



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*PROCESO DE SELECCIÓN, ENSAMBLE Y FUNCIONAMIENTO DE
ESCUDOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN SUELOS BLANDOS:
CASO DE ESTUDIO LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

REYES ALBARRÁN PAULETTE

DIRECTOR DE TESIS:

ING. SERGIO MACUIL ROBLES



MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres que son el centro de mi vida.

A mis hermanas que amo y que son mi ejemplo a seguir.

Al M. J. Sergio Macuil Robles,

Que me ha brindado su apoyo desinteresadamente.

Al M. J. Andrés Moreno y Fernández,

Que me asesoró con paciencia y amabilidad.

A mi Dios que sin él no lo hubiera logrado.

Contenido

INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO LÍNEA 12 DEL METRO	5
1.1 Características Físicas y Operativas	6
1.2 Estructura Organizacional del Consorcio	9
CAPÍTULO II PERFIL ESTRATIGRAFICO	11
2.1 Trazo y Perfil del Túnel Mexicaltzingo-Mixcoac.	11
2.1.1 Trazo	12
2.1.2 Perfil	15
2.2 Perfil Estratigráfico	19
CAPÍTULO III SELECCIÓN DEL ESCUDO.	22
3.1 Parámetros para la Selección del Escudo	22
3.2 Tipo de Escudo Utilizado en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México	26
3.2.1 Componentes del escudo EPB utilizado en la Línea 12	27
3.3 Características del Escudo Utilizado en la Línea 12.	29
CAPÍTULO IV SISTEMA DE SOPORTE DEL TÚNEL	35
4.1 Junta de Sellado	38
4.2 Acoplamiento entre Anillos	38
4.3 Conexiones Atornilladas	39
4.4 Transmisión de la fuerza de los cilindros de empuje	39
CAPÍTULO V PROCESO DE ENSAMBLE DEL ESCUDO UTILIZADO EN LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	41
5.1 Armado en sitio.	41
CAPÍTULO VI FUNCIONAMIENTO DEL ESCUDO Y ACTIVIDADES INVOLUCRADAS ANTES Y DURANTE SU OPERACIÓN	43
6.1 Tratamiento Geotécnico Previo al Paso del Escudo	44
6.2 Estructura de Atraque	44
6.3 Excavación de los primeros metros	46
6.4 Excavación del túnel en los metros subsecuentes	48
6.5 Sistema de inyección bi-componente	49
6.5.1 Fabricación de la mezcla de inyección	51

6.6	Sistema de guiado del escudo _____	52
6.7	Control de las presiones en el frente de excavación. _____	53
CAPÍTULO VII CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA PERFORACIÓN DEL TÚNEL _____		56
7.1	Mantenimiento de la Máquina _____	56
7.2.	Instrumentación del túnel _____	56
7.2.1	Instrumentación al interior del túnel _____	57
7.2.2	Instrumentación al exterior del túnel. _____	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES EN LA OPERACIÓN DE ESCUDOS EN SUELOS BLANDOS. _____		61
REPORTE FOTOGRÁFICO _____		64
ANEXO 1 PLANOS _____		78
1.a.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEFINITIVO DESDE EJE 3 ORIENTE HASTA MIXCOAC, TRAMO ATLALILCO-MIXCOAC _____	79
1.b.	ESCUDO EPB (EPB331-331) _____	80
1.c.	POSICIONES DE LA DOVELA DE CIERRE _____	81
ANEXO 2 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LAS PRESIONES DE SOSTENIMIENTO DEL FRENTE DURANTE LA EXCAVACION DEL TÚNEL. _____		82
ANEXO 3 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LOS ASENTAMIENTOS EN SUPERFICIE DEBIDOS A LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL. _____		87
ANEXO 4 GRÁFICAS DE ASENTAMIENTO EN SUPERFICIE REALIZADAS CON BASE EN LECTURAS TOMADAS DE LA INSTRUMENTACIÓN SUPERFICIAL SOBRE EL EJE DEL TRAZO. _____		88
ANEXO 5 GRÁFICAS DE VARIACIÓN DEL DIÁMETRO HORIZONTAL INTERNO DEL TÚNEL, REALIZADAS CON BASE EN LECTURAS TOMADAS DE LA INSTRUMENTACIÓN INTERNA DEL TÚNEL _____		105
ÍNDICE DE TABLAS _____		111
ÍNDICE DE FIGURAS _____		112
BIBLIOGRAFÍA _____		113

INTRODUCCIÓN

La construcción de túneles en México, ha retomado su importancia en estos últimos años, ya que se han realizado proyectos destacados en donde parte de su trazo o incluso su trazo completo se desarrolla en sección tipo Túnel. Por mencionar algunos ejemplos tenemos la carretera Durango-Mazatlán que contará con 56 túneles con longitud total de aproximadamente 14.2 km, el TEO (Túnel Emisor Oriente) con longitud total de 62 km, el Túnel Rio de la Compañía con longitud de 6.5 km, la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México en su tramo Mexicaltzingo-Mixcoac, con longitud aproximada de 6.3 km, entre otros, con longitudes pequeñas pero no menos importantes.

Estoy convencida de que en un futuro no muy lejano, el número de túneles que actualmente se están construyendo se duplicará, y se van a necesitar ingenieros y técnicos con conocimientos sobre el tema y que además les guste estar involucrado en estas actividades. Existe una variedad bibliográfica relacionada con túneles (clasificación, método constructivo, sistema de soporte, etc.), pero se ve limitada cuando nos enfocamos hacia la excavación de túneles con escudo, es por tal motivo que tuve la inquietud de conocer sobre túneles excavados con este tipo de tecnología.

El objetivo de este trabajo es describir las diferentes actividades que se tienen que realizar antes, durante y después del paso del escudo por el terreno, analizar los criterios que se deben aplicar para seleccionar el tipo de máquina requerida en la excavación, describir el proceso de ensamble y funcionamiento de la misma.

El caso de estudio es la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, ya que es un proyecto que se encuentra en su etapa de construcción y puede obtener información oportuna, además de que realicé visitas a la obra que me ayudaron a entender mejor las actividades involucradas en la excavación del túnel con escudo.

El trabajo está dividido en siete capítulos que tienen como objetivo, lo siguiente:

- Capítulo I: Describir de manera breve el proyecto de la Línea 12, cuál es su objetivo, qué beneficios trae consigo, características físicas y operativas del proyecto, qué empresas forman el consorcio que está encargado de su construcción, este capítulo nos dará una pequeña pero clara descripción del proyecto integral de la Línea 12 Tláhuac-Mixcoac del Sistema de Transporte Colectivo.
- Capítulo II: Describir el trazo y perfil que tiene la Línea 12, enfocado principalmente en la sección tipo túnel; así como el perfil estratigráfico que tiene la zona en donde estará alojado el túnel.
- Capítulo III: Detallar los parámetros utilizados para la selección adecuada de un escudo, así como el tipo y características de la máquina utilizada en la excavación de la Línea 12 en su sección tipo Túnel.
- Capítulo IV: Describir el tipo de revestimiento y acoplamiento (tanto longitudinal como transversal) que es utilizado en la construcción del túnel de la Línea 12.
- Capítulo V: Describir el ensamble del escudo en la lumbrera de entrada ubicada en el intertramo Atlalilco-Mexicaltzingo; aunque en realidad la parte medular de este capítulo se encuentra dentro del reporte fotográfico, ya que hay material visual que ayuda a entender mejor el proceso de ensamble.
- Capítulo VI: Explicar todas las actividades a realizar antes y durante el paso del escudo, además de describir el funcionamiento de éste durante cada actividad.
- Capítulo VII: Dar una breve explicación de la instrumentación empleada tanto en el interior como en el exterior del túnel.

Me gustaría que este trabajo cumpla sus expectativas como lo ha hecho con las mías, y que varios ingenieros se interesarán en el tema ya que se necesitará personal calificado para hacer frente a la demanda que estamos por enfrentar.

CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO LÍNEA 12 DEL METRO

La construcción de la Línea 12 del Metro, dentro del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, forma parte del Programa de “inversión pública” más grande del país de los últimos 10 años.

Con base a los estudios llevados a cabo por Empresas especializadas contratadas por el Gobierno de la Ciudad de México se reducirá el tiempo de traslado de las personas de Tláhuac al Centro Histórico, de dos horas a 45 minutos; reduciéndose también el costo del transporte de \$13.00 a \$ 4.00, además de poder movilizar diariamente la cantidad aproximada de 400 mil usuarios en días laborables.

Por su extensión de 24.9 km. es la línea de mayor longitud de la Red del Sistema de Transporte Colectivo (metro) y la más larga de América Latina.

Los objetivos principales de la construcción de la Línea 12 son:

1.- Brindar servicio de transporte masivo de pasajeros en forma rápida, segura, económica y ecológicamente sustentable a los habitantes de siete delegaciones.

- Tláhuac: Con el mayor índice demográfico
- Iztapalapa: La más poblada
- Coyoacán: Con un importante índice de saturación vial
- Benito Juárez: Con un importante índice de saturación vial
- Xochimilco: Comunicación adicional al centro por Tulyehualco
- Milpa Alta: Comunicación directa al CETRAM Tláhuac por Tecomitl
- Álvaro Obregón: Con un gran índice demográfico.

2.- Mejorar el desempeño de la totalidad de la Red del Metro, al proporcionar conectividad con las Líneas 2, 3, 7 y 8 en el sur de la Ciudad de México.

La construcción de la Línea 12 traerá grandes beneficios a la sociedad en:

- Vialidades: Construcción de vialidades conforme a un proyecto integrado en la zona de influencia, para reforzar el transporte público y evitar la competencia excesiva con la nueva línea del Metro (puentes vehiculares y peatonales, ampliaciones, adecuaciones geométricas, nueva señalización horizontal y vertical e instalación de semáforos).
- Ciclovías y estacionamientos: Incorporación de facilidades al uso de la bicicleta en el diseño de estaciones y vialidades relacionadas.
- Nuevo diseño de estaciones: Incorporación de escaleras eléctricas, salvaescaleras, bandas transportadoras, torniquetes mixtos (con capacidad para lectura de boletos unitarios y tarjetas electrónicas); baños y accesibilidad total a personas con discapacidad.
- Desarrollo urbano, ecológico y turístico en la zona de influencia: Mejoramiento y ampliación de la capacidad del drenaje existente, especialmente en áreas de inundaciones.
- Ampliación del área de reserva ecológica en la zona con el posible desarrollo de un centro de conservación y turismo ecológico.
- Equipamiento para la seguridad pública, incorporando vigilancia en las instalaciones y mejorando la iluminación en la zona de influencia.
- Aumentar la productividad de la Ciudad al reducir el tiempo de transporte hasta en una hora quince minutos desde la terminal sur-oriente al centro del D.F. por persona.
- Disminuir la contaminación del ambiente por emisiones de gases y ruido que desprenden los vehículos de combustión.

1.1 Características Físicas y Operativas

La línea 12 “Línea Dorada” es la más extensa de México y América Latina, la cual tendrá las siguientes características:

- 24.9 Kilómetros de longitud.
- 20 Estaciones.
- 16 Aparatos de Vía.
- 28 Trenes (al inicio de la operación intervalo de 3.9 minutos).
- 35 Trenes (intervalo mínimo de 2.5 minutos en horas pico).
 - De rodadura férrea
 - De ocho vagones cada uno
- Mínima distancia en transbordos.
- Alternativas de integración del comercio formal e informal en terminales, estaciones y aledaños.

- Posibilidad de desarrollo inmobiliario en terminales y estaciones.
- Preparaciones para continuidad de la Red.
- Reordenamiento del transporte en el corredor y puntos de transferencia.
- Infraestructura planeada considerando necesidades de operación y mantenimiento de la Línea.
- Programa de desvíos de tránsito por la construcción de obras.
- Áreas de estacionamiento para bicicletas en terminal Tláhuac y estaciones.
- Diseño de ciclovías a lo largo de la ruta.

Estaciones

La línea 12 del Metro de la Ciudad de México contará con 20 estaciones, de las cuales 2 son superficiales, 9 elevadas, 1 en cajón subterráneo y 8 en túnel.

La tabla 1.1, expone la sección y el tipo de cada una de las estaciones que integran la Línea 12.

No.	Estación	Sección	Tipo
1	TLAHUAC	Superficial	Terminal
2	TLALTENCO	Superficial	De paso
3	ZAPOTITLÁN	Elevado	De paso
4	NOPALERA	Elevado	De paso
5	OLIVOS	Elevado	De paso
6	SAN LORENZO	Elevado	De paso
7	PERIFERICO ORIENTE	Elevado	De paso
8	CALLE 11	Elevado	De paso
9	LA VIRGEN	Elevado	De paso
10	ESIME CULHUACAN	Elevado	De paso
11	BARRIO TULA	Elevado	De paso
12	ATLALILCO L12	Cajón	Correspondencia
13	MEXICALTZINGO	Túnel	De paso
14	ERMITA	Túnel	Correspondencia
15	EJE CENTRAL	Túnel	De paso
16	PARQUE DE LOS VENADOS	Túnel	De paso
17	ZAPATA	Túnel	Correspondencia
18	20 DE NOVIEMBRE	Túnel	De paso
19	INSURGENTES SUR	Túnel	De paso
20	MIXCOAC	Túnel	Terminal/Correspondencia.

Tabla 1.1 “Estaciones que integran la Línea 12 Tlahuac-Mixcoac”.

Aparatos de Vía

La Línea 12 de la Ciudad de México contará con 16 aparatos de vía en todo su trazo.

Los aparatos de vía tienen por objeto realizar bien el desdoblamiento o el cruce de las vías, aún cuando adoptan formas variadas, derivan todas ellas de los aparatos fundamentales siguientes:

El desvío, que permite el paso de los vehículos de una vía a otra (figura 1.1).

La entre vía, que permite realizar la conexión entre dos desvíos (figura 1.2).



Figura 1.1 Aparato de Vía "desvío"

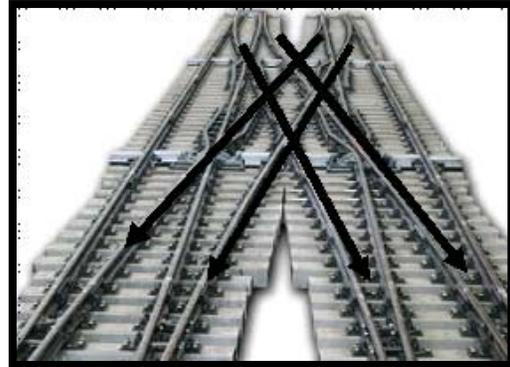


Figura 1.2 Aparato de Vía "Entre Vía"

La siguiente tabla muestra la ubicación y cadenamientos de los 16 aparatos de vía que tendrá la Línea 12 en toda su longitud.

Ubicación	Cadenamiento inicial	Cadenamiento final
Tláhuac-Cola de Maniobra	3+952.989	4+261.671
Tláhuac 1	4+214.806	4+282.519
Tláhuac 2	4+504.695	4+586.957
Zapotitlán	6+920.806	6+963.022
Periférico 1	11+946.577	11+988.793
Periférico 2	12+284.291	12+326.507
Periférico 3	12+681.165	12+723.382
Periférico-Vía de Fosa	12+988.793	13+289.291
ESIME Culhuacan 1	15+733.048	15+775.264
ESIME Culhuacan 2	15+989.262	16+031.478
Vía "Z" 1	19+785.122	19+852.801
Vía "Z" 2	20+032.801	20+100.477
Ermita 1	22+636.163	22+667.610
Ermita 2	23+202.906	23+243.543
Zapata	26+275.548	26+316.995
Mixcoac	28+179.620	28+262.435

Tabla 1.2 "Ubicación de los 16 aparatos de Vía que tendrá la Línea 12".

1.2 Estructura Organizacional del Consorcio

Con relación a la licitación pública internacional en la modalidad de proyecto integral a precio alzado y tiempo determinado de fecha de enero del 2008. Las empresas ICA, ALSTOM y CARSO presentaron su propuesta de manera grupal, en junio del 2008 y el Gobierno del Distrito Federal dio la adjudicación a este consorcio en julio del mismo año. A continuación se hace una descripción de las tres empresas involucradas:

Ingenieros Civiles Asociados de S.A. de C.V.

Ingenieros Civiles Asociados ICA, la empresa de ingeniería, procuración y construcción más grande de México, fue fundada en 1947 y ha realizado obras de construcción e ingeniería en 21 países.

ALSTOM

ALSTOM (antiguamente GEC-Alsthom, y en un principio Alsthom) es una corporación francesa centrada en el negocio de la generación de electricidad y la fabricación de trenes y barcos. ALSTOM además diseña y produce sistemas de Metro de alta calidad y funcionalidad.

Grupo CARSO

Es uno de los conglomerados más importantes de América Latina. Controla y opera gran cantidad de empresas de los ramos industrial, comercial y de infraestructura y construcción; también se encuentra en otros sectores, como el automotriz y el minero.

Los trabajos tanto de obra civil como de sistemas electromecánicos están distribuidos dentro del consorcio de la siguiente forma:

Obra Civil

- ICA 75%
- CARSO 25%

Sistemas Electromecánicos

- ALSTOM 100%

La construcción de la Línea 12 se realiza en dos etapas: la primera, parte de Tláhuac a Atlalilco (Ver figura 1.3), las labores se iniciaron en Agosto del 2008 y se pretende ponerla en operación el próximo 31 de diciembre de 2010, la segunda etapa se considera de Atlalilco a Mixcoac (Ver figura 1.4), en donde las labores iniciaron con la excavación del tramo 1 (lumbreira de entrada-Estación Ermita) el 20 de enero de 2010 y se pretende ponerla en operación el día 31 de diciembre de 2011.

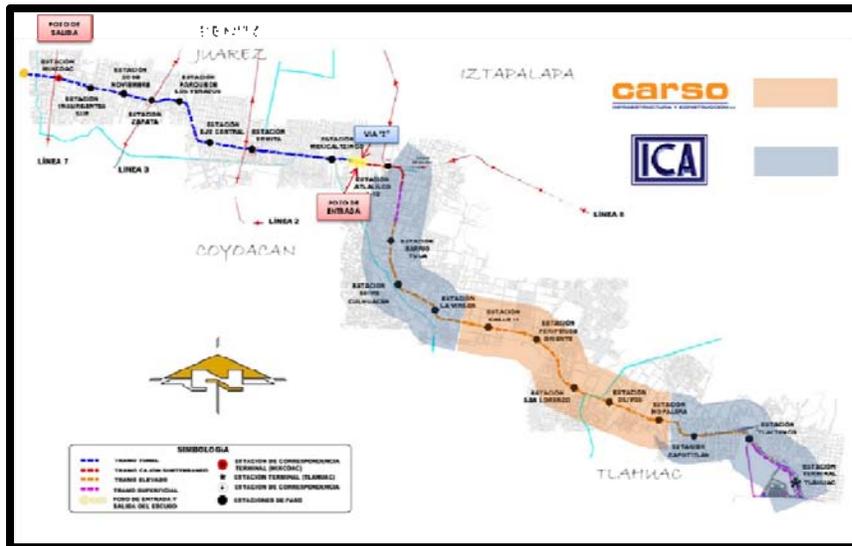


Figura 1.3 Construcción de la primera etapa

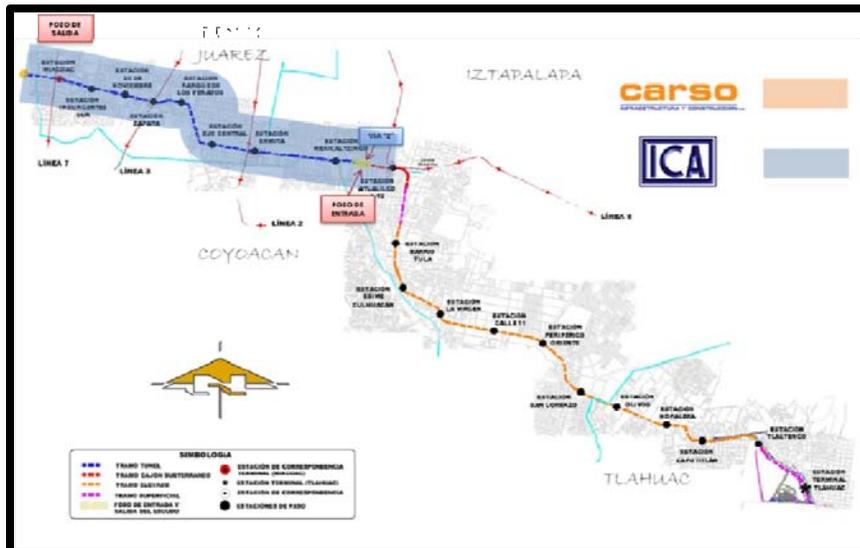


Figura 1.4 Construcción de la segunda etapa

CAPÍTULO II PERFIL ESTRATIGRAFICO

2.1 Trazo y Perfil del Túnel Mexicaltzingo-Mixcoac.

Antes de que un túnel se pueda planear en líneas generales y diseñar a detalle, se deberá reunir información sobre los aspectos físicos del proyecto, además de los estudios económicos, los cuales tienen una relación directa. La necesidad de una detallada y extensa investigación es probablemente mayor que para la mayoría de otros tipos de construcción. La construcción de túneles es altamente costosa, pero lo sería más si se ahorrara en investigaciones necesarias para hacer una mejor selección de su trazo y perfil.

Para determinar el trazo y perfil del túnel se deberá contar con la topografía del área en cuestión hasta el más amplio grado práctico, junto con los antecedentes de cualquier alteración importante del terreno, así como los datos geológicos y geotécnicos. Al proyecto general de los posibles trazos y perfiles basados en la topografía le sigue un examen detallado de las posibles alternativas hasta el punto en que se pueda seleccionar el alineamiento más favorable y evidente.

La importancia de disponer de un buen sistema de control de trazo y perfil en el área de construcción del túnel es por que proporciona la base de la localización de las estructuras, instalaciones, vías de acceso, etc., tanto en la etapa de proyecto como en la de construcción.

2.1.1 Trazo

El trazo de la Línea 12 Tláhuac-Mixcoac está basado en las Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México.

El inicio del tramo se encuentra en el cadenamamiento 3+936.063, referido a los talleres de la estación terminal Tláhuac y el final referido a la cabecera poniente de los andenes de la estación Mixcoac en el cadenamamiento 28+896, con una longitud aproximada total de 24,959.937m.

En su concepto general el trazo está dividido en cuatro tramos, diferenciándose entre ellos por su sección tipo: superficial, elevada, cajón subterráneo y túnel.

El primer tramo con la sección superficial se desarrolla paralelo al canal de salida de los talleres de la estación Tláhuac, hasta la intersección con la avenida Tláhuac y la estación de Tlaltenco. Una vez entrando a la avenida Tláhuac el trazo del metro queda centrado hasta la intersección con la avenida Ermita Iztapalapa. Hasta la altura del cruce con la Calzada Taxqueña, ubicación de la estación Barrio Tula, la sección es elevada. Tras ésta estación y sobre la misma avenida Tláhuac, a la altura de la calle Moctezuma es donde la línea se entierra pasando a ser una sección en cajón subterráneo.

La sección en cajón subterráneo se mantiene hasta la altura de la calle Centeno, pasada la cual se ubica la lumbrera de entrada del escudo. Desde esta lumbrera, el trazo se desarrolla en sección tipo túnel hasta poco antes de la estación Mixcoac, excluyendo las estaciones y los abocinamientos ejecutados a cielo abierto. El último tramo se ejecuta como túnel en mina.

El trazo definitivo de la Línea 12, es el resultado de un análisis y estudio profundo de movilidad y captación de usuarios, además de ser condicionado por algunos elementos existentes, tales como:

- Obras inducidas
- Asentamientos urbanos
- Tránsito vehicular
- Condiciones del subsuelo
- Topografía del terreno
- Afectaciones
- Vialidades existentes
- Correspondencias
- Arqueología

Aparte de dichas condicionantes, el trazo debe cumplir ciertas especificaciones para cada uno de sus elementos. Los elementos del trazo son la tangente, la curva circular y la curva de transición, en donde cada uno tiene diferentes efectos en la operación, velocidad, confort y seguridad del usuario y es por esta razón que se debe de estudiar cada uno de estos elementos por sí solo ya que son de gran importancia para el trazo.

El diseño de la Línea 12, se ha realizado adoptando los parámetros recomendados para los elementos del trazo, adaptándolos a la velocidad del proyecto establecida en las bases de diseño (publicadas en Septiembre del 2008).

La tabla 2.1 resume las especificaciones de trazo para el proyecto y construcción de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

		Especificaciones (1)	Bases de diseño	Valores Aplicados	
TRAZO	Radio de curvatura horizontal	R_{\min} Vías principales [m] R_{\min} Vías secundarias [m]	150 60	200 70	250 (2) 70
	Longitud mínima	L_{\min} Tangente [m]	16	No existe	$V_p/2$ (3)
	Sobreelevación	h_{\max} Peralte práctico[mm]	160	No existe	160
		h_{\max} Peralte teórico[mm]	310	No existe	310
		Pend. Peralte máx. [mm/m]	3	No existe	3
		Variación del peralte[mm/s]	No existe	No existe	50
Aparatos y estaciones.		En tangente	No existe	En tangente	

Tabla 2.1 "Especificaciones de trazo para el proyecto y construcción de la Línea 12".

1. La normativa utilizada es la recogida en las "Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México".
2. Longitud mínima entre dos curvas consecutivas.

El valor aplicado para la velocidad de proyecto son las siguientes:

- La velocidad máxima de diseño del proyecto según las "Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México" es $V_p = 90$ km/h.
- La velocidad máxima de servicio del proyecto según las "Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México" es $V_p = 85$ km/h.

Como ya se menciona en el capítulo I, la Línea 12 está compuesta por 20 estaciones, que van desde Tlahuac hasta Mixcoac; la tabla 2.2 indica los cadenamientos y distancias entre las estaciones que conforman el trazo de la sección tipo túnel.

ESTACIÓN	CADENAMIENTO		
	INICIO	PM	FINAL
LUMBRERA DE ENTRADA			20+354.35
Distancia [m]	519.201		
MEXICALTZINGO	20+873.551	20+950.551	21+027.551
Distancia [m]	1767.053		
ERMITA	22+794.604	22+871.604	22+948.604
Distancia [m]	924.429		
EJE CENTRAL	23+873.033	23+950.033	24+027.033
Distancia [m]	1340.946		
PARQUE DE LOS VENADOS	25+367.979	25+444.979	25+521.979
Distancia [m]	482.237		
ZAPATA	26+004.216	26+081.216	26+158.216
Distancia [m]	446		
20 DE NOVIEMBRE	26+604.216	26+681.216	26+758.216
Distancia [m]	710.512		
INSURGENTES SUR	27+468.728	27+545.728	27+622.728
Distancia [m]	180.423		
LUMBRERA DE SALIDA			27+803.151
LONGITUD DEL TÚNEL [m]	6370.801		
Distancia [m]	487.381		
MIXCOAC	28+290.532	28+367.532	28+444.532

Tabla 1.2 "Cadenamientos y distancias entre las estaciones que conforman el trazo de la sección tipo túnel".

Con base en la tabla anterior la longitud total a excavar con escudo es 6,370.801m, que es la distancia que existe entre la lumbrera de entrada que se encuentra en el Cadenamiento 20+354.35 un poco antes de la estación Mexicaltzingo y la lumbrera de salida que está en el Cadenamiento 27+803.151, después de la estación Insurgentes Sur, esta longitud no corresponde a la diferencia de los dos cadenamientos ya que el escudo no excava la zona de las estaciones, porque en estas se harán excavaciones a cielo abierto.

La figura 2.1 muestra el trazo definitivo de la Línea 12, dividido en tramos diferenciándose entre ellos por su sección tipo, así como la longitud total por excavar, las estaciones y correspondencias que la Línea tendrá.

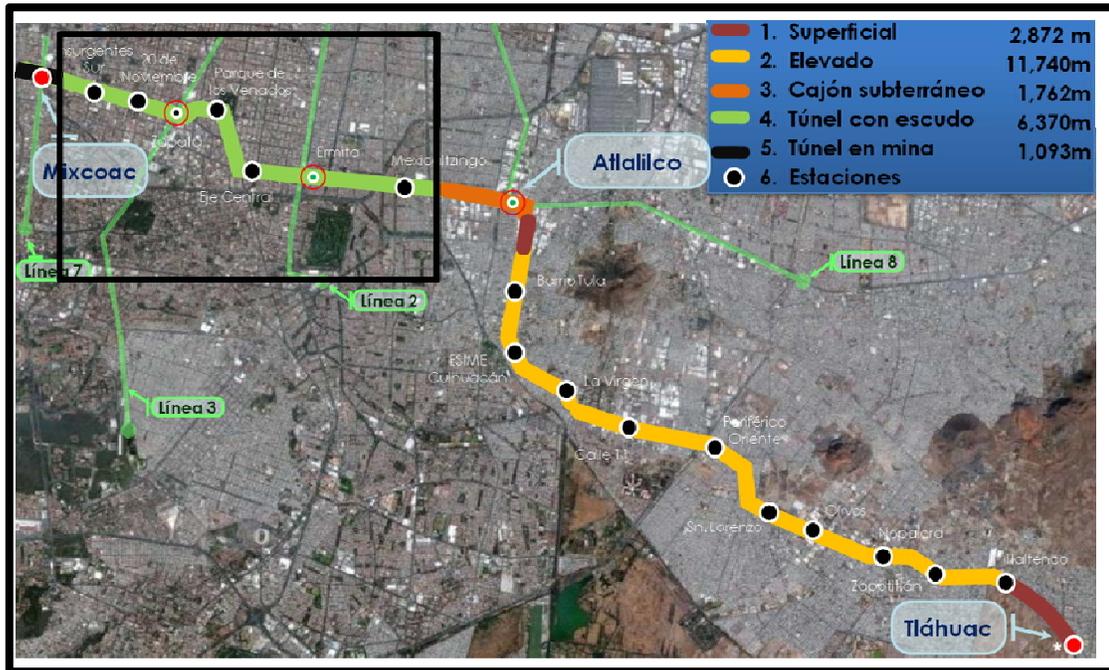


Figura 2.1 Trazo Definitivo Línea 12

2.1.2 Perfil

El perfil de la Línea 12 Tláhuac-Mixcoac está basado en las Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México.

