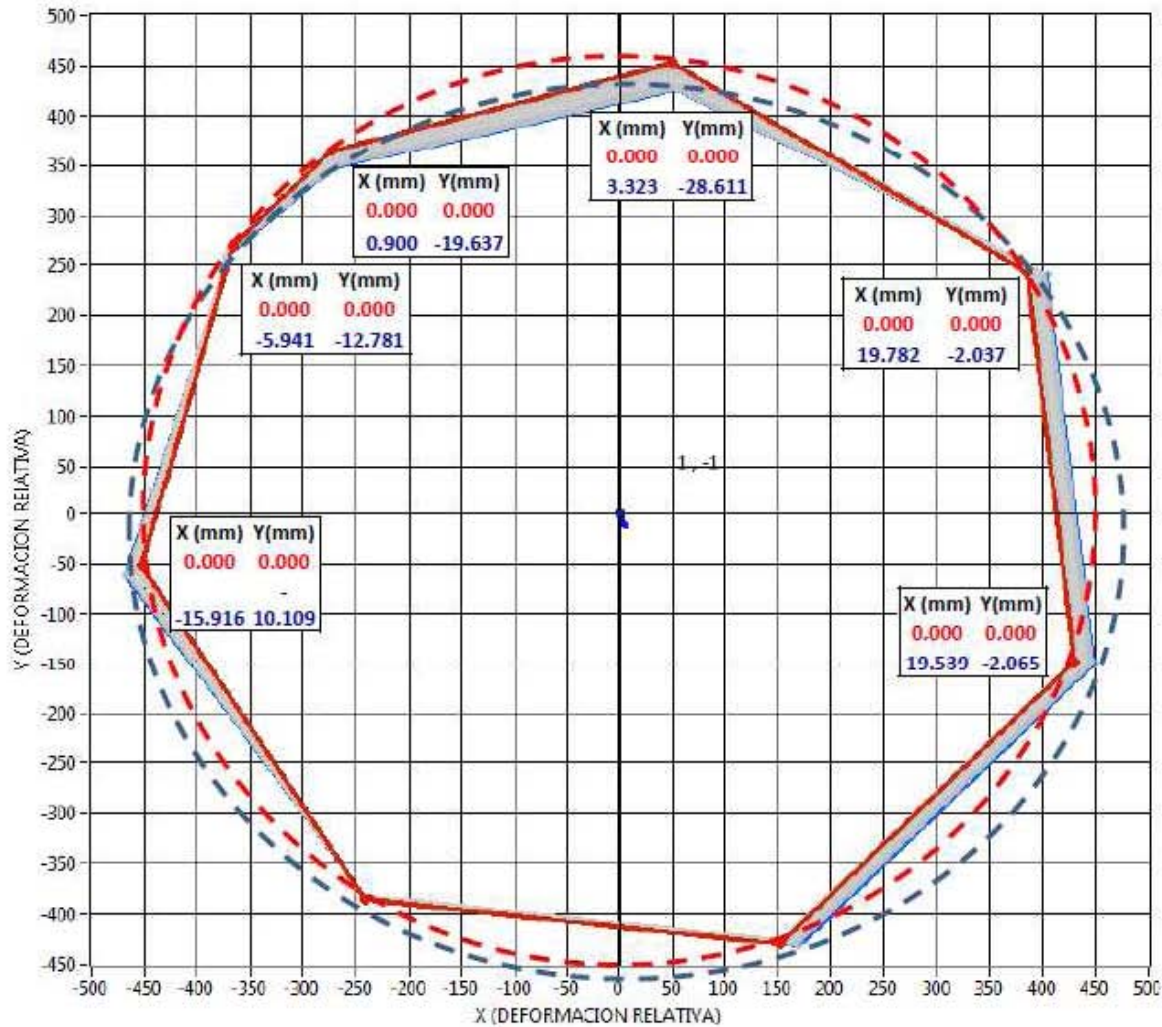
Los anillos instrumentados corresponden al número 28 y 103, ambos pertenecientes al tramo de la lumbrera de entrada y la estación Mexicaltzingo. En las gráficas que se presentan de las convergencias y divergencias automatizadas, se muestra la deformación relativa máxima que registra el deformímetro (Tilt meter) instalado en la dovela. De color rojo se puede observar la lectura inicial, mientras que de color azul podemos ver la última lectura correspondiente a la fecha de monitoreo.

Se eligió un sistema de referencia cartesiano conveniente para determinar los desplazamientos positivos y negativos que se registran. También se muestra en la gráfica un esquema de la configuración del anillo, y se observan además, los 6 tilt meter instalados en las dovelas. En el caso del sistema de convergencias no se pudo tener una vista previa de la programación utilizada para la obtención de las gráficas, la razón es que a diferencia de los demás dispositivos que se pueden graficar utilizando el Excel, para el sistema de convergencias automatizado se utiliza un software especializado llamado Logger Net, para esta tesis solo fueron proporcionadas las gráficas generadas por el sistema de convergencias. Para mayor información acerca del Logger Net se podrán consultar las referencias proporcionadas.

Las periodicidad del monitoreo de los anillos instrumentados fue de tres veces a la semana, sin embargo, aquí se presentarán dos fechas de monitoreo para cada anillo; el análisis y conclusiones pertinentes se harán en capítulos posteriores.



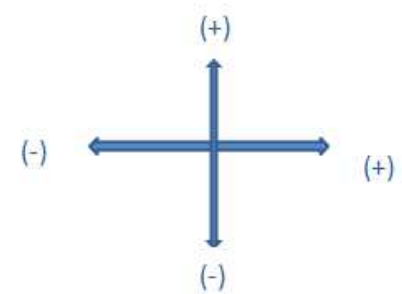
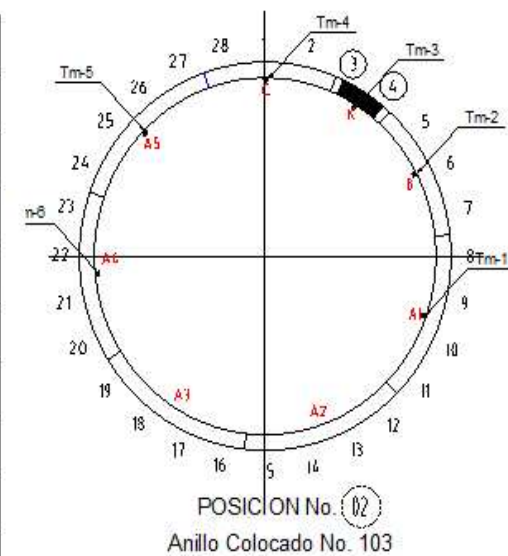
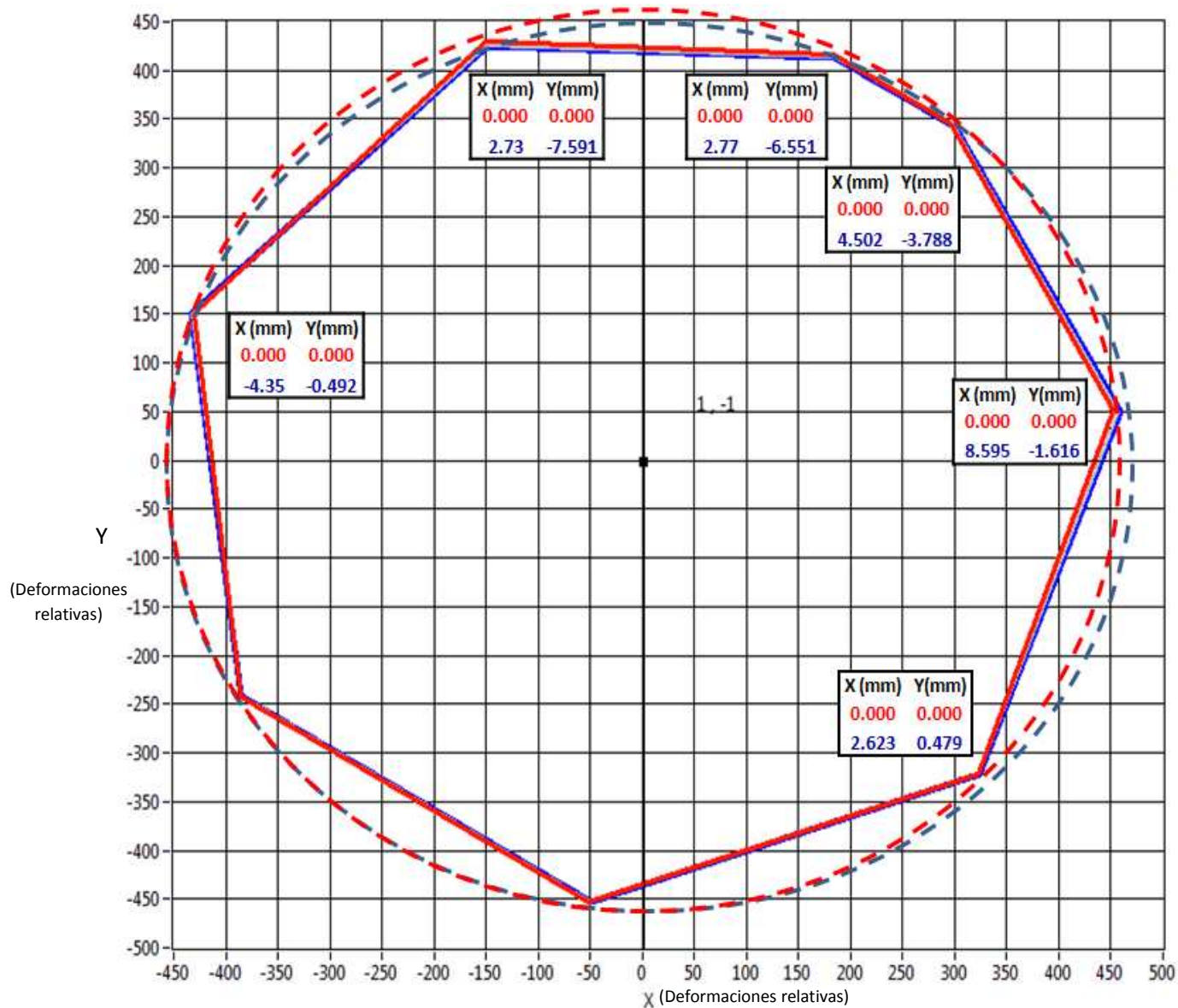
Gráfica 5 Anillo 28 correspondiente al 19 de abril de 2010



Sentido de Desplazamiento

- Lectura inicial 16/03/2010 20:50:00
- Lectura final 27/05/2010 06:00:00

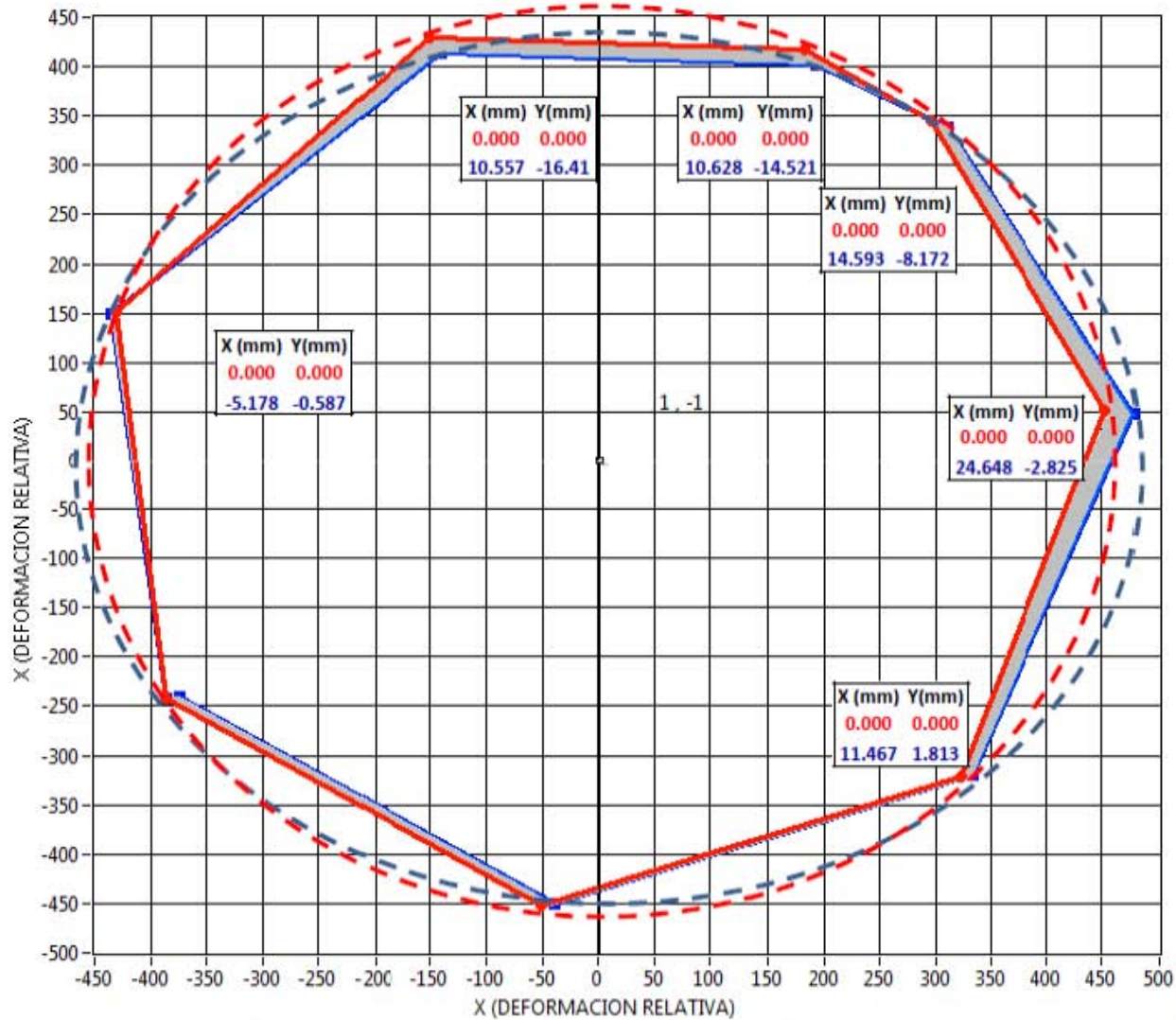
Gráfica 6 Anillo 28 correspondiente al 27 de mayo de 2010



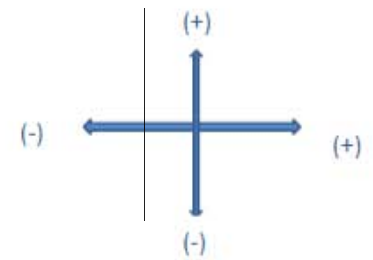
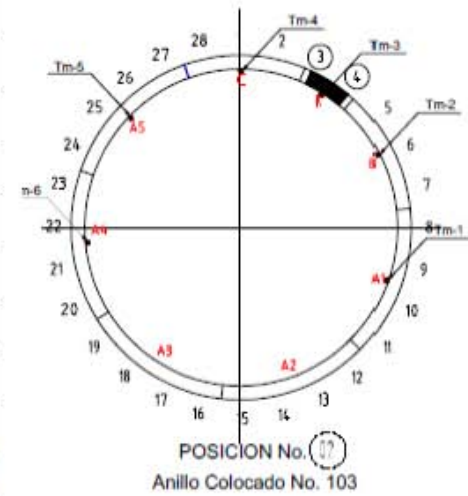
Sentido de Desplazamiento

- Lectura inicial 13/04/2010 19:32
- Lectura final 19/04/2010 11:45:00

Gráfica 7 Anillo 103 correspondiente al 19 de abril de 2010



La última lectura del sistema de convergencias se realizó el día 4 de Junio de 2010 ya que en esta fecha se quitó el sistema para colocarlo posteriormente en el siguiente punto.



