



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO PARA LA CONSTRUCCIÓN
DEL TUNEL EMISOR ORIENTE EN EL VALLE DE MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A:

ANTONIO RÍOS MANRIQUE



TUTOR:

M.I. SALVADOR DÍAZ DÍAZ

2009

JURADO ASIGNADO

Presidente. M. en I. Agustín Demeneghi Colina
Secretario. M. en I. Miguel Angel Rodriguez Vega
Vocal. M. en I. Salvador Díaz Díaz
1^{er} suplente. M. en I. Marco Tulio Mendoza Rosas
2^{do} suplente. M. en I. Jaime Antonio Martinez Mier

México D.F.

Ciudad Universitaria

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. SALVADOR DÍAZ DÍAZ

A mi familia, que me ha dado su apoyo incondicional, que siempre ha caminado conmigo en los caminos más sinuosos, espero que este triunfo lo sientan como suyo y que toda la vida caminemos juntos; a Tere y a Victor mis padres y a mi querida hermana Arieti.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor M.I. Salvador Díaz Díaz por confiar en mí y apoyarme en este proyecto.

A la UNAM por formarme y dejarme ser parte de ella.

A la División de Ingeniería Civil y Geomática por darme las herramientas para triunfar y sobresalir en el ámbito profesional y por dejarme cosechar grandes amistades.

Al CONACYT por otorgarme el apoyo económico durante mis estudios de posgrado.

A mi Padre y a mi Madre porque me han dado toda su vida y siempre han estado para mí y porque son mi satisfacción más grande, los amo.

A mi Mana Ari por compartir los mejores momentos a mi lado y porque su superación personal me inspiro a querer ser como ella, eres grande mana estoy orgulloso de ti.

A mi novia Berenice, porque cada día a su lado me llena de vida y por toda la ayuda que me brindo durante mis estudios y trámites de titulación. Te amo y espero pasar mi vida junto a ti.

A mis amigos: Solar, Alejandro, Alex, Edmundo porque los considero mis hermanos y compartí con ustedes los momentos más gratos de mi vida, espero que siempre sigamos apoyándonos.

Al Ing. Ricardo Iñigo, porque me brindo su apoyo cuando más lo necesité y contribuyó en la elaboración de este trabajo de tesis.

A TODOS GRACIAS..... TOTALES

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	2
Hipótesis	3
Objetivo	3
Alcances	4
Contenido de la tesis	4
1. GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
1.1 Localización	6
1.2 Topografía	7
1.3 Geología de la zona	8
1.4 Estudio geotécnico	10
1.5 Ingeniería básica	11
1.6 Metas físicas	12
1.7 Impacto ambiental	12
2. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS	
2.1 Descripción general del proyecto	15
2.2 Modalidad de contratación	17
2.2.1 Consorcio formado para la construcción de la obra	18
2.3 Programa general de la obra	19
2.3.1 Actividades críticas	19
2.4 Inversión y beneficios esperados	21
2.5 Criterios de diseño	24
2.6 Normas aplicables	28
3- PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	
3.1 Lumbreras	29
3.2 Túnel	33
3.2.1 Fabricación de dovelas	35
3.2.2 Formación de anillos de dovelas	39
3.3 Revestimiento definitivo del túnel	40

4.- PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO

4.1 Fundamentos	43
4.1.1 Marco geohidrológico y profundidad del nivel estático	45
4.1.2 Comportamiento general de los suelos	48
4.1.3 Efectos sísmicos sobre estructuras subterráneas	51
4.2 Máquina excavadora de túneles	52
4.2.1 Evolución histórica	53
4.3 Equipo para la construcción de túneles	59
Escudo EPB	60
Escudo Mixshield	66
Escudo para roca dura	67
Doble escudo	68
Topos	69
4.4 Escudo EPB (Earth Pressure Balance)	74
4.4.1 Componentes del escudo EPB	79
4.5 Rendimientos esperados	91
4.6 Trabajos preliminares	92
4.7 Extracción, bajada y giro del escudo	101
4.8 Excavación del túnel	105
4.8.1 Procedimiento de construcción	109
CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	117

INTRODUCCIÓN.

Debido a la insuficiencia del drenaje profundo de la Ciudad de México y la falta de un sistema alternativo, ante condiciones de precipitaciones extraordinarias, el riesgo de inundaciones severas en el Valle de México es inminente y una catástrofe de magnitudes inconmensurables resultaría inevitable si no se llevan a cabo acciones oportunas de mitigación y las obras que se describen de forma general en este documento.

A pesar de que puede ser reparado estructuralmente, la capacidad hidráulica del Emisor Central no puede ser restablecida a su condición original, mucho menos puede ser ampliada. El sistema de Drenaje Profundo requiere de un sistema alternativo que permita una operación confiable a través de un mantenimiento regular que elimine definitivamente cualquier riesgo de inundación catastrófica, no sólo durante los años en que el Emisor Central se encuentre en mantenimiento, sino de forma permanente.

Se requiere incrementar sustancialmente la capacidad de drenaje general, para satisfacer las condiciones actuales que han generado el crecimiento urbano y su demanda creciente del consumo de agua, con la propuesta siguiente:

La construcción del Emisor Oriente como drenaje alternativo al Emisor Central, además de ampliar la capacidad de desagüe del Valle de México, permitirá realizar los trabajos de mantenimiento necesarios en ambos drenajes, para una adecuada operación del sistema.

Antecedentes.

La Cuenca del Valle de México se encuentra cerrada por una cadena volcánica que da origen a la sierra de Chichinautzin. Este conjunto montañoso interrumpe el drenaje natural del valle, y le da origen a la vocación de lago a toda la región del Distrito Federal y su área metropolitana.

Esta condición ha sido la causa de innumerables inundaciones desde tiempos precolombinos; en 1900 se inauguró una de las salidas artificiales, constituida por el Gran Canal de Desagüe, con una longitud de 47.5 km, así como el 1er Túnel de Tequisquiac de 10 km de longitud.

Desde el año de 1930 la Ciudad de México ha crecido exponencialmente. La insuficiencia de los manantiales existentes y su contaminación, demandó la perforación de pozos para la obtención de agua, lo que, a su vez, ocasionó los asentamientos regionales que afectan fundamentalmente a los suelos arcillosos del Valle.

La función entre la creciente extracción de agua mediante la perforación de pozos y el hundimiento regional del Valle, ha causado la pérdida de pendiente hidráulica del Gran Canal de Desagüe y por tanto, la disminución significativa en la capacidad de desalojo de las aguas de la Ciudad de México.

Por las repetidas inundaciones y con objeto de aliviar los constantes problemas causados por las precipitaciones pluviales, de 1967 a 1975 se construyó el Túnel Emisor Central como obra principal de Sistema de Drenaje Profundo, el cual constituye una de las tres salidas artificiales del Valle, las otras dos son el Gran Canal del Desagüe cuyo componente final son los túneles de Tequisquiac y el Tajo de Nochistongo.

El Emisor Central, es prácticamente el único conducto principal por el que pueden salir las aguas del Valle de México, ya que el histórico Gran Canal del Desagüe, anteriormente responsable de tal tarea, ha perdido pendiente hidráulica, por causa del hundimiento regional que aqueja a la Ciudad de México, y con ello buena parte de su capacidad de desalojo.

Hipótesis.

La construcción del Túnel Emisor Oriente en la cuenca del Valle de México pretende dar el apoyo necesario para el desalojo de las aguas residuales y del agua pluvial de la Ciudad de México, evitando inundaciones futuras de resultados catastróficos.

Esta nueva obra del drenaje profundo, busca restaurar las condiciones de pendiente en el sistema y dar las condiciones óptimas para el correcto desalojo del afluente residual y pluvial.

El proceso de excavación con escudo permite la construcción del túnel sin producir asentamientos en la superficie del terreno ni daños a edificaciones y estructuras superficiales o subterráneas.

El empuje total de la máquina debe ser capaz de absorber los empujes del terreno en el frente del túnel, además de absorber los rozamientos entre escudo y suelo y entre escudo y dovelas, sin permitir deformaciones.

La disposición de seis distintos frentes de trabajo conduce a tiempos reducidos de construcción y rendimientos apropiados para el avance esperado en el túnel.

Objetivo.

Redactar una referencia de consulta que contenga toda la información necesaria acerca de los procesos de excavación mecánica en el Túnel Emisor Oriente, el cual tiene por objetivo, reforzar el sistema principal de drenaje actual y disminuir el riesgo de falla en la Zona Metropolitana del Valle de México, que podría tener como consecuencia la generación de inundaciones en parte del Distrito Federal y del Estado de México. Asimismo, implementar un procedimiento de mantenimiento que permita inspeccionar el drenaje sin que se interrumpa su operación.

Para lo anterior es necesario un proyecto ejecutivo que incluya planos, memorias, especificaciones, catálogos y todo lo necesario para la ejecución de la obra basado en la ingeniería básica existente y apegándose a la normativa vigente.

Alcances.

La finalidad del trabajo es presentar los principales conceptos y trabajos para la construcción del Túnel Emisor Oriente.

Asimismo los trabajos y procedimientos de excavación de éste, contemplar las especificaciones técnicas y conclusiones que llevan a la elección del equipo de excavación y exponer las nuevas tecnologías para estos procesos con equipos novedosos y calificados.

Contenido de la Tesis.

El contenido de esta tesis está compuesto por los siguientes temas:

- **CAPITULO 1.** La descripción general de los proyectos, localización de la obra y los estudios que conllevan la ingeniería básica, todo lo que se tiene que plantear antes de ejecutar los trabajos correspondientes, incluyendo el impacto ambiental que genera la obra.
- **CAPITULO 2.** Teniendo en cuenta las bases del proyecto, se indica la descripción de la obra, la cual explica el tipo de contrato y la modalidad de éste, el programa general de la obra y sus actividades críticas, la normativa que se debe seguir para aplicar los criterios de diseño, la inversión del proyecto y los beneficios esperados.
- **CAPITULO 3.** Después de tener la idea clara de la obra se explican los procesos constructivos básicos de las obras importantes como son lumbreras y

túnel, el proceso de fabricación de dovelas y la formación de anillos de revestimiento primario y todos los componentes del revestimiento definitivo.

- **CAPITULO 4.** En el último capítulo se explicarán los procedimientos constructivos para la excavación del túnel. Fundamentos, equipos para excavación de túneles y su evolución histórica, las diferencias entre cada equipo, escudos de excavación, sus componentes, rendimientos esperados del equipo y todo lo referente al proceso de excavación del túnel.



Figura 1 Conducción y pendientes para el desalojo de aguas residuales.

1.3 Geología de la zona

La Cuenca de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas, que se localiza en la parte centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana entre los meridianos 98° 15' - 99° 30' y los paralelos 19° 00' - 20° 15'. Mide en dirección norte-sur unos 90 km y en la dirección este-oeste la parte norte casi 100 km, mientras que la sur alcanza 50 km, con área de aproximadamente 9,600 km². La elevación de sus planicies es de 2240 m.s.n.m. en la parte sur y 2390 m.s.n.m. en la norte, la cuenca incluye al Distrito Federal y parte de los Estados de México, Hidalgo y Tlaxcala.

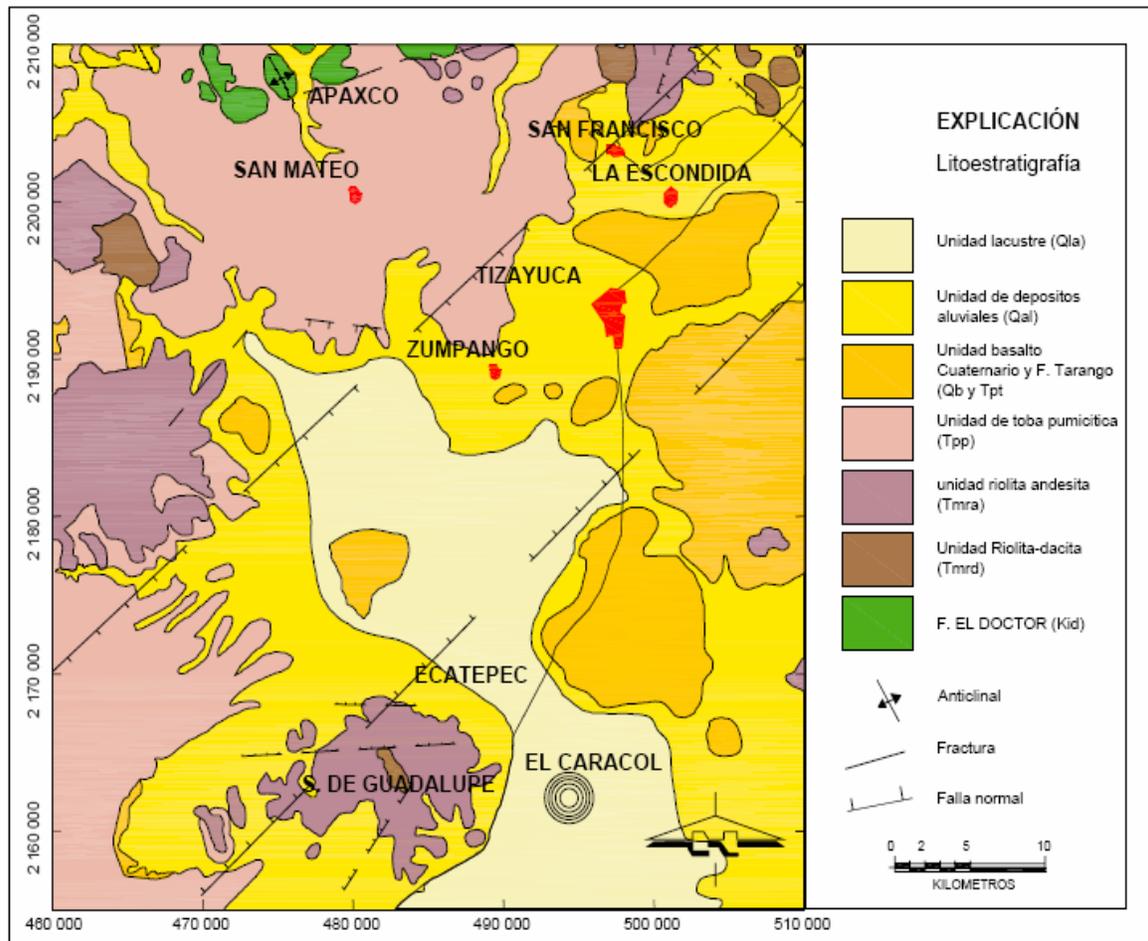


Figura 1.3.1 Geología Regional

La Cuenca de México se formó al cerrarse el antiguo Valle de México por el sur, como resultado de una intensa actividad volcánica, la cual dio origen a la sierra de Chichinautzin, con estructuras conformadas por rocas andesítico-basálticas.

El nuevo conjunto montañoso interrumpió el drenaje existente, debido a la acumulación de lavas y productos volcanoclásticos, que al alcanzar una altura considerable formaron una represa natural. Estas nuevas condiciones favorecieron la existencia de lagos y su posterior azolvamiento paulatino; de forma paralela tuvieron lugar eventos volcánicos cortos y locales. La sección geológica del túnel interpretada por la ingeniería básica, revela los paquetes que conforman la secuencia estratigráfica integrada por los depósitos ubicados en la tabla 1.3.1

Tipos de depósitos
Lacustres
Aluviales
Tobas, lavas y rocas volcánicas
Abanicos aluviales

Tabla 1.3.1 Secuencia estratigráfica integrada a lo largo del túnel

Con la finalidad de dar cumplimiento al Programa General de Obra, el Túnel Emisor Oriente se dividió en seis grandes tramos, los cuales se construirán de manera independiente, para lo cual se requerirán el mismo número de equipos para realizar su excavación. La obra estará conformada por las siguientes etapas o frentes de trabajo:

Frente de trabajo	Cadenamientos		Lumbrera		Longitud en metros
	Inicial	Final	Inicio	Final	
Tramo 1	0 - 017 al 10 + 040		De L-0 a L-5		10,058
Tramo 2	10 + 040 al 21+ 617		De L-5 a L-10		11,576
Tramo 3	21+617 al 30 + 566		De L-10 a L-13		8,948
Tramo 4	30 + 566 al 41 + 214		De L-13 a L-17		10,648
Tramo 5	40 + 214 al 49 + 573		De L-17 a L-20		8,359
Tramo 6	49 + 573 al 61 + 315		De L-20 al portal de salida		11,743

Tabla 1.3.2 Cadenamientos y longitud entre lumbreras.

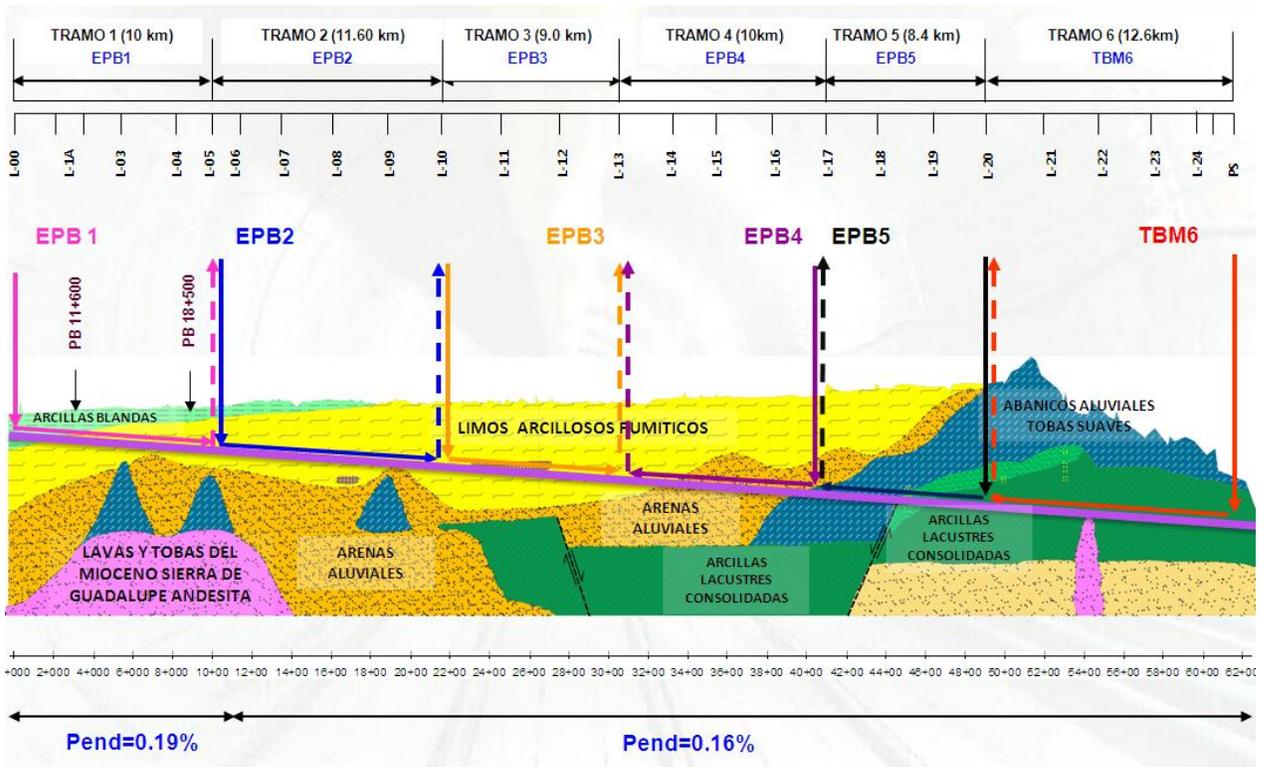


Figura 1.3.2 Perfil geológico

1.4 Estudio geotécnico

Debido a que durante la construcción del túnel y sus lumbreras se requiere conocer al detalle, verificar o corroborar las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del subsuelo, se realizarán estudios geotécnicos complementarios a los efectuados en la etapa de ingeniería básica, incluyendo pruebas de permeabilidad a lo largo del trazo de túnel y de transmisibilidad en las zonas cercana a la laguna de Zumpango o cuando el túnel se encuentre debajo de cauces superficiales.

En los estudios de mecánica de suelos efectuados durante la etapa de ingeniería básica, se definieron los siguientes tipos de materiales.

TIPO	I	II	III	IV
Descripción	<p>Blando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arcilla, • Arcilla-limosa, • Arcilla-arenosa • Intercalación de capas y lentes de arena y ceniza volcánica y lentes duros 	<p>Duro:</p> <p>Tobas poco cementadas;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limos-arcillosos, • Arenas-arcillosas, • Arenas-limosas • Limos-arenosos 	<p>Muy duro:</p> <p>Tobas empacadas con conglomerados y piroclastos;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limo arenoso muy cementados, • Arenas-arcillosas cementadas, • Arenas-limosas cementadas, • Arcilla.- gris verde muy dura 	<p>Rocas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Basalto • Basalto vesicular • Brecha volcánica • Toba cementada • Lahares

Tabla 1.4.1 Tipos de materiales encontrados a lo largo del túnel

1.5 Ingeniería básica

La ingeniería básica comprendió todos los estudios preliminares para la ejecución de los trabajos en el Túnel Emisor Oriente, como:

- Topografía
- Estudios geológicos
- Estudios geohidrológicos
- Estudios geotécnicos
- Estudios de factibilidad
- Diseños conceptuales de lumbreras
- Diseños conceptuales de túnel

1.6 Metas físicas

Construcción de un túnel con longitud aproximada de 62 km, 7 m de diámetro terminado, 24 lumbreras (incluida una existente), y capacidad de desalojo de hasta 150 m³/s, con periodo de ejecución de septiembre de 2008 a finales de septiembre de 2012.

Estructura	Metas 2007 - 2012					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Proyecto ejecutivo	-	10%	90%	-	-	-
Lumbreras	-	-	14	9	1	-
Excavación	-	-	3,135	30,453	23,717	4,511
Revestimiento	-	-	-	7,045	32,396	22,375

Estructura	Metas Trimestrales 2009			
	I	II	III	IV
Proyecto ejecutivo	30%	20%	25%	25%
Lumbreras	-	2	5	7
Excavación	-	-	-	3135

1.7 Impacto ambiental

Para la construcción del Túnel Emisor Oriente se debe considerar la normativa a lo que aspectos ambientales se refiere y apegarse a las leyes y disposiciones normativas vigentes aplicables en materia de impacto ambiental, como lo son:

- Ley General de Equilibrio Ecológico y su Reglamento
- Ley Forestal, en los ámbitos Municipal, Estatal y Federal

Asimismo las especificaciones que indique al respecto la CONAGUA.

Lo anterior es aplicable a todas las actividades derivadas de la construcción del túnel y lumbreras, para lo cual debe considerarse personal especialista en materia de impacto ambiental que vigilen el cumplimiento de la legislación vigente en materia de impacto ambiental y en general todas las acciones de prevención orientadas a la protección y conservación del medio ambiente en cada etapa de construcción del túnel.

Entre las actividades derivadas de la construcción del túnel y lumbreras se encuentra:

Lo relacionado al manejo de lodos procedentes de la excavación, los cuales deben transportarse a los bancos de tiro designados por la Dependencia para depositarlos de manera ordenada; además, considerar el mantenimiento y conservación continua de los caminos de acceso a los sitios de depósito final.

Asimismo, las acciones referentes a la conformación y protección del banco de tiro de materiales, construcción de los bordos y tinas de acuerdo a las indicaciones de la Dependencia.

El sitio de disposición final del agua extraída del túnel, los procedimientos para el transporte y control de material de excavación tanto sólidos como acuosos, el programa de riegos en los campamentos y caminos y rutas que sean utilizados, manteniéndose la humedad necesaria para evitar suspensión de partículas en el aire y dispersión de polvos a la atmósfera, los procedimientos para el depósito, conformación y protección del material en el banco de tiro, así como de las acciones de restitución del sitio al término de las actividades, el procedimiento para manejo de materiales y residuos peligrosos producto del mantenimiento del equipo y maquinaria, la instalación de almacenes temporales de materiales y residuos peligrosos, los suministros del mantenimiento de los escudos excavadores, los procedimientos para el manejo de residuos domésticos, cronograma de actividades y mantenimientos de

depósitos y materiales de apoyo, la preparación, instalación y mantenimiento de áreas de maniobras y ordenamiento de campamentos y oficinas, todas las medidas y acciones preventivas requeridas en los sitios de la elaboración de las dovelas.

Se deberá evitar cualquier riesgo potencial de contaminación del subsuelo o acuíferos en la zona de influencia de la obra. De encontrarse desperdicio de materiales procedente de la obra en el trayecto al tiro, será responsabilidad de la constructora el que sea retirado a la brevedad posible, y afrontará los costos y consecuencias que esto derive.

