



# Tesis de Titulación de la Licenciatura de Ingeniería Civil

**Excavación de Túneles en Suelos Blandos**

Caso de Estudio: Excavación del Valle de Chalco para  
Desalojar las Aguas Residuales del Valle de México

abril de 2011

**Preparado por:**

**Luis Ángel González González**

legnasiul@gmail.com



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Descripción del Proyecto del Caso de Estudio .....	2
<b>2 OBJETIVO Y CONTENIDOS DE LA TESIS</b> .....	<b>4</b>
<b>3 ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
Túneles .....	5
Diferentes Tipos de Suelos el Valle de México .....	5
Excavación de Túneles en Suelos Blandos .....	7
Clasificación suelos blandos para la Construcción de Túneles .....	8
La importancia de los Proyectos de Infraestructura para el Desalojo de Aguas Residuales en el Valle de México.....	9
La Necesidad del Túnel del Valle de Chalco .....	12
<b>4 EQUIPO DE EXCAVACIÓN EN SUELOS BLANDOS</b> .....	<b>14</b>
Trabajos Previos a la Excavación.....	14
Escudos .....	14
Escudos de Frente Presurizado .....	15
Escudos de Presión de Tierras (EPB).....	15
Tuneladoras .....	16
<b>5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXCAVACIÓN DEL TÚNEL EN EL VALLE DE CHALCO</b> .....	<b>25</b>
Trabajos Previos a la Excavación.....	25
Inicio de la Excavación .....	38
Llegadas a las Lumbreras .....	47
<b>6 SISTEMA Y FABRICACIÓN DE DOVELAS</b> .....	<b>49</b>
Descripción General del Sistema de Dovelas.....	49
Fabricación de Dovelas.....	53
Sistema de Unión entre Dovelas.....	55
<b>7 LA IMPORTANCIA DE UN SISTEMA DE GUIADO EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES.....</b>	<b>57</b>
Diferentes Sistemas de Guiado en la Excavación de Túneles .....	57
Descripción del Sistema Utilizado en la Excavación del Túnel en Chalco.....	58
<b>8 CONCLUSIONES</b> .....	<b>62</b>



## FIGURAS

Figura 1.1	Croquis del proyecto del caso de estudio de esta tesis .....	3
Figura 2.1	Zonificación geotécnica del Valle de México .....	7
Figura 2.2	Mancha Urbana ZMVM .....	10
Figura 3.3	Grafica de Hundimiento a lo largo del canal Río de la Compañía. ....	13
Figura 4.1	Plano general del carro 1 del tren de equipos .....	19
Figura 4.2	Plano general del carro 2 del tren de equipos .....	21
Figura 4.3	Plano general del carro 3 del tren de equipos .....	22
Figura 4.4	Plano general del carro 4 del tren de equipos .....	23
Figura 5.1	imágenes de carga y descarga de la tuneladora .....	27
Figura 5.2	Construcción del portal de entrada del escudo.....	30
Figura 5.3	Bajada de Dovelas al Interior del Túnel.....	39
Figura 5.4	Bajada del Carro 1 (carro de bombas).....	40
Figura 5.5	Esquema de la distancia necesaria para el paro programado de bajada de tren de equipos .....	42
Figura 5.6	Esquema general del cambio de vías en el interior del túnel .....	47

## TABLAS

Tabla 5.1	Inventario de transportación de la tuneladora.....	26
Tabla 5.2	Costos de la transportación de la tuneladora .....	27

## ANEXOS

No se encontraron elementos de tabla de contenido.



## Dedicatorias



## 1. Introducción

- 1.1 El presente documento trata de mostrar el procedimiento constructivo general de un túnel realizado en terrenos blandos.
- 1.2 Este trabajo se basa principalmente en la información recolectada durante mi desarrollo laboral como Jefe de Obra en la excavación de un túnel en suelo blando en el Valle de Chalco al Este de la Zona Metropolitana del Valle de México.
- 1.3 El caso de estudio se basa en el túnel antes mencionado del cual se definen sus características más adelante en este capítulo introductorio.
- 1.4 Este trabajo se concentra en mostrar con el mayor detalle posible las principales actividades, la técnica y la tecnología que se emplea actualmente a nivel mundial en la excavación de túneles en condiciones similares sin pretender convertirse en un manual para la excavación de túneles ya que cada excavación tiene condiciones diferentes y particulares.
- 1.5 La estructura de este documento está hecha para que el lector comprenda los conceptos básicos relacionados a este tipo de proyectos para después pasar a los detalles del proceso de excavación de un túnel.
- 1.6 El documento comienza con esta sección introductoria y procede después en un segundo capítulo definiendo los objetivos y mostrando el contenido detallado de cada capítulo.
- 1.7 El tercer capítulo corresponde al de antecedentes donde se presentan algunas definiciones básicas para poder comprender la situación del proyecto y presenta una justificación general del mismo en el contexto de la Zona Metropolitana y en específicamente en la zona del proyecto.
- 1.8 El siguiente capítulo describe brevemente los escudos, las tuneladoras y el equipo que se utilizó en el caso de estudio.
- 1.9 En el quinto capítulo se describen de manera general el proceso y las actividades que se deben de llevar a cabo para la excavación del túnel del Valle de Chalco.
- 1.10 Uno de los principales insumos para la construcción del túnel son las dovelas de las cuales se habla con detalle durante el sexto capítulo.
- 1.11 El penúltimo capítulo explica brevemente las técnicas y la tecnología actual para guiar a los escudos durante la excavación.
- 1.12 Las conclusiones principales de este trabajo de tesis se muestran en el capítulo 8 con el que se cierra este documento.



### Descripción del Proyecto del Caso de Estudio

- 1.13 El túnel del Valle de Chalco forma parte del Macroproyecto de Drenaje General del Valle de México y para su realización se cuenta con la aprobación del Fideicomiso 1928 para apoyo del Saneamiento del Valle de México, el cual tiene como propósito asumir de manera coordinada entre la Comisión Nacional del Agua, El Gobierno del Estado de México y el Gobierno del Distrito Federal, la administración de los proyectos de drenaje y de saneamiento de la Zona Metropolitana del Valle de México, para lo cual se tienen acuerdos crediticios con organismos financieros internacionales como el Banco Internacional de Desarrollo (BID) y Banco Japonés de Cooperación Internacional (JBIC).
- 1.14 El proyecto está constituido por un túnel de 6,764 m de longitud y 5 metros de diámetro. El túnel parte en la lumbrera 1 a una profundidad de 24 metros aproximadamente, recorriendo el margen izquierdo del actual canal del río de la Compañía, atravesando en su recorrido las lumbreras 1A, 2, 3, 3A, terminando en la lumbrera 4 en donde se construirá una planta para bombear el agua nuevamente al cauce del río.
- 1.15 Las lumbreras fueron construidas con el método de flotación con concreto reforzado de f'c de 300 kg/cm<sup>2</sup> de alta resistencia a los sulfatos. Las lumbreras 1, 2, 3 y 3A tienen un diámetro interior de 12 m, la lumbrera 1A de 5 metros y la lumbrera número 4 de 16 m.
- 1.16 La excavación del túnel se realizó con un escudo de presión de tierras balanceadas (EPB) de fabricación alemana, adquirido especialmente para la realización de este proyecto de 6.30 metros de diámetro y 652 toneladas de peso.
- 1.17 En la siguiente figura se muestra un croquis del trazado general del túnel y la ubicación de las lumbreras antes descritas.

FIGURA 1.1 CROQUIS DEL PROYECTO DEL CASO DE ESTUDIO DE ESTA TESIS





## 2. Objetivo y Contenidos de la Tesis

Objetivo: Mostrar la aplicación del equipo (Escudo) en la excavación de túneles para el desalojo de aguas residuales en grandes ciudades.

### Contenido

#### Introducción

1. Introducción
2. Antecedentes
  - Túneles
  - Diferentes tipos de suelos en el valle de México
  - Clasificación de suelos blandos para la construcción de túneles
  - Excavación de túneles en suelos blandos.
  - La importancia de los proyectos de infraestructura para el desalojo de aguas residuales en el valle de México.
  - La necesidad del túnel del valle de Chalco
3. Equipo de Excavación en Suelos Blandos
  - Escudos
  - Escudos de frente presurizado
  - Escudos de Presión de tierras balanceadas
  - Tuneladoras
4. Descripción del Proceso de Excavación para el túnel en el Valle de Chalco
  - Trabajos previos a la excavación
  - Inicio de la Excavación
  - Etapas de la Excavación
  - Puntos de Llegada
5. Colocación y fabricación de Dovelas
  - Descripción general del sistema de dovelas
  - Fabricación de Dovelas
  - Sistema de unión entre dovelas
6. La importancia de un sistema de guiado en la excavación de túneles.
  - Diferentes sistemas de Guiado en la excavación de túneles.
  - Descripción del sistema de guiado utilizado en la excavación del túnel del Valle de Chalco

### 3. Antecedentes

#### Túneles

- 3.1 Desde tiempos remotos el hombre se ha aprovechado los espacios subterráneos naturales como hábitat de vida, dando uso de las cuevas formadas por la naturaleza, usando estas como viviendas.
- 3.2 Con el desarrollo de las civilizaciones el hombre se ha visto en la necesidad de crear nuevos espacios subterráneos, los cuales han ido evolucionando desde pequeñas excavaciones a nivel superficial hasta las grandes excavaciones profundas que se realizan hoy en día.
- 3.3 El hombre en distintas épocas ha desarrollado y utilizado diferentes técnicas y herramientas para la excavación de rocas y suelos.
- 3.4 Un túnel es una perforación en el terreno aproximadamente horizontal, en la que domina la longitud sobre las otras dimensiones. Generalmente los túneles son artificiales pero también existen algunos casos de túneles creados por la naturaleza.
- 3.5 Los túneles cumplen con muy distintas funciones, pueden ser para el tránsito de peatones, automóviles, transporte metropolitano, sistemas ferroviarios, para la explotación de minas, conducción de agua (potable, de riego y sanitaria) y sistemas de cables.
- 3.6 Las diferentes composiciones de los suelos y las variadas estructuras de roca que se pueden presentar en las capas inferiores a la superficie terrestre representan cada una un problema distinto para la construcción de un túnel.
- 3.7 Es de suma importancia llevar a cabo estudios de geotecnia que permitan conocer la situación del subsuelo en el lugar donde se va a llevar a cabo la obra, especialmente sobre la trayectoria de la excavación, ya que en estos estudios se basa el proyecto de construcción del túnel.



#### Diferentes Tipos de Suelos el Valle de México

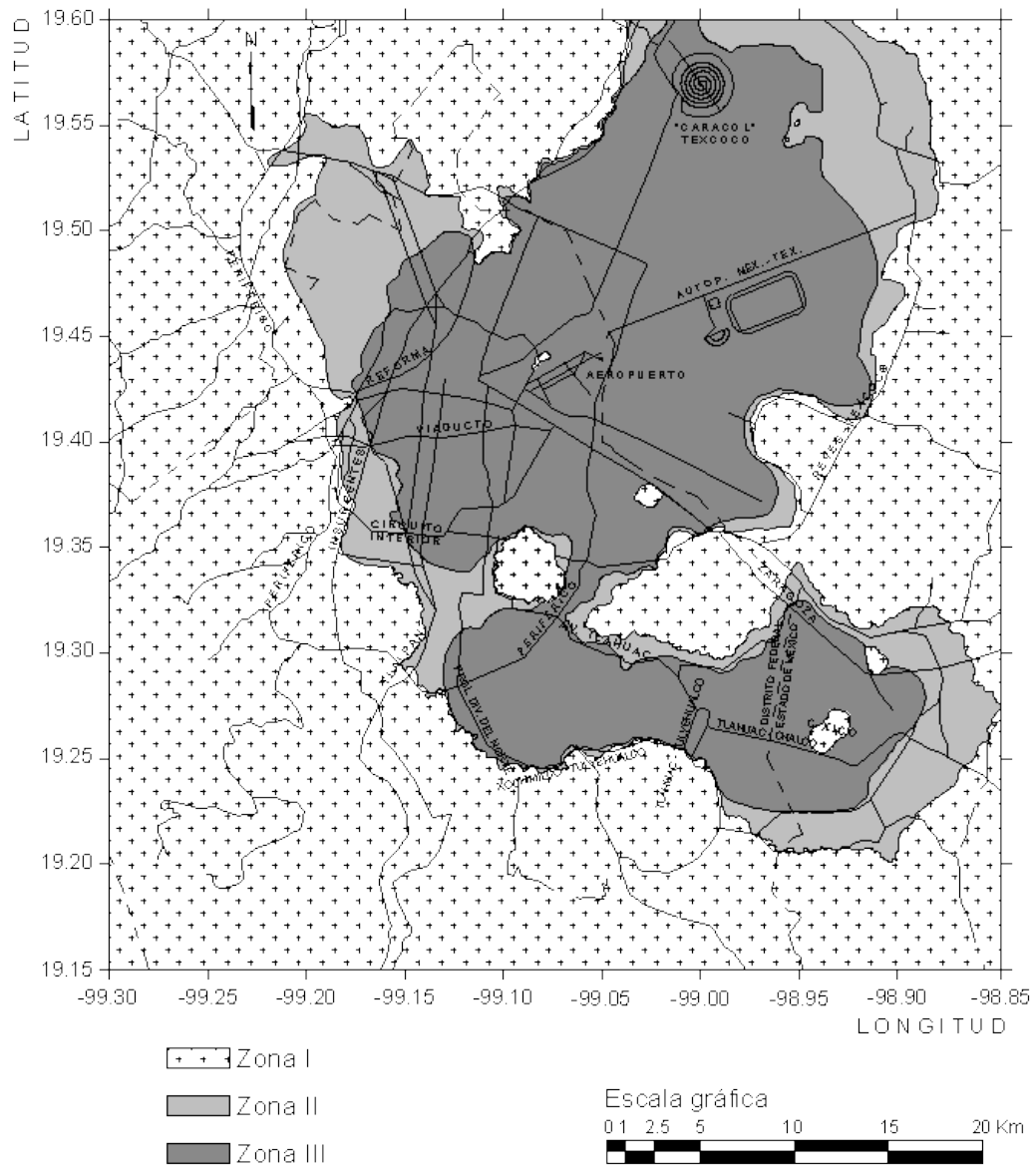
- 3.8 De acuerdo a las normas complementarias para el diseño y construcción de cimentaciones la Zona Metropolitana del Valle de México se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados;
- Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros; y
- Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

3.9 En la siguiente figura se muestra la ubicación general de las diferentes zonas definidas para el distrito federal.

FIGURA 3.1 ZONIFICACIÓN GEOTECNICA DEL VALLE DE MÉXICO



- 3.10 Si pudiéramos comparar la figura anterior contra un plano topográfico de la misma zona se observaría que la partes más altas de la ciudad corresponden a la zona I (Suelos firmes o roca) mientras que las más baja de la cuenca pertenecen a la zona III (suelos blandos)

**Excavación de Túneles en Suelos Blandos**

- 3.11 Muy buena parte de la Zona metropolitana se ha desarrollado en las partes más bajas sobre el antiguo lecho del sistema de lagos de la cuenca del valle de México en donde encontramos principalmente suelos blandos.



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 3.12 Durante muchos años las necesidades de la ciudad han impulsado a los ingenieros mexicanos a construir infraestructura y edificaciones cimentada o alojada en suelos blandos.
- 3.13 La realización de obras en suelos blandos presenta diversas dificultades dependiendo del tipo de proyecto a realizar ya sean cimentaciones para todo tipo de estructuras o en este caso la excavación de un túnel.
- 3.14 La excavación de túneles en suelos blandos se ha visto envuelta por la problemática de cómo sostener el frente la excavación además a esto se suman las condicionantes de entorno como la presencia de agua, contaminación del medio, difíciles condiciones de trabajo así como los asentamientos en la superficie producidos por la excavación que pueden causar daños a la infraestructura existente en la superficie.
- 3.15 Los avances logrados durante los últimos años en términos de geotecnia brindan a los ingenieros un panorama más amplio sobre el comportamiento de los suelos y las posibles situaciones que enfrentarán durante la realización de un proyecto. Por otra parte el conocimiento adquirido durante todo este tiempo ayuda a generar diseños más seguros y eficientes.
- 3.16 El estudio de los suelos blandos ha contribuido en buena medida a la evolución de las tecnologías y los procesos constructivos para disminuir los costos, incrementar los rendimientos y mejorar la seguridad durante la ejecución de los proyectos.
- 3.17 Para la construcción de un túnel es necesario conocer las condiciones geotécnicas de la región en donde se realizara el proyecto para así poder proponer los sistemas constructivos y la tecnología más adecuada.

### Clasificación suelos blandos para la Construcción de Túneles

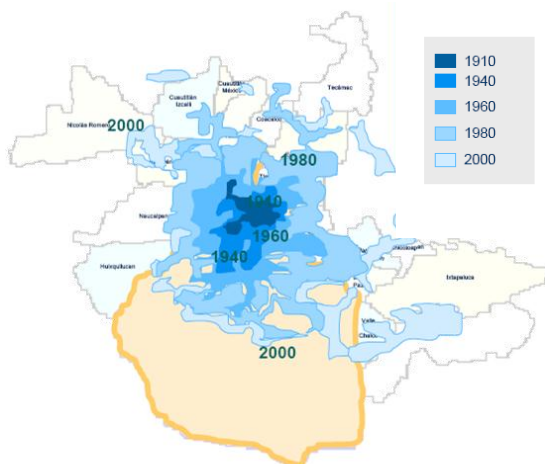
- 3.18 Como ya se menciona es de suma importancia conocer las condiciones del suelo en el que se pretende construir un túnel sin importar el uso final que se dará al mismo.
- 3.19 Para fines de la selección del sistema constructivo y la tecnología los suelos blandos se pueden clasificar en 6 tipos diferentes en función del comportamientos que tienen como respuesta a las sollicitaciones a las que son sometidos al realizar la excavación de un túnel.
  - i) Suelo Estable (Firm Ground): En este tipo de suelos la excavación puede avanzar una cierta distancia sin la necesidad de algún tipo de soporte.
  - ii) Suelo Desmoronable (Raveling Ground): A este tipo pertenecen los suelos que se desmoronan en el techo y en la parte frente de la excavación.
  - iii) Suelo Movedizo (Running Ground): Tipo de suelos que presentan inestabilidad en el frente sin soporte hasta que se forma un talud estable con su ángulo de reposo.