El perfil definitivo de la Línea 12, es el resultado de un análisis y estudios profundo de los diferentes condicionantes de diseño de la Línea, tales como:

- Topografía del terreno
- Obras inducidas
- Geotecnia
- Líneas existentes
- Condicionantes de operación
- Condicionantes de los aparatos de vía
- Arqueología

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

La tabla 2.3 resume las especificaciones de perfil para el proyecto y construcción de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

		especificaciones (1)	Bases de Diseño	Valores Aplicados
PERFIL	Radio de Curvatura Vertical	R_{\min} deseables [m] a_v Aceleración vertical [m/s^2]	2500 ($v=80$) No existe	No existe 3125 ($v=90$) No existe 0.2
	Longitud Mínima	L_{\min} Rampa con pendiente uniforme [m]	16	No existe $V_p/2$
		S_{\max} [%]	4	4 2
		S_{\min} Tramo interestación en túnel y cajón subterráneo o superficial [%]	0.2	No existe 0.2
		S_{\min} Tramo interestación elevado [%]	0.3	No existe 0.3
	Pendientes	Estaciones [%]	0	No existe 0
		Vías de estacionamiento [%]	0	No existe 0
		Aparatos de vía [%]	2	No existe 0
		En talleres [%]	0	No existe 0

Tabla 2.3 "Especificaciones de perfil para el proyecto y construcción de la Línea 12".

1. La normativa utilizada es la recogida en las "Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México".
2. Longitud mínima entre dos curvas consecutivas.

Los valores aplicados para la velocidad de proyecto son los mismos que se utilizaron para el trazo del proyecto.

El inicio de perfil se encuentra en el cadenamamiento 3+936.063 el cual tiene una cota de 2,236.15 m.s.n.m., en donde se encuentra la cola de maniobra y la estación terminal Tláhuac, el final del perfil se encuentra en el cadenamamiento 28+896 y tiene una cota de 2,246.35 m.s.n.m. referido a la cabecera poniente de los andenes de la estación Mixcoac.

A continuación se hace un breve resumen del perfil en el tramo con sección tipo túnel.

En el 20+354.325 finaliza el tramo subterráneo en cajón e inicia el túnel. La rasante del túnel parte inicialmente en un tramo horizontal para facilitar la maniobra del escudo hasta el cadenamiento 20+396.337, posteriormente continúa con una pendiente del 0.30% hasta el cadenamiento 20+729.670 a partir del cual se mantiene horizontal hasta el 21+133.683 en este tramo se encuentra la estación Mexicaltzingo. Tras este punto la rasante desciende con el -1.0% hasta el cadenamiento 21+417.252 y posteriormente con un -0.2% hasta el 22+359.695, con el fin de pasar bajo el colector y encauzamiento del río Churubusco. En todo el perfil del túnel se ha intentado mantener una cobertura mínima de 8 metros posteriormente la rasante sube con 1.0% hasta el cadenamiento 22+571.752 de forma que se llegue a la cota necesaria para la ubicación de la estación Ermita. A continuación sigue un tramo horizontal hasta el cadenamiento 23+298.934, en el que se ubica la estación Ermita y dos aparatos de vía. Después de pasar bajo la calzada Tlalpan, la pendiente asciende con el 0.45% hasta el 23+798.934. A partir de este punto y hasta el 24+052.909 es horizontal. En este tramo se encuentra la estación Eje Central. Posteriormente la rasante desciende con una pendiente del -0.65% hasta el cadenamiento 24+493.401 a partir del cual vuelve a elevarse con una pendiente del 0.20% hasta el 24+906.327 y del 1.2% a partir de este punto y hasta el 25+334.439, le sigue un tramo horizontal que comienza en el cadenamiento anterior y finaliza en el 25+566.100 en este tramo se encuentra la estación Parque de los Venados. El perfil se eleva posteriormente con una pendiente del 0.60% hasta el 25+786.100, a partir de donde se vuelve nuevamente horizontal hasta el cadenamiento 26+178.693 en este tramo se encuentra la estación Zapata. En él, el perfil está condicionado por la presencia de la Línea 3, que discurre bajo la Avenida Universidad, bajo la que pasa la línea 12.

Tras este punto la rasante se eleva con una pendiente del 1.2% hasta el 26+250.794, donde el perfil se vuelve a situar en horizontal para poder alojar un aparato de vía, este tramo horizontal continúa hasta el 26+373.046. De nuevo la rasante se eleva con una pendiente del 2.0% hasta el 26+553.286. A partir de este punto y hasta el 26+834.377 el perfil es horizontal, en este tramo se encuentra la estación 20 de Noviembre. Siguiendo el perfil del terreno natural, la rasante se eleva de nuevo con una pendiente del 1.2% hasta el cadenamiento 27+412.711. A partir de este punto y hasta el 27+657.253 es horizontal. En este tramo se encuentra la estación Insurgentes Sur. Posteriormente la rasante se eleva nuevamente con una pendiente del 2.0% hasta el cadenamiento 28+143.253 en este tramo (en el cadenamiento 27+803.151) se ubica la lumbrera de salida del escudo.

A partir del punto donde termina la pendiente del 2.0% y hasta el final del tramo el perfil es horizontal. En este tramo se encuentra un aparato de vía, la estación Mixcoac y la cola de maniobra, donde comienza el depósito Mixcoac. En él, el perfil está condicionado por la presencia de la Línea 7, bajo la avenida Revolución, sobre la que pasa la Línea 12.

La tala 2.4 resume los parámetros geométricos aplicados y el listado de alineaciones de la Línea 12 en el tramo Mexicaltzingo-Mixcoac.

ID	Pendiente %	Longitud Curva		Vértice	
		Vertical [m]	Radio [m]	Origen	Cota [m]
Mexicaltzingo	0	45	4500	21133.683	2221.15
40	-1	40	5000	21417.252	2218.314
41	-0.2	45	3750	22359.695	2216.429
42	1	50	5000	22571.752	2218.55
Ermita	0	45	10000	23298.934	2218.55
44	0.45	45	10000	23798.934	2220.8
Eje Central	0	39	6000	24052.909	2220.8
46	-0.65	42.5	5000	24493.401	2217.937
47	0.2	50	5000	24906.327	2218.763
48	1.2	48	4000	25334.439	2223.9
Parque de los V.	0	30	5000	25566.1	2223.9
50	0.6	30	5000	25786.1	2225.22
Zapata	0	37.5	3125	26178.693	2225.22
52	1.2	37.5	3125	26250.794	2226.085
53	0	70	3500	26373.046	2226.085
54	2	62.5	3125	26553.286	2229.69
20 de Noviembre	0	45	3750	26834.377	2229.69
56	1.2	45	3750	27412.711	2236.63
Insurgentes Sur	0	62.5	3125	27657.253	2236.63
58	2	62.5	3125	28143.253	2246.35
Mixcoac	0				

Tabla 2.4 "Parámetros geométricos de alineaciones de la Línea 12 Mexicaltzingo-Mixcoac"

Como se podrá observar en el cuadro resumen anterior todas las especificaciones que se tenían para el perfil se cumplen (radios de curvatura vertical y pendientes).

La figura 2.2 muestra el perfil completo de la Línea 12, muestra los cuatro tipos de secciones que conforman a la Línea. La longitud de la sección tipo túnel incluye la excavada con escudo y con método convencional (tipo mina).

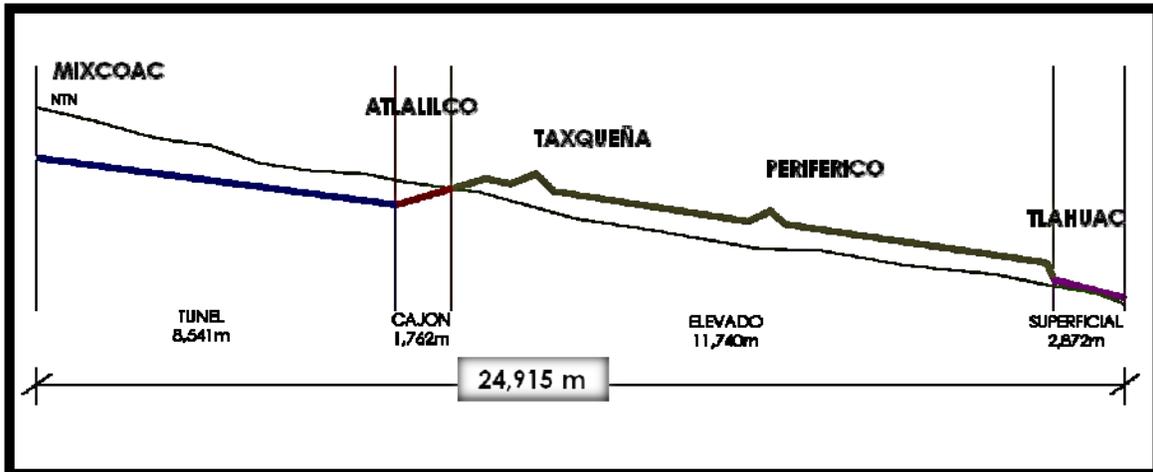


Figura 2.2 Perfil de la Línea 12

2.2 Perfil Estratigráfico

Una vez que se tiene definido el trazo y el perfil del túnel tenemos que saber con qué tipo de suelo vamos a trabajar y es por esta razón que nos vemos en la necesidad de conocer el perfil estratigráfico del proyecto, ya que nos servirá de base para seleccionar el tipo de escudo y el revestimiento del túnel.

El perfil estratigráfico indica una sección vertical a través del terreno, que muestra los espesores y el orden de sucesión de los estratos. El termino estrato se aplica a una capa de suelo relativamente bien definida, que se halla en contacto con otras capas de características similares o diferentes.

Para conocer el perfil estratigráfico del trazo del túnel los medios principales que se utilizan son las pruebas de laboratorio y las pruebas en "situ", cuyo objetivo es identificar y localizar con exactitud cada estrato importante para el trazo del túnel propuesto.

Conforme a la zonificación geotécnica marcada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCG-04), del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-04), el tramo Mexicaltzingo-Nave de

depósito en Mixcoac de la línea 12 del Metro se ubica principalmente en las zonas II y III, con una pequeña parte en la zona I.

Y recordando que la zona I o de Lomas se encuentra formada por rocas o suelos generalmente firmes depositados fuera del ambiente lacustre, en los que pueden existir superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto, o cohesivos realmente blandos, la zona II o de transición se caracteriza porque los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad o menos y está constituida principalmente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre y la zona III se encuentra caracterizada por la presencia de potentes depósitos de arcilla de alta compresibilidad, separadas por capas arenosas de compacidad media a alta, con espesores variables desde unos centímetros a varios metros y los depósitos lacustres pueden estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados, y rellenos artificiales. Podemos decir que la Línea 12 estará situada en una zona muy compresible prácticamente en toda su extensión, en donde los asentamientos en superficie estarán presentes a cada instante.

La figura 2.3 fue tomada del las NTCG-04 y nos muestra el paso de la línea 12 a través de las diferentes zonas geotécnicas.

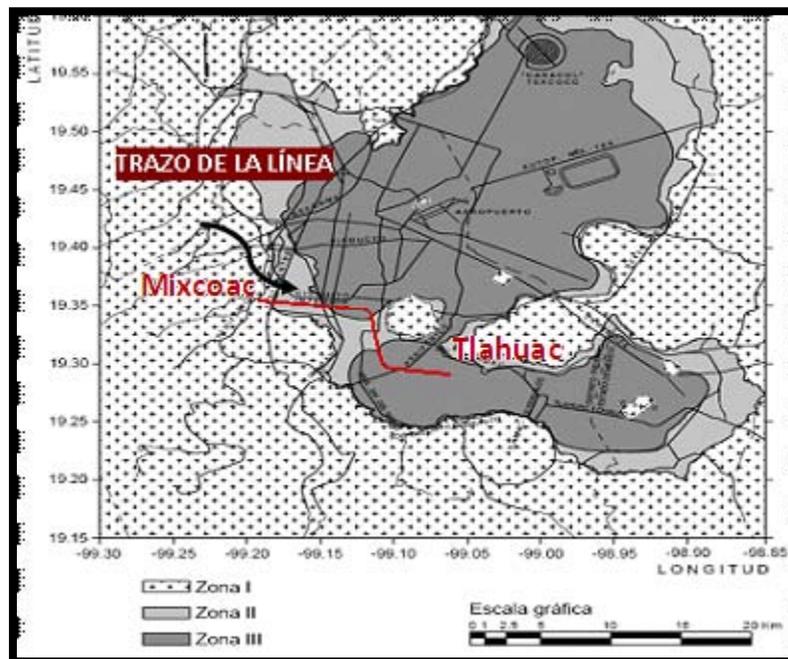


Figura 2.3 Paso de la línea 12 por diferentes zonas geotécnicas

La figura 2.4 muestra someramente el perfil estratigráfico del trazo de sección tipo túnel de la Línea 12, como se podrá observar coincide con lo señalado por la zonificación de las NTCG-04; el perfil estratigráfico a detalle se encuentra en el anexo 1.a. “Perfil estratigráfico definitivo desde eje 3 oriente hasta Mixcoac, tramo Atlalilco-Mixcoac”.

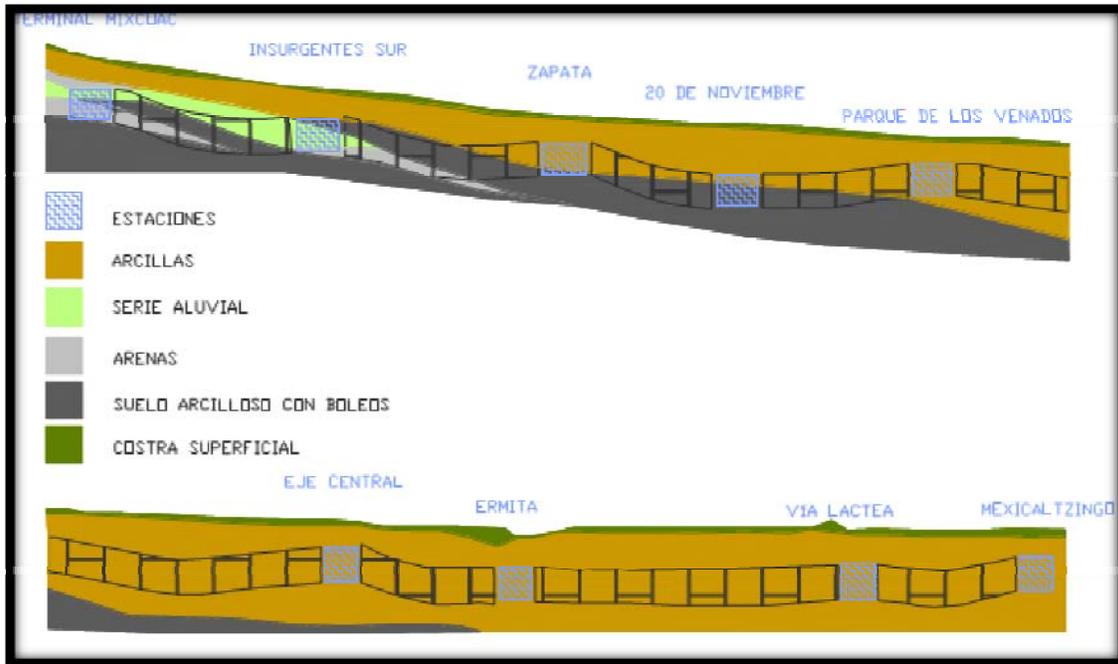


Figura 2.4 Perfil Estratigráfico

CAPÍTULO III SELECCIÓN DEL ESCUDO.

La selección del escudo es una de las partes más importantes en el proceso de excavación del túnel, ya que de esto dependerá la eficiencia que el escudo llegue a tener.

Para poder elegirlo adecuadamente debemos de tomar en consideración varios parámetros, que nos ayudarán para seleccionar claramente cuál es el ideal, ya que cada túnel tiene características propias.

3.1 Parámetros para la Selección del Escudo

Los siguientes parámetros no solo van dirigidos hacia la selección del tipo de escudo, sino también a elegir de entre diversos fabricantes, ya que generalmente no solo tenemos la oferta de uno solo y debemos de saber elegir al mejor de ellos.

- Trazo y Perfil: Nos van a servir para indicarnos la longitud total a excavar por el escudo, el ángulo de giro (tanto horizontal como vertical) que debe ser capaz de brindar el escudo, tomando en cuenta:
 - Distancia entre lumbreras.
 - Profundidad de lumbreras.
 - Radios de curvatura mínimos horizontales y verticales.
 - Pendiente.

- Geométrico: Este parámetro nos ayudará en el dimensionamiento adecuado del escudo, tomando en cuenta:
 - Diámetro interior terminado del túnel.
 - Diámetro de excavación.
 - Diámetro exterior de dovela.
 - Diámetro interior de dovela.
 - Espesor de dovela.
 - Ancho de dovela.
 - Número de segmentos del anillo de dovelas.
 - Espesor del revestimiento definitivo.
 - Diámetro de lumbreras.

- Geotécnico: Este es un parámetro muy importante para seleccionar el tipo de escudo ya que con base en la información geotécnica podemos elegir entre un escudo para suelo blando (EPB), duro (TBM, topo) o mixto (mixshield), tomando en cuenta:
 - Perfil geológico.
 - Características físicas y mecánicas de suelos y rocas.
 - Presiones de agua y tierra en el frente de excavación.
 - Tamaño máximo de boleos.
 - Mineralogía de las rocas.
 - Grado de abrasión de las rocas.

Además de tomar en cuenta estos parámetros debemos de realizar diversos análisis que nos ayudarán a elegir al adecuado de entre varios fabricantes, como los siguientes:

- Análisis de la Propuesta Económica del Fabricante.

Es conveniente elaborar un cuadro comparativo entre los elementos económicos que incluye la propuesta:

- Precio del escudo.
- Precio de los diferentes sistemas.
- Precio de los equipos opcionales.
- Fletes.
- Impuestos de importación.
- Valor de recompra.
- Forma de pago.
- Financiamiento.

- Servicio post venta.
- Capacitación.
- Viáticos.
- Transportes y hospedajes.
- Garantías.

- Análisis de la Propuesta Técnica del Fabricante.

Es necesario elaborar un cuadro comparativo entre las diferentes propuestas de los fabricantes de escudos, de manera que se analice cada uno de los elementos que componen la máquina, para cada tramo de geología similar.

CONCEPTO	TRAMO 1 FABRICANTE "A"	TRAMO 1 FABRICANTE "B"	TRAMO 1 FABRICANTE "C"
1.-TIPO DE ESCUDO	TBM EPB	TBM EPB	TBM EPB
● DIÁMETRO SECCION FRONTAL	10,200 mm		
● DIÁMETRO SECCIÓN FALDÓN.	10,170 mm		
● LONGITUD DEL ESCUDO.	11,383 mm		
● PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN	2.5 BAR		
● SENSORES DE PRESIÓN DE TIERRA.	6		
2.- FALDÓN			
● TIPO DE FALDÓN	ARTICULADO		
● LINEAS DE INYECCIÓN INTEGRADAS	SÍ		
● DIÁMETRO EXTERIOR	10,170 mm		
● SISTEMA DE SELLADO	3 CEPILLOS DE ALAMBRE		

Tabla 1.1 "Análisis de la propuesta técnica del fabricante"

El análisis de dicha propuesta técnica permite comparar:

- Componentes y mecanismos.
- Capacidades.
- Consumos. (electricidad, combustibles y lubricantes, herramientas de corte, etc.)
- Versatilidad para incrementar capacidad.
- Componentes incluidos y adicionales.
- Sistemas de control.
- Tiempos de fabricación.

- Análisis de Producción de las Máquinas.

Es necesario elaborar un programa para cada fabricante que incluya los tiempos que serán necesarios para las diferentes etapas de:

- Ensamble del escudo.
- Excavación de los primeros metros.
- Excavación de los metros subsecuentes.
- Llegada a la lumbrera de salida.

Lo anterior permite determinar el rendimiento promedio factible y por ende el número de máquinas que se requieren para poder cumplir con el programa de obra.

Una vez que se seleccionó el tipo de escudo y se finalizó el análisis (técnico, económico y de producción) de cada máquina ofertada se puede elegir correctamente la máquina y fabricante y empezar con el diseño de las instalaciones requeridas para el buen funcionamiento de la misma.

- Instalaciones en Túnel, Lumbrera y Superficie.

De acuerdo al tipo de máquina elegida y a sus demandas, es necesario determinar (diseñar) las instalaciones que se requieren para su operación:

- Energía eléctrica Fuerza.
- Energía eléctrica iluminación.
- Ventilación.
- Aire comprimido.
- Agua.
- Durmientes y vías.
- Tuberías de rezagas (si es el caso)
- Tolvas en superficie.
- Subestación eléctrica.
- Instalaciones de de control y comunicación.
- Elevador de personal.
- Planta generadora de emergencia.
- Transformadores.
- Muros de reacción.

Es conveniente determinar dichas instalaciones en conjunto con el fabricante de la máquina.

- Equipos Auxiliares.

Es necesario repasar con el fabricante el total de equipo auxiliar que se requiere para la adecuada operación de la máquina y sus capacidades:

- Locomotoras.
- Trucks de dovelas.
- Ventiladores.
- Etc.

El no realizar los análisis antes mencionados de manera minuciosa puede traer como consecuencia lo siguiente:

- Mala selección del escudo.
- Mal balance en los equipos de rezaga.
- Falta de capacidad en las instalaciones.
- Sobre costos por no haber estimado de manera adecuada el total de maquinaria auxiliar que se requiere.
- Sobre costo en las instalaciones en túnel, lumbrera y superficie.
- Sobre costo en los consumos.
- No lograr los rendimientos esperados.
- No soportar adecuadamente los precios unitarios durante su elaboración.

3.2 Tipo de Escudo Utilizado en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

El escudo utilizado en la Línea 12 es un EPB (Earth Pressure Balance), el desarrollo de las EPB comenzó en los años 70's en Japón. La primera EPB fue utilizada en Tokio en 1974, tenía un diámetro externo de 3.72 m. y fue manufacturado por una empresa Japonesa llamada IHI (Ishikawa-jima-Harmia).

Las características ideales que el suelo debe tener para que una EPB trabaje adecuadamente son las siguientes:

- Buena deformación plástica
- Consistencia suave
- Baja fricción interna
- Baja permeabilidad

3.2.1 Componentes del escudo EPB utilizado en la Línea 12

La figura 3.1 muestra los componentes del escudo EPB (EPB331-331) utilizado en la excavación de la línea 12.

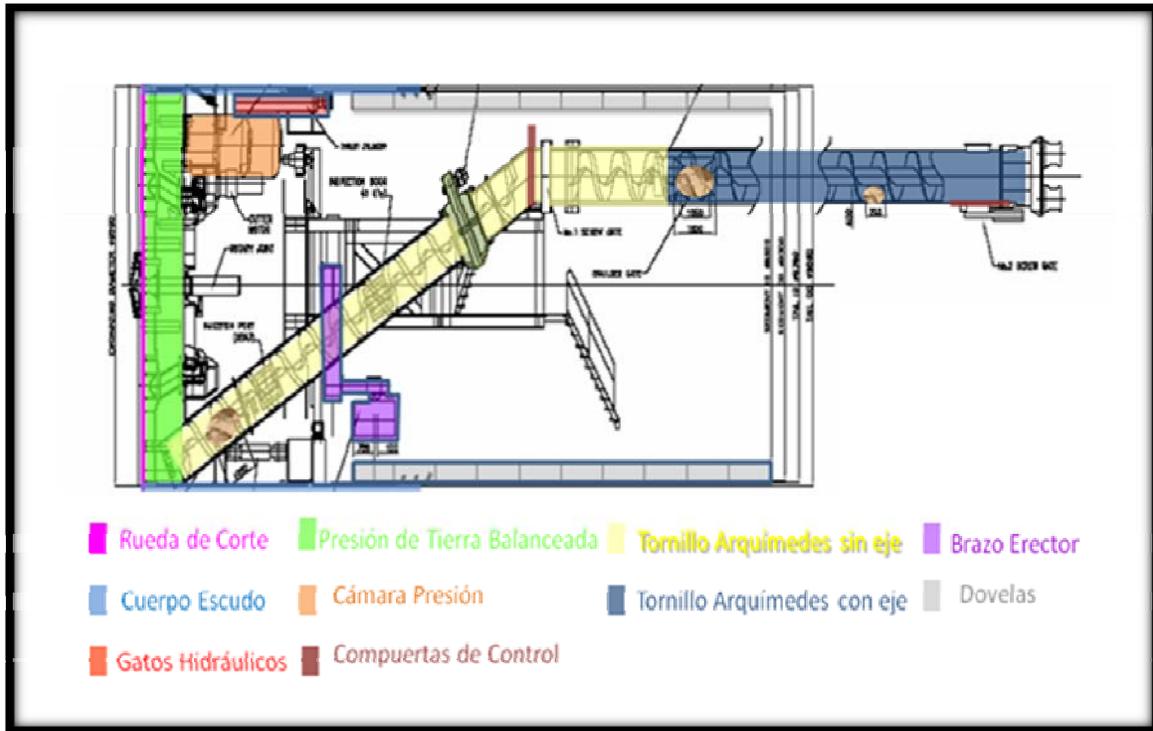


Figura 3.1 Componentes del EPB, utilizado en la excavación de la Línea 12.

El plano del escudo utilizado en la excavación de la Línea 12 lo pueden encontrar en el anexo 1.b “Escudo EPB (EPB331-331)”.

Para entender un poco más cómo es que funciona una Earth Pressure Balance (EPB), se describirá su forma de trabajo.

La figura 3.2 muestra de forma esquemática las principales fuerzas e interacciones en la excavación con escudo EPB. El proceso de excavación se inicia en el frente, donde las herramientas de corte giran con la rueda de corte (1) penetran y rompen el suelo del frente gracias al empuje transmitido a la cabeza cortadora (2) desde los cilindros de empuje del escudo (8). El primer objetivo es que el proceso de corte del suelo se haga de forma efectiva, con el mínimo desgaste de herramientas y el mínimo torque (1). Inmediatamente tras ser cortado, el material excavado debe ser capaz de fluir cómodamente a través de las aberturas de la cabeza de corte hacia la cámara de excavación y hasta el tornillo sinfín o la bomba de extracción. El buen flujo de material es necesario para garantizar un mínimo desgaste secundario de herramientas y una velocidad de avance constante y elevada.

En suelos inestables, es necesario aplicar presión en la cámara de excavación (3) con objeto de estabilizar el frente (como es el suelo de la Ciudad de México). Cuanto mayor es la presión del frente en la cámara (3), mayores serán el torque de la rueda de corte (1) y el desgaste de herramientas, lo cual puede acabar repercutiendo en una disminución de la velocidad de avance. La fuerza resultante de la presión en la cámara (4) reacciona contra el mamparo estanco que además debe ser ayudada por el empuje de los cilindros (8) para enterrarse más en el terreno. La fuerza resultante de presión en la cámara (4), no sólo depende de la presión que se aplique para sostener el frente, sino que depende también de la densidad del material excavado. Por ello, es de crucial importancia mantener la densidad del material en la cámara suficientemente baja, tanto para minimizar la fuerza de empuje (8), como para permitir un adecuado flujo del material a través de la cámara.

Otras fuerzas que deben ser contrarrestadas por la fuerza de empuje total (8) son las fuerzas de fricción con el suelo (5), que pueden ser minimizadas con un adecuado guiado de la máquina y verificando el correcto posicionamiento del faldón del escudo. Además, con la presión a lo largo del escudo (7), que es función de las presiones de frente (3) y de inyección de mortero (6), se puede controlar la deformación del suelo alrededor del escudo y con ello se puede reducir la fricción.

La inyección de mortero (6) no sólo permite controlar la deformación del suelo, sino que ofrece al revestimiento de dovelas el confinamiento necesario para trabajar como anillo. La calidad del revestimiento depende, finalmente también, de la magnitud y distribución de las fuerzas de los cilindros de empuje (8) que, como hemos visto, resultan de todo el proceso.

En definitiva, se puede concluir que existe una estrecha interacción entre los procesos de la excavación con escudo y, al mismo tiempo, con las propiedades del suelo. Para que el Control de Procesos sea efectivo, es necesario comprender y dominar todos los procesos y las interacciones existentes en todo momento.