También deberá considerarse la limpieza frecuente de los sitios de construcción, un área de aproximadamente 100 m alrededor de los mismos y de las vialidades de circulación continua de sus vehículos de carga, para minimizar las molestias a la población.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

2.1 Descripción general del proyecto

Los estudios hidrológicos realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en los que se han incluido las aportaciones de los municipios del Estado de México, al norte de la Sierra de Guadalupe, arrojan un requerimiento de un conducto alterno de 7.0 m de diámetro, para garantizar una evacuación segura de las aguas pluviales y las aguas negras, considerando una tormenta de diseño de 50 años como periodo de retorno.

Bajo esta condición, la CONAGUA, determinó la necesidad de construir el Túnel Emisor Oriente, bajo las características de un drenaje que, en conjunto con el Emisor Central, satisfaga las necesidades de drenaje de la Ciudad.

El proyecto comprende la construcción del Túnel Emisor Oriente y sus obras auxiliares. Estos trabajos abarcan la construcción de 23 lumbreras, 18 con un diámetro de 12 m y 5 con diámetro de 16 m. Incluye la fabricación de 41,600 anillos de dovelas de 0.35 y 0.40 m de espesor, 1.50 m de ancho, 7.70 m de diámetro interior y 8.4 m de diámetro exterior. La longitud del túnel es de 61,700 m desde la lumbrera L-0 al portal de salida.

La excavación se realizará con escudos de frente presurizable del tipo EPB, de 8.70 m de diámetro exterior propiedad de CONAGUA. El revestimiento definitivo es de concreto armado de 0.35 m de espesor, de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, quedando un diámetro terminado del túnel de 7.00 m.

En su primer tramo, el trazo del Túnel Emisor Oriente corresponde al del Gran Canal del Desagüe; inicia en la Lumbrera 2 de Túnel Interceptor Río de los Remedios, que ha sido denominada "Lumbrera 0" del Túnel Emisor Oriente.

El trazo del túnel se mantiene paralelo y dentro del derecho de vía del Gran Canal del Desagüe, en una longitud aproximada de 31 km hasta las proximidades con la Laguna de Zumpango.

Posteriormente, el trazo continúa hacia el norte - poniente en los límites de la Laguna de Zumpango, para luego avanzar hacia el norte y descargar en la misma zona donde desemboca el Emisor Central. Su longitud total, es del orden de los 62 km.



Figura 2.1.1 Ubicación del trazo del Emisor Oriente

Deberán hacer los estudios geotécnicos complementarios, el diseño estructural de las lumbreras, de los anillos de dovelas y del revestimiento definitivo del túnel.

Los escudos tipo EPB fueron seleccionados con base en las condiciones del suelo y profundidades del túnel y de acuerdo a la geología determinada.

Estructura	Características
Longitud	62 km
Diámetro	7 m
Lumbreras	24
Capacidad de desalojo	150 m ³ /s

Tabla 2.1.1 Características del túnel

2.2 Modalidad de contratación

Modalidad del contrato: CONTRATO DE OBRA PÚBLICA Y TIEMPO DETERMINADO

Partes que celebran este contrato: EL EJECUTIVO FEDERAL A TRAVÉS DE LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, POR CONDUCTO DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, Y POR LA OTRA “**EL CONTRATISTA**”.

EL CONTRATO SE ADJUDICÓ A “**EL CONTRATISTA**” PARA LLEVAR A CABO LOS TRABAJOS A QUE SE DESTINA EL PRESUPUESTO AUTORIZADO, DE ACUERDO CON LOS ACTOS RELATIVOS AL PROCEDIMIENTO DE CONTRATACIÓN DE **ADJUDICACIÓN DIRECTA**.

El contrato tiene la modalidad de contrato mixto:

- Proyecto Ejecutivo del Túnel Emisor Oriente (PRECIO ALZADO)
- Construcción del Túnel Emisor Oriente (PRECIO UNITARIO)

Todas las actividades y documentos técnicos del proyecto ejecutivo (estudios, bases de diseño, anteproyecto, memorias descriptivas, memorias de cálculo, especificaciones generales, especificaciones particulares, procedimientos de construcción, planos constructivos y de detalle, catálogo de conceptos y cantidades de obra) se contratarán en la modalidad de precio alzado por lo que el Contratista debe entregar para revisión de CONAGUA la siguiente documentación:

1. Red de actividades calendarizada indicando las duraciones, o bien, la ruta crítica.
2. Cédula de avances y pagos programados, calendarizados y cuantificados por actividades a ejecutar, conforme a los periodos determinados por la convocante.
3. Programa de ejecución general de los trabajos conforme al presupuesto total con erogaciones, calendarizado y cuantificado.

2.2.1 Consorcio formado para la construcción de la obra

Lo que se refiere como "**EL CONTRATISTA**" es el consorcio conformado por 5 empresas de la manera siguiente.

- Ingenieros Civiles Asociados (ICA)
- Construcciones y Trituraciones (COTRISA)
- Lombardo Construcciones
- Grupo Estrella
- Carso Infraestructura y Construcción (CICSA)

Estas cinco empresas forman un consorcio con el nombre de "**Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea S.A. de C.V.**" COMISSA la cual MANIFIESTA SER UNA SOCIEDAD CONSTITUIDA CONFORME A LAS LEYES MEXICANAS.

2.3 Programa general de la obra

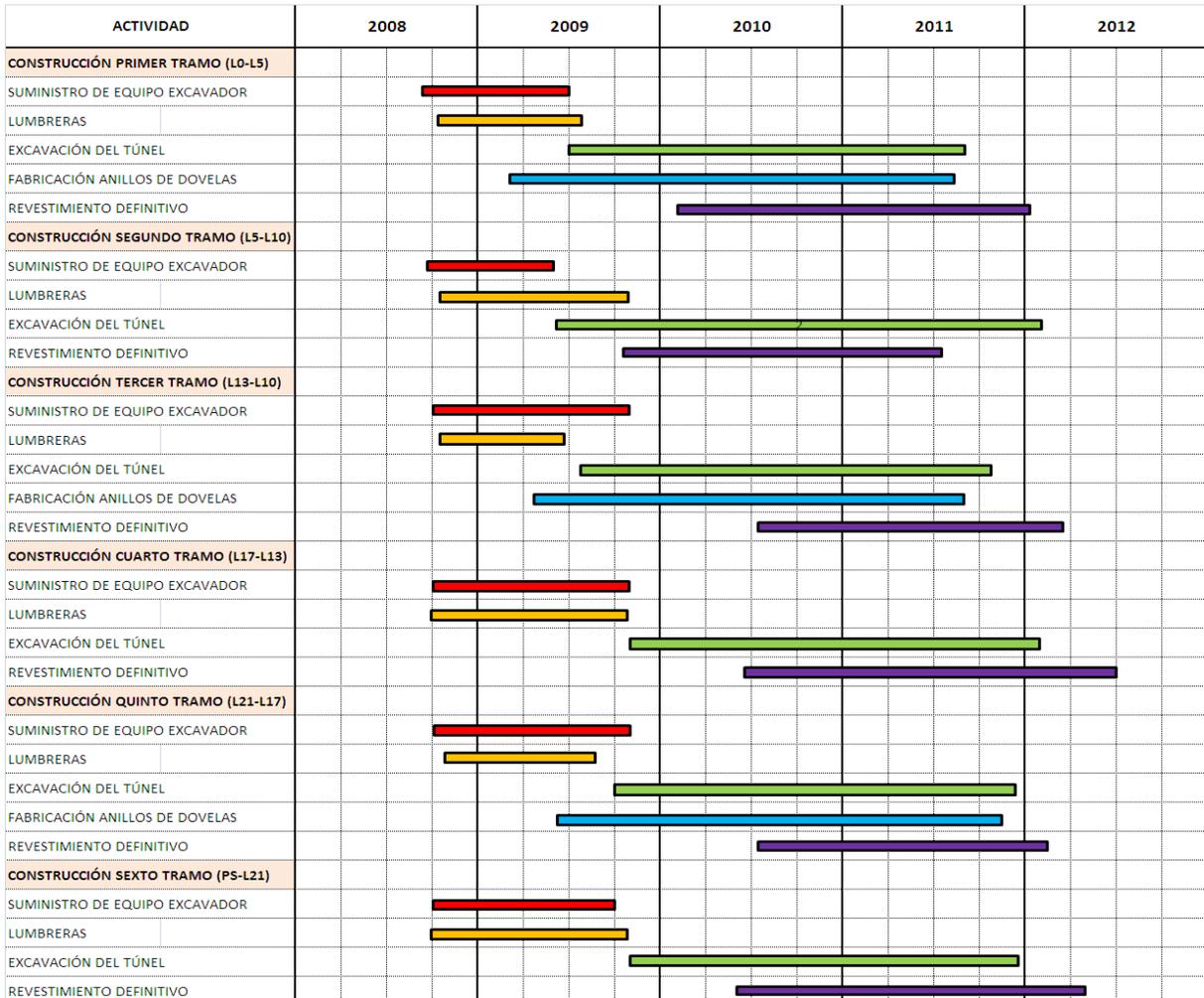


Tabla 2.3 Programa general de obra

2.3.1 Actividades críticas

Se denominan actividades críticas a aquellas actividades cuya holgura es nula, y por lo tanto, si se retrasan o se alargan en su ejecución más allá de su duración esperada, provocarán un retraso exactamente igual en tiempo en la fecha de término del proyecto.

Las actividades críticas se enlistan a continuación:

- Aspectos de tenencia de la tierra, particularmente en los sitios de lumbreras y portal de salida, y atención a los reclamos sociales que se generan en este tipo de proyectos, entre otros, las demandas en materia de suministro de agua potable, drenaje, mejoramiento de vialidad y mejoramiento de imagen urbana.
- Aspectos de la adquisición de los terrenos, la cual se ha visto afectada por el anuncio sobre la construcción de una refinería en el Estado de Hidalgo, generando especulación en el costo de la tierra, en los sitios de lumbreras L21, L22, L23, L24 y del portal de salida, ubicados en esa entidad, de ahí que será imprescindible asignar una partida presupuestal para atención social y tenencia de la tierra.
- Suministro de equipos de perforación ("escudos") y construcción de las lumbreras de acceso.
- Entrega de anticipo de obra.
- Fabricación del equipo excavador.
- Traslado del equipo excavador.
- Ensamble y pruebas del equipo excavador.
- Preliminares.
- Mantenimiento del escudo.
- Derecho de vía.
- Construcción de lumbreras.

2.4 Inversión y beneficios esperados

El monto de inversión total del proyecto es de 14,230 millones de pesos (incluye IVA), para ser ejecutado en un periodo de cinco años.

Concepto	Inversión Total *	Participación Federal		%	Contraparte		%
Túnel Emisor Oriente	14,230	PEF	7,676	54%	Distrito Federal	3,277	23%
					Estado de México	3,277	23%
TOTAL	14,230						

*Incluye IVA

** La contraparte debe corresponder al 50% total de la inversión total (25% por cada Fideicomitente). El monto consignado como contraparte corresponde con el autorizado por el Comité de dicho Fideicomiso, con base a un estimado inicial de inversión de 13,108 que se modificó a 14,230 millones de pesos conforme a los contratos firmados con los contratistas y proveedores.

Concepto	Inversión Total*	Calendario de inversiones				
		2008	2009	2010	2011	2012
Túnel Emisor Oriente	14,230	469	4,458	4,122	3,953	1,228
TOTAL	14,230	469	4,458	4,122	3,953	1,228

Tabla 2.4 Total de Inversión para la construcción de Túnel Emisor Oriente

Beneficios esperados

Los beneficios socioeconómicos esperados por la construcción del Túnel Emisor Oriente corresponden a los daños que se eviten por una eventual inundación en la zona metropolitana de la Ciudad de México derivados de una falla del Túnel Emisor Central.

En ese sentido, los beneficios estimados corresponden a los siguientes:

- ✓ Daños evitados a particulares en sus viviendas. Pérdida o deterioro de enseres y bienes muebles e inmuebles, en nueve delegaciones del Distrito Federal y cuatro municipios del Estado de México.
- ✓ Daños evitados a la infraestructura pública. Reparación o rehabilitación de pistas de aterrizaje y edificaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, reparación o rehabilitación del Sistema de Transporte Colectivo METRO, reparación o rehabilitación de subestaciones de energía y reencarpetamiento de vialidades afectadas, entre otras.
- ✓ Daños evitados en el sector económico. El Distrito Federal y el Estado de México aportan en conjunto el 32.3% del PIB, por lo que las 9 delegaciones y 4 municipios, repercutirán en una disminución del PIB nacional.
- ✓ Costos evitados por atención de la emergencia. Recursos económicos y humanos que se evitará erogar en la atención a emergencias por una inundación.

En el siguiente cuadro se presenta un resumen de los beneficios esperados para los primeros ocho años de operación del túnel, así como el valor actual total de ellos.

Daños evitados con la operación del Túnel Emisor Oriente (millones de pesos)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	VPBS
Vivienda	170	239	311	411	468	528	588	650	3,465
Aeropuerto	53	73	84	104	118	132	145	159	831
Metro	206	283	364	470	532	595	657	720	3,704
Vialidades	48	67	85	109	124	138	153	168	864
Subestaciones Eléctricas	10	14	19	25	28	32	35	39	198
PBT	1,383	2,021	2,749	3,772	4,342	4,931	5,542	6,174	33,985
Atención emergencias	189	259	324	412	463	512	561	609	3,009
Total	2,061	2,956	3,936	5,304	6,075	6,867	7,682	8,518	46,056

Tabla 2.4.1 Beneficios esperados

Rentabilidad

	Valor Presente Neto (VPN) \$	Tasa Interna de Retorno (TIR) %
De acuerdo con el análisis costo- beneficio presentado a la SHCP	38,015,193,501	26.64

Tabla 2.4.2 Rentabilidad del proyecto

Los resultados de la evaluación demuestran que el proyecto es rentable, ya que genera un beneficio social neto de 38,015 millones de pesos.

2.5 Criterios de diseño

Los criterios de diseño para la construcción del túnel emisor oriente se pueden enlistar de la siguiente forma:

Criterios de diseño geotécnico del túnel

El proyecto geotécnico del túnel, debe considerar las propiedades mecánicas de los materiales existentes que se atravesarán, así como las características hidráulicas e hidrológicas de los diferentes tramos y las particularidades de cada sitio.

Deben considerarse también las características de las tuneladoras y el método constructivo que se vaya a seguir en cada tramo, dado que el revestimiento primario a base de dovelas permanecerá un tiempo considerable.

El perfil estratigráfico completo del túnel debe contener los siguientes parámetros que se consideran en el diseño:

- Clasificación de los materiales.
- Resistencia al corte de los suelos (cohesión y ángulo de fricción interna).
- Módulo de elasticidad.
- Deformabilidad.
- Contenido de agua, límites de resistencia líquido y plástico, granulometría y peso volumétrico.
- Estado de presiones de poro del subsuelo.

Se deben determinar las presiones necesarias en el frente de ataque del escudo, para equilibrar las presiones del suelo, de manera que los hundimientos superficiales inducidos por la excavación del túnel se mantengan dentro de las tolerancias establecidas.

Criterios de diseño geotécnico de lumbreras

El proyecto geotécnico de lumbreras debe considerar las propiedades índice y mecánicas de los materiales existentes en el lugar donde se ubicará cada una de ellas.

Dentro del diseño geotécnico de las lumbreras se debe determinar lo siguiente:

- Diagramas de esfuerzos y empujes de tierras.
- Análisis de la falla de fondo.
- Revisión por flotación de la lumbrera.
- Revisión de la estabilidad de zanja para muros Milán.
- Análisis geotécnico de lumbrera
- Análisis de estabilidad de taludes cercanos, si los hubiera.
- Procedimiento constructivo.

Criterios de análisis y diseño estructural

A las estructuras superficiales que no estén en contacto con algún agente agresivo se les considerará como estructuras naturales. Las estructuras enterradas y en general aquellas que conduzcan algún agente agresivo serán consideradas como estructuras frágiles, aplicando los factores de carga implícitos para este grupo y cumpliendo con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias.

Las estructuras superficiales deben analizarse ante cargas gravitacionales (muertas y vivas) y accidentales (viento o sismo) que puedan presentarse durante el proceso constructivo y de operación. El diseño de las estructuras se efectuará para la combinación de cargas más desfavorable, con los factores de carga y de reducción de capacidad acorde a las normas de diseño que se adopten para el tipo de esfuerzos que correspondan, verificando que las deformaciones generadas, queden dentro de las tolerancias especificadas en las normas.

En cada una de las estructuras es necesario aplicar un análisis detallado de acciones accidentales como: sismo (estático, dinámico o simplificado) y viento (estático o dinámico).

En lo referente a los recubrimientos mínimos libres y características del concreto a emplearse en el análisis y diseño de las estructuras, se deben tomar en cuenta los criterios que marquen las normas por concepto de durabilidad.

La cimentación de las estructuras superficiales debe analizarse y diseñarse con base en el estudio de mecánica de suelos y apego a las normas.

Criterios de diseño para el revestimiento primario y definitivo del túnel

La construcción de los túneles produce cambios radicales en las condiciones hidráulicas del subsuelo, éstos pueden ser temporales o definitivos, según sea la permeabilidad de la estructura. Como se sabe, la construcción del Túnel Emisor Oriente producirá abatimientos del nivel freático vecino a él incrementando los esfuerzos efectivos en la masa de suelo y provocando asentamientos. Si el revestimiento del túnel es impermeable o se toman precauciones para restaurar el contenido de agua y la condición de la misma en el suelo, el nivel freático se recuperará al cabo de un tiempo; en caso contrario el túnel será un dren permanente. La primera actitud conduce a la necesidad de que los revestimientos soporten adicionalmente presiones hidrostáticas, en tanto que la segunda exige tomar las precauciones para que el túnel funcione efectivamente como un dren, sin que ello interfiera en su utilización principal.

Es evidente que siempre será económico y deseable un criterio de diseño que haga el máximo uso posible de la capacidad del material para soportarse a sí mismo. Una

elección apropiada de los sistemas de revestimiento y de los momentos en que se instalen puede contribuir a minimizar las cargas de tierra y a hacer que el medio tome por sí mismo la mayor parte de sus presiones. De hecho, y ésta es una regla fundamental, un revestimiento debe contemplarse siempre como una restricción que se coloca para ayudar al material excavado a soportarse a sí mismo. El cómo controlar los movimientos depende mucho de las propiedades del material y de la naturaleza del propio revestimiento.

Para las condiciones dadas en este proyecto se buscó la combinación óptima de flexibilidad y rigidez.

- El soporte primario, o de primera fase, debe garantizar la seguridad de los trabajadores y la estabilización de la cavidad a corto plazo. El soporte primario conservativo deberá ser integrado con elementos de refuerzo mecánico, en este caso la construcción de dovelas prefabricadas de concreto reforzado; con ello se asegura el establecimiento de condiciones estáticas de mayor eficiencia para las funciones del revestimiento definitivo.
- El revestimiento definitivo debe garantizar el adecuado factor de seguridad o la confiabilidad establecida para la obra, absorbiendo las cargas que se estimen y le sean aplicadas a largo plazo. En tales cargas, en principio, no se incluirían las acciones sísmicas, a menos que se trate de secciones específicas correspondientes a circunstancias consideradas en estos criterios especialmente sensibles a dichas acciones como ocurre en secciones de túnel muy superficiales o excavadas en sectores geológicos especialmente desfavorables. En las secciones de revestimiento en que no resulte requerida una cuantía relevante de acero de refuerzo para absorber solicitaciones estáticas, se debe colocar acero dimensionándolo para controlar el agrietamiento por retracción o alternativamente, se podrá eliminar tal acero y sustituirlo con una adecuada cuantía de fibras, dependiendo todo de las limitaciones que se impongan a la aceptabilidad de desarrollo de las referidas grietas.

Cuando el revestimiento no resulte directamente de exigencias estructurales, sus funciones serán, entre otras, facilitar la ventilación natural, garantizar la regularidad geométrica de la sección y mejorar la impermeabilización, en este caso en particular, se proyecta utilizar revestimiento de concreto reforzado de 35 cm de espesor y un recubrimiento para la corrosión que provocan las aguas residuales.

2.6 Normas aplicables

Se empleará el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias, versión 2004.

En aquellos casos no cubiertos por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias, podrán considerarse si fuera necesario y de común acuerdo con la CONAGUA, los reglamentos, códigos y manuales de las siguientes instituciones:

- ONNCCE Organismo Nacional de Normalización y Certificado de la Construcción y Edificación.
- D.G.N. Dirección General de Normas
- S.C.T. Secretaria de Comunicaciones y Transportes
- I.M.C.Y.C. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto
- PEMEX Petróleos Mexicanos
- A.S.T.M. American Society for Testing Materials
- A.W.S. American Welding Society
- A.C.I. American Concrete Institute

3. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

3.1 Lumbreras

El proyecto incluye la construcción de 23 lumbreras, con profundidades variables entre 30 y 135 m, cinco de ellas de gran sección (16.00 m de diámetro) para el suministro, montaje, desmantelamiento y extracción de las máquinas excavadoras.

Las condiciones geotécnicas de los suelos, en cada sitio donde se ubicarán, condicionarán las características de los procedimientos constructivos de las lumbreras.

Para las lumbreras localizadas en los suelos blandos, deben definirse con detalle las diversas etapas de excavación y sus condiciones de estabilidad, con objeto de mantener, en todas las etapas constructivas, los factores de seguridad necesarios para este tipo de estructuras.

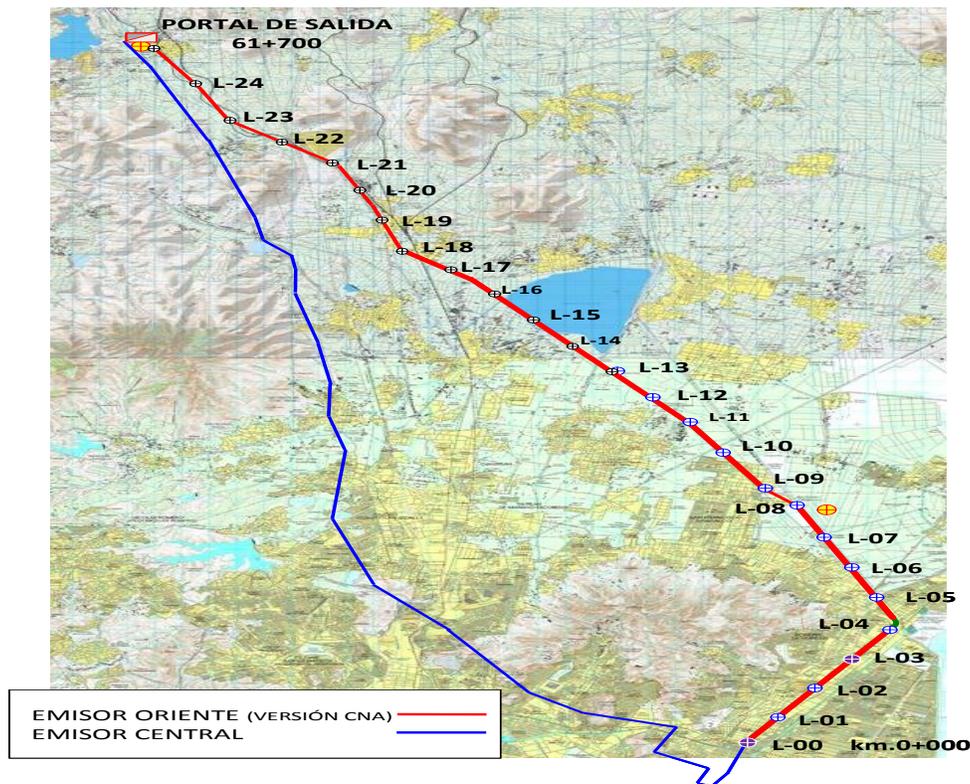


Figura 3.1.1 Localización de lumbreras

Para cualquiera de los procedimientos de construcción de las lumbreras, previo a la construcción de cada etapa, se deberán entregar los proyectos ejecutivos firmados por el responsable de seguridad estructural con registro vigente. La entrega de estos proyectos deberá señalarse en un programa de actividades de ingeniería.