- iv) Suelo Fluyente (Flowing Ground): Debido a la presencia de agua, el suelo fluye al interior del túnel en forma de un fluido viscoso.
- v) Suelo Fluyente con Presión (Squeezing Ground): Este tipo de suelo se mueve hacia adentro de modo gradual, sin que necesariamente se desmorone o rompa.
- vi) Suelo Expansivo (Swelling Ground): Tipo de suelos que, al interactuar con el agua, aumentan su volumen cuando no tienen barreras que los confinen o generan presión cuando se encuentran confinados por algunos elementos.

### **La Importancia de los Proyectos de Infraestructura para el Desalojo de Aguas Residuales en el Valle de México**




- 3.20 El agua ha jugado un papel fundamental en el origen y desarrollo de la ciudad de México que fue fundada en medio de una laguna y ubicada en una cuenca cerrada. La prevención de inundaciones y la disposición de las aguas residuales han sido preocupación y ocupación primordial de las autoridades de la ciudad desde hace muchos años.
- 3.21 La ciudad de México ocupa una décima parte del valle de Anáhuac en el centro-sur del país, en un terreno que formó parte de la cuenca lacustre del Lago de Texcoco, es la ciudad más poblada del país y una de las mayores del mundo. En su crecimiento la ciudad fue incorporando a numerosos poblados que se encontraban en las cercanías. A principios del siglo XXI, el área metropolitana desborda los límites del Distrito Federal y se extiende sobre 40 municipios del estado de México y un municipio del estado de Hidalgo
- 3.22 La Zona Metropolitana de la Ciudad de México estaba habitada en el 2005 por 19.311.365 personas, casi el 20% de la población total del país. De acuerdo al censo de población del año 2010 en el Distrito Federal se tienen un total de 8'873,017 habitantes y un total de 20'137,152 en la zona metropolitana. En los últimos años se ha visto una reducción considerable en las tasas de crecimiento de la zona metropolitana y se prevé que en los próximos años se alcance una población de equilibrio de aproximadamente 25 millones de habitantes para la ZMVM.

FIGURA 3.2 MANCHA URBANA ZMVM



	1910	2004
Mancha Urbana [km <sup>2</sup> ]	27	1800
Población [millones]	0.5	20

- 3.23 Antiguamente una buena parte del territorio del Distrito Federal fue ocupada por el sistema de lagos de la cuenca de México. La cuenca de México era una cuenca cerrada, que luego fue abierta por obra del ser humano.
- 3.24 Desde tiempos remotos la población del Valle de México se ha visto amenazada por fuertes inundaciones, para evitar esta situación se han construido grandes obras desde épocas prehispánicas como la construcción del albarradón de Nezahualcoyotl para prevenir las inundaciones en algunas zonas del valle, hasta la fecha actual en la cual se construyen distintas obras en la zona urbana para dar saneamiento a dichos problemas.
- 3.25 Las inundaciones recurrentes y por periodos prolongados en la época de la colonia obligaron a los españoles a iniciar la construcción del Tajo de Nochistongo, que es una salida artificial para drenar los excedentes hacia la cuenca del río Tula.
- 3.26 A principios del siglo pasado se vio la necesidad de una nueva salida de agua de la cuenca, con lo que, por órdenes del entonces presidente Porfirio Díaz se realizó la construcción del Gran Canal de Desagüe, con el cual se pensó se solucionaría definitivamente el problema.
- 3.27 En el año de 1925 hubo nuevas inundaciones en la ciudad, en gran medida, por el hundimientos diferenciales que afectaron el sistema de colectores haciéndolo perder su pendiente.
- 3.28 Debido a las inundaciones recurrentes en los años posteriores y al problema de los hundimientos diferenciales se llevó a cabo la construcción de la red de drenaje profundo de la Ciudad de México.

Principales Conductos de Desagüe de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México		
	<b>Tajo de Nochistongo</b>	
	Inauguración	1690
	Capacidad de Diseño	90 m <sup>3</sup> /s
	Uso Actual	20 m <sup>3</sup> /s
	<b>Gran Canal</b>	
	Inauguración	1900
	Capacidad de Diseño	90 m <sup>3</sup> /s
	Uso Actual	20 m <sup>3</sup> /s
	<b>Drenaje Profundo</b>	
	Inauguración	1975
	Capacidad de Diseño	200 m <sup>3</sup> /s
	Uso Actual	150 m <sup>3</sup> /s

3.29 La precipitación media en la zona metropolitana es de 700 mm anuales pudiendo alcanzar hasta 1150 mm en algunos años. La temporada de lluvia en la zona metropolitana comprende desde junio a octubre meses en los cuales se concentra el 84% de la participación anual.



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 3.30 Actualmente el Túnel Emisor Oriente es una de las mayores obras hidráulicas realiza del mundo y tiene como finalidad extraer aguas residuales de la cuenca del Valle de México para llevarlas hasta una nueva planta de tratamiento en el estado de Hidalgo.

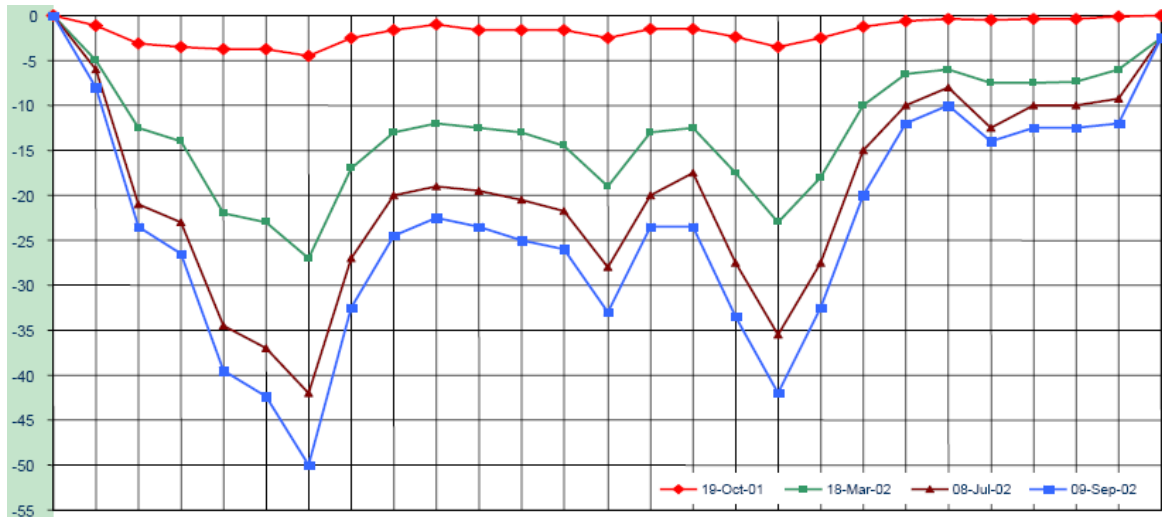
### La Necesidad del Túnel del Valle de Chalco

- 3.31 La zona sur-Oriente del valle en el Estado de México y principalmente la zona de Chalco, Valle de Chalco, Iztapalaca, además de los nuevos desarrollos urbanos en el corredor de la carretera federal y la autopista a Puebla dependen básicamente del Canal Río de la Compañía para el desfogue de aguas pluviales y residuales.
- 3.32 El canal conduce los escurrimientos hacia el norte hasta descargar en el Dren General del Valle y éste a su vez al Gran Canal de Desagüe.
- 3.33 El Canal Río de la Compañía se encuentre en suelos de diferentes características que van desde roca y depósitos de pie de talud en las faldas de algunos cerros hasta suelos compuesto por arcillas muy blandas con espesores que en algunas zonas alcanzar cerca de los 80 metros de profundidad en la zona del ex lago de Chalco.
- 3.34 El problema asociado al fenómeno del hundimiento regional del Valle de Chalco y a la diferencia de espesores de material compresible sobre el que se construyó el Canal Río de la Compañía ocasiona desplazamientos verticales y horizontales diferenciales notables con lo que se producen grietas de tensión y se favorece la erosión interna en los bordos del mismo.
- 3.35 Debido a las profundas capas de arcilla que se presentan en la zona donde se ubica el canal, en algunos puntos se presentan asentamientos mayores a los 40 cm por año (más de 1 mm por día en promedio), lo que se ve reflejado en la pérdida de capacidad de conducción y de bordo libre, así como los movimientos en los terraplenes que forman los bordos.
- 3.36 Los problemas mencionados anteriormente aunados a las fuertes lluvias que se presentaron durante el mes de mayo del año 2000 produjeron una falla en el margen izquierdo que inundó el valle de Chalco y provocó el cierre de la autopista de Puebla.
- 3.37 Situaciones similares se presentaron nuevamente a principios del año 2010 inundando nuevamente Chalco y la autopista.
- 3.38 A partir del año 2001 como parte de las medidas de contingencia del canal se instalaron instrumentos de medición a lo largo del canal para estudiar su



comportamiento. Los resultados de las mediciones de desplazamiento del canal se muestran en la siguiente gráfica.

**FIGURA 3.3** GRAFICA DE HUNDIMIENTO A LO LARGO DEL CANAL RÍO DE LA COMPAÑÍA.



3.39 El hundimiento acelerado que presenta el canal en sus diferentes tramos incrementa el riesgo de que situaciones como la vividas en el año 2000 y 2010 se presenten con mayor frecuencia.

3.40 Como solución a este problema se planteó la construcción del túnel como una obra emergente de protección para el Valle de Chalco. La función del túnel es disminuir el flujo de agua del canal a lo largo de los cerca de 7 km donde el nivel promedio de agua del canal es mayor al nivel promedio de las poblaciones alrededor.

3.41 Los objetivos generales de la construcción del túnel son:

- Satisfacer las necesidades de saneamiento de las aguas residuales que genera la población asentada en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Evitar inundaciones catastróficas que causen daños directos a la vida de la población y sus bienes, así como los indirectos por la afectación al desarrollo normal de las actividades humanas en la zona de Chalco, Valle de Chalco, Iztapaluca, y las zonas que puedan verse afectadas por el desbordamiento o falla del canal río de la Compañía.

3.42 En el año 2010 cuando se presentó la última falla importante del canal el túnel ya se encontraba terminado pero desgraciadamente los cárcamos de bombeo en sus extremos se encontraban aún es proceso de construcción.



# 4. Equipo de Excavación en Suelos Blandos

### Trabajos Previos a la Excavación

#### Escudos

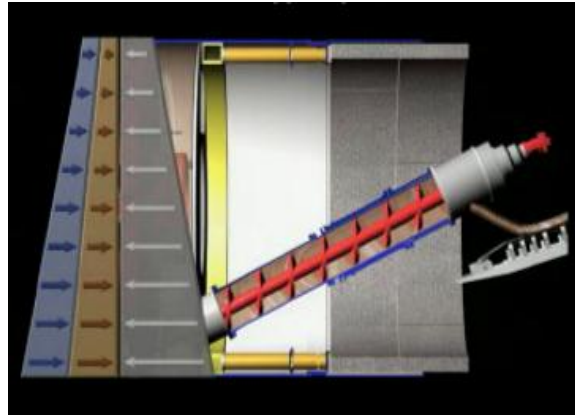
- 4.1 Los escudos nacen con la necesidad de poder brindar una zona estable y segura para poder realizar la excavación de túneles en terrenos blandos, de esa misma idea proviene el nombre de escudo (shield) teniendo este como objetivo brindar protección al frente de la excavación.
- 4.2 Por definición un escudo es una estructura rígida y resistente que, introducido dentro del túnel, proporciona una zona estable y segura en el frente de trabajo de la excavación, protegiendo este contra el colapso de la bóveda o el mismo frente.
- 4.3 La primera patente de un escudo fue registrada en el año 1818 por el inglés M.I. Brunnel, era un escudo circular revestido con dovelas de fundición empernadas, fue utilizado en la construcción del primer túnel bajo el río Támesis en Londres.
- 4.4 Al tratarse de un túnel subfluvial construido en terrenos blandos, su construcción entrañó múltiples problemas derivados de la inestabilidad del frente y la inundación del túnel como consecuencia de la infiltración del agua del río, lo cual puso en evidencia las limitantes de este primer escudo.
- 4.5 Debido a lo anterior los diseñadores se dieron a la tarea de encontrar soluciones a los problemas planteados por esta primera excavación, a partir de esto, al diseño básico propuesto por Brunnel, se fueron incorporando distintas mejoras. Algunos años después se comenzó a utilizar gatos hidráulicos para hacer avanzar el escudo en la excavación (1869), además de esto se buscaron distintas opciones para poder sostener el frente de la excavación y evitar las inundaciones en el túnel.
- 4.6 Poco a poco los escudos pasaron de ser solamente elementos de protección para los obreros y se fueron convirtiendo en maquinaria para la excavación de túneles. Hoy en día existen una gran variedad de escudos mecanizados para distintos fines.
- 4.7 La mecanización de los escudos incrementó considerablemente los rendimientos en la excavación, pero la infiltración de agua y el soporte del frente continuó siendo el principal problema. La tendencia a seguir fue la construcción de escudos que trabajaran en ambientes presurizados.
- 4.8 Los primeros intentos por controlar la presión en la excavación vinieron con los túneles presurizados, estos eran túneles sellados en los cuales se instalaban bombas las cuales inyectaban aire a presión para así equilibrar la presión ejercida por el suelo en el frente de la excavación.
- 4.9 Los altos costos para mantener el túnel presurizado, el tiempo invertido por los obreros en las cámaras de compresión y descompresión necesarias para el ingreso y egreso al túnel, así como las secuelas y el bajo rendimiento del personal sometido a



ambientes presurizados fueron los principales factores que desalentaron la construcción de túneles con este sistema.

### Escudos de Frente Presurizado

- 4.10 Los escudos de frente presurizado son escudos cerrados que funcionan manteniendo una presión adecuada en el frente para mantener equilibrada la presión entre el escudo y el terreno.
- 4.11 Los primeros escudos de frente presurizado utilizaban aire comprimido, pero tenían muchos problemas en suelos permeables, ya que la presión se perdía con facilidad.
- 4.12 Los escudos de lodos en lugar de utilizar aire en el frente inyectan lodo bentonítico para generar presión y al mismo tiempo darle cierta estabilidad al frente de la excavación.



### Escudos de Presión de Tierras (EPB)

- 4.13 Los escudos de presión de tierras balanceadas (EPB = earth pressure balance) aparecieron por primera vez en Japón en los años 70's. Este tipo de escudos aprovechan el material excavado para dar presión al frente de la excavación.
- 4.14 La estabilidad del frente de este escudo se consigue manteniendo un equilibrio entre el ritmo de excavación y de extracción de los residuos de una cámara de presión colocada inmediatamente después del disco de corte.
- 4.15 El suelo es excavado con un disco provisto de cortadores para soltar el suelo y aberturas por las que el material excavado pasa a la cámara de excavación.
- 4.16 La cámara de excavación es un tambor comunicado por el disco de corte con el frente de la excavación. La cámara siempre está llena, la presión se controla mediante la extracción de material, si se requiere mayor presión en el frente se extrae menos material del excavado, de modo contrario si se quiere disminuir la presión se aumenta la extracción, de tal modo que si se quiere mantener constante la presión se debe extraer aproximadamente el mismo material que se está excavando.
- 4.17 La extracción del material de la cámara de presión se realiza con un tornillo sin fin el cual vierte el material a algún sistema de transporte para sacarlo del túnel.

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 4.18 Los escudos avanzan mediante sistemas de gatos hidráulicos que van apoyados en los anillos de dovelas. La dirección se controla cambiando la presión en los distintos gatos según hacia donde se quiera ir.
- 4.19 Los escudos EPB se recomiendan ampliamente para suelos cohesivos que al ser excavados aumentan su plasticidad o que puedan ser convertidos en muy plásticos mediante agitación, suelos inestables y bajo el nivel freático.
- 4.20 Ventajas de los Escudos EPB:
- Aplicación en suelos blandos
  - Poca contaminación química
  - Al no tener presencia de aire comprimido, no hay pérdidas de presión en suelos muy permeables, no hay explosiones y se reducen considerablemente los riesgos para los obreros
  - Menor espacio para la excavación ya que se requieren menos equipos
- 4.21 Comparado con un escudo de lodos su costo de operación es menor pues no se requiere de planta de tratamiento de lodos.
- 4.22 A continuación se describe a grandes rasgos el funcionamiento general del equipo:
- El disco de corte gira y va soltando el suelo.
  - El suelo suelto pasa a través de las aberturas del disco a la cámara de excavación donde se deposita hasta tener suficiente material para mantener el equilibrio de presión entre el suelo y la cámara.
  - La extracción de material de la cámara de presión se hace mediante un tornillo sin fin que deposita el material en tolvas, bandas o algún medio de transporte para su extracción del túnel.

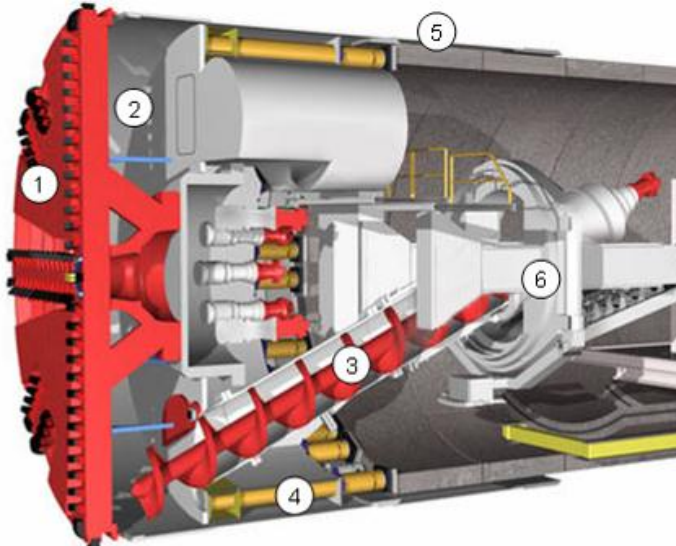
### Tuneladoras

- 4.23 Tuneladora es el conjunto formado por el escudo y el tren de equipos de apoyo necesario para el funcionamiento del mismo, la colocación del revestimiento y la instalación de los servicios en el túnel (Agua, iluminación, aire, ventilación, etc.).
- 4.24 Para la excavación del túnel del Valle de Chalco se construyó un Escudo de Presión de Tierras Balanceadas (EPB) y un tren de equipos de última generación de acuerdo a las necesidades específicas del proyecto con el objetivo de que la obra se realizara de la mejor manera posible, en el menor tiempo y con los menores impactos negativos tanto ambientales como sociales.
- 4.25 La tuneladora construida para la excavación del túnel en el Valle de Chalco utilizó por primera vez en el mundo un sistema de bombas para extraer el material de la excavación desde el tornillo sin fin hasta un patio donde se cargan camiones con el material.