Sentido de Desplazamiento

- Lectura inicial 13/04/2010 19:32
- Lectura final 04/06/2010 6:00:00

Gráfica 8 Anillo 103 correspondiente al 4 de junio de 2010

II.4 Extensómetro Magnético con tubería para inclinómetro

Se presenta en primer lugar las gráficas correspondientes al extensómetro magnético, como ya se mencionó, este dispositivo registra movimientos verticales a diferentes profundidades de un mismo barreno, por tanto, se muestran las seis gráficas que componen el monitoreo llevado a cabo para este dispositivo, en el eje de las abscisas se observan los asentamientos registrados en milímetros y en el eje de las ordenadas se muestran las fechas de la lectura correspondiente, también se puede observar la hoja de cálculo utilizada para el procesamiento de la información generada.

En segundo lugar, se presenta las gráficas del inclinómetro, este dispositivo mide los desplazamientos horizontales a diferentes profundidades de un mismo barreno, este inclinómetro se compone de una tubería ranurada y a su vez esta tubería sirve para adosar el extensómetro magnético. Se puede ver que en el eje de las ordenadas están las profundidades a las que se está monitoreando la deformación generada por el paso de la tuneladora, mientras que en las abscisas se muestra el desplazamiento medido en milímetros.

El sistema de monitoreo varió dependiendo el avance del escudo, siendo de dos veces a la semana 100 metros antes y 100 metros después del paso del escudo por donde se localizó el extensómetro con tubería para inclinómetro, mientras que el monitoreo fue casi todos los días mientras el escudo se encontraba en los 200 metros más próximos al dispositivo de medición ya mencionado. También se puede observar la hoja de cálculo utilizada para el procesamiento de la información generada.

La forma de tomar las lecturas del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro es con la ayuda de una sonda magnética especial para este tipo de monitoreo, así como de una PC de campo de la marca RST Instrument (Field PC). Para más detalles acerca de del tipo de sonda y de la PC de campo consulte las referencias dadas al final de esta tesis.

LECTURAS SONDA MAGNETICA							
Lecturas en m	NUMERO DE ARAÑA						
FECHA	1	2	3	4	5	6	ANILLO DE REFERENCIA
27/02/2010	5.796	9.441	14.115	19.926	24.434	26.911	31.813
01/03/2010	5.797	9.442	14.115	19.927	24.435	26.911	31.812
03/03/2010	5.798	9.442	14.114	19.927	24.435	26.909	31.812
08/03/2010	5.798	9.442	14.115	19.929	24.431	26.908	31.813
10/03/2010	5.797	9.442	14.115	19.929	24.434	26.913	31.813
13/03/2010	5.796	9.440	14.114	19.928	24.436	26.912	31.812
17/03/2010	5.796	9.443	14.114	19.927	24.435	26.910	31.808
19/03/2010	5.795	9.442	14.113	19.927	24.436	26.910	31.807
22/03/2010	5.796	9.442	14.115	19.926	24.436	26.911	31.807
25/03/2010	5.794	9.442	14.113	19.926	24.435	26.911	31.807
27/03/2010	5.795	9.441	14.114	19.924	24.435	26.912	31.807
29/03/2010	5.796	9.442	14.114	19.926	24.435	26.910	31.806
31/03/2010	5.796	9.442	14.114	19.927	24.436	26.908	31.807
05/04/2010	5.796	9.443	14.114	19.927	24.435	26.910	31.807
07/04/2010	5.797	9.443	14.114	19.927	24.435	26.910	31.809
10/04/2010	5.796	9.443	14.115	19.927	24.435	26.913	31.809
13/04/2010	5.796	9.443	14.115	19.927	24.436	26.913	31.808
15/04/2010	5.796	9.443	14.114	19.926	24.436	26.913	31.806
17/04/2010	5.795	9.443	14.114	19.926	24.436	26.912	31.806
19/04/2010	5.795	9.442	14.115	19.925	24.435	26.912	31.812
21/04/2010	5.795	9.443	14.115	19.926	24.435	26.913	31.812
23/04/2010	5.796	9.443	14.114	19.926	24.436	26.913	31.809
28/04/2010	5.794	9.446	14.131	19.949	24.460	26.938	31.830
29/04/2010	5.795	9.435	14.127	19.944	24.455	26.935	31.822
30/04/2010	5.793	9.440	14.125	19.942	24.456	26.932	31.819
01/05/2010	5.792	9.442	14.123	19.939	24.449	26.930	31.817
03/05/2010	5.792	9.442	14.121	19.937	24.446	26.928	31.815
06/05/2010	5.793	9.441	14.120	19.934	24.443	26.925	31.813
08/05/2010	5.793	9.441	14.118	19.932	24.442	26.923	31.811
10/05/2010	5.791	9.441	14.118	19.932	24.442	26.921	31.810
12/05/2010	5.790	9.440	14.116	19.933	24.440	26.917	31.815
18/05/2010	5.792	9.439	14.115	19.928	24.438	26.915	31.808
20/05/2010	5.791	9.440	14.115	19.929	24.437	26.913	31.806

Imagen 2 Datos capturados de los registros de campo.

La ecuación programada en la hoja de cálculo es:

$$DV = ABS([(LiAR - LiAraña) - (LAR - LAraña)] + [(LAraña - LiAraña) - (LAR - LiAR)]) * 1000$$

Donde:

DV= Desplazamiento Vertical Medido en milímetros

LiAR= Lectura inicial de anillo de referencia

LiAraña= Lectura inicial de araña magnética

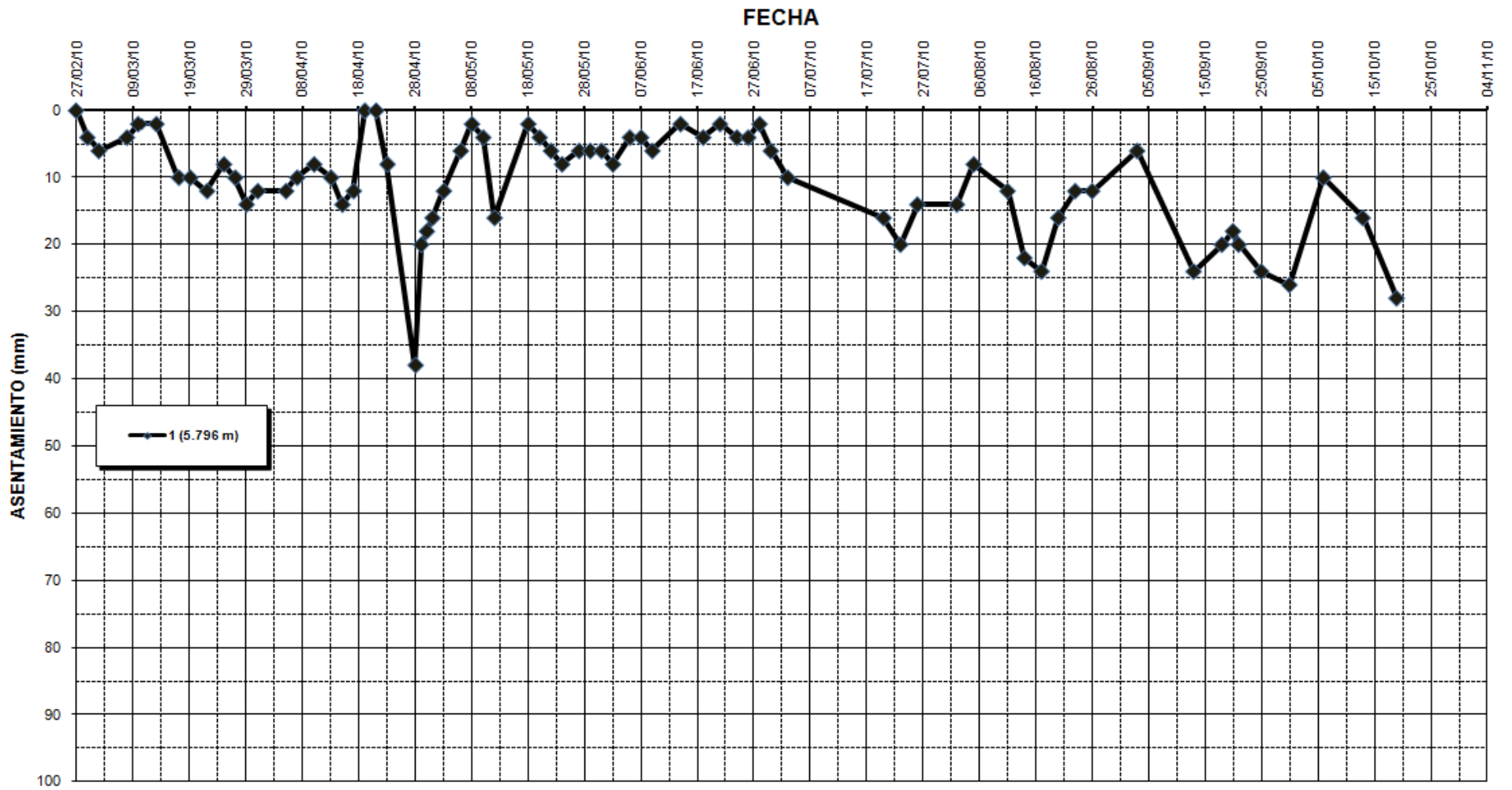
LAR= Lectura de anillo de referencia

Laraña= Lectura de araña magnética

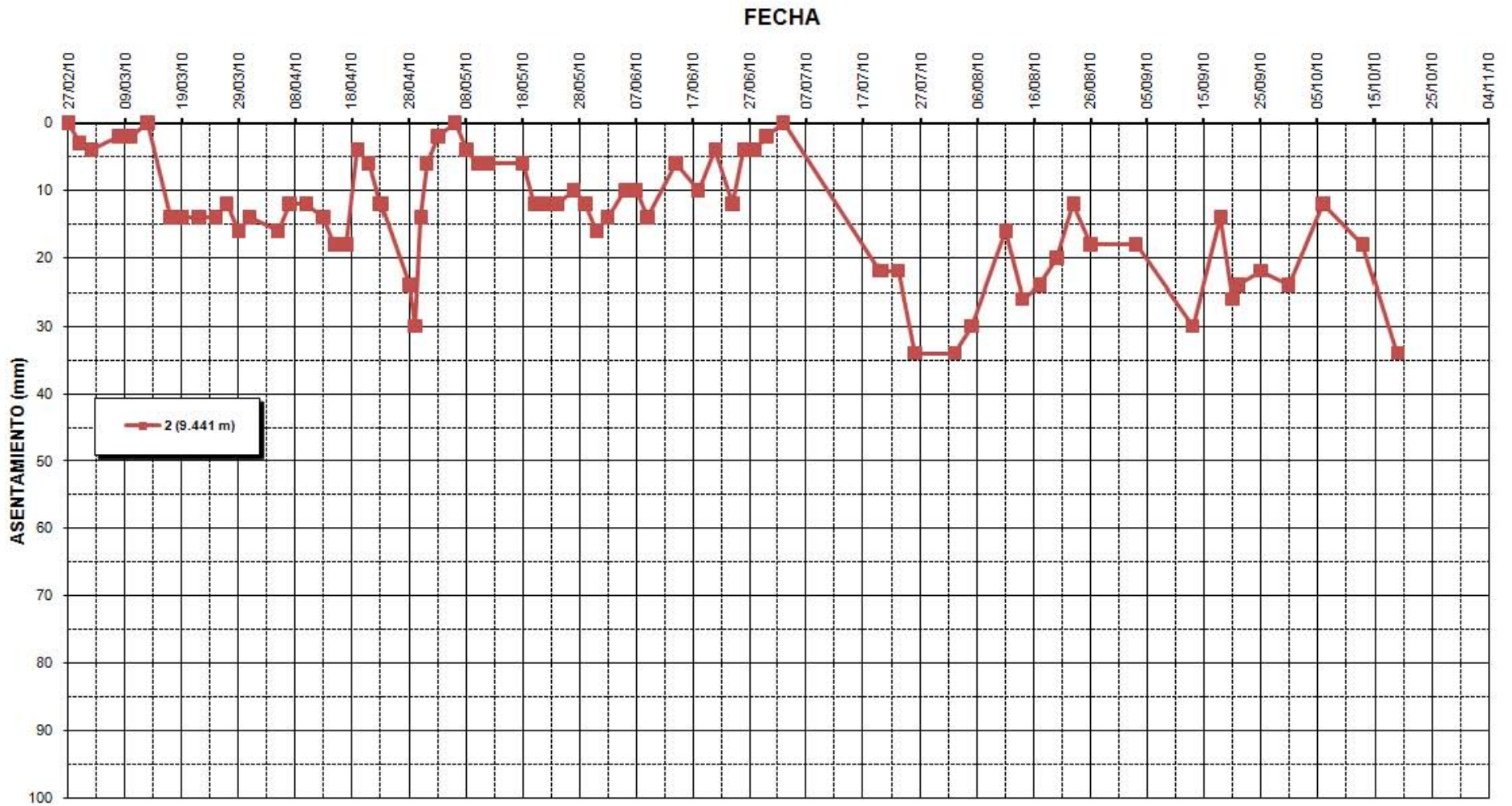
ABS= Valor absoluto

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	2.000	4.000	4.000	2.000	0.000
03/03/2010	6.000	4.000	0.000	4.000	4.000	2.000	0.000
08/03/2010	4.000	2.000	0.000	6.000	6.000	6.000	0.000
10/03/2010	2.000	2.000	0.000	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	8.000	12.000	12.000	8.000	0.000
19/03/2010	10.000	14.000	8.000	14.000	16.000	10.000	0.000
22/03/2010	12.000	14.000	12.000	12.000	16.000	12.000	0.000
25/03/2010	8.000	14.000	8.000	12.000	14.000	12.000	0.000
27/03/2010	10.000	12.000	10.000	8.000	14.000	14.000	0.000
29/03/2010	14.000	16.000	12.000	14.000	16.000	12.000	0.000
31/03/2010	12.000	14.000	10.000	14.000	16.000	6.000	0.000
05/04/2010	12.000	16.000	10.000	14.000	14.000	10.000	0.000
07/04/2010	10.000	12.000	6.000	10.000	10.000	6.000	0.000
10/04/2010	8.000	12.000	8.000	10.000	10.000	12.000	0.000
13/04/2010	10.000	14.000	10.000	12.000	14.000	14.000	0.000
15/04/2010	14.000	18.000	12.000	14.000	18.000	18.000	0.000
17/04/2010	12.000	18.000	12.000	14.000	18.000	16.000	0.000
19/04/2010	0.000	4.000	2.000	0.000	4.000	4.000	0.000
21/04/2010	0.000	6.000	2.000	2.000	4.000	6.000	0.000
23/04/2010	8.000	12.000	6.000	8.000	12.000	12.000	0.000
28/04/2010	38.000	24.000	2.000	12.000	18.000	20.000	0.000
29/04/2010	20.000	30.000	6.000	18.000	24.000	30.000	0.000
30/04/2010	18.000	14.000	8.000	20.000	32.000	30.000	0.000
01/05/2010	16.000	6.000	8.000	18.000	22.000	30.000	0.000
03/05/2010	12.000	2.000	8.000	18.000	20.000	30.000	0.000
06/05/2010	6.000	0.000	10.000	16.000	18.000	28.000	0.000
08/05/2010	2.000	4.000	10.000	16.000	20.000	28.000	0.000
10/05/2010	4.000	6.000	12.000	18.000	22.000	26.000	0.000
12/05/2010	16.000	6.000	2.000	10.000	8.000	8.000	0.000
18/05/2010	2.000	6.000	10.000	14.000	18.000	18.000	0.000
20/05/2010	4.000	12.000	14.000	20.000	20.000	18.000	0.000