Datos topográficos de las lumbreras del Túnel Emisor Oriente

LUMBRERA	COORDENADAS		DIÁMETRO (m)	CADENAMIENTO	DIST. AL INICIO DEL TEO (m)	DIST. ENTRE LUMBRERA (m)	ELEV. DE TERRENO m.s.n.m.	PENDIENTE	ELEV. DE PLANTILLA m.s.n.m.	PROF. DE LA LUMBRERA (m)	DESNIVEL REPECTO AL INICIO (m)
	X	Y									
L-0	491,877.707	2,156,503.826	16.00	0+017.077	0.000	0.000	2,227.290	0.0019	2203.997	23.293	-0.000
L-1A	493,314.466	2,158,838.679	12.00	2+739.374	2,722.297	2,722.297	2,231.392	0.0019	2198.825	32.597	-5.172
L-3	494,795.725	2,161,029.953	12.00	5+384.319	5,387.242	2,644.945	2,234.976	0.0019	2193.799	41.177	-10.198
L-4	496,362.001	2,163,382.532	12.00	8+193.971	8,176.894	2,809.652	2,234.207	0.0019	2188.461	45.746	-15.536
L-5	497,351.967	2,164,910.748	16.00	10+040.714	10,023.637	1,846.743	2,233.613	0.0019	2184.952	48.681	-19.045
L-6	496,917.265	2,168,209.085	12.00	11+456.107	11,439.030	1,415.393	2,237.419	0.0019	2182.263	55.156	-21.734
L-7	496,097.341	2,169,045.041	12.00	13+406.831	13,440.754	2,010.724	2,239.835	0.0018	2179.046	60.789	-24.951
L-8	495,031.297	2,170,385.843	12.00	16+044.065	16,028.988	2,577.234	2,240.605	0.0018	2174.922	65.983	-29.075
L-9	493,911.702	2,172,932.676	12.00	18+826.113	18,808.036	2,782.048	2,240.283	0.0018	2170.471	69.812	-33.526
L-10	492,716.079	2,175,454.947	16.00	21+817.470	21,600.393	2,791.357	2,238.480	0.0018	2166.005	72.485	-37.902
L-11	491,467.414	2,178,148.150	12.00	24+586.064	24,568.987	2,968.594	2,241.476	0.0018	2161.255	80.221	-42.742
L-12	490,224.170	2,180,877.815	12.00	27+585.522	27,568.445	2,999.459	2,238.790	0.0018	2156.456	80.334	-47.541
L-13	488,895.531	2,183,545.605	16.00	30+585.951	30,548.874	2,980.429	2,239.886	0.0018	2151.887	88.199	-52.310
L-14	486,271.915	2,184,070.472	12.00	33+407.233	33,380.156	2,841.282	2,243.247	0.0018	2147.141	96.106	-56.856
L-15	484,448.121	2,185,403.930	12.00	35+668.126	35,651.049	2,280.893	2,244.271	0.0018	2143.524	100.747	-60.473
L-16	482,805.489	2,187,681.088	12.00	38+465.394	38,448.317	2,797.268	2,246.673	0.0018	2139.048	107.625	-64.949
L-17	480,949.084	2,189,687.489	16.00	41+213.958	41,196.881	2,748.584	2,249.772	0.0018	2134.650	115.122	-69.347
L-18	479,253.965	2,192,138.132	12.00	44+327.679	44,310.602	3,113.721	2,258.042	0.0016	2129.668	126.374	-74.329
L-19	478,281.579	2,194,276.448	12.00	46+676.217	46,661.140	2,350.538	2,258.691	0.0016	2125.907	130.764	-78.090
L-20	476,847.797	2,196,790.247	16.00	49+572.680	49,555.603	2,894.463	2,269.385	0.0016	2121.276	148.109	-82.721
L-21	474,927.864	2,198,591.415	12.00	52+211.435	52,194.356	2,638.755	2,239.628	0.0016	2117.054	122.774	-86.943
L-22	472,974.546	2,200,182.974	12.00	54+731.056	54,714.879	2,520.521	2,223.182	0.0016	2113.021	110.161	-90.976
L-23	471,880.839	2,202,581.385	12.00	57+384.297	57,367.220	2,652.341	2,195.388	0.0016	2108.778	88.810	-95.219
L-24	470,959.956	2,203,609.177	12.00	58+838.926	58,821.849	1,454.629	2,191.785	0.0016	2106.450	85.335	-97.547
P.S.	489,317.321	2,205,477.176		61+315.511	61,298.434	2,476.595	0,000.000	0.0016	2102.488		-101.509

Tabla 3.1.1 Cadenamientos de lumbreras

La programación y logística definitivas de los tramos de construcción se podrían distribuir de la siguiente forma:

Tramo I

Este tramo va de la lumbrera 2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios (TIRR) a la lumbrera L-5 del TEO. La lumbrera 2 del TIRR se le denomina lumbrera L-0 del TEO, y está localizada en Anillo Periférico Norte y Av. Gran Canal, Delegación Gustavo A. Madero, Distrito Federal. La lumbrera L-0 se utilizará para el ensamble de los equipos, incluyendo la máquina excavadora, que será del tipo que seleccione el Contratista bajo su completa y exclusiva responsabilidad, esta máquina será utilizada para la excavación del tramo de túnel con longitud aproximada de 10.06 km, del cadenamiento 0+017 al 10+040. Las lumbreras intermedias tendrán de 12.0 m de diámetro.

Tramo 2

El tramo inicia en la lumbrera L-5 y termina en la L-10, localizada en la intersección del Gran Canal, Dren General del Valle y Av. Carlos Hank González, en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México. La lumbrera L-5 tendrá 16 m de diámetro interior mínimo o el necesario, definido por el Contratista, bajo su completa y exclusiva responsabilidad. En esa lumbrera se bajará y ensamblará el equipo que seleccione el Contratista, el cual será utilizado para la excavación del tramo de túnel con longitud aproximada de 11.6 km, del cadenamiento 10+040 al 21+617. Las lumbreras intermedias serán de 12.0 m de diámetro.

Tramo 3

Este tramo va de la lumbrera L-10 a la lumbrera L-13. La lumbrera L-10 será de 16 m de diámetro, y se utilizará para el montaje del equipo excavador que seleccione el Contratista, para la excavación del tramo con longitud aproximada de 8.9 km, del cadenamiento 21+ 617 al 30+565; las lumbreras intermedias serán de 12.0 m de diámetro.

Tramo 4

El tramo va de la lumbrera L-13 a la lumbrera L-17. La lumbrera L-13 será de diámetro interior mínimo (12 m) o el necesario, definido por el Contratista. El tramo tendrá aproximadamente 10.7 km, del cadenamiento 30+565 al 40+914; las lumbreras intermedias serán de 12.0 m de diámetro.

Tramo 5

Este tramo va de la lumbrera L-17 a la lumbrera L-20. La lumbrera L-17 será de 16 m de diámetro interior mínimo o el necesario, definido por el Contratista. El tramo tendrá aproximadamente 8.4 km y va del cadenamiento 40+914 al 49+372; las lumbreras intermedias tendrán 12.0 m de diámetro.

Tramo 6

El tramo va de la lumbrera 20 al portal de salida. La lumbrera L-20 será de 16 m de diámetro. El tramo tendrá aproximadamente 11.7 km y va del cadenamiento 49+372 al 62+049. La excavación se realizará del portal hacia la lumbrera 20 y se realizará la rezaga hacia el portal; las lumbreras intermedias tendrán 12.0 m de diámetro.

Es necesario emplear los dispositivos de señalización y seguridad para la ayuda de tráfico en aquellos sitios donde sea necesario afectar vialidades de forma temporal; además, construir los accesos a los predios donde se localizarán las lumbreras.

El proceso de excavación de las lumbreras se hará con equipos guiados y almeja de 60 cm de ancho mínimo para la excavación de pantallas y muro Milán. Debe tenerse especial cuidado en la densidad del lodo bentonítico, la cual no será menor de 1.07 ton/m³ y mantener el nivel del mismo como máximo a 0.5 m abajo del nivel del brocal de la lumbrera.

En cualquier caso, antes de iniciar la construcción de la lumbrera, debe cuidarse que la excavación cumpla en cualquier punto con la profundidad de proyecto, tomando en cuenta una sobre excavación en el fondo para admitir el azolve durante la propia construcción de la lumbrera.

El concreto para el revestimiento definitivo de las lumbreras será de una resistencia mínima de proyecto de $f'c=350$ kg/cm², y se elaborará con cemento **CPO-30 y/o 40R-RS** resistente a los sulfatos y relación agua/cemento de 0.45.

3.2 Túnel.

La estructura principal que integra el proyecto corresponde a un túnel de 62 km de longitud aproximada, con diámetro terminado de 7.00 m. El túnel se excavará con escudos de 8.7 m de diámetro aproximado, utilizando anillos prefabricados de dovelas como soporte primario y revestimiento secundario de concreto armado colado en el sitio.

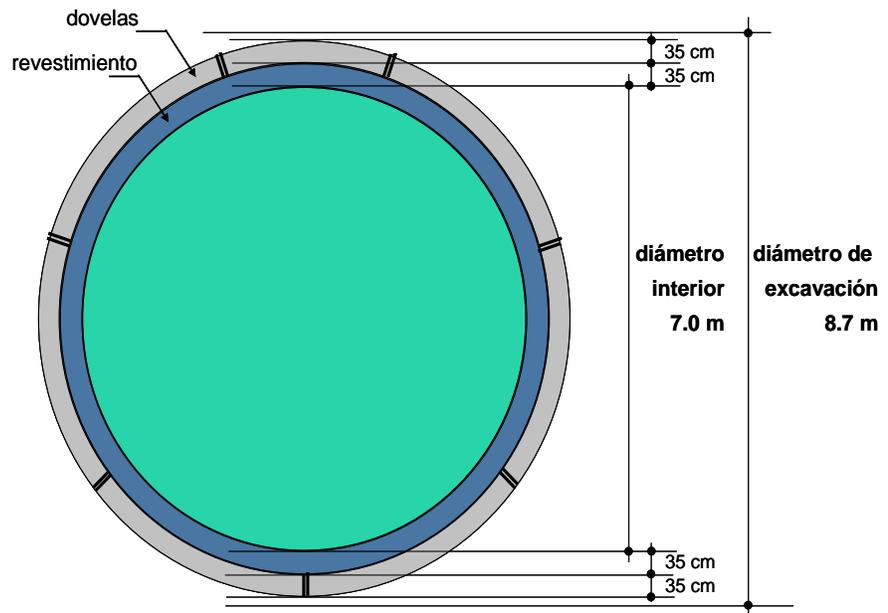


Figura 3.2 Características geométricas del túnel

El procedimiento de excavación se realizará con la siguiente metodología general:

Una vez ensamblados e instalados todos los sistemas auxiliares del escudo, el procedimiento inicia con el accionamiento de los gatos de empuje contra el anillo de concreto de reacción trasero. Al accionar la cabeza de corte y remover el terreno del frente, el escudo se empuja e introduce de forma controlada en el terreno, generando el avance propio de la máquina y dejando el espacio suficiente para la instalación de un anillo de dovelas.

En donde sea necesario, el empuje de la máquina se realiza manteniendo permanentemente la presión del frente de forma balanceada con la presión natural del terreno. Simultáneo al empuje, se realiza la inyección de lechada entre dovelas y terreno para llenar huecos y evitar efectos de asentamiento en superficie.

El material producto de la excavación se removerá de la cámara de corte mediante bombeo o tornillo sin fin, dependiendo del tipo de escudo, rezagándolo por medio de bombeo y banda, dependiendo de la consistencia del material.

Es importante considerar el área necesaria para las instalaciones y su protección. Deben entregarse a la constructora responsable áreas destinadas para las instalaciones en cada lumbrera, las que debe optimizar y utilizar racionalmente, siempre bajo su responsabilidad. Se considerará desde el principio el área para el arranque con el equipo del escudo y sus accesorios, el área de maniobras para el equipo, las dovelas, la instalación de la planta de lechada de mortero para las inyecciones, la planta para el concreto del revestimiento definitivo y el retiro de las instalaciones que haya utilizado para y durante la construcción.

1.2.1 Fabricación de dovelas

Proceso de fabricación:

Se tendrán 4 líneas de vías paralelas con capacidad para 6 juegos de moldes que equivale a 42 moldes para dovelas de 35cm de espesor.

La cámara de curado contará con una capacidad de 30 moldes, 5 fuera para el reposo y 7 en la línea de producción (fuera de la cámara de curado).

En la línea de producción se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- Limpieza y aplicación del desmoldante.
 - Colocación de parrilla de acero, accesorios e insertos.
 - Bancos de materiales.
 - Colocación del concreto.
 - Acabado.
 - Lavado.
 - Desmolde y desalojo de la dovela.
-
- Limpieza y aplicación del desmoldante.

El proceso de fabricación inicia con la limpieza y aplicación del desmoldante al molde metálico para evitar la adherencia del concreto, así como imperfecciones en el acabado. La limpieza se ejecutará con espátulas, cardas, cepillos de alambre y sopleteado de aire. La aplicación del desmoldante será con aspersor a razón de 140 ml/m² de superficie de contacto.

- ❑ Colocación de parrilla de acero, accesorios e insertos.

La parrilla se colocará dentro de los moldes parrillas de acero de $f_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$. La densidad de acero para las dovelas de 35 cm, será de 94.5 Kg/m^3 empleando acero del No. 3 y No 4 de acuerdo al diseño siguiente:

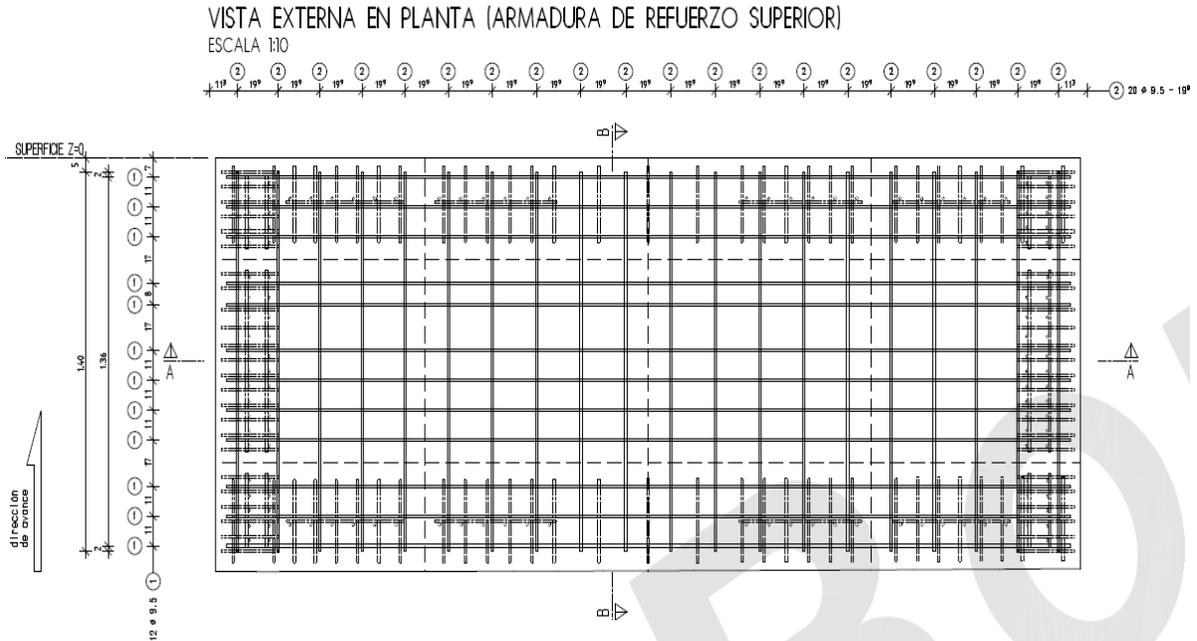


Figura 3.2.1 Diseño de dovela (parrilla de acero)

Después de colocada la parrilla dentro del molde y asegurada mediante separadores de plástico ó mortero, se procede a la colocación de los insertos del diseñador y fabricante francés Anixter Sofrasar.

- ❑ Bancos de materiales

Para el concreto se deben definir los bancos de agregados de grava y arena, que de acuerdo a los términos de referencia cumple las especificaciones.

Para la grava se utilizará el banco "La Valenciana" ubicado en Atotonilco de Tula Hgo; la grava es de origen calizo. La arena se extraerá del banco "La Magdalena", localizado en San Jerónimo Almanalco, Edo. de México, cerca de Texcoco.

❑ Colocación de concreto

El proceso de colado se realizará dentro del cuarto habilitado para este fin, en el que se tendrán los controles sobre el suministro del concreto y el vaciado del mismo sobre el molde. El vibrado se llevara a cabo con el apoyo de los vibradores de pared que vienen integrados al molde y que funcionan a base de aire comprimido.

Se conoce la importancia del Cemento Portland Compuesto (CPC) en la contribución al cuidado del medio ambiente, además de su buen desempeño en condiciones normales; sin embargo, para elementos prefabricados no es recomendable, debido a las variaciones en el fraguado del concreto. El vapor de agua produce reacciones anormales y en consecuencia se tiende a presentar reducciones en las resistencias requeridas, así como la durabilidad del prefabricado. Por tal motivo, se utilizará Cemento Portland Ordinario (CPO).

❑ Acabado de la pieza

Después del colado de la pieza se enrasa el molde con el apoyo de llanas metálicas y de madera, para enseguida proceder a la limpieza del molde antes de entrar al túnel de curado.



Figura 3.2.2 Fabricación de dovelas

Curado

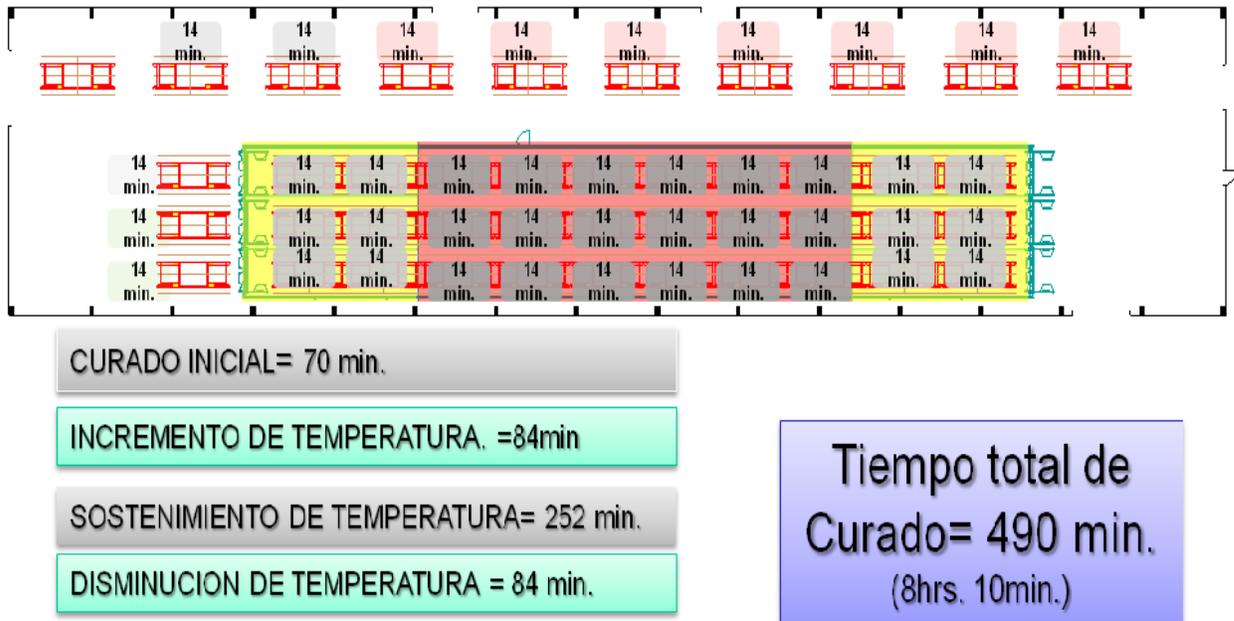


Figura 3.2.3 Tiempos de curado

☐ Monitoreo de temperatura

En el interior del cuarto de colado contará con un tablero en el que aparezcan de manera visible las temperaturas al interior del túnel de curado. Esto se hará a través de válvulas termostáticas que permitirán controlar el flujo de vapor y que a su vez son gobernadas por termopares o sensores que estarán mandando una señal a las válvulas y a un tablero digital.

☐ Desmolde y desalojo de la pieza

Después de haber alcanzado 130 Kg/cm² de resistencia, se procederá a desmoldar la pieza mediante el sistema de succión, el cual descansará la dovela sobre la mesa de giro para finalmente enviarla al patio de pre almacenaje.

3.2.2 Formación de anillos de dovelas

Los anillos de dovelas son elementos estructurales formados geoméricamente, que en conjunto forman el anillo circular requerido por el proyecto ejecutivo. El anillo tiene un ancho de 1.50 m y está formado por 7 dovelas de concreto reforzado.

Los trabajos incluyen la fabricación de 41,600 anillos de dovelas para la construcción del túnel Emisor Oriente, el transporte de anillos a los diferentes frentes de excavación y el almacenamiento de dovelas hasta su utilización.

Se deben instalar el número de plantas y juegos de moldes suficientes para alcanzar una producción diaria que garantice el cumplimiento del programa de construcción establecido.

De manera general, el proceso de fabricación de las dovelas se inicia con la limpieza de los moldes y aplicación de desmoldante para evitar la adherencia del concreto. Posteriormente, con ayuda de una grúa viajera, se coloca la armadura del acero de refuerzo y los insertos, y enseguida se procede con la verificación y control del molde para efectuar el colado del concreto y el vibrado hasta lograr el acomodo del concreto en el molde.

Después del colado se afina la superficie fresca de concreto, y de esta forma se ingresa la dovela al proceso de curado.

Una vez concluido el periodo de curado y que se ha obtenido la resistencia mínima para el desmolde, se procede al retiro y extracción de las dovelas del molde; con ayuda de una grúa viajera la dovela se envía a la zona de marcación y su posterior almacenamiento.

Las dovelas se fabrican en moldes móviles, con vibradores integrados en su estructura, los cuales son desplazados sobre rieles de manera cíclica por la planta.

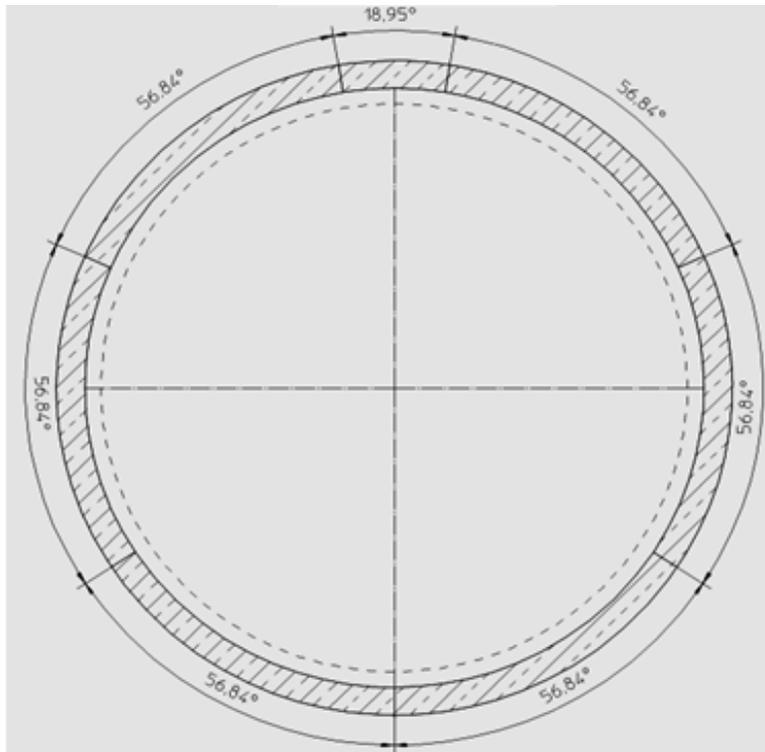


Figura 3.2.2 Segmentación del anillo de dovelas

La resistencia que deben alcanzar las dovelas a edad temprana con ayuda del curado a vapor, debe ser suficiente para soportar con seguridad los esfuerzos derivados de su desmolde, manejo y almacenamiento.

Es necesario contar con un laboratorio de control de calidad acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), en el sitio de los trabajos, y asumir toda la responsabilidad de la obra en cuanto al control de calidad de la producción de dovelas.

3.3 Revestimiento definitivo del túnel

El revestimiento definitivo del túnel, será de concreto reforzado con un espesor mínimo de 35 cm con una resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con cemento CPO30 y/o 40R - RS resistente a los sulfatos.

De manera general el procedimiento se inicia con la colocación de acero de refuerzo, para lo cual, se marcarán referencias topográficas a lo largo del túnel para garantizar que quede en la posición y nivel que indique el proyecto.