- 4.26 A continuación se describe los principales componentes del escudo y del tren de equipos de la tuneladora que se empleó para la excavación del Túnel en el Valle de Chalco.

### *Componentes Principales del Escudo*



1. Disco de Corte
2. Cámara de Excavación
3. Tornillo Sin Fin
4. Cilindros de Propulsión
5. Faldón del Escudo
6. Erector de Dovelas

### *Disco de Corte*

- 4.27 El disco de corte es de metal con 6.30 metros de diámetro, equipado con 116 cuchillas rozadoras, las cuales sobresalen 100 mm de la superficie del disco. El disco cuenta con distintas aberturas para permitir el paso de al material a la cámara de excavación.
- 4.28 La rueda de corte es accionada por 6 motores de 75 kW (450 kW en total), los cuales pueden generar un par máximo al arranque de 3,283 kNm, para el arranque, y en funcionamiento 2,814 kNm. La velocidad máxima de rotación del disco es de 2.7 rpm.

### *Cámara de Excavación*

- 4.29 La cámara de excavación está diseñada para trabajar con una presión máxima de 3 bar.
- 4.30 En la parte posterior de la cámara de excavación se encuentra la mampara de presión la cual esta instrumentada de manera vertical con sensores de presión los cuales envían información hasta la cabina de mandos.
- 4.31 La extracción de material se realiza por el orificio ubicado en la parte inferior de la mampara de presión mediante el tornillo sin fin.

### *Tornillo sin Fin*

- 4.32 Es el dispositivo de extracción de material de la cámara de excavación, mide 10.8 metros de longitud y 70 centímetros de diámetro, es activado por un motor de 132 kW con el que puede girar a una velocidad de hasta 22 rpm.

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

### *Cilindros de Propulsión*

- 4.33 El escudo cuenta con 16 pares de gatos hidráulicos (32 gatos en total) ubicados de manera perimetral a cada 22.5 °. Los gatos hidráulicos constituyen el sistema de propulsión del escudo de ahí el término de cilindros de propulsión. En cada par de gatos se tiene unas placas de apoyo de material plástico flexible para distribuir la presión ejercida por los cilindros y evitar roturas en las dovelas.



- 4.34 Los gatos trabajando en conjunto alcanzan un empuje total de 2900 toneladas. La extensión máxima de los gatos es de 2.30 metros.
- 4.35 La distribución de los pares de gatos permite al escudo moverse en cualquier dirección con la limitante de que los radios de giro son muy grandes, para el caso del proyecto los giros son de 200 y 400 metros de radio.

### *Erector de Dovelas*

- 4.36 El erector de dovelas es un sistema hidráulico de brazo telescópico, con el que se levantan las dovelas para colocarlas en posición y fijarlas. El sistema esta apoyado sobre un anillo hueco de tal forma que el erector puede girar 360 grados.

### *Faldón del Escudo*

- 4.37 Es la parte posterior del escudo, la cual brinda el espacio suficiente para el armado de los anillos de dovelas.
- 4.38 El faldón tiene una longitud de 3.70 metros aproximadamente y un diámetro de 6.29 metros. En el perímetro de la parte posterior del faldón se encuentran tres capas de cepillos con cerdas metálicas que van apoyados sobre los anillos ya colocados.



- 4.39 Con la diferencia de diámetros entre el escudo y los anillos de dovelas los cepillos sirven como sellos, entre las capas de cepillos se inyecta grasa blanca para disminuir la permeabilidad y evitar que el mortero de inyección se introduzcan a la zona de la excavación.
- 4.40 El escudo y el faldón se encuentran unidos, en forma de articulación, con 14 gatos hidráulicos.

### *Componentes Principales del Tren de Equipos*

- 4.41 El tren de equipos está constituido por 5 carros con diferentes equipos necesarios para el funcionamiento del escudo y un puente que liga los carros 1 y 2.
- 4.42 La longitud total del escudo más el tren de equipos es de 83 metros.

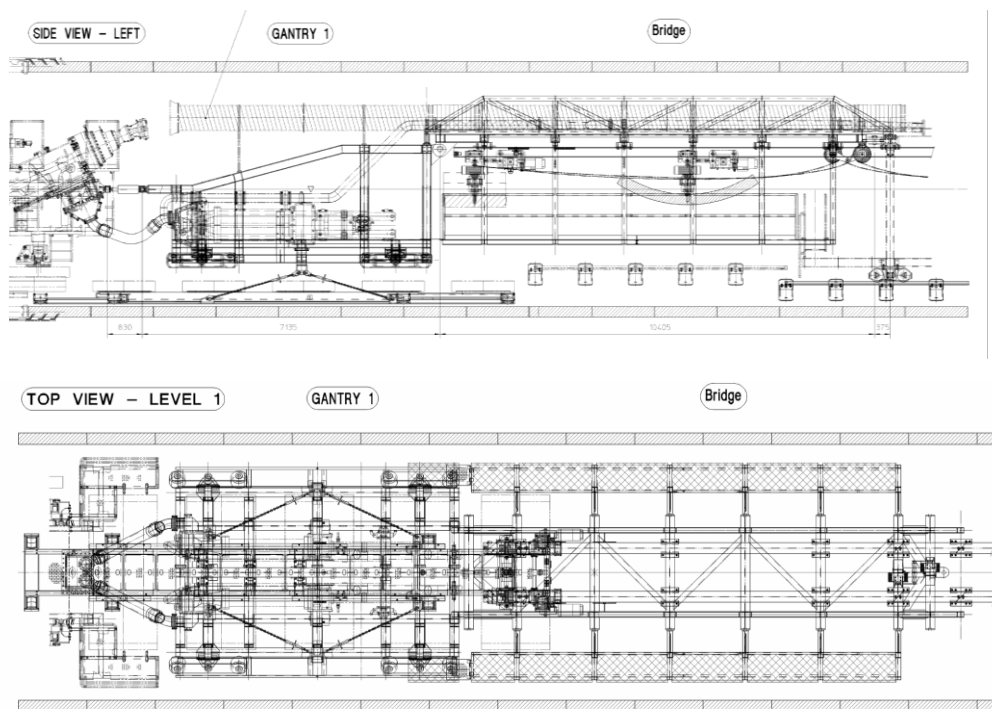
*Carro 1*

- 4.43 El carro número uno es el primer carro detrás del escudo, a diferencia de los demás carros, este carro está apoyado mediante buggys directamente sobre las dovelas del revestimiento primario del túnel sin la necesidad de ningún tipo de vías.
- 4.44 En este carro se encuentran los equipos de bombeo de rezaga. Las bombas de rezaga son bombas a base de pistones los cuales impulsan el material a través de una tubería de 8" para llevarlo al patio rezagado.
- 4.45 Bajo el carro número uno se encuentra la cama de dovelas, que es una plancha metálica móvil en la cual se montan las dovelas en orden para hacerlas pasar por debajo del carro uno hasta dejarlas al alcance del brazo erector. Los principales equipos que se encuentran en este carro son:

- Bombas de Rezaga
- Cama de Dovelas



**FIGURA 4.1 PLANO GENERAL DEL CARRO 1 DEL TREN DE EQUIPOS**





## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 4.46 Las bombas de rezaga del carro 1 se conectan a una tolva debajo del tornillo sin fin y toman el material producto de la excavación para bombearlo hasta el exterior del túnel a un patio dispuesto para verter el material.
- 4.47 Las bombas instaladas son similares a las que se utiliza para el bombeo de concreto pero con algunas adecuaciones para el bombeo de lodo.
- 4.48 Las bombas instaladas tienen capacidad para bombear lodo hasta 2600 metros.

### *Puente*

- 4.49 El puente comunica el carro dos con el carro uno y proporciona espacio suficiente para poder girar las dovelas antes de colocarlas en la cama de dovelas. El puente comunica los carros mediante dos pasarelas ubicadas a cada uno de los lados, en el centro se encuentra un equipo para levantar las dovelas de los carros la locomotora, girarlas y colocarlas en la cama.
- 4.50 El carro puente no se encuentra apoyado sobre ningún tipo de rieles, se apoya directamente en el carro número uno y el dos.
- 4.51 El componente principal del puente es el sistema para girar y transportar dovelas.

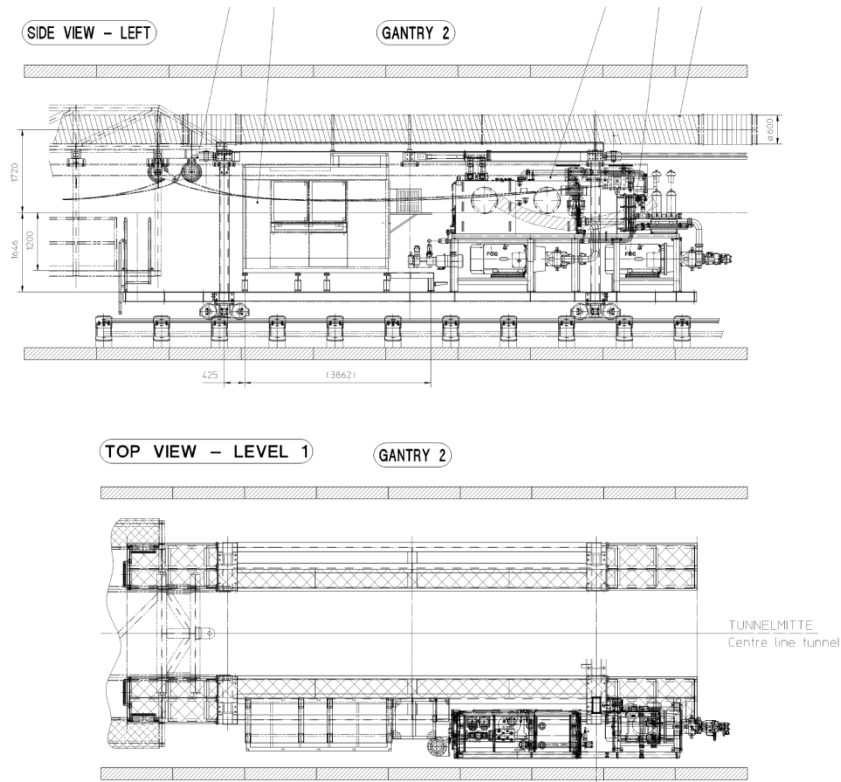
### *Carro 2*

- 4.52 En este carro se encuentra la cabina de mandos desde la cual el piloto puede monitorear y controlar el escudo y gran parte de los componentes de la tuneladora.
- 4.53 Además de la Cabina de Mando se encuentran dos depósitos de aceite hidráulico con sus bombas respectivas y el sistema hidráulico auxiliar de las bombas de rezaga.
- 4.54 A partir de este carro, los carros siguientes van apoyados sobre los rieles del tren de equipos y no sobre buggies como el carro número uno.
- 4.55 Los componentes principales del carro 2 son:

- Cabina de mandos
- Depósitos de Aceite
- Bombas Hidráulicas



FIGURA 4.2 PLANO GENERAL DEL CARRO 2 DEL TREN DE EQUIPOS



*Carro 3*

4.56 En este carro se encuentran los paneles eléctricos a los cuales están conectados todos los sistemas de la tuneladora, enfrente de estos paneles se encuentra el tanque de lechada para la inyección con capacidad de 6 m<sup>3</sup> y bajo este las bombas para la inyección.

4.57 Las bombas de Inyección envían el mortero desde el depósito de lechada por cuatro líneas hasta el punto de inyección con presión suficiente para introducir el mortero en el terreno y llenar el espacio anular que se produce por la diferencia de diámetros entre el escudo y los anillos.

4.58 Componentes Principales

- Paneles Eléctricos
- Depósito de Lechada
- Bombas de Inyección
- Depósito de Grasas
- Bombas de Grasas



Paneles Eléctricos



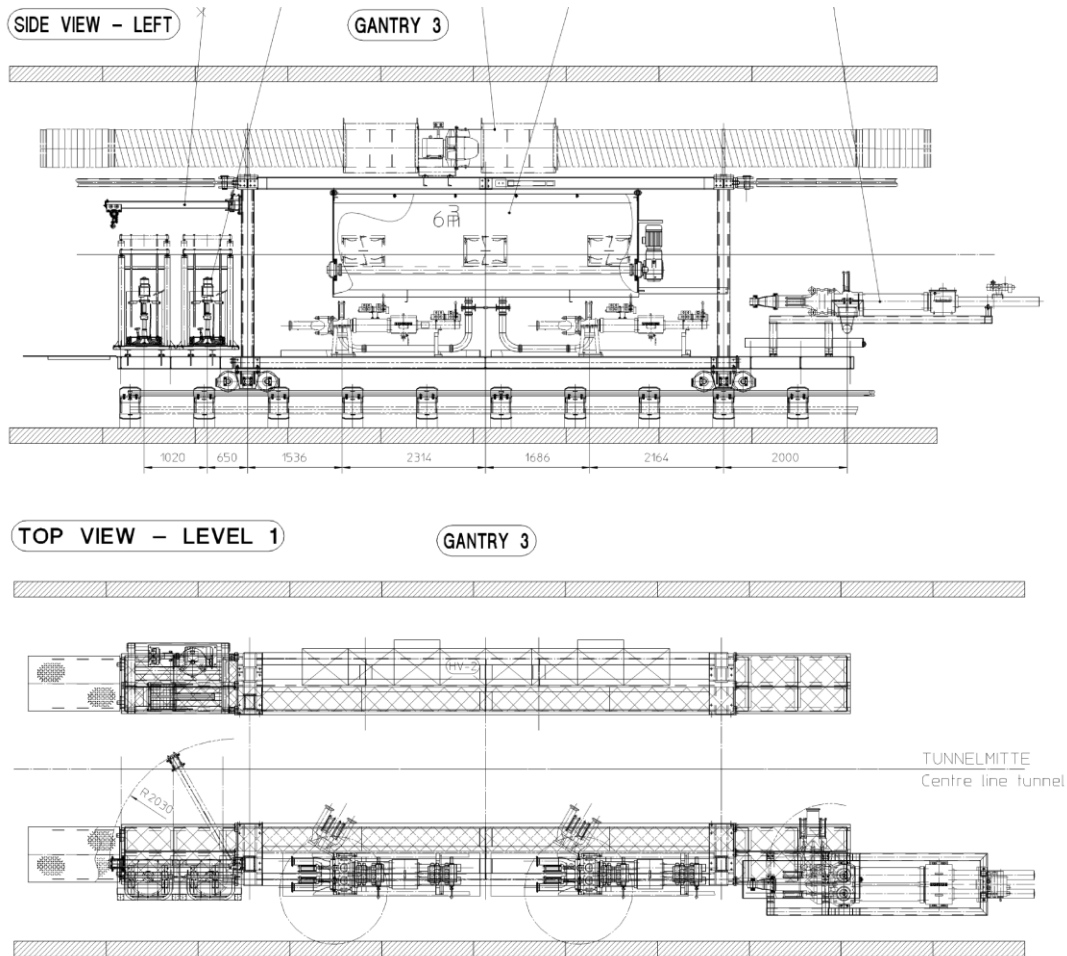
Deposito de Lechada



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

### I Sistema de Enfriamiento

FIGURA 4.3 PLANO GENERAL DEL CARRO 3 DEL TREN DE EQUIPOS



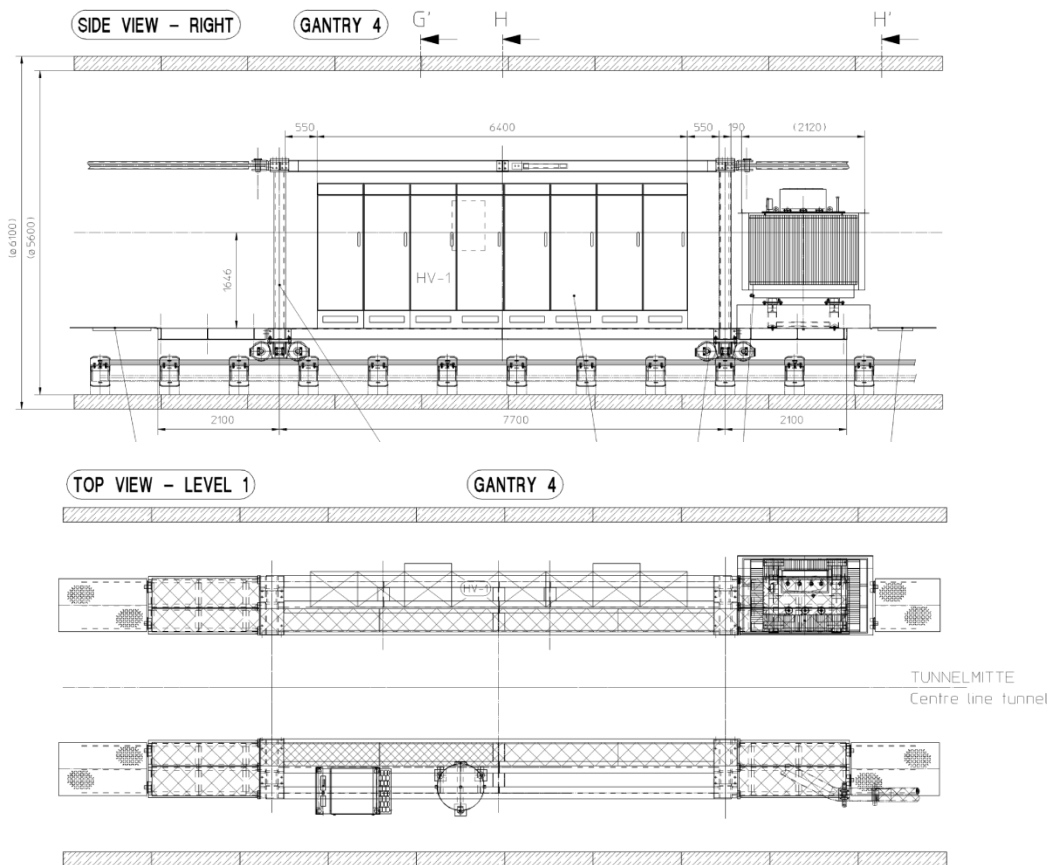
### Carro 4

4.59 En el carro cuatro se encuentran los paneles eléctricos de reserva que en caso de que se presente alguna falla en los principales el escudo pueda continuar operando mientras se realizan las reparaciones necesarias.