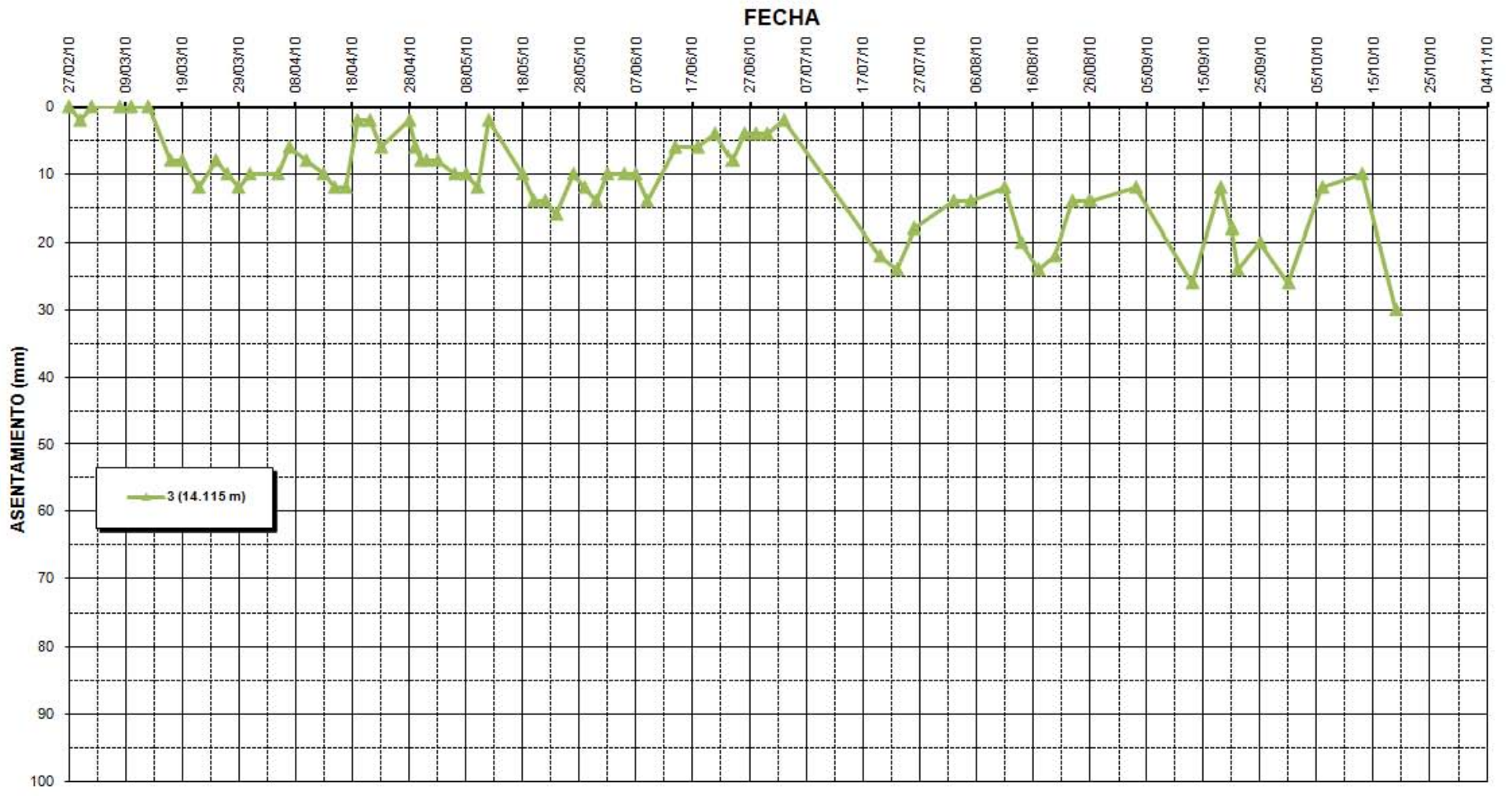
Imagen 3 Datos procesados para determinar movimientos verticales.



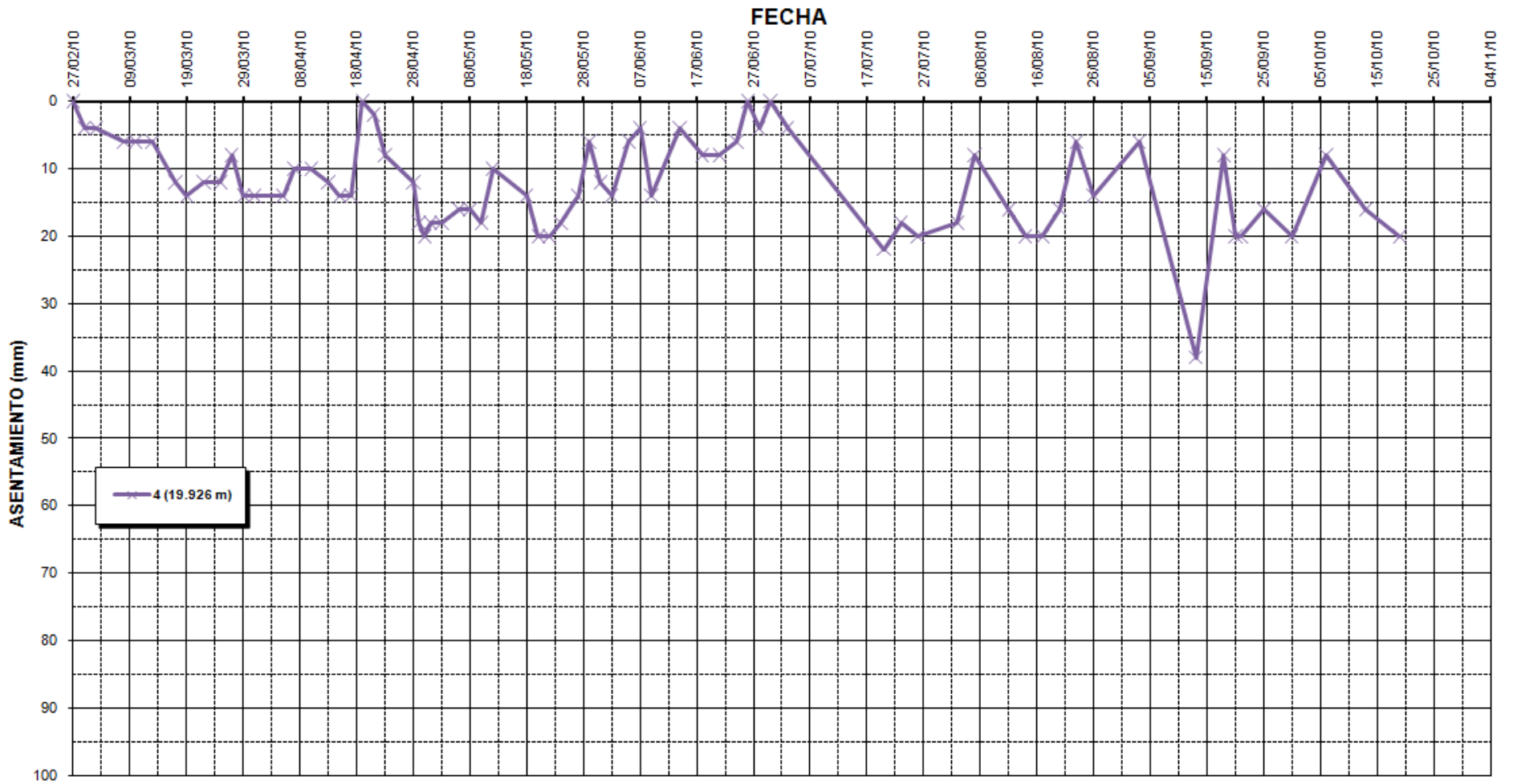
Gráfica 9 Comportamiento de araña magnética 1



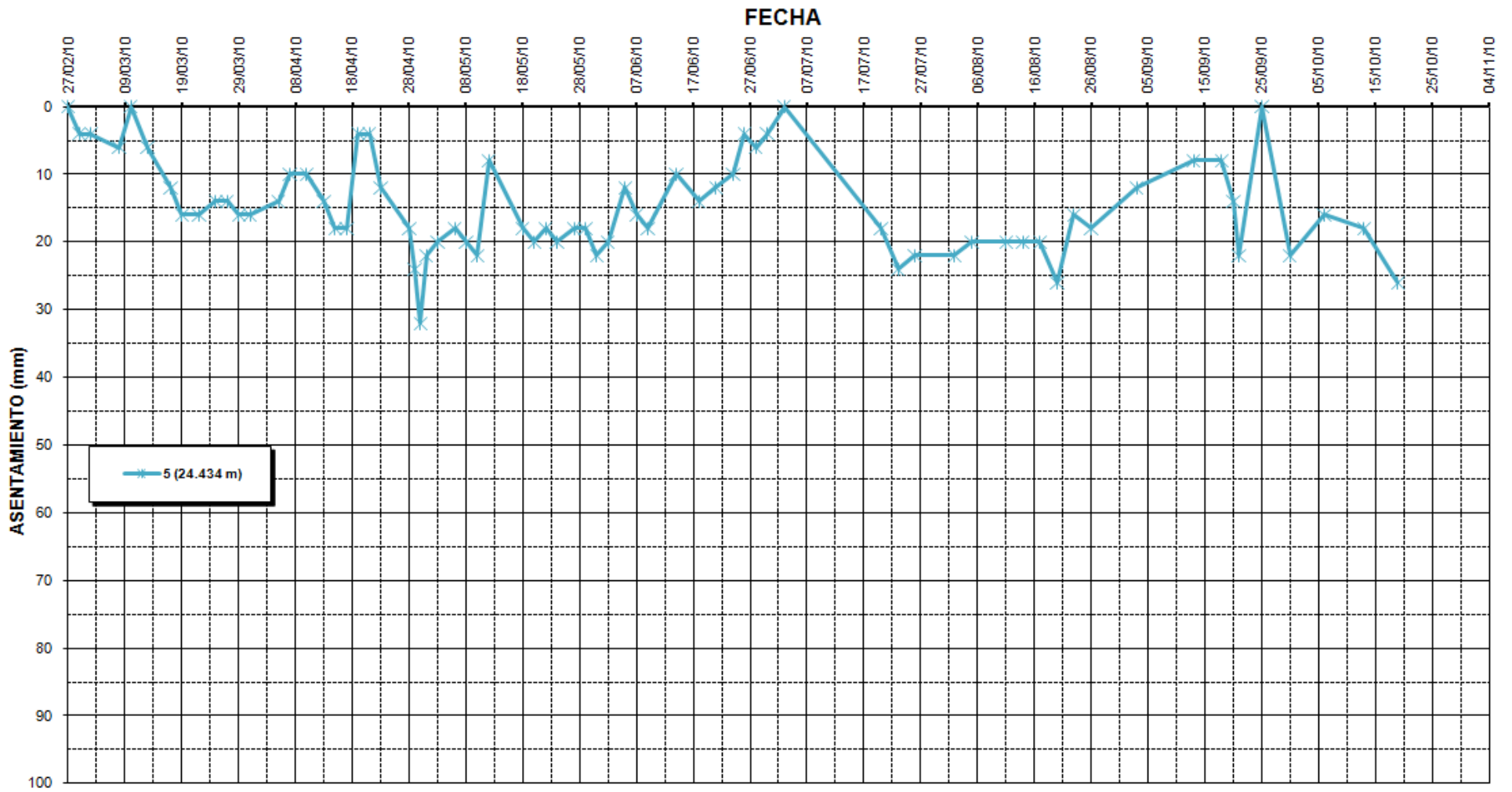
Gráfica 10 Comportamiento de araña magnética 2



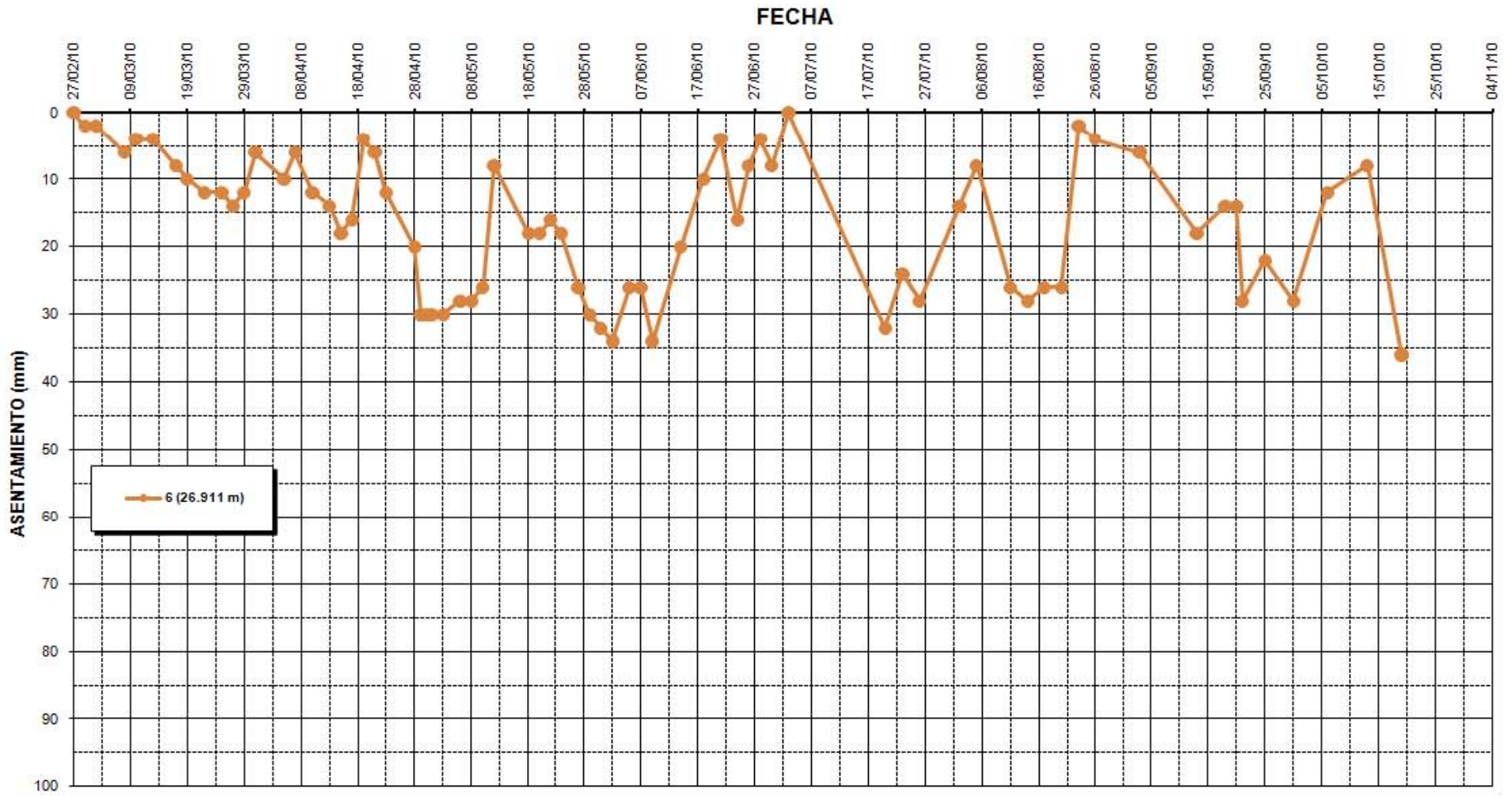
Gráfica 11 Comportamiento de araña magnética 3



Gráfica 12 Comportamiento de araña magnética 4



Gráfica 13 Comportamiento de araña magnética 5



Gráfica 14 Comportamiento de araña magnética 6

La siguiente imagen fue tomada de las hojas de cálculo elaboradas para el procesamiento de los datos obtenidos en campo con la ayuda de la unidad de lectura.