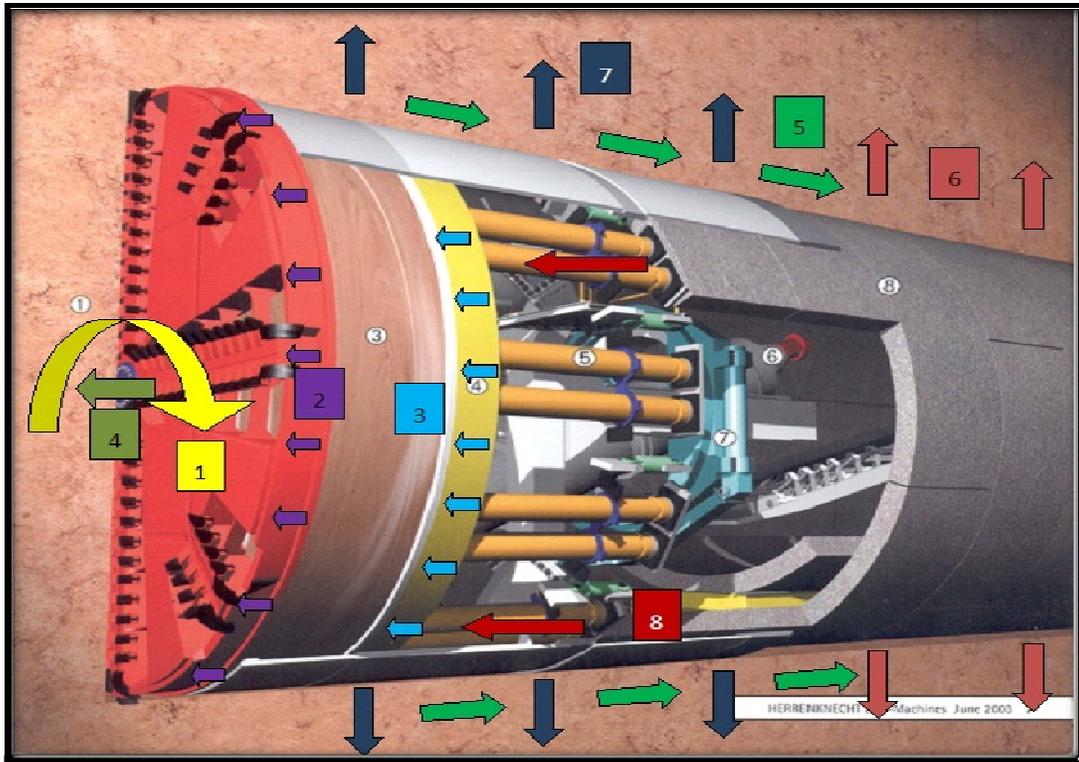


Figura 3.2 Fuerzas e interacciones en la excavación con escudo EPB

3.3 Características del Escudo Utilizado en la Línea 12.

La empresa Norteamericana Robbins fue la encargada del diseño, ensamble y puesta en marcha del escudo EPB (EPB331-331) utilizado en la Línea 12, a continuación se presentan las condiciones más importantes de diseño y los componentes del escudo.

CONDICIONES DE DISEÑO DEL ESCUDO

I. Geología	a) Geología	Arcilla, Arena y Roca
	b) Tamaño máximo de roca	800 mm.
II. Alineación del Túnel	a) Longitud del túnel	6,370.801m.

b) Radio mínimo de curva	
i) Vertical	2500 m.
ii) Horizontal	250 m.
c) Gradiente máximo	20 %

III. Dovelas

	Dovelas de concreto reforzado
a) Tipo	
b) Diámetro externo	9,910 mm.
c) Diámetro interno	9,110 mm.
d) Espesor	400 mm.
e) Largo	1,500 mm.
f) Número de dovelas por anillo	7 piezas+1K
g) Peso máximo por anillo	45,000 kg.

COMPONENTES DEL ESCUDO

I. Cuerpo del escudo

a) Diámetro exterior del faldón	10,170 mm.
b) Diámetro interior del faldón	9,990 mm.
c) Espesor del faldón	90 mm.
d) holgura del Faldón	40 mm.
e) Longitud total	11,383 mm.
f) Sello del faldón	
i) Tipo	Tipo cepillo de alambre
ii) Filas	3

II. Empuje

a) Número de cilindros de empuje	28
b) Empuje unitario	3,000 kN
c) Empuje total	84,000 kN
d) Extensión máxima de cilindros	2,300 mm
e) Velocidad nominal de extensión	53 mm/min
f) Velocidad máxima de extensión	100 mm/min

III. Articulación

a) Tipo	Plana activa
b) Radio de curvatura mínimo	250 m.
c) Giro	
i) Horizontal	2°
ii) Vertical	0.5°
d) Empuje total	20,300 kN

IV. Cabeza cortadora

a) Tipo	Spoke
b) Diámetro de excavación	10,200 mm

V. Especificaciones de la cabeza cortadora

a) Tipo de energía	Eléctrica
b) Potencia de la cabeza cortadora	2,280 kW
c) Velocidad máxima	2 rpm
d) Fuerza de torsión máxima	20,300 kNm

VI. Tornillo sinfín No. 1

a) Tipo	Sin eje
b) Tipo de manejo	Hidráulico
c) Diámetro interno de la cubierta	1,200 mm
d) Tamaño máximo de piedra	800 mm
e) Velocidad máxima	5 rpm
f) Fuerza de torsión máxima	300 kNm
g) Capacidad	338 m ³ /h ($\eta=100\%$)
h) Compuerta	1, accionada hidráulicamente

VII. Tornillo sinfín No.2

a) Tipo	
i) Parte frontal	Sin eje
ii) Parte trasera	Con eje
b) Tipo de manejo	Hidráulico
c) Diámetro interno de la cubierta	1,200 mm
d) Tamaño máximo de piedra	
i) Parte frontal	800 mm
ii) Parte trasera	400 mm
e) Velocidad máxima	6 rpm

f) Fuerza de torsión máxima	300 kNm
g) Capacidad	338 m ³ /h ($\eta=100\%$)
h) Compuerta	1, accionada hidráulicamente

VIII. Bomba de rezaga

a) Tipo	Bomba pistón
b) Capacidad	180 m ³ /h
c) Cantidad	2

IX. Erector de dovelas

a) Velocidad máxima	2 rpm
b) Ángulo de giro	$\pm 220^\circ$
c) Movimiento radial	1,065 mm
d) Movimiento axial	850 mm
e) Grados de Libertad	6
f) Mecanismo de sujeción	Vacio

X. Puertos de inyección

a) Cabeza cortadora	6 puertos de $\phi 40\text{mm}$.
b) Mamparo	20 puertos de $\phi 50\text{mm}$.
c) Cuerpo del escudo	12 puertos de $\phi 50\text{mm}$.
d) Tornillo sinfín	7 puertos de $\phi 50\text{mm}$.

SISTEMA BACKUP

I. Carros

a) Tipo	Forma de portal
b) Cantidad	6 carros
c) Longitud total	90 metros

II. Sistema de Inyección

		Inyección simultanea a través del faldón
a) Tipo		
b) Mortero		
i) Tanque agitador		
Capacidad		15 m ³
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		200 l/min
Cantidad		2
c) Acelerante		
i) Tanque		
Capacidad		1.5 m ³
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		20 l/min.
Cantidad		2

III. Sistema de Espuma¹

a) Agente		
i) Tanque		
Capacidad		2 m ³ .
Cantidad		1
b) Solución		
i) Tanque agitador		
Capacidad		8 m ³
Cantidad		1
ii) Bomba		
Gasto		30 l/min
Cantidad		6

IV. Sistema de agua industrial

a) Tanque		
i) Capacidad		15 m ³
ii) Cantidad		1

¹ La espuma se inyecta cuando el material por excavar contiene boleas, con la finalidad de que la espuma actúe como aglomerante, garantizando así la trabajabilidad del material excavado. La espuma se inyectará a partir de la estación parque de los venados ya que se empezará a trabajar con boleas, actualmente solo se le inyecta agua al frente.

- b) Bomba
 - i) Gasto 200 l/min
 - ii) Cantidad 4

V. Sistema de aire comprimido

- a) Compresor
 - i) Gasto 8.2 m³/min
 - ii) Cantidad 2

VI. Ventilación por ventilador

- a) Flujo 600 m³/min
 - b) Diámetro del ducto 800 mm.
-

CAPÍTULO IV SISTEMA DE SOPORTE DEL TÚNEL

El revestimiento de un túnel es básicamente una estructura instalada dentro del túnel. La función del revestimiento puede ser estructural (soporte del terreno), funcional (como evitar el flujo de agua a través de este), o puede proporcionar un acabado arquitectónico. La mayoría de los revestimientos de túneles son de concreto aunque en ciertas condiciones se usa el acero. El concreto a su vez puede ser vaciado en obra, instalado usando segmentos prefabricados o proyectado como en el caso del shotcrete.

El revestimiento puede estar integrado por un primario más un final o solo un revestimiento único, el revestimiento primario es el sistema de soporte de un túnel que debe garantizar la estabilización de la excavación a corto plazo, así como la seguridad de los trabajadores hasta la colocación del revestimiento final, el revestimiento final, es el sistema de soporte definitivo de un túnel que debe garantizar una adecuada seguridad estructural, absorbiendo las cargas de servicio de acuerdo con los criterios establecidos en el diseño; el revestimiento único como su nombre lo dice, hace el trabajo tanto del revestimiento primario como del final.

Para el proyecto del túnel de la Línea 12 del Metro de Ciudad de México, ICA encargó a IMM (Maidl+Maidl) el diseño y dimensionamiento de las dovelas del revestimiento del túnel. Con base al Predimensionamiento realizado por IMM y a las consideraciones del fabricante Robbins, se acordaron las siguientes condiciones de contorno para la definición de las dovelas:

Concepto para el diseño del anillo:

- Partición: 7 dovelas más dovela llave, Anillo universal (Figura 4.1).

El sistema de revestimiento está formado por anillos universales, en donde las dovelas se atornillan entre sí formando un anillo troncocónico. La construcción del túnel con revestimiento por anillos universales permite el trazado de curvas, tanto en trazo como en perfil. Esto es debido a que los anillos son troncos de conos, y colocando las caras convergentes contiguas se consigue obtener una alineación curva, esto se logra gracias a las 14 posiciones en las que se puede colocar la llave de cierre.

En el anexo 1.c. "Posiciones de la dovela de cierre" se encuentra el plano que muestra las 14 posiciones de la llave de cierre, así como las correcciones que se pueden hacer con dichas posiciones.

La tabla 4.1 desglosa el tipo, la cantidad y el peso de cada dovela que conforman a un anillo.

PESO TOTAL POR ANILLO			
Descripción	Piezas	Volumen[m ³]	Peso [kg]
A1	1	2.548	6369
A2	1	2.598	6494
A3	1	2.620	6549
A4	1	2.598	6494
A5	1	2.548	6369
B	1	2.096	5239
C	1	2.096	5239
K	1	0.824	2060
TOTAL		17.928	44813

Tabla 1.1 "Peso total por anillo de dovelas"

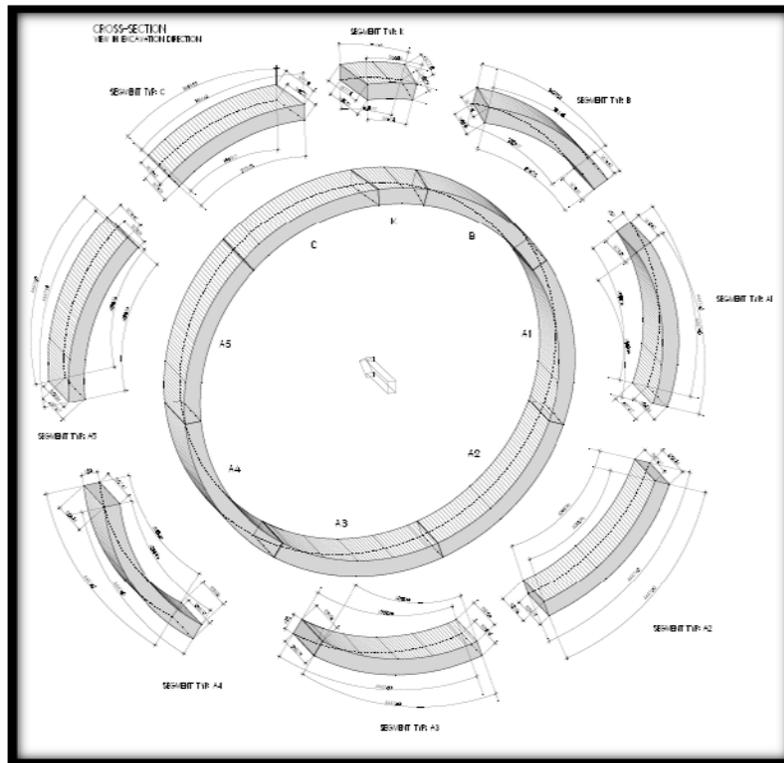


Figura 4.1 Partición del anillo universal en 7 dovelas +1 de cierre.

- Dimensiones:
 - 9910 mm diámetro exterior
 - 9110 mm diámetro interior
 - 400 mm espesor de las dovelas
 - 1500 mm longitud de las dovelas.

Las dovelas son elementos estructurales de concreto reforzado con una resistencia de proyecto de 450 kg/cm^2 , elaboradas con cemento CPC 40RS (resistencia a sulfatos), prefabricadas de forma geométrica tal que en conjunto forman un anillo circular de 9.91m de diámetro exterior, 9.11m de diámetro interior y 40 cm de espesor. El ancho del anillo formado es de 1.50 m, cabe mencionar que este ancho es el que se encuentra en el eje del anillo, ya que su sección transversal del anillo es troncocónica.

Las dovelas son fabricadas por la empresa alemana Herrenknecht que para la construcción de la Línea 12 del Metro en su tramo sección tipo túnel, ejecutado con escudo tienen que el compromiso de fabricar aproximadamente de 4248 anillos de dovelas.

4.1 Junta de Sellado

El revestimiento del túnel será simple. La estanqueidad del revestimiento se garantizará mediante 2 juntas de sellado elastoméricas colocadas alrededor del perfil de la dovela, una de ellas que es la de mayor espesor es colocada en la planta, mientras la otra de menor espesor es colocada por personal de la empresa ICA.

Estas juntas están diseñadas para poder soportar la presión de agua actuante a la profundidad de la solera del túnel que será como máximo de aproximadamente 2 bar a 2,5 bar.

4.2 Acoplamiento entre Anillos

Con objeto de limitar los desplazamientos relativos entre anillos de dovelas, se diseñó un sistema de acoplamiento mecánico de tipo machihembrado en las juntas transversales de los anillos, Fig. 4.2. En cada uno de los segmentos se colocaron 2 puntos de acoplamiento, de manera que en total existen 14 puntos acoplamiento por anillo, ver figura 4.4. El sistema de macho y hembra en las juntas se arma con varillas de acero con objeto de aumentar el refuerzo ante la transmisión de las fuerzas de acoplamiento.

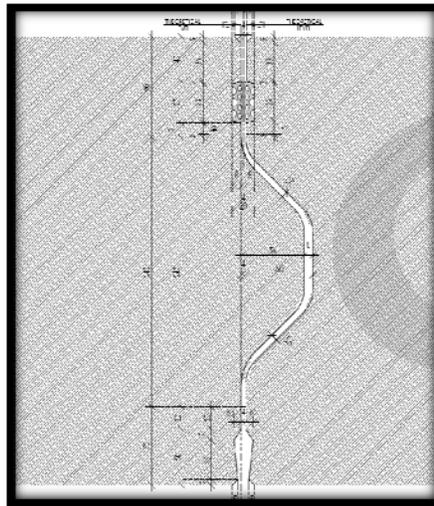


Figura 4.2 Acoplamiento tipo Machihembrado

4.3 Conexiones Atornilladas

Además del acoplamiento mecánico de tipo machihembrado, se diseñaron conexiones atornilladas, ver figura 4.3, tanto en las juntas transversales como en las juntas longitudinales. Los tornillos se dimensionaron para la fuerza de reacción máxima de las juntas de sellado elastomérica. En cada una de las juntas transversales y longitudinales de las dovelas se diseñaron dos conexiones atornilladas, figura 4.4.

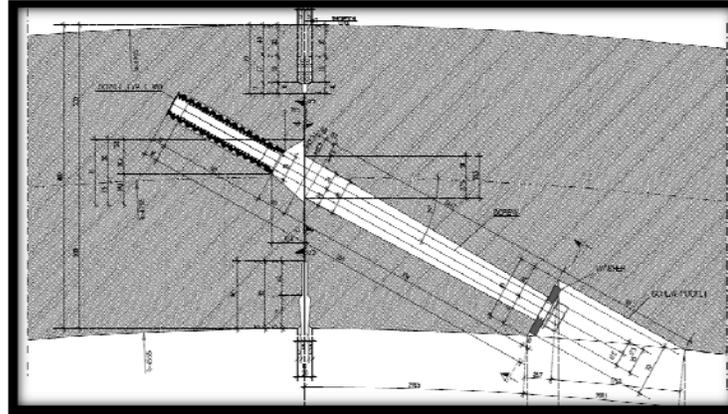


Figura 4.3 Conexión atornillada.

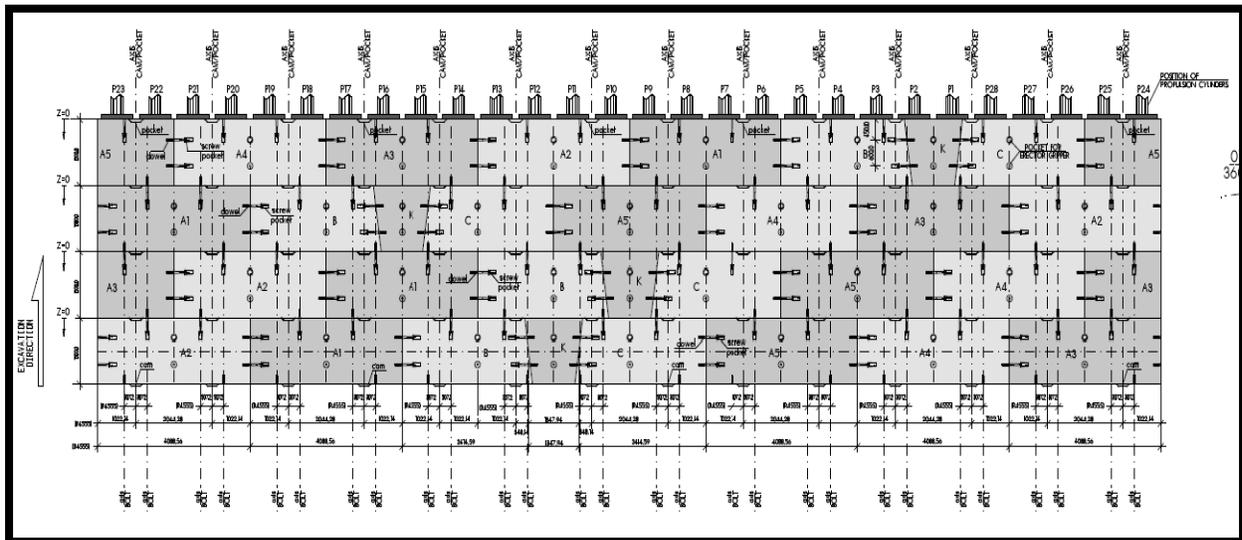


Figura 4.4 Sistemas de acoplamiento longitudinal y transversal.

4.4 Transmisión de la fuerza de los cilindros de empuje

En la junta transversal delantera, donde apoyan las zapatas los cilindros de empuje de la EPB, ver figura 4.5, se diseñaron resaltes en la superficie de concreto con objeto de transmitir de forma controlada las fuerzas de empuje hacia las zonas reforzadas con varillas de armado. De esta manera se evita transmitir solicitaciones a los bordes y esquinas de las dovelas.

En la junta transversal trasera en cambio, se diseñó una superficie plana de concreto (sin resaltes) con objeto de aumentar las tolerancias para la transmisión adecuada de las fuerzas hacia la dovela trasera. La transmisión de las fuerzas de empuje tiene lugar mediante contacto concreto-concreto.

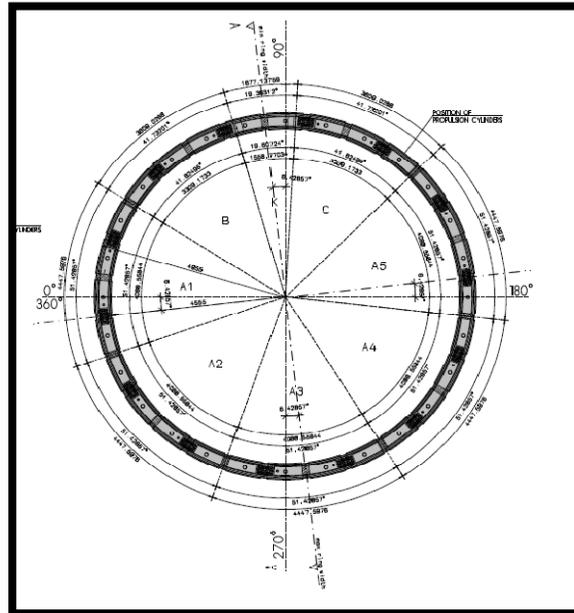


Figura 4.5 Posición de las zapatas de los cilindros de empuje de la EPB

CAPÍTULO V PROCESO DE ENSAMBLE DEL ESCUDO UTILIZADO EN LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El ensamble del escudo estuvo a cargo por ingenieros y técnicos de la empresa americana Robbins, duro aproximadamente 98 días, del 29 de septiembre del 2009 al 20 de enero del 2010.

5.1 Armado en sitio.

El suministro, ensamble y puesta en marcha del escudo EPB se realizó en la lumbrera de acceso ubicada en el intertramo Atlalilco-Mexicaltzingo de la siguiente manera: primero se conformó una plataforma de trabajo en el área de instalaciones superficiales, posteriormente se inició el ensamble del escudo en dos etapas, en el fondo de la lumbrera y superficie conectadas entre sí conforme a las especificaciones del fabricante (Robbins), mismas que garantizaron y garantizarán la funcionalidad del escudo para la excavación del túnel.

La instalación de recursos básicos en la superficie vecina a la lumbrera fue necesaria para que el escudo iniciara con el proceso de excavación y se garantizara su correcto funcionamiento, estos recursos básicos fueron:

- Área de recepción del material excavado.
- Equipo de carga del material excavado
- Líneas de suministro y comunicación del túnel (aire, agua, energía).
- Almacén y suministro de los anillos de dovelas
- Planta de fabricación del mortero
- Subestación eléctrica

Tales instalaciones en superficie se habilitaran nuevamente en las estaciones Ermita y Parque de los Venados sucesivamente, con el fin de que todas las instalaciones se encuentren cerca del área del trabajo del escudo.

Una vez que el escudo se ensambló en la lumbrera y las instalaciones estuvieron habilitadas en el exterior, el escudo estuvo listo para empezar la excavación de los primeros metros.

Simultáneamente a la instalación de los recursos básicos con los que debe de contar el escudo para su buen funcionamiento, se realizó la demolición parcial del muro Milán correspondiente a la zona por excavar, la demolición abarcó aproximadamente el 80% del espesor del muro, de tal manera que se retiró el primer lecho de acero y quede aparente el segundo lecho de acero, listo para retirarse justo antes del inicio de la excavación.

Desafortunadamente al escudo no se le hace ningún tipo de prueba mecánica en sitio para garantizar su correcto funcionamiento durante toda la excavación o para detectar daños a piezas causados por el transporte del mismo, ya que las pruebas se le realizan en el país de origen y con esas son suficientes para garantizar su funcionamiento.

La parte medular de este capítulo “el proceso de armado del escudo”, se encuentra dentro del primer apartado del reporte fotográfico, ahí se puede observar la secuencia del ensamble, consideré que sería más inteligible desarrollarlo de esta manera ya que siempre tener ayuda visual agiliza la comprensión.

CAPÍTULO VI FUNCIONAMIENTO DEL ESCUDO Y ACTIVIDADES INVOLUCRADAS ANTES Y DURANTE SU OPERACIÓN

El utilizar un escudo como medio de perforación de un túnel involucra varias actividades necesarias para que éste pueda funcionar adecuadamente y para que el proceso de excavación se realice de forma eficaz.

Ya que la longitud total a excavar, para la Línea 12 de la Ciudad de México, es grande (se realizará en aproximadamente 21 meses) se dividirá en 3 tramos para su ejecución, la tabla 6.1 muestra la longitud, recorrido y duración de cada tramo.

TRAMO	LONGITUD	RECORRIDO	DURACION	INICIO	FIN
1	2286.254m	Lumbrera de Entrada- Estación Ermita.	208 días	20/01/2010	24/08/2010
2	2265.375m	Estación Ermita-E. Parque de los Venados	174 días	25/08/2010	22/02/2011
3	1819.172m	E. Parque de los Venados- Lumbrera de Salida	230 días	23/02/2011	21/10/2011
Total	6370.801m		612 días		

Tabla 6.1 "Programa de excavación de la Lumbrera de entrada a la de salida".

A continuación se describirán las actividades a realizar antes y durante la operación del escudo.

6.1 Tratamiento Geotécnico Previo al Paso del Escudo

Antes de iniciar el proceso de excavación es necesario dar un tratamiento geotécnico a todas las entradas y salidas de las estaciones así como a las lumbreras, ya que el suelo natural por el que atraviesa el túnel es blando y tiene una resistencia baja a la compresión, es por tal motivo que se da este tratamiento con la finalidad de elevar su resistencia y evitar colapsos del terreno al entrar el escudo.

El tratamiento geotécnico consiste en realizar la sustitución del suelo natural por pilas elaboradas con una mezcla suelo-cemento, la cual deberá tener una resistencia a la compresión simple de 20 kg/cm^2 como mínimo al menos dos días antes de que el escudo cruce por la zona mejorada.

La dosificación propuesta del suelo-cemento para alcanzar la resistencia de 20 kg/cm^2 , es la siguiente:

- Cemento 118kg
- Tepetate 1,050 kg
- Agua 437 litros
- Aditivo FSR 1.77 kg (1.5% en peso del cemento).

La excavación para el remplazo, se realizará mediante perforaciones de 1.5m de diámetro, excavados con maquinaria para pilas de cimentación, la demolición de las ventanas circulares para el lanzamiento y recepción del escudo se podrá iniciar cuando el material de remplazo haya alcanzado una resistencia mínima de 20 kg/cm^2 .

6.2 Estructura de Atraque

Una vez que se haya ensamblado el escudo y se hayan accionado todos los sistemas del equipo, se está en condiciones de iniciar con los trabajos de excavación del túnel, procediendo a la colocación de los primeros anillos de atraque.

En primera instancia se procede al retiro del segundo lecho de acero del muro Milán correspondiente a la zona por excavar, ya que el primer lecho de acero del muro se retira

cuando todos los recursos básicos del equipo se están instalando y cuando el tratamiento geotécnico haya alcanzado la resistencia mínima de 20 kg/cm².

Posteriormente se procede al empuje del escudo contra el muro Milán que sigue aparente en la zona por excavar y se monta, detrás del escudo, la estructura de atraque incluyendo el anillo metálico.

La colocación de la estructura de atraque inicia con la bajada de las dovelas del primer anillo, la cual es pieza por pieza. Las piezas se introducen por el cajón subterráneo mediante un vagón de dovelas.

Las dovelas son trasladadas del vagón a la mesa de traslación mediante un polipasto que recorre la parte central del Puente del Escudo. El brazo erector del escudo EPB, tendrá acceso a las dovelas en la extremidad delantera de la mesa de traslación, y así levantará la dovela, mediante el sistema de vacío para colocarla en su posición de armado. Una vez colocada se retirará el brazo erector y se moverá para tomar y colocar la siguiente, sujetándola a la primera dovela mediante tornillos que se sujetan a los insertos “tuerca” instalados en la propia dovela.

Este mismo procedimiento se realizará para la colocación de las cinco dovelas tipo “A”, las tipo “B” y “C” y la tipo “K” en forma de cuña, hasta configurar el primer anillo circular.

Es importante mencionar que la colocación de los anillos de atraque no es una labor fácil ya que son los primeros que se colocan y todavía no cuentan con la estabilidad suficiente para sostenerse, es por eso que cuando se van colocando las dovelas del anillo, el faldón por medio de unos ángulos ayuda a darle forma al anillo y sirve como sostén, en los anillos de atraque no solo es suficiente el machihembrado y los tornillos que se tiene para su acoplamiento, además se deben de colocar placas metálicas en las juntas longitudinales, con la finalidad de que ayuden a la rigidez del anillo.

Estando debidamente colocado el anillo de atraque y en contacto tanto con los cilindros de empuje del escudo como con la estructura de reacción (marco), se procederá a realizar el empuje del escudo, accionando los gatos hidráulicos del escudo, hasta que se tenga en el faldón un espacio suficiente para la colocación del segundo anillo de atraque, el cual se colocará de forma similar al primero, este proceso se tendrá que repetir hasta que se tengan los seis anillos de atraque.

6.3 Excavación de los primeros metros

Una vez que el escudo haya tenido contacto con los anillos de atraque y la estructura de reacción, se procede a verificar que el sello de salida instalado en el portal y/o estaciones cubra uniformemente la camisa del escudo, para así iniciar la presurización de la cámara e iniciar con la excavación de los primeros metros del túnel.

Ya teniendo el escudo en contacto con el tratamiento geotécnico se procede a excavarlo con el cortador accionado en baja revolución para comenzar con el empuje. Se accionan los gatos de empuje del escudo en baja velocidad. A medida de que el cortador se acerque al final de la zona de tratamiento, se verifica que la presión del cortador no exceda la presión propia del terreno, especialmente cuando se empieza a excavar el terreno no tratado.

La carrera de los gatos se verifica revisando lo indicado por los sensores de desplazamiento colocados en 4 gatos (1, 8, 15 y 22) y manualmente en cuatro ubicaciones opuestas como mínimo, para corroborar el correcto desplazamiento del escudo.

Al tener en la carrera de los gatos un desplazamiento mínimo de 1.60 metros se procede a su paro, lo cual significa que el empuje ha concluido, procediéndose a la colocación de dovelas siguiente.

Al término de cada empuje se verifica en el sistema de guiado automático la posición real del escudo y se compara con la del proyecto, lo cual da la pauta a seguir para la programación de la colocación del anillo de dovelas antes del siguiente empuje y corregir así la posición del escudo.

Para la colocación de los anillos subsecuentes (estructurales o de soporte) se realizan las siguientes actividades:

- a) Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se coloca la primera dovela tipo "A".
- b) La dovela es tomada por el brazo erector, previamente se verifica que cuente con los tornillos necesarios para la colocación de la misma, procediendo con la colocación de la dovela en su sitio correspondiente y fijando la tornillería a los insertos "tuercas".