La colocación del acero de refuerzo se realiza mediante silletas de acero que aseguren que el armado se mantenga en su lugar durante todo el proceso de colado y fraguado del concreto.

Para el colado del revestimiento se deben utilizar cimbras metálicas modulares de acabado aparente, de 7.00 m de diámetro terminado, en cantidad y longitud suficiente para garantizar el rendimiento necesario para cumplir el programa de construcción autorizado.

La movilización e instalación de la cimbra metálica, así como el descimbrado, requieren de un transportador especialmente diseñado para realizar eficientemente estas maniobras.

La cara de la cimbra deberá tratarse con un agente desencofrante para evitar que el concreto se adhiera a las paredes de la cimbra, de manera que facilite el descimbrado.

Durante las maniobras de colocación, nivelación y sujeción de las cimbras, la brigada de topografía revisará su alineamiento correcto y recubrimiento adecuado del acero de refuerzo.

La transportación del concreto hasta la cimbra se realizará por bombeo, utilizando bombas de pistón.

La colocación del concreto es en forma monolítica en tramos de 9.00 m; el concreto que va a ser colocado en el molde, primero se descarga hasta llenar las ventanas laterales con las que cuenta la cimbra, utilizando una manguera flexible para su descarga. Enseguida se cierran las ventanas y se descarga el concreto por las boquillas que tiene la cimbra a lo largo de su clave; la colocación debe ser apoyada con la utilización de vibradores neumáticos de pared. Estos vibradores son trasladables y la

base queda permanentemente colocada en la cimbra y es únicamente el vibrador la pieza móvil de de fijación rápida.

Para el curado del concreto se utilizará una membrana a base de polímeros acrílicos especiales y disolventes, de evaporación rápida, que permita un curado y sellado eficaz del concreto recién colado; el curado en el concreto se realizará lo más pronto posible e inmediatamente después del descimbrado.

4. PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO

4.1. Fundamentos

La problemática que presenta la construcción del sistema de drenaje profundo, el cual consiste en la excavación de túneles a una profundidad considerable en el área urbana de la Ciudad de México, con diferentes calidades del material, ha conducido a la aplicación de diversos métodos o sistemas de excavación.

Dentro de los métodos de excavación mecánica de túneles, entendiéndolo como tal la que se realiza a plena sección mediante la acción directa y continua de herramientas de corte sobre el terreno por excavar, es la que ofrece mayores posibilidades de desarrollo y expansión. Los trabajos de construcción de túneles plantean una problemática específica como consecuencia de las limitadas dimensiones y accesibilidad del frente de trabajo, y de las desfavorables consecuencias que puede acarrear en el medio circundante (roturas, deformaciones, filtraciones) la apertura de un hueco continuo en su interior.

La construcción con éxito de un túnel exige la aplicación de métodos específicos y de una simetría de trabajo que permita la obtención de rendimientos adecuados, manteniendo la estabilidad general del entorno afectado.

La excavación mecánica, mediante el progresivo desarrollo de máquinas con nueva tecnología, y la ayuda de técnicas constructivas complementarias, es capaz de conseguir esos objetivos aportando altos grados de mecanización y automatización.

Permite también realizar una excavación alterando en pequeña medida las características resistentes iniciales del terreno, integrando desde el primer momento de revestimiento al proceso constructivo mediante la colocación

sistemática del mismo detrás de la máquina, con una efectiva interacción entre revestimiento y excavación.

Sin embargo, en algunos casos estos objetivos no son fáciles de conseguir. La variabilidad de los terrenos y de sus propiedades geomecánicas a lo largo del túnel, así como la de las condiciones impuestas por el entorno (presencia de agua, construcciones próximas), con frecuencia plantea problemas constructivos por la falta de adaptación de la maquinaria utilizada a situaciones muy distintas y dispares.

La versatilidad de las máquinas debe, por tanto, tenerse muy en cuenta en el momento de hacer su elección.

Otra situación de la excavación mecánica está en la dureza, tenacidad y agresividad de los materiales, como las rocas, que pueden hacer el procedimiento más complejo.

En estos casos se hace necesario el empleo de explosivos, que es otro de los métodos tradicionales de excavaciones en roca.

Cada tipo de maquinaria tiene sus propias limitaciones en relación con la dureza de las rocas que puede excavar. En ésta Tesis se tratan las características principales de cada una de ellas y los alcances que puedan satisfacer las necesidades de la construcción del Túnel Emisor Oriente.

Las características de los terrenos blandos y los condicionantes del entorno, como: escaso recubrimiento, asentamientos en superficie, presencia de agua, contaminación del medio, entre otros, han propiciado el desarrollo de técnicas de excavación en ellos mediante la utilización de escudos, cuya amplia variedad de modelos es capaz de dar respuesta satisfactoria a las demandas técnicas, que se planteen.

4.1.1 Marco geohidrológico y profundidad del nivel estático

El trazo del Túnel Emisor Oriente se encuentra asociado a los siguientes acuíferos:

- 1.- El de la Ciudad de México (acuífero de tipo semiconfinado)
- 2.- Cuautitlán - Pachuca (acuífero de tipo semiconfinado)

De acuerdo a un estudio efectuado en 2003, los límites de los acuíferos se establecieron bajo decreto en el Diario Oficial de la Federación como muestra la figura 4.1.1 (en color negro) y el límite dinámico fue determinado (en color rojo). La frontera entre los acuíferos de la ciudad de México y Cuautitlán-Pachuca está definida entre las lumbreras L4 TEO y L5 TEO y en el caso de Cuautitlán-Pachuca la división correspondiente se localiza entre la L20 TEO y L21 TEO.

Acuífero de la Ciudad de México. Es del tipo semiconfinado. Abastece de agua al Distrito Federal y una parte del estado de México (Tlalnepantla y Ecatepec de Morelos).

El subsistema acuífero Ciudad de México está integrado en:

La parte superior, por dos grandes estratos de arcilla separados por una delgada capa de material arenoso (capas duras), que hidráulicamente son de importancia debido a su alta permeabilidad. En la parte media existe material granular grueso, piroclastos, conglomerados y material volcánico. El cuerpo inferior está constituido por rocas volcánicas fracturadas que sobreyacen a rocas carbonatadas de origen sedimentario. El acuífero se asienta sobre un

aglutinado arcilloso, cuyo espesor es de alrededor de 50m. Los suelos arcillosos se presentan de forma irregular, los cuales realizan la función de confinante o semiconfinante. El acuífero asociado a esa zona se clasifica como semiconfinado y alcanza profundidades mayores a 800 m.

Acuífero Cuautitlán- Pachuca. Es de tipo semiconfinado y cubre parte del suministro de agua del Distrito Federal (Delegaciones Venustiano Carranza y Gustavo A.Madero) y del Estado de México (Municipios de Ecapetec de Morelos, Tecámac, Tultitlan, Tultepec, Coacalco, Nextlapan, Santa María Tonanitla, Cuautitlán, Jaltenco, Teoloyucan, Zumpango, San Juan Zitlaltepec y Huehuetoca).

De acuerdo al estudio de determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca de CONAGUA, se identifican tres cuerpos: el superior, con sedimentos de origen lacustre, material arcillo-arenoso, y presencia de tobas permeables con intercalaciones de derrames lávicos; se le considera de baja capacidad productora. Le subyace una secuencia de basaltos, brechas y tobas intercaladas con material piroclástico fino; a esta secuencia se le estima una alta permeabilidad. El cuerpo inferior está compuesto por riolitas, dacitas y andesitas del Terciario.

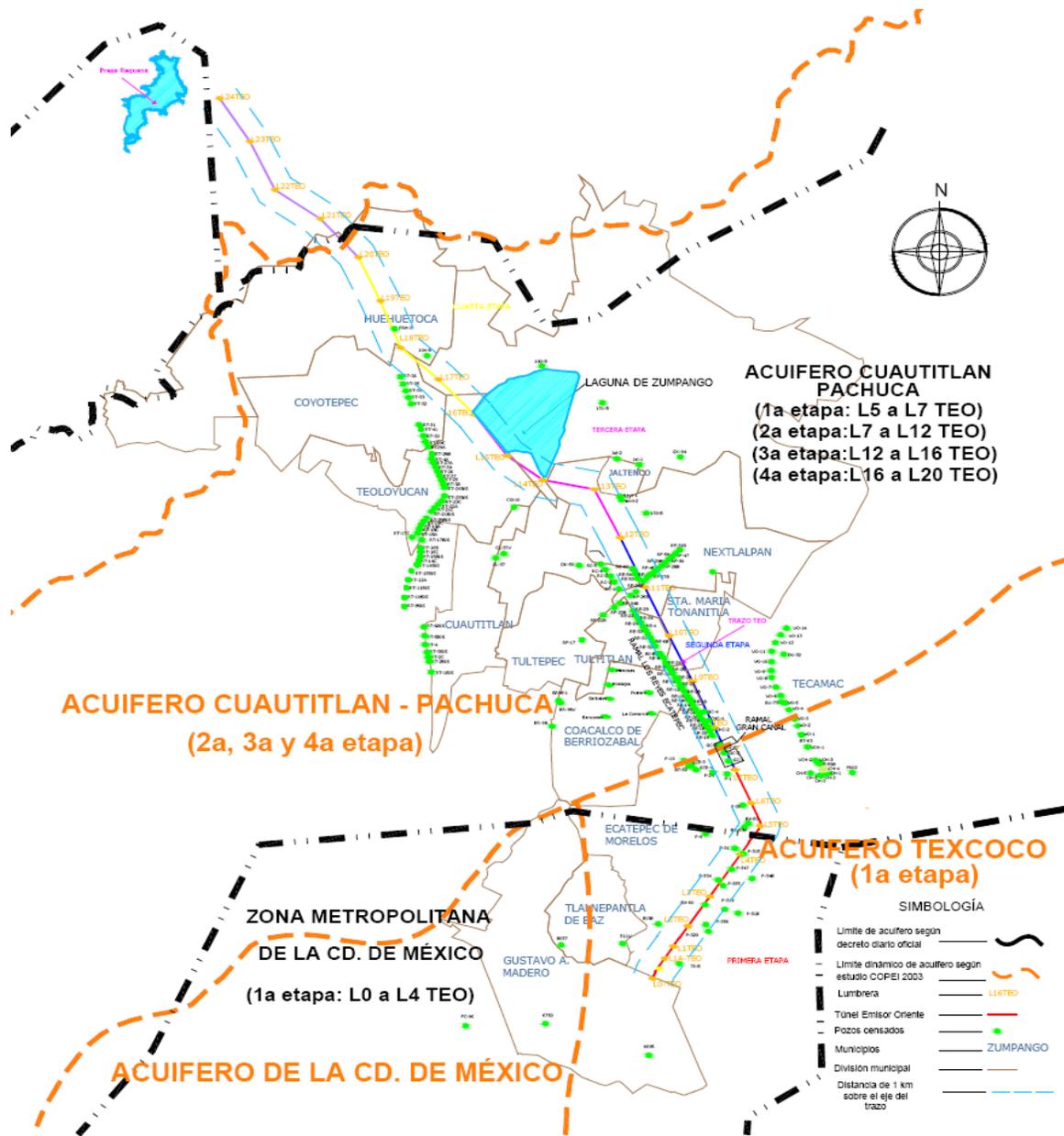


Figura 4.1.1 Marco geohidrológico

Etapas de los acuíferos asociados al trazo del Túnel Emisor Oriente

- Primera etapa. La profundidad del nivel estático del acuífero se encuentra entre las isocurvas 48m y 72m; el valor mínimo corresponde a la lumbrera L0 TEO y el extremo máximo a la L7 TEO. Conforme lo indica el Diario Oficial de la Federación, la división de acuíferos (Ciudad de México y Cuatitlán-Pachuca) se

localiza entre las lumbreras L3 TEO y L4 TEO, aproximadamente en las isocurvas 56m y 58m.

- Segunda etapa. Corresponde al acuífero Cuatitlán-Pachuca. Los niveles estáticos sobre el trazo se localizan entre las isocurvas 72m y 62m, es decir, entre las lumbreras L7 TEO y L12 TEO. Las zonas con mayor profundidad se ubican a la altura de las lumbreras L9 TEO y L10 TEO, entre las isocurvas 76m y 80m.
- Tercera etapa. También se encuentra en el acuífero Cuatitlán-Pachuca. Los niveles estáticos oscilan entre 62m y aproximadamente 80m de profundidad, observándose los niveles más someros cerca de la lumbrera L13 TEO en la isocurva 60m.

4.1.2 Comportamiento general de los suelos.

Se distinguen hasta seis comportamientos distintos de los terrenos como respuesta a las solicitaciones a las que son sometidas al ser excavados en túnel.

Los comportamientos básicos son los siguientes:

Terreno firme (*Firm ground*)

En terreno firme una máquina tuneladora puede avanzar 1 a 3m sin necesidad de un sostenimiento inmediato. No es necesario, sostener el frente de excavación. Este tipo de comportamiento lo tienen las arcillas duras y cementadas y los materiales granulares con cohesión.

Terreno desmoronable (*Raveling ground*)

A este tipo pertenecen los terrenos que se desmoronan en el techo y en la parte alta del frente de excavación. Se desmoronan en pequeños trozos que

caen dentro de la sección excavada. La acción es progresiva y puede conducir a la formación de una chimenea en la parte alta de la excavación. Tienen este tipo de comportamiento las arenas con poca cohesión, los limos no plásticos y las arenas finas con cohesión aparente; los suelos residuales que conservan sus estructuras primitivas también suelen tener un comportamiento similar.

Terreno movedizo (*Running ground*)

A este tipo pertenecen los terrenos que presentan inestabilidades en frentes no sostenidos hasta que se forma un talud estable para conseguir el ángulo de reposo. Los suelos sin cohesión, como arena seca o limpia y grava suelta, pertenecen a esta categoría.

Terreno fluyente (*Flowing ground*)

A causa de la presión de filtración que se desarrolla hacia el frente, los terrenos correspondientes a las dos categorías anteriores se pueden transformar en materiales que fluyen hacia el túnel como si se tratara de un líquido viscoso.

Terreno fluyente con presión (*Squeezing ground*)

El terreno que pertenece a este tipo y no es soportado, se mueve hacia dentro del túnel en forma gradual, presionando sin que necesariamente se desmorone o se rompa. Este comportamiento es característico de arcillas blandas. El momento en que se produce el movimiento depende de la plasticidad del suelo.

Terrenos expansivos (*Swelling ground*)

A este tipo pertenecen los suelos que interaccionan con el agua aumentando su volumen a expandirse o presionando sobre los revestimientos si ésta es impedida. Este fenómeno de hinchamiento se presenta principalmente en las arcillas firmes a duras. La expansividad de las arcillas provoca una invasión de material alrededor de la sección excavada en las zonas no sostenidas o una presión de hinchamiento sobre el revestimiento que en algunos casos puede

alcanzar valores importantes. Se han llegado a medir presiones sobre el revestimiento de hasta 1.00 MPa

En la tabla se muestra una clasificación simplista de acuerdo a su compacidad o consistencia.

Tipo de suelo	RESISTENCIA	
	Término	Definición
Guijarros	Suelto/denso Cementación fuerte	Inspección de huecos y particular relleno.
Arenas y gravas (Suelos de grano grueso)	Cementación ligera	Se excavan con el pico terrones que se desgastan con el pulgar y se desmoronan con las manos.
	Muy densa	Se requiere el pico para su excavación. Resulta difícil introducir un punzón de 50 mm. más de 50-100 mm.
	Densa	
	Compacto	
Suelto	Se excava con la azada; se introduce bien un punzón de 50 mm.	
Limos (Suelos de grano fino)	Muy suelto	
	Firme o denso	Puede moldearse o romperse con una fuerte presión en los dedos.
Arcillas	Blando o suelto	Se rompe o moldea fácilmente con los dedos.
	Muy dura	Se puede intentar con la uña del pulgar.
Arcillosas limosas	Dura	No se puede moldear con los dedos, pero se puede intentar con el pulgar.
Arcillas arenosas (Suelos de grano muy fino)	Firme	Se puede moldear con fuerte presión de los dedos.
	Blanda	Se moldea fácilmente con los dedos.

Tabla 4.1.1 Clasificación de suelos respecto a su compacidad y/o consistencia

4.1.3 Efectos sísmicos sobre estructuras subterráneas

Los efectos sísmicos en estructuras subterráneas se evalúan con enfoques diferentes a los usados para estructuras superficiales. En general, las estructuras superficiales se diseñan para fuerzas de inercia causadas por aceleraciones del terreno. En cambio, las acciones sísmicas de diseño para estructuras subterráneas se expresan en términos de deformaciones impuestas en la estructura por el suelo debido a la interacción entre ambos. Es por ello que el enfoque de diseño sísmico para estructuras de túneles se basa en la determinación de la aceleración, velocidad y desplazamiento máximos del terreno para el sismo de diseño.

El enfoque de diseño más sencillo es el que ignora la interacción del túnel con el suelo circundante. De esta forma, las deformaciones del terreno debidas al sismo de diseño se estiman en condiciones de campo libre y luego el túnel se diseña para acomodarse a estas deformaciones. Este enfoque resulta satisfactorio para túneles más flexibles que el terreno. En caso contrario, es necesario considerar los efectos de interacción suelo-estructura, ya que la rigidez del túnel puede afectar considerablemente las deformaciones circundantes.

Los criterios de diseño más importantes para el cálculo de efecto de sismo en estructuras subterráneas son dos:

- 1) El método de deformación de campo libre, que puede ser muy conservador para túneles mucho más rígidos que el suelo.
- 2) El método de interacción suelo-estructura, para considerar la influencia de la rigidez del túnel.

Con estos métodos se calculan las máximas deformaciones axial y de flexión (curvatura) producidas por diferentes tipos de ondas, así como la fuerza axial, el momento flexionante y la fuerza cortante de diseño. Para su aplicación se

requiere del conocimiento de los movimientos máximos del terreno, los cuales se deben de especificar para dos niveles de diseño:

1) El temblor base de operación (TBO), definido como el mayor sismo esperado en un periodo de retorno de 125 años.

- Para el TEO, 8 a 8.4 en escala Richter

2) El temblor máximo probable (TMP), definido como el sismo con una probabilidad baja de excedencia (10%) durante la vida útil de la estructura (50 años).

- Para el TEO, 7 a 7.5 en escala Richter

4.2 Máquina excavadora de túneles

Una tuneladora o T.B.M. (del inglés *Tunnel Boring Machine*) es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento, si éste es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva.

La excavación se realiza generalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos, alimentados a su vez por motores eléctricos, (dado que la alimentación general de la máquina se realiza con energía eléctrica), aún cuando también existen tuneladoras menos mecanizadas sin cabeza giratoria. El empuje necesario para adelantar la máquina se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado o en zapatas móviles (denominadas *grippers*), accionados también por gatos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se obtiene un punto fijo desde donde empujarán.

Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa el denominado "equipo de rezaga" de la tuneladora (o en denominación inglesa *back up*), constituido

por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que, a menudo, ruedan sobre los rieles que la misma tuneladora coloca, en las que se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

Los rendimientos conseguidos con tuneladoras de cabeza giratoria son muy altos si se comparan con otros métodos de excavación de túneles, pero su uso solo es rentable a partir de una longitud mínima de túnel a excavar: se requiere amortizar el precio de la máquina y reducir el tiempo que se tarda en diseñarla, fabricarla, transportarla y montarla (que puede llegar a los dos años). Además, los túneles a excavar con tuneladora deben tener radios de curvatura grandes porque las máquinas no aceptan curvas cerradas, y tener una sección circular en túneles excavados con cabeza giratoria.

4.2.1 Evolución histórica

a) Escudos convencionales

El invento del escudo aplicado a la construcción de túneles se atribuye a Marc Isambard Brunel, en 1818. Su escudo consistía en una serie de celdas o compartimentos que podían avanzar independientemente unos de otros. Permitía trabajar varios operarios simultáneamente, y cuando era necesario el frente se protegía con tableros de madera. Una vez avanzados todos los compartimentos se colocaba en el espacio libre un revestimiento de mampostería o de segmentos de fundición. El primer escudo de forma rectangular se empleó satisfactoriamente en el túnel bajo el Támesis entre 1835 y 1843.

En 1831, Lord Cochmne patenta un método para utilizar el aire comprimido en túneles bajo el nivel freático.

En los años siguientes se suceden las patentes de fabricación de escudos. En 1869, A. E. Beach, en América. Construye un escudo cilíndrico de 2.40 m que

avanza en una sola pieza mediante gatos hidráulicos que reaccionan contra el revestimiento de mampostería colocado detrás. Este escudo se inventó como alternativa al método (cut and cover) en arenas secas. Se incorpora por primera vez el uso de gatos hidráulicos como elemento de empuje.

En 1869-1890, J. H. Gaeathead construye el escudo para el segundo túnel bajo el río Támesis.

En 1962, J. Tabor, en América construye por primera vez un escudo de cuchillas móviles, que se emplean independientes mediante gatos hidráulicos; sus ángulos de incidencia son notables. Este escudo fue construido por la firma Mining Equipment Manufacturing Company (MEMCO) para resolver los problemas planteados durante la excavación de un túnel colector donde se encontraron arenas sueltas bajo el nivel freático.

En 1978, se construye un escudo de cuchillas fabricado por la firma alemana Westfalia Linen para ser utilizado en la excavación de túneles en el metro de Frankfurt. Este tipo de escudos se utiliza en combinación con diversos sistemas de excavación, como: rozadoras y excavadoras.

b) Escudos mecanizados

Los escudos mecanizados comenzaron a desarrollarse con posterioridad a los escudos convencionales. Los principales hitos en su desarrollo son:

En 1869, John Rice inventa un escudo que trabaja un año después en un túnel de la línea central del ferrocarril de Londres, pero su funcionamiento no fue satisfactorio. En 1901 diseñó otro escudo en el que el propio escudo y el elemento excavador forman una unidad solidaria. La cabeza de corte gira mediante una serie de engranajes, el último de los cuales engrana en una rueda dentada situada sobre la circunferencia de la rueda excavadora. Los engranajes son accionados mediante un motor eléctrico de 45 KW. La rueda excavadora tiene seis brazos sujetos en sus extremos a un disco circunferencial. A partir de

1901 este escudo fue fabricado comercialmente por Markharn Co. Ltd., y utilizado en varios proyectos con resultados satisfactorios, consiguiendo avances semanales hasta de 55 m.

En 1955 Genear Mood Peg fabrica un escudo excavador que se utilizó con éxito en la construcción de túneles en Londres; el escudo tenía un diámetro de 4 m y consiguió avances de 110 m/semana.

En 1956 se inventa el escudo mecanizado, el cual presenta dos innovaciones:

- Utilización de excéntricas que permiten a los cortadores periféricos excavar con un radio mayor en la corona y en los laterales del escudo, con lo que se alivia la presión del frente y facilita el movimiento del escudo a través del terreno.

- Utilización de un anillo de reacción que absorbe el empuje de los gatos y que va situado entre la parte trasera de los gatos y el último anillo colocado. El anillo se expande contra las paredes del túnel para absorber el empuje axial. Este tipo de escudo se ha venido usando hasta 1979.

En 1966 aparecen los escudos mecanizados de cabeza oscilante, fabricados por la firma Calweld y ampliamente utilizados hasta 1973. Se construyeron en diversos diámetros, entre 2.95 y 9.87 m.

En 1967, Robert L. Priestley comienza el desarrollo de un nuevo tipo de máquina llamada en el lenguaje anglosajón (*Shielded Tunneling Machines*). Se trata de una máquina cilíndrica que es empujada hacia adelante mediante once arietes hidráulicos, capaces de aportar un empuje de 762 t, y cuya reacción es absorbida por el revestimiento prefabricado que se va colocando detrás de la máquina mediante un sistema que expande el anillo contra el terreno y coloca el bloque clave.

La cabeza de corte consta de cuatro brazos radiales provistos de picas de fricción. La potencia la suministran cuatro motores eléctricos de 3.7 KW. La cabeza gira sobre un soporte circular estanco que proporciona a la misma una gran estabilidad, permitiendo un acceso fácil al frente.

Con este tipo de máquina se consiguió un récord mundial de avance en terreno blando durante la perforación del túnel acueducto en el río Essex (D- 2,81 m), de 43.4 m en una semana, con revestimiento incluido. Diversas modificaciones se hicieron sobre la máquina original. Se montaron cortadores de disco en la cabeza de corte y se instaló un anillo de reacción.

c) Escudos de cabeza presurizada con aire comprimido

Como consecuencia de los problemas derivados de la utilización del aire comprimido, se encaminaron los esfuerzos de inventiva hacia el desarrollo de un tipo de máquinas que emplaza el aire comprimido únicamente en la zona de trabajo de la cabeza, permaneciendo el personal la mayor parte del tiempo en un ambiente a la presión atmosférica.