La ecuación programada en la hoja de cálculo es:

$$DAC = [(Lact - Linic) * 0.5] * Cos \alpha$$

Donde:

DAC= Deflexión acumulada corregida

Lact= Lectura actual

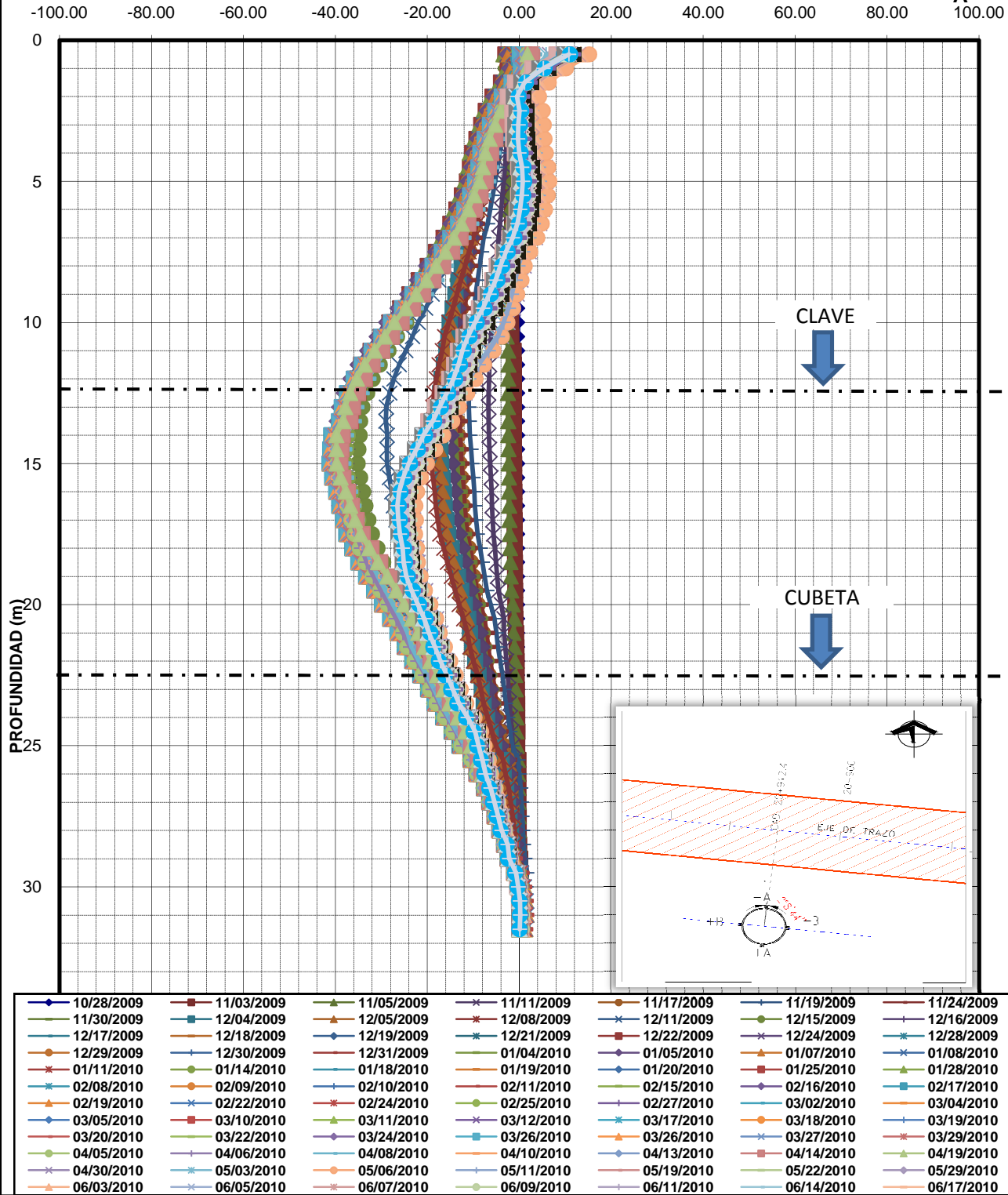
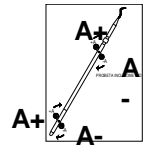
Linic= Lectura inicial

Cos α = Ángulo de corrección

DIFERENCIAS EN LA LECTURA ACTUAL		EJE A					EJE B		
(A+) - (A-)	(B+) - (B-)	Corr. (EJE A)	Corr. (EJE B)	DEFLEXION i	DEFLEXION ACUM.	DEFLEXION ACUM. CORREGIDA	DEFLEXION i	DEFLEXION ACUM.	DEFLEXION ACUM. CORREGIDA
21.88378	-8.55924	0.25383	-0.37898	0.1269	0.1269	0.0906	-0.1895	-0.1895	-0.2093
16.05369	-4.14905	0.05453	-0.31682	0.0273	0.1542	0.0888	-0.1584	-0.3479	-0.3700
10.73856	-1.25138	0.05117	-0.16532	0.0256	0.1798	0.0991	-0.0827	-0.4306	-0.4559
6.87531	0.33619	0.1447	0.01454	0.0723	0.2521	0.1716	0.0073	-0.4233	-0.4618
2.10768	-0.8636	0.36743	0.00449	0.1837	0.4358	0.3527	0.0022	-0.4210	-0.4928
7.25383	-3.82763	-0.31713	-0.24236	-0.1586	0.2773	0.1748	-0.1212	-0.5422	-0.5834
12.14316	2.5776	0.30202	-0.59611	0.1510	0.4283	0.2696	-0.2981	-0.8403	-0.9038
13.91944	3.30299	0.06099	-0.09538	0.0305	0.4588	0.2909	-0.0477	-0.8880	-0.9562
13.32366	3.18379	-0.18424	-0.09561	-0.0921	0.3667	0.1917	-0.0478	-0.9358	-0.9866
14.92265	3.67178	0.14007	-0.26652	0.0700	0.4367	0.2365	-0.1333	-1.0690	-1.1303
14.87253	4.89026	0.0282	-0.02856	0.0141	0.4508	0.2478	-0.0143	-1.0833	-1.1469
13.63201	3.33916	0.04646	-0.02147	0.0232	0.4740	0.2687	-0.0107	-1.0941	-1.1616
14.48837	1.35221	0.21529	-0.13805	0.1076	0.5817	0.3621	-0.0690	-1.1631	-1.2490
12.53674	10.66969	0.1513	-0.13054	0.0757	0.6573	0.4248	-0.0653	-1.2283	-1.3268
10.17294	16.11096	0.80664	0.06398	0.4033	1.0606	0.8272	0.0320	-1.1964	-1.3682
10.14919	15.07342	0.69009	0.1977	0.3450	1.4057	1.1845	0.0988	-1.0975	-1.3332
9.5565	11.79683	-0.03363	0.14567	-0.0168	1.3889	1.1811	0.0728	-1.0247	-1.2586
10.00279	9.12394	0.68754	-0.029	0.3438	1.7326	1.5166	-0.0145	-1.0392	-1.3349
10.65149	7.58604	0.93819	-0.08138	0.4691	2.2017	1.9706	-0.0407	-1.0799	-1.4596
10.52712	6.31178	0.59226	-0.0122	0.2961	2.4979	2.2608	-0.0061	-1.0860	-1.5190
10.17565	2.72964	0.92538	-0.04653	0.4627	2.9605	2.7117	-0.0233	-1.1092	-1.6254
10.32685	-0.23244	0.24056	0.05094	0.1203	3.0808	2.8346	0.0255	-1.0838	-1.6221
12.85893	0.32205	1.13336	0.11699	0.5667	3.6475	3.4025	0.0585	-1.0253	-1.6669
14.12292	3.44865	1.86866	0.70198	0.9343	4.5818	4.3848	0.3510	-0.6743	-1.4903

Imagen 4 Datos procesados para determinar desplazamientos horizontales.

LINEA 12 DEL METRO
 REPORTE DE LECTURAS DE INCLINÓMETRO
 TRAMO LUMBRERA - MEXICALTZINGO
 EJE A-A
 DEFLEXIONES CORREGIDAS (mm)



Gráfica 15 Inclinómetro

II.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo

Por medio de levantamientos topográficos se obtienen los registros de los movimientos verticales en superficie sobre el eje del trazo, estos levantamientos están en función del avance del escudo y por tanto la variación de los registros está directamente relacionada con el progreso en la excavación del túnel. En la gráfica se podrá observar el cadenamiento correspondiente en donde se realizan los levantamientos (eje de las abscisas), mientras que en las ordenadas se observan los desplazamientos en milímetros.

Se puede observar que el comportamiento de la gráfica puede verse alterado por las maniobras en superficie, esto debido a factores diversos tales como traslado de maquinaria y/o equipo especializado de construcción pesada, almacenaje de material o montaje de alguna estructura propia de la obra de la línea 12, sin embargo, en dicha gráfica se hacen las anotaciones pertinentes para aclarar algún comportamiento peculiar y poder así lograr un monitoreo eficiente.

La nivelación de las referencias superficiales se hace periódicamente con referencia a bancos de nivel profundos y semi profundos distribuidos a lo largo del trazo de la línea 12, pero estas nivelaciones no se muestran en la gráfica ya que el propósito de las referencias superficiales es mostrar puntualmente lo que sucede solo en el eje de trazo y no se considera el hundimiento local y regional dado por los bancos de nivel profundos y semi profundos.

Por último, la gráfica de las referencias superficiales sobre el eje de trazo se presenta en un principio tal y como aparece en la página del departamento de instrumentación del consorcio de la línea 12, sin embargo, para poder visualizarla mejor dicha gráfica la he dividido en dos partes para que esta pueda ser apreciada y observada con mayor detalle.

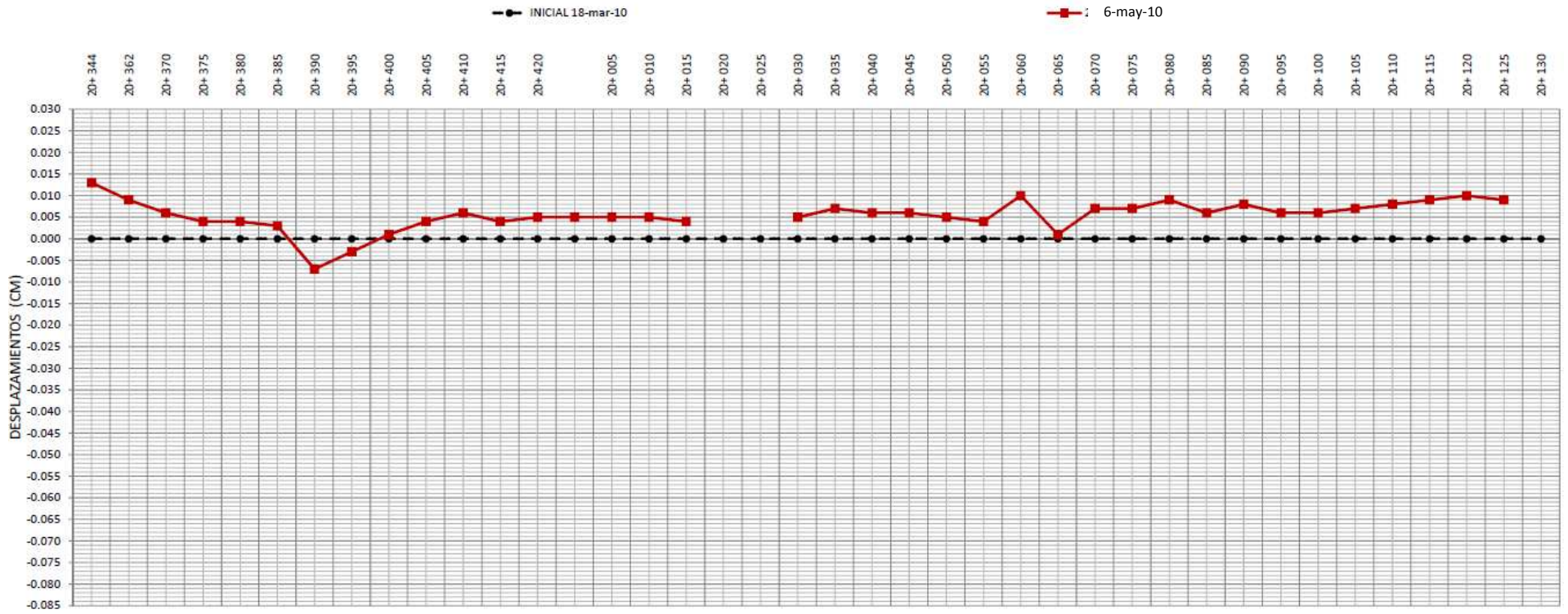
La ecuación programada en la hoja de cálculo es:

$$\text{Desplazamiento} = (\text{Lectura CERO}) - (\text{Lectura Subsecuente})$$

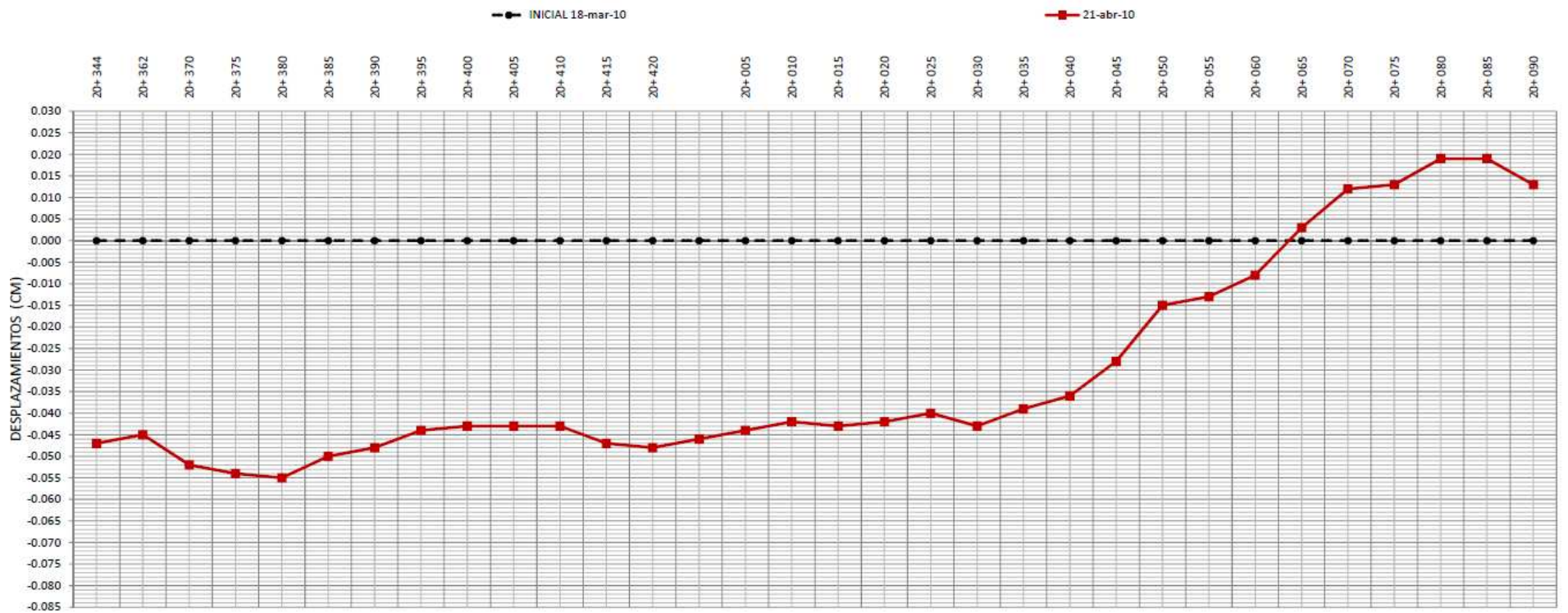
El desplazamiento obtenido está en milímetros.