- c) Se apoyan dos, tres o cuatro gatos a la dovela dependiendo de la posición de la misma para poder retirar el brazo erector, trasladándolo para posicionarse en la siguiente dovela por colocar.
- d) Se retiran los gatos necesarios para alojar la segunda dovela tipo “A”.
- e) Se hacen coincidir el orificio del tornillo con el del inserto “tuerca”, colocando los tornillos correspondientes.
- f) Nuevamente se apoyan dos, tres o cuatro gatos de acuerdo con la posición de la dovela, se retira el brazo erector para desplazarse a la siguiente dovela situada sobre la mesa de traslación.
- g) Se repetirá la misma secuencia descrita hasta colocar las cinco dovelas tipo “A”, las dovelas tipo “B” y “C” y la cuña “K” dentro del faldón del escudo.
- h) Estas actividades serán repetidas para la colocación de los anillos durante todo el proceso de excavación del túnel, procurando que las dovelas no se traslapen en las juntas para que no se formen líneas de fallas longitudinales por la posición repetitiva de los anillos. Cabe mencionar que todas las posiciones de los anillos que se utilizan son para formar las curvas existentes y/o para corregir la línea o nivel en caso de existir desviaciones del trazo teórico.

Cabe recordar que el anillo de dovelas de diseño es un anillo universal, de manera que por medio de sus catorce posiciones posibles permiten seguir las curvas o tangentes del trazo y perfil del proyecto.

Una vez colocado el anillo, se está en condición de realizar otro empuje o avance, el cual comienza con el giro de la cabeza de corte y el empuje de los cilindros.

Al excavar el terreno, éste se introduce y se presuriza convenientemente en la cámara frontal del escudo EPB, para posteriormente ser evacuado, también bajo control, a través de los tornillos sinfín (Nos. 1 y 2). Durante el tiempo que el terreno permanece atrapado en el frente del escudo EPB, se le pueden añadir aditivos que le proporcionen propiedades especiales para su bombeabilidad y para su trabajo como “sello” en el interior del tornillo sinfín.

Al salir del tornillo sinfín, el material entrará en un sistema de bombas de pistones que lo impulsan por una tubería de acero de diámetro interior 8” hasta la superficie en la zona especial de almacenamiento de rezaga.

Paralelo a la excavación y colocación de anillos, se colocan rieles sobre apoyos metálicos para el avance del back up y una vía de rieles sobre durmientes para la circulación de los

vagones que alimentan dovelas, equipo y demás materiales al escudo, durante los primeros metros de excavación.

La inyección de la mezcla o mortero en el espacio anular comprendido entre el terreno y los anillos de dovelas, se realiza de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel, en los anillos que vayan saliendo del faldón del escudo, con un sistema integral de tuberías de inyección colocadas en el faldón del escudo. Para tal fin se emplea un sistema de inyección basado en el concepto Bi-componente.

6.4 Excavación del túnel en los metros subsecuentes

Realizada la excavación de los primeros metros del túnel, se verifica el espacio generado por el avance del EPB, para así colocar las instalaciones necesarias dentro del túnel, tales como: el tren del equipo de la EPB, cambios de vía, locomotoras eléctricas y así como todos los recursos necesarios para facilitar e incrementar la eficiencia de la excavación del túnel (iluminación, ventilación, etc.).

Una vez que se hayan bajado los trenes del escudo (back-up) se procede a accionar los gatos de empuje, los cuales reaccionarán con el anillo anterior e impulsan el escudo contra el terreno. La velocidad de avance es regulada con el flujo hidráulico que controla la presión de los gatos de empuje del escudo.

Al cortarse el terreno, éste se introduce y presuriza en la cámara frontal del escudo EPB, para posteriormente ser expulsado bajo control a través de los tornillos sinfín y el sistema de bombas de rezaga.

Cuando el material no permita utilizar el sistema de extracción de rezaga mediante bombeo, se cambiará al sistema de bandas combinado con el empleo de vagones de rezagas movidos por locomotoras, este sistema se utilizará a partir de la Estación Parque de los Venados, ya que el suelo contiene boleas que no pueden ser expulsados mediante el bombeo.

Simultáneo al empuje, se realiza la inyección de la mezcla Bi-componente entre dovelas y terreno, así mismo en la superficie se preparan las siguientes dovelas verificando que no cuenten con posibles desportilladuras ocasionadas por el transporte de las mismas. De igual forma se preparan los tornillos e insertos necesarios para la fijación de las dovelas. Ya que se cuenta con el material necesario este se bajará a la lumbrera sobre los vagones

de dovelas que serán llevados al frente de excavación por medio del polipasto y la mesa de traslación (antes de que en el frente se termine el empuje).

Cuando la carrera de los gatos tenga un desplazamiento de 1.60 metros, se procede al paro del empuje de los gatos, procediéndose a la colocación del anillo siguiente.

Para la colocación de los anillos se lleva la misma secuencia de actividades descritas en el subtema "Excavación de los primeros metros".

Una vez colocando el nuevo anillo se está en condición de realizar otro empuje o excavación, el cual comienza con el arranque del cortador y el accionamiento programado de los gatos, como ya se explico en el subtema anterior.

Una vez que el escudo este por llegar a la siguiente estación de recepción, cien metros antes se tendrá un control más estricto y coordinado con cada actividad para así llegar lo más cerca posible al eje teórico al portal de llegada. Cuando el escudo detecte que ha llegado a la estación o lumbrera se habrá concluido el tramo de excavación con el proceso antes descrito, ya que se involucrarán otras actividades tales como demolición de concreto en el portal de llegada y la liberación de presión en la cámara del escudo.

Teniendo el escudo en la estación se revisará, dándole mantenimiento a todo el equipo necesario, así como el alineamiento con el eje del próximo tramo del túnel por excavar, paralelamente al mantenimiento, se ubicarán las instalaciones pertinentes en superficie para el suministro de recursos básicos durante el proceso de excavación.

Con esta misma secuencia se excavarán los tres tramos de túnel con ayuda de la EPB.

6.5 Sistema de inyección bi-componente

Durante el avance del escudo EPB, se genera un espacio anular entre el revestimiento del túnel y el suelo excavado, debido a la diferencia de diámetros exteriores entre el escudo y el revestimiento de dovelas prefabricadas.

Con el fin de controlar los asentamientos en superficie, garantizar la correcta instalación de las dovelas prefabricadas y permitir una transmisión uniforme de las cargas del suelo sobre el revestimiento es necesario rellenar el espacio anular, lo que se lleva a cabo por

medio de la inyección de mortero a través de los conductos situados en el faldón del escudo.

Este sistema permite combinar una mezcla de mortero (que puede contener un aditivo retardante) con un acelerante en el faldón del escudo. La mezcla de ambos componentes fluye por una corta distancia hasta el final del faldón del escudo en donde encuentra el hueco a ser llenado. Entonces el fraguado y la estabilización de la mezcla Bi-componente se lleva a cabo en un corto tiempo.

Para el funcionamiento del sistema, existen dos tanques en el tren de equipo o “backup” del escudo. Un tanque contiene el mortero premezclado y el otro acelerante, ambos líquidos se transportan por medio de bombas independientes.

El sistema de tubería se compone de dos líneas, una para cada componente. Ambos líquidos se mezclan en la parte final del faldón del escudo y la mezcla bi-componente penetra en el espacio anular. Cada línea dispone de un medidor de flujo y de presión, solo la medición de presión del mortero se utiliza para el proceso de regularización.

La inyección de la mezcla en el espacio anular, se realiza de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel, se inyecta alrededor de los anillos que van saliendo del faldón, por medio de los dos canales de inyección ubicados en la parte superior, con lo que se logra que el mortero llegue a todo el perímetro del faldón; a la parte superior por medio de la presión aplicada a la inyección y a la parte inferior por gravedad.

El volumen teórico de la mezcla de inyección por anillo es igual a 6.9 m^3 . La inyección se detiene cuando cualquiera de estos dos criterios se cumple:

- a) Volumen real inyectado es igual al volumen teórico más un 10 o 15%.
- b) La presión de inyección alcanza la presión de confinamiento aplicada en la parte superior del frente del escudo.

6.5.1 Fabricación de la mezcla de inyección

Para la fabricación de la mezcla de inyección se ha instalado en la superficie vecina a la lumbrera o estación de trabajo una planta de mortero cuyos principales componentes constan de:

- a) Agitador vertical de 2.5 m³ de capacidad o similar.
- b) Silo para almacenamiento de 70 toneladas de cemento.
- c) Área de almacenamiento de arena fina.
- d) Área de almacenamiento de bentonita en sacos.
- e) Tolva de pesado de los materiales.
- f) Una bomba Moyno 3L-10 o similar.
- g) Un tanque para almacenamiento de agua.

La mezcla bi-componente se constituye de dos elementos principales: el mortero y el acelerante.

- El mortero consiste principalmente en agua, cemento, arena fina y bentonita, puede contener además un aditivo retardante superplastificante que inhibe el fraguado del mortero, manteniendo su trabajabilidad y estabilidad, con lo que se obtiene un flujo fácil y continuo del mortero por la tubería.
- El acelerante es un aditivo listo para usarse que activa el fraguado del mortero e incrementa la viscosidad de la mezcla de cemento. Permite obtener rápidamente una consistencia de la mezcla que evita el colapso del suelo en el espacio anular, llamada consistencia de gelatinización (que en este caso es de 90 segundos). El acelerante se agrega al mortero en una proporción que varía entre el 5 y 7% en volumen.

Cabe mencionar que después de los 149 anillos colocados en el túnel dicha mezcla se cambio por una mezcla de inyección optimizada en donde se suprimió el contenido de arena debido a la abrasión que sufre el sistema de inyección. Con este cambio la resistencia de compresión del mortero se vio afectada ya que paso de 3.47 kg/cm² a 2.10 kg/cm² (resistencia a un día), la cual es suficiente para evitar el colapso.

6.6 Sistema de guiado del escudo

La máquina excavadora EPB está provista de un sistema de guiado que automáticamente determina la posición exacta y la dirección de guiado del escudo en el espacio tridimensional, además de que provee información acerca de la desviación de la máquina respecto de su trayectoria de diseño.

Para definir la ubicación y dirección del escudo, el sistema cuenta con un prisma instalado en la parte delantera de la máquina, cuya posición exacta respecto del eje de la máquina y relativa al sistema coordenado tridimensional local se mide previo al inicio de la excavación.

Para medir la posición relativa del sistema coordenado local del escudo respecto del sistema global de coordenadas, el sistema de guiado mide además el rodamiento y la inclinación de la excavadora por medio de un inclinómetro biaxial montado dentro de la máquina.

El prisma dentro del escudo es medido automática y continuamente por un teodolito cuya posición y orientación en la pared del túnel son definidas por medio de una medición topográfica al momento de la instalación.

El sistema de medición del ángulo horizontal del teodolito deberá ser orientado mediante la instalación midiendo manualmente respecto a un prisma de referencia cuyas coordenadas han sido determinadas previamente.

Toda la información deberá ser introducida a la computadora del sistema de forma manual.

De esta manera se establecerán las coordenadas globales del prisma en el escudo midiendo las distancias y los ángulos vertical y horizontal a partir del teodolito que ya ha sido referenciado. Debido a que desde un inicio se estableció la ubicación del prisma en el sistema coordenado local del escudo y a que tanto la inclinación como el rodamiento de la máquina se conocen en todo momento, la posición de cualquier punto del escudo puede ser calculada en el espacio tridimensional global.

La trayectoria de diseño proyectada en el sistema coordenado global también se conoce y se introduce en la computadora del sistema. En consecuencia, es posible calcular la desviación horizontal y vertical de la EPB respecto a la trayectoria de diseño, así como la

orientación de la máquina, los cuales se le presentan al operador de manera gráfica. De manera opcional es posible mostrar el avance óptimo hacia la trayectoria de diseño.

La figura 6.1 muestra el sistema de guiado automático con el que cuenta el escudo EPB, utilizado en la excavación de la Línea 12.

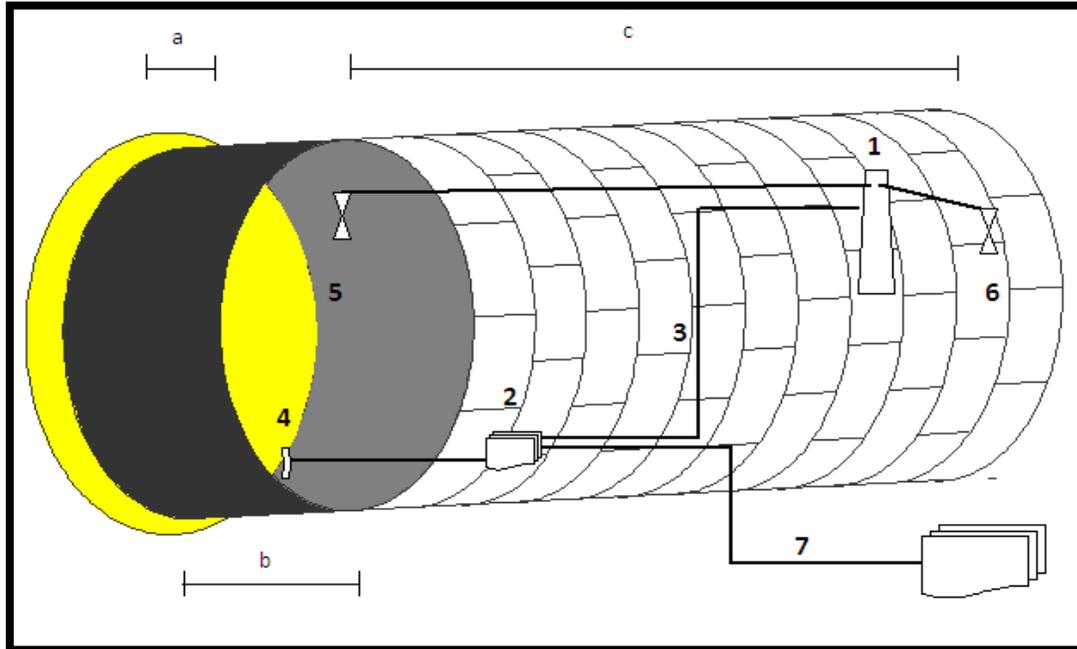


Figura 6.1 Sistema de Guiado Automático.

- a. Cabeza cortadora
- b. Cuerpo y faldón del escudo
- c. Dovelas colocadas
1. Teodolito.
2. Sistema de cómputo dentro del escudo.
3. Transmisión de datos del teodolito a la computadora interna.
4. Inclínómetro
5. Prismas
6. Prisma de referencia para el teodolito
7. Línea de transmisión de la computadora interna hacia la cabina de control.

6.7 Control de las presiones en el frente de excavación.

La operación del escudo EPB involucra varios procesos: el relleno de la cámara de excavación con el material excavado, la rotación de la cabeza de corte, la propulsión de los gatos de empuje y el ajuste de volumen de rezaga con el volumen del suelo excavado, por medio del control de la velocidad de la rotación de los tornillos sinfín. De todo ello, la

parte más importante es el control de la presión de tierra dentro de la cámara de corte. El valor de la presión está determinado por las condiciones de la excavación, tales como el tipo de suelo, las características geológicas y geotécnicas del suelo, la presión de agua en el suelo y la profundidad del túnel.

Para llevar a cabo de manera segura la excavación del túnel es necesario llenar la cámara a presión con el suelo excavado con objeto de evitar fallas en el frente, una vez que ya este a presión el suelo en la cámara, la cantidad de rezaga descargada por el tornillo sinfín, debe de ser igual a la cantidad de suelo excavado.

El valor objetivo de la presión de tierra necesaria para mantener la estabilidad del frente se calcula de manera teórica de acuerdo con las condiciones de la excavación antes del inicio de la misma, aunque debe ser revisada de acuerdo con la diferencia de la cantidad de rezaga descargada respecto de la cantidad de suelo excavado. Las presiones de tierra en la cámara de corte para el sostenimiento del frente serán las calculadas para cada zona del túnel.

En el anexo 2, podrán encontrar las presiones de sostenimiento del frente durante la excavación del tramo 1, de la lumbrera de acceso del escudo hasta poco antes de la Estación Ermita.

El proceso de control de las presiones en el frente es como sigue:

- a) Registrar la velocidad de avance del escudo que se da en función del tipo de terreno excavado y de la presión hidráulica aplicada por los gatos de empuje.
- b) Ajustar la velocidad de rotación del tornillo sinfín para descargar la cantidad de suelo en proporción a la velocidad de avance del escudo.
- c) Cuando la presión de tierra en la cámara de corte que se muestra en la pantalla de control salga del rango permisible, la velocidad de rotación del tornillo sinfín deberá ser ajustada (incrementada o disminuida) por el operador. Dicha operación permite mantener la presión de la cámara dentro de los rangos admisibles.
- d) Cuando el volumen medido de la rezaga extraída mostrado en la pantalla de control exceda el rango admisible, se debe revisar el valor objetivo de la presión de tierra y ajustarse por medio de la variación de la velocidad de rotación del tornillo sinfín hasta que el volumen de suelo rezagado recupere su tendencia.

La tabla 6.2 muestra los dos métodos para medir la cantidad de rezaga que se extrae durante la excavación.

Tipo	Dispositivo	Método
Medición de Volumen	Tornillo Sinfín	medición de las revoluciones del tornillo
	Bomba de Lodos	medición de los ciclos de la bomba
Medición de peso	Banda transportadora	medición del peso de la banda por medio de celdas de carga

Tabla 6.2 "Métodos para medir la cantidad me material rezagado"

Las indicaciones importantes para el operador están dadas por los sensores de presión de tierra en la cámara y los dispositivos para la medición de la cantidad de rezaga extraída. Los valores detectados por ambos tipos de sensores se muestran en la pantalla de control comparándolos con el valor objetivo. De acuerdo con la indicación el operador puede modificar la velocidad de rotación del tornillo sinfín.

El escudo cuenta con 10 sensores para medir la presión de tierra, que se encuentran en la cámara de presión, estos sensores se encuentran distribuidos como lo indica la figura 6.2.

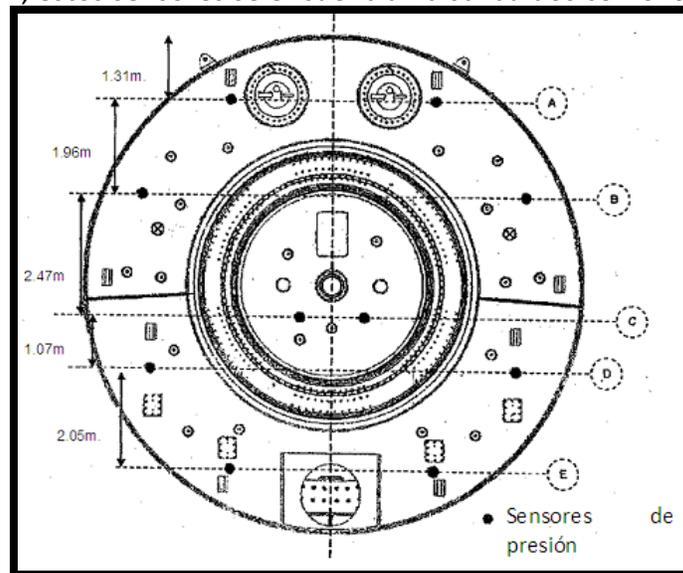


Figura 6.2 Distribución de los Sensores de Presión en la Cámara de Presión.

CAPÍTULO VII CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA PERFORACIÓN DEL TÚNEL

7.1 Mantenimiento de la Máquina

El mantenimiento de la máquina consiste en verificar que la rueda de corte, la cámara de presión, el erector y el tornillo sinfín no hayan sufrido daños durante su operación, ya que en ocasiones el tipo de suelo esperado no corresponde al tipo de suelo excavado, causando daños principalmente al sistema de expulsión de rezaga, además del cambio de aceite y del sello del faldón tipo cepillo de alambre.

El mantenimiento se brinda cada que el escudo pasa por una estación, por lo tanto se le dan 7 mantenimientos durante toda el proceso de excavación (de la lumbrera de entrada a la de salida, se encuentran 7 estaciones) durando éste aproximadamente 6 días, los trabajos de mantenimiento están a cargo de la empresa Robbins, que fue la que ensambló y fabricó el escudo y de ingenieros especializados de la empresa ICA.

7.2. Instrumentación del túnel

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del túnel y de las edificaciones aledañas antes y durante el paso del escudo, se está instalado un sistema de instrumentación que permite medir la presión de confinamiento sobre el anillo, cambios en la geometría transversal de anillos, asentamientos y desplazamientos en la masa de suelo y en superficie.

A continuación se presentan los lineamientos generales para la instalación de la instrumentación y frecuencia de toma de lecturas.

7.2.1 Instrumentación al interior del túnel

Celdas de presión

Para detectar la magnitud y distribución de los esfuerzos de confinamiento que el subsuelo ejerce sobre el revestimiento del túnel, se instrumentarán 5 anillos de dovelas, uno por cada zona geotécnica, la tabla 7.1 indica la ubicación de los 5 anillos instrumentados.

ZONA GEOTÉCNICA	CADENAMIENTO APROXIMADO	TRAMO
1	20+646	ATLALILCO-MEXICALTZINGO
2	22+360	MEXICALTZINGO-ERMITA
3	24+220	EJE CENTRAL-PARQUE DE LOS VENADOS
4	25+900	PARQUE DE LOS VENADOS-ZAPATA
5	27+700	INSURGENTES SUR-MIXCOAC

Tabla 7.1 "Ubicación de los cinco anillos instrumentados con celdas de presión"

El anillo de dovelas se instrumentará con cuatro celdas de presión colocadas ortogonalmente.

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

Una vez colocado el anillo de dovelas instrumentado con celdas de presión, la frecuencia de medición será la siguiente.

- Se deberán tomar las lecturas necesarias hasta observar una estabilización de las mismas (como mínimo 3 lecturas similares). Una vez logrado lo anterior, y con los datos de las mediciones, se deberán elaborar gráficas tiempo vs presión.
- Se realizan lecturas diarias hasta que las gráficas tiempo vs presión muestren una tendencia de estabilidad.

- En el momento en que las gráficas muestren una tendencia de estabilidad franca, las lecturas se realizarán cada tercer día, si después de tres meses se observa la continuidad de la estabilidad, se podrán realizar una vez por semana.

Diámetro horizontal interior de anillos

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

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

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

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

Las frecuencias de lectura serán las siguientes:

- a) En el momento en que se coloque el anillo y cuando las condiciones del tren de equipo del escudo lo permitan, se realizara la primera lectura, posteriormente se tomará una lectura diaria, esto hasta que en las gráficas tiempo vs diferencia de diámetro se observe una estabilidad en por lo menos 15 días consecutivos.
- b) Una vez que se muestre una tendencia de estabilidad conforme a lo anterior, se realizará una lectura cada tercer día, si después de tres meses se observa la continuidad de la estabilidad en muestreo se realizará una vez por semana.

En el anexo 5 se encuentran las gráficas de variación del diámetro horizontal interno del túnel, realizadas con base en lecturas tomadas de la instrumentación interna del túnel del anillo 0 al anillo 120

7.2.2 Instrumentación al exterior del túnel.

Referencias superficiales sobre el eje de trazo.

Este control se realizará mediante una línea de colimación a lo largo del eje del trazo, compuesta por Bancos de Nivel Superficiales separados a cada 20.00 m. dichos bancos estarán colocados sobre el eje del trazo.

Todos los puntos de las líneas de colimación se ubicarán sobre un eje y posteriormente se medirán las posibles deformaciones transversales y verticales que sufra cada uno de ellos.

En áreas verdes los bancos de nivel estarán constituidos por un cilindro de concreto simple de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, con un tornillo metálico de 5/8" x 4", en pavimento el banco de nivel deberá estar constituido por un tornillo metálico de 5/8" x 4".

La frecuencia de las lecturas en estos bancos será la indicada a continuación.

- a) Una primer lectura antes de los primeros 100 metros previos al paso del escudo, la segunda tres días posteriores, si las dos lecturas son similares se toma como inicial, de no ser así se tomarán las lecturas hasta que tengan una diferencia máxima de ± 3 mm.
- b) 100 metros antes y 100 metros después del paso del escudo se realizará una lectura al día.
- c) Posteriormente a los 100 metros del paso de escudo se realizará una lectura por semana durante cuatro meses, momento en el cual si la tendencia marca estabilidad podrán suspenderse las lecturas.

En el anexo 3 se podrán encontrar los asentamientos máximos permisibles aplicados al primer tramo por excavar, de la lumbrera de Acceso a la Estación Ermita.

En el anexo 4 se encuentran las gráficas de asentamiento en superficie realizadas con base en lecturas tomadas de la instrumentación superficial sobre el eje del trazo, del cadenamiento 20+370 al cadenamiento 20+860.

Referencias superficiales transversales al eje de trazo.

Este control se realizará mediante una línea de colimación transversal al eje del trazo, compuesta por Bancos de Nivel Superficiales separados a cada 20.00 m. Dichas líneas de colimación estarán colocadas a cada 250 metros aproximadamente, dependiendo de la distancia a la que se encuentren las calles que cruzan el eje del trazo.

Todos los puntos de las líneas de colimación se ubicaran sobre un eje y posteriormente se medirán las posibles deformaciones transversales y verticales que sufra cada uno de ellos.

La frecuencia de las lecturas será similar a las indicadas en el subtema “Referencias superficiales sobre el eje de trazo”.

Palomas y plomos

Con el fin de conocer los movimientos que se pudieran presentar en los edificios aledaños al túnel, se procederá a colocar marcas de pintura (palomas) y puntos de desplome en los paramentos de estos, de acuerdo a lo descrito a continuación:

Las palomas se ubicaran en las edificaciones mayores a tres niveles colindantes con la zona de proyecto. Las marcas (palomas) se colocarán en las colindancias de las edificaciones a 1.50 m de altura, medido a partir del nivel de banquetta.

Además de las líneas de colimación y palomas, se deberán marcar puntos de desplome en los edificios de tres niveles o más, colindantes con la obra, utilizando las botaguas de algunas edificaciones o fijando ménsulas o perfiles de fierro en las azoteas o en donde lo permita la construcción. Posteriormente se medirán los posibles desplomes que se presenten en cada uno de ellos. Se deberá de tomar una lectura de desplome inicial, la cual servirá de referencia y para conocer si la edificación se encuentra desplomada de origen, por lo que deberá de tomarse antes del paso del escudo.

La frecuencia de las lecturas será similar a las indicadas en el subtema “Referencias superficiales sobre el eje de trazo”.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES EN LA OPERACIÓN DE ESCUDOS EN SUELOS BLANDOS.

El objetivo principal del uso de escudos es el de aumentar la seguridad y calidad del proceso constructivo, y a la vez optimizar los costos y plazo del mismo, es por eso que debemos de apoyarnos en un análisis sistemático que nos pueda brindar información en tiempo real de los procesos involucrados, a partir del registro electrónico de los datos de funcionamiento de la máquina.

Para aprovechar al máximo el potencial de la información proporcionada por los datos de funcionamiento del escudo, se debe de llevar a cabo un análisis de la información de forma sincronizada con el proceso constructivo.

Esta sincronización se ha de llevar a cabo mediante un:

- Seguimiento y comparación en tiempo real entre valores reales medidos y los valores objetivo preestablecidos en los distintos parámetros técnicos y mecánicos de funcionamiento, y de los parámetros que describen la interacción entre el escudo y el terreno.

- Reconocimiento a tiempo de estados de funcionamiento críticos, de manera que sea posible llevar a cabo las contramedidas necesarias y evitar así paradas largas y no planeadas de la máquina.

- Mejoramiento de los distintos procesos parciales que intervienen en la excavación con tuneladora mediante el análisis de los datos de funcionamiento de cada proceso.

Algunas recomendaciones que se dan en la operación de escudos en suelos blandos, son las siguientes:

- Encargar la labor de realizar las pruebas tanto de laboratorio como in situ, a una empresa calificada que garantice la confiabilidad de los resultados ya que de ellas depende la elección de la maquina y el tipo de revestimiento.
- Realizar el tratamiento geotécnico en las entradas y salidas de las estaciones, así como en las lumbreras, ayudará a evitar colapsos del terreno cuando el escudo pase por ellas.
- Tomar en cuenta todos los parámetros y análisis necesarios para la selección del escudo, ya que de no ser así se puede llegar a una elección errónea que se puede ver reflejada en la eficiencia de la máquina.
- Estar alerta cuando se realiza la inyección del mortero ya que es una actividad importante dentro de la excavación del túnel, si esta no se realiza adecuadamente, no cumpliendo ninguno de los dos criterios para el paro de la inyección, se puede estar en serios problemas ya que se presentaran asentamientos importantes en la superficie, provocando poca confianza al usuario.
- Asegurarse que tanto el ensamble, operación y mantenimiento de la máquina este al mando del fabricante de la misma, ya que ellos tendrán gente especializada que pueda realizar estas labores sin retrasos que podrían modificar el tiempo de culminación.
- Revisar periódicamente que las presiones registradas en la cámara de excavación se encuentren dentro del rango de valores admisibles para la zona, ya que de esto dependerá la estabilidad del frente de excavación, si esto no fuera así, modificar la velocidad de extracción de rezaga de la cámara.
- Contar con un sistema de guiado preciso durante la excavación es de gran importancia, ya que de este depende que la excavación del túnel se realice conforme a proyecto y que el escudo tenga una buena velocidad de avance, ya que la fuerza de fricción entre el terreno y el faldón del escudo disminuye.

- Evitar daños en las juntas de dovelas y anillos, ya que esto podría modificar la resistencia de la dovela y por consecuencia la del anillo, esto lo podemos hacer, procurando que los cilindros de empuje hagan su recorrido de forma uniforme, verificando las lecturas de los sensores de desplazamiento.
- Cuando se tenga la necesidad de inyectar espuma al frente, mediante los puertos de inyección de la cabeza cortadora, se tiene que tener cuidado con la cantidad y forma de inyectarla, ya que si no se hace correctamente el suelo puede llegar a tener otro comportamiento al esperado, causando una modificación en la forma de expulsión.
- Saber si es necesario el cambio de sistema de expulsión de rezaga (sistema de bombas por cintas transportadoras o viceversa) antes de fincar el pedido de la máquina o a un tiempo razonable evita paros inesperados en las actividades.
- Contar con un operador del escudo que sea capaz de interpretar los datos arrojados por el programa de cómputo utilizado durante la excavación del túnel oportunamente, ya que de nada servirá tener un análisis sistemático adecuado si no hay quien lo interprete correctamente.
- Conocer la cantidad del aditivo que se le agrega al material excavado cuando se encuentra en la cámara de excavación para mejorar su trabajabilidad y de esta manera aumentar la velocidad de avance del escudo.
- Contar con las lecturas realizadas a la instrumentación colocada tanto al interior como exterior del túnel después del paso del escudo con la finalidad de conocer el grado de afectación que se tiene en la zona vecina al paso del escudo.
- Contar con un software que nos permita:
 - Reconocer situaciones críticas de funcionamiento
 - Reconocer anomalías geológicas del terreno
 - Reconocer a tiempo fallas mecánicas de la máquina.
 - Realizar interacciones entre el escudo y el terreno.