Los momentos más importantes en la evolución de este tipo de máquinas han sido:

En 1961 se construyó la primera máquina por la compañía Campenon Bernard.

En 1962 se construyó la segunda máquina, Etoike TBM, por la compañía Robbins. La máquina tenía un diámetro de 18.30 m, peso de 450 t, y se utilizó en la excavación del metro de París. La cabeza de corte llevaba montados cortadores de discos y 180 herramientas fijas de corte. El empuje era de 71(KN), proporcionado por 37 arietes hidráulicos que reaccionaban contra el anillo de revestimiento. El par de giro era de 7.120 (KN/m).

En 1965 se construyó el escudo mecanizado. Para acometer la excavación de los túneles de 2 m de Hamburgo y Viena y, posteriormente, el de Sao Paulo (1973), en el que se consiguieron avances de 15 m/día, en dos relevos. Básicamente, el escudo consiste en una cabeza reversible que lleva incorporado un sistema móvil de chapas de acero que soportan el frente mediante gatos hidráulicos independientes. Esta cabeza va dentro de un doble escudo en el interior de un recinto de trabajo presurizado.

d) Escudos de lodos

Este tipo de máquinas se desarrolló como respuesta a las dificultades planteadas en la excavación de túneles bajo carga hidráulica, obviando los problemas inherentes al empleo del aire comprimido. Incorpora el lodo bentonítico a presión como elemento estabilizador del frente de trabajo y equilibrador de las presiones hidrostáticas y geostáticas; se utiliza también como vehículo de transporte de los productos de excavación.

Las etapas más importantes en su desarrollo son:

En 1966 Markham & Co. Ltd. construye una máquina para ser utilizada en la construcción de los túneles de drenaje de la ciudad de México en terrenos inestables bajo fuerte presión de aguas (3 atm). La máquina lleva incorporada una robusta mampara de acero que separa la cabeza excavadora del resto del cuerpo principal. En la cabeza lleva seis brazos cortadores radiales montados sobre un eje central que transmite un movimiento oscilante a los brazos.

Mediante 22 gatos circunferenciales se ejerce un empuje de 1.3 t, que es absorbido por el revestimiento colocado detrás del escudo. La cabeza puede moverse radialmente dentro del escudo 40 cm.

El espacio comprendido entre el frente y la mampara de cierre está lleno de agua a presión. Los productos excavados se mezclan con lodo mediante unos agitadores situados detrás de la cabeza de corte en la parte baja del escudo y son extraídos con bombas y tuberías al exterior.

El revestimiento formado por anillos de segmentos prefabricados es colocado automáticamente mediante un erector hidráulico.

En 1970, Milsubishi Heavy Industries construyó dos máquinas de 7.29 m de diámetro para ser utilizadas en los túneles de ferrocarril bajo la bahía de Tokio. El desarrollo de este tipo de escudos se produce en Japón, a partir de 1969, con un ritmo creciente de unidades fabricadas y con incorporación de importantes innovaciones, de modo que en el momento presente disponen de

una tecnología propia que figura en un lugar destacado en el mercado internacional.

En 1971, Robert E. Briesflep, Ltd. construye una máquina de 4.1 m de diámetro. La cámara de trabajo va presurizada con un lodo de bentonita. Los productos extraídos pasan a través de una criba vibrante y de unos hidrociclones que separan la bentonita de los productos excavados.

En 1973, la firma japonesa Tekken Kensetu diseñó un escudo de lodos de control automático, construido por la firma Mitsubishi Heavy Industries Ltd. La máquina era básicamente igual a la utilizada en 1970 en los túneles bajo la bahía de Tokio; se componía de un escudo cilíndrico de 5,05 m de diámetro.

La máquina era dirigida mediante un láser. La presión del lodo se controlaba mediante una válvula de control automático de la presión colocada dentro de la tubería. En condiciones normales, la máquina avanza un metro cada 20 minutos. La colocación de los segmentos lleva entre 20 y 30 minutos, y la inyección y prolongación de tuberías entre 110 y 20 minutos. De este modo podía completarse un ciclo de un metro de avance en una hora.

En 1974, la firma alemana Wayss Frogta, al frente de un grupo de firmas constructoras, construyó un escudo de lodos al que llamaron hidroescudo. Esta máquina se utilizó en el túnel colector de Hamburgo que discurría a través de depósitos de arena y gravas, con estratos de arcilla y turba bajo el área del puerto, con una altura de agua de 16 m sobre 121 soleras.

La primera máquina consistía en un escudo circular de 4.50 m de diámetro con una rueda excavadora de tipo abierto con seis radios excavadores y montada sobre un eje inclinado.

e) Escudos de tierras

A partir de los escudos de lodos se han desarrollado en Japón un nuevo tipo de máquinas en que la estabilización del frente de excavación se realiza mediante la presión ejercida por los materiales excavados dentro de un tambor.

El material es transportado hidráulicamente con tuberías y bombas o con un sistema convencional de vagonetas.

Al no utilizarse lodo bentonítico no es necesaria la utilización de una planta de tratamiento de lodos. Las fases principales de su desarrollo son:

En 1966, la compañía Constructora japonesa Sato Kogyo comenzó los trabajos de desarrollo del escudo de tierras, y tras muchos ensayos en el laboratorio y en terreno, una unidad fue construida por Heavy Industries en 1966.

En 1978 se construye el escudo para ser utilizado en Hamburgo, con diámetro de 4.18 m. La regulación de la presión en el líquido estabilizador se realizaba neumáticamente. La presión del agua alcanzó valores de hasta 1 bar y la velocidad media fue de 8 m/día.

4.3 Equipo para la construcción de túneles



Debido a las particularidades de proyecto de cada túnel, tales como la geología, diámetro y longitud, cada uno necesita una máquina distinta. Aun así, la tecnología que domina el mercado se puede clasificar, en términos generales, en dos tipos:

a) La hincas de tubos.

En este caso, la máquina y los tubos que forman posteriormente el túnel, se hincan mediante cilindros hidráulicos.

- Microtuneladoras

b) Túneles con revestimiento por dovelas.

Una vez realizado un avance, la máquina coloca el revestimiento y deja el túnel totalmente realizado. Dependiendo de la geología se pueden utilizar los siguientes equipos:

- Escudos EPB
- Escudos Mixshield
- Escudos para roca dura
- Doble escudos
- Topos

Escudo de presión de tierras EPB

En aquellos estudios geotécnicos donde se detecten terrenos cohesivos, es recomendable el empleo de un escudo EPB (Earth Pressure Balance). Sus ventajas son: un elevado rendimiento de extracción, la rentabilidad de su funcionamiento y su respeto al medio ambiente.

Los escudos EPB utilizan la tierra excavada como medio de sostenimiento del frente. El acondicionamiento del terreno con espuma amplía considerablemente el campo de aplicaciones del escudo. La fuerza de los cilindros de propulsión, transmitida a través del mamparo estanco, actúa sobre la tierra plastificada en la cámara de extracción, consiguiendo así un equilibrio de fuerzas y evitando derrumbamientos del frente. El material excavado se transfiere a una cinta

transportadora a través de un sinfín. El transporte del material al exterior se realiza mediante vehículos sobre rieles o camiones.

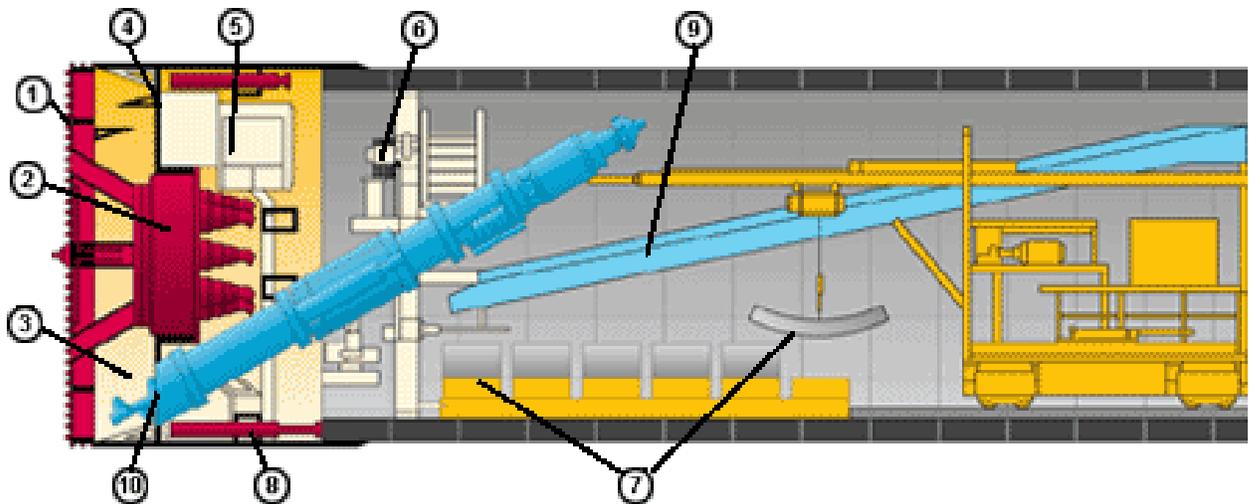


Figura 4.4 Escudo EPB

1. Rueda de corte.
2. Accionamiento.
3. Cámara de excavación.
4. Sensor de presión.
5. Esclusa de aire comprimido.
6. Erector de dovelas
7. Dovelas.
8. Cilindros de propulsión.
9. Cintas transportadoras
10. Sinfín de extracción.

Modalidad	Peculiaridad	Variante
D-1 ESCUDO DE FRENTE ABIERTO PRESURIZADO CON AIRE COMPRIMIDO		
D-2 ESCUDO DE FRENTE CERRADO Y PRESURIZADO	D-2-LB ESCUDO DE LODOS BENTONITICOS	MBM--KTBM
		Hidroecudo
		Hidroyet
		Thxchield
		Miexchield
	D-2-T ESCUDO DE TIERRAS	D-2-T-T
		D-2-T-AP AGUA A PRESIÓN
		D-2-T-AB + INYECCION DE LODO
	D-2-AP ESCUDO PRESURIZADO CON AIRE COMPRIMIDO	
	D-2-M-U MAQUINA TOPO UNIVERSAL	

Tabla 4.4 Escudos Presurizados

Escudos de lodo presurizado. D-2-LB

Los escudos de lodos (slurry pressure shield) son el resultado del desarrollo de la tecnología japonesa a partir de la tecnología de escudos importada de Europa. El desarrollo de los escudos de lodos se produjo entre los años 1960 y 1965.

El desarrollo de los escudos de lodos ha sido motivado principalmente por la necesidad de dar una respuesta técnica alternativa al uso de los escudos de aire comprimido.

Básicamente, este escudo asegura la estabilidad del frente mediante la acción combinada de la cabeza de corte y del lodo a presión. Este lodo, además de contribuir a la estabilidad del frente, sirve como vehículo de transporte de los escombros producidos durante la excavación que son conducidos a la superficie mediante un sistema hidráulico de tuberías y bombas. En el exterior, una planta de tratamiento separa los escombros del lodo, que es reciclado nuevamente al interior del túnel. Este tipo de escudos es apropiado para trabajar en terrenos naturales en condiciones difíciles y bajo presión de agua, como túneles bajo ríos o lechos marinos. La presencia de rocas de gran tamaño dentro del terreno plantea problemas; esta dificultad puede obviarse apartándolos manualmente del circuito hidráulico de transporte.

Los lodos que se utilizan son bentoníticos; el uso de la bentonita en la técnica de perforación no es nuevo; la primera utilización data de *1684* y fue hecha por el ingeniero francés Panvelle. Con carácter general se llama bentonita a cualquier arcilla del grupo de la montmorilonitas; sin embargo, en un sentido estricto se refiere a la arcilla, en el estado de Wyoming, en EE. UU., cerca del fuerte Benton.

Los lodos bentoníticos empleados en los escudos utilizan también su propiedad tixotrópica para estabilizar el frente.

Hay seis minerales de arcilla del grupo de la montmorilonitas que presentan la propiedad de hincharse al contacto con el agua. El carácter tixotrópico permite a este tipo de arcillas con la misma facilidad fluidificarse cuando se las mantiene en agitación y aumentar su consistencia cuando está ceca.

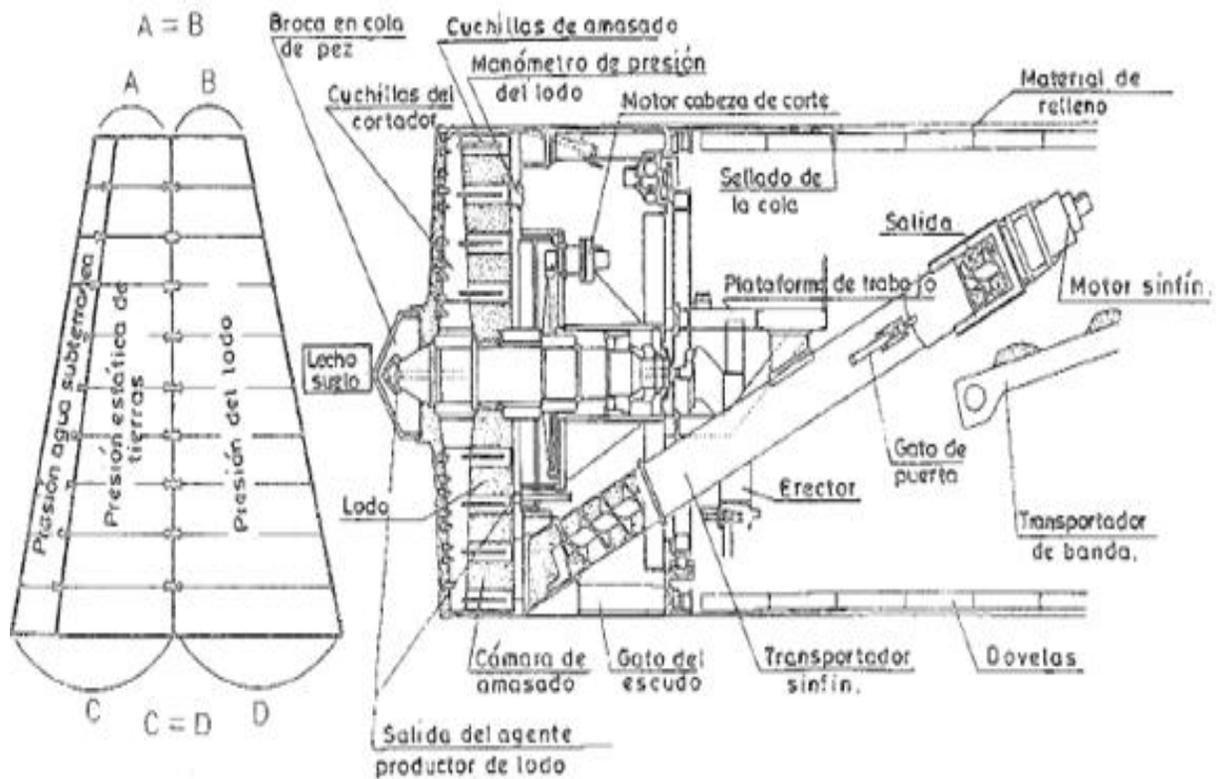
Los lodos utilizados pueden ser de distintas densidades, adaptándose a las exigencias de los terrenos. Para obtener lodos más densos y viscosos se utiliza la montmorilonita sódica, que tiene la capacidad de hincharse después de la adición del agua, aumentando hasta 16 veces su volumen.

Escudos equilibrados con presión de tierras e inyección de arcilla o bentonita - Variante D

Este tipo de escudos es de funcionamiento similar al de lodos densos. La estabilización del frente se consigue mediante la aplicación de arcilla o bentonita en estado líquido, inyectada dentro de la cámara llena de los productos excavados y que se convierten en lodos arcillosos.

El control de la excavación se efectúa midiendo la presión del lodo dentro de la cámara. No es necesaria la utilización de una planta de tratamiento de lodos, aunque el incremento del volumen de descarga, causado por la inyección de bentonita dentro del tambor, algunas veces plantea problemas en el transporte y manipulación de los fluidos.

Este tipo de escudo no tiene cabeza de corte, sino solamente elevadores con dientes de corte, si bien en las unidades de grandes diámetros se utiliza una cabeza de corte. La plastificación y la impermeabilización de los materiales excavados se consiguen inyectando dentro de la cámara de trabajo un material plástico que se mezcla con el material excavado mediante unas espas sujetas a la parte posterior de los radios excavadores. La presión del lodo dentro de la cámara se controla constantemente para comprobar que sea la adecuada para mantener estable el frente de excavación.



Esquema de escudo Daiho de tierras e inyección de bentonita.

El incremento del volumen de descarga como consecuencia de la inyección de lodo dentro de la cámara, algunas veces plantea problemas en el sistema de transporte.

Este tipo de escudos se utiliza satisfactoriamente en suelos muy permeables y no cohesivos, como arenas y gravas sin contenido de arcilla o limos. En caso de terrenos muy permeables puede ser necesario utilizar como producto de inyección un lodo denso que permita la formación del "cake" en el frente de excavación.

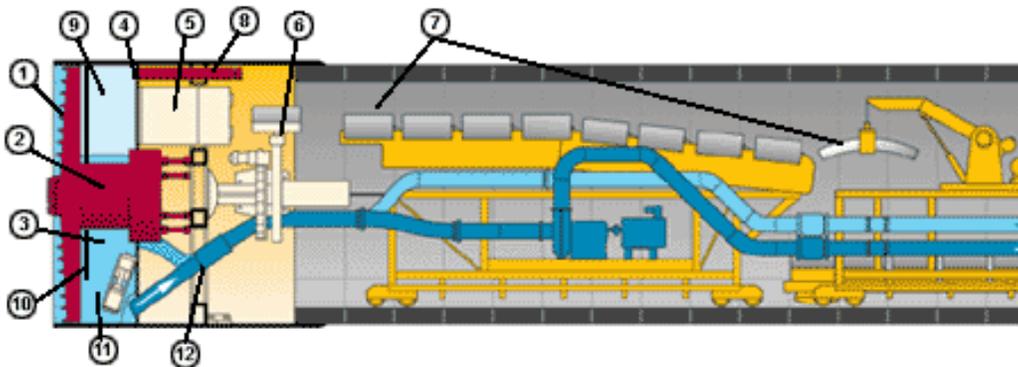
Para mantener la presión del lodo denso dentro de la cámara de trabajo, a la vez que una descarga continua de los materiales, se instala un alimentador en el extremo del sinfín.

El escudo "mixshield"

Es un escudo muy polivalente. La idea básica consiste en perforar en diferentes tipos de geología con una misma máquina, pero con diferentes modos operativos. Funciona como hidroescudo, escudo con control de presión de tierra EPB, aire comprimido o escudo abierto. Actualmente, es uno de los tipos de escudos más utilizados en la construcción de túneles en ciudades para líneas de metro, ferrocarriles, carreteras.

El sostenimiento del frente mediante fluidos es el método de operación más frecuente. Como medio de soporte y de transporte se utiliza una suspensión de bentonita. La mezcla agua/tierra/bentonita se trata en una planta separadora y la suspensión recuperada, se vuelve a introducir en el circuito.

Esquema básico de un mixshield:



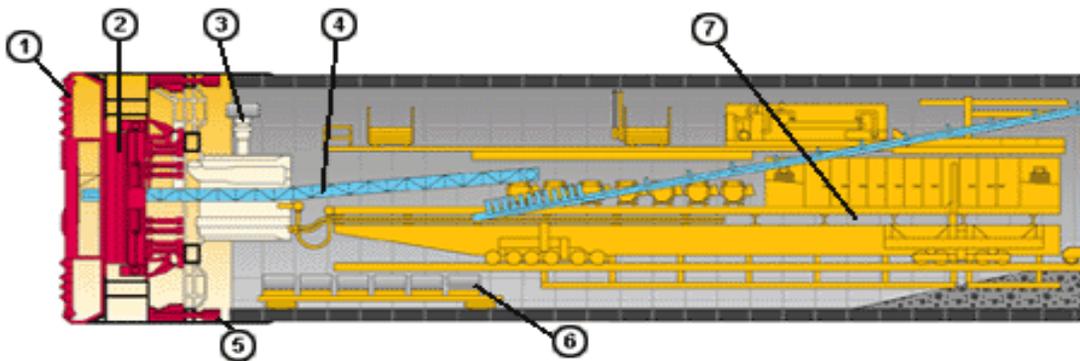
- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. Rueda de corte. | 7. Dovelas. |
| 2. Accionamiento. | 8. Cilindros de propulsión. |
| 3. Suspensión de bentonita. | 9. Burbuja de aire comprimido. |
| 4. Sensor de presión. | 10. Mampara sumergible. |
| 5. Esclusa de aire comprimido. | 11. Machacadora. |
| 6. Erector de dovelas. | 12. Tubería de extracción. |

Escudo para roca dura

También denominados “topos escudados” ya que son utilizados en las mismas condiciones geológicas que los topes. Estos escudos se diferencian muy poco en la rueda de corte y en el sistema de extracción del escombros de los topes estándar. Sin embargo, son totalmente diferentes en el sistema de propulsión y en el escudo de protección. La seguridad es la ventaja fundamental que ofrece el topo escudado con relación al topo estándar y es que la excavación y el sostenimiento del túnel tienen lugar dentro del escudo protector, eliminándose el riesgo continuo que se corre en las instalaciones libres de sostenimiento.

Otra ventaja importante que ofrece el escudo para rocas duras en contraste con el topo es, que el escudo permite colocar el revestimiento definitivo del túnel. De este modo con la colocación de las dovelas prefabricadas de hormigón armado el túnel queda totalmente finalizado con el paso de la tuneledora.

Esquema básico de un escudo para roca dura:



- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1. Rueda de Corte. | 5. Cilindros de empuje. |
| 2. Accionamiento. | 6. Dovelas. |
| 3. Erector de dovelas. | 7. Cuadros de distribución. |
| 4. Cinta transportadora. | |

El doble escudo

Los dobles escudos son tuneladoras con características mixtas entre el topo y el escudo. La característica principal es que está dotado de dos sistemas de propulsión independientes, donde el primero de éstos corresponde al sistema de propulsión del escudo y el segundo con el del topo. El doble escudo es un escudo telescópico articulado en dos piezas que proporciona un sostenimiento continuo del terreno durante el avance del túnel.

Las distintas posibilidades de trabajo que ofrecen los dobles escudos permiten conseguir unos rendimientos próximos a los de los topos, que los escudos para roca dura no podrían conseguir. Al igual que los escudos para roca dura, los dobles escudos permiten realizar túneles a través de terrenos con geología cambiante e inestable que los topos no podrían realizar.



Figura 4.4.1 Fotografía de un doble escudo

El escudo delantero sirve como estructura soporte de la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos interno y externo.

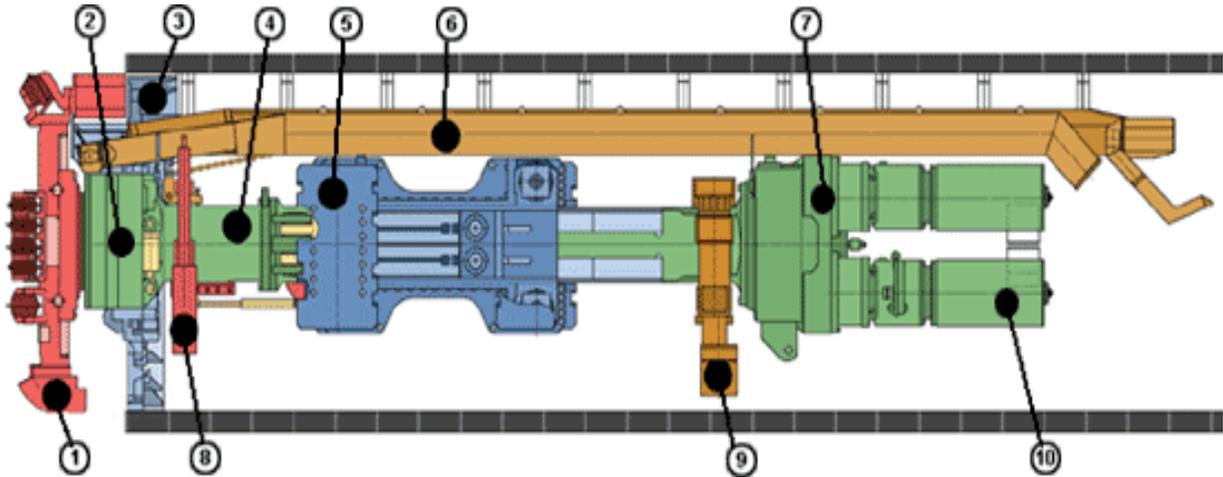
El escudo trasero o escudo de anclaje, incorpora las zapatas de los *grippers* operables a través de ventanas. En su parte posterior incorpora el erector de dovelas y los cilindros de empuje para la propulsión en modo escudo normal.