TOPOGRAFIA													
fecha / km	20+ 344.48	20+ 361.65	20+ 370.00	20+ 375.00	20+ 380.00	20+ 385.00	20+ 390.00	20+ 395.00	20+ 400.00	20+ 405.00	20+ 410.00	20+ 415.00	20+ 420.00
INICIAL 18-mar-10	2234.328	2234.328	2234.257	2234.215	2234.161	2234.236	2234.343	2234.437	2234.443	2234.519	2234.612	2234.692	2234.749
Lectura CERO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18-mar-10	2234.328	2234.328	2234.257	2234.215	2234.161	2234.236	2234.343	2234.437	2234.443	2234.519	2234.612	2234.692	2234.749
19-mar-10	2234.328	2234.328	2234.257	2234.215	2234.160	2234.235	2234.342	2234.435	2234.439	2234.514	2234.608	2234.688	2234.744
Desplazamiento	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.004	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005
19-mar-10	2234.328	2234.328	2234.257	2234.215	2234.160	2234.235	2234.342	2234.435	2234.439	2234.514	2234.608	2234.688	2234.744
Desplazamiento	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.004	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005
20-mar-10	2234.327	2234.327	2234.256	2234.210	2234.162	2234.233	2234.340	2234.432	2234.427	2234.510	2234.595	2234.684	2234.742
Desplazamiento	-0.001	-0.001	-0.001	-0.005	0.001	-0.003	-0.003	-0.005	-0.016	-0.009	-0.017	-0.008	-0.007
20-mar-10	2234.326	2234.326	2234.254	2234.210	2234.159	2234.231	2234.339	2234.432	2234.426	2234.508	2234.588	2234.679	2234.735
Desplazamiento	-0.002	-0.002	-0.003	-0.005	-0.002	-0.005	-0.004	-0.005	-0.017	-0.011	-0.024	-0.013	-0.014
21-mar-10	2234.326	2234.326	2234.255	2234.208	2234.157	2234.225	2234.337	S/L	2234.426	S/L	2234.580	2234.658	2234.726
Desplazamiento	-0.002	-0.002	-0.002	-0.007	-0.004	-0.011	-0.006		-0.017		-0.032	-0.034	-0.023
22-mar-10	2234.327	2234.325	2234.254	2234.212	2234.157	2234.232	2234.337	2234.429	2234.433	2234.511	2234.584	2234.654	2234.702
Desplazamiento	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.004	-0.004	-0.006	-0.008	-0.010	-0.008	-0.028	-0.038	-0.047
23-mar-10	2234.330	2234.330	2234.258	2234.217	2234.162	2234.237	2234.343	2234.436	2234.440	2234.507	2234.584	2234.650	2234.704
Desplazamiento	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.003	-0.012	-0.028	-0.042	-0.045
23-mar-10	2234.327	2234.326	2234.254	2234.212	2234.156	2234.232	2234.337	2234.428	2234.433	2234.498	2234.574	2234.640	2234.693
Desplazamiento	-0.001	-0.002	-0.003	-0.003	-0.005	-0.004	-0.006	-0.009	-0.010	-0.021	-0.038	-0.052	-0.056
24-mar-10	2234.327	2234.328	2234.257	2234.213	2234.159	2234.232	2234.340	2234.431	2234.435	2234.502	2234.577	2234.647	2234.703
Desplazamiento	-0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.002	-0.004	-0.003	-0.006	-0.008	-0.017	-0.035	-0.045	-0.046
24-mar-10	2234.327	2234.325	2234.254	2234.211	2234.155	2234.230	2234.335	2234.428	2234.431	2234.499	2234.574	2234.643	2234.695
Desplazamiento	-0.001	-0.003	-0.003	-0.004	-0.006	-0.006	-0.008	-0.009	-0.012	-0.020	-0.038	-0.049	-0.054
25-mar-10	2234.325	2234.324	2234.254	2234.211	2234.154	2234.231	2234.335	2234.428	2234.433	2234.498	2234.574	2234.643	2234.698
Desplazamiento	-0.003	-0.004	-0.003	-0.004	-0.007	-0.005	-0.008	-0.009	-0.010	-0.021	-0.038	-0.049	-0.051

Imagen 5 Levantamientos topográficos y procesamiento de datos para obtener los desplazamientos verticales.



Gráfica 16 Referencias transversales sobre el eje de trazo



Gráfica 17 Referencias transversales sobre el eje de trazo antes y después del paso del escudo

II.6 Extensómetro de Barras

Las dos barras que se colocaron en el extensómetro se desplazan de manera vertical ascendente o descendente según el avance de la excavación. En la gráfica se puede observar el eje de las abscisas correspondiente a la fecha del levantamiento topográfico; mientras que en el eje de las ordenadas se puede ver el desplazamiento medido en milímetros, el signo negativo representa hundimientos en el suelo y el signo positivo nos indica expansión del terreno. El cadenamiento donde se instaló el extensómetro es el 20+715.250, y el monitoreo fue solo durante el paso del escudo por ese punto.

De color azul se muestra la gráfica de la barra instalada a 15.20 metros de profundidad, mientras que de color rojo se presenta la barra de 9.90 metros de longitud. Se puede observar también la hoja de cálculo utilizada para procesar la información generada por los levantamientos topográficos correspondientes.

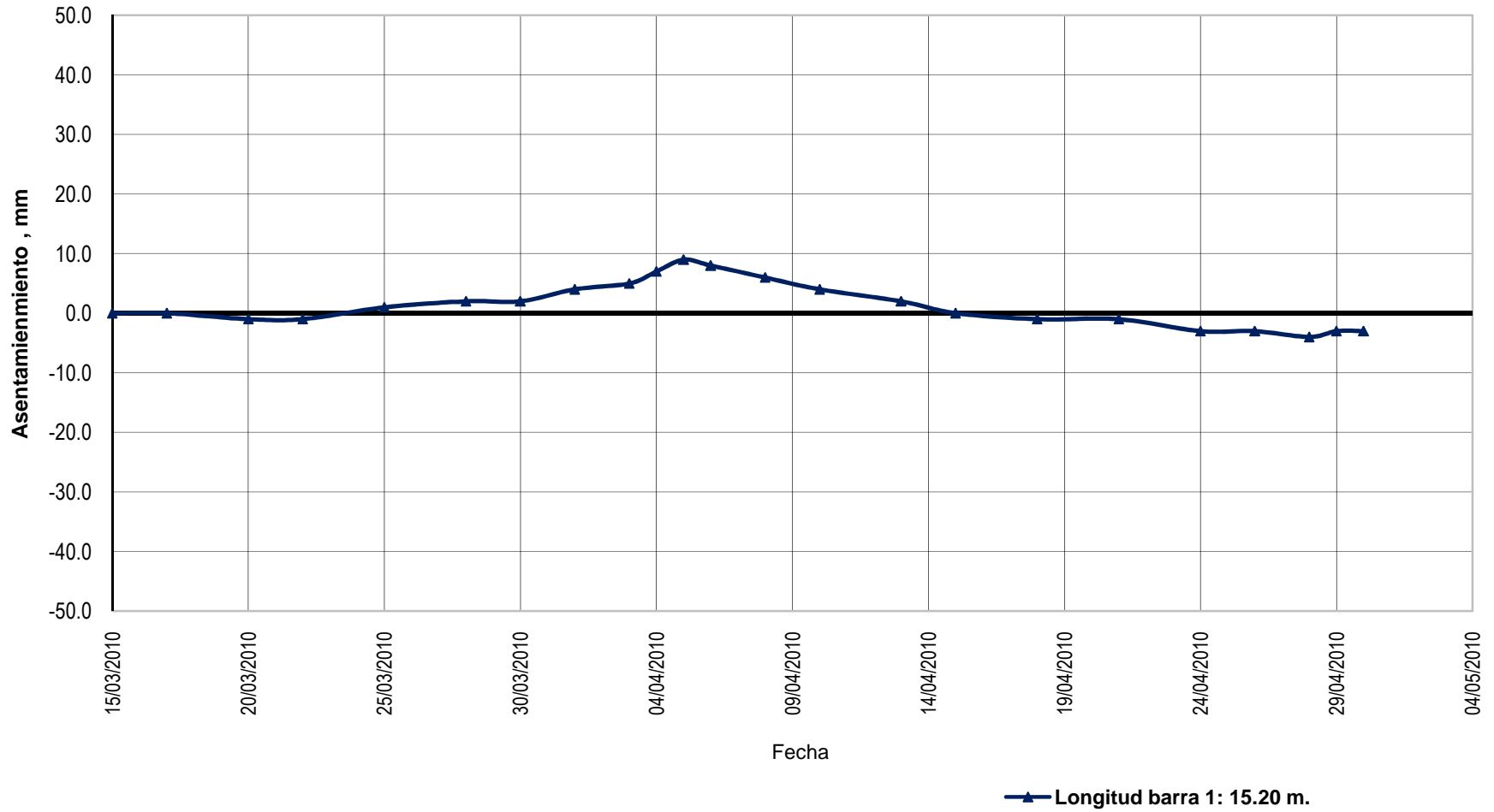
La ecuación programada en la hoja de cálculo para calcular los desplazamientos verticales en milímetros es:

$$DESPLAZAMIENTO = (LECTURA ACTUAL - LECTURA INICIAL) * 1000$$

		EXT-01		EXT-02	
		Longitud barra 1: 15.20 m.		Longitud barra 2: 9.90 m.	
No.	Fecha	Lectura [m]	Diferencia acumulada [mm]	Lectura [m]	Diferencia acumulada [mm]
1	15/03/2010	2270.174	(inicial)	2270.173	(inicial)
2	17/03/2010	2270.174	0.000	2270.173	0.000
3	20/03/2010	2270.173	-1.000	2270.174	1.000
4	22/03/2010	2270.173	-1.000	2270.174	1.000
5	25/03/2010	2270.175	1.000	2270.175	2.000
6	28/03/2010	2270.176	2.000	2270.175	2.000
7	30/03/2010	2270.176	2.000	2270.176	3.000
8	01/04/2010	2270.178	4.000	2270.179	6.000
9	03/04/2010	2270.179	5.000	2270.180	7.000
10	04/04/2010	2270.181	7.000	2270.181	8.000
11	05/04/2010	2270.183	9.000	2270.182	9.000
12	06/04/2010	2270.182	8.000	2270.180	7.000
13	08/04/2010	2270.180	6.000	2270.179	6.000
14	10/04/2010	2270.178	4.000	2270.179	6.000
15	13/04/2010	2270.176	2.000	2270.177	4.000
16	15/04/2010	2270.174	0.000	2270.175	2.000
17	18/04/2010	2270.173	-1.000	2270.174	1.000
18	21/04/2010	2270.173	-1.000	2270.174	1.000
19	24/04/2010	2270.171	-3.000	2270.172	-1.000
20	26/04/2010	2270.171	-3.000	2270.171	-2.000
21	28/04/2010	2270.170	-4.000	2270.170	-3.000

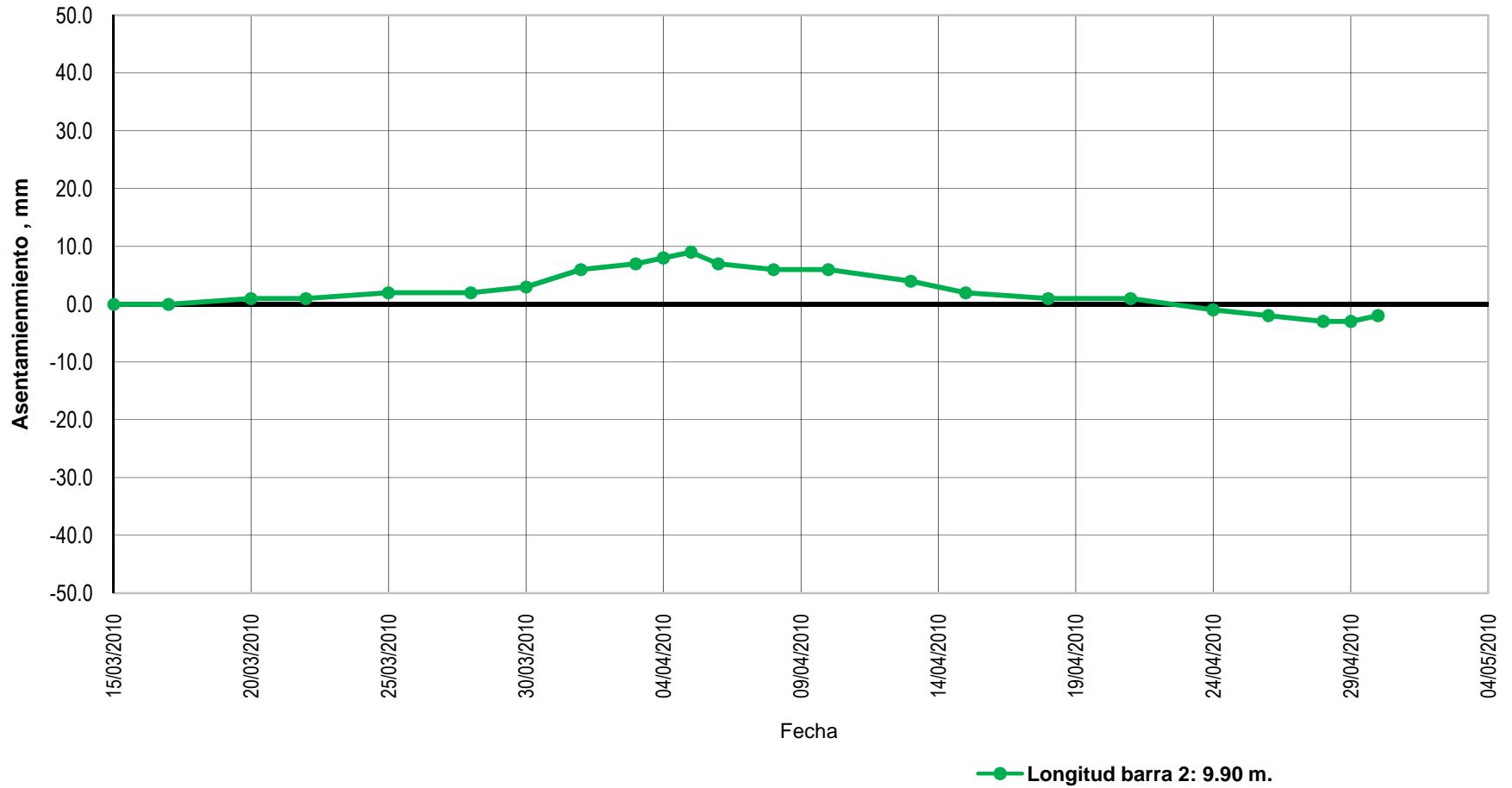
Imagen 6 Datos procesado para medir desplazamientos verticales.