4.60 Además de los gabinetes, también se tiene el transformador que alimenta de energía a toda la tuneladora.

- I Componentes Principales
- I Paneles Eléctricos de Reserva
- I Transformador Eléctrico
- I Compresor

FIGURA 4.4 PLANO GENERAL DEL CARRO 4 DEL TREN DE EQUIPOS



*Carro 5*

4.61 En el carro cinco se encuentran los carretes de cable, las extensiones de la tubería de rezaga y un sistema para las extensiones de la tubería de rezaga.

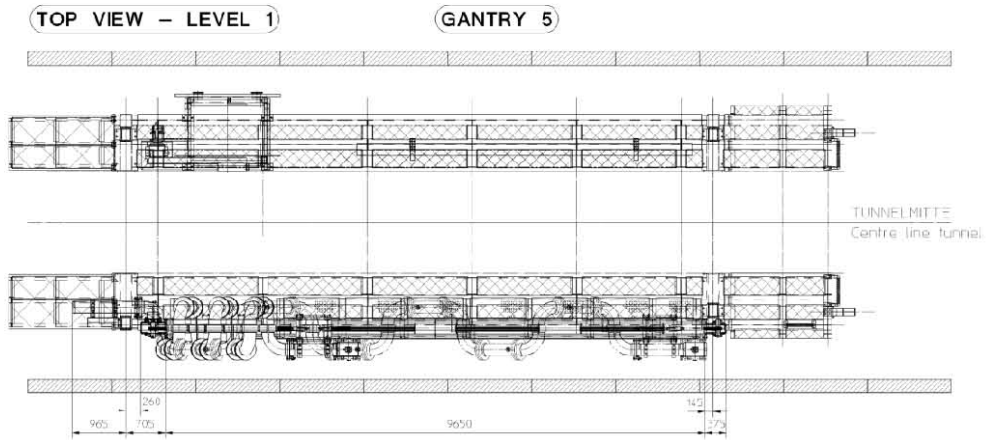
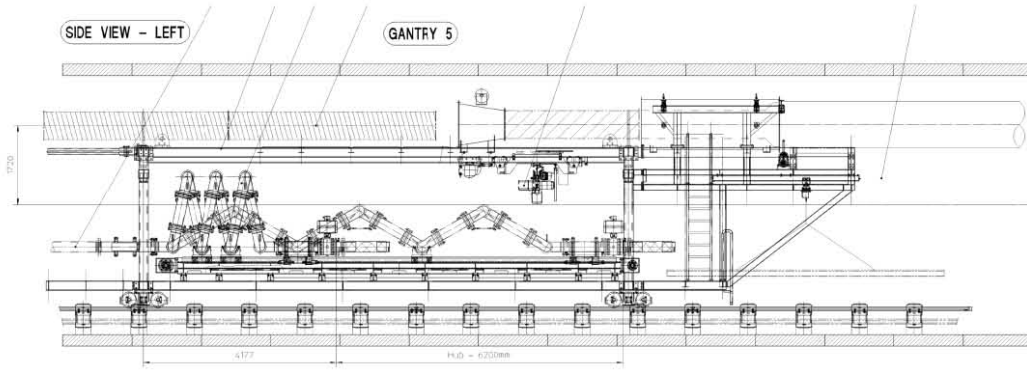
4.62 Para el cambio de la tubería de rezaga se tiene un sistema retráctil que se va extendiendo hacia la parte posterior del carro conforme avanza la excavación, una vez que se cumple el recorrido se cierran las válvulas, se desconecta el tubo anterior, se retrae y se conecta un nuevo tramo de tubería para seguir con el avance.

4.63 Componentes Principales

- Sistema para el cambio de la tubería de rezaga
- Carretes de Cable y Tubos para la extensión de la tubería de rezaga.



# Excavación de Túneles en Suelos Blandos



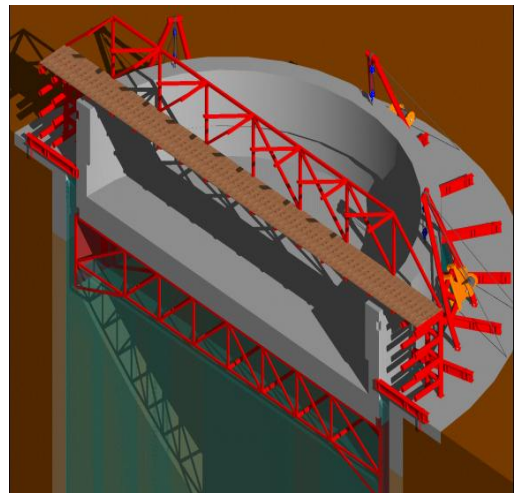
## 5. Descripción del Proceso de Excavación del Túnel en el Valle de Chalco

### Trabajos Previos a la Excavación

- 5.1 Antes de poder dar inicio con la excavación se tienen que realizar diversas que van desde la transportación del equipo (tuneladora), la construcción de las lumbreras que serán los accesos al túnel y una serie de instalaciones para la fabricación de mezcla de inyección y el almacenamiento e introducción de los insumos de la excavación.
- 5.2 A continuación se describen las principales actividades a realizar necesarias para dar inicio a la excavación.

### Construcción de Lumbreras

- 5.3 La lumbrera es un elemento estructural circular de concreto reforzado cuya función principal es permitir el acceso de los recursos y personal necesarios para la construcción de un tramo de túnel y mantenimiento del mismo.



- 5.4 En la construcción de las lumbreras para el proyecto del Túnel Río de la Compañía ICA utiliza el método de flotación en suelos blandos debido principalmente a la estratigrafía de la zona.

- 5.5 A grandes rasgos el método sigue los siguientes pasos:

- i) Se excava una zanja perimetral con ayuda de un equipo guiado y brocales que forman un polígono de 20 lados iguales, sustituyendo el material excavado por lodo fraguante a base de agua,
- ii) bentonita y cemento para formar una pantalla perimetral.
- iii) Se forma la pantalla perimetral sustituyendo el suelo con lodo bentonítico
- iv) Terminada la pantalla perimetral se excava totalmente el núcleo de la lumbrera con almeja loca.
- v) Posteriormente se coloca un tanque metálico invertido que servirá para la flotación de la lumbrera.
- vi) Sobre el tanque se construye la losa de fondo y los muros de la lumbrera.
- vii) Cada que se termina la construcción de una etapa de muro se realiza la inmersión.

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 5.6 La inmersión del tanque y la estructura desplantada sobre él se va controlando mediante la inyección de aire comprimido y con ayuda de malacates se mantiene la verticalidad de los elementos teniendo así el control absoluto de la flotación.
- 5.7 Los muros de concreto armado de 25 cm de espesor se realizan considerando etapas de colado de 2.40 metros cada una, hasta llegar al nivel de excavación requerido por el proyecto.
- 5.8 Para el proyecto en el Valle de Chalco se construyeron un total de 6 lumbreras, 4 de 12 m (L1, L2, L3 y L3A), una de 16 m (L4) y una de 5 m de diámetro (L1A).

### *Transportación del Equipo de Excavación*

- 5.9 La transportación del equipo desde la planta donde se construyó en Alemania hasta el sitio de la obra en Chalco, México implicó un reto debido a los volúmenes, dimensiones y los grandes pesos de las cargas.
- 5.10 Para dar solución a este problema se contrató a una empresa especializada en logística, que con colaboración del personal de la constructora y el fabricante se encargó de realizar la planeación necesaria, la revisión de opciones y los trámites necesarios para poder traer el equipo.
- 5.11 La carga a transportar fueron el escudo (escudo medio, escudo frontal, rueda de corte y el faldón), los cinco carros del tren de equipos, el puente y distintas piezas y refacciones almacenadas en contenedores para su transportación.

**TABLA 5.1 INVENTARIO DE TRANSPORTACIÓN DE LA TUNELADORA**

Descripción	Unidad	Final
Carga Suelta (Break Bulk)	Piezas	12
Piezas Contenerizadas (Dry)	Piezas	2
Piezas a Cielo Abierto (Open Top)	Piezas	10
Peso	Ton.	652
Volumen	m <sup>3</sup>	1,586

- 5.12 El escudo y todas las demás piezas hicieron un recorrido de más de 11 mil kilómetros partiendo de la ciudad de Schwanau, Alemania, recorriendo por países como Francia, Italia, Bélgica, Austria, por mencionar algunos antes de su llegada a nuestro país.
- 5.13 Los costos generados por la transportación fueron los siguientes



TABLA 5.2 COSTOS DE LA TRANSPORTACIÓN DE LA TUNELADORA

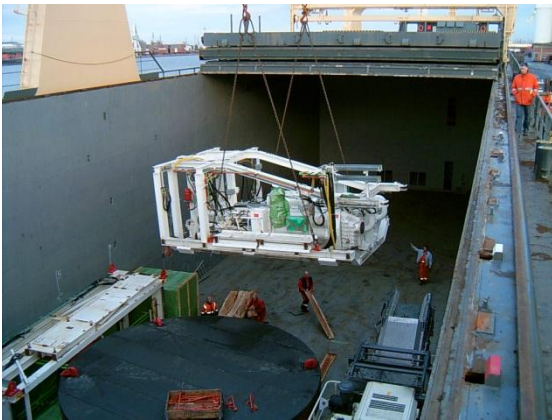
Transportación Internacional		
Gastos de Origen	USD	123,720.00
Flete Marítimo de Contenedores	USD	66,700.00
Flete Marítimo de Carga Suelta	USD	183,650.00
Aduana de Exportación	USD	1,800.00
<b>Total</b>	<b>USD</b>	<b>375,870.00</b>
Transportación en Territorio Nacional		
Transportación Terrestre	USD	148,319.00
Impuestos de Importación	Pesos	15,829.27

FIGURA 5.1 IMÁGENES DE CARGA Y DESCARGA DE LA TUNELADORA





## Excavación de Túneles en Suelos Blandos



### *Preparativos en la Lumbrera*

- 5.14 Terminada la lumbrera L1, comenzaron todos los trabajos preparativos y de planeación con el fin de tener todo listo en tiempo para la llegada de los equipos y el comienzo de la excavación.
- 5.15 Durante la planeación se revisaron distintos temas correspondientes a las labores a realizar durante lo sucesivo, considerando siempre tres puntos de suma importancia:
- Tiempo de ejecución, buscando que los trabajos se realicen con el menor tiempo necesario sin descuidar la calidad y la seguridad.
  - Logística, dando el orden adecuado a cada actividad de tal modo que fuera posible realizar el mayor número de actividades simultaneas sin que se interpongan unas con otras.
  - Seguridad. Debido a la cantidad de equipos, dimensiones y pesos de la carga así como la cantidad de gente involucrada en la construcción del túnel, la organización de la seguridad, debe de ser suficiente para garantizar la integridad de todo el personal en la obra y la gente que se pueda ver afectada por la misma.
- 5.16 Para que el escudo inicie con el proceso de excavación es necesario la instalación de recursos básicos para su correcto funcionamiento en la superficie vecina a la

lumbreira, tales como: una área de recepción del material excavado, sistema de carga del material excavado, las líneas de suministros y comunicación al túnel (aire, agua etc.), almacén y suministro de los anillos de dovelas, planta de fabricación de lechada, acometida de energía, subestación, laboratorios, oficinas etc. Tales instalaciones en superficie se habilitarán en las lumbreiras L-1, L-2 y L-3

- 5.17 Los principales trabajos preparativos se describen a continuación.

### *Limpieza y Colado de Losa en la Superficie*

- 5.18 En la superficie se realizó una limpieza general, se retiraron los escombros y los materiales que no eran necesarios para poder colar una losa en los alrededores de la lumbreira para tener lugar donde colocar en un principio los componentes de la tuneladora, la maquinaria y los equipos para la excavación y más adelante utilizar parte de este espacio como almacén de dovelas.

### **FIGURA 5.2 CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES EN LA SUPERFICIE DE LA LUMBRERA**



### *Construcción del Portal*

- 5.19 El portal marca el inicio del túnel, está construido con concreto  $f'c$  de  $300 \text{ kg/cm}^2$  con cemento resistente a los sulfatos y reforzado con acero con límite de fluencia de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ . Su finalidad es soportar el empuje del terreno en la zona de entrada a la excavación.
- 5.20 El armado del portal está anclado con el armado de la lumbreira, para la construcción fue necesario demoler partes del muro de lumbreira hasta dejar descubierto el acero de refuerzo.
- 5.21 El diámetro interior del portal es de 6.5 metros con 8.9 metros de ancho, la distancia al paño interior y exterior de la lumbreira desde el umbral es de 1.975 y 2.475 metros respectivamente. El espacio entre el portal y el escudo es sellado con neopreno de 20 mm de espesor y dureza shore 60.
- 5.22 El sello de neopreno perimetral está sujeto mediante 76 tornillos que a su vez se sujetan placas de media pulgada de espesor, de forma trapezoidal, con dos orificios. Los tornillos a su vez se sujetan a un anillo perimetral del mismo espesor que las placas, anclado al umbral con 30 varillas de  $\frac{1}{2}$ " y 40 cm de longitud en un radio de 3.425 m.

FIGURA 5.3 CONSTRUCCIÓN DEL PORTAL DE ENTRADA DEL ESCUDO



- 5.23 El sello de neopreno se coloca para cerrar el espacio que queda entre el portal y la camisa del escudo de tal modo que no escape material por la presión que ejerce el equipo en el terreno durante de la excavación y el mortero al inyectar los primeros anillos. .

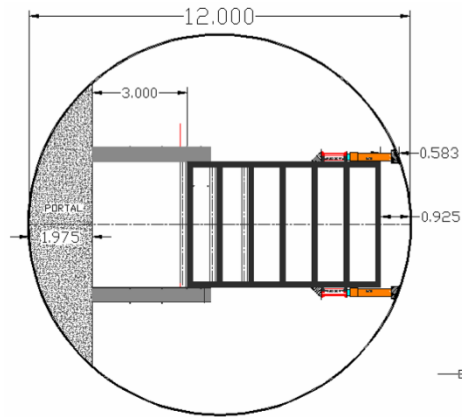
### *Colocación de la Cuna del Escudo*

- 5.24 La cuna del escudo es una estructura metálica construida para soportar y mover el escudo en el fondo de la lumbrera durante la etapa de armado.
- 5.25 La cuna esta orientada sobre la dirección del eje del túnel y se apoya con gatos hidráulicos en unos dados de reacción en el muro de la lumbrera con los cuales se empujan la cuna para poder recorrer el escudo hacia el portal.
- 5.26 Realizado el avance de la cuna se coloca una cuna de complemento con un nuevo juego de gatos para empujar el escudo hasta introducirlo en el portal.
- 5.27 La posición en la cual se colocan los tubos de 8 pulgadas es la misma que la posición de apoyo de los cilindros de propulsión con excepción de la parte superior e inferior en la que estás distribuidos solo 5 tubos en lugar de 6 para los 3 pares de gatos.

Bajada y Armado del Equipo

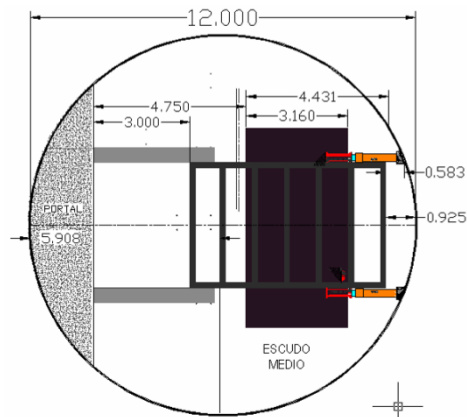
1

Posicionamiento Inicial de la Cuna del Escudo

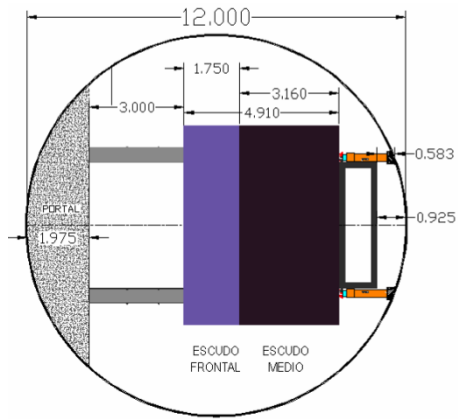


2

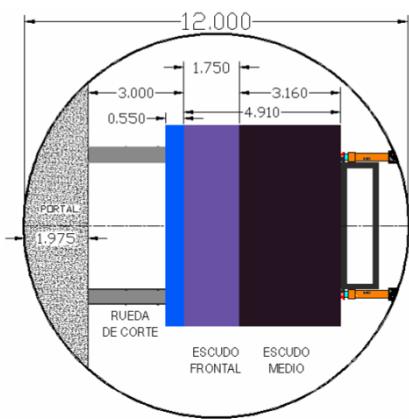
Descenso del Escudo Medio



3 Descenso del Escudo Frontal con Motores Acoplados

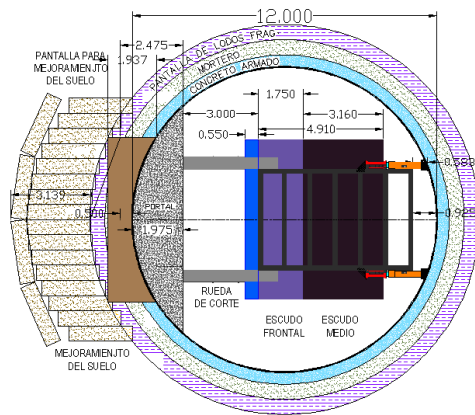


4 Descenso de la Rueda de Corte



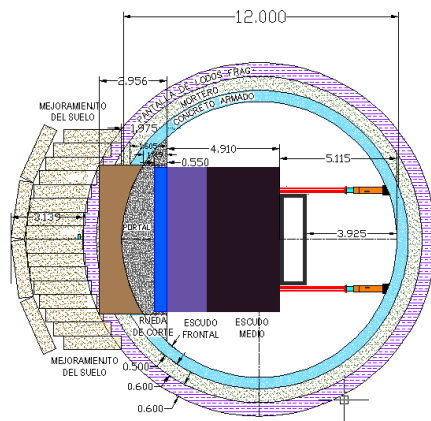
5

Ensamble de la rueda de corte al escudo frontal y medio e inicio de la demolición del núcleo de la lumbrera.