Topos

Los topos son tuneladoras diseñadas para poder excavar rocas duras y medias sin grandes necesidades de soporte inicial. Los elementos principales que forman un topo son dos: la cabeza de corte y la sección de anclaje, compuesta a su vez por los codales o *grippers*, los cilindros y el back up o carro estructural. En el diseño de un topo, la parte fundamental a estudiar con más detenimiento es la cabeza de corte y la posición de las herramientas de corte, discos de corte, rastrillos, cangilones de desescombros y los "*copy cutters*" que se van a instalar en ella.

La fuerza para realizar el avance se obtiene como reacción de los *grippers* contra el terreno.

Esquema básico de un topo:

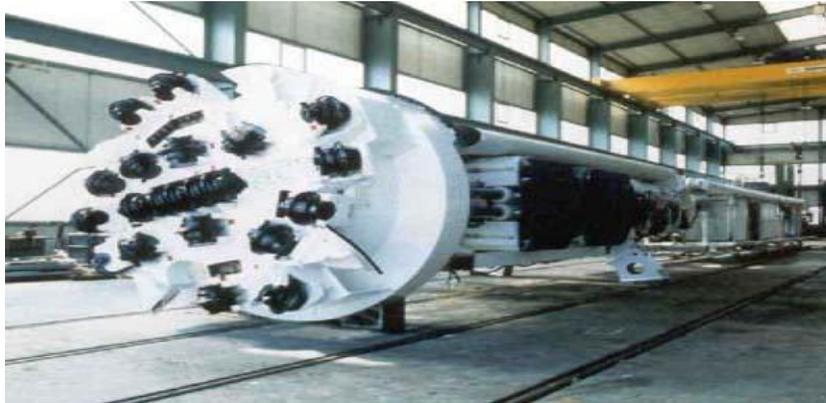


- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Rueda de corte para roca | 6. Cinta transportadora |
| 2. Rodamiento principal | 7. Accionamiento rueda de corte |
| 3. Escudo para la rueda de corte | 8. Soporte delantero |
| 4. Kelly interior | 9. Soporte trasero |
| 5. Kelly exterior | 10. Motor eléctrico |

El topo ensanchador es, como su nombre lo indica, aquel que se utiliza para agrandar túneles y así evitar las consecuencias de las fuerzas de agarre en la excavación finalizada, ya que los topos ensanchadores tienen los *grippers* delante de la rueda de corte.

Los topos para planos inclinados están especialmente diseñados para túneles con pendientes mayores de 10% y que han llegado al 50%. Han sido utilizados en la construcción de funiculares subterráneos a estaciones de esquí, túneles de centrales eléctricas y minas.

La sección de anclaje de un topo comprende: un carro estructural o back up, un conjunto de zapatas de anclajes denominados codales o *grippers*, y los cilindros de empuje de la máquina.



Los codales o grippers: son las zapatas que apoyan la máquina contra la roca durante el avance. Deben de soportar la fuerza de empuje necesaria para el avance del topo, proporcionada por los cilindros de empuje y transmitirla a las paredes del túnel.

El funcionamiento de un topo se compone de 5 ciclos bien diferenciados:

1. La máquina es acodalada en el túnel. Comienza la excavación.
2. Los cilindros de empuje del cabezal de corte llegan al final de su carrera.
3. Los soportes delanteros y traseros se extienden y se retraen los codales.
4. EL cuerpo principal de la máquina o Kelly exterior se desliza suavemente hacia delante.
5. La máquina se alinea usando el soporte trasero.
6. Los codales son extendidos y los soportes recogidos. La máquina está lista para iniciar un nuevo ciclo.

Teniendo en cuenta el alcance de las máquinas para excavación mecánica en túneles y sus componentes principales, se procede a hacer un análisis detallado de los factores y etapas que engloban la elección de un equipo de excavación, en este caso para la construcción del Túnel Emisor Oriente.

La tabla 4.4.1 muestra los estudios que se deben tomar en cuenta para completar una de las etapas de elección de equipos, considerando la profundidad y seriedad de los estudios a realizar.

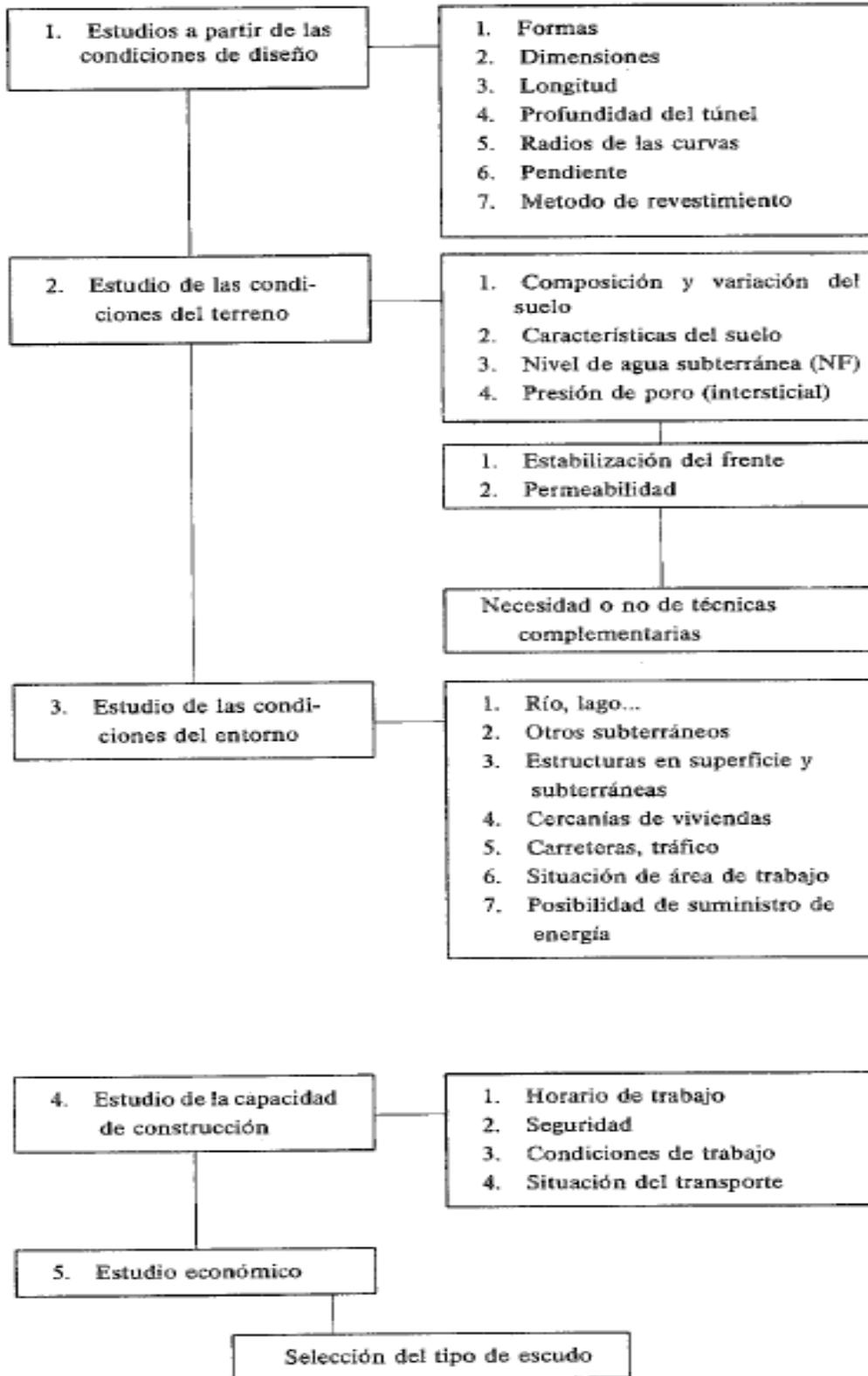


Tabla 4.4.1 Estudios para condiciones de diseño y selección de escudo

Después de tomar todas las consideraciones mencionadas en la tabla anterior se llega a la conclusión de que por cuestiones de tiempos de proyecto y tipo de suelo en los diferentes tramos del Túnel Emisor Oriente, se utilizarán Escudos "EPB".

A continuación se tratan las principales características de estos escudos.

4.4 Escudo EPB (Earth Pressure Balance)

Principio de funcionamiento

Los escudos de compensación de presión de tierra (de forma abreviada escudo EPB o escudo de presión de tierra balanceada), se emplean especialmente en terrenos cohesivos, los cuales acusan una baja permeabilidad al agua.

Con los escudos EPB, el terreno excavado por la rueda de corte sirve de apoyo al frente de excavación para evitar asentamientos o elevaciones.

Para que el terreno excavado del frente de ataque pueda servir de medio estabilizante, éste deberá tener las siguientes características:

- Buena deformación plástica
- Consistencia pastosa a suave
- Caja fricción interna
- Baja permeabilidad al agua

Por regla general, el suelo no presenta completamente estas características, ni antes ni después de su excavación. El material debe acondicionarse con aditivos como espuma para poder transportarlo.

También deben tenerse en cuenta las modificaciones de la presión de tierra.

Avance y excavación del material

El terreno se extrae del *frente de excavación* [1] valiéndose de la herramienta de la rueda de corte en rotación, y se empuja a través de las aberturas de la *rueda de corte* [2] hacia la *cámara de excavación* [3].

Ahí el terreno se mezcla con el suelo plastificado disponible. La fuerza de los cilindros de propulsión se transmite a través del *mamparo estanco* [4] al suelo plastificado, evitando así una penetración incontrolada del terreno del frente a la cámara de excavación.

El estado de compensación se habrá alcanzado, cuando el suelo plastificado en la cámara de excavación no pueda seguirse compactando por la presión de tierra y agua prevalecientes. La presión de tierra ahora existente en el frente de ataque deberá corresponder aproximadamente a la presión de tierra en reposo. Si la presión de apoyo del suelo plastificado se incrementa por encima del estado de equilibrio, se provocaría una compresión adicional de él en la cámara de excavación, así como del terreno presente, y bajo determinadas circunstancias podría tener lugar una elevación del suelo delante del escudo. Si se redujera la presión de tierra el suelo podría penetrar a la cámara de excavación y con ello se provocarían asentamientos de la superficie del terreno.

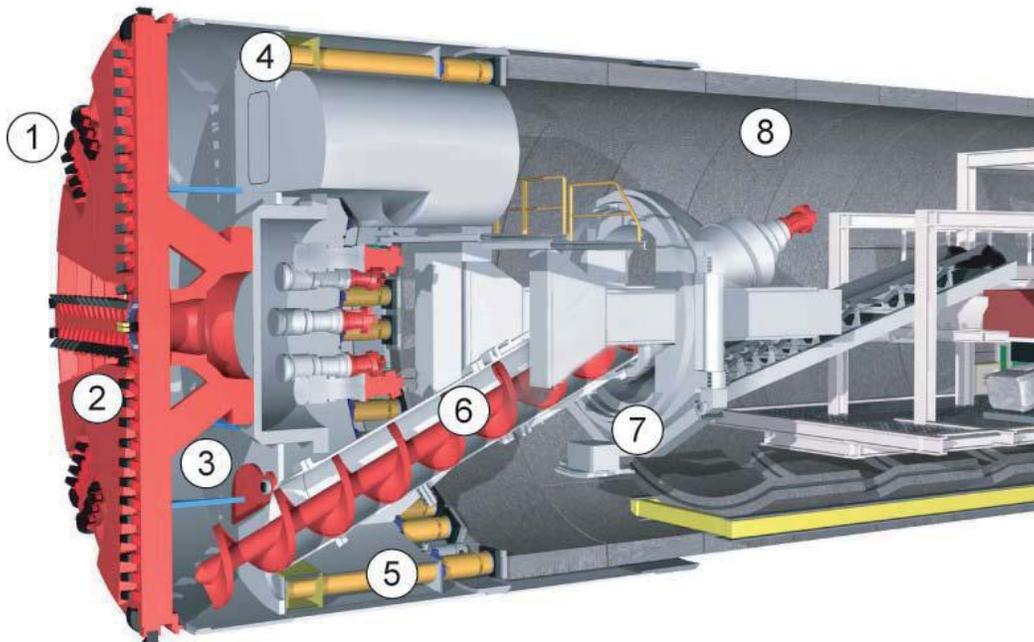


Figura 4.5 Escudo EPB

- [1] Frente de excavación
- [2] Rueda de corte
- [3] Cámara de excavación
- [4] Mamparo estanco
- [5] Cilindro de avance
- [6] Tornillo sinfín
- [7] Dovelas
- [8] Cola del escudo

El material excavado se transporta por medio del *tornillo sinfín* [6] fuera de la cámara de excavación bajo presión, acarreándose al túnel que se encuentra bajo presión atmosférica. Para que la transición del material de la salida del sinfín a la cinta transportadora se pueda efectuar sin necesidad de utilizar una esclusa, la tierra debe tener una baja permeabilidad al agua, de forma que se evite una corriente a través del tornillo sinfín.

El revestimiento del túnel se efectúa normalmente con *dovelas de concreto armado* [7], que se montan en la zona del escudo detrás del mamparo estanco en condiciones de presión atmosférica.

El espacio que queda entre la parte exterior de la dovela y el diámetro de excavación es inyectado continuamente con mortero mediante aberturas de inyección en la *cola del escudo* [8].

La presión de tierra se ve afectada por los siguientes factores principales:

- Velocidad de avance
- Volumen de material excavado
- Adición de sustancias para el acondicionamiento del terreno

La forma más usual para regular la presión de tierra durante el avance en la velocidad especificada es cambiando la velocidad del tornillo sinfín. La presión de tierra baja cuando la tierra se transporta más rápido debido a una alta velocidad del sinfín.

La presión de tierra se incrementa cuando la tierra se transporta más lentamente.

En general también es posible regular la presión de tierra por medio de la velocidad de avance. Para ello al reducir la velocidad de avance se tiene como efecto la disminución de la presión de tierra, por lo contrario al incrementar la velocidad de avance la presión de tierra aumenta.

En cualquier caso, el objetivo es mantener constante la presión de tierra durante el avance. La presión originada en la cámara de tierra deberá igualar la presión de tierra frente a la rueda de corte, para de esta manera evitar asentamientos y desprendimientos del terreno.

La presión de tierra y la presión de apoyo se indican en el puesto de mando sirviéndose de los sensores de presión de tierra instalados a diferentes niveles en el mamparo estanco.

La velocidad de rotación de la rueda de corte puede modificarse durante el avance, para lograr el mejor mezclado y acondicionamiento posibles del terreno o para reducir una rodadura del escudo.

CABEZA DE CORTE (Cutting Wheel)	Diametro Division Tipo de picas Housings discos Paso giratorio Lineas/inyectores de espuma Placas Hardox Flanche accionamiento Peso	8130mm 4 piezas (mayor mecanizado) diseno nuevo, 2 lineas de Widia si, 16 con rippers (mayor mecanizado) 4 líneas espuma, 2 de aceite si, 4 si, Hardox 400 para rodamiento 3,6m aprox 80 ton
ESCUDO (Shield)	Diametro Largo total Cilindros empuje Fuerza de empuje Division escudo Presion de operacion Peso escudo	8090mm 9,000mm 2x13 260/220/2300mm 56,033 kN 4 piezas 5 bar 250 ton aprox
TORNILLO SIN FÍN (Screw conveyor)	Diámetro Longitud Telescopico Accionamiento Capacidad Guillotina Presion de operacion Peso	800mm aprox 16m si 315 kW 420 m3/h doble 5 bar por definir
ACCIONAMIENTO (Cutting wheel drive)	Tipo Rodamiento principal Motores Potencia instalada Par nominal Vel. Maxima Presion de operacion sellos Peso	Electrico 3,6m 8 x 160 kW 1,280 kW 4,580 kNm 0-4 rpm 5 bar por definir
ERECTOR	Diámetro corona Potencia instalada Peso	aprox 3,800mm 75 kW 43 ton
BACK UP	Numero de carros Largo total backup Alimentador de dovelas Cinta transportadora en backup Potencia instalada sist hidraulico Bombas de mortero Bomba de transferencia mortero Compresor de aire Bombas de grasa Capacidad transformadores Variadores de frecuencia Enrolladores de manguera Cassete de ventilacion Equipo de espuma Alta tension Equipo de bentonita Equipo agua alta presion	6 aprox 84 m 1 anillo completo si por definir 75 kW 315 kW Sistema de mortero por definir 3x KSP12 1x KSP 45 2 x 55 kW 2 2x1200 kVA 8x160kW rodillos, 25m 1,400mm si, completo (bombas, tanques, etc) Superior a 12 kV opcional 80m3/hr; 8bar

Tabla 4.4 Especificaciones técnicas de escudo

El empuje total de la maquina debe ser capaz de absorber los empujes del terreno en cabeza, en el frente del túnel, de forma que el terreno no penetre ni tan siquiera se deforme, además de ser capaz de absorber los rozamientos entre escudo y suelo y entre escudo y dovelas. Debe también disponer de una reserva de empuje que sea capaz de desbloquearlo si se atora. Todo lo anterior sin permitir deformaciones.

4.4.1 Componentes del escudo EPB

Cabeza giratoria circular de corte

En general la excavación se realiza mediante una cabeza giratoria circular con herramientas de corte de fricción o de desgaste.

La cabeza de corte puede ser de construcción en radios, con las herramientas de corte distribuidos a lo largo de ellos, dejando unos espacios abiertos entre los mismos.

Esta construcción en radios permite un fácil acceso al frente de trabajo y a los cortadores, para su mantenimiento y sustitución; sin embargo, este tipo de cabeza no proporciona un gran soporte del frente de excavación. Este tipo de diseño funciona bien en terrenos firmes y generalmente proporciona un soporte suficiente en terrenos desmoronables.

Cabeza de corte de frente cerrado

Otro tipo comúnmente utilizado es la cabeza de corte de frente cerrado, llamado tambor excavador (*drum digger*).

Los cortadores excavan el material del frente y los escombros son eliminados a través de aberturas practicadas en la parte frontal del tambor. El tamaño de estas aberturas puede, generalmente, usarse para prevenir entradas incontroladas de material procedente del frente.

Unas puertas permiten el acceso al frente de trabajo, pero éste es generalmente limitado; las puertas de acceso pueden reforzarse según la demanda de soporte del frente.

Tanto la cabeza con sus radios como el tambor cortador pueden construirse de modo que sus mitades o sus cuadrantes puedan oscilar independientemente unos de otros.

El avance del escudo y la rotación de la cabeza se regulan midiendo las presiones de agua y del terreno dentro de la cámara de trabajo y el par de la cabeza de corte.

El porcentaje de abertura de la cabeza cortadora debe ser equilibrada, de tal manera que no permita la entrada de material suelto o saturado y por otro lado, debe ser lo suficientemente grande para que el material penetre con facilidad en la cámara al ir siendo cortado por las picas o dientes.

Tornillo sinfín / evacuación del material excavado

Para la evacuación del material excavado, se monta un tornillo sinfín en la dovela de fondo que alcanza el tren de apoyo siguiendo un ángulo determinado.

El diseño estático y cinemático del tornillo sinfín se corresponde con las características del proyecto. Para optimizar el flujo del material excavado, se puede añadir agua o espuma por medio del orificio de inyección previsto. En la zona de la compuerta del tubo del sinfín se encuentra montada una sonda de presión de tierra. En la zona del fondo del túnel el tornillo sinfín pasa por un tubo de desgaste hasta la cámara de excavación.

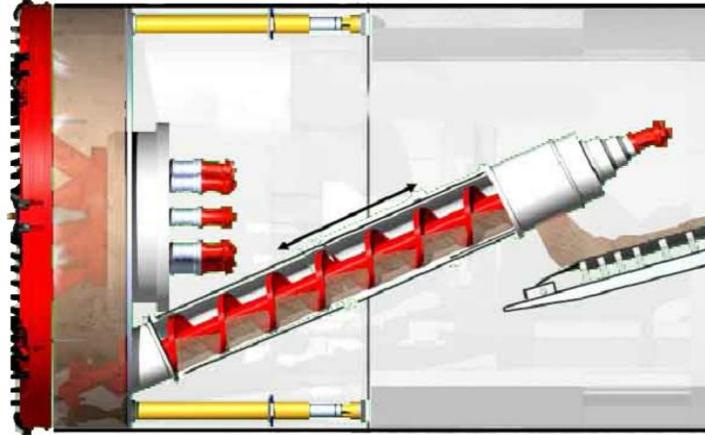


Figura 4.5.1 Tornillo Sinfín

Para la evacuación del material excavado, la tuneladora está equipada con un sistema de bandas o cintas transportadoras. El material excavado cae sobre la cinta de la máquina (dispuesta en el eje central de la misma). Desde la cinta de la máquina, se traspa el material excavado a la cinta transversal y, finalmente, a la cinta de túnel.

Si por cambios geológicos no es posible transportar el material excavado con las cintas transportadoras, se procede a eliminar el escombros con ayuda de bombas de materias consistentes.

El cuerpo de la máquina

El escudo es el principal componente del cuerpo de la máquina. Éste va instalado contra el frente y protege a los hombres y el equipo del colapso del terreno, hasta que se instala el revestimiento permanente. Si la cabeza de corte utilizada es circular, generalmente ésta se monta dentro del escudo juntamente con los motores de avance.

El movimiento hacia adelante de la máquina, se efectúa mediante gatos hidráulicos situados alrededor de la periferia de la parte trasera del escudo, que generalmente reaccionan contra el último anillo del revestimiento. Cada gato hidráulico puede funcionar independientemente o en grupo. Los gatos están contruidos de modo que sean capaces de hacer avanzar el escudo una distancia igual al ancho de los anillos del revestimiento.

Una vez completada esta parte del ciclo se coloca el revestimiento en la zona que ha quedado libre detrás de la cola del escudo.

Si la máquina ha sido diseñada de modo que los gatos reaccionen contra el anillo del revestimiento, la excavación y el avance deberán interrumpirse mientras se coloca el anillo del revestimiento.

Los gatos hidráulicos sirven para dirigir también el escudo, ajustándolo a la alineación requerida. Utilizando mas gatos sobre una parte del perímetro que sobre la otra se puede dirigir el avance del escudo, arriba, abajo, a la derecha o a la izquierda.

En la parte posterior de este cilindro se encuentra el denominado "faldón", que es el lugar donde se ensamblan las dovelas de concreto precoladas, que forman el revestimiento primario del túnel. Al final del faldón se localizan tres sellos perimetrales (dos de neopreno y uno de cerdas de alambre), cuya función es impedir la entrada al escudo de la mezcla de inyección que se coloca en el espacio anular.

El equipo de rezaga

Durante el avance de la máquina hacia adelante, la rezaga es arrastrada sobre un transportador o cadena transportadora que la envía a la parte trasera del escudo, donde es cargada en el sistema de evacuación que la extrae al exterior y que generalmente es un tren de vagones arrastrados por una locomotora.

Instalación de espuma

El principio para la producción de espuma se basa en un remolino mecánico de aire con un líquido espumante. La mezcla de agua y agente tensoactivo con el líquido se realiza en el área del tren de apoyo. Para ello se lleva el agente tensoactivo desde un depósito cambiante a través de un caudalímetro a las tuberías de líquido correspondientes, sirviéndose de una bomba dosificadora y agua de la tubería de agua industrial.

La producción en sí de espuma se realiza a través del remolino mecánico de aire y líquido en diversas lanzas de espuma. Ambos componentes se dosifican mediante los elementos de mando y se transportan a las lanzas de espuma.

Las regulaciones se modifican dependiendo de la velocidad, de la presión de soporte y de la receta indicada.

Estos modos operativos pueden conducirse en la modalidad manual, semiautomática o automática, conforme al diseño del equipo.

Con ayuda de las válvulas de bola regulables, el operario del escudo puede controlar la inyección de espuma en los siguientes puntos:

- Rueda de corte
- Estatores en el escudo
- Tornillo sinfín

Los requerimientos técnicos para un terreno acondicionado con espuma consisten en:

- Transmisión de la presión de soporte al frente de excavación
- Suficiente deformabilidad
- Baja permeabilidad al agua
- Elasticidad marcada
- Reducción de conglutinaciones en la TBM
- Reducción del desgaste

Sistema regulador de aire comprimido

El sistema de regulación de aire comprimido se encuentra instalado en la zona del escudo y sirve para regular la presión de apoyo. Durante el avance normal de la máquina, el sistema queda inoperativo. Antes de realizar tareas de

mantenimiento con la necesidad de bajar el nivel de tierra plastificada en la cámara de excavación, es imprescindible activar el sistema.

