



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Túnel Emisor Oriente (TEO):
Procedimiento constructivo de una galería
de montaje para ensamble de una máquina
tuneladora.**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

Oscar José Muñoz

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Heriberto Esquivel Castellanos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/045/16

Señor
ÓSCAR JOSÉ MUÑOZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. HERIBERTO ESQUIVEL CASTELLANOS, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO): PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UNA GALERIA DE MONTAJE PARA ENSAMBLE DE UNA MAQUINA TUNELADORA"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA L21-A
- III. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE GALERÍA DE MONTAJE
- IV. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 2 de mayo del 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Dedicatoria y agradecimientos

A mi familia:

Les doy las gracias a Silvia, Oscar y Marian que me cuidaron y apoyaron a lo largo de tantos años, gracias por su cariño incondicional, que a base de esfuerzo, amor y comprensión me han guiado en la vida y han logrado hacer de mi un profesionista.

A mis amigos:

Ustedes has sido importantes en mi paso por la facultad y fuera de ella brindándome su amistad, su consejo y experiencias inolvidables.

A mi asesor el Inq. Heriberto Esquivel Castellanos:

Gracias por su paciencia, dedicación y compromiso ya que con su ayuda fue posible realizar este trabajo.

A la CONAGUA:

Por prestarme la información necesaria para completar este trabajo.

A mis asesores externos:

Un agradecimiento especial a los ingenieros Carlos y Fernando Sáenz, José Anselmo Pérez, Alberto Porras y Fabiola Miranda por compartirme sus conocimiento y experiencias en el tema.

A la UNAM:

Por darme los conocimientos necesarios para desempeñarme en el ámbito profesional y en particular a la Facultad de Ingeniería.

Índice

Capítulo 1: Antecedentes	12
1.1) Antecedentes	12
1.1.1) Justificación del proyecto	13
1.1.2) Proyectos históricos para el desalojo del agua.....	14
1.1.3) Túnel Emisor Oriente (TEO)	18
1.1.3.1) Geología.....	20
1.1.3.2) Geotecnia.....	22
1.1.3.3) Lumbreras.....	23
1.1.3.4) Túnel.....	26
1.1.3.5) Revestimiento primario	27
1.1.3.6) Revestimiento definitivo.....	28
1.2) Excavación con tuneladoras	29
1.2.1) Tuneladoras.....	29
1.2.2) Tipos de escudo.....	30
1.2.3) Escudo de presión de tierra balanceada	35
1.2.4) Partes de una tuneladora	36
1.2.5) Ciclo de excavación	37
Capítulo 2: Procedimiento constructivo de la lumbrera L-21A.....	39
2.1) Geología.....	40
2.2) Componentes estructurales de la lumbrera	40
2.2.1) Brocal.....	41
2.2.2) Revestimiento primario	42
2.2.2.1) Excavación	43
2.2.2.2) Concreto lanzado.....	43
2.2.2.3) Anillos estructurales metálicos	45
2.2.3) Losa de fondo.....	45
2.2.4) Revestimiento definitivo.....	46
2.2.5) Portales de entrada y salida	46

<u>Capítulo 3: Procedimiento constructivo de galería de montaje</u>	47
3.1) Descripción del proyecto	50
3.1.1) Geología.....	51
3.2.1) Procedimiento constructivo	55
3.2.1.1) Media sección superior	55
3.2.1.2) Media sección inferior	63
3.3) Procedimiento de ensamble de máquina tuneladora	65
<u>Capítulo 4: Conclusiones</u>	73
<u>Referencias</u>	77
Anexos	79

Índice de figuras

- Figura 1. Valle de México (Méndez Sánchez, 2003).
- Figura 2. Pérdida de pendiente hidráulica (CONAGUA 2010).
- Figura 3. Crecimiento de la mancha urbana.
- Figura 4. Fotografía de la construcción del Tajo de Nochistongo.
- Figura 5. Desalojo del agua en el Valle de México (CONAGUA, 2012).
- Figura 6. Trazo del TEO.
- Figura 7. Anillo de dovelas de prueba (CONAGUA, 2010).
- Tabla 1. Subdivisión del TEO.
- Figura 8. Límites del Valle de México.
- Figura 9. División geotécnica del TEO.
- Figura 10. Construcción de lumbrera con muro milán (CONAGUA, 2010).
- Figura 11. Construcción de lumbrera con método convencional (CONAGUA, 2010).
- Figura 12. Construcción de lumbrera con la combinación de ambos métodos (CONAGUA, 2010).
- Figura 13. Túnel Emisor Oriente.
- Figura 14. Patio de almacenaje de dovelas (CONAGUA, 2010).
- Figura 15. Procedimiento constructivo para la fabricación de dovelas (CONAGUA, 2010).
- Figura 16. TBM.
- Figura 17. Tipos de escudo (Fabricante de TBM Mitsubishi).
- Figura 18. Escudo de tipo manual.