ASENTAMIENTO DEL TERRENO MEDIDO CON EXTENSÓMETRO DE BARRAS



Gráfica 18 Extensómetro de barras a 15.20 metros de profundidad

ASENTAMIENTO DEL TERRENO MEDIDO CON EXTENSÓMETRO DE BARRAS



Gráfica 19 Extensómetro de barras a 9.90 metros de profundidad

CAPÍTULO III

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

III.1 Descripción general

En el capítulo I se describió el principio básico de funcionamiento de los diversos dispositivos utilizados en el monitoreo del tramo Mexicaltzingo-Lumbrera de acceso, mientras que en el capítulo II se presentaron los registros gráficos obtenidos de cada dispositivo ya mencionado, en este capítulo III se interpretan y analizan los diferentes parámetros graficados que se generaron durante el monitoreo del túnel excavado con escudo tipo EPB y del monitoreo del terreno aledaño a dicho túnel.

Los datos y/o valores graficados que serán puntos de interés serán los valores obtenidos como máximos, mínimos, puntos de inflexión y zonas de estabilidad. Aun cuando en algunos casos se cuenta con registros de diversas fechas de monitoreo, para el caso de las deformaciones relativas del anillo se tomará la última lectura proporcionada (sistema de convergencias), mientras que en el caso de los dispositivos monitoreados con topografía (extensómetro de barras y referencias superficiales), se examinará el historial de las lecturas recabadas.

Durante este análisis e interpretación se mostrarán nuevamente algunas gráficas de las utilizadas en el capítulo II, pero sin entrar a detalle en ellas, ya que solo se destacarán aquellos puntos que sean de interés para el presente capítulo, además, las observaciones que se hagan estarán apoyadas solo en los registros de los datos presentados, ya que en el último capítulo de esta tesis se presentaran las conclusiones y recomendaciones pertinentes generadas de dicha observación y análisis.

III.2 Celdas de presión

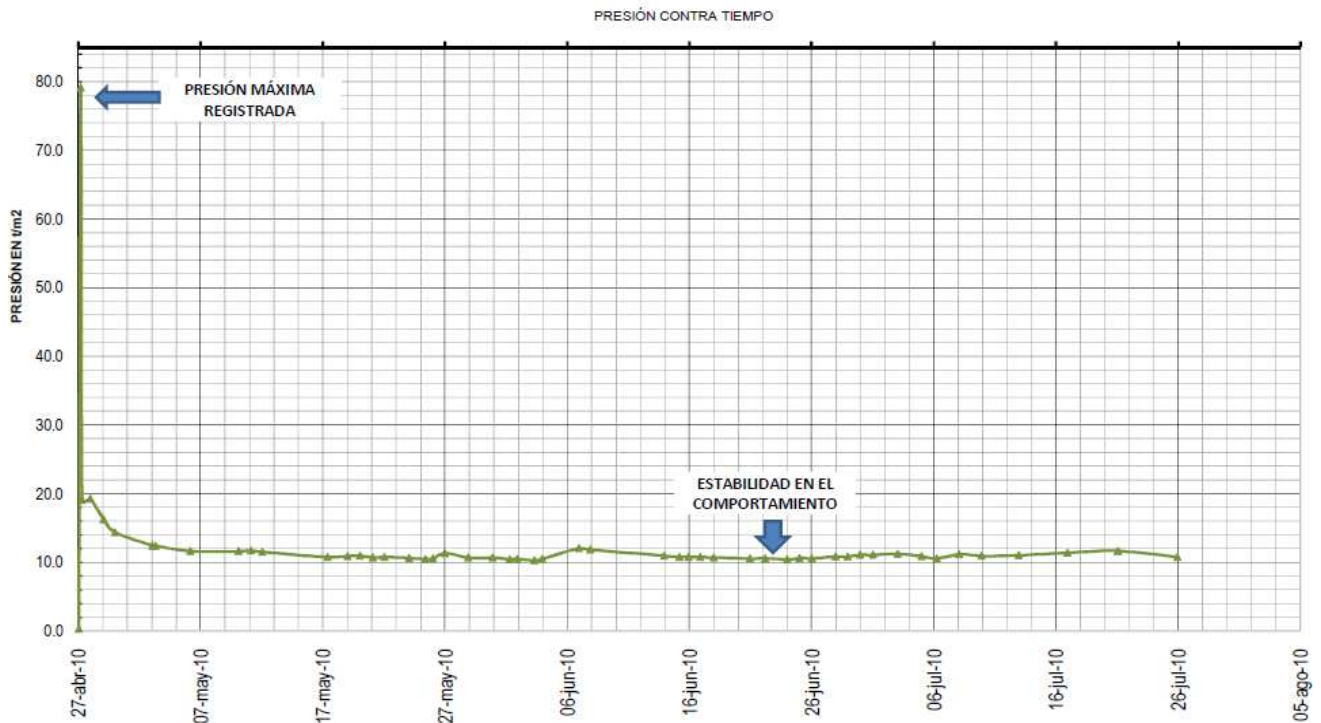
Las celdas de presión colocadas en el anillo 188 pasaron por tres etapas principales, estas son:

1. Instalación de celdas en el interior del concreto en la planta de dovelas.
2. Colocación de las dovelas por el escudo tipo EPB.
3. Disposición final de las dovelas en el túnel.

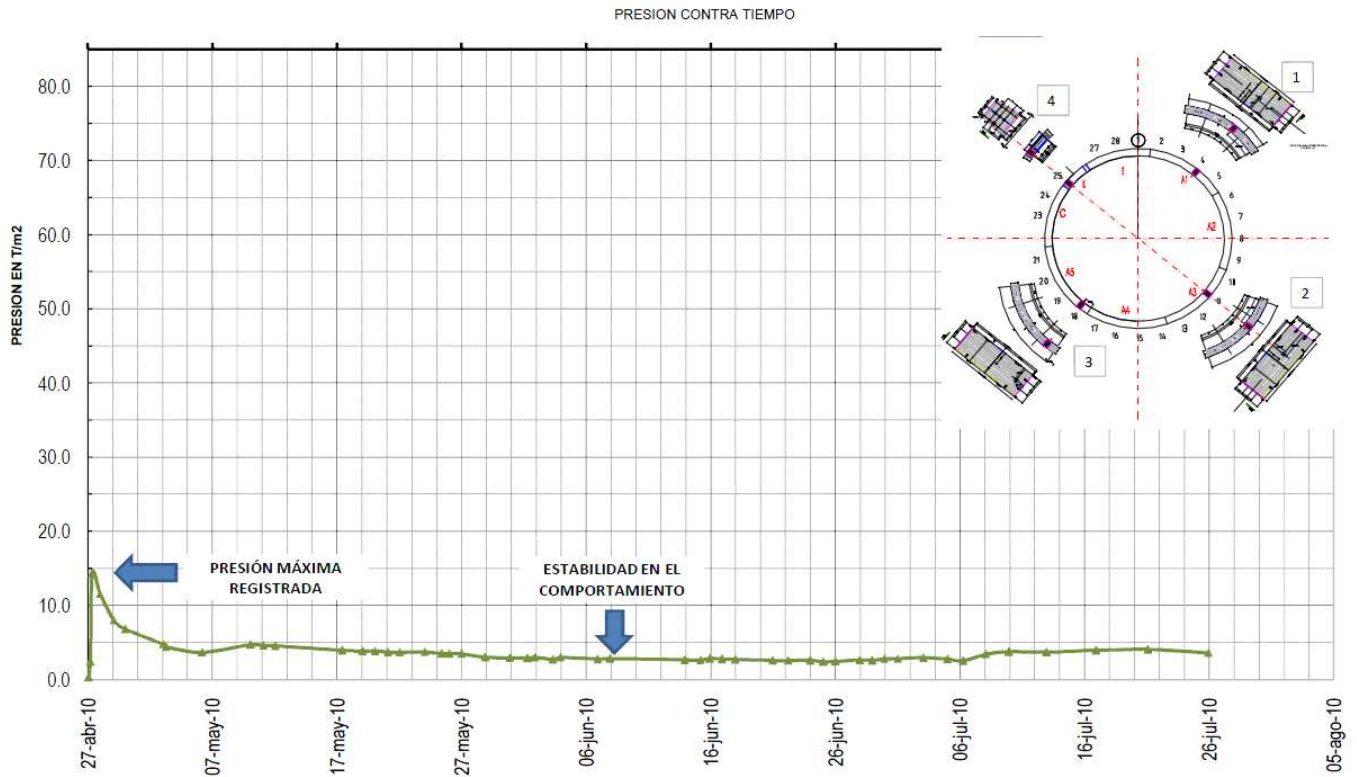
Durante estas tres etapas se puede observar que el comportamiento de las gráficas también registra este procedimiento. La lectura cero es la correspondiente a la colocación de las celdas en el interior de las dovelas, donde no estaban sometidas a ningún esfuerzo ni del escudo, ni del suelo, este punto se puede observar en la grafica y corresponde al 27 de abril de 2010, día de la instalación.

La segunda etapa se muestra en la gráfica con la anotación de "Presión Máxima Registrada", esta presión se registra el mismo día de la instalación y es generada por la inyección de lodos bentoníticos dentro del faldón del escudo en el proceso de colocación del anillo de dovelas. En este punto las celdas registran presiones provocadas por el proceso de instalación y estas presiones no corresponden a las del terreno, ya que el anillo cuando es colocado pasa un lapso dentro del faldón del escudo, y es cuando se coloca el anillo siguiente cuando el anillo que estaba en el faldón es liberado.

La etapa numero tres representa el contacto del anillo instrumentado con celdas de presión y el suelo que es aledaño al mismo; se puede ver de la gráfica que la presión disminuye drásticamente cuando al anillo sale del faldón y empieza a tener interacción con el terreno. Las graficas de las 4 celdas se estabilizan en un lapso menor a dos semanas. Para el caso de las cuatro gráficas de las celdas, tres de ellas alcanzan la estabilidad a la presión aproximada de 10 t/m², mientras que la grafica que corresponde a la clave del túnel registra una presión máxima de 15 t/m² y una presión en la que se estabiliza de 3.5 t/m² aproximadamente.



Las dovelas A1, A3, A5, muestran un comportamiento similar, por lo que la gráfica mostrada arriba solo se presenta como un ejemplo, en el capítulo anterior se observa a detalle cada gráfica.



La gráfica muestra el comportamiento registrado en la dovela K del anillo.

III.3 Sistema de convergencias y divergencias automatizado

Cabe señalar que las medidas de convergencia únicamente miden la variación de la longitud que hay entre dos puntos. En consecuencia, los desplazamientos que se pueden determinar entre estos dos puntos son desplazamientos relativos.

La medición de la deformación relativa del anillo 28 muestra los siguientes datos:

	19/04/2010		27/05/2010	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
TM-1	14.085	-0.908	19.539	-2.065
TM-2	15.479	-0.748	19.782	-2.037
TM-3	1.850	-22.720	3.323	-28.611
TM-4	0.017	-15.937	0.900	-19.637
TM-5	-5.526	-10.390	-5.941	-12.781
TM-6	-13.157	-8.349	-15.916	10.109

De los cuales se observa que el valor máximo registrado es:

X= 19.782
Y= -28.611

Estas deformaciones corresponden a la clave del túnel, mientras que para la mínima deformación se tiene:

$$X= 0.900$$

$$Y= -2.037$$

El valor de X corresponde a la dovela K, esta deformación se toma de la lectura del 27 de mayo y varía en un 1.88% con respecto a la registrada el 19 de abril, mientras que el valor de Y se registra en la dovela A1 ubicada en la clave del túnel.

La medición de la deformación relativa del anillo 103 muestra los siguientes datos:

De los cuales se observa que el valor máximo registrado es:

	19/04/2010		04/06/2010	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
TM-1	2.623	0.479	11.467	1.813
TM-2	8.595	-1.616	24.648	-2.825
TM-3	4.502	-3.788	14.593	-8.172
TM-4	2.77	-6.551	10.628	-14.521
TM-5	2.73	-7.591	10.557	-16.410
TM-6	-4.35	-0.492	-5.178	-0.587

$$X= 24.648$$

$$Y= -16.410$$

Siendo que para la deformación en X se registra en la dovela B, mientras que para Y tenemos el registro en la dovela A5.

Para la mínima deformación tenemos los siguientes valores.

$$X= -5.178$$

$$Y= -0.587$$

Ubicadas en la dovela A4 que a su vez se localiza en uno de los hastiales del túnel.

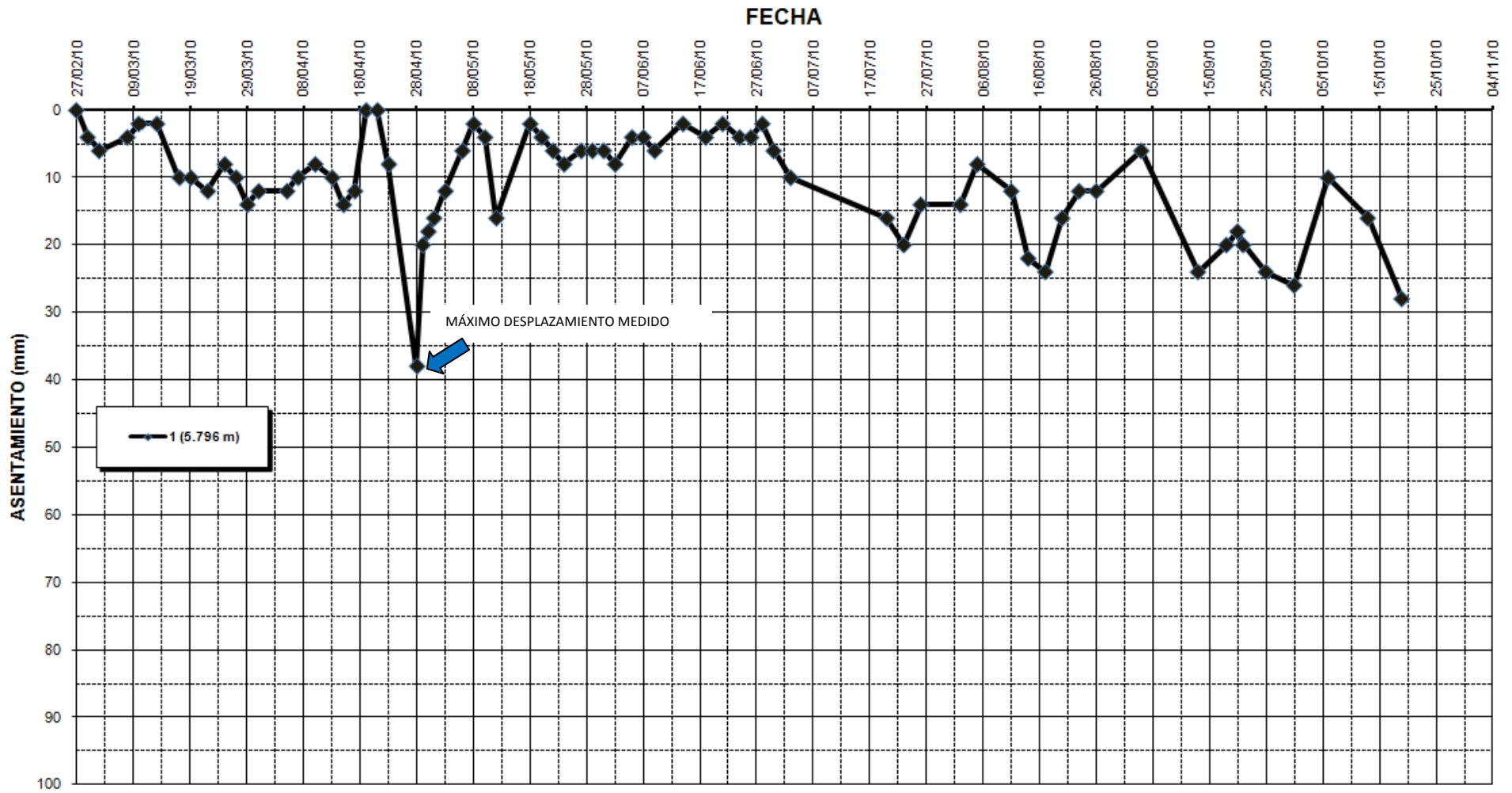
III.4 Extensómetro Magnético con tubería para inclinómetro

Las arañas magnéticas colocadas en la tubería registraron los movimientos verticales del terreno, siendo el mayor desplazamiento de 39mm en la araña más somera y este a su vez se da mientras el escudo pasa por el punto instrumentado; de las gráficas presentadas en el capítulo II se observa que todas ellas parten del valor cero como punto de origen y de allí se desplazan de forma ascendente o descendente dependiendo del avance de la excavación.