REPORTE FOTOGRÁFICO

	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Lumbrera de entrada del escudo ubicada en el intertramo Atlalilco-Mexicaltzingo.</p>
		<p>Componentes del escudo, localizados en la lumbrera de entrada.</p>
		<p>Ensamble de la parte inferior de la parte frontal del cuerpo del escudo en la lumbrera de entrada y frente a la zona de tratamiento geotécnico.</p>

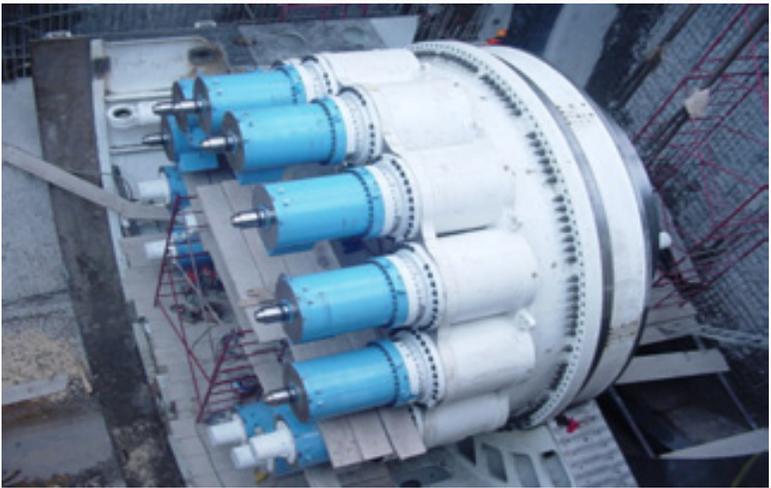
	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Colocación de los 12 motores de la cabeza cortadora de 190 Kw de potencia cada uno.</p>
	 <p>Cilindros de articulación</p>	<p>Vista de los 12 motores de la cabeza cortadora, 8 cilindros de articulación y la parte frontal inferior del cuerpo del escudo.</p>
		<p>Ensamble del Mamparo del escudo, es aquí donde se presuriza el material excavado para darle estabilidad al frente (ubicación de los 10 sensores de presión), para posteriormente ser expulsado por los tornillos sinfín.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Parte frontal superior del cuerpo del escudo, con los 8 cilindros de articulación restantes, listo para ser colocado.</p>
		<p>Ensamble completo de la parte frontal del cuerpo del escudo y comienzo del ensamble de la parte final del cuerpo</p>
		<p>Montaje de la parte final del cuerpo del escudo, esta parte sirve de eje para los cilindros de empuje, como se puede observar se encuentran los 28 espacios correspondientes a los cilindros de empuje.</p>

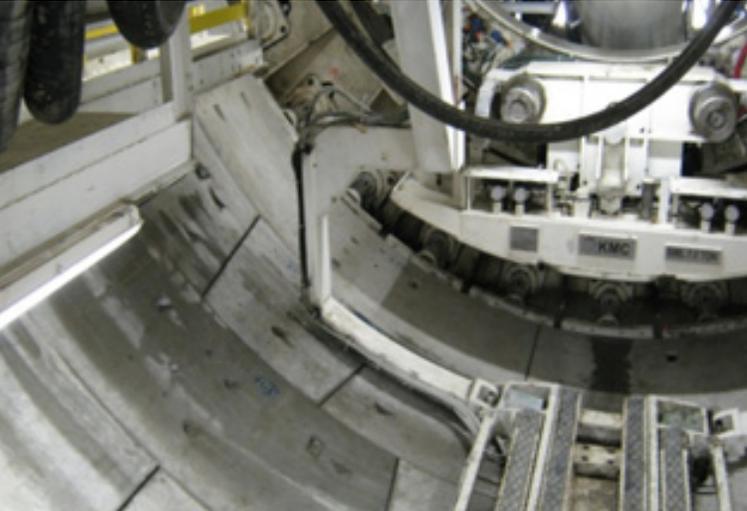
	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Colocación de los 28 cilindros de empuje del escudo, las pequeñas zapatas que tienen los cilindros sirven para transmitir uniformemente la fuerza a las dovelas, ya que de no ser así se podrían dañar al anillo de dovelas.</p>
		<p>Ensamble del tornillo sinfín # 1, sin eje, con un diámetro interno de 1200mm, por donde se podrá transportar un Tamaño máximo de boleo de 800mm.</p>
		<p>El erector es la parte del escudo que se encarga de colocar las dovelas para formar el anillo, su sistema de sujeción es el vacío, el erector puede dar un ángulo de giro de $\pm 220^\circ$.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Colocación de la parte frontal del puente del escudo, durante todo el proceso de excavación esta pieza es importante ya que puedes observar desde ahí todo el proceso confiablemente.</p>
		<p>Bajada de la rueda de corte a la lumbrera, que a la vez tiene que ser ensamblada ya que llega de origen por partes, la rueda de corte tiene una velocidad máxima de 2rpm y una fuerza de torsión máxima de 20,300kNm.</p>
		<p>Unión entre la rueda de corte y el mamparo del escudo, en el espacio generado entre la rueda de corte y el mamparo se presuriza el material, para posteriormente ser expulsado por el tornillo sinfín, que se encuentra en la parte inferior.</p>

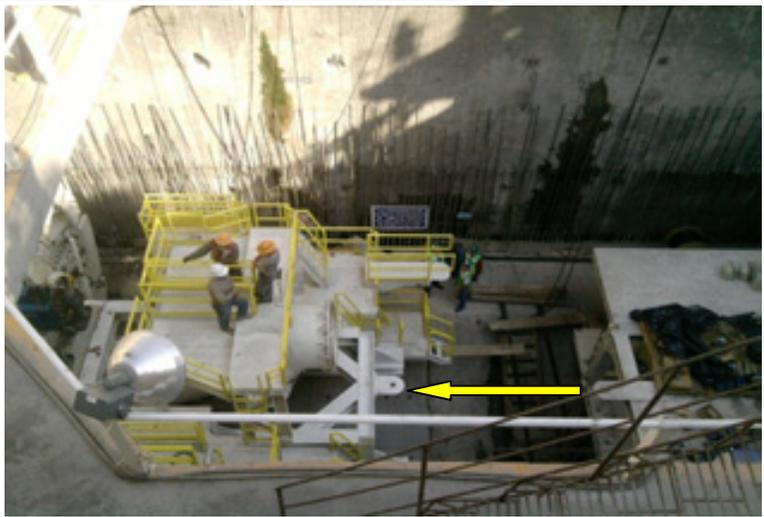
	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		<p>Unión entre la parte frontal del puente con el puente, en la parte superior del puente se encuentra la cabina de control del escudo (es aquí donde llegan todos los datos de trabajo del escudo) y por la parte inferior del puente se transportan las dovelas por el polipasto.</p>
		<p>El faldón es la parte del escudo que sirve como sostenimiento del terreno, mientras se colocan las dovelas del anillo.</p>
		<p>Ensamble del tornillo sinfín # 2, parte frontal con eje y parte trasera sin eje, con diámetro interno de 1200mm, puede transportar un tamaño máximo de boleo de 800 y 400mm respectivamente.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
ENSAMBLE		Conexión entre el escudo y los backup ubicados en zona vecina a la lumbrera, ya que el espacio con que se cuenta en la lumbrera no es suficiente para poder bajar los 6 backup, se tienen que conectar mediante un sistema que garanticen su funcionamiento.
TRATAMIENTO GEOTÉCNICO		Retiro del segundo lecho de acero, del muro Milán en la lumbrera de entrada, este lecho se retira una vez que se haya realizado el tratamiento geotécnico, para que se empiece con el empuje del escudo.
		Silos de suelo-cemento, resultado del tratamiento geotécnico.

	FOTO	DESCRIPCIÓN
COLOCACION DE LOS ANILLOS DE ATRAQUE		<p>La colocación de los anillos de atraque requieren un soporte inicial que garantice su correcto acoplamiento entre dovelas, es por eso que se tienen que colocar ángulos soldados al faldón para que ayuden a sostener cada dovela y formar el anillo de atraque.</p>
		<p>Ya que en los anillos de atraque no es suficiente el machihembrado y los tornillos como sistema de acoplamiento, se usan placas metálicas en las juntas longitudinales para garantizar la forma de anillo.</p>
		<p>Una vez que se ha colocado un anillo de atraque, se tiene que empujar hacia la estructura de reacción, para poder armar el siguiente anillo de atraque.</p>

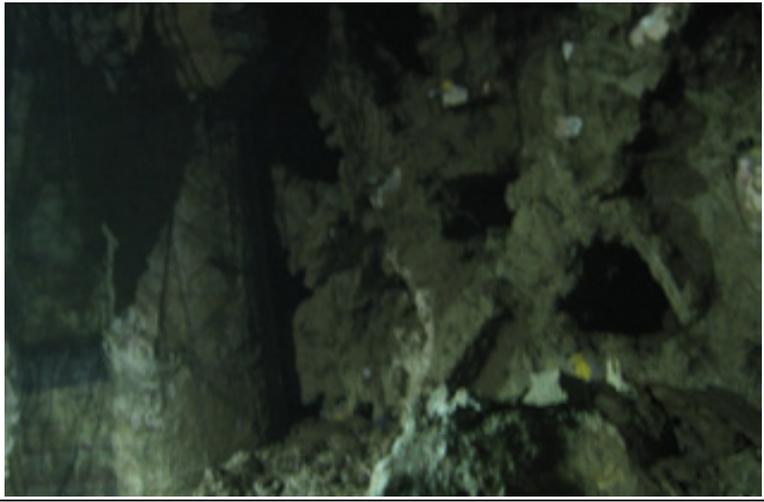
	FOTO	DESCRIPCIÓN
ANILLOS DE ATRAQUE		<p>Vista en planta de los 6 anillos de atraque, marco de reacción y anillo metálico.</p>
		<p>Vista interna de los 6 anillos de atraque, se pueden ver las placas metálicas en las juntas longitudinales, que sirvieron para acoplar las dovelas de cada anillo.</p>
ALMACEN DE DOVELAS		<p>Se debe de contar con un área amplia para el almacén de dovelas procedentes de la planta y de esta manera garantizar que siempre será abastecida la demanda de dovelas en el frente.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
TIPO DE ACOPLAMIENTO		<p>Sistema de acoplamiento transversal entre anillos, machihembrado.</p>
		<p>Sistema de acoplamiento transversal entre anillos y longitudinal entre dovelas, "tornillos y tuercas".</p>
POLIPASTO		<p>El polipasto es la maquina que se encarga del traslado de dovelas desde el vagón de dovelas hasta la mesa de traslación.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
MESA DE TRASLACIÓN	 <p>Mesa de traslación</p>	<p>La mesa de traslación se encarga de transportar las dovelas desde donde las deja el polipasto hasta el frente de excavación, para que posteriormente sean tomadas por el erector y colocadas en su sitio</p>
EMPUJE DE ANILLO		<p>Empuje del escudo hacia el terreno a excavar, el anillo de dovelas anterior ayuda al empuje. El tiempo que tarda el empuje es de aproximadamente 30 minutos y la colocación de un anillo es de 15 minutos</p>
PUERTOS DE INYECCIÓN		<p>El objetivo principal de los puertos de agua o espuma en la cabeza cortadora es hacer más trabajable el material por excavar y de esta manera evitar un torque mayor. La cabeza cortadora cuenta con 6 puertos de 40mm de diámetro.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
SISTEMA DE GUIADO		<p>El sistema de guiado indica que tan alejado o cercano se está excavando del eje teórico del túnel, está compuesto por un prisma y un teodolito, el prisma se encuentra abajo del cilindro de empuje 1.</p>
PLANTA DE MORTERO		<p>Se cuenta con una planta de mortero, que se encuentra en la zona vecina a la lumbrera, en donde se fabrica el mortero a utilizar en el relleno del espacio anular.</p>
PURTOS DE INYECCIÓN		<p>El faldón cuenta con dos puertos de inyección de mortero, este mortero se inyecta para llenar el espacio anular de los anillos que van saliendo del faldón.</p>

	FOTO	DESCRIPCIÓN
ARRIBO DEL ESCUDO A LA ESTACIÓN MEXICALTZINGO		<p>ARRIBO DEL ESCUDO “LA RIELERA” A LA ESTACION MEXICALTZINGO EL DIA 19 DE MAYO DEL 2010</p>
		
		

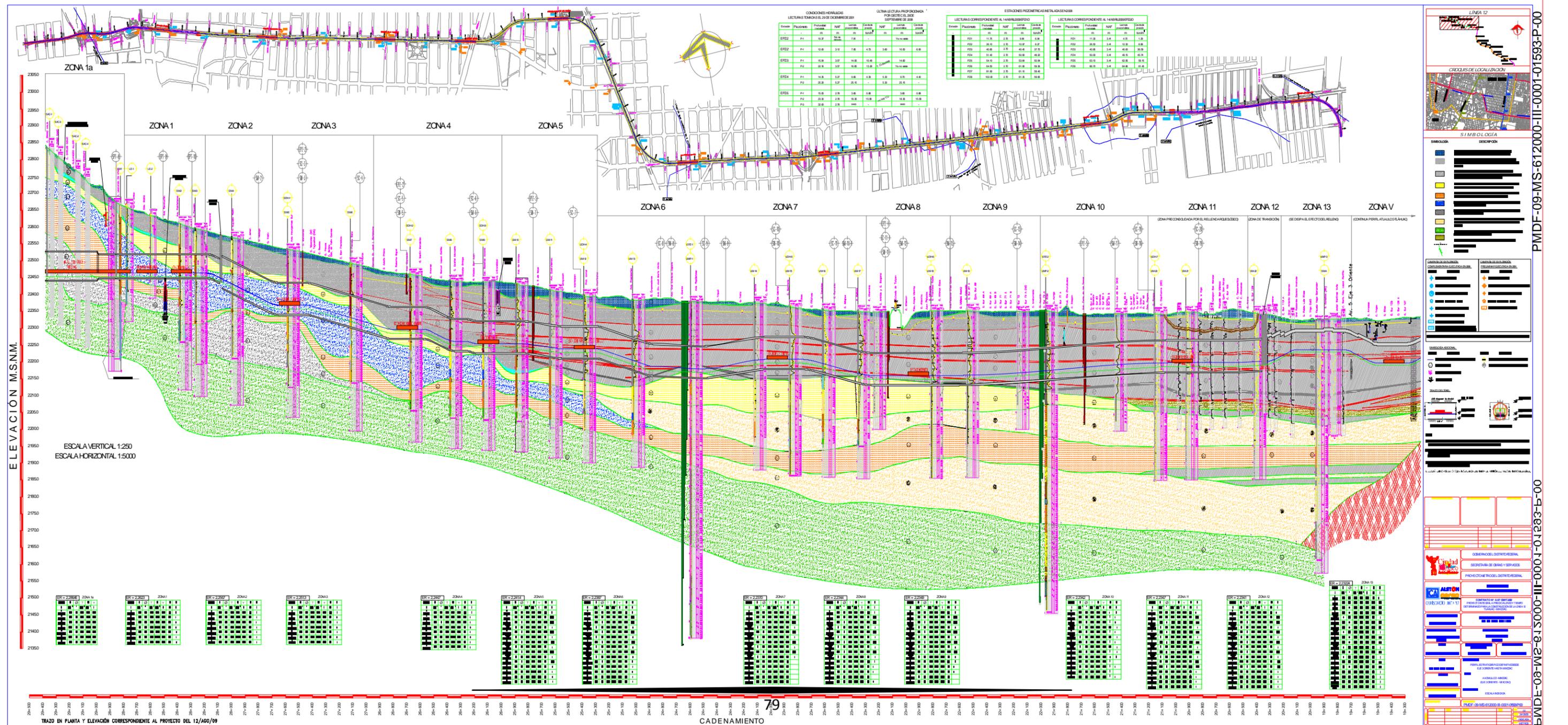
	FOTO	DESCRIPCIÓN
ARRIBO DEL ESCUDO A LA ESTACIÓN MEXICALTZINGO		<p>ARRIBO DEL ESCUDO “LA RIELERA” A LA ESTACION MEXICALTZINGO EL DIA 19 DE MAYO DEL 2010</p>
		
		

ANEXO 1 PLANOS

- 1.a. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEFINITIVO DESDE EJE 3 ORIENTE HASTA MIXCOAC,
TRAMO ATLALILCO-MIXCOAC
 - 1.b. ESCUDO EPB (EPB331-331)
 - 1.c. POSICIONES DE LA DOVELA DE CIERRE

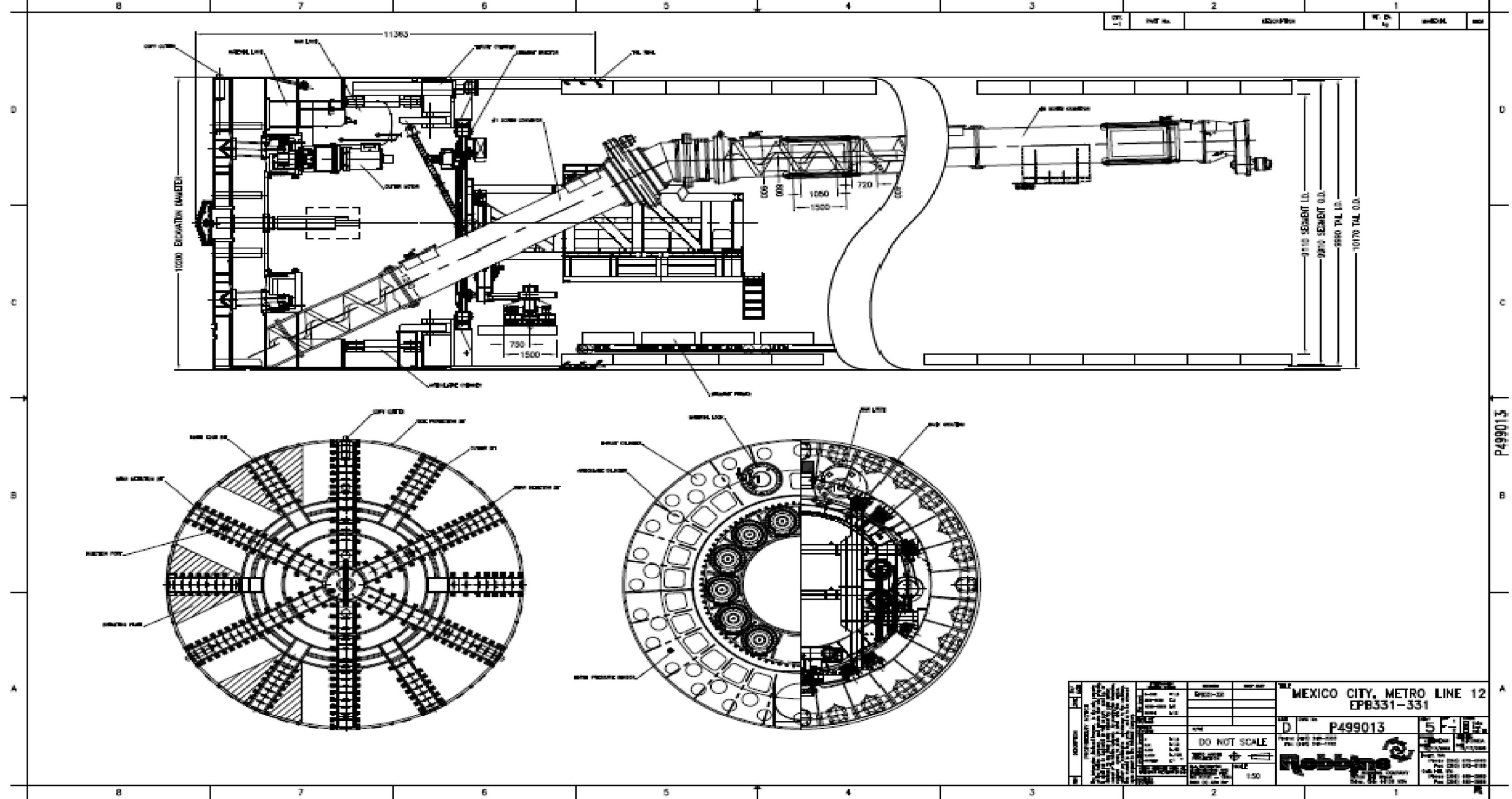
ANEXO 1 PLANOS

1.a. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEFINITIVO DESDE EJE 3 ORIENTE HASTA MIXCOAC, TRAMO ATLALILCO-MIXCOAC



PMDF-09-MS-612000-III-0001-01593-P-00
 BMD E-08-W2-8-1 S000-III-0001-01283-B-00

1.b. ESCUDO EPB (EPB331-331)



REV	DATE	DESCRIPTION	BY	CHKD
-----	------	-------------	----	------

P499013

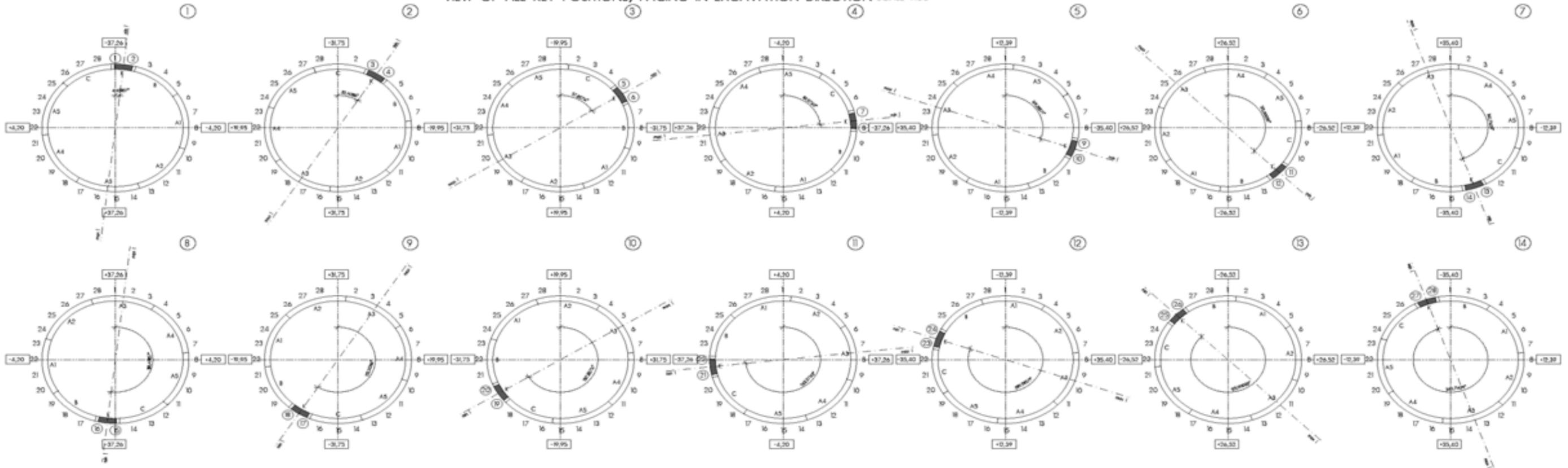
B

A

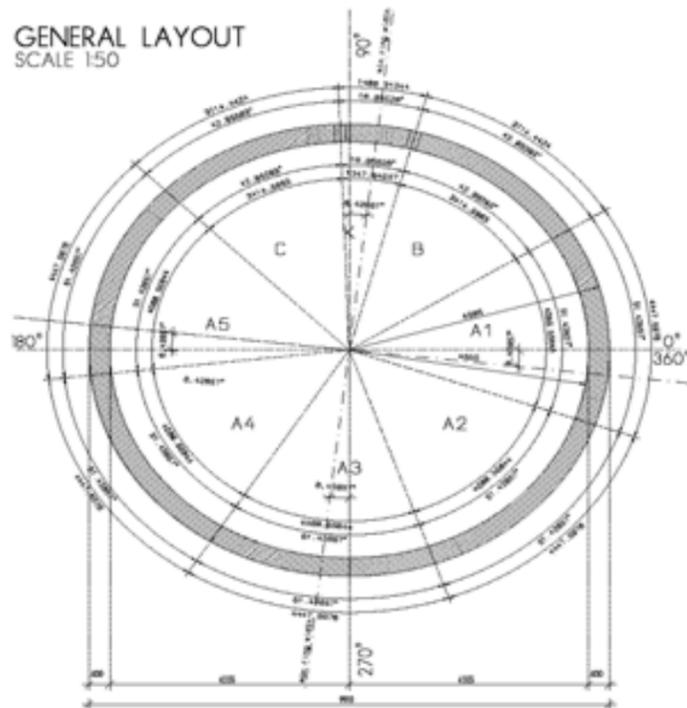
MEXICO CITY, METRO LINE 12 EPB331-331	D P499013	5 F
	DO NOT SCALE	

1.c. POSICIONES DE LA DOVELA DE CIERRE

VIEW OF ALL KEY POSITIONS, FACING IN EXCAVATION DIRECTION SCALE 1:100



GENERAL LAYOUT SCALE 1:50



POSITION OF JACKS SCALE 1:50



max L = MAX LENGTH OF RING
 min L = MIN LENGTH OF RING
 [-37.26] DIFFERENCE TO AVERAGE LENGTH OF RING (1500mm)
 K, B, C, A1, A2, A3, A4 and A5 SEGMENT LETTER
 1-28 NUMBERING OF JACKS

SCALE = 1:100

SCALE = 1:50

ALL DIMENSIONS IN mm AND DEGREE

Tunnel Mexico City, Metro Line 12



Prof. Dr.-Ing. B. Witt	Dr.-Ing. B. Witt	Project No.	080050-1
Consulting Engineers	Consulting Engineers	Date	
Original: Mexico 112	11288 Berlin	Author	B. Witt
Germany		Verified	B. Witt
		Author/Lead	B. Witt

PRECAST REINFORCED CONCRETE LINING
 GENERAL PLAN

Drawing No.	150 / 1100	Scale	150 / 1100
Revision		Status	Issue

ANEXO 2 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LAS PRESIONES DE SOSTENIMIENTO DEL FRENTE DURANTE LA EXCAVACION DEL TÚNEL.

Las presiones de sostenimiento en el frente durante la excavación se obtuvieron mediante los criterios analíticos siguientes:

- Solución aproximada para suelo con peso propio.
- Criterio de los teoremas de frontera, frontera inferior.
- Criterio del empuje en reposo.
- Criterio observacional

El desarrollo de cada criterio no se incluye ya que no es objetivo del trabajo, solo se mencionarán los resultados de presión máxima y mínima para cada línea de sensores del escudo.

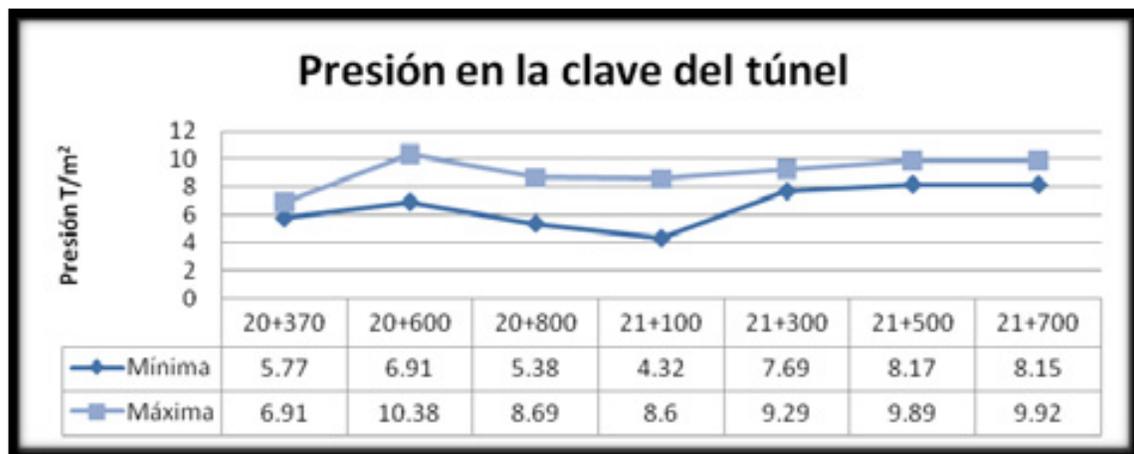
Cabe mencionar que la mayor parte de los resultados del criterio “empuje en reposo” son los utilizados para la presión máxima, en cambio para la presión mínima se ocuparon resultados de todos los criterios excepto del criterio “Empuje en reposo”.

Las presiones en el frente que se muestran en la siguiente tabla van desde el cadenamiento 20+370 poco después de la lumbrera de acceso hasta el cadenamiento 21+700 un poco antes de la estación Ermita, ya que este será el primer tramo a excavar, que actualmente se está excavando y se terminará aproximadamente entre agosto y septiembre de este año.