Asimismo, se debe activar el sistema siempre que las condiciones geológicas requieran avanzar con la cámara de excavación llenada sólo en parte.

La presión de apoyo se regula por medio de una burbuja de aire en la cámara de excavación.

Por razones de seguridad, la máquina está equipada con un sistema de regulación de aire comprimido redundante, de manera que al fallar uno o más componentes del sistema primario, el operario puede activar inmediatamente el sistema secundario.

Componentes principales del sistema:

- Convertidor de presión
- Estación de regulación y control
- Válvulas reguladoras de entrada de aire

El sistema de regulación mantiene el nivel de sobrepresión ajustable. De esta manera, se compensan interferencias como pérdidas de aire comprimido en el área del frente de ataque. La presión de la burbuja de aire se debe ajustar según las condiciones geológicas para mantener estable la presión de apoyo en el techo de la galería.

Cola del escudo (faldón)

Con ayuda de una bomba aspirante, se inyecta la grasa para la cola del escudo o faldón en el anillo de alimentación del escudo. La cola del escudo está equipada con un sellado por cepillos de dos filas y un anillo de chapa flexible. El espacio entre los cepillos y la chapa (cámara) se llenan de grasa para la cola del escudo.

Cada cámara ofrece cierta cantidad de conexiones que se pueden abrir/ cerrar por medio de una válvula de bola neumática.

Los sensores de presión montados en cada una de las válvulas de bola miden la presión que se visualiza en el panel de operario. La presión aplicada no se utiliza para ninguna función de regulación. El sistema y el modo de funcionamiento automático se activan en el panel de control.

La junta de la cola del escudo se tiene que lubricar antes y durante el avance con una pasta de obturación. Si la junta no se lubrica regularmente, el material de inyección (mortero) fluye por la junta y llena las cámaras intermedias de la junta. Incluso ligeros ángulos de conducción pueden causar desplazamientos de la dovela, de forma que las juntas ya no sean flexibles.

Para prolongar al máximo posible la vida útil y asegurar el correcto funcionamiento del sellado por cepillos, es imprescindible la alimentación adecuada del mismo con la grasa especificada.

Por tanto, es necesario ajustar el sistema según el volumen de grasa especificado por parte del proveedor del mismo, así como los parámetros de avance (particularmente la duración).

Asimismo, es un requerimiento indispensable respetar todas las instrucciones del fabricante sobre el primer llenado en el lugar de uso.

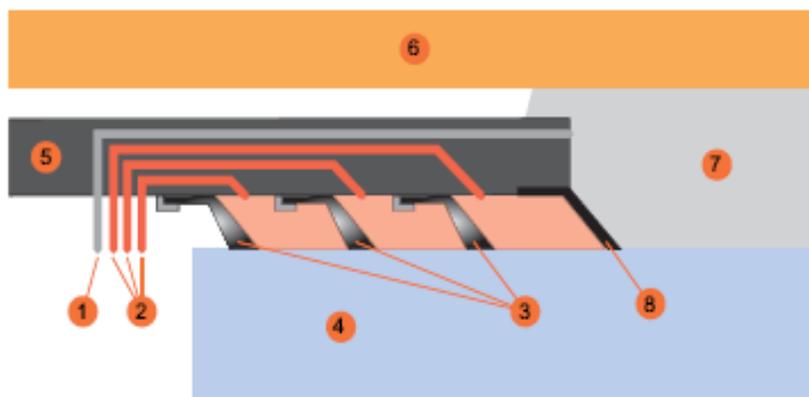


Figura 4.5.1.1 Cola del escudo

- [1] Conducto de mortero
- [2] Conducto de grasa
- [3] Sellado por cepillos
- [4] Dovela
- [5] Cola del escudo
- [6] Terreno
- [7] Mortero
- [8] Escama

Cámara presurizada de mezclado

Es el espacio comprendido entre la cabeza cortadora y una mampara metálica. Las funciones de la cámara del mezclado son equilibrar la presión hidrostática del suelo mediante la inyección de lodo, el cual es suministrado desde superficie por bombeo; asimismo permitir el mezclado del suelo con el lodo.

La mampara metálica está diseñada para una presión de lodo hasta 2.3 kg/cm² y para sostener el eje de la cabeza cortadora. En la mampara metálica, que forma la cámara se localizan:

- Dos puertas para inspección, que se utilizan para revisar el frente de excavación, para lo que previamente la cámara de mezclado se vacía.
- Una válvula para eliminación del aire de la cámara durante la presurización del frente de excavación.
- Sensores de presión de la cámara presurizada. Indican la presión frontal de trabajo. Uno registra la presión en las consolas y el otro directamente en un manómetro colocado en la mampara.
- Clinómetros para medir el giro del escudo. Indican la posición del escudo respecto a su eje vertical.
- Clinómetro para medir la inclinación del escudo. Indica la posición del escudo respecto a su eje horizontal (pendiente).
- Válvulas para suministro y extracción de lodos. Permiten el suministro y retiro de la cámara presurizada. Se operan manualmente.
- Transmisión de la cabeza cortadora. Su función es la de proporcionar el torque necesario al cortador, por medio de ocho motores eléctricos.
- Gatos de empuje. Proporcionan el avance del escudo durante la excavación, apoyándose en el último anillo de dovelas colocado. Asimismo con los gatos de empuje, se conduce al escudo de acuerdo a las líneas de proyecto.

El escudo cuenta con 24 gatos de empuje, instalados en el perímetro interno del escudo, con una capacidad de 120 t cada uno, lo que proporciona una fuerza total de empuje de 2880 ton. La longitud de carrera de los gatos es de 1.15 m. y cuentan con dos sensores que indican la longitud de extensión. La velocidad de extensión es regulable hasta 5 cm/min. Cada gato puede operarse de manera independiente para la conducción del escudo.

El anillo erector es el dispositivo encargado del montaje de las dovelas y tiene capacidad para deslizar, girar y colocar las dovelas en su posición final.

El anillo erector tiene 3.8 m de diámetro, velocidades de 0.5 y 0.8 r.p.m. con movimientos circular (330° reversible), radial (65 cm.) y axial (20 cm.), el cual es operado a control remoto.

El tren de equipo atrás del cuerpo del escudo, van instalados los equipos que son necesarios para su operación. Son remolcados por el propio escudo, durante el avance de excavación. El tren está formado por 4 módulos y una unidad de tubería telescópica. A continuación se indican los equipos que contienen estos módulos:

Módulo 1

Está formado por la cabina del operador, y un polipasto montado en una trabe carril, por medio de la cual se llevan las dovelas al alcance del anillo erector.

Módulo 2

Está integrado por la unidad de poder hidráulico, el gabinete de circuitos eléctricos en la parte superior un transformador de 450 kva y los depósitos de aceite hidráulico.

Módulo 3

Está formado por la unidad de derivación de lodos o bypass, las válvulas de compresión de suministro y extracción y la unidad neumática.

Módulo 4

Está formado por la bomba de extracción de lodos.

Unidad de tubería telescópica

Es la que permite que el escudo pueda avanzar hasta 6 m sin instalar tuberías rígidas para suministro y extracción de lodos y está formada por una tubería externa y una interna, que se deslizan a través de un sistema de cremallera.

A continuación se indican las funciones de los equipos principales que integran el tren del escudo.

Cabina del operador. Desde esta cabina operan los sistemas de: la cabeza cortadora (corte y desplazamiento); gatos de empuje; las compuertas de control de excavación; las unidades de energía hidráulica y de lubricación; asimismo cuenta con los indicadores necesarios para monitorear la operación del escudo.

Unidad hidráulica. Está integrada por tres unidades de energía hidráulica, para operar:

1. Los gatos de empuje
2. El gato de la cortadora y el anillo erector
3. Los gatos de las compuertas de control de excavación (alabes de ranura)

Gabinete de circuitos eléctricos contiene los circuitos de suministro de energía a las unidades hidráulicas, a la bomba de lubricación, a los motores de la cabeza cortadora, al compresor de aire y a los circuitos de iluminación, y un tablero para operación local de las válvulas de circulación de lodo.

Sistema neumático. Consta de un compresor de aire de 7 kg/cm² para operar las válvulas de compresión del sistema de circulación de lodos y la válvula de derivación.

Adicionalmente del equipo antes mencionado, se tiene instalada en superficie la consola de control central, desde la cual se opera el sistema de circulación de lodos. Cuenta con los indicadores necesarios para monitorear el funcionamiento de operación del escudo y en dos graficadores va registrando la información obtenida por los sensores del escudo.

Para concluir con la descripción de las partes del escudo, a continuación se indica el funcionamiento del sistema de circulación de lodos. El sistema de

circulación de lodos es el procedimiento mediante el cual con lodo a presión, suministrado desde superficie por medio de bombeo se equilibra la presión hidrostática del suelo y a través del mismo sistema de bombeo. El suelo excavado es llevado a superficie para su tratamiento y reutilización parcial en la planta de lodos.

El sistema de circulación de lodos está compuesto por: una bomba de suministro de lodos, es una bomba centrífuga con capacidad de 3.4 m³/min., con una capacidad variable hasta 1200 r.p.m., que va instalada en superficie junto al tanque de suministro; bomba de extracción de lodos es una bomba centrífuga con capacidad de 3.4 m³/min., con una velocidad variable hasta 1350 r.p.m., que va instalada en el modulo no 4 del tren de equipo.

Unidad neumática

Proporciona la energía para operar las válvulas de compresión de suministro y descarga y la válvula de derivación. Va instalada en el módulo 3 del tren de equipo del escudo. La unidad de tubería telescópica permite avanzar al escudo hasta 6 m sin necesidad de instalar tramos nuevos de tubería y va instalada al final de tren de equipo del escudo. La secuencia de trabajo del sistema de circulación de lodos es la siguiente:

1. Se ponen en operación las bombas de suministro y extracción de lodos, en la forma de circulación de derivación y se ajustan las velocidades de las bombas, de acuerdo a la presión frontal, para igualar los flujos y densidades de lodos.
2. Para iniciar la excavación se pasa el sistema al modo de circulación frontal, se ajustan las velocidades de suministro y extracción para igualar flujos.
 - a) Al terminar la excavación se pasa el sistema al modo de circulación de derivación para igualar densidades en las tuberías.

- b) Se paran las bombas en el siguiente orden: bombas intermedias, bomba de extracción y bomba de suministro

4.5 Rendimientos esperados

Para hacer una evaluación de los costos de ejecución con máquinas tuneladora, es necesario partir de una estimación de los rendimientos que podrán obtenerse en cada uno de los tipos de terreno presentes en el túnel. El avance medio estimado vendrá dado por la expresión:

$$\text{AMD} = (\text{A} \times \text{HRD}) \times \text{CU} \times (\text{B} \times \text{PN})$$

donde:

AMD	Avance medio estimado-día.
A x HRD	Horas útiles trabajadas-día.
CU	Coeficiente de utilización de la máquina.
B +PN	Penetración efectiva.
PN	Penetración neta.
A	Coeficiente A (Depende del rendimiento del operador de maquinaria especializado oscila entre 1.5 y 5 m/día)
B	Coeficiente B (Depende de las propiedades del suelo oscila entre 0.7 y 0.9)

Penetración neta (PN)

Es la velocidad con la que penetra una máquina en el suelo cuando está trabajando. Se expresa generalmente en HORA / HOMBRE o en m/hora.

Existen muchos criterios de determinación de esta penetración neta. Todos ellos se basan en la caracterización de las propiedades mecánicas del suelo; para ello es necesario realizar ensayos diversos en el laboratorio.

Para definir el avance y los rendimientos, el fabricante de los equipos garantiza la colocación de un anillo de dovelas en 20 minutos y excavar un anillo completo en unos 20 minutos, que sumado da un ciclo mínimo teórico de 40 minutos por anillo. La velocidad de avance de los gatos principales es como máximo de 8 cm por minuto en posición de excavación. Esta velocidad, para los 150 cm de longitud del anillo, da 18 minutos y 45 segundos.

Llevado al extremo de capacidad teórica, en un día de tres turnos, con 20 horas útiles, podrían hacerse 30 anillos o avances. Con 6 días por semana y 4.3 semanas por mes se obtendrían en teoría 770 avances al mes. Siendo 1.5 m la longitud de cada avance, supone 1155 m/mes

En definitiva, se toma como rendimiento de los equipos EPB a considerar para el proyecto del Túnel Emisor Oriente, 400 m de túnel al mes.

4.6 Trabajos preliminares

Para trabajar con un escudo de frente presurizado se requiere de una serie de equipos e instalaciones, tanto en superficie como en lumbrera, que permitan no solo el funcionamiento de la máquina misma, sino también un ciclo ágil de excavación.

Trabajos en superficie:

Las instalaciones generales que conforman el campamento, además de talleres de carpintería, electricidad, mecánica y soldadura, almacenes, vestidores, baños y oficinas, son las siguientes:

- Subestación de energía eléctrica.
- Planta de emergencia.
- Patio de dovelas y sistema de manteo.
- Compresor.
- Cisterna para agua tratada.
- Planta de tratamiento y sistema de circulación de lodos.
- Tuberías en superficie.

Subestación de energía eléctrica.

Tanto el escudo de frente presurizado como el equipo complementario requieren de energía eléctrica para su funcionamiento; por lo tanto, es necesario instalar una subestación cuya capacidad estará en función de los equipos por alimentar. La tensión de alimentación (acometida) será de 23 kv, con tres diferentes distribuciones: 4160v. (túnel), 440v. (superficie) y 220v. (túnel y superficie) las derivaciones para cada equipo se alojan sobre la superficie en trincheras, con el objeto de darles protección sin que interfieran con la circulación normal dentro del campamento.

Planta de emergencia.

Debe contarse con una planta de emergencia de capacidad suficiente para que, en caso de un corte temporal en el suministro normal de energía eléctrica, puedan cerrarse las ventanillas del cabezal cortador del escudo, así como las válvulas del sistema de circulación de lodos necesarias para mantener la presión en el frente, se pueda operar el elevador de personal y mantener el alumbrado necesario en el interior del túnel y en la superficie

Patio de dovelas y sistema de manteo.

Se requiere de un sitio adecuado para el almacenaje en obra de las dovelas prefabricadas que constituyen el revestimiento primario, de tal forma que puedan estibarse eficientemente y que sean de fácil acceso para la grúa del sistema de manteo. Las dimensiones del patio de dovelas estarán regidas por el área disponible para el campamento, tratando de que sea lo suficientemente grande para albergar el "stock" de dovelas requerido para el avance diario programado del frente del escudo. Las dovelas deben colocarse sobre polines anclados al firme del patio para que su peso no se concentre en un sólo punto, provocando con ello asentamientos; de igual manera, al estibar una dovela sobre otra. Deben colocarse polines intermedios, siguiendo la línea de los inmediatos inferiores.

El manteo generalmente se realiza por medio de una grúa pórtico, que además de suministrar las dovelas al túnel, baja todos los materiales indispensables para la excavación, tales como rieles, tubos, y equipo que se vaya requiriendo en el interior del túnel. Esta grúa pórtico puede sustituirse por una motogrúa, que además de la función ya mencionada, se encargue de la rezaga de los cárcamos, siempre y cuando la disposición de las instalaciones en superficie lo permita. Cualquiera que sea el tipo de grúa que se seleccione para el manteo, debe tener capacidad suficiente para manejar los materiales o equipos de mayor peso que deban suministrarse durante la excavación del túnel. Tal es el caso de las dovelas, con un peso aproximado de 2 t cada una, y de la locomotora, de 3 t.

Compresor.

Se requiere la instalación de un compresor en superficie, con capacidad suficiente para alimentar a las bombas de achique que se localizarán en el fondo de la lumbrera y en el túnel.

Tendido de tubería y cisterna para agua tratada.

Debido a que se requieren grandes volúmenes de agua para la excavación con escudos de frente presurizado (aproximadamente 34 m³ por anillo), se emplea agua tratada en lugar de agua potable. Para ello, es necesario tender una tubería de suministro desde la línea de conducción de agua tratada más Cercana hasta el campamento; aquí el agua se almacena en una cisterna, con capacidad suficiente para proveer a la planta de lodos por lo menos durante diez empujes de anillos cuando el gasto de la línea de alimentación sea bajo o nulo

Sistema de circulación y planta de tratamiento de lodos.

El material producto de la excavación debe retirarse del frente, extraerse del túnel y depositarse en superficie en espera de ser acarreado al tiro asignado. En el caso de los escudos de frente presurizado, la rezaga del material se efectúa por medio de tuberías y una serie de bombas que componen el sistema de circulación, suministrando el lodo a la cámara presurizada del frente, para posteriormente extraerlo de ésta, mezclado con el material excavado. En superficie únicamente se instala la bomba de suministro, mientras que la bomba de descarga se incluye en el tren de equipo del escudo y las de traspaleo se van instalando en el interior del túnel conforme su construcción avanza.

El lodo extraído del túnel se deposita en una planta de tratamiento, cuya función es separar, por medio de sedimentación, el material producto de la excavación del lodo que se utiliza en la estabilización del frente. El primero se retira de la planta por medio de camiones de volteo y pipas; el resto es reacondicionado para continuar con la excavación.

La planta de lodos se localiza en un espacio cercano a la lumbrera y se compone básicamente de:

-Cárcamo de desecho o descarga. Lugar donde se recibe el lodo proveniente del frente de excavación y en el que se inicia la sedimentación de los grumos de arcilla que han sido acarreados por el lodo de suministro.

-Cárcamo de sedimentación. Sitio en el cual continúa el proceso de sedimentación de la arcilla en suspensión.

-Cárcamo de ajuste. Para reducir aún más la densidad del lodo que ha pasado por el cárcamo de sedimentación, en el cárcamo de ajuste se le adiciona agua tratada proveniente de la cisterna y se le homogeniza, para lo cual se emplean agitadores verticales o la inyección de aire a presión.

-Cárcamo de suministro. Lugar en el que se almacena el lodo con las características necesarias para ser enviado nuevamente al frente de excavación.

-Caseta central de control. Sitio que aloja la consola central, en la cual se recibe la información que se genera durante la excavación del túnel y se controla todo el sistema de circulación de lodos. La caseta se instala junto a la planta de lodos, a una altura desde la cual se dominen los cárcamos y de tal forma que la consola quede debidamente protegida.

Tuberías en superficie.

Como complemento a las instalaciones en superficie, es indispensable el tendido de una serie de tuberías cuya finalidad es el suministro de agua tratada de la cisterna a la planta de lodos y a la lumbrera, el suministro de aire a presión desde el compresor y el transporte del agua de achique del túnel.

Trabajos en lumbrera.

Se requiere de trabajos especiales en la lumbrera, algunos de los cuales se realizan exclusivamente al inicio de la excavación y otros durante todo el transcurso de ésta.

- Cuna para recepción del escudo.

- Muro de atraque.

- Plataformas en lumbrera.
- Planta de inyección.
- Tuberías y cableado en pared de lumbrera.
- Escalera de caracol y elevador de personal.

Cuna para recepción del escudo.

La cuna es una estructura de concreto reforzado, anclada a la losa de fondo de la lumbrera, cuya finalidad es proporcionar apoyo al escudo y conformar un elemento de continuidad del túnel en la lumbrera. Sus dimensiones están dadas en función de los datos del proyecto y del escudo propiamente dicho. La cuna cuenta con tres rieles a todo lo largo de su cara superior, ahogados en el concreto, cuyo objetivo es facilitar el deslizamiento del escudo durante los empujes; debe tenerse especial cuidado en el alineamiento y nivel de estos rieles, porque son la guía del escudo. Asimismo, se dejan preparaciones a base de acero estructural en los hombros de la cuna, sobre los cuales se apoye posteriormente una plataforma de trabajo en el fondo de la lumbrera. Es indispensable que la cuna se construya en dos o tres secciones, dejando pasillos entre éstas para que el fondo de la lumbrera quede comunicado, formando un cárcamo de captación del agua proveniente del túnel, la cual se bombea a la superficie. Existen algunas variantes en cuanto al diseño básico de una cuna, las cuales se aplican cuando el escudo va a sufrir un cambio de dirección al término de la excavación de un tramo de túnel e inicio de otro.

Muro de atraque.

En forma similar a la de cualquier escudo, el de frente presurizado requiere de un muro de atraque, que es una estructura de concreto reforzado anclada a la pared de la lumbrera, orientada transversalmente respecto al eje del túnel cuya finalidad es servir de apoyo a los semianillos de dovelas (anillos provisionales)

sobre los cuales reaccionan los gatos de empuje del escudo, al momento de efectuar los primeros empujes.

En caso de que el escudo haya sido girado, probablemente ya no sea posible construir el muro de concreto, ya que la pared de la lumbrera habrá perdido continuidad; entonces, puede construirse un atraque tubular o de perfiles estructurales, cuya función será exactamente la misma.

Sello de salida.

Este dispositivo tiene como objeto proporcionar un elemento de contención que impida la circulación del lodo del frente hacia la lumbrera, por la holgura existente entre la camisa del escudo y la pared de la excavación, durante los primeros empujes.

El sello consiste en un conjunto de anillos metálicos y de hule, de diferentes diámetros, que atornillados entre sí forman uno solo, permitiendo por su interior el paso del escudo. Los anillos que conforman el sello de salida para el escudo de frente presurizado de 6.24 m de diámetro, son los siguientes:

- a) Anillo metálico, formado por un ángulo rolado de 100 x 100 x 13 mm y 6.40m de diámetro interior.
- b) Anillo de hule natural de 25 mm (1") de espesor y 46.50 cm de ancho, con un diámetro interior de 5.66 m.
- c) Anillo metálico de placa de acero estructural de 19 mm (3/4") de espesor y diámetro interior de 6.30 m. Es importante mencionar, que al construir la estructura del sello de salida se suelda una válvula en la parte superior del anillo metálico, cuya función es liberar el aire atrapado al momento de iniciar la presurización con lodo de la cámara frontal del escudo.

Plataformas en lumbrera.

Al iniciar la excavación con un escudo de frente presurizado, se cuenta exclusivamente con el espacio del interior de la lumbrera para alojar el tren de

equipo, cuya longitud aproximada instalada en el túnel es de 50 m. Por lo anterior, se hace necesario un acomodo especial de los carros que lo integran. Para ello se construyen plataformas ancladas a la pared de la lumbrera, a una elevación mayor que la de la cuna del escudo, con las cuales se optimiza el espacio; de esta forma, al iniciar los trabajos de excavación, la ubicación del tren de equipo no interferirá con las actividades que se realicen en el fondo de la lumbrera, tales como demolición, rezaga y colocación de semi anillos.

Conforme la excavación del túnel avanza, el equipo se va instalando en su interior, hasta que las plataformas quedan de la siguiente manera: mezcladora (agitador), dosificador para agua, plataforma de trabajo y almacenaje de bentonita.

En este tipo de planta la dosificación se efectúa en forma semiautomática, de acuerdo a las especificaciones de obra. No es indispensable que la planta de inyección se instale en el interior de la lumbrera; puede ubicarse en superficie, junto al brocal, y estar formada por elementos más simples. La dosificación se efectúa manualmente.

Tuberías y cableado en pared de lumbrera.

Algunas de las tuberías que se tienden en superficie se prolongan hasta el túnel por el muro de la lumbrera (achique, suministro de aire y agua). De igual forma, el cableado de los diversos equipos eléctricos que se emplean durante la excavación debe llevarse por el muro de la lumbrera, para ser introducido posteriormente al túnel.

Escalera de caracol y elevador de personal.

Para el acceso del personal se requiere la instalación de una escalera de caracol, debidamente protegida, adosada al muro de la lumbrera. Opcionalmente se puede utilizar un elevador de personal.

Trabajos previos al inicio de la excavación.

Se denomina como "trabajos previos al inicio de la excavación", aquellas actividades que se realizan cuando están terminadas las instalaciones en superficie, lumbrera y el escudo se encuentra en condiciones de operar. Estos trabajos son:

- Instalación de los dientes sobre cortadores.
- Demolición de la pared y de la inyección perimetral de lumbrera.
- Colocación de semianillos de atraque.

Instalación de los dientes sobre cortadores.

La función de los sobre cortadores, que se instalan en el cabezal cortador del escudo, es reducir la fricción entre el suelo tratado y la camisa del escudo.

Demolición de la pared y de la inyección perimetral de lumbrera.