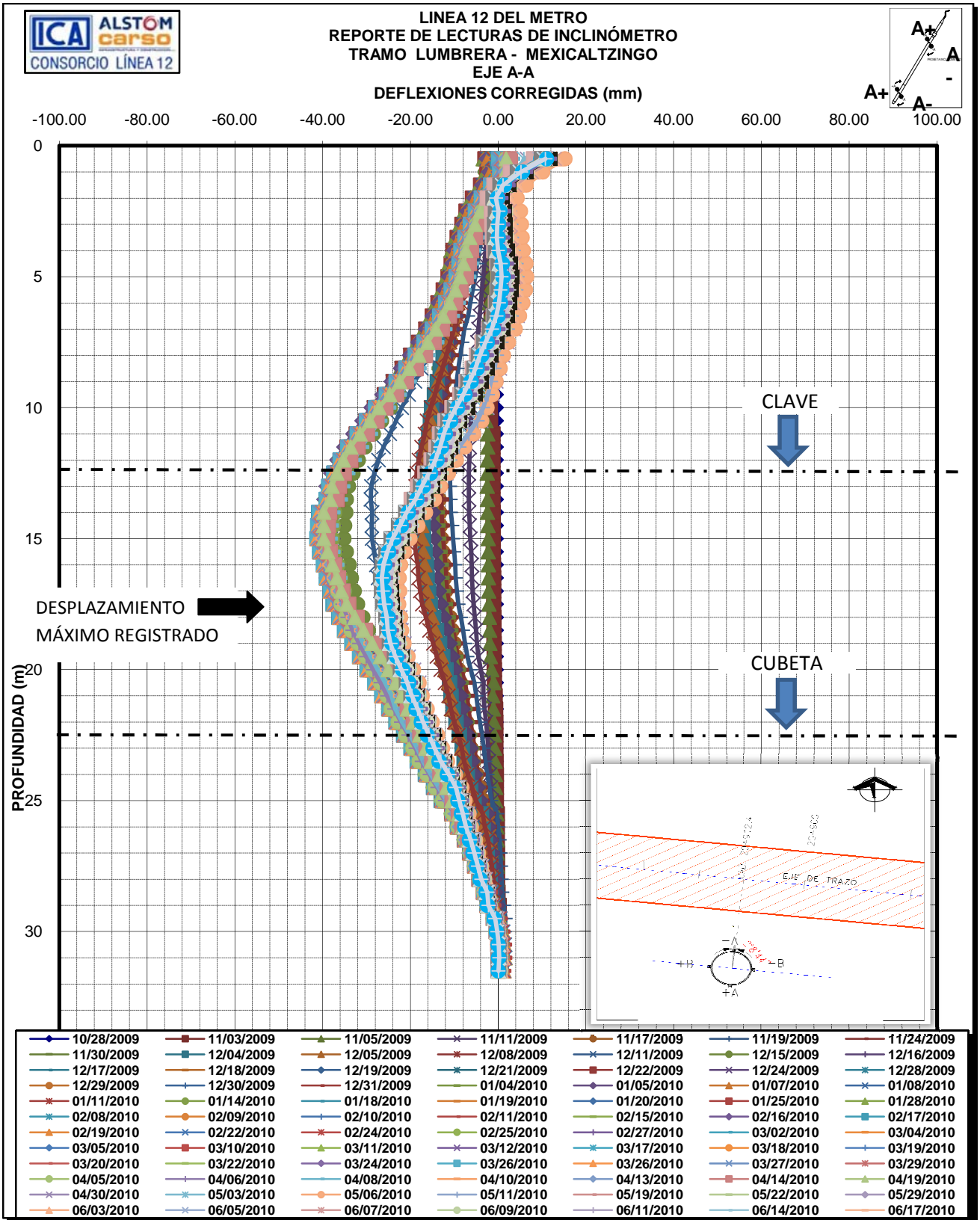
Las arañas son un dispositivo que se monitorea de forma manual a través de una sonda magnética, por lo cual los errores pueden estar presentes debido a factores humanos, la instalación adecuada también influye en el comportamiento de los dispositivos, sin embargo, la variedad de registros generados por las arañas magnéticas permite tener diversos datos para ser comparados entre sí y detectar alguna anomalía generada por factores distintos al movimiento del terreno.

Como ya se dijo en el capítulo I, el barreno en el que se instalan las arañas magnéticas y el inclinómetro es el mismo, y mientras que las arañas registran el desplazamiento vertical, el inclinómetro registra la deformación horizontal, esta deformación se acentúa al paso del escudo. Tenemos de la gráfica que el valor máximo de deflexión medido está en -44mm a los 15 metros de profundidad, notamos también en la gráfica que esta deformación se da en el túnel, ligeramente por encima de los hastiales, y vemos que en la parte superior del inclinómetro las deformaciones son mayores comparadas con aquellas a mayor profundidad.

Se puede observar también que después del paso del escudo por el punto instrumentado el terreno empieza a recuperarse de forma paulatina, sin embargo, aunque el historial de lecturas no nos muestra un rango mayor de monitoreo, se sabe por la experiencia en los monitoreos de otros inclinómetros que estos no se recuperen de manera total a través del tiempo, esto debido a que la flexión en la tubería tipo ABS seguirá sometida a los esfuerzos que el suelo le proporcionará al túnel durante toda su vida útil.



En la gráfica se muestra la araña más somera que es la que registra el máximo desplazamiento medido al paso del escudo.

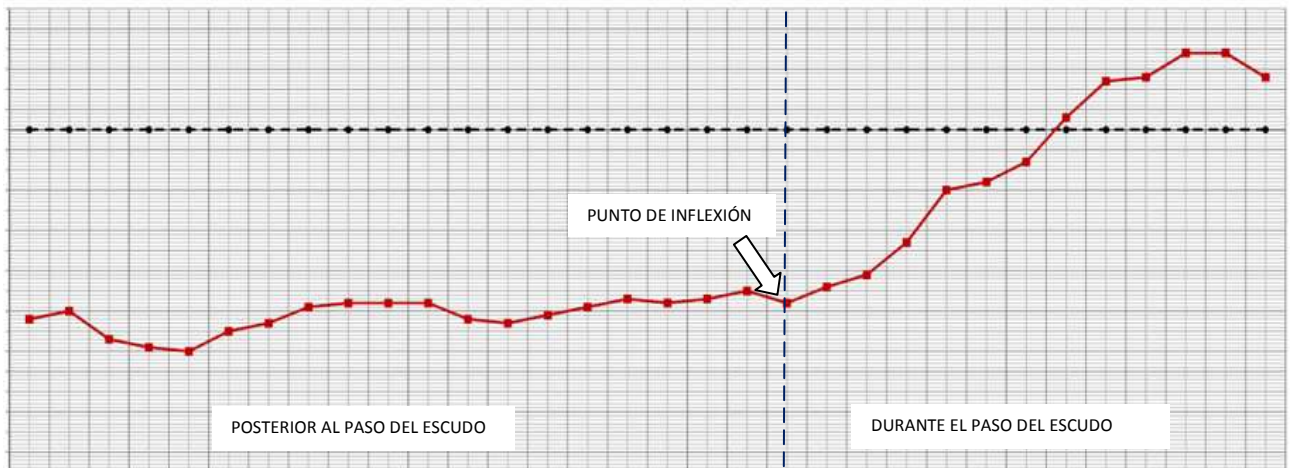


El inclinómetro muestra una máxima deformación al paso del escudo y una recuperación paulatina de la deflexión posterior al paso del escudo tipo EPB.

III.5 Referencias superficiales sobre el eje del trazo

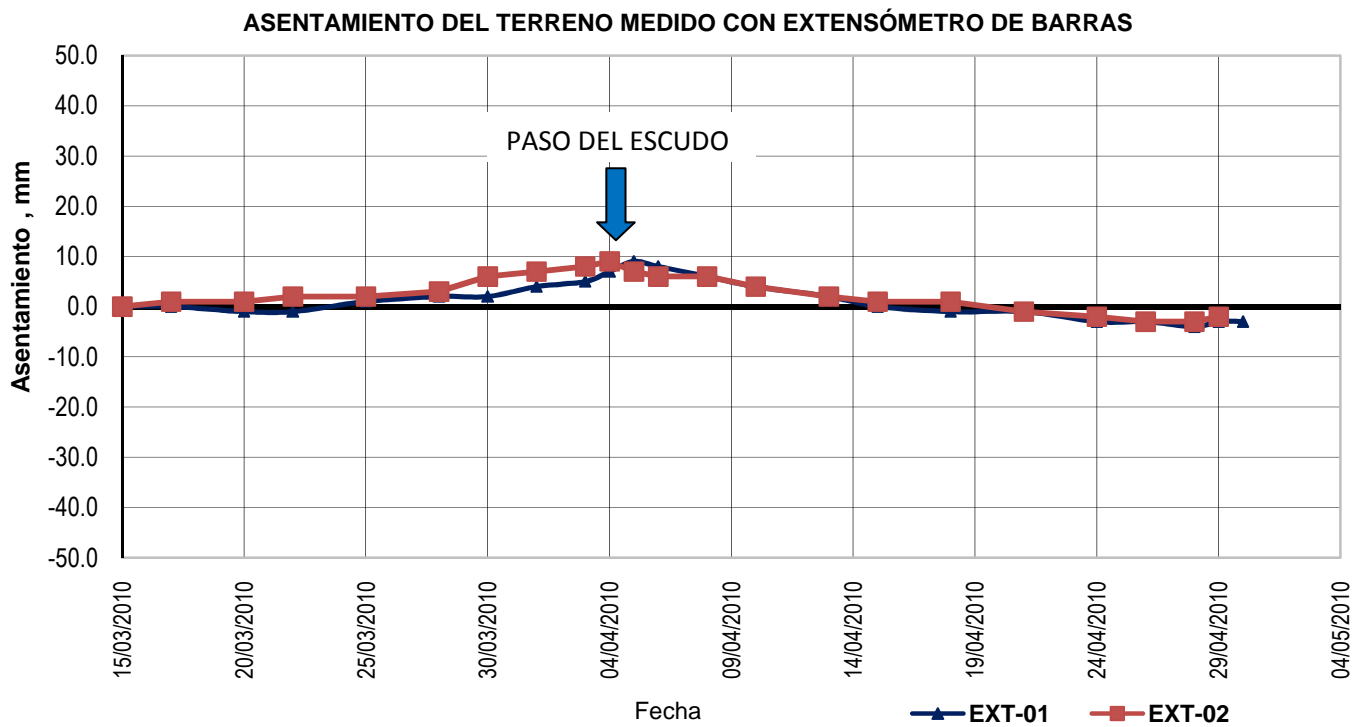
Las gráficas presentadas en el capítulo anterior muestran una clara tendencia de expansión del terreno al paso del escudo, esto como consecuencia de los empujes que el terreno recibe al ir construyendo el túnel, mientras que la segunda gráfica mostrada muestra asentamientos en el terreno una vez que el escudo pasó por allí. Los valores máximos medidos en expansión son del orden de 0.020 cm al paso del escudo, mientras que los asentamientos máximos registrados son del orden de -0.055 cm una vez que el escudo ha pasado en su totalidad por la zona instrumentada con referencias superficiales.

En la siguiente gráfica se muestra de manera esquemática cual es el comportamiento registrado en una sección del túnel correspondiente al tramo en estudio, en la gráfica se ve claramente una zona de asentamientos (posterior al paso del escudo) y una zona de expansiones (durante el paso del escudo), las referencias al eje de trazo por tanto, registran por medio de levantamientos topográficos este comportamiento y permiten valorar si existe riesgo alguno por los esfuerzos que el suelo está recibiendo y que como consecuencia se manifiestan en expansiones y/o asentamientos.



III.6 Extensómetro de Barras

En la siguiente gráfica se muestran juntas las dos barras, en ellas podemos ver que el comportamiento entre sí es muy similar, además, el eje de las ordenadas ha sido nombrado por el departamento de instrumentación de la línea 12 como asentamiento, sin embargo, para la presente tesis llamaremos “expansiones” al asentamiento con signo positivo, mientras que el asentamiento con signo negativo será llamado simplemente “asentamiento”.



El extensómetro de barras muestra una tendencia muy parecida al de las referencias superficiales en el sentido de que muestra expansiones durante el paso del escudo y registra asentamientos después del paso de la tuneladora, sin embargo, a diferencia de las referencias superficiales, el extensómetro de barras se ubica a diferentes profundidades, la barra 1 está a 15.20m de profundidad y coincide con el hastial del túnel, mientras que la barra 2 se encuentra a 9.90m y coincide con la clave del túnel.

Debido a que las barras están más próximas al paso escudo tipo EPB, estas pueden registrar mayores deformaciones en el suelo, para ese caso tenemos que la máxima expansión que se registra es al paso del escudo con un valor medido de 9mm y que corresponde a la barra 2, mientras que el máximo asentamiento registrado es de -4mm en ambas barras y este muestra una estabilidad posterior al paso del escudo por el punto instrumentado con el extensómetro de barras.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

IV.1 Celdas de presión

Las celdas utilizadas en la línea 12 del metro son dispositivos con la más alta tecnología en el mercado y el fabricante da una garantía por cada dispositivo que vende, la información correspondiente puede ser consultada en las referencias al final de esta tesis. Antes de cualquier instalación, las celdas deben ser probadas con la unidad de lectura correspondiente una vez que están disponibles en el sitio donde serán colocadas, para que de esta forma se pueda detectar alguna anomalía por fabricación o alguna otra causada durante la importación. Después de verificar su correcto funcionamiento se debe conocer el arreglo en el que serán colocadas, para el caso del anillo 188 se hizo un arreglo ortogonal.