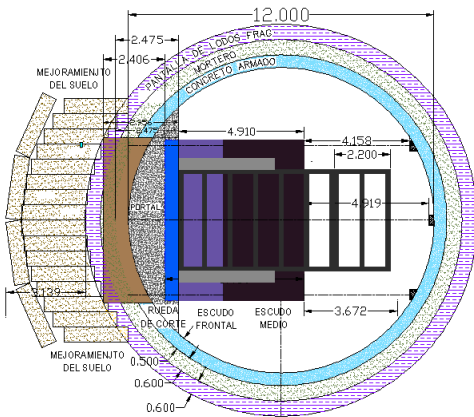
6

Empuje de 3 metros de la Cuna con el Escudo y Colocación del Sello de Neopreno

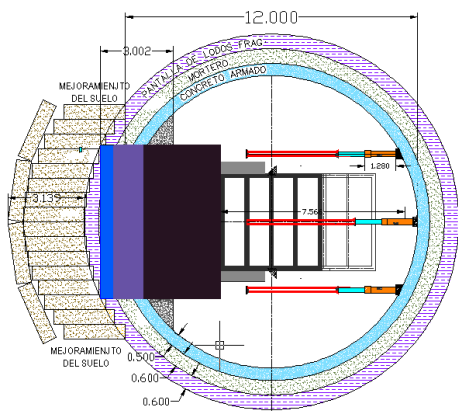


# Excavación de Túneles en Suelos Blandos

## 7 Adición de la cuna de complemento de 2.20 metros

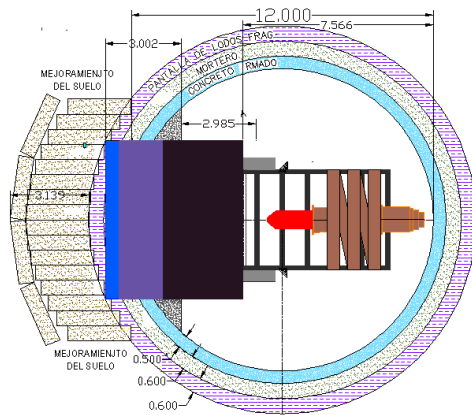


## 8 Empuje del escudo de 3 metros hacia el interior del portal



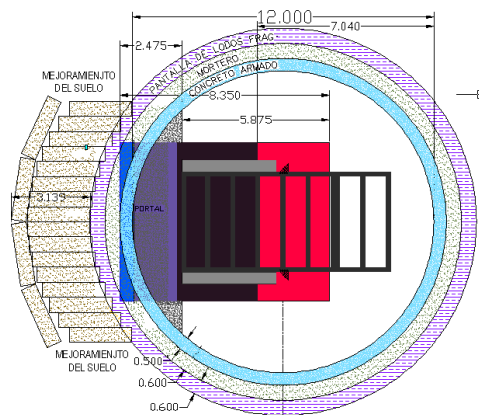
9

Descenso y Colocación del Erector de Dovelas y el Tornillo Sin Fin



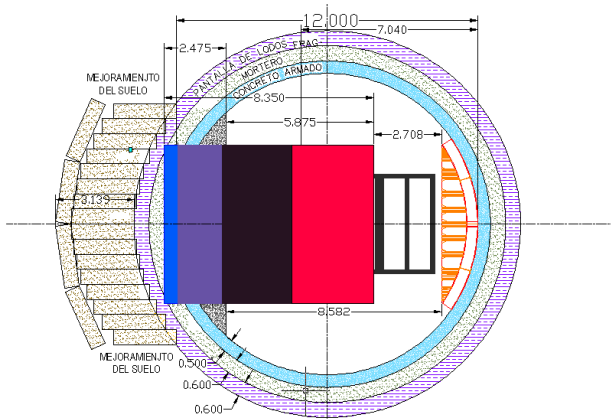
10

Descenso y Colocación del Faldón

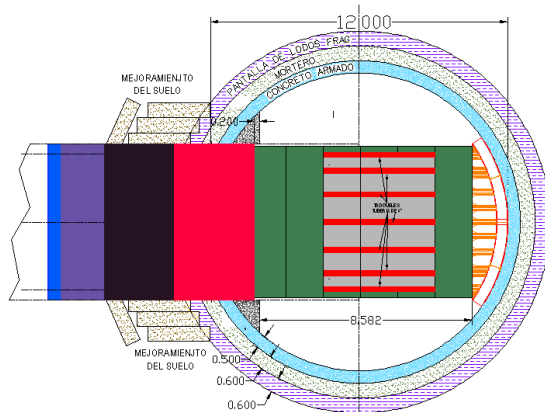




11 Colocación del Muro de Atraque y Comienzo de las Conexiones Hidráulicas y Eléctricas



12 Colocación de Anillos y Troqueles de Atraque para Transmitir el Empuje del Escudo al Muro de la Lumbrea los Primeros 70 metros



### *Muro de Atraque*

- 5.28 El muro de atraque es una estructura formada por 16 vigas roladas IR en las cuales radialmente se apoyan 30 tubos de 8" de diámetro de diferentes longitudes (según son posición) para colocar después un anillo de 9.5 mm de espesor para formar un plano vertical sobre el cual se apoyaran los cilindros de propulsión del escudo.
- 5.29 La función del muro de atraque es transmitir el empuje producido por el escudo al muro de la lumbrera de tal modo que la repartición de cargas en el muro sean lo más uniforme posibles.
- 5.30 Con el ensamble completo de los componentes principales del escudo en la lumbrera (disco de corte, escudo frontal, escudo medio, erector de dovelas, tornillo sin fin y el faldón), lo siguiente fue colocar del muro de reacción en su posición en el fondo de la lumbrera.



### *Conexión de Cables y Mangueras*

- 5.31 Teniendo colocado el muro de reacción se comenzó la conexión de mangueras y cables necesarios para la operación del escudo todos ellos conectados con el tren de equipos y la cabina de mando que al comienzo de la excavación se encontraban ubicados en la superficie de la lumbrera.
- 5.32 Las mangueras y los cables bajaban desde la superficie y se conectaban con el escudo atravesando en su mayoría por los espacios entre el muro de atraque.
- 5.33 Una vez conectados todos los cables y mangueras, el día 4 de marzo de 2007 se verifica el funcionamiento de los distintos equipos de la máquina, se realizan pruebas de los sistemas de avance, corte, extracción de material, articulaciones, etc. para estar seguros de que todo se encuentre en orden para el comienzo de la excavación

### *Colocación de Anillos de Atraque*

- 5.34 Con el escudo ensamblado y terminadas las pruebas de funcionamiento el escudo se encuentra en condiciones de operación.
- 5.35 La bajada de las dovelas para el primer anillo se realiza con ayuda de la grúa ubicada en el exterior de la lumbrera bajando pieza por pieza introduciéndolas por el espacio que queda entre el faldón del escudo y el muro de reacción.
- 5.36 En el interior de la lumbrera las dovelas son arrastradas con ayuda de "tirfos" y diferenciales hasta quedar al alcance del brazo erector del escudo, mismo que mediante un perno mecánico coloca las dovelas en su posición. Las dovelas se fijan entre ellas mediante tornillos que se sujetan a los insertos de la dovela contigua.
- 5.37 El primer anillo es montado en el faldón del escudo y de ahí se empuja con los cilindros de propulsión hasta quedar en contacto con el muro de atraque. Los

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

siguientes anillos son montados de igual modo en el interior del faldón y son empujados hasta quedar en contacto cada uno con el anillo anterior.

- 5.38 Estando debidamente armado el primer anillo de atraque y en contacto tanto de los gatos del escudo como del muro de atraque se procede a la demolición del mortero colocado en el portal lo necesario para permitir el acceso del escudo y que el sello de neopreno cumpla su función de contener la presión del suelo en el espacio entre el escudo y el portal.
- 5.39 Terminada la demolición de del mortero en el portal de entrada se accionan los cilindros de propulsión hasta tener un avance suficiente (1.60 -1.90 metros aprox.) para la colocación del siguiente anillo, se retiran los cilindros de propulsión y se procede a la colocación del mismo.
- 5.40 El primer anillo de dovelas se monta completo apoyado contra el muro de atraque de los siguientes tres anillos se montan tres dovelas para dejar el espacio superior abierto y permitir el acceso de las dovelas y el material necesario para la excavación.
- 5.41 Los semianillos colocados se soportan lateralmente por una estructura metálica a base de troqueles para evitar la aparición de fisuras en las dovelas por la falta del auto soporte que se da cuando el anillo se forma completo.

### Inicio de la Excavación

- 5.42 Con los anillos de atraque en contacto con el muro y el escudo, después verificar que el sello de neopreno cubra uniformemente la camisa del escudo se da inicio a los trabajos de excavación. La excavación comenzó el día 7 de marzo de 2007.
- 5.43 El primer avance del escudo se da apoyado en el tercer anillo, uno completo y dos semianillos.
- 5.44 En el exterior del túnel el escudo trabaja sin presión de confinamiento por lo cual con el torque producido al momento de excavar el escudo tiende a girar, para evitar que gire se colocaron troqueles tipo IPR de 8” soldados al faldón y apoyados en la losa de la lumbrera.
- 5.45 El escudo comienza su avance ejerciendo empuje solo con la mitad de los cilindros de propulsión apoyados en el semianillo de atraque. Poco después de comenzada la excavación se vio la necesidad de colocar troqueles en los espacios que quedaban entre los semianillos, para que sirvan como puentes entre anillos pues comenzaron a fracturarse las dovelas que quedaban sin apoyo directo con las dovelas del anillo anterior.



- 5.46 A las dovelas certificadas por la supervisora se les colocan los sellos de empaque que van alrededor de la de la dovela en la superficie de contacto entre anillos y dovelas. Los dos anillos colocados completos antes del portal son certificados y tienen sus empaques, estos marcan el inicio del túnel.
- 5.47 Una vez que el escudo avanza y deja descubierto el anillo que coincide con el portal de entrada se ajustan las placas que sujetan el anillo perimetral de neopreno hasta quedar casi en contacto con el anillo de dovelas para dar más soporte al sello y asegurar que resista la presión ejercida por el terreno al ser excavado.
- 5.48 Por falta de empuje de los gatos superiores del escudo tenía una tendencia ascendente, para poder apoyar los gatos superiores se colocaron 7 troqueles de 8” con el fin de ligar los anillos del portal con el anillo apoyado en el muro de reacción y así poder ejercer presión con todos los gatos y corregir la dirección del escudo.
- 5.49 Los primeros metros de la excavación del túnel se realizaron únicamente con el escudo sin contar con el apoyo del tren de equipos. La cabina de mandos se encontraba en la superficie desde donde se controlaba y monitoreaba al escudo.
- 5.50 En un principio el material excavado salía del tornillo sin fin por unas mangueras para colocarlo en tambos, y de ahí sacarlos al exterior con ayuda de la grúa.
- 5.51 Las dovelas para los anillos se bajaban de igual modo con la grúa y en el fondo de la lumbrera se transportaban hasta el erector de dovelas con un montacargas que las dejaba al alcance del brazo del erector para ser colocadas.



**FIGURA 5.4 BAJADA DE DOVELAS AL INTERIOR DEL TÚNEL**



- 5.52 De este modo se operó hasta completar los primeros nueve metros de la excavación para tener el espacio suficiente para bajar el carro uno con las bombas de rezaga y la cama de dovelas.

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 5.53 Para cuando se colocó el cuarto anillo del túnel se tenía preparado y probado todo el equipo para la inyección para comenzar a inyectar los primeros anillos que iban quedando descubiertos por el faldón del escudo.

### *Bajada del Tren de Equipos*

#### *Bajada del Carro 1*

- 5.54 La bajada del carro número uno, en donde se encuentran las bombas de rezaga, se realizó teniendo completos los primeros 9 metros de excavación que representan espacio suficiente para el carro 1 y para seguir bajando las dovelas para continuar con la excavación.
- 5.55 La poca longitud que se tiene de túnel al momento del paro para la bajada del carro, generó dudas sobre la estabilidad de los anillos colocados ya que para la maniobra fue necesario quitar los troqueles de apoyo entre los primeros anillos y los anillos de atraque.
- 5.56 Para garantizar la seguridad de la operación antes de comenzar la bajada se realizaron pruebas empujando el escudo de 5 a 10 centímetros y liberando los gatos superiores para ver el comportamiento del escudo y de los anillos.
- 5.57 Antes de bajar el carro se retiran los troqueles superiores que ligan los anillos al inicio del túnel con el muro de atraque y también las dovelas superiores del anillo en contacto con el muro para así dar más espacio para maniobrar el carro y la cama de dovelas.
- 5.58 En la superficie de la lumbrera se retiran las pasarelas laterales del carro según lo planeado. En el fondo de la lumbrera se hace una limpieza general, se limpian las rejillas de la tolva que va a conectarse con las bombas de rezaga y se colocan nuevamente para tener todo listo para las conexiones.
- 5.59 La maniobra de bajada se realiza el día 24 de marzo, bajando primero la cama de dovelas que va colocada debajo del carro y después se continúa con la bajada del carro.
- 5.60 El carro se coloca en su posición detrás del escudo jalándolo con polipastos para posteriormente comenzar a hacer todas las conexiones, se colocan nuevamente las pasarelas y se prepara la cama de dovelas. Terminadas las conexiones se prueban los sistemas del escudo y el equipo de bombeo.

**FIGURA 5.5 BAJADA DEL CARRO 1 (CARRO DE BOMBAS)**



- 5.61 Para el reinicio de la excavación no se colocan nuevamente las dovelas superiores del primer anillo de atraque, en lugar de esto se hacen extensiones a los troqueles y se dejan apoyados contra el muro de reacción.
- 5.62 Las bombas de rezaga del carro uno se conectan a la tolva que esta junto al tornillo sin fin y se conectan al tubo de rezaga por el cual el material pasa desde la tolva, por la bomba y se empuja hasta el patio en donde el material se colecta mediante un cargador frontal y se deposita en camiones de volteo.
- 5.63 Desde este momento las dovelas se llevan con ayuda del monta cargas desde la lumbrera y se colocan en orden en la cama de dovelas que las hace pasar por debajo del carro uno y las deja al alcance del brazo erector para ser colocadas.
- 5.64 Mientras se continua con el avance de la excavación se comienza la instalación de las vías para el tren de equipos así como el sistema de vías auxiliares para el tren que se encargará de llevar las dovelas hasta el puente y el carro dos donde están las grúas para girar las dovelas y colocarlas en la cama.
- 5.65 La excavación se continua con un mejor ritmo gracias a que la extracción del material producto de la excavación se realiza con las bombas en lugar de con artesas como se venía realizando hasta antes de la bajada del carro.
- 5.66 Mientras se continua con el avance de la excavación se comienza la instalación de las vías para el tren de equipos así como el sistema de vías auxiliares para el tren que se encargará de llevar las dovelas hasta el puente y el carro dos donde están las grúas para girar las dovelas y colocarlas en la cama.

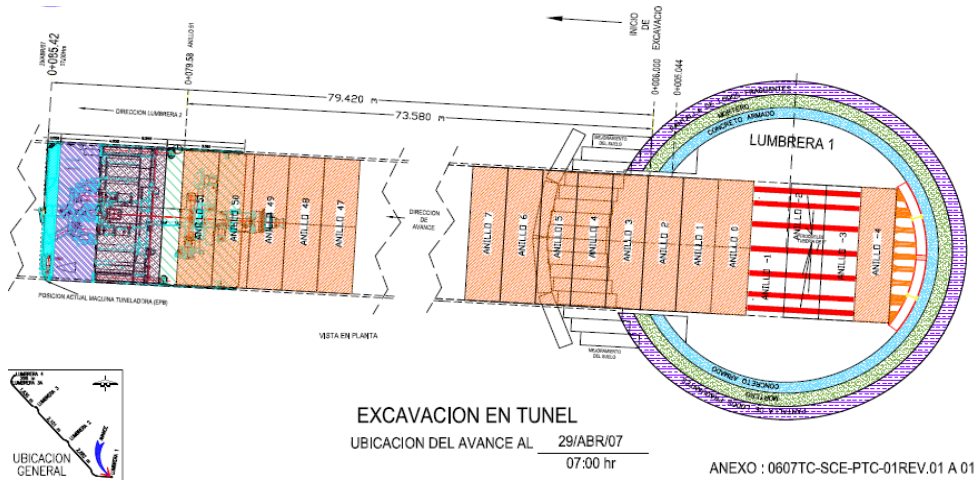
### *Bajada del Puente*

- 5.67 La longitud necesaria para la bajada de los carros faltantes del tren de equipos fue la equivalente a 50 anillos (aproximadamente 75 metros) y en caso de no cumplirse para la fecha prevista se contaba con un plan emergente en el cual se tenía prevista la bajada de los distintos carros con excepción del carro número 5 pues la ausencia de este no afecta el funcionamiento del equipo.
- 5.68 Según lo planeado se realizó un estudio topográfico para determinar que partes de la estructura de atraque era necesario retirar para la bajada de los carros faltantes del tren de equipos
- 5.69 Faltando 40 centímetros para completar el avance para la colocación del último anillo se colocó bentonita en el interior de la cámara de excavación del escudo para que se mezcle con el suelo que se va excavando y así asegurar que la presión en el frente se mantenga durante los días necesarios para la operación de bajado del tren de equipos.