		Cadenamiento						
		20+370	20+600	20+800	21+100	21+300	21+500	21+700
Cobertura[m] Presión [t/m ²]		7.05	8.93	7.6	7.55	8.3	8.83	8.93
		Mínima	5.77	6.91	5.38	4.32	7.69	8.17
Clave	Máxima	6.91	10.38	8.69	8.6	9.29	9.89	9.92
	Mínima	7.48	8.64	7.08	5.96	8.89	9.38	9.43
Línea A	Máxima	9.44	11.9	10.19	10.08	10.75	11.35	11.37
	Mínima	9.22	10.08	8.63	7.3	10.71	11.19	11.13
Línea B	Máxima	11.65	14.18	12.43	12.32	12.94	13.55	13.55
	Mínima	10.6	11.37	9.83	8.29	12.41	12.98	12.8
Eje	Máxima	13.72	16.31	14.53	14.4	15	15.6	15.59
	Mínima	11.07	11.81	10.25	8.63	13	13.48	13.38
Línea C	Máxima	14.44	17.05	15.25	15.13	15.71	16.31	16.29
	Mínima	11.87	12.56	10.95	9.2	13.98	14.47	14.36
Línea D	Máxima	15.64	18.29	16.47	16.34	16.9	17.5	17.48
	Mínima	13.42	14.02	12.31	10.31	15.9	16.39	16.25
Línea E	Máxima	17.98	20.7	18.84	18.7	19.22	19.83	19.78
	Mínima	14.41	14.95	13.18	11.02	17.13	17.61	17.46
Cubeta	Máxima	19.48	22.24	20.36	20.21	20.74	21.31	21.26

Tabla A2 "Presiones de sostenimiento del frente en el tramo de excavación 1"

Gráficas de presión de sostenimiento del frente de excavación.



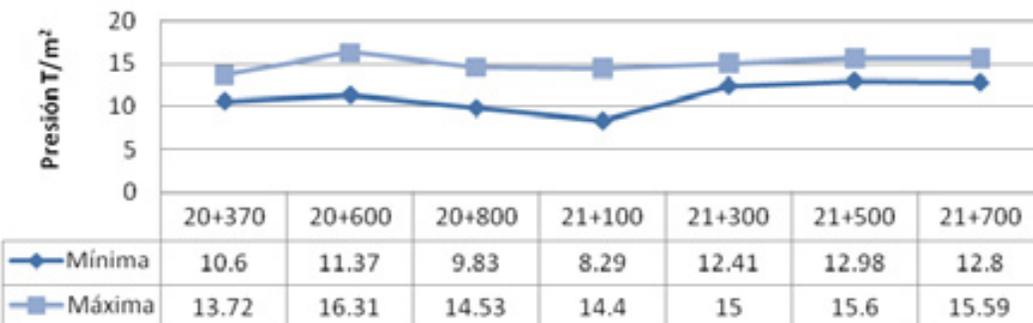
Presión en la línea A del túnel



Presión en la línea B del túnel



Presión en el eje del túnel



Presión en la línea C del túnel

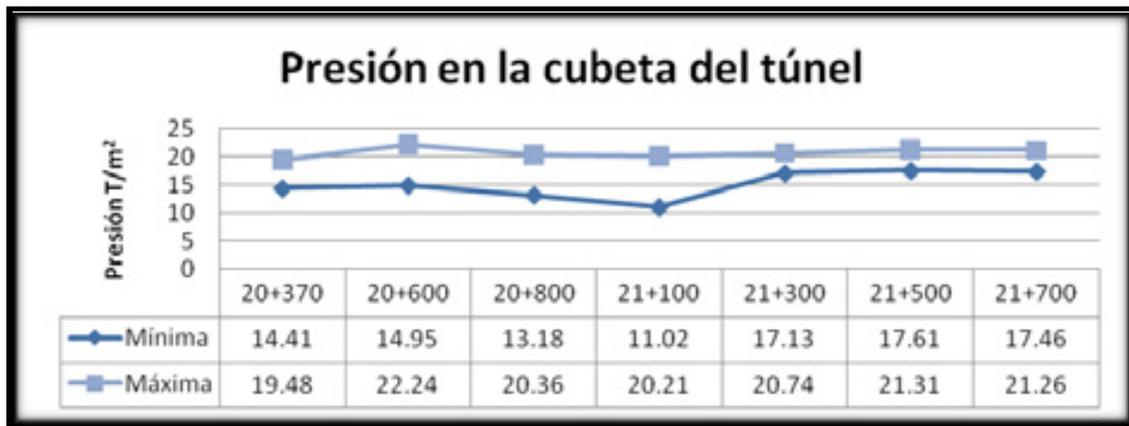


Presión en la línea D del túnel



Presión en la línea E del túnel





Debe tenerse en cuenta que los cálculos están basados en cálculos teóricos que deben ser verificados de acuerdo con las condiciones que se encuentren en campo al momento de la excavación. Para ello es necesario un adecuado monitoreo de los asentamientos en superficie de manera que puedan relacionarse con la presión aplicada en la cámara del escudo.

Las presiones a ser utilizadas para los primeros metros de avance del escudo serán las máximas calculadas, con un rango de variación de -10%. Deberá considerarse además la variación de presión aplicada que puede existir por la precisión del mecanismo de empuje que mantiene las presiones en la cámara, la cual es del orden de $\pm 0.2 \text{ bar} = 2 \text{ t/m}^2$.

ANEXO 3 EVALUACIÓN TEÓRICA DE LOS ASENTAMIENTOS EN SUPERFICIE DEBIDOS A LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL.

La evaluación de los asentamientos en superficie es un problema complejo ya que la magnitud de los desplazamientos en el suelo depende de un gran número de factores que incluyen: las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del suelo, la geometría del túnel y su profundidad, los métodos de excavación y la calidad de ejecución de la construcción.

Sin embargo existen varios enfoques teóricos o semiempíricos que permiten evaluar de manera analítica y aproximada los asentamientos en superficie que se presentarán debido a la excavación del túnel.

Los criterios aplicados para la evaluación de los asentamientos para la Línea 12 son los siguientes:

- Criterio de Kolymbas.
- Criterio de Attewell y Woodman.

Cabe mencionar que solo se van a mencionar los resultados de cada criterio ya que el objetivo de este trabajo no es desarrollar los cálculos.

La tabla siguiente muestra los resultados de los criterios aplicados para la evaluación de los asentamientos en superficie desde el cadenamamiento 20+370 poco después de la lumbrera de acceso hasta el cadenamamiento 21+700 un poco antes de la estación Ermita.

Cadenamiento [Km]	Cobertura [m]	Kolymbas $S_{max}[m]$	Attewell y W. $S_{max}[m]$
20+370	7.05	0.032	0.043
20+600	8.93	0.035	0.037
20+800	7.6	0.035	0.041
21+100	7.55	0.042	0.041
21+300	8.3	0.033	0.039
21+500	8.83	0.033	0.037
21+700	8.93	0.033	0.037

Tabla A3 "asentamientos en superficie tramo 1"

Los asentamientos máximos en superficie son de alrededor 4 cm, para el tramo 1.

ANEXO 4 GRÁFICAS DE ASENTAMIENTO EN SUPERFICIE REALIZADAS CON BASE EN LECTURAS TOMADAS DE LA INSTRUMENTACIÓN SUPERFICIAL SOBRE EL EJE DEL TRAZO.

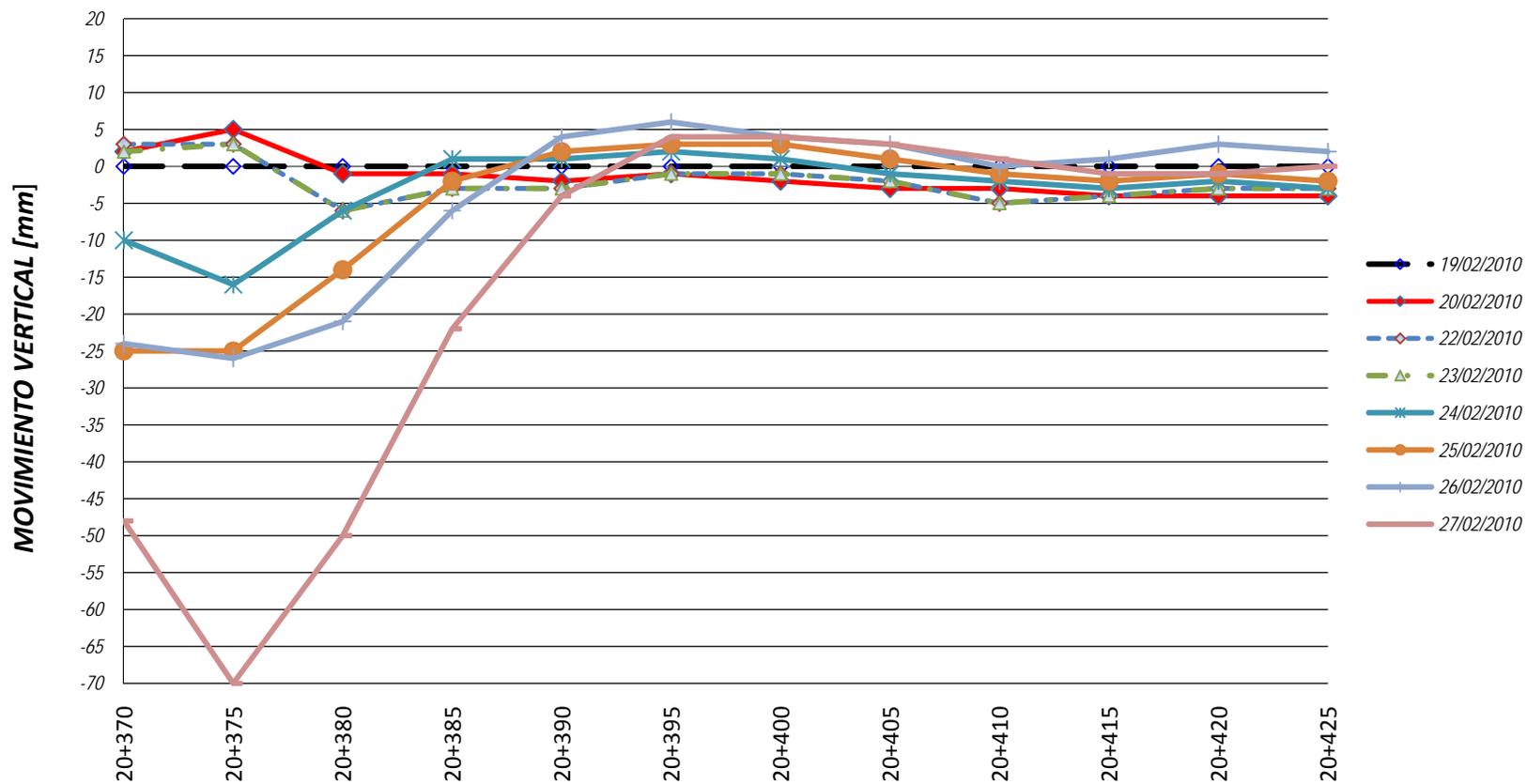
Las siguientes tablas muestran las lecturas tomadas desde el cadenamamiento 20+370 que es donde se localiza la lumbrera de entrada del escudo hasta el cadenamamiento 20+860, un poco antes de donde se localiza la estación Mexicaltzingo, estas lecturas abarcan aproximadamente 4 meses de trabajo desde febrero hasta mayo, mes en donde el escudo arribo a la estación Mexicaltzingo (22 de Mayo).

Como observarán el asentamiento mayor fue de 102 mm de deformación y se presento en el mes de Febrero se localizó en el cadenamamiento 20+395, que se encuentra muy cerca de la lumbrera de entrada del escudo y la expansión mayor se localizo en el cadenamamiento 20+715 con 28mm y esto fue en el mes de abril.

FECHA	20+370	20+375	20+380	20+385	20+390	20+395	20+400	20+405	20+410	20+415	20+420	20+425
19/02/2010	2234.340	2234.329	2234.264	2234.330	2234.450	2234.551	2234.546	2234.604	2234.667	2234.728	2234.775	2234.819
20/02/2010	2234.342	2234.334	2234.263	2234.329	2234.448	2234.550	2234.544	2234.601	2234.664	2234.724	2234.771	2234.815
22/02/2010	2234.343	2234.332	2234.258	2234.327	2234.447	2234.550	2234.545	2234.602	2234.662	2234.724	2234.772	2234.816
23/02/2010	2234.342	2234.332	2234.258	2234.327	2234.447	2234.550	2234.545	2234.602	2234.662	2234.724	2234.772	2234.816
24/02/2010	2234.330	2234.313	2234.258	2234.331	2234.451	2234.553	2234.547	2234.603	2234.665	2234.725	2234.773	2234.816
25/02/2010	2234.315	2234.304	2234.250	2234.328	2234.452	2234.554	2234.549	2234.605	2234.666	2234.726	2234.774	2234.817
26/02/2010	2234.316	2234.303	2234.243	2234.324	2234.454	2234.557	2234.55	2234.607	2234.667	2234.729	2234.778	2234.821
27/02/2010	2234.292	2234.259	2234.214	2234.308	2234.446	2234.555	2234.550	2234.607	2234.668	2234.727	2234.774	2234.819
MV [mm]	-48	-70	-50	-22	-4	4	4	3	1	-1	-1	0

Tabla A4 Lecturas tomadas en el mes de Febrero

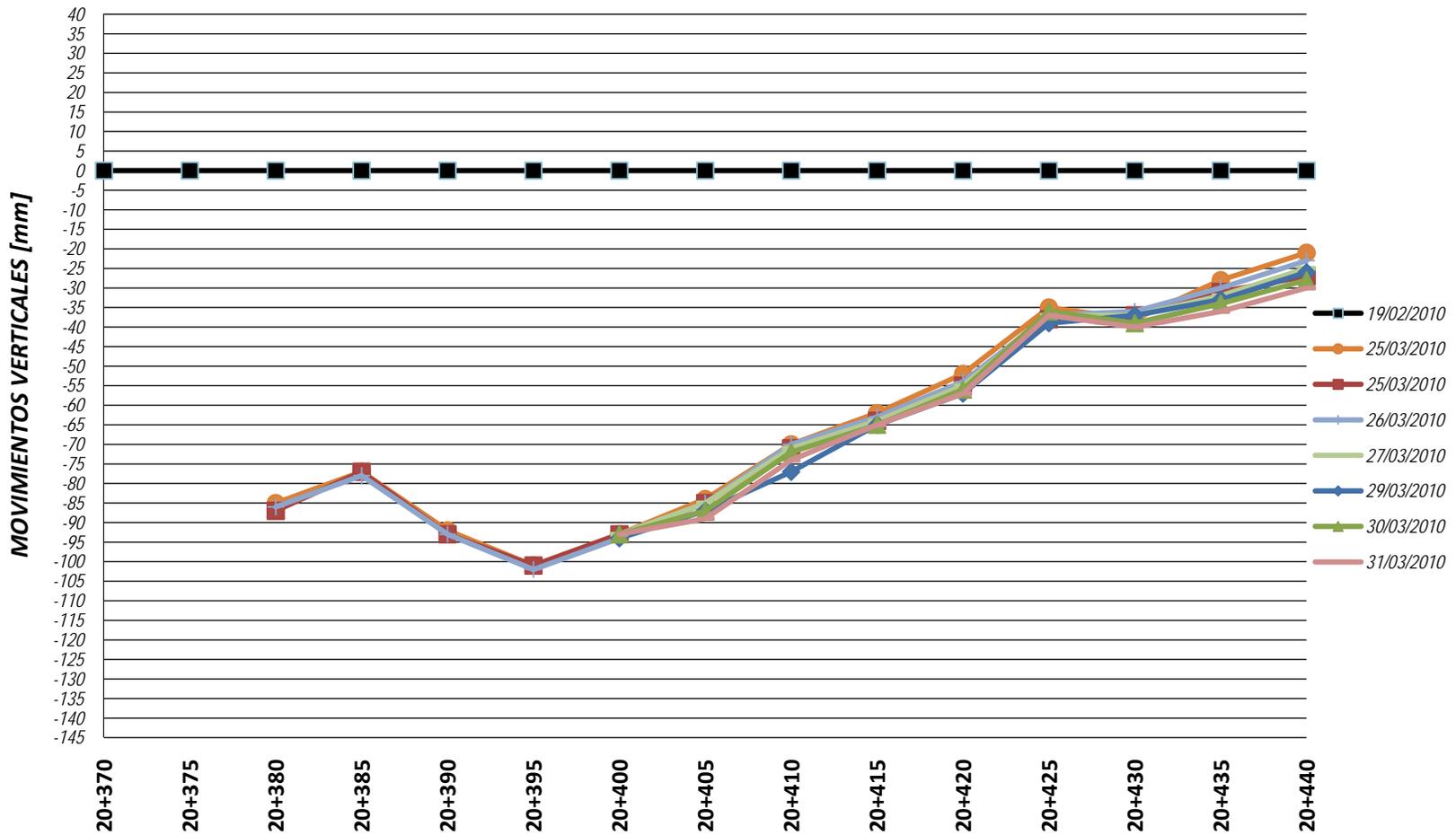
PERFIL DE MOVIMIENTOS VERTICALES SOBRE TERRENO NATURAL



FECHA	20+370	20+375	20+380	20+385	20+390	20+395	20+400	20+405	20+410	20+415	20+420	20+425	20+430	20+435	20+440
01/03/10	obstruido	2234.236	2234.195	2234.288	2234.427	2234.544	2234.544	2234.602	2234.664	2234.725	2234.769	2234.812			
02/03/10	obstruido	2234.235	2234.192	2234.286	2234.428	2234.548	2234.546	2234.605	2234.666	2234.726	2234.771	2234.816			
03/03/10	obstruido	2234.237	2234.195	2234.290	2234.431	2234.548	2234.547	2234.605	2234.667	2234.726	2234.773	2234.816			
04/03/10	obstruido	2234.236	2234.192	2234.287	2234.430	2234.545	2234.545	2234.603	2234.665	2234.724	2234.770	2234.814			
05/03/10	obstruido	2234.237	2234.199	2234.289	2234.429	2234.546	2234.546	2234.605	2234.665	2234.724	2234.772	2234.816			
06/03/10	obstruido	2234.237	2234.194	2234.289	2234.429	2234.545	2234.545	2234.605	2234.666	2234.725	2234.770	2234.815			
08/03/10	obstruido	2234.238	2234.195	2234.290	2234.430	2234.545	2234.545	2234.603	2234.667	2234.727	2234.772	2234.817			
09/03/10	obstruido	2234.237	2234.193	2234.288	2234.428	2234.544	2234.544	2234.604	2234.666	2234.725	2234.772	2234.821			
10/03/10	obstruido	2234.236	2234.193	2234.288	2234.429	2234.544	2234.544	2234.602	2234.664	2234.722	2234.771	2234.815	2234.783	2234.796	2234.800
11/03/10	obstruido	2234.237	2234.194	2234.288	2234.427	2234.549	2234.546	2234.603	2234.664	2234.724	2234.771	2234.814	2234.783	2234.796	2234.800
12/03/10	obstruido	2234.231	2234.190	2234.282	2234.425	2234.546	2234.544	2234.602	2234.663	2234.722	2234.768	2234.813	2234.781	2234.792	2234.797
13/03/10	obstruido	2234.231	2234.182	2234.276	2234.416	2234.534	2234.539	2234.599	2234.661	2234.719	2234.765	2234.810	2234.777	2234.789	2234.793
14/03/10	obstruido	2234.230	2234.181	2234.265	2234.403	2234.524	2234.534	2234.598	2234.662	2234.720	2234.768	2234.812	2234.779	2234.792	2234.798
15/03/10	obstruido	2234.229	2234.176	2234.263	2234.397	2234.518	2234.527	2234.594	2234.660	2234.720	2234.769	2234.813	2234.780	2234.791	2234.797
16/03/10	obstruido	2234.232	2234.178	2234.254	2234.366	2234.473	2234.503	2234.580	2234.658	2234.725	2234.777	2234.821	2234.787	2234.799	2234.802
17/03/10	obstruido	2234.231	2234.178	2234.253	2234.362	2234.456	2234.466	2234.544	2234.637	2234.717	2234.772	2234.821	2234.788	2234.799	2234.807
18/03/10	2234.274	2234.231	2234.178	2234.252	2234.360	2234.454	2234.461	2234.537	2234.632	2234.710	2234.766	2234.816	2234.783	2234.795	2234.801
19/03/10	2234.274	2234.231	2234.178	2234.253	2234.360	2234.453	2234.460	2234.535	2234.630	2234.710	2234.766	2234.814	2234.781	2234.795	2234.800
20/03/10	2234.277	2234.234	2234.179	2234.254	2234.350	2234.452	2234.455	2234.526	2234.615	2234.698	2234.760	2234.815	2234.789	2234.799	2234.804
21/03/10	2234.274	2234.231	2234.177	2234.252	2234.363	2234.451	2234.455	2234.522	2234.602	2234.676	2234.738	2234.797	2234.776	2234.796	2234.803
22/03/10	2234.278	2234.235	2234.181	2234.255	2234.362	2234.454	2234.458	2234.524	2234.600	2234.669	2234.729	2234.791	2234.765	2234.796	2234.806
23/03/10			2234.178	2234.253	2234.359	2234.451	2234.455	2234.521	2234.599	2234.665	2234.720	2234.784	2234.762	2234.792	2234.804
24/03/10			2234.177	2234.251	2234.357	2234.450	2234.453	2234.521	2234.598	2234.666	2234.721	2234.780	2234.746	2234.767	2234.780
25/03/10			2234.179	2234.253	2234.358	2234.450	2234.453	2234.520	2234.597	2234.666	2234.723	2234.784	2234.745	2234.768	2234.779
26/03/10			2234.178	2234.252	2234.357	2234.449	2234.452	2234.519	2234.597	2234.665	2234.721	2234.782	2234.747	2234.766	2234.777
27/03/10							2234.453	2234.519	2234.596	2234.664	2234.720	2234.782	2234.746	2234.764	2234.775
29/03/10			2234.177				2234.452	2234.517	2234.590	2234.663	2234.718	2234.780	2234.746	2234.763	2234.774
30/03/10							2234.453	2234.517	2234.595	2234.663	2234.719	2234.783	2234.744	2234.762	2234.772
31/03/10							2234.453	2234.515	2234.593	2234.663	2234.718	2234.782	2234.743	2234.760	2234.770
MV[mm]	-62	-94	-87	-78	-93	-102	-93	-89	-74	-65	-57	-37	-40	-36	-30

Tabla A4.1 Lecturas tomadas en el mes de Marzo del Cad. 20+370 al Cad. 20+440

PERFIL DE MOVIMIENTOS VERTICALES SOBRE TERRENO NATURAL



FECHA	20+445	20+450	20+455	20+460	20+465	20+470	20+475	20+480	20+485	20+490	20+495	20+500	20+505	20+510	20+515	
01/04/10	2234.751	2234.778	2234.821	2234.873	2234.937	2234.97	2235.053	2235.104	2235.18	2235.257	2235.318	2235.307	2235.359	2235.381	2235.381	
05/04/10	2234.752	2234.78	2234.825	2234.876	2234.941	2234.975	2235.058	2235.11	2235.185	2235.26	2235.319	2235.307	2235.362	2235.385	2235.385	
06/04/10	2234.753	2234.781	2234.822	2234.867	2234.929	2234.968	2235.05	2235.11	2235.192	2235.278	2235.329	2235.317	2235.369	2235.393	2235.392	
07/04/10	2234.741	2234.768	2234.807	2234.849	2234.909	2234.942	2235.029	2235.087	2235.176	2235.27	2235.323	2235.31	2235.362	2235.384	2235.373	
08/04/10	OBS	2234.765	2234.805	2234.845	2234.904	2234.936	2235.015	2235.067	2235.152	2235.246	2235.31	2235.307	2235.361	2235.381	2235.380	
09/04/10	2234.738	2234.765	2234.805	2234.846	2234.904	2234.936	2235.015	2235.067	2235.152	2235.246	2235.31	2235.307	2235.361	2235.381	2235.379	
10/04/10	2234.737	2234.765	2234.804	2234.845	2234.902	2234.932	2235.009	2235.056	2235.132	2235.221	2235.276	2235.277	2235.344	2235.379	2235.382	
11/04/10	2234.735	2234.762	2234.801	2234.84	2234.899	2234.927	2235.005	2235.052	2235.129	2235.218	2235.272	2235.27	2235.332	2235.363	2235.374	
12/04/10	2234.735	2234.762	2234.8	2234.84	2234.898	2234.927	2235.003	2235.052	2235.127	2235.215	2235.269	2235.263	2235.329	2235.361	2235.373	
13/04/10	2234.74	2234.772	2234.805	2234.851	2234.904	2234.933	2235.009	2235.056	2235.133	2235.221	2235.273	2235.264	2235.316	2235.342	2235.349	
14/04/10	2234.734	2234.765	2234.804	2234.844	2234.902	2234.932	2235.01	2235.056	2235.134	2235.219	2235.27	2235.261	2235.314	2235.336	2235.343	
15/04/10	2234.74	2234.766	2234.805	2234.845	2234.903	2234.932	2235.008	2235.056	2235.133	2235.219	2235.272	2235.26	2235.312	2235.335	2235.337	
16/04/10															2235.337	
17/04/10																2235.337
19/04/10																2235.332
20/04/10																2235.333
21/04/10																2235.333
22/04/10																
23/04/10																
24/04/10																
26/04/10																
27/04/10																
28/04/10																
29/04/10																
30/04/10																
MV[mm]	-35	-43	-39	-46	-55	-48	-45	-43	-39	-36	-35	-35	-38	-39	-42	

Tabla A4.2 Lecturas tomadas en el mes de Abril, del Cad. 20+445 al Cad. 20+515

FECHA	20+520	20+525	20+530	20+535	20+540	20+545	20+550	20+555	20+560	20+565	20+570	20+575	20+580	20+585	20+590
01/04/10															
05/04/10															
06/04/10	2235.408														
07/04/10	2235.396	2235.420	2235.418	2235.450	2235.473										
08/04/10	2235.394	2235.416	2235.414	2235.445	2235.467	2235.518	2235.558	2235.628	2235.618	2235.656	2235.697	2235.704	2235.691	2235.685	2235.657
09/04/10	2235.394	2235.415	2235.414	2235.444	2235.467	obstruido	2235.556	2235.626	2235.613						
10/04/10	2235.397	2235.420	2235.417	2235.449	2235.472	2235.519	2235.560	2235.631	obstruido						
11/04/10	2235.394	2235.418	2235.414	2235.444	2235.467	2235.514	2235.555	obstruido	2235.615						
12/04/10	2235.393	2235.417	2235.414	2235.445	2235.468	2235.516	2235.557	2235.628	2235.617						
13/04/10	2235.376	2235.413	2235.422	2235.458	2235.480	2235.528	2235.568	2235.637	2235.626	2235.661	2235.702				
14/04/10	2235.365	2235.402	2235.412	2235.455	2235.481	2235.530	2235.569	2235.639	2235.627	2235.662	2235.702	2235.708	2235.700		
15/04/10	2235.358	2235.387	2235.402	2235.433	2235.466	2235.523	2235.567	2235.637	2235.624	2235.659	2235.700	2235.706	2235.696		
16/04/10	2235.356	2235.381	2235.379	2235.415	2235.442	2235.503	2235.556	2235.636	2235.630	2235.664	2235.704	2235.709	2235.698	2235.688	2235.660
17/04/10	2235.354	2235.379	2235.375	2235.411	2235.436	2235.488	2235.536	2235.618	2235.622	2235.664	2235.708	2235.713	2235.700	2235.693	2235.660
19/04/10	2235.351	2235.375	2235.370	2235.405	2235.429	2235.477	2235.520	2235.595	2235.596	2235.645	2235.696	2235.713	2235.704	2235.695	2235.663
20/04/10	2235.351	2235.375	2235.370	2235.405	2235.428	2235.477	2235.520	2235.594	2235.593	2235.639	2235.688	2235.704	2235.700	2235.698	2235.670
21/04/10	2235.350	2235.379	2235.369	2235.402	2235.427	2235.475	2235.518	2235.592	2235.590	2235.635	2235.677	2235.687	2235.687	2235.691	2235.670
22/04/10									2235.590	2235.633	2235.675	2235.684	2235.680	2235.677	2235.649
23/04/10					2235.425	2235.473	2235.517	2235.590	2235.587	2235.631	2235.673	2235.680	2235.676	2235.672	2235.641
24/04/10					2235.427	2235.475	2235.518	2235.590	2235.588	2235.632	2235.674	2235.682	2235.677	2235.673	2235.641
26/04/10							2235.516	2235.589	2235.586	2235.629	2235.672	2235.679	2235.675	2235.670	2235.638
27/04/10							2235.516	2235.590	2235.588	2235.630	2235.671	2235.680	2235.674	2235.672	2235.637
28/04/10									2235.588	2235.632	2235.674	2235.681	2235.676	2235.672	2235.638
28/04/10															2235.635
29/04/10															2235.637
30/04/10															2235.637
MV[mm]	-58	-47	-49	-47	-46	-43	-43	0	-30	-24	-23	-23	-15	-13	-19