Al ser embebidas en la dovela requieren de un proceso manual para ser colocadas, durante este proceso crucial de colocado en la dovela se requiere de técnicos capacitados para este trabajo, además, con la supervisión correspondiente de un ingeniero del área de instrumentación se garantiza una correcta instalación, ya que una vez embebida en la dovela no será posible extraer la celda para hacer alguna reparación o modificación.

El monitoreo de las celdas durante el periodo estipulado por el proyecto también debe ser realizado por personal capacitado, y una gran variedad de lecturas da un mejor panorama para poder detectar algún error en el monitoreo, mismo que de detectarse deberá ser corregido a la brevedad. El personal encargado del procesamiento de los datos también deberá contar con los conocimientos suficientes para poder manejar las hojas de cálculo creadas para dicho procesamiento, además, deberá poseer conocimientos en el área de estructuras, geotecnia y principios básicos de hidráulica para de esta forma poder tener un criterio adecuado para informar de algún comportamiento que pudiera poner en riesgo la seguridad del personal de obra, de los futuros usuarios de la línea 12 o de algún daño en la estructura.

IV.2 Sistema de convergencias y divergencias automatizado

De los dispositivos utilizados en el monitoreo de la línea 12 el metro, en particular del tramo en estudio correspondiente a la lumbrera de acceso hasta la estación Mexicaltzingo, el sistema de convergencias automatizado es el que cuenta con la mayor tecnología disponible, su sistema micro eléctrico-mecánico (MENS), permitió medir en tiempo real los posibles desplazamientos relativos en la geometría de los anillos 28 y 103. Una vez instalado en el anillo correspondiente se puede proceder a la automatización del sistema, permitiendo de esta forma un gran historial de lecturas (o un historial con pocas lecturas si así se requiere), que ya no están sujetos a errores humanos de monitoreo.

Sin embargo, la instalación de los 6 tilt meters (clinómetros) en cada anillo, está a cargo de técnicos capacitados para dicho fin, ya que el factor humano puede alterar los

resultados arrojados por el sistema de convergencias, es necesario contar con la supervisión suficiente para evitar errores en la instalación. Otra cosa que se debe considerar es que durante el proceso constructivo del túnel los dispositivos están en todo momento propensos a deterioro o pérdida total por alguna maniobra propia de la construcción, por lo cual también es recomendable supervisar aquellos trabajos que pudieran poner en riesgo la integridad de los dispositivos.

El sistema de convergencias resultó muy adecuado para el monitoreo en la zona de carros y pórticos del escudo, ya que la poca visibilidad por la estructura metálica del escudo imposibilita las convergencias tradicionales a base de levantamientos topográficos.

El software que acompaña a la automatización del sistema, permite optimizar tiempo en el procesamiento de los datos, pero como es bien sabido en el ámbito ingenieril, se requiere de ingenieros con conceptos y criterio adecuado para la correcta interpretación de los resultados y por ende del comportamiento de las convergencias en el anillo, ya que la tecnología no sustituye todavía a la labor de un buen ingeniero.

IV.3 Extensómetro magnético con tubería para inclinómetro

Este dispositivo que permite en un mismo barreno monitorear desplazamientos verticales y desplazamientos horizontales, mostró a través del monitoreo correspondiente las distintas etapas constructivas del túnel y el comportamiento del terreno al paso del escudo.

Al igual que los dispositivos antes mencionados, el fabricante garantiza el correcto funcionamiento de la tubería tipo ABS para inclinómetro y de las arañas magnéticas utilizadas para el extensómetro, aun así, estos deben ser probados antes de su colocación in situ, y es la etapa de la instalación donde se debe prestar mucha atención para evitar fallas en los dispositivos generadas por una mala instalación. Se debe tener cuidado también al momento de hacer el barreno en el suelo, esto con el fin de no dañar alguna línea de conducción de agua, luz, drenaje, etcétera.

El extensómetro magnético reportó expansiones en la parte más somera demostrando así las expansiones generadas por el paso de la tuneladora por el punto instrumentado, además, registró los asentamientos posteriores al paso del escudo y con los datos obtenidos de asentamientos y expansiones se pudo verificar el correcto comportamiento de la construcción del túnel; con las lecturas posteriores se mostró una clara estabilidad en el terreno, lo que garantiza la seguridad de la obra y de las construcciones aledañas.

El inclinómetro por su parte, sirvió para medir los movimientos horizontales en el terreno a diferentes profundidades, como se pudo ver en la gráfica la zona de mayor flexión en la tubería es la que corresponde a los hastiales del túnel, esto resulta lógico ya que es en

esa zona donde el inclinómetro está más cerca del túnel y por tanto recibe un mayor empuje del suelo al paso del escudo tipo EPB.

Se nota también que la recuperación en la gráfica del inclinómetro es paulatina y que la estabilidad en el terreno se alcanza en función del tiempo. Con el inclinómetro se pudo determinar que no existía riesgo alguno por la construcción del túnel y que el proceso constructivo utilizado en esa zona fue el adecuado.

El monitoreo del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro se realiza con una brigada de campo especializada, los errores humanos pueden estar presentes en la recolección de los datos, por lo que al tener una gran variedad de lecturas se minimiza la posibilidad de contar con datos erróneos.

Otra cosa que es necesaria añadir es que las sondas utilizadas para el monitoreo del extensómetro magnético con tubería para inclinómetro deben ser calibradas periódicamente (por lo menos una vez al año), para contar con la precisión requerida en la toma de lecturas. El procesamiento e interpretación de datos corresponde a ingenieros con criterio y conocimientos suficientes para determinar si existe algún riesgo o anomalía durante el proceso constructivo del túnel.

IV.4 Referencias superficiales sobre el eje del trazo

La topografía usada para los levantamientos de las referencias superficiales reportó expansiones y asentamientos sobre el eje del trazo, debido a la profundidad mayor a 11 metros del nivel de rodamiento de la avenida Ermita con respecto al extradós la clave del túnel, estos asentamientos y expansiones fueron relativamente pequeños (en comparación con los que registró el extensómetro de barras), sin embargo, queda demostrado que la influencia del proceso constructivo del túnel se hace presente aún en la superficie.

Las referencias superficiales también sirvieron para determinar si en algún momento se tenía que limitar la circulación de vehículos sobre la avenida Ermita, en este caso, debido a los desplazamientos mínimos en la superficie del terreno, no se tuvo que tomar alguna medida de cierre de carriles de manera total o parcial en la avenida ya mencionada.

El sistema de levantamientos topográficos está sujeto a los posibles errores ya conocidos tales como son, mala calibración la estación topográfica, errores al capturar los datos, cambios por temperatura, daños en las referencias colocadas en el pavimento, etcétera. Sin embargo, los errores ya mencionados resultaron mínimos y no alteraron de ninguna manera los resultados del monitoreo.

El sistema de referencias superficiales topográficas es un método que ha probado su eficacia en diversas obras de ingeniería. Del sistema de instrumentación utilizado en el tramo de estudio que comprende esta tesis, el sistema de referencias superficiales es

quizás el más usado en la actualidad y seguramente se seguirá utilizando de manera habitual en otras obras dado que es fácil de instalar y de monitorear, además de que su precio de instalación puede resultar más bajo en comparación con los otros dispositivos mencionados en esta tesis.

IV.5 Extensómetro de Barras

El extensómetro de barras instalado en el cadenamiento 20+715.250 sobre el eje de trazo de la línea 12, tiene la característica de que fue ensamblado en la obra con la debida supervisión del departamento de instrumentación, esto para reducir los costos por adquisición de un extensómetro de importación. El principio de funcionamiento básico consiste en que al ser empujado desde la base el extensómetro registrará expansiones en la superficie y caso contrario, al registrarse pérdida de suelo en la base del extensómetro este registrará asentamientos en la superficie.

Los asentamientos y expansiones fueron mayores en comparación con los registrados con las referencias superficiales, esto como ya se dijo en un capítulo anterior es debido a que las barras están a diferentes profundidades, razón por la cual estas son más sensibles al paso del escudo por el punto instrumentado. El extensómetro permitió verificar un buen comportamiento del sistema constructivo al paso del escudo y después de que el túnel quedó construido con el recubrimiento primario a base de dovelas.

Los problemas que pudieran surgir derivados de la instalación son debido a una mala ubicación del punto que se requiere monitorear, daño en obras existentes tales como sistemas de agua potable, drenaje, cableado subterráneo, etcétera, que pudieran ser ocasionados por no contar con la información necesaria al momento de barrenar el terreno. También se deben realizar pruebas a los extensómetros antes de ser instalados in situ para corroborar su buen funcionamiento. La inyección de cemento bentonita debe ser la adecuada para no alterar la resistencia del terreno en el barreno donde se ubicará el extensómetro de barras.

Este dispositivo es monitoreado por medio de levantamientos topográficos, razón por la cual los errores en la toma de lecturas pueden estar presentes. Los datos procesados y la correcta interpretación de los mismos están a cargo de un ingeniero que debe reportar alguna anomalía o comportamiento que pueda poner en riesgo la obra y las construcciones aledañas. Para el caso del extensómetro de dos barras verticales instalado en el tramo de la lumbrera de entrada a la estación Mexicaltzingo, no se reportó ninguna anomalía durante el proceso constructivo del túnel, por lo cual no se tuvo que tomar alguna medida preventiva o correctiva en la construcción con escudo tipo EPB.

IV.6 Comportamiento del suelo-estructura

El sistema de instrumentación implementado en el intertramo en estudio, permitió medir in situ diferentes parámetros tales como asentamientos, expansiones, presión en la masa del suelo, superficies de falla, deformaciones relativas en el túnel, etcétera. Como se mencionó al principio esta tesis, la zona geotécnica a la que corresponde el intertramo es zona III o de lago, debido a esto la velocidad de deformación y presiones generadas por el agua en el subsuelo repercuten de manera significativa en el comportamiento del terreno.

El sistema de instrumentación implementado mostró la tendencia del comportamiento del terreno a diferentes profundidades y en diferentes zonas del túnel, así mismo, se pudieron comparar los parámetros medidos con aquellos que se obtuvieron de pruebas de laboratorio y se pudo con esto optimizar el diseño de las dovelas del túnel en los intertramos siguientes (la optimización del diseño generado por la instrumentación sale del alcance de esta tesis, para mayor información se puede consultar en las referencias dadas al final).

El terreno no presentó ningún parámetro que pudiera perjudicar la construcción del túnel, ni las construcciones aledañas. La correcta instalación y el monitoreo adecuado permitieron concluir que el proceso constructivo del túnel es confiable y que no representa daños a la infraestructura existente. El terreno lacustre por donde cruza el intertramo no afectó el buen funcionamiento del túnel en esta etapa de la obra, sin embargo, dado que el terreno se altera en función del tiempo, se debe implementar un sistema de instrumentación que permita monitorear las deformaciones y posibles comportamientos generados por la interacción del suelo con la estructura, esto durante la vida útil de la obra.

Debido a la gran longitud del túnel de la línea 12, no es posible implementar un sistema de instrumentación que cubra la mayor parte de la obra (a excepción de las referencias superficiales sobre el eje del trazo), razón por la cual se debe diseñar un sistema de instrumentación que permita medir aquellas zonas que sean representativas de la obra, y aquellos puntos que por su peculiaridad pudieran representar un riesgo mayor dada la ejecución de la obra. Además, la instrumentación se apoyó en las teorías existentes en cuanto a la mecánica de suelos se refiere, también toma en cuenta los reglamentos y normas de construcción vigentes para tener parámetros que permitan saber cuáles son las zonas y los límites que se deben considerar como tolerables dentro de la construcción del túnel.

Por último, la instrumentación en México es algo relativamente nuevo, por lo cual la bibliografía existente es escasa, razón por la cual se agradece al Departamento de instrumentación de la Línea 12 del metro por las facilidades prestadas para la realización de la presente tesis. La mejora y optimización de los sistemas de instrumentación estarán

acompañadas del avance tecnológico, sin embargo, los conceptos y el buen criterio de ingeniero deberán ser los que determinen si los datos de las mediciones que arrojen los dispositivos son aceptables o si se deben desechar por alguna anomalía cualquiera que esta sea.

Además, se debe contar siempre con una mente abierta, ya que aún muchas de las teorías de comportamiento de suelos y de estructura de materiales usan en la mayoría de casos hipótesis simplificadoras que no necesariamente pudieran corresponder al comportamiento real del suelo y de la estructura, por la cual es imprescindible seguir midiendo in situ para poder de esta manera contar con los datos y herramientas que puedan corroborar o desechar las teorías utilizadas en ingeniería.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Zonificación geotécnica de la ciudad de México.

Fig. 2 Perfil estratigráfico correspondiente al intertramo.

Fig. 3 Intertramo Estación Mexicaltzingo - Lumbrera de acceso.

Fig. 4 Esquema de Celda de presión en clave.

Fig. 5 Celda de presión colocada en dovela.

Fig. 6 Tilt meter colocado en dovela.

Fig. 7 Datalogger utilizado para la automatización de los tilt meters.

Fig. 8 Esquema del anillo instrumentado con tilt meters.

Fig. 9 Arañas magnéticas en tubería para inclinómetro.

Fig. 10 Esquema de extensómetro magnético con tubería para inclinómetro.

Fig. 11 Referencia superficial.

Fig. 12 Vista en planta de referencias superficiales sobre el eje de trazo.

Fig. 13 Extensómetro de barras.

Fig. 14 Esquema de extensómetro de barras.

Fig. 15 Esquema de dovelas instrumentadas con celdas de presión.

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1 Datos procesados para obtener presiones.

Imagen 2 Datos capturados de los registros de campo.

Imagen 3 Datos procesados para determinar movimientos verticales.

Imagen 4 Datos procesados para determinar desplazamientos horizontales.

Imagen 5 Levantamientos topográficos y procesamiento de datos para obtener los desplazamientos verticales.

Imagen 6 Datos procesado para medir desplazamientos verticales.

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 Anillo 188, dovela A-1

Gráfica 2 Anillo 188, dovela A-3

Gráfica 3 Anillo 188, dovela A-5

Gráfica 4 Anillo 188, dovela K

Gráfica 5 Anillo 28 correspondiente al 19 de abril de 2010

Gráfica 6 Anillo 28 correspondiente al 27 de mayo de 2010

Gráfica 7 Anillo 103 correspondiente al 19 de abril de 2010

Gráfica 8 Anillo 103 correspondiente al 4 de junio de 2010

Gráfica 9 Comportamiento de araña magnética 1

Gráfica 10 Comportamiento de araña magnética 2

Gráfica 11 Comportamiento de araña magnética 3

Gráfica 12 Comportamiento de araña magnética 4

Gráfica 13 Comportamiento de araña magnética 5

Gráfica 14 Comportamiento de araña magnética 6

Gráfica 15 Inclinómetro

Gráfica 16 Referencias transversales sobre el eje de trazo

Gráfica 17 Referencias transversales sobre el eje de trazo antes y después del paso del escudo

Gráfica 18 Extensómetro de barras a 15.20 metros de profundidad

Gráfica 19 Extensómetro de barras a 9.90 metros de profundidad

BIBLIOGRAFIA

- Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de cimentaciones.
- Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto.
- T. William Lambe. Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. Traducción José A. Jiménez. México D. F. 2009.

Sitios WEB

- <http://www.rstinstruments.com>
- <http://www.geokon.com>
- <http://www.icalinea12.com.mx>
- <http://www.campbellsci.com>
- <http://www.metro.df.gob.mx>
- <http://www.robbinstbm.com>