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

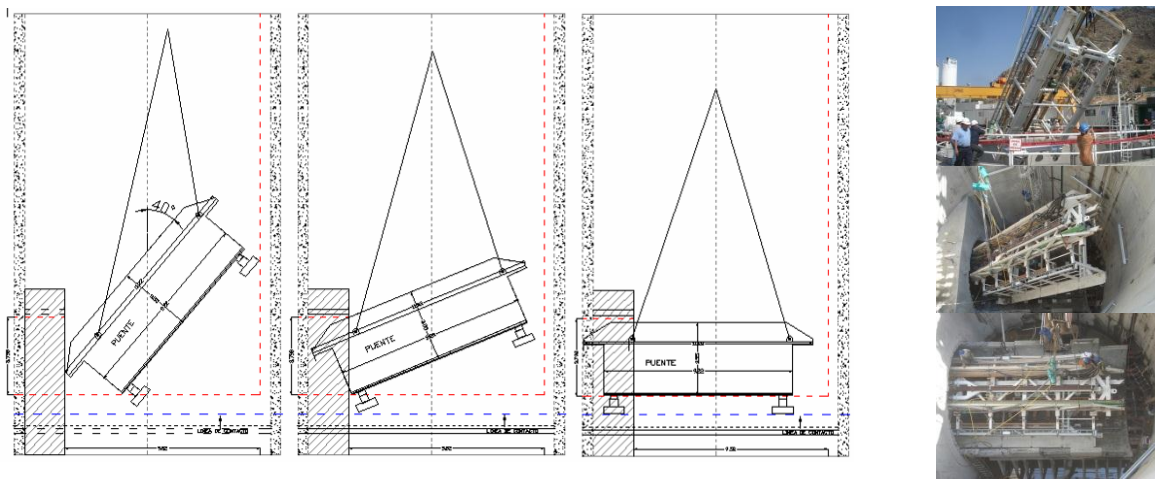
**FIGURA 5.6 ESQUEMA DE LA DISTANCIA NECESARIA PARA EL PARO PROGRAMADO DE BAJADA DE TREN DE EQUIPOS**



- 5.70 Con la excavación terminada se procede a la limpieza de la línea de la tubería de rezaga y la desconexión de mangueras y cables conectados al escudo que corren a través del túnel para retirarlas del interior.
- 5.71 El aceite hidráulico contenido en las mangueras se depositó en tambos para evitar que se derrame en el interior del túnel y reducir los desperdicios con el fin de poderlo aprovechar posteriormente.
- 5.72 Mientras se realiza toda la desconexión en el interior del túnel también comienza la desconexión de mangueras y cables en la superficie.
- 5.73 Terminada la retirada de cables y mangueras en el interior del túnel se procede a realizar una limpieza total para eliminar todo el material y los residuos de aceite y grasa derramados en el interior del túnel.
- 5.74 Finalizada la limpieza del túnel se coloca el sistema de vías auxiliar para locomotora eléctrica que llevará las dovelas desde la lumbrera hasta la tuneladora. El sistema de vías auxiliar consta de durmientes y rieles a lo largo todo el túnel. Además del sistema de vías auxiliar se colocan las ménsulas y rieles complementarios para sobre estos apoyar los carros del tren de equipos.
- 5.75 Parte del sistema de atraque en la lumbrera se retiró para permitir el paso de los carros de la tuneladora, se retiraron los troqueles, las dovelas superiores de los anillos adyacentes al portal de entrada del túnel, se demolió parte del primer anillo del túnel ya que la otra parte se encuentra dentro del portal de entrada y se retira la parte superior del muro de atraque.
- 5.76 Topografía realizó las distintas propuestas de bajada de cada uno de los carros para garantizar su entrada en el túnel, en dichas propuestas se indica si es necesario retirar algún componente de los carros y la ubicación de los puntos de izaje para cada caso.

- 5.77 Para la bajada del puente se colocan ruedas provisionales para poder llevarlo desde la entrada de la lumbrera hasta su posición final. La maniobra de bajada se realiza con una grúa de 500 toneladas en virtud de que la maniobra se debe realizar con una inclinación tal que permita introducir primero una parte en el interior del portal.
- 5.78 La bajada del puente del tren de equipos se realiza con la ayuda de polipastos neumáticos para controlar la inclinación hasta tener el carro en contacto con los rieles.
- 5.79 Con el puente colocado sobre los rieles se coloca la tubería de ventilación en la parte superior y se jala mediante tirfos hasta tener una distancia suficiente para poder bajar la locomotora con la cual se llevará el carro hasta el punto de conexión con el carro número 1.

**FIGURA 5.7 BAJADA DEL PUENTE**



- 5.80 Terminada la maniobra se retira nuevamente la locomotora para proceder con la bajada del carro número 2.

*Bajada del Carro 2*

- 5.81 Para la bajada del carro número dos se retiran las ruedas frontales y un tramo de viga al frente del carro y se colocan un par de orejas adicionales en la parte superior de la estructura para el izaje del carro.
- 5.82 Debido al peso de la estructura fue necesario reforzarla con perfiles del tipo IPR además se hizo una revisión minuciosa para garantizar que todos los componentes del carro permanezcan en su lugar durante la maniobra.
- 5.83 Al iniciar la maniobra se comenzó a deformar la estructura de soporte del carro por lo que se decidió suspender la maniobra y bajar el carro por partes para lo que se separaron las secciones laterales y las la parte central.
- 5.84 La bajada de cada una de las partes se realizó de manera similar a la indicada en los documentos presentados por topografía en los que se indica las inclinaciones y posiciones para la colocación del carro en el fondo de la lumbrera.



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 5.85 La primera parte que se colocó en el fondo de la lumbrera fue la lateral derecha que es la más larga, después la lateral izquierda y al final la central para ser armadas en el fondo de la lumbrera.
- 5.86 Se colocaron las ruedas frontales del carro, el tramo de viga que se retiró para la maniobra y la tubería de ventilación. Armado completamente el carro se empuja unos metros con ayuda de "tirfos" hasta tener espacio suficiente para bajar la locomotora y empujar el carro hasta el puente para engancharlos.

**FIGURA 5.8 MANIOBRA DE BAJADA DEL CARRO DOS DE LA TUNELADORA**

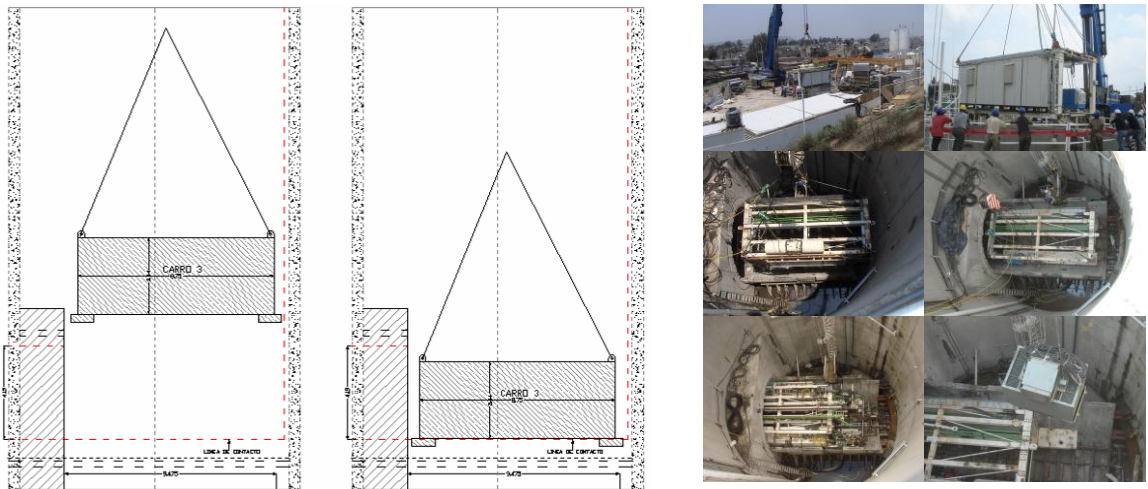


- 5.87 Con ayuda de gatos hidráulico de apoyo se levanta el puente para retirar las ruedas provisionales que sirvieron para moverlo en el interior del túnel y con los mismos gatos se coloca a la altura en la cual ensambla correctamente con el carro número 1 y 2. Con el puente ensamblado con los carros número 1 y 2 se retira nuevamente la locomotora.
- 5.88 Realizado el ensamble se retiran las vigas auxiliares que sirvieron de apoyo para las ruedas del puente y se comienzan las conexiones de los sistemas de funcionamiento entre el carro número 1, 2 y el escudo.

### *Bajada del Carro 3*

- 5.89 Para la bajada del carro 3 se colocan las ruedas y se retiran los depósitos de grasa, el sistema de enfriamiento, las pasarelas y las vigas que comunican con los carros contiguos.
- 5.90 La bajada se realiza del mismo modo que los carros anteriores solo que para este caso no fue necesario dar inclinación al carro para colocarlo sobre los rieles.
- 5.91 Con el carro en el fondo de la lumbrera se bajan los componentes que se retiraron y se ensamblan nuevamente, se coloca la tubería de ventilación y se empuja con herramienta manual hasta tener espacio suficiente para bajar la locomotora y llevarlo hasta el punto de ensamble con el carro número 2.

FIGURA 5.9 BAJADA EL CARRO 3

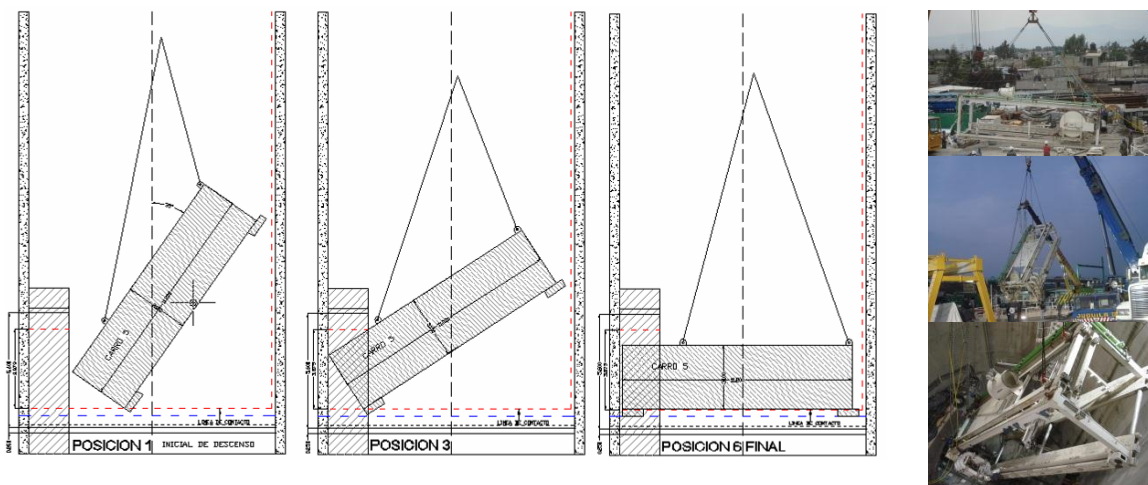


*Bajada del Carro 4*

- 5.92 La bajada del carro cuatro se realiza exactamente del mismo modo que la bajada del carro tres debido a que las dimensiones de la estructura de soporte principal son idénticas.
- 5.93 Es necesario colocar las ruedas del carro y retirar el transformador eléctrico, las pasarelas y las vigas que comunican con los otros carros.
- 5.94 El armado y empuje del carro se lleva siguiendo el mismo procedimiento que con los demás carros: empujando con herramienta manual los primeros metros y luego con ayuda de la locomotora para después retirarla del túnel.

*Bajada del Carro 5*

- 5.95 Del mismo modo que se procedió con los carros anteriores, para el carro 5 se retiran todas las piezas y componentes excedentes al marco de la estructura principal y se colocan las ruedas.



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 5.96 Debido a que el carro número cinco es el carro más largo del tren de equipos para la bajada se realizó de manera casi vertical. Con el carro sobre los rieles se coloca todo lo que se retiró para la bajada, se coloca la tubería de ventilación y se recorre un poco para dejar espacio para colocar la parte posterior del carro.
- 5.97 El ensamble con los demás carros se realiza del mismo modo que en los casos anteriores utilizando herramienta mecánica en un principio y la locomotora para llevarlo a su posición final.

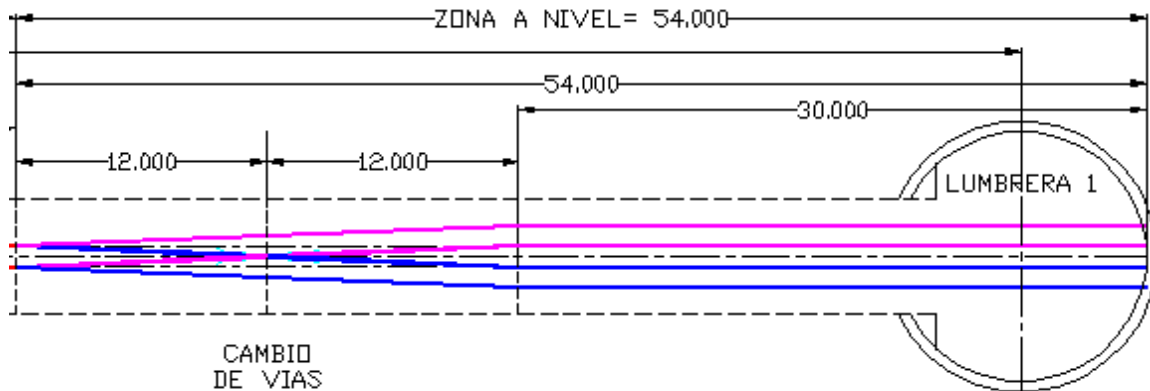
### *Reinicio de la Excavación*

- 5.98 Con todos los carros en el fondo de lumbrera y en su posición en el túnel comienzan nuevamente los trabajos de conexión del escudo y del tren de equipos para después realizar una prueba general de todos los sistemas y dar inicio nuevamente a la excavación.
- 5.99 Los ciclos de excavación y de colocación de dovelas del escudo se siguen realizando del mismo modo que se habían venido haciendo, a partir de este momento cambia la manera manejar las dovelas en la lumbrera y en el interior del túnel.
- 5.100 El transporte de dovelas desde el patio de la lumbrera hasta el erector se lleva acabo de la siguiente manera:
- Las dovelas se toman del patio de almacenaje con la grúa pórtico, se bajan y se colocan en los carros del tren.
  - El tren lleva las dovelas desde la lumbrera hasta el carro dos de la tuneladora donde se toman las dovelas para girarlas y colocarlas en la cama de dovelas.
  - La cama de dovelas lleva las dovelas hasta el erector para colocarlas en su lugar.



- 5.101 Con el tren de equipos ubicado en el túnel la operación del escudo se da de una manera más continua pues no se pierde tiempo con la extensión de mangueras, cables y tubos como se tenía que realizar cuando los carros estaban en la superficie de la lumbrera, las únicas extensiones que se realizan son la de los cables de electricidad que alimentan al transformador eléctrico y las tuberías de agua del sistema de enfriamiento, de achique, de aire y de rezaga.
- 5.102 La excavación continua hasta alcanzar una distancia adecuada para colocar los cambios de vía. Los cambios de vía se colocan para agilizar el transito de dovelas en el interior del túnel .

FIGURA 5.10 ESQUEMA GENERAL DEL CAMBIO DE VÍAS EN EL INTERIOR DEL TÚNEL



- 5.103 Con el cambio de vías listo el equipo sigue operando hasta su llegada a la siguiente lumbrera donde se realiza un nuevo paro para verificar las condiciones en las que se encuentra el equipo después de recorrer el tramos, cambiar los cortadores, darle mantenimiento y realizar algunas reparaciones en caso de ser necesario.

#### Llegadas a las Lumbreras

- 5.104 Las llegadas a cada una de las lumbreras por las que tuvo que pasar la túneladora eran uno de los momentos más críticos y riesgosos durante la excavación del túnel pues eran los momentos en los que se dejaba el terreno que se estaba excavando más expuesto.
- 5.105 El procedimiento definitivo de llegada a las lumbreras consistía en:
- Realización de inyecciones perimetrales para mejoramiento del terreno.
  - Construcción de una “cuna” de recepción del escudo de concreto.
  - Demolición parcial del muro de la lumbrera.
  - Demolición para ubicar la punta del escudo.
  - Avance del escudo y demolición del resto del muro en la zona de llegada.
  - Limpieza de la lumbrera
  - Recepción del Escudo en la cuna
  - Colado de cierre del tramo.
  - Revisión y mantenimiento del escudo
- 5.106 Las inyecciones perimetrales de lechada en la periferia de la llegada del escudo se realizan con boquillas ranuradas de 12 metros de longitud para mejorar la consistencia del terreno en la zona de la lumbrera y reducir las filtraciones de agua o terreno al interior de la lumbrera mientras se realiza el procedimiento de llegada, revisión y mantenimiento del equipó y se reinicia la excavación.

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 5.107 La mezcla que se inyecta en el terreno se compone básicamente de cemento, bentonita, agua y acelerante de fraguado.
- 5.108 La cuna es una estructura semicircular del mismo diámetro del escudo con tres rieles embebidos en el concreto. La cuna es la estructura que soporta durante el mantenimiento del mismo.
- 5.109 Con la cuna lista y el escudo aproximándose al punto de llegada se realiza una primera demolición de la mitad del espesor del muro armado de la lumbrera de acuerdo a un trazo señalado por topografía.
- 5.110 Una vez que el escudo se encuentra en posición detrás del muro de la lumbrera se realiza una demolición de un metro de diámetro para ubicar la posición del escudo. Con la ubicación definitiva del escudo se procede a la demolición del muro restante en la zona de llegada y al retiro por completo del cerco de refuerzo del muro para permitir el paso libre del equipo.
- 5.111 Antes de que el escudo pueda entrar libre a la lumbrera se debe de hacer una limpieza completa de la misma para retirar todo el material producto de la demolición del muro y el lodo que sale de la cámara de la excavación del escudo.
- 5.112 Ya con la lumbrera limpia el escudo avanza hasta quedar completamente sobre la cuna de concreto donde se detiene el equipo para realizar una inspección completa de sus condiciones y realizar las reparaciones que sean necesarias en la rueda de corte.
- 5.113 Para evitar el flujo de agua y material al interior de la lumbrera el espacio que queda entre la demolición realizada para permitir el paso del escudo y los anillos de dovela colocados con el escudo al ras del muro de la lumbrera se realiza un colado de concreto simple.
- 5.114 El escudo y la excavación se detienen por aproximadamente 2 semanas hasta que se tiene en condiciones óptimas para reiniciar la excavación. El proceso de reinicio de la excavación es básicamente el mismo que el de inicio de la excavación.
- 5.115 La excavación y llegada de la máquina a cada una de las lumbrera se repite en cada uno de los tramos hasta llegar a la Lumbrera L4 en donde se recibe la tuneladora por última vez, se desarma y se retira de la lumbrera para enviarla a los patios de almacenaje de maquinaria donde se restaura y se deja en condiciones para el siguiente proyecto.

## 6. Sistema y Fabricación de Dovelas

- 6.1 Las dovelas son elementos constructivos que conforman arcos, anillos y bóvedas, tienen forma de cuña y pueden ser de piedra tallada, ladrillo, prefabricadas de concreto, metálicas o de algunos otros materiales.
- 6.2 La construcción con dovelas se ha venido realizando desde hace muchos años en la construcción de puentes, portales o como elementos decorativos. En la construcción de túneles en suelos blandos se utiliza como revestimiento primario durante la excavación.
- 6.3 La tecnificación de la excavación de túneles en suelos blandos ha permitido pasar de la colocación de elementos pequeños de mampostería a las grandes piezas de prefabricados metálicos o de concreto que se utilizan actualmente.