Tabla A4.3 Lecturas tomadas en el mes de Abril, del Cad. 20+520 al Cad. 20+590

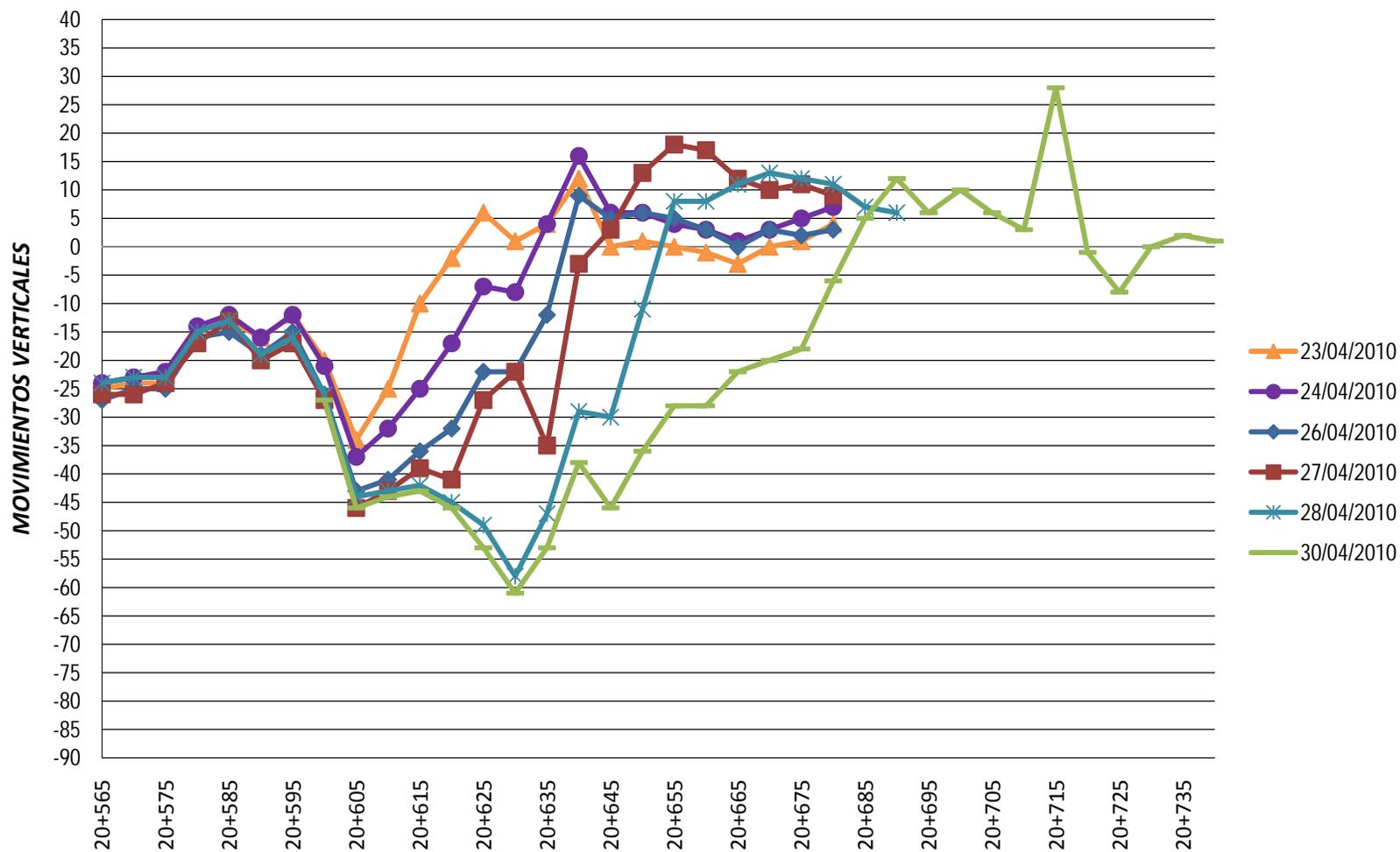
FECHA	20+595	20+600	20+605	20+610	20+615	20+620	20+625	20+630	20+635	20+640	20+645	20+650	20+655	20+660	20+665
01/04/10															
05/04/10															
06/04/10															
07/04/10															
08/04/10	2235.646	2235.589													
09/04/10															
10/04/10															
11/04/10															
12/04/10															
13/04/10															
14/04/10															
15/04/10															
16/04/10															
17/04/10	2235.646	2235.594	2235.531												
19/04/10	2235.651	2235.592	2235.530	2235.510	2235.469	2235.394									
20/04/10	2235.659	2235.599													
21/04/10	2235.665	2235.607	2235.540	2235.519	2235.477	2235.401	2235.287	2235.249							
22/04/10	2235.644	2235.593	2235.536	2235.527	2235.483	2235.405	2235.288	2235.247	2235.167	2235.098	2235.060	2235.023	2234.980	2234.935	2234.889
23/04/10	2235.634	2235.569	2235.497	2235.485	2235.459	2235.392	2235.286	2235.250	2235.171	2235.110	2235.060	2235.024	2234.980	2234.934	2234.886
24/04/10	2235.634	2235.568	2235.494	2235.478	2235.444	2235.377	2235.273	2235.241	2235.171	2235.114	2235.066	2235.029	2234.984	2234.938	2234.890
26/04/10	2235.631	2235.563	2235.488	2235.469	2235.433	2235.362	2235.258	2235.227	2235.155	2235.107	2235.065	2235.029	2234.985	2234.938	2234.889
27/04/10	2235.629	2235.562	2235.485	2235.467	2235.430	2235.353	2235.253	2235.227	2235.132	2235.095	2235.063	2235.036	2234.998	2234.952	2234.901
28/04/10	2235.630	2235.563	2235.487	2235.467	2235.427	2235.349	2235.231	2235.191	2235.120	2235.069	2235.030	2235.012	2234.988	2234.943	2234.900
29/04/10	2235.629	2235.562	2235.484	2235.464	2235.426	2235.347	2235.228	2235.187	2235.114	2235.059	2235.015	2234.990	2234.956	2234.915	2234.886
30/04/10		2235.562	2235.485	2235.466	2235.426	2235.348	2235.227	2235.188	2235.114	2235.060	2235.014	2234.987	2234.952	2234.907	2234.867
MV[mm]	-17	-27	-46	-44	-43	-46	-51	-61	-54	-38	-46	-36	-28	-28	-22

Tabla A4.4 Lecturas tomadas en el mes de Abril, del Cad. 20+595 al Cad. 20+665

FECHA	20+670	20+675	20+680	20+685	20+690	20+695	20+700	20+705	20+710	20+715	20+720	20+725	20+730	20+735	20+740
01/04/10															
05/04/10															
06/04/10															
07/04/10															
08/04/10															
09/04/10															
10/04/10															
12/04/10															
13/04/10															
14/04/10															
15/04/10															
16/04/10															
17/04/10															
19/04/10															
20/04/10															
21/04/10															
22/04/10	2234.825	2234.739	2234.638												
23/04/10	2234.825	2234.740	2234.642												
24/04/10	2234.828	2234.744	2234.645												
26/04/10	2234.828	2234.741	2234.641												
27/04/10	2234.835	2234.750	2234.647	2234.569	2234.489										
28/04/10	2234.838	2234.751	2234.649	2234.576	2234.495	2234.437	2234.413	2234.377	2234.344	2234.324	2234.307	2234.316			
29/04/10	2234.836	2234.751	2234.653	2234.580	2234.498	2234.438	2234.413	2234.373	2234.340	2234.320	2234.304	2234.312			
30/04/10	2234.805	2234.721	2234.632	2234.574	2234.501	2234.443	2234.423	2234.383	2234.347	2234.352	2234.306	2234.308	2234.291	2234.293	2234.294
MV[mm]	-20	-18	-6	5	12	6	10	6	3	28	-1	-8	0	2	1

Tabla A4.5 Lecturas tomadas en el mes de Abril, del Cad. 20+670 al Cad. 20+740

PERFIL DE MOVIMIENTOS VERTICALES SOBRE TERRENO NATURAL



FECHA	20+600	20+605	20+610	20+615	20+620	20+625	20+630	20+635	20+640	20+645	20+650	20+655	20+660
01/05/10						2235.225	2235.184	2235.110	2235.055	2235.011	2234.982	2234.947	2234.902
03/05/10						2235.223	2235.183	2235.108	2235.053	2235.007	2234.978	2234.944	2234.898
04/05/10	2235.556	2235.481	2235.461	2235.421	2235.346	2235.225	2235.184	2235.108	2235.052	2235.006	2234.978	2234.943	2234.898
05/05/10	2235.556	2235.481	2235.461	2235.421	2235.341	2235.220	2235.180	2235.106	2235.050	2235.006	2234.977	2234.939	2234.894
06/05/10	2235.556	2235.481	2235.461	2235.421	2235.344	2235.223	2235.183	2235.107	2235.051	2235.006	2234.979	2234.940	2234.896
08/05/10	2235.556	2235.481	2235.461	2235.421	2235.343	2235.222	2235.181	2235.106	2235.050	2235.004	2234.975	2234.941	2234.897
10/05/10					2235.345	2235.224	2235.182	2235.107	2235.050	2235.004	2234.976	2234.941	2234.897
11/05/10					2235.344	2235.223	2235.182	2235.107	2235.051	2235.006	2234.976	2234.940	2234.895
12/05/10					2235.344	2235.223	2235.181	2235.105	2235.049	2235.004	2234.975	2234.939	2234.894
13/05/10					2235.345	2235.222	2235.181	2235.107	2235.052	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
14/05/10					2235.346	2235.224	2235.182	2235.106	2235.052	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
15/05/10					2235.345	2235.224	2235.183	2235.107	2235.051	2235.006	2234.977	2234.942	2234.897
16/05/10					2235.346	2235.224	2235.183	2235.107	2235.052	2235.006	2234.977	obstruido	2234.897
17/05/10					2235.345	2235.223	2235.182	2235.107	2235.051	2235.006	2234.978	2234.942	2234.897
18/05/10					2235.345	2235.224	2235.183	2235.107	2235.050	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
19/05/10					2235.345	2235.225	2235.183	2235.107	2235.051	2235.006	2234.977	2234.942	2234.898
20/05/10					2235.344	2235.222	2235.183	2235.107	2235.051	2235.006	2234.978	2234.942	2234.897
21/05/10					2235.345	2235.222	2235.184	2235.106	2235.051	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
22/05/10					2235.345	2235.222	2235.184	2235.106	2235.051	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
24/05/10					2235.345	2235.223	2235.181	2235.107	2235.051	2235.005	2234.976	2234.941	2234.896
25/05/10					2235.346	2235.225	2235.183	2235.107	2235.051	2235.005	2234.977	2234.942	2234.894
26/05/10					2235.347	2235.225	2235.184	2235.106	2235.051	2235.005	2234.975	2234.942	2234.896
27/05/10					2235.346	2235.226	2235.185	2235.107	2235.051	2235.006	2234.978	2234.943	2234.898
28/05/10					2235.345	2235.224	2235.182	2235.105	2235.050	2235.004	2234.974	2234.941	2234.895
29/05/10					2235.345	2235.223	2235.182	2235.107	2235.051	2235.006	2234.975	2234.942	2234.897
31/05/10					2235.346	2235.223	2235.182	2235.107	2235.050	2235.006	2234.976	2234.942	2234.896
MV[mm]	-33	-50	-49	-44	-48	-57	-67	-60	-48	-54	-47	-38	-39

Tabla A4.6 Lecturas tomadas en el mes de Mayo, del Cad. 20+600 al Cad. 20+660

FECHA	20+665	20+670	20+675	20+680	20+685	20+690	20+695	20+700	20+705	20+710	20+715	20+720	20+725
01/05/10	2234.862	2234.8	2234.714	2234.62	2234.554	2234.482	2234.433	2234.413	2234.377	2234.346	2234.325	2234.305	2234.305
03/05/10	2234.857	2234.794	2234.707	2234.609	2234.54	2234.461	2234.406	2234.385	2234.369	2234.334	2234.317	2234.31	2234.316
04/05/10	2234.856	2234.794	2234.708	2234.61	2234.539	2234.461	2234.406	2234.385	2234.357	2234.33	2234.309	2234.307	2234.318
05/05/10	2234.854	2234.791	2234.706	2234.608	2234.536	2234.457	2234.401	2234.379	2234.348	2234.315	2234.298	2234.297	2234.319
06/05/10	2234.855	2234.793	2234.706	2234.61	2234.539	2234.46	2234.402	2234.38	2234.346	2234.312	2234.289	2234.282	2234.301
08/05/10	2234.855	2234.792	2234.706	2234.609	2234.537	2234.458	2234.402	2234.376	2234.344	2234.306	2234.279	2234.265	2234.275
10/05/10	2234.855	2234.792	2234.707	2234.609	2234.537	2234.459	2234.399	2234.375	2234.343	2234.305	2234.277	2234.261	2234.269
11/05/10	2234.855	2234.792	2234.706	2234.608	2234.538	2234.459	2234.4	2234.376	2234.343	2234.305	2234.278	2234.262	2234.271
12/05/10	2234.854	2234.79	2234.705	2234.607	2234.535	2234.456	2234.401	2234.376	2234.343	2234.305	2234.279	2234.261	2234.268
13/05/10	2234.854	2234.791	2234.705	2234.607	2234.536	2234.456	2234.399	2234.375	2234.345	2234.306	2234.277	2234.262	2234.27
14/05/10	2234.854	2234.79	2234.705	2234.607	2234.536	2234.457	2234.401	2234.376	2234.345	2234.307	2234.28	2234.264	2234.27
15/05/10	2234.855	2234.792	2234.707	2234.607	2234.536	2234.457	2234.399	2234.375	2234.344	2234.306	2234.277	2234.263	2234.27
16/05/10	2234.855	2234.792	2234.706	2234.607	2234.536	2234.457	2234.399	2234.375	2234.343	2234.306	2234.278	2234.263	2234.27
17/05/10	2234.855	2234.793	2234.706	2234.608	2234.536	2234.459	2234.401	2234.376	2234.344	2234.307	2234.279	2234.263	2234.27
18/05/10	2234.855	2234.791	2234.705	2234.607	2234.536	2234.457	2234.401	2234.373	2234.344	2234.306	2234.278	2234.263	2234.268
19/05/10	2234.856	2234.792	2234.705	2234.608	2234.536	2234.457	2234.4	2234.374	2234.344	2234.306	2234.278	2234.262	2234.268
20/05/10	2234.855	2234.792	2234.706	2234.607	2234.534	2234.456	2234.4	2234.373	2234.342	2234.305	2234.277	2234.261	2234.268
21/05/10	2234.855	2234.792	2234.705	2234.607	2234.534	2234.456	2234.4	2234.372	2234.342	2234.305	2234.278	2234.262	2234.269
22/05/10	2234.855	2234.792	2234.705	2234.607	2234.534	2234.456	2234.4	2234.373	2234.342	2234.305	2234.278	2234.262	2234.269
24/05/10	2234.854	2234.789	2234.704	2234.606	2234.535	2234.457	2234.4	2234.374	2234.344	2234.306	2234.279	2234.262	2234.269
25/05/10	2234.855	2234.792	2234.704	2234.606	2234.535	2234.457	2234.4	2234.373	2234.343	2234.304	2234.278	2234.261	2234.269
26/05/10	2234.854	2234.791	2234.705	2234.606	2234.534	2234.455	2234.399	2234.372	2234.343	2234.305	2234.277	2234.261	2234.269
27/05/10	2234.856	2234.791	2234.705	2234.606	2234.535	2234.456	2234.4	2234.373	2234.343	2234.305	2234.278	2234.261	2234.268
28/05/10	2234.853	2234.79	2234.704	2234.606	2234.533	2234.454	2234.398	2234.371	2234.341	2234.303	2234.275	2234.259	2234.267
29/05/10	2234.855	2234.792	2234.705	2234.607	2234.534	2234.455	2234.4	2234.373	2234.343	2234.305	2234.277	2234.261	2234.267
31/05/10	2234.854	2234.791	2234.704	2234.606	2234.534	2234.456	2234.399	2234.373	2234.343	2234.304	2234.276	2234.259	2234.267
MV[mm]	-35	-34	-35	-32	-35	-33	-38	-40	-34	-40	-48	-48	-49

Tabla A4.6 Lecturas tomadas en el mes de Mayo, del Cad. 20+665 al Cad. 20+725

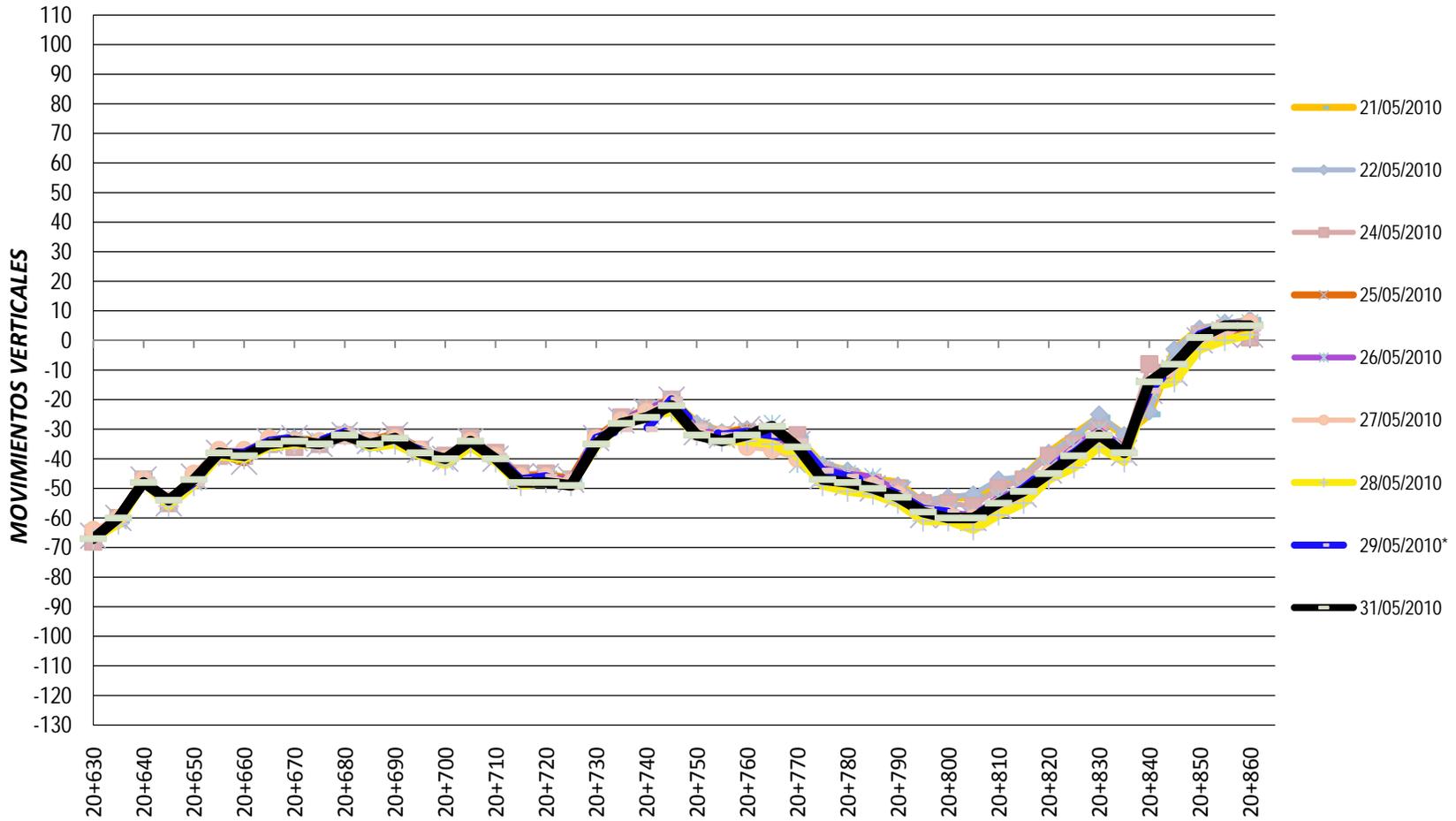
FECHA	20+730	20+735	20+740	20+745	20+750	20+755	20+760	20+765	20+770	20+775	20+780	20+785	20+790
01/05/2010	2234.287	2234.29	2234.29	2234.297	2234.296	2234.298	2234.336	2234.366	2234.381				
03/05/2010	2234.298	2234.297	2234.296	2234.302	2234.3	2234.302	2234.338	2234.369	2234.382	2234.411	2234.401	2234.381	2234.344
04/05/2010	2234.302	2234.3	2234.299	2234.305	2234.302	2234.304	2234.342	2234.373	2234.387	2234.415	2234.406	2234.385	2234.349
05/05/2010	2234.313	2234.313	2234.31	2234.313	2234.308	2234.306	2234.342	2234.372	2234.386	2234.415	2234.405	2234.384	2234.348
06/05/2010	2234.296	2234.305	2234.31	2234.314	2234.306	2234.306	2234.34	2234.372	2234.385	2234.413	2234.404	2234.384	2234.346
08/05/2010	2234.268	2234.279	2234.291	2234.306	2234.308	2234.316	2234.352	2234.379	2234.39	2234.416	2234.406	2234.385	2234.348
10/05/2010	2234.26	2234.268	2234.275	2234.29	2234.291	2234.3	2234.345	2234.384	2234.4	2234.423	2234.411	2234.39	2234.352
11/05/2010	2234.26	2234.267	2234.274	2234.285	2234.281	2234.286	2234.336	2234.373	2234.397	2234.429	2234.418	2234.396	2234.357
12/05/2010	2234.258	2234.265	2234.271	2234.282	2234.274	2234.275	2234.338	2234.377	2234.406	2234.436	2234.434	2234.419	2234.381
13/05/2010	2234.262	2234.267	2234.273	2234.283	2234.273	2234.273	2234.313	2234.346	2234.364	2234.392	2234.393	2234.384	2234.354
14/05/2010	2234.261	2234.266	2234.272	2234.282	2234.273	2234.273	2234.312	2234.343	2234.359	2234.381	2234.371	2234.357	2234.328
15/05/2010	2234.26	2234.266	2234.272	2234.282	2234.272	2234.271	2234.31	2234.341	2234.354	2234.378	2234.367	2234.346	2234.309
16/05/2010	2234.259	2234.263	2234.27	2234.279	2234.269	2234.266	2234.308	2234.337	2234.35	2234.371	2234.358	2234.338	2234.299
17/05/2010	2234.259	2234.265	2234.27	2234.279	2234.27	2234.269	2234.308	2234.339	2234.351	2234.372	2234.359	2234.339	2234.301
18/05/2010	2234.258	2234.265	2234.27	2234.28	2234.269	2234.268	2234.306	2234.336	2234.349	2234.37	2234.359	2234.338	2234.299
19/05/2010	2234.26	2234.263	2234.27	2234.279	2234.268	2234.267	2234.307	2234.338	2234.351	2234.37	2234.358	2234.337	2234.297
20/05/2010	2234.258	2234.265	2234.269	2234.279	2234.269	2234.267	2234.306	2234.335	2234.348	2234.368	2234.357	2234.334	2234.297
20/05/2010	2234.257	2234.264	2234.27	2234.279	2234.27	2234.267	2234.307	2234.335	2234.35	2234.37	2234.358	2234.335	2234.297
21/05/2010	2234.257	2234.264	2234.27	2234.279	2234.27	2234.267	2234.306	2234.335	2234.348	2234.369	2234.357	2234.334	2234.296
22/05/2010	2234.257	2234.264	2234.27	2234.279	2234.27	2234.267	2234.306	2234.335	2234.348	2234.369	2234.357	2234.334	2234.295
24/05/2010	2234.258	2234.265	2234.27	2234.279	2234.268	2234.266	2234.305	2234.334	2234.349	2234.367	2234.355	2234.333	2234.294
25/05/2010	2234.258	2234.264	2234.269	2234.279	2234.267	2234.266	2234.306	2234.335	2234.346	2234.365	2234.353	2234.331	2234.292
26/05/2010	2234.258	2234.264	2234.27	2234.279	2234.269	2234.265	2234.305	2234.338	2234.339	2234.368	2234.356	2234.335	2234.293
27/05/2010	2234.258	2234.264	2234.269	2234.278	2234.267	2234.266	2234.305	2234.335	2234.345	2234.365	2234.353	2234.332	2234.292
28/05/2010	2234.255	2234.263	2234.267	2234.275	2234.266	2234.264	2234.302	2234.331	2234.342	2234.362	2234.35	2234.329	2234.289
29/05/2010	2234.258	2234.263	2234.264	2234.277	2234.267	2234.266	2234.305	2234.334	2234.347	2234.367	2234.355	2234.333	2234.292
31/05/2010	2234.256	2234.263	2234.267	2234.277	2234.266	2234.264	2234.304	2234.337	2234.345	2234.364	2234.353	2234.331	2234.291
MV[mm]	-35	-28	-26	-22	-32	-34	-32	-29	-36	-47	-48	-50	-53

Tabla A4.8 Lecturas tomadas en el mes de Mayo, del Cad. 20+730 al Cad. 20+790

FECHA	20+795	20+800	20+805	20+810	20+815	20+820	20+825	20+830	20+835	20+840	20+845	20+850	20+855	20+860
03/05/10	2234.344													
04/05/10	2234.348													
05/05/10	2234.348													
06/05/10	2234.346													
08/05/10	2234.348													
10/05/10	2234.351													
11/05/10	2234.354	2234.362	2234.377											
12/05/10	2234.377	2234.383	2234.395	2234.450	2234.527	2234.561	2234.617	2234.658						
13/05/10	2234.345	2234.373	2234.384	2234.451	2234.526	2234.561	2234.619	2234.658	2234.676	2234.614	2234.644	2234.671	2234.176	2233.556
14/05/10	2234.346	2234.361	2234.381	2234.458	2234.534	2234.565	2234.622	2234.661	2234.680	2234.618	2234.648	2234.676	2234.179	2233.558
15/05/10	2234.306	2234.324	2234.347	2234.435	2234.516	2234.565	2234.627	2234.666	2234.684	2234.619	2234.647	2234.675	2234.181	
16/05/10	2234.294	2234.310	2234.327	2234.406	2234.494	2234.544	2234.614	2234.665	2234.690	2234.622	2234.646	2234.674		
17/05/10	2234.295	2234.309	2234.324	2234.400	2234.483	2234.528	2234.606	2234.656	2234.684	2234.621	2234.649	2234.676	2234.180	2233.559
18/05/10	2234.290	2234.305	2234.320	2234.397	2234.479	2234.520	2234.592	2234.646	2234.674	2234.625	2234.646	2234.675	2234.178	2233.557
19/05/10	2234.291	2234.304	2234.319	2234.396	2234.478	2234.519	2234.590	2234.640	2234.670	2234.621	2234.648	2234.677	2234.182	2233.563
20/05/10	2234.293	2234.303	2234.317	2234.394	2234.474	2234.511	2234.581	2234.628	2234.649	2234.625	2234.640	2234.671	2234.181	2233.562
21/05/10	2234.289	2234.304	2234.318	2234.394	2234.474	2234.512	2234.581	2234.628	2234.647	2234.588	2234.641	2234.673	2234.181	2233.563
22/05/10	2234.290	2234.304	2234.319	2234.396	2234.474	2234.512	2234.580	2234.629	2234.647	2234.589	2234.641	2234.673	2234.182	2233.563
24/05/10	2234.289	2234.302	2234.315	2234.393	2234.473	2234.511	2234.578	2234.624	2234.643	2234.605	2234.634	2234.671	2234.180	2233.557
25/05/10	2234.285	2234.298	2234.311	2234.387	2234.468	2234.506	2234.575	2234.621	2234.641	2234.596	2234.633	2234.669	2234.178	2233.558
26/05/10	2234.287	2234.299	2234.312	2234.390	2234.470	2234.507	2234.577	2234.624	2234.643	2234.596	2234.636	2234.671	2234.182	2233.562
27/05/10	2234.286	2234.298	2234.311	2234.387	2234.467	2234.505	2234.574	2234.621	2234.641	2234.597	2234.634	2234.668	2234.178	2233.562
28/05/10	2234.283	2234.296	2234.307	2234.384	2234.465	2234.503	2234.570	2234.618	2234.638	2234.597	2234.630	2234.666	2234.176	2233.558
29/05/10	2234.287	2234.299	2234.312	2234.388	2234.470	2234.507	2234.575	2234.622	2234.642	2234.596	2234.636	2234.671	2234.181	2233.560
31/05/10	2234.286	2234.297	2234.311	2234.388	2234.469	2234.505	2234.574	2234.622	2234.641	2234.599	2234.636	2234.670	2234.181	2233.591
MV[mm]	-58	-60	-60	-55	-51	-45	-39	-32	-38	-14	-8	1	5	5

Tabla A4.9 Lecturas tomadas en el mes de Mayo, del Cad. 20+795 al Cad. 20+860

PERFIL DE MOVIMIENTOS VERTICALES SOBRE TERRENO NATURAL



Las tablas siguientes son un resumen de los asentamientos o expansiones causadas por el paso del escudo por mes y además se muestra el asentamiento o hundimiento máximo en el cadenamiento.