La pared de la lumbrera se demuele con martillos neumáticos, por etapas, hasta tener contacto con el suelo mejorado, con el siguiente procedimiento:

- a) Primero se ranura el concreto, formando una cuadrícula (sin alcanzar la zona de la inyección perimetral). El hueco demolido debe ser geométricamente mayor que el diámetro del escudo.
- b) Una vez hecho lo anterior, se procede a cortar el acero de refuerzo y a retirar los bloques de concreto, de arriba hacia abajo.
- c) Se limpia la zona de escombros y material suelto. Al realizar estas actividades, deben tomarse las precauciones necesarias para que en caso de presentarse cualquier indicio de falla del frente, pueda controlarse adecuadamente (contar con madera para ademar, tubería para canalizar flujos de agua). Asimismo, es de vital importancia que estos trabajos se realicen con la mayor rapidez.

4.7 Extracción, bajada y giro del escudo.

La excavación de túneles con escudo requiere de maniobras para el movimiento del equipo del punto de terminación de un túnel al punto de inicio de otro. Estas maniobras presentan características especiales cuando se trata de un escudo de frente presurizado de 8.13 m de diámetro.

Extracción del escudo.

Para la maniobra de extracción es necesario aligerar el escudo, que tiene un peso total aproximado de 240 t; para tal efecto, se desmontan primero las siguientes estructuras:

- Cabezal cortador
- Plataformas de trabajo
- Faldón

El Peso total aproximado de los componentes anteriores es de = 40 t.

Posteriormente se sueldan, en la cara exterior de la camisa del escudo, unos canales de acero estructural, cuya función es la de alojar los estrobos con los que se sujeta la máquina, impidiendo que éstos se deslicen a lo largo de su eje. Con esto, el peso total a levantar se reduce a 200 t. El movimiento se realiza con dos o tres grúas de 250 a 350 t de capacidad cada una, dependiendo del área disponible en superficie tomando en cuenta la inclinación de la pluma de las grúas, así como las posibilidades de giro, avance y/o retroceso) Una vez en superficie, el transporte del escudo de una obra a otra, se efectúa sobre una plataforma autoalineable de 96 llantas.

Bajada del escudo.

Esta maniobra se realiza de forma similar a la extracción, moviendo primero al fondo de la lumbrera el cuerpo del escudo y posteriormente el cabezal y las plataformas. Es importante tomar en cuenta que no sólo se requieren grúas para el movimiento del escudo en sí, sino que también son necesarias para las maniobras de retiro o reinstalación del cabezal, aunque de mucho menor capacidad.

Giro del escudo.

En ocasiones es necesario girar el escudo en el fondo de la lumbrera para continuar con la excavación del otro tramo de un mismo túnel. Para ello se puede emplear una cuna cruzada o una cuna metálica.

Una cuna cruzada es convencional, construida con concreto armado y anclada al fondo de la lumbrera, cuya característica especial consiste en tener dos superficies de deslizamiento con diferente dirección: una de ellas es la de llegada del escudo y la otra la de salida. Esto requiere que el escudo sea izado, por medio de grúas, de su posición original y bajado nuevamente en la posición que se requiere para el inicio del nuevo tramo.

La cuna metálica se construye con perfiles estructurales. De acuerdo a la elevación de proyecto ésta puede no requerir el empleo de grúas; sin embargo, es necesario instalar sobre la losa de fondo de la lumbrera un sistema de rieles sobre el cual se deslizará la cuna metálica, desde la posición de llegada hasta la posición de salida del escudo. Además, deben colocarse varios gatos hidráulicos en la pared de la lumbrera, mismos que al reaccionar contra la cuna, provocaran el movimiento de ésta.

Equipo complementario y sus funciones

Dentro del proceso constructivo de un túnel excavado con un escudo de frente cerrado y presurizado con lodos, es necesario contar con un equipo complementario para el sistema de excavación, el cual se divide en:

- Equipo en superficie
- Equipo en túnel

Equipo en superficie.

a) Grúa pórtico para 8 t o grúa autopropulsada con capacidad equivalente. Se requiere para bajar todos los materiales y equipo que se necesitan en la excavación del túnel como son: dovelas, durmientes, rieles, tuberías, bombas, transformadores. Normalmente, se ha utilizado la grúa pórtico en la excavación de túneles con escudo, tomando en cuenta la visibilidad que se tiene hasta el fondo de la lumbrera, pero queda a juicio del contratista estabilizar ésta o usar una grúa autopropulsada de capacidad equivalente.

b) Planta dosificadora o agitadores de 2.0 m³ de capacidad. Equipo con el que se elabora el mortero utilizado en la inyección de contacto dovela-terreno natural utilizado para llenar el espacio anular que queda entre la dovela y el terreno.

c) Draga. Se utiliza en la planta de lodos para rezagar el material sólido producto de la sedimentación de los cárcamos, que reciben el material de excavación. Se debe usar con una almeja sin dientes y sin barrenos para evitar que se vacíe el lodo al momento de rezagar.

d) Bombas de lodos de 15 cm y 20 h.p. Se requieren para cargar los camiones pipa con el lodo producto de la excavación del túnel para transportarlo al tiro.

e) Bomba de 10 cm y 20 h.p. Se utilizan en el manejo del agua tratada en la planta de lodos, para mantener uniforme la densidad que requiere el escudo en la fosa de suministro y limpieza general de la planta.

f) Agitador vertical. Se requiere para ajustar la densidad del lodo, después de que éste ha pasado por el proceso de sedimentación y puede utilizarse nuevamente en la excavación.

g) Bomba de lados de 15 cm. Se emplea para el traspaleo de lados del cárcamo de descarga al de suministro.

h) Planta generadora de energía eléctrica de 125 kva. Se requiere en casos de emergencia, cuando el suministro de energía eléctrica se suspende.

La capacidad de la planta debe ser la necesaria para mantener únicamente la iluminación del túnel, ya que el escudo cuenta con un sistema de seguridad propio que cierra las válvulas del by-pass, manteniendo el frente presurizado en el momento del corte de la energía eléctrica.

i) Compresor de 600 a 700 p.c.m. Suministra el aire comprimido para el equipo neumático que se encuentra tanto en el interior del túnel como en superficie.

j) Equipo para talleres. Se debe contar con el equipo necesario para cada uno de los siguientes talleres: carpintería, mecánico y eléctrico.

k) Camión-pipa. Se utiliza para transportar el lodo de desecho de la obra al tiradero oficial.

l) Camión de volteo. Equipo que se encarga de llevar el material sólido producto de la sedimentación en los cárcamos al tiradero oficial.

Equipo en el túnel.

- a) Locomotoras. Son las encargadas de transportar los vagones en los cuales se transportan tanto materiales como el equipo que será utilizado en el frente de excavación. Pueden ser eléctricas o de diesel y con capacidad de tracción mínima de 25 t.
- b) Vagones. Se necesitan para llevar al frente los materiales requeridos en la excavación del túnel. Es necesario que estén habilitados de tal forma que la plataforma tenga una curvatura igual al de las dovelas para facilitar la carga y el manejo de las mismas.
- c) Vagón-tolva. Es un vagón que está equiparado con una tolva de 2.0 m³ de capacidad y una bomba para inyectar mortero a una presión de 1 .5 kg/cm². Se usa para transportar el mortero, elaborado en la planta dosificadora o en los agitadores, al frente de excavación, al fin de que al momento de efectuar ésta, se realice simultáneamente la inyección de contacto en el anillo saliente del faldón del escudo.

4.8 Excavación de túnel

Avance y conducción del escudo

Como se ha mencionado, por medio de los 24 gatos de empuje, el escudo avanza y es conducido durante la excavación de acuerdo a los requerimientos del proyecto. Para realizar con éxito la excavación de un túnel, no se debe perder de vista que cada empuje debe responder a una planeación general de la conducción del escudo, por lo que cualquier corrección a las desviaciones que se presenten respecto a la línea de proyecto, debe ser estudiada detenidamente.

Empujes

Al iniciar cada ciclo de excavación, para efectuar cada empuje se deben considerar los siguientes factores:

- Topografía.
- Posición y orientación del escudo.
- Espacio anular entre anillos de dovelas y faldón del escudo.
- Volumen excavado y volumen desplazado durante los empujes.
- Formas de avance.

-Topografía

Es necesario conocer la elevación y posición con respecto al alineamiento de proyecto del último anillo colocado dentro del faldón, así como de los anillos anteriores, para verificar si los resultados de los empujes previos corresponden a lo planeado. En función de esta verificación se determina la necesidad de programar las modificaciones o correcciones que se consideren necesarias.

-Posición y orientación del escudo

El escudo cuenta con los dispositivos (clinómetros) para indicar en forma constante la posición con respecto a su eje longitudinal (*pitching*) y respecto a su eje vertical (*rolling*). El "*pitching*" determina las acciones inmediatas por ejecutar, para corregir desviaciones, en caso de que existan.

-Espacio anular entre anillos de dovelas y faldón del escudo

Es el espacio existente entre el diámetro exterior del anillo de dovelas y el diámetro interior del faldón del escudo (gálibos). Por especificación, la separación mínima que debe existir es de 5 mm. En todos los empujes se debe cuidar que la separación entre dovelas y faldón no rebase la separación mínima, para evitar que al pegarse el revestimiento primario y el cuerpo del escudo, se generen en las dovelas esfuerzos que puedan dañarlas, lo que además puede dañar los sellos de neopreno en esa zona, provocando, que se presenten fugas de mortero de la inyección, así como lodo proveniente del frente al interior del escudo. La posición ideal es mantener concéntricos los anillos con respecto al

faldón del escudo. Cuando se requiere despegar el escudo del endovelado, se dejan de usar de 2 a 4 gatos de empuje en la zona donde las dovelas y el faldón se encuentran pegados, para provocar un desbalanceo de las fuerzas aplicadas en el empuje, lo que hará que el escudo avance menos en esa zona, lográndose de esta manera despegar las dovelas del faldón.

-Volumen excavado y volumen desplazado durante los empujes

En la consola del control central se cuenta con una computadora que va calculando, en forma continua, la relación entre el volumen excavado (V_e) y el volumen desplazado (V_d), que debe mantenerse en la unidad para evitar sobre excavación o inducir esfuerzos de compresión en el terreno.

Volumen excavado. Es la cantidad de material que pasa por las compuertas de control de excavación. Es determinado por la computadora a partir de los datos registrados por los medidores de flujo de suministro y extracción de lodos.

Volumen desplazado. Es el volumen ocupado por el escudo durante su avance. Es determinado por la computadora a partir de los datos registrados por los sensores de carrera de los gatos de empuje.

Cuando la relación V_e/V_d es menor que la unidad, indica que se está empujando el terreno, lo que implica que se debe ajustar la velocidad del avance del escudo o abrir más las compuertas de control de excavación.

Formas de avance

Los controles independientes para desplazamiento de la cabeza cortadora y de los gatos de empuje permiten al escudo tener dos formas de avance.

Avance alternado. Es la repetición del ciclo que a continuación se indica, hasta que los gatos de empuje estén totalmente extendidos.

a) El cuerpo del escudo avanza cortando el terreno; la cabeza cortadora mantiene una presión contra el frente, sin girar, con las compuertas de control de excavación cerradas. Se va retrayendo el gato de la cabeza cortadora conservando la presión del frente.

b) Una vez que el cuerpo del escudo tiene un avance de 40 cm, se detiene para iniciar la excavación, la que se efectúa con la cabeza cortadora avanzando 40cm, girando con las compuertas de control de excavación abiertas, mientras el cuerpo del escudo permanece fijo con respecto al suelo. La repetición de este ciclo se efectúa hasta concluir el empuje. Esta forma de avanzar se recomienda para familiarizarse con la operación del escudo.

Avance simultáneo. En esta forma de trabajo el cuerpo del escudo y la cabeza cortadora avanza simultáneamente. Esto se hace extendiendo los gatos de empuje con la cabeza cortadora girando y manteniendo fijo su desplazamiento.

Inyección de contacto entre dovela y terreno

Al avanzar el escudo y salir las dovelas de un espacio anular que corresponde al espesor y la holgura de las dovelas respecto al mismo. Debe ser inyectada de manera inmediata la mezcla de inyección, para evitar asentamientos en superficie. Una vez que los anillos van saliendo del faldón del escudo la dosificación de la mezcla de inyección utilizada de 0.5 m³ es:

Cemento:	200 kg.
Arena sílica:	0.243 m ³
Bentonita:	50 kg.
Agua:	380 lt.

La inyección está limitada a 1.5 kg/cm² de presión ó 2.0 m³ de mezcla por anillo (lo que ocurra primero).

4.8.1 Procedimiento de construcción

Excavación de 50 m iniciales

Al inicio de la excavación de un tramo de túnel, el equipo del escudo se instala en la lumbrera. La introducción de este equipo, se realiza durante el avance de los primeros 50 m. de túnel, que es la longitud que ocupa el tren, el cual posteriormente es remolcado por el propio escudo. La excavación de los 50 m iniciales se pueden dividir en dos etapas:

a) Excavación de los primeros 5 m de túnel

Una vez que el escudo está próximo a la zona de mejoramiento del suelo, debe cruzar 4 m de un material con resistencia aproximada de 20 kg/cm², lo que hace necesario la colocación de los dientes de sobre-excavación, para liberar el cuerpo del escudo de fricciones adicionales. El proceso para la instalación de estos dientes es el siguiente:

- Expandir el gato de la cabeza cortadora los 40 cm. de carrera.
- Girar la cabeza cortadora, con pequeños impulsos, para que las preparaciones para los dientes queden cerca de una de las puertas de inspección de la cámara presurizada.
- Colocar los dientes de sobre-excavación. Nunca se debe retraer la cabeza cortadora con los dientes de sobre-excavación colocados.

Una vez que se instalaron los dientes de sobre-excavación, se procede al llenado de la cámara presurizada (con agua tratada proveniente de la planta de tratamiento) y del espacio que existe entre el cuerpo del escudo y sello de salida de la lumbrera, hasta alcanzar una presión de 1.0 kg/cm². El aire atrapado es expulsado por la válvula colocada en la parte superior del sello de salida

Posteriormente se operan la cabeza cortadora y los gatos de empuje (apoyándose en los anillos de atraque) para iniciar el movimiento del escudo.

Una vez que el escudo tiene 1 m de avance, se procede a la colocación de los anillos de dovelas y así sucesivamente.

Al cruzar la zona de mejoramiento del suelo es frecuente que se presenten taponamientos en la tubería de extracción de lodo. El procedimiento para destapar la línea, es desconectar las mangueras flexibles para intercambiar los ductos de suministro y extracción de lodo. El flujo de lodo en dirección opuesta debe liberar la línea del obstáculo existente. Si el taponamiento continua, se debe buscar el obstáculo, desacoplando la tubería en otros puntos, tales como cambios de dirección. El avance del escudo durante su penetración en el terreno, se debe efectuar en forma horizontal para eliminar la posibilidad de que el cuerpo del escudo pueda golpearse con el marco metálico del sello de salida.

Una vez que la cabeza cortadora cruza la zona tratada, se deben retirar los dientes de sobre-excavación. Asimismo, se debe ajustar la presión frontal, de acuerdo a lo indicado en el estudio de mecánica de suelos o se puede determinar aumentando, en 0.2 kg/cm^2 , la presión señalada en el manómetro instalado en la mampara metálica. Este segundo procedimiento, se efectúa manteniendo el lodo de la cámara presurizada en reposo, con las válvulas de suministro y extracción cerradas.

Cuando el escudo se introduce totalmente en el sello de salida de la lumbrera, se deben cerrar las placas perimetrales del marco metálico, para evitar que el sello de hule se regrese. La primera inyección entre dovelas y terreno, que normalmente se efectúa durante el empuje para el cuarto anillo de túnel, no se

limita en volumen, debido a que es necesario inyectar el espacio entre dovelas y sello de salida de la lumbrera.

b) Excavación de los siguientes 45 m.

La instalación en túnel del tren de equipo se efectúa de acuerdo al avance de la excavación. La longitud del tren de equipos es de 40 m, con la carrera de la tubería telescópica retraída. Como se ha mencionado, el tren de equipo consta de 4 módulos y una unidad de tubería telescópica, que van instalándose en el túnel a medida que se tiene el espacio para cada módulo. A continuación se indica la secuencia de instalación del equipo en túnel:

El modulo número 1, se instala al tener 8 m de avance

El modulo número 2, se instala al tener 15 m de avance

El modulo número 3, se instala al tener 21 m de avance

La unidad de tubería telescópica, se instala al tener 45 m de túnel, lo que permite avanzar hasta 51 m antes de iniciar la colocación de las dovelas la excavación de los metros subsecuentes se vuelve cíclica, es decir, empujar, inyectar, colocar dovelas y colocar las instalaciones de acuerdo al avance.

Retiro de anillos de atraque

Cuando el túnel tiene una longitud de 60 m aproximadamente, se pueden retirar los semianillos de atraque, ya que esta longitud permite absorber la fuerza de los gatos de empuje del escudo, sin desplazar los anillos instalados. Los anillos de atraque deben almacenarse para usarse nuevamente en otro tramo de excavación. Para facilitar el suministro de dovelas y materiales al túnel, en la zona de clave de los semianillos de atraque se coloca una estructura tubular, para sustituir las dovelas faltantes.

Procedimiento para terminación de excavación

Al finalizar la excavación de un tramo, el escudo debe cruzar por una zona de mejoramiento del suelo, similar al de la salida de lumbrera. A continuación se indica el procedimiento requerido para terminar la excavación de un tramo, así como la colocación del escudo en la lumbrera de llegada:

1. Cuando la cabeza cortadora se encuentra a 1.0 m del muro de la lumbrera, se despresuriza la cámara de mezclado, debido a que ya no es necesario utilizar el sistema de circulación de lodos. Asimismo se suspende la inyección de contacto.
2. Se realiza la demolición de una parte del muro de la lumbrera, y se descubre parcialmente la cabeza cortadora, para ubicar físicamente la posición del escudo y definir el área total que se demolerá.
3. Al finalizar la demolición del muro, se avanza el escudo sin girar la cabeza cortadora, para empujar el material del frente al interior de la lumbrera, de donde es extraído posteriormente. El escudo se avanza hasta que la cabeza cortadora llegue al paño de la lumbrera.
4. El escudo es recibido en la lumbrera en una cuna, que puede ser de concreto o metálica. Una vez verificado el nivel de la cuna, el escudo avanza hasta quedar sobre dicha cuna.
5. Cuando el escudo termina su desplazamiento, se procede a retirar los anillos que no forman parte del túnel, pero que se requieren para apoyo y colocación del escudo en el centro de la lumbrera. Estos anillos son reutilizados.
6. El espacio perimetral entre dovelas y muro de lumbrera, se calafatea para efectuar la inyección entre dovelas y terreno, que había sido suspendida, terminando con esta actividad la excavación.

Casos de emergencia

Para solucionar eventuales inestabilidades en el frente, el cuerpo del escudo cuenta con 12 preparaciones, localizadas junto a la mampara. Cada preparación cuenta con una válvula.

Por medio de estas preparaciones, se pueden hincar hacia el frente tuberías y a través de ellas efectuar un tratamiento de inyección para mejorar el suelo y poder continuar con la excavación del túnel. El tipo de mezcla y volumen por inyectar debe estudiarse previamente. La inyección debe efectuarse con las compuertas de control de excavación cerradas totalmente.

CONCLUSIONES

- El Túnel Emisor Oriente tiene como objetivo particular reforzar el sistema principal de drenaje actual y eliminar o disminuir fuertemente riesgos de falla en la zona metropolitana que provocaría inundaciones en una parte del Distrito Federal y de su zona conurbada del Estado de México lo que se traduce a ser una obra de emergencia de alta complejidad.
Se debe tener toda la información necesaria, basarse en la ingeniería que existe y experiencia aprovechable de las obras anteriormente construidas como el Túnel Emisor Central o el Túnel Río de la Compañía.
- El alcance del proyecto comprende la construcción del túnel emisor y sus obras auxiliares: construcción de 23 lumbreras, 18 con un diámetro de 12m, 5 con un diámetro de 16 m y una longitud del túnel de 62 km. El objetivo último de la ingeniería y de la construcción es proporcionar una obra útil y segura, en servicio en un tiempo determinado.
- La urgencia de las obras de gran importancia en nuestro país, requiere de acciones emergentes, es por eso que el contrato del Túnel Emisor Oriente se dió por adjudicación directa, lo cual impacta mucho en los procesos y tiempos de construcción.
- Es importante mencionar que esta obra se cataloga como una inversión a largo plazo, y no por el capital que puede generar a futuro, sino por todos los daños y catástrofes que se pueden evitar.
- La versatilidad de las máquinas debe tenerse muy en cuenta en el momento de su elección. El trazo del nuevo túnel tiene especial importancia por las características topográficas y geológicas debido a que en un futuro, durante la construcción del túnel y sus lumbreras se definirán zonas en las que se necesite conocer al detalle verificar o

corroborar las características y propiedades de los materiales que atravesarán.

- La estabilidad de la excavación de un túnel y el trabajo estructural del revestimiento dependen de tres factores: tipo y condiciones del suelo, tipo de soporte y el procedimiento constructivo.
- Dentro de los métodos de excavación de túneles, es la excavación mecánica, entendiéndose como tal la que se realiza mediante la acción directa y continuada de herramientas de corte para excavar, la que ofrece mayores posibilidades de desarrollo y expansión.
- La construcción de un túnel exige métodos y procedimientos que permitan un rendimiento adecuado, manteniendo la estabilidad del entorno. Es la excavación mecánica y el desarrollo de la moderna maquinaria, junto a la tecnología que le es propia, las que consiguen mayores objetivos aportando altos grados de mecanización y automatización.
- Es importante conocer las características y alcances de los escudos excavadores para la construcción de cualquier túnel, sin importar sus dimensiones. La capacitación del personal que va a operar el equipo, así como la planeación del proceso de excavación; son indispensables de lo contrario conllevaría rendimientos muy bajos y problemas con la estabilidad del suelo a excavar.
- La aportación principal que busca este trabajo de investigación, es redactar una referencia de consulta especializada, que contenga información acerca del procedimiento de excavación con escudo del Túnel Emisor Oriente, así como datos complementarios acerca de las máquinas tuneladoras con todos sus componentes y especificaciones,

esto se logra con datos reales y exactos, proporcionados por los fabricantes de las mismas.

- En la actualidad se construyen un gran número de túneles ferroviarios, metropolitanos e hidráulicos y en el horizonte se divisa una nueva época con programación amplia de perforación de nuevos túneles. Es pues, el momento de tener documentos y trabajos especializados que servirán, sin duda, como referencia de consulta de excavación mecánica de túneles.

BIBLIOGRAFÍA.

- Enrique Tamez González, José Luis Rangel, Ernesto Holguín. "Diseño Geotécnico de Túneles", México D.F. (2003).
- Jesús Alberro. "Presiones de Roca en Túneles e Interacción Roca – Revestimiento" Instituto de Ingeniería UNAM (2001).
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. DGCOH "Excavación de Túneles de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, con Escudos Cortadores de Frente Presurizado a base de Lodos"
- Miguel Arenillas Parra. "La Geología y los Túneles "Revista de Obras Públicas Febrero-Marzo México, D.F.
- Laureano Cornejo Álvarez "Excavación Mecánica de Túneles" Ed. Rueda, Madrid (2002).
- Herrenknecht Tunnelvortriebstechnik "Operating Manuals EPB" Alemania (2008).
- Chern J.C., F.Y. Shiao, and C.W. Yu, "An Empirical Safety Criterion for Tunnel Construction". *Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, (1998).
- Carranza-Torres, "Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock-Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion." (2000).

- Hoek, E., "Dimensionamiento del Revestimiento de Túneles". Notas del curso Lombardi, Publicación Especial de la Reunión Presiones de Roca en Revestimiento de Túneles, Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas, México, Nov. (2000).
- O. Dubugnonb, Barendsens "Nail Seale Model Testing a New Approach in TBM Developments" Rapid Excavation and Tunnelling Conference, June – (2004).
- Donu Deerea, "Diverse Geology and TBM Tunnelling Problems" Rapid Excavation and Tunnelling Conference. Canada
- T. Romeo Johannissegn. "Logical Parameters for Hard Rock Tunnel Boring. Tunnels and Tunnelling" April. (2005).
- Túnel, S.A. de C.V. "Memoria Técnica de las Obras de Drenaje Profundo del Distrito Federal" Vol. 1 (2003).
- Túnel, S.A. de C.V. "Memoria Técnica de las Obras de Drenaje Profundo del Distrito Federal" Vol. 2 (2003).
- <http://es.wikipedia.org/wiki/tuneladora>