### Descripción General del Sistema de Dovelas

- 6.4 Los anillos de dovelas utilizados en la construcción de los primeros túneles eran de forma cilíndrica perfecta salvo en las curvas del túnel para las cuales se fabricaban anillos especiales con la curvatura necesaria.
- 6.5 Los sistemas de dovelas actuales utilizan un una sola configuración de anillos de forma troncocónica con los que se varía el plano de dirección (plano del anillo) dependiendo de la posición en la que se coloque la cuña.
- 6.6 Con los nuevos sistemas cuando se quiere ir en línea recta se va cambiando la posición de la cuña de  $180^\circ$  entre cada anillo y cuando se quiere girar en alguna dirección se busca colar la cuña siempre hacia el lado que se quiere ir.
- 6.7 Las principales ventajas de estos sistemas es que se tiene mayor libertad para realizar giros de distintos radios y cualquier dirección y que no es necesaria la fabricación de anillos especiales.
- 6.8 La única limitante para la colocación de la cuña es que no pueden coincidir las juntas entre dovelas entre anillos contiguos por lo que no se puede colocar de manera consecutiva la cuña en la misma posición.

### *Tipos de Anillos*

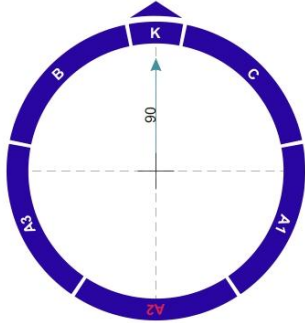
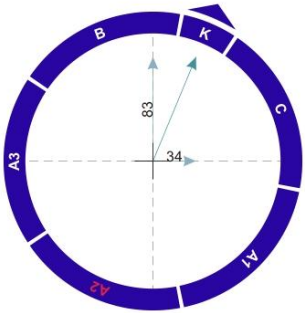
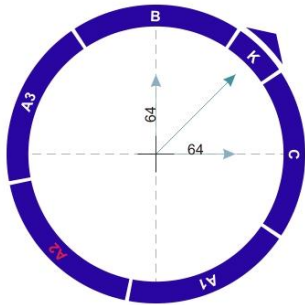
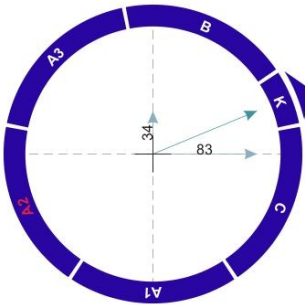
- 6.9 Todos los anillos tienen la misma configuración de armado, el tipo de anillo lo define la posición en la que se coloca la cuña. La posición de la cuña siempre coincide con algún par de cilindros de propulsión, con lo que, del mismo modo que los cilindros de propulsión la cuña se puede ir girando a cada  $22.5^\circ$ .
- 6.10 Los tipos de anillo van desde el U01 hasta el U16, para el tipo U01 la cuña va apoyada en par de cilindros número 1, para el U02 la cuña va apoyada en el par número 2 y así del mismo modo para los demás tipos.



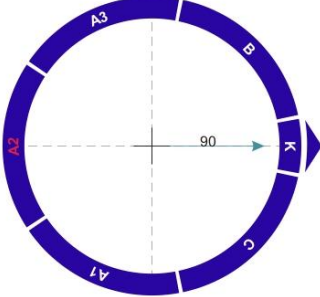
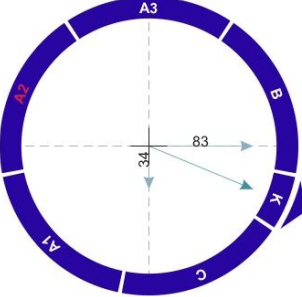
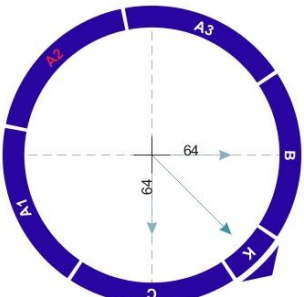
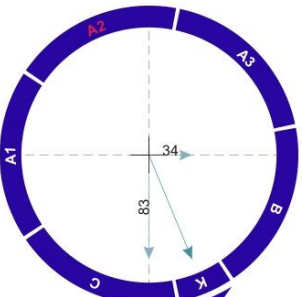
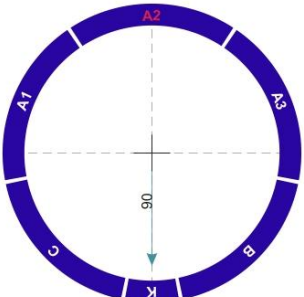
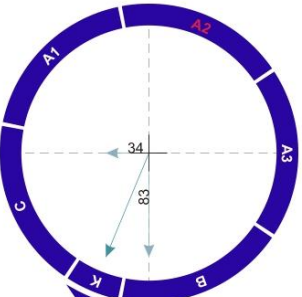
## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 6.11 La forma troncocónica de los anillos hace que varíe el plano dirección (plano del anillo) con cada tipo de anillo lo que permite el trazado de curvas y rectas variando la posición de la cuña.

**TABLA 6.1 TABLA DE DESVIACIONES DEL PLANO SEGÚN EL TIPO DE ANILLO QUE SE SELECCIONE**

Tipo de Anillo			
U01		U02	
			
DH = 0 mm	DV = 90 mm	DH = 34 mm	DV = 83 mm
U03		U04	
			
DH = 64 mm	DV = 64 mm	DH = 83 mm	DV = 34 mm

## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

U05		U06	
			
DH = 90 mm	DV = 0 mm	DH = 83 mm	DV = -34 mm
U07		U08	
			
DH = 64 mm	DV = -64 mm	DH = 34 mm	DV = -83 mm
U09		U10	
			
DH = 0 mm	DV = -90 mm	DH = -34 mm	DV = -83 mm





## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

U11		U12	
DH = -64 mm	DV = -64 mm	DH = -83 mm	DV = -34 mm
U13		U14	
DH = -90 mm	DV = 0 mm	DH = -83 mm	DV = 34 mm
U15		U16	
DH = -64 mm	DV = 64 mm	DH = -34 mm	DV = 83 mm

### Fabricación de Dovelas

- 6.12 Actualmente la fabricación de dovelas se realiza en serie mediante un proceso cíclico y controlado que garantiza la calidad de los elementos prefabricados.
- 6.13 Las dovelas para los anillos de revestimiento del túnel se fabrican juegos de moldes metálicos móviles de tipo universal, que se desplazan cíclicamente, sobre un juego de vías tipo carrusel, por toda la planta.
- 6.14 La fabricación de dovelas se realiza mediante un proceso cíclico que se repite una y otra vez durante la jornada como se describe a continuación:
- i) Limpieza y aceitado del molde para evitar la adherencia del concreto
  - ii) Con ayuda de una grúa viajera se coloca la armadura del acero de refuerzo y después se colocan los insertos, antes de pasar a la siguiente etapa se realiza una verificación del molde.
  - iii) Colocación del Concreto
  - iv) Vibrado del concreto para que se reparta la mezcla en todo el molde
  - v) Pulido y Acabado de la Pieza
  - vi) Etapa de curado a vapor
  - vii) Desmolde
  - viii) Volteo de la Pieza
  - ix) Almacenaje
- 6.15 En la siguiente figura se ilustra el ciclo de fabricación de dovelas:



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

- 6.16 El ciclo de fabricación de un anillo tiene una duración de 7 horas aproximadamente y en plantas modernas se pueden llegar a fabricar hasta 28 anillos completos por cada 24 horas de operación de una línea de trabajo.
- 6.17 Los anillos de dovelas que se utilizaron como revestimiento primario para el Túnel en el Valle de Chalco estaban compuestos por 6 piezas de prefabricado de concreto. En la siguientes figuras se muestra la forma de cada una de las dovelas y vista tridimensional de un anillo armado.

TABLA 6.2 PLANTA DE GENERAL DE CADA UNA DE LAS DOVELAS

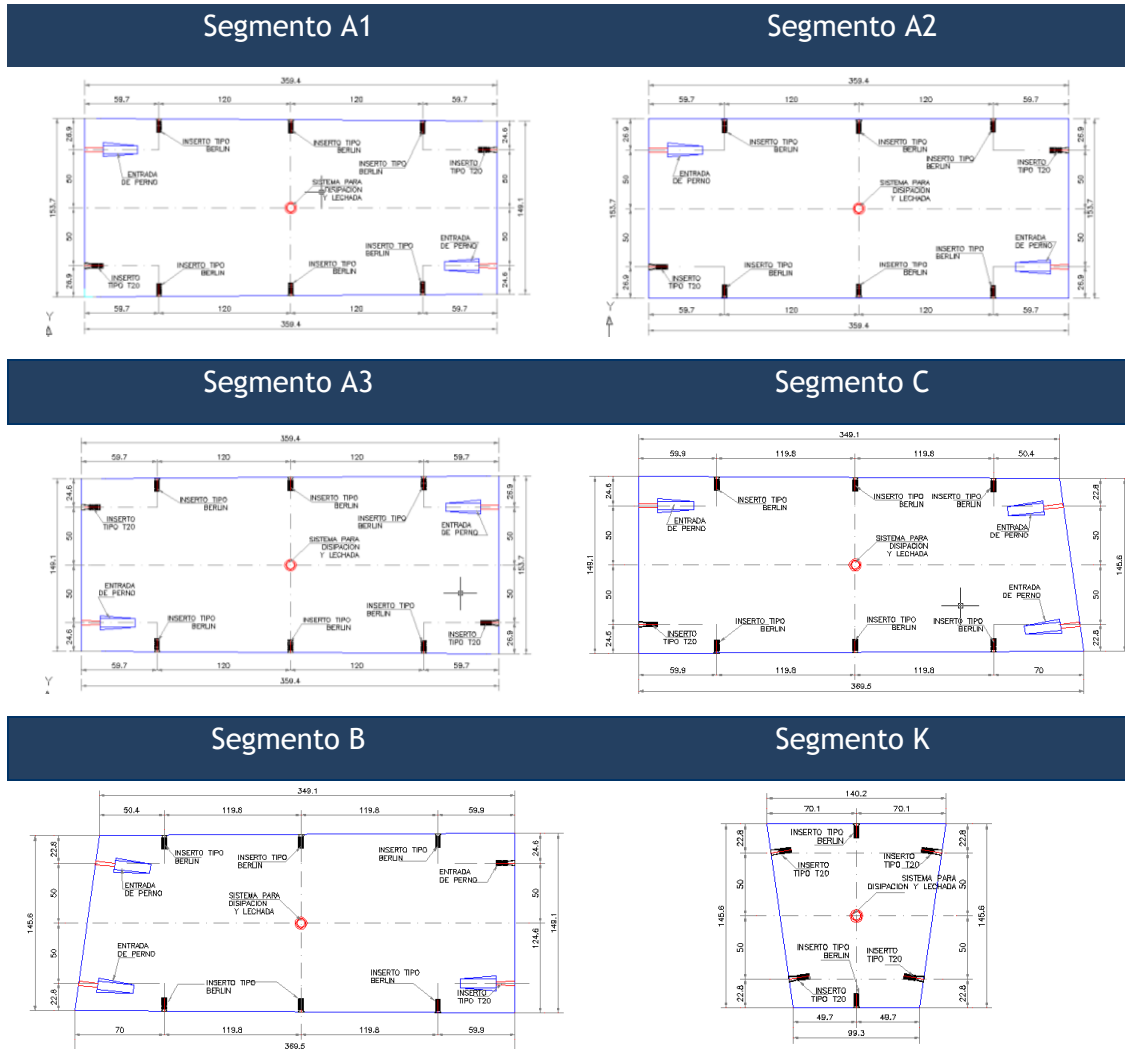
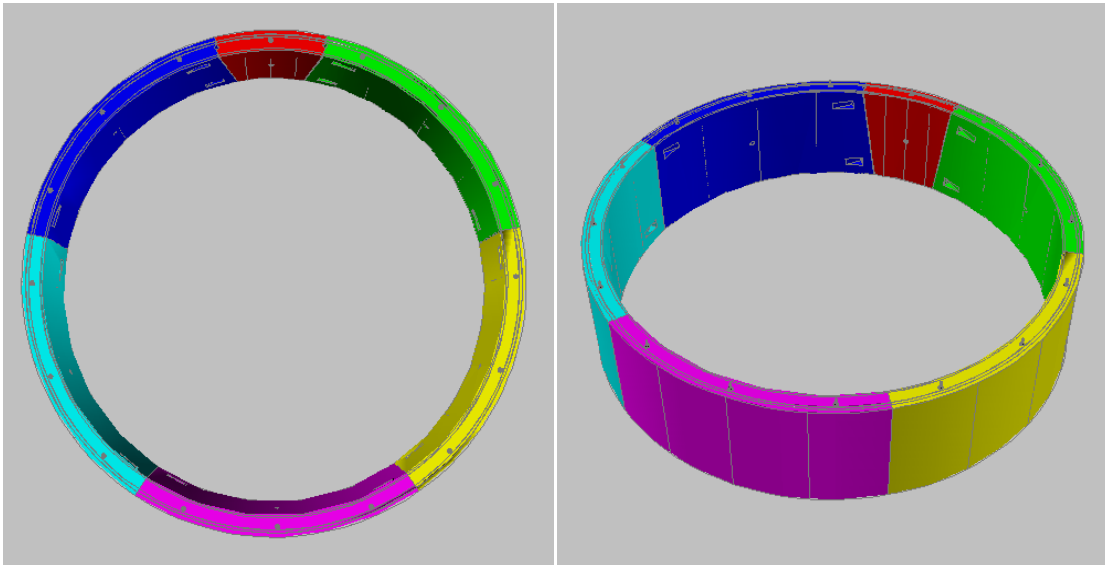


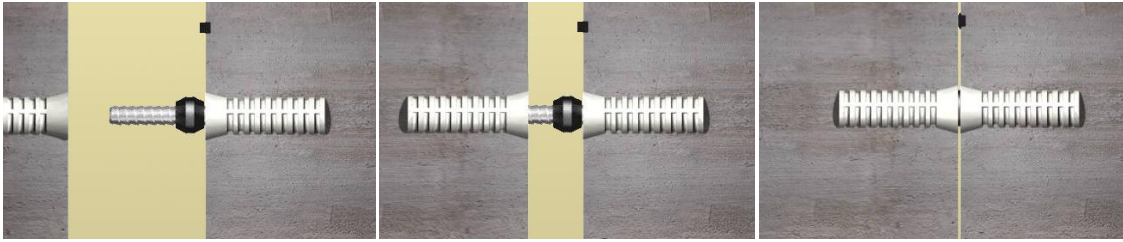
FIGURA 6.1 PROYECCION TRIDIMENCIONAL DE UN ANILLO DE DOVELAS ARMADO



### Sistema de Unión entre Dovelas

- 6.18 Durante la construcción de un túnel se realizan dos diferentes tipos de unión entre dovelas:
- De dovela a dovela
  - Entre anillos
- 6.19 La unión entre dovelas es necesaria para evitar que el anillo pierda su forma mientras se va armado y cuando es sometido a la fuerza generada por el empuje de la tuneladora.
- 6.20 La unión entre anillos se realiza para ligar de manera permanente todos los anillos del túnel y limitar los desplazamientos horizontales de los mismos durante la construcción y la vida útil del proyecto.
- 6.21 En un principio todas las uniones se realizaban mediante tornillos y tuercas convencionales que iban entra cajas de acero sujetas con el acero de refuerzo de las dovelas.
- 6.22 Actualmente las dovelas se unen entre sí mediante tornillos que van a insertos plásticos colocados en la dovela contigua. Los insertos plásticos ahogados en el concreto evitan el uso de tuercas y agilizan el armado de los anillos.
- 6.23 Para las uniones entre anillos también se utilizan insertos plásticos colocados en las dovelas durante su fabricación pero en este caso se han desarrollado dos tipos de uniones diferentes. El primer tipo de unión se da mediante tornillos que van a insertos del mismo modo que para la unión entre dovelas y el segundo mediante tornillos bicéfalo que van de inserto a inserto unidos por presión sin necesidad de atornillar (unión tipo Berlín).

FIGURA 6.2 UNION MEDIANTE TORNILLO TIPO BERLIN



- 6.24 El interior de los insertos utilizados para la unión entre dovelas tiene la forma de la cuerda del tornillo de unión mientras que los insertos para la unión tipo Berlín son lisos y de un diámetro menor al del tornillo bicéfalo para que al momento de ejercer presión funcione como un “check” y no permita que se libere nuevamente.
- 6.25 La utilización de sistemas de unión tipo Berlín incrementa ligeramente el costo de la fabricación de las dovelas ya que es necesario utilizar un inserto más por cada punto de unión pero reduce el tiempo de armado de los anillos con lo que se incrementan los rendimientos de excavación.

## 7. La Importancia de un Sistema de Guiado en la Excavación de Túneles

- 7.1 Dese tiempos remotos el trazado preciso de los túneles ha sido uno de los puntos determinantes del éxito o fracaso de este tipo de proyectos, es por esto, que los equipos de topografía juegan un papel muy importante en la construcción de cualquier tipo de túnel.
- 7.2 Cuando uno se encuentra en el proceso de excavación de un túnel es difícil determinar la dirección a la que se dirige pues, además de no poder ver el frente, todo se ve igual, entonces si uno cree que va perfectamente en línea recta posiblemente puede tener desviaciones menores en cualquier dirección que al acumularse con la longitud del túnel de se pueden convertir varios metros de diferencia en los puntos de llegada.
- 7.3 Las desviaciones del túnel tienen muchas implicaciones y conllevan muchos problemas como los siguientes por mencionar algunos.
- **Puntos de Llegada:** si el escudo no llega en la posición que se quiere se deberán cambiar los procedimientos, ajustar las estructuras en la llegada o en alguno casos incluso suspender la llegada a un punto determinado o incluso la suspensión definitiva de la excavación
  - **Daño a estructuras aledañas:** En situaciones en las que el túnel pasa cercano a estructuras profundas, otros túneles, cimentaciones o instalaciones se pueden dañar dichos elementos u obligar a la suspensión de la excavación por no tener por donde continuar con el túnel.
  - **Función del túnel:** Si no se respetan los radios de giro o las pendientes las instalaciones los proyectos para las instalaciones en el interior del túnel se deben de ajustar y en casos de túneles para conducción de agua la capacidad se ve afectada.
- 7.4 En general los descuidos en la dirección son costos en cuestión de tiempo y dinero por todas las posibles situaciones que se acaban de describir por esto durante la excavación es muy importante contar con un buen sistema de guiado y mantener un control estricto de las mediciones topográficas.