	20+370	20+375	20+380	20+385	20+390	20+395	20+400	20+405	20+410	20+415	20+420	20+425	20+430	20+435	20+440	20+445	20+450
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO	-48	-70	-50	-22	-4	4	4	3	1	-1	-1						
MARZO	-62	-94	-87	-78	-93	-102	-93	-89	-74	-65	-57	-37	-40	-36	-30		
ABRIL																	
MAYO																-35	-43
MÁX [mm]	-62	-94	-87	-78	-93	-102	-93	-89	-74	-65	-57	-37	-40	-36	-30	-35	-43

	20+455	20+460	20+465	20+470	20+475	20+480	20+485	20+490	20+495	20+500	20+505	20+510	20+515	20+520	20+525	20+530	20+535
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO																	
MARZO																	
ABRIL	-39	-46	-55	-48	-45	-43	-39	-36	-35	-35	-38	-39	-42	-58	-47	-49	-47
MAYO																	
MÁX [mm]	-39	-46	-55	-48	-45	-43	-39	-36	-35	-35	-38	-39	-42	-58	-47	-49	-47

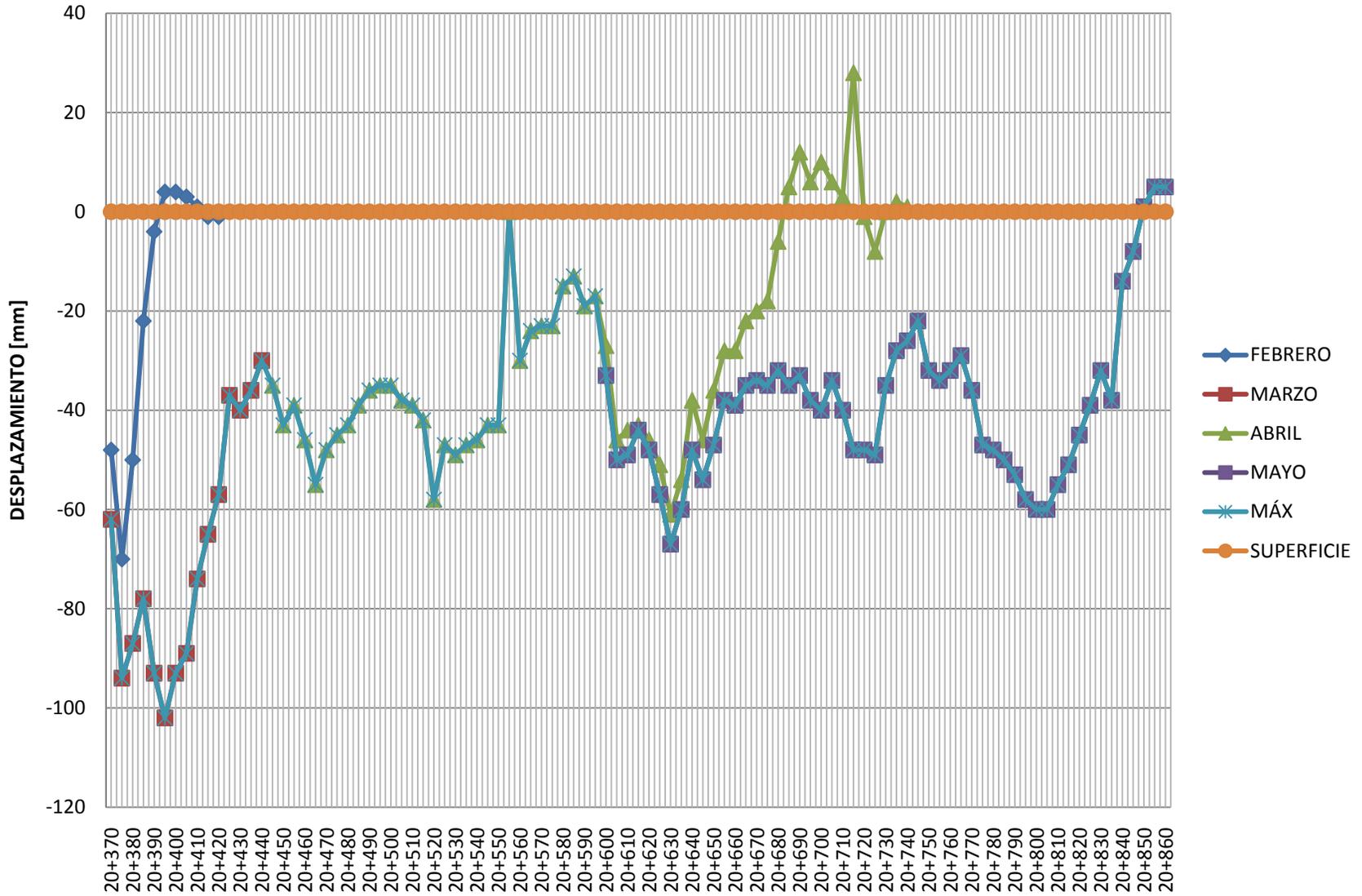
	20+540	20+545	20+550	20+555	20+560	20+565	20+570	20+575	20+580	20+585	20+590	20+595	20+600	20+605	20+610	20+615	20+620
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO																	
MARZO																	
ABRIL	-46	-43	-43	0	-30	-24	-23	-23	-15	-13	-19	-17	-27	-46	-44	-43	-46
MAYO													-33	-50	-49	-44	-48
MÁX [mm]	-46	-43	-43	0	-30	-24	-23	-23	-15	-13	-19	-17	-33	-50	-49	-44	-48

	20+625	20+630	20+635	20+640	20+645	20+650	20+655	20+660	20+665	20+670	20+675	20+680	20+685	20+690	20+695	20+700	20+705
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO																	
MARZO																	
ABRIL	-51	-61	-54	-38	-46	-36	-28	-28	-22	-20	-18	-6	5	12	6	10	6
MAYO	-57	-67	-60	-48	-54	-47	-38	-39	-35	-34	-35	-32	-35	-33	-38	-40	-34
MÁX [mm]	-57	-67	-60	-48	-54	-47	-38	-39	-35	-34	-35	-32	-35	-33	-38	-40	-34

	20+710	20+715	20+720	20+725	20+730	20+735	20+740	20+745	20+750	20+755	20+760	20+765	20+770	20+775	20+780	20+785	20+790
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO																	
MARZO																	
ABRIL	3	28	-1	-8	0	2	1										
MAYO	-40	-48	-48	-49	-35	-28	-26	-22	-32	-34	-32	-29	-36	-47	-48	-50	-53
MÁX [mm]	-40	-48	-48	-49	-35	-28	-26	-22	-32	-34	-32	-29	-36	-47	-48	-50	-53

	20+795	20+800	20+805	20+810	20+815	20+820	20+825	20+830	20+835	20+840	20+845	20+850	20+855	20+860
EJE TÚNEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRERO														
MARZO														
ABRIL														
MAYO	-58	-60	-60	-55	-51	-45	-39	-32	-38	-14	-8	1	5	5
MÁX [mm]	-58	-60	-60	-55	-51	-45	-39	-32	-38	-14	-8	1	5	5

ASENTAMIENTOS Y EXPANSIONES EN SUPERFICIE



ANEXO 5 GRÁFICAS DE VARIACIÓN DEL DIÁMETRO HORIZONTAL INTERNO DEL TÚNEL, REALIZADAS CON BASE EN LECTURAS TOMADAS DE LA INSTRUMENTACIÓN INTERNA DEL TÚNEL.

El objetivo de este anexo es exponer las lecturas realizadas para conocer la variación del diámetro horizontal interno del túnel y saber si el comportamiento del anillo es el esperado y si no lo es proponer soluciones para que de esta manera sea el esperado.

Las siguientes gráficas muestran la variación del diámetro horizontal interno, las lecturas se realizaron durante los meses de abril e inicios de mayo y corresponden a los anillos del 0 al 120, que abarca desde el inicio del túnel hasta aproximadamente el cadenamiento 20+534, que se encuentra antes de la estación Mexicaltzingo.

Como se podrá observar el diámetro horizontal interno sufre más expansión que contracción y esto es debido al peso propio del suelo natural alojado sobre el túnel

Como podrán observar en las gráficas siguientes en el anillo 88 se encuentra se encuentra la contracción mayor (6mm) que se da en este tramo y en el anillo 89 se presenta la expansión más significativa (22mm) en este tramo.

Los anillos de dovelas no sufren grandes deformaciones ya que el espesor teórico de las dovelas resulto ser de 42 cm, con base en un analisis estructural que realizo la empresa Maidl&Maidl, y en la práctica se realizo de 45 cm, lo cual ayuda a que el anillo no sufra deformaciones altamente considerables.

FECHA	NUMERO DE ANILLO															
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
07/04/10	9.083	9.083	9.087	9.081	9.100	9.105										
09/04/10	9.082	9.083	9.087	9.081	9.100	9.104	9.116	9.115	9.112	9.106	9.114	9.122	9.131	9.138		
10/04/10	9.082	9.084	9.088	9.083	9.103	9.108	9.118	9.116	9.112	9.106	9.114	9.122	9.130	9.140	9.121	9.117
11/04/10	9.082	9.084	9.089	9.082	9.103	9.108	9.118	9.116	9.111	9.106	9.114	9.126	9.130	9.140	9.123	9.117
12/04/10	S/L	9.084	9.088	9.082	9.101	9.108	9.118	9.115	9.112	9.106	9.113	9.127	9.131	9.139	9.125	9.117
14/04/10	9.085	9.084	9.088	9.083	9.101	9.107	9.119	9.117	9.112	9.106	9.115	9.130	9.133	9.141	9.126	9.120
15/04/10	9.082	9.084	9.089	9.082	9.102	9.108	9.118	9.116	9.111	9.106	9.115	9.128	9.131	9.141	9.126	9.118
16/04/10	9.084	9.084	9.088	9.082	9.101	9.108	9.118	9.116	9.112	9.107	9.116	9.128	9.132	9.141	9.125	9.122
19/04/10	9.083	9.082	9.089	9.083	9.100	9.105	9.118	9.116	9.112	9.107	9.115	9.127	9.134	9.140	9.127	9.122
20/04/10	9.083	9.082	9.087	9.083	9.104	9.108	9.120	9.118	9.114	9.108	9.117	9.132	9.133	9.143	9.129	9.121
21/04/10	9.082	9.085	9.091	9.081	9.102	9.109	9.122	9.118	9.113	9.108	9.120	9.128	9.134	9.142	9.125	9.119
22/04/10	9.086	9.091	9.087	9.085	9.105	9.109	9.121	9.119	9.114	9.110	9.119	9.127	9.136	9.144	9.130	9.125
23/04/10	9.085	9.083	9.090	9.083	9.101	9.109	9.122	9.120	9.115	9.108	9.119	9.134	9.134	9.145	9.128	9.123
24/04/10	9.083	9.083	9.089	9.083	9.102	9.109	9.120	9.119	9.115	9.109	9.119	9.133	9.134	9.145	9.128	9.123
26/04/10	9.084	9.083	9.088	9.083	9.103	9.109	9.121	9.119	9.115	9.109	9.120	9.133	9.135	9.146	9.130	9.123
28/04/10	9.084	9.083	9.091	9.084	9.109	9.110	9.122	9.121	9.116	9.110	9.119	9.134	9.136	9.146	9.131	9.125
29/04/10	9.084	9.083	9.091	9.084	9.103	9.110	9.120	9.120	9.117	9.111	9.121	9.134	9.138	9.147	9.132	9.126
30/04/10	9.084	9.083	9.090	9.083	9.104	9.109	9.121	9.121	9.117	9.111	9.121	9.135	9.137	9.147	9.132	9.126
04/05/10	9.083	9.082	9.089	9.084	9.103	9.109	9.121	9.121	9.116	9.111	9.122	9.134	9.138	9.148	9.131	9.129
05/05/10	9.085	9.083	9.089	9.085	9.105	9.111	9.122	9.122	9.117	9.111	9.123	9.134	9.137	9.147	9.132	9.125
06/05/10	9.085	9.084	9.088	9.086	9.105	9.111	9.121	9.121	9.118	9.114	9.124	9.137	9.141	9.150	9.133	9.126
07/05/10	9.085	9.084	9.089	9.086	9.105	9.112	9.121	9.120	9.119	9.114	9.123	9.137	9.140	9.149	9.134	9.127
08/05/10	9.085	9.083	9.088	9.085	9.104	9.111	9.124	9.122	9.119	9.112	9.123	9.134	9.139	9.151	9.133	9.127
10/05/10	9.084	9.084	9.090	9.085	9.105	9.112	9.124	9.122	9.115	9.119	9.124	9.139	9.140	9.150	9.134	9.129
11/05/10	9.084	9.083	9.091	9.084	9.105	9.113	9.124	9.121	9.118	9.118	9.124	9.137	9.139	9.150	9.134	9.129
MH [mm]	1	0	4	3	5	8	8	6	6	12	10	15	8	12	13	12

Tabla A5 Lecturas tomadas para conocer la variación del Diámetro horizontal interno del anillo 0 al 30

FECHA	NUMERO DE ANILLO														
	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60
07/04/2010															
09/04/2010															
10/04/2010	9.116														
11/04/2010	9.116	9.113	9.113												
12/04/2010	9.117	9.113	9.112												
14/04/2010	9.119	9.116	S/L	9.116	9.107										
15/04/2010	9.118	9.116	9.112	9.118	9.107	9.091	9.089	9.088	9.082						
16/04/2010	9.118	9.116	9.116	9.116	9.110	9.092	9.089	9.089	9.084	9.074	9.069				
19/04/2010	9.120	9.118	9.117	9.118	9.108	9.093	9.090	9.086	9.086	9.075	9.078	9.088	9.095	9.094	
20/04/2010	9.122	9.118	9.119	9.117	9.109	9.093	9.092	9.082	9.086	9.074	9.071	9.087	9.096	9.096	
21/04/2010	9.120	9.118	9.117	9.121	9.110	9.092	9.091	9.089	9.084	9.077	9.071	9.088	9.097	9.097	
22/04/2010	9.123	9.119	9.118	9.120	9.110	9.092	9.095	9.091	9.085	9.076	9.074	9.087	9.098	9.101	9.105
23/04/2010	9.123	9.119	9.119	9.120	9.111	9.094	9.093	9.090	9.086	9.077	9.071	9.087	9.097	9.095	9.103
24/04/2010	9.124	9.119	9.119	9.120	9.111	9.094	9.094	9.091	9.088	9.077	9.072	9.088	9.099	9.100	9.103
26/04/2010	9.113	9.121	9.112	9.121	9.113	9.095	9.094	9.092	9.087	9.079	9.073	9.088	9.099	9.099	9.104
28/04/2010	9.124	9.122	9.121	9.122	9.114	9.095	9.095	9.093	9.088	9.079	9.073	9.089	9.100	9.100	9.104
29/04/2010	9.125	9.122	9.121	9.122	9.114	9.096	9.096	9.094	9.089	9.079	9.074	9.090	9.100	9.100	9.105
30/04/2010	9.126	9.122	9.121	9.122	9.115	9.096	9.095	9.094	9.090	9.079	9.074	9.091	9.101	9.100	9.105
04/05/2010	9.126	9.122	9.123	9.124	9.117	9.098	9.097	9.094	9.090	9.080	9.076	9.090	9.102	9.100	9.104
05/05/2010	9.126	9.121	9.123	9.124	9.115	9.098	9.098	9.095	9.091	9.080	9.076	9.091	9.102	9.100	9.104
06/05/2010	9.129	9.124	9.123	9.129	9.116	9.098	9.099	9.097	9.091	9.079	9.077	9.092	9.100	9.101	9.103
07/05/2010	9.128	9.124	9.124	9.128	9.115	9.098	9.098	9.097	9.090	9.076	9.081	9.091	9.101	9.101	9.104
08/05/2010	9.128	9.123	9.123	9.125	9.118	9.099	9.098	9.097	9.092	9.082	9.078	9.093	9.104	9.104	9.105
10/05/2010	9.128	9.124	9.124	9.129	9.117	9.090	9.099	9.097	9.092	9.077	9.079	9.093	9.104	9.103	9.106
11/05/2010	9.128	9.128	9.126	9.127	9.117	9.100	9.099	9.097	9.093	9.083	9.079	9.095	9.104	9.103	9.106
MH [mm]	12	15	13	11	10	9	10	9	11	9	10	4	9	10	1

Tabla A5.1 Lecturas tomadas para conocer la variación del Diámetro horizontal interno del anillo 32 al 60

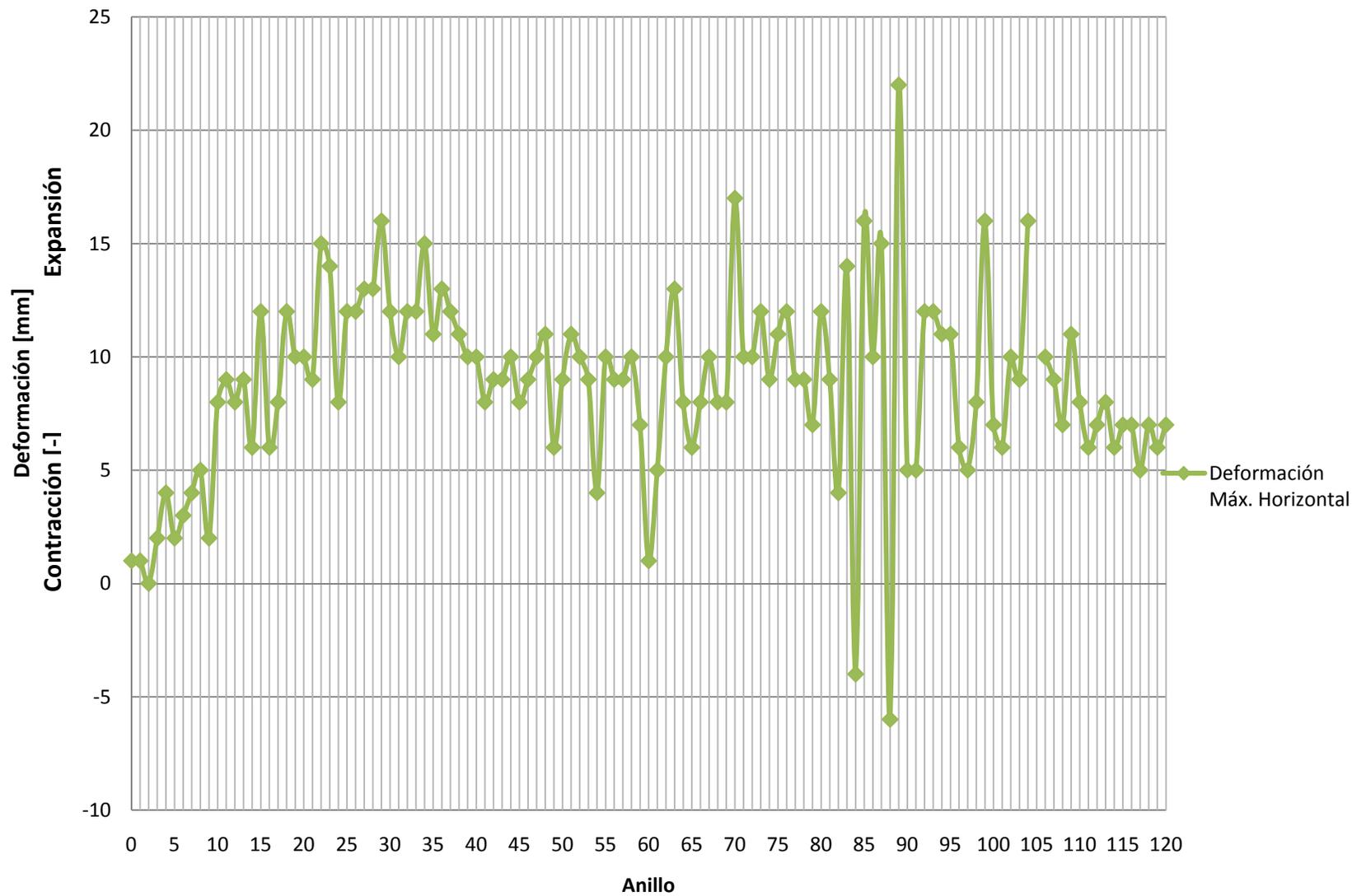
FECHA	NUMERO DE ANILLO														
	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
07/04/2010															
09/04/2010															
10/04/2010															
11/04/2010															
12/04/2010															
14/04/2010															
15/04/2010															
16/04/2010															
19/04/2010	9.092	9.094	9.104	9.101	9.099	9.100	9.092								
20/04/2010	9.095	9.095	9.102	9.101	9.099	9.101	9.094	9.088	9.089						
21/04/2010	9.100	9.101	9.104	9.102	9.101	9.103	9.095	9.095	9.096	9.088	9.095	9.097	9.094	9.097	9.095
22/04/2010	9.095	9.100	9.106	9.101	9.101	9.099	9.095	9.091	9.083	9.091	9.090	9.084	9.096	9.082	9.093
23/04/2010	9.095	9.097	9.105	9.103	9.101	9.099	9.095	9.092	9.088	9.093	9.091	9.086	9.096	9.084	9.094
24/04/2010	9.095	9.098	9.103	9.104	9.101	9.102	9.095	9.094	9.089	9.094	9.092	9.088	9.098	9.083	9.094
26/04/2010	9.096	9.099	9.104	9.102	9.105	9.102	9.097	9.094	9.090	9.095	9.093	9.088	9.096	9.085	9.095
28/04/2010	9.097	9.099	9.107	9.106	9.103	9.105	9.100	9.095	9.095	9.095	9.095	9.089	9.099	9.086	9.097
29/04/2010	9.097	9.100	9.108	9.106	9.104	9.104	9.099	9.096	9.094	9.096	9.094	9.089	9.098	9.087	9.097
30/04/2010	9.098	9.099	9.109	9.105	9.103	9.105	9.099	9.097	9.093	9.097	9.094	9.090	9.099	9.087	9.096
04/05/2010	9.098	9.100	9.110	9.107	9.103	9.102	9.099	9.097	9.095	9.098	9.096	9.090	9.101	9.089	9.099
05/05/2010	9.100	9.101	9.109	9.107	9.105	9.101	9.1	9.096	9.095	9.098	9.096	9.092	9.100	9.089	9.099
06/05/2010	9.100	9.100	9.112	9.108	9.107	9.107	9.104	9.101	9.096	9.098	9.094	9.101	9.100	9.088	9.096
07/05/2010	9.100	9.100	9.110	9.107	9.106	9.107	9.101	9.099	9.096	9.098	9.096	9.100	9.100	9.089	9.098
08/05/2010	9.100	9.101	9.111	9.108	9.105	9.108	9.102	9.100	9.096	9.099	9.098	9.092	9.102	9.092	9.100
10/05/2010	9.101	9.101	9.111	9.107	9.118	9.112	9.102	9.100	9.097	9.100	9.099	9.094	9.103	9.091	9.102
11/05/2010	9.102	9.102	9.112	9.109	9.116	9.110	9.101	9.100	9.098	9.100	9.099	9.093	9.104	9.091	9.100
MH [mm]	10	8	8	8	17	10	9	12	9	12	4	-4	10	-6	5

Tabla A5.2 Lecturas tomadas para conocer la variación del Diámetro horizontal interno del anillo 62 al 90

FECHA	NUMERO DE ANILLO														
	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120
07/04/2010															
09/04/2010															
10/04/2010															
11/04/2010															
12/04/2010															
14/04/2010															
15/04/2010															
16/04/2010															
19/04/2010															
20/04/2010															
21/04/2010	9.089														
22/04/2010	9.09	9.09													
23/04/2010	9.092	9.095													
24/04/2010	9.092	9.091	9.094	9.084	9.082	9.087	9.085	9.087	9.089						
26/04/2010	9.092	9.093	9.094	9.084	9.081	9.088	9.085	9.088	9.088						
28/04/2010	9.095	9.096	9.094	9.086	9.084	9.09	9.088	9.092	9.092	9.087	9.082	9.067	9.084	9.069	9.08
29/04/2010	9.096	9.097	9.095	9.087	9.084	9.09	9.089	9.092	9.093	9.088	9.082	9.067	9.084	9.069	9.08
30/04/2010	9.095	9.097	9.095	9.087	9.085	9.089	9.09	9.091	9.092	9.089	9.083	9.067	9.082	9.072	9.08
04/05/2010	9.097	9.098	9.098	9.089	9.088	9.093	9.091	9.094	9.094	9.09	9.084	9.07	9.082	9.071	9.083
05/05/2010	9.099	9.099	9.101	9.088	9.089	9.093	9.092	9.094	9.096	9.092	9.085	9.07	9.089	9.072	9.083
06/05/2010	9.099	9.097	9.103	9.088	9.087	9.09	9.093	9.092	9.096	9.091	9.086	9.07	9.088	9.07	9.088
07/05/2010	9.099	9.099	9.101	9.087	9.088	9.092	9.091	9.094	9.095	9.092	9.085	9.07	9.089	9.072	9.088
08/05/2010	9.099	9.099	9.099	9.09	9.09	9.095	9.092	9.095	9.096	9.094	9.085	9.071	9.088	9.074	9.084
10/05/2010	9.1	9.101	9.1	9.091	9.09	9.095	9.093	9.096	9.097	9.096	9.088	9.073	9.088	9.075	9.086
11/05/2010	9.101	9.101	9.1	9.092	9.09	9.097	9.101	9.097	9.096	9.095	9.089	9.073	9.091	9.076	9.087
MH [mm]	12	11	6	8	7	10	16	10	7	8	7	6	7	7	7

Tabla A5.3 Lecturas tomadas para conocer la variación del Diámetro horizontal interno del anillo 92 al 120

DEFORMACIÓN MÁX. HORIZONTAL



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 “Estaciones que integran la Línea 12 Tlahuac-Mixcoac”.</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 1.2 “Ubicación de los 16 aparatos de Vía que tendrá la Línea 12”.</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2.1 “Especificaciones de trazo para el proyecto y construcción de la Línea 12”.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2.2 “Cadenamientos y distancias entre las estaciones que conforman el trazo de la sección tipo túnel”.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.3 “Especificaciones de perfil para el proyecto y construcción de la Línea 12”.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.4 “Parámetros geométricos de alineaciones de la Línea 12 Mexicaltzingo-Mixcoac”</i>	<i>18</i>
<hr/>	
<i>Tabla 3.1 “Análisis de la propuesta técnica del fabricante”</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4.1 “Peso total por anillo de dovelas”</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6.1 “Programa de excavación de la Lumbrera de entrada a la de salida”.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6.2 “Métodos para medir la cantidad me material rezagado”</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7.1 “Ubicación de los cinco anillos instrumentados con celdas de presión”</i>	<i>57</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Aparato de Vía “desvío”</i>	8
<i>Figura 1.2 Aparato de Vía “Entre Vía”</i>	8
<i>Figura 1.3 Construcción de la primera etapa</i>	10
<i>Figura 1.4 Construcción de la segunda etapa</i>	10
<i>Figura 2.1 Trazo Definitivo Línea 12</i>	15
<i>Figura 2.2 Perfil de la Línea 12</i>	19
<i>Figura 2.3 Paso de la línea 12 por diferentes zonas geotécnicas</i>	20
<i>Figura 2.4 Perfil Estratigráfico</i>	21
<i>Figura 3.1 Componentes del EPB, utilizado en la excavación de la Línea 12.</i>	27
<i>Figura 3.2 Fuerzas e interacciones en la excavación con escudo EPB</i>	29
<i>Figura 4.1 Partición del anillo universal en 7 dovelas +1 de cierre.</i>	37
<i>Figura 4.2 Acoplamiento tipo Machihembrado</i>	38
<i>Figura 4.3 Conexión atornillada.</i>	39
<i>Figura 4.4 Sistemas de acoplamiento longitudinal y transversal.</i>	39
<i>Figura 4.5 Posición de las zapatas de los cilindros de empuje de la EPB</i>	40
<i>Figura 6.1 Sistema de Guiado Automático.</i>	53
<i>Figura 6.2 Distribución de los Sensores de Presión en la Cámara de Presión.</i>	55

BIBLIOGRAFÍA

- Túneles, Planeación, Diseño y Construcción, T. M. Megaw y J.V. Bartlett., Noriega Editores, 1ra edición, México 1988, Pág. 91-109.
- Mecánica de Suelos, T. William Lambe y Robert V. Whitman, Limusa, 3ra edición, México 1981, Pág. 91.
- Mecánica de Suelos a la Ingeniería Práctica, Karl Terzaghi y Ralph B. Peck, Editorial. Librería el Eteneo, 2da edición, México 1986, Pág. 285-291.
- Topografía Moderna, Russell C. Brinker y Paul R. Wolf, Harla, 6ta edición, México 1977, Pág. 398- 404.
- Introducción a la Topografía, James M. Anderson y Edward M. Mikttail, HcGraw Hill, 1ra edición, México 1985, Pág. 175-179.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-04) y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCG-04).
- Consideraciones generales para elegir y determinar la compra de una “TBM”, M. I. Andrés Moreno y Fernandez.
- Presentación realizada por la empresa ICA el 22 de octubre de 2008.
- Presentación “Línea 12 del Bicentenario” realizada por la empresa ICA, en Junio del 2008.
- Memoria de cálculo “Evaluación Teórica de los Asentamientos en Superficie Debidos a la Excavación del Túnel”. 2 de Enero de 2010.
- Memoria de Cálculo “Evaluación Teórica de las Presiones de Sostenimiento del Frente Durante la Excavación Del Túnel”. 2 de Enero de 2010.
- Especificación “Procedimiento de Excavación del Túnel con Escudo EPB”.11 de Noviembre de 2009.
- Programa de Obra “Excavación de Túnel de la Línea 12”. 19 de Enero de 2010.
- Through Soft Ground with Earth Pressure, Herrenknecht Martín, june 2003.
- Boletín “Modificación a las Recomendaciones de los Tratamientos Geotécnicos de Entrada y Salida de las Cabeceras de Estaciones en General, Perteneciente a la

Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México. 6 de Enero de 2010.

- Especificación “Especificación de la Inyección de Mortero Bicomponente en el Espacio Anular entre las Dovelas y el Terreno Durante la Excavación del Túnel con Escudo EPB”. 8 de Enero de 2010.
- Especificación “Especificación para la Instalación de la Instrumentación del Túnel Excavado con Escudo, Perteneciente a la Línea 12 del Metro, del Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México”. 7 de Diciembre de 2009.
- Especificación “Procedimiento de Fabricación, Almacenamiento y Transporte de Dovelas para el Revestimiento del Túnel”. 11 de Noviembre de 2009.
- Bases de Diseño del Proyecto Geotécnico en el tramo Atlalilco- Nave de Deposito Mixcoac. Septiembre 2008.
- Memoria de Trazo de la Línea 12 Tlahuac-Mixcoac. 5 de Diciembre de 2008.
- Memoria de Trazo de la Línea 12 Tlahuac-Mixcoac. 5 de Diciembre de 2008.
- Technical Specification for Series 330 EPB (EPB331-331) Mexico City Metro Line 12. 15 de Marzo de 2009.
- Manual de Diseño de Dovelas, Metro Línea 12, Ciudad de México. Maidl+maidl consulting engineers. 24 de noviembre 2008.
- Principios del Control de Procesos en la Excavación del Túneles con Tuneladora. Maidl+maidl consulting engineers. Junio 2008.
- Control de procesos y gestión de datos para la excavación de túneles con tuneladora, Maidl+maidl consulting engineers, febrero 2010.

Páginas de Internet consultadas:

UMSS, Universidad Mayor de San Simón, Publicaciones electrónicas, libros y textos, Aparatos y Haces de Vía.

- <http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/26/7.htm>

Microtúnel, Máquinas tuneladoras, Escudo EPB (Earth Pressure Balance)

- http://www.microtunnel.com/24_escudoepb.htm

Asociación Española de Fabricantes Exportadores de Material, Equipos y Servicios Ferroviarios.

- http://www.mafex.es/fotos/empresas_foto/desvio_jez%201.jpg
- http://www.mafex.es/fotos/empresas_foto/felguera_01.jpg

MACCAFERRI, tuneles y galerías, necesidades y soluciones

- http://www.maccaferri.com.br/download/tuneles_galerias.pdf?PHPSESSID=3hfg9t1an754lvch1tmshhcdt3

Portal electrónico del STC, Metro de la Ciudad de México.

- <http://www.metro.df.gob.mx/sabias/linea12.html>