### Diferentes Sistemas de Guiado en la Excavación de Túneles

- 7.5 En el pasado la dirección de la excavación la dictaban los topógrafos provistos en el mejor de los casos con teodolitos simples y utilizando sistemas muy rudimentarios, las correcciones en la dirección no se realizaban de manera continua pues era muy difícil realizar los trabajos de medición con toda la actividad que se lleva a cabo en el interior del túnel.
- 7.6 El sistema en general consistía en el llevar el trazo del túnel desde el acceso del mismo hasta el frente de la excavación. Entre mayores eran las distancias dentro del túnel y más compleja la geometría del trazado se incrementaban la posibilidades de



## Excavación de Túneles en Suelos Blandos

cometer errores importantes. Con el tiempo la tecnología avanzó para proveer a los topógrafos de equipos más precisos con los cuales, si se lleva un buen control, se reducen significativamente los errores pero los sistemas no cambiaron mucho desde entonces.

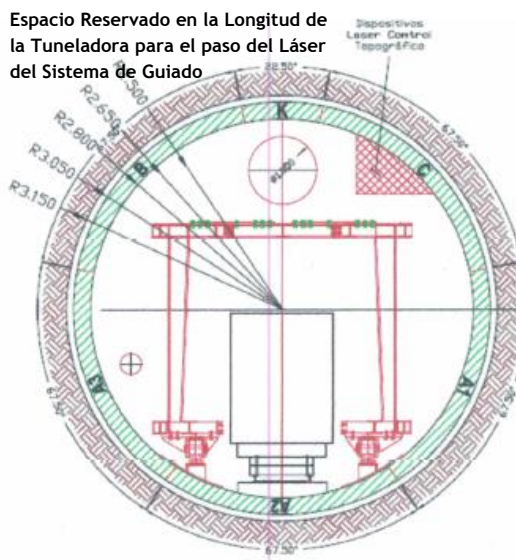
- 7.7 Cuando se introdujeron las tuneladoras el incremento considerable en los rendimientos de excavación obligaron realizar verificaciones de la posición y dirección con mayor frecuencia para mantener el túnel de acuerdo al trazado del proyecto. El sistema continuó siendo básicamente el mismo utilizando cuadrillas de topografía más numerosas para poder realizar verificaciones de la posición y la dirección del escudo con mayor frecuencia.
- 7.8 Actualmente los sistemas de guiado permiten a los operadores de las tuneladoras conocer con precisión la posición y dirección del escudo de manera precisa, en tiempo real y reducen la carga de trabajo para los equipos de topografía.

### Descripción del Sistema Utilizado en la Excavación del Túnel en Chalco

- 7.9 El sistema de guiado seleccionado para la tuneladora que se utilizó en la excavación del túnel del Valle de Chalco fue diseñado en Alemania por una de las compañías con mayor experiencia y más innovadora en el desarrollo de este tipo de sistemas.
- 7.10 Los componentes principales del sistema de guiado son:
- Estación total de medición topográfica con emisor láser.
  - Unidad Automática de Tarjeta de Láser (ALTU)
  - Computadora con el Software de control del Sistema de Guiado
  - Equipos de control remoto para la comunicación de la computadora del Sistema de Guiado con la estación total.

### Funcionamiento General

- 7.11 Los componentes del sistema se montan en posición y se verifica que haya completa visibilidad entre la estación total y la tarjeta láser.
- 7.12 El software del sistema de guiado se alimenta con el trazado del túnel las coordenadas de la estación total montada en la base metálica y las coordenadas de prisma con el que se verifica la alineación de la estación.
- 7.13 La estación total con emisor laser colocada en su posición según el proyecto se encarga de guiar a la tuneladora emitiendo un rayo hacia la unidad automática de laser que envía



información a la cabina con la posición horizontal, vertical, inclinación y giro.

7.14 El sistema se encarga de verifica constantemente que la alineación de la estación total se mantenga dentro de las tolerancias para que la trayectoria que registra el sistema sea real, en caso de que la alineación salga de las tolerancias informa tanto a los pilotos como a las cuadrillas de topografía para que verifiquen la alineación lo antes posible.

7.15 En la siguiente figura se muestra una imagen de la pantalla del sistema de guiado y se explica la información que muestra en cada uno de los campos.

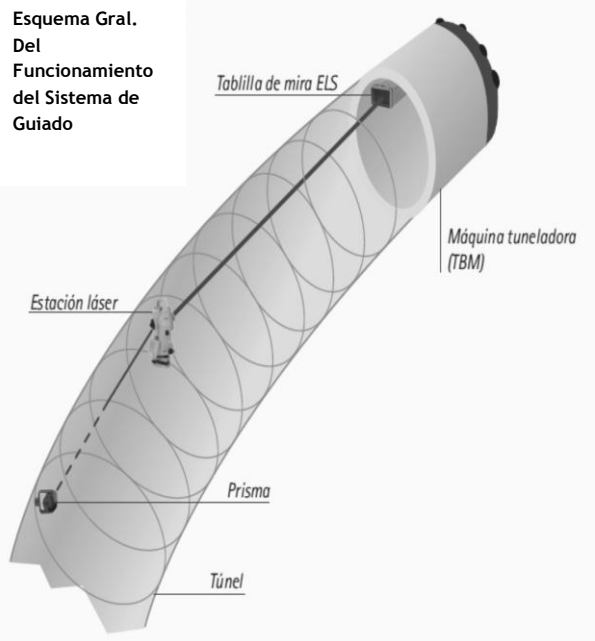
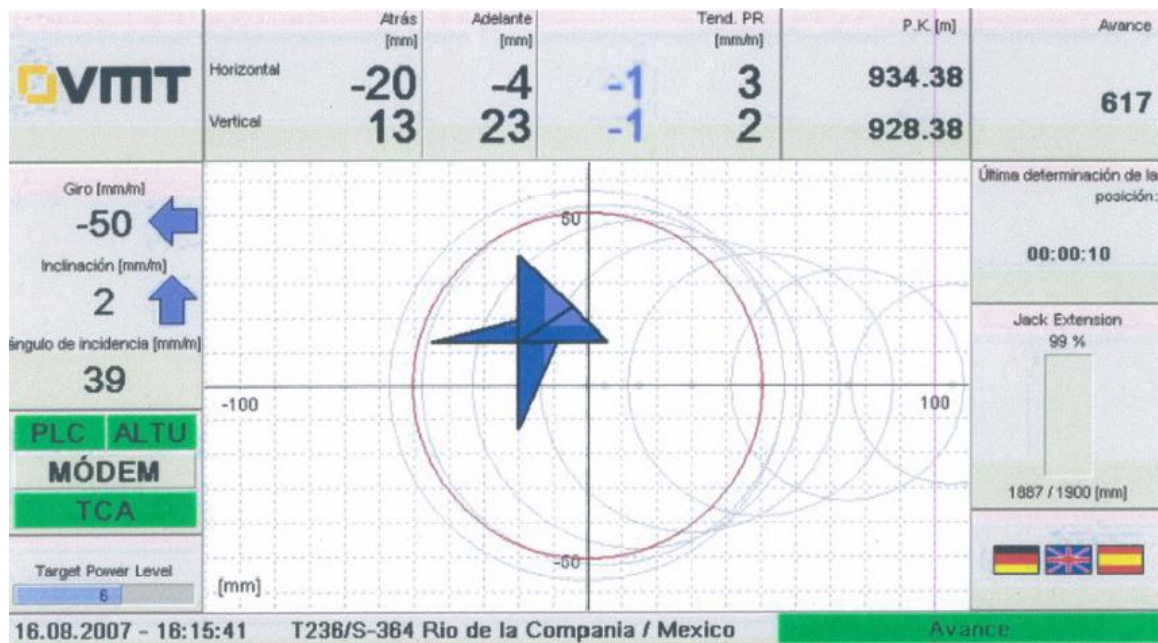
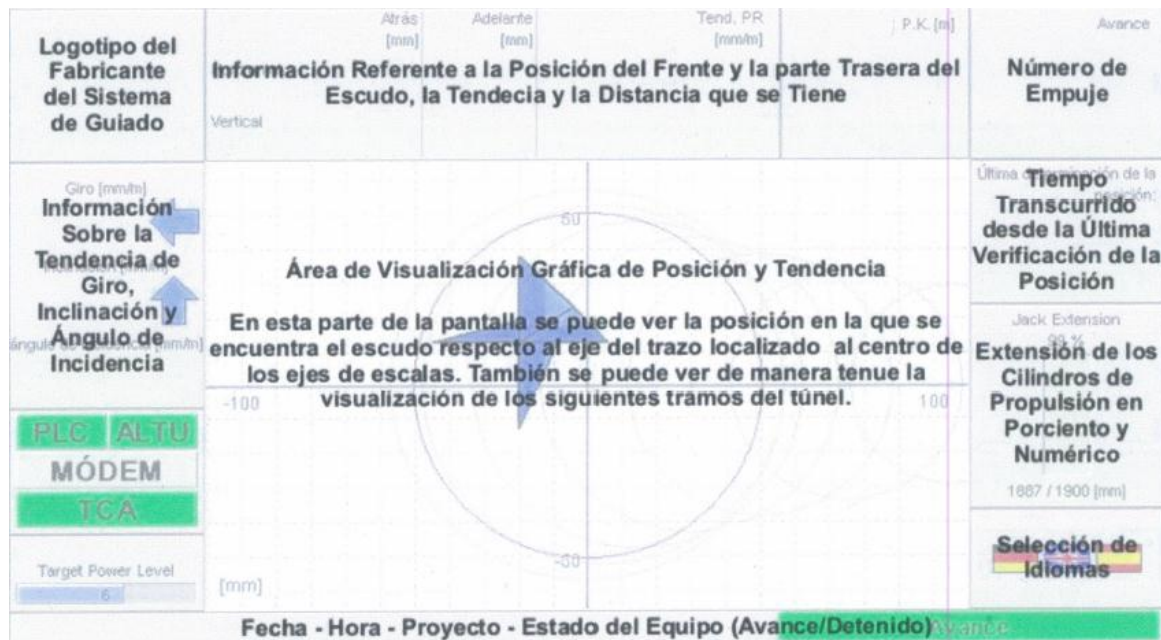


FIGURA 7.1 PANTALLA DEL SISTEMA DE GUIADO Y DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MISMA.



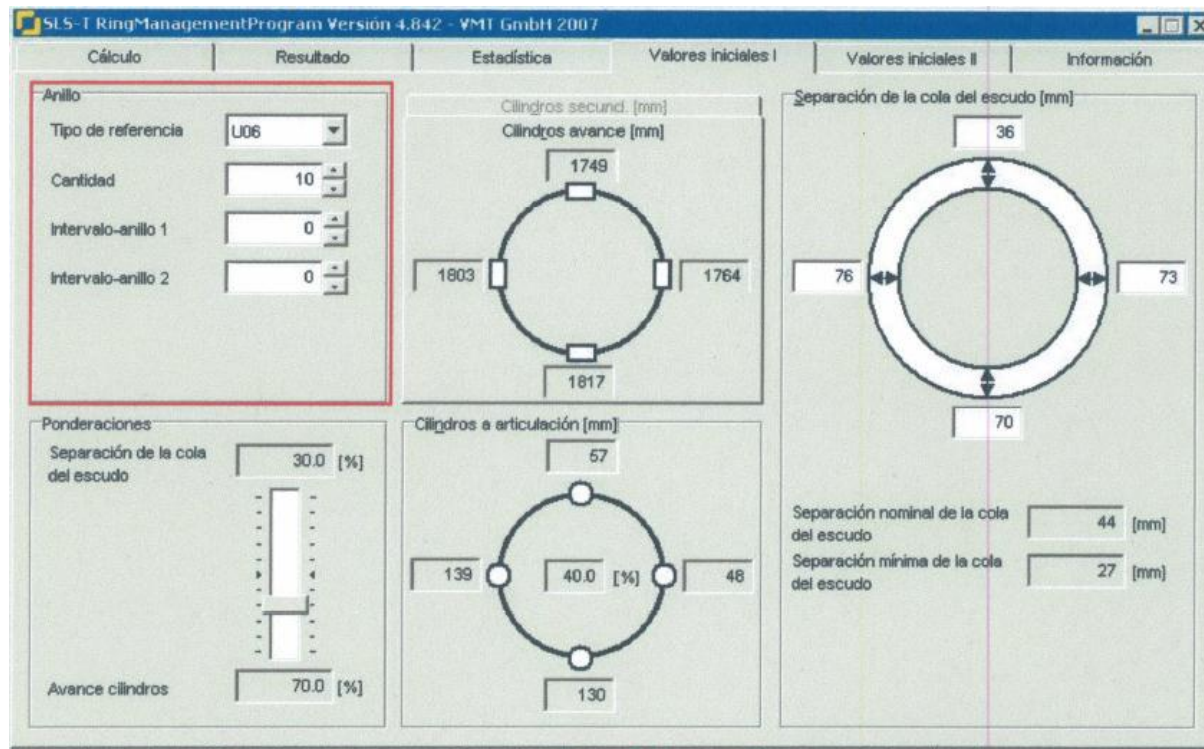


## Excavación de Túneles en Suelos Blandos



- 7.16 Además de guiar la excavación el sistema de guiado también selecciona el tipo de anillo más adecuado para armar en cada empuje en función de la posición, la dirección a la que se quiere ir y el espacio anular que existe entre el último anillo construido y el faldón del escudo.

FIGURA 7.2 PANTALLA DE CONSTRUCCIÓN DE ANILLO



- 7.17 La pantalla que se muestra en la figura anterior corresponde a la pantalla de construcción de anillos en la que el operador del escudo únicamente introduce la separación de la cola del escudo contra el último anillo armado para seleccionar la configuración de anillo más adecuada para mantener el trazado del túnel lo más apegado posible a lo proyectado.
- 7.18 La selección de anillo recomendada por el sistema se muestra en la señalada en el recuadro rojo. En la pantalla también se muestra la extensión de los cilindros de empuje (plano de empuje) y los de la articulación.
- 7.19 La selección de los anillos se encuentra limitada por la condición de que no deben coincidir las juntas entre dovelas pues representan puntos de debilidad para los sellos alrededor de las dovelas.
- 7.20 En la siguiente tabla se muestra las sucesiones permitidas de anillos en función de la coincidencia de juntas.

**TABLA 7.1 TABLA DE SECUENCIA PERMITIDA Y NO PERMITIDA DE ANILLOS EN EL TÚNEL DEL VALLE DE CHALCO.**

Tipo	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
01	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S
02	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S
03	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N
04	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S
05	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S
06	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N
07	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S	N
08	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N	S
09	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	N
10	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N
11	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S	S
12	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N	S
13	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S	N
14	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S	S
15	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N	S
16	S	S	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S	N	S	S	N
	Permitido								No Permitido							



### 8. Conclusiones

- 8.1 Las condiciones de la cuenca del Valle de México donde se estableció la Ciudad de México propician la inundaciones por la dificultad que existe para el desalojo de aguas pluviales y residuales.
- 8.2 El crecimiento de la población y los asentamientos en zonas de inundación implican una cada vez mayor inversión en proyectos de drenaje y protección para la población.
- 8.3 Los grandes proyectos de Infraestructura encaminados a disminuir los riesgos de inundaciones son prioridad para poder garantizar la seguridad de la población y las actividades económicas en la zona metropolitana.
- 8.4 El proyecto del Valle de Chalco tiene como objetivo principal la protección de la población en riesgo de inundación por el desbordamiento o fallo del Canal de la Compañía.
- 8.5 La principal ventaja de la construcción de túneles profundos en lugar de canales es que estos, a pesar de ser más costos, brindan una solución a largo plazo al estar menos expuestos a los fenómenos de hundimiento que afectan a la zona metropolitana y por esto mantener mejores condiciones de servicio durante mayor tiempo.
- 8.6 Las nuevas tecnologías aplicadas para al excavación de túneles utilizando tuneladoras permiten la creación de nueva infraestructura para diferentes usos con muy poca afectación en las zonas superiores al trazo del proyecto como en el caso del túnel de Chalco en el que se logro llevar a cabo la obra sin obstruir o dañar la Autopista México-Puebla y sin afectar el funcionamiento normal del canal de drenaje existente.
- 8.7 Por el motivo antes expuesto, la utilización de tuneladoras para la construcción de todo tipo de túneles será mayor tanto para grandes profundidades donde la utilización de esta tecnología es casi indispensable como en las zonas urbanas incluso para profundidades menores donde se pueden utilizar otros métodos constructivos.
- 8.8 El túnel del caso de estudio fue construido utilizando escudos ya que era la única forma de construir el túnel debido a las condiciones geológicas, la profundidad y la necesidad de continuar operando el canal existente durante su construcción.
- 8.9 La construcción del túnel de Chalco se retrasó por diversos motivos de los cuales muy pocos podían ser adjudicados al funcionamiento del equipo o al proceso constructivo.
- 8.10 Durante la excavación del último tramo del túnel se rompieron las marcas de velocidad de avance tanto diarias, semanales y mensuales del proyecto y se logró superar el mayor registro histórico de avance en túneles de este tipo en la constructora. Estos logro se dieron gracias a las especialización del personal y la mayor eficacia de la operativa tanto del equipo como del personal sin descuidar nunca la seguridad y la calidad.

- 8.11 En general se observa que el incremento excesivo de la velocidad de avance repercute en la seguridad y la calidad de construcción por lo que en este tipo de proyecto es preferible mantener velocidades menores que garanticen la operación segura de la máquina y que permita que las actividades paralelas necesarias para el avance del equipo y la construcción se den de manera segura y con la calidad especificada.
- 8.12 En esta tesis se expusieron los conceptos principales y los procedimientos constructivos generales que se utilizaron para poder llevar a cabo la construcción del Túnel en el Valle de Chalco.
- 8.13 En el área constructiva muy buena parte de los conocimientos necesarios para ejecutar, gestionar y proyectar una obra son difíciles de adquirir únicamente en las aulas o leyendo libros relacionados con el tema, el conocimiento base se adquiere mediante estos medios pero el conocimiento y entendimiento profundo del cómo se hacen las cosas se adquiere solo se puede adquirir mediante la experiencia.
- 8.14 En ese orden, las primeras partes de esta tesis contienen información documental recabada de distintas fuentes documentales que proporcionan las bases para el entendimiento de qué es un túnel y los conceptos del funcionamiento de los equipos, mientras que, los capítulos finales describen los procesos, actividades y recomendaciones aprendidas en campo durante la construcción del túnel.