- Figura 19. Escudo de tipo semimecanizado.
- Figura 20. Escudo de tipo mecanizado.
- Figura 21. Escudo de frente abierto.
- Figura 22. Escudo de frente cerrado.
- Figura 23. Partes una EPB (CONAGUA, 2010).
- Figura 24. Localización de la lumbrera L-21A.
- Figura 25. Lumbrera (CONAGUA, 2010).
- Figura 26. Brocal y muro milán (CONAGUA, 2010).
- Figura 27. Galería de montaje (CONAGUA, 2011).
- Figura 28. Geometría de la galería de montaje (CONAGUA, 2011).
- Figura 29. Distribución de la galería de montaje (CONAGUA, 2007).
- Figura 30. Material de relleno de fondo de la lumbrera (CONAGUA, 2015).
- Figura 31. Demolición del revestimiento primario de la media sección superior (anillos metálicos y concreto) (CONAGUA, 2015).
- Figura 32. Excavación de coyoterías (CONAGUA, 2015).
- Figura 33. Viga rastra (CONAGUA, 2015).
- Figura 34. Excavación para la colocación del primer marco metálico (CONAGUA, 2015).
- Figura 35. Almacén de marcos metálicos (CONAGUA, 2015).
- Figura 36. Excavación de la media sección superior (CONAGUA, 2015).
- Figura 37. Colocación de tensores entre marcos (CONAGUA, 2015).
- Figura 38. Lanzado de concreto en el espacio entre marcos (CONAGUA, 2015).
- Figura 39. Etapas subsecuentes de excavación y revestimiento (CONAGUA, 2015).

- Figura 40. Demolición del revestimiento primario de la media sección inferior (CONAGUA, 2015).
- Figura 41. Colocación de patas (CONAGUA, 2015).
- Figura 42. Bajada de la cabeza de corte y el tornillo sinfín (CONAGUA, 2010).
- Figura 43. Conexión mediante umbilicales entre la cabeza cortadora y los carros 1 y 2 (CONAGUA, 2010).
- Figura 44. Seccionamiento de la galería de montaje (CONAGUA, 2010).
- Figura 45. Cabeza cortadora unida al carro puente (CONAGUA, 2010).
- Figura 46. Principio operativo del escudo EPB (CONAGUA, 2014).

Índice de anexos

- Anexo 1. Geología en el trazo del TEO (CONAGUA, 2010).
- Anexo 2. Características geotécnicas (CONAGUA, 2016).
- Anexo 3. Modelo geotécnico de la lumbrera L-21A (CONAGUA, 2014).
- Anexo 4. Características estratigráficas del trazo (CONAGUA, 2015).
- Anexo 5. Etapas constructivas de la media sección superior (CONAGUA, 2007).
- Anexo 6. Etapas de la construcción de la media sección inferior (CONAGUA, 2007).
- Anexo 7. Etapas del ensamble de la TBM (CONAGUA, 2016).
- Anexo 8. Etapas del ensamble de la TBM (CONAGUA, 2016).

Introducción

A lo largo de los años las inundaciones han sido un tema recurrente en la Ciudad de México, siempre se ha buscado una solución que no implique detener el crecimiento urbano en la Zona Metropolitana generando un problema ya que el lago original se ha estado reduciendo para dar lugar a una ciudad cada vez más grande y con un mayor número de habitantes.

Como una manera de prevención se han construido obras hidráulicas de gran importancia para drenar la cuenca, ya que al quedar cerrada hace 700,000 años la única manera de desalojar el agua de las lluvias era la evaporación.

En la actualidad hay una gran rezaga en las obras, particularmente en lo relativo a la capacidad de descarga, una de ellas es el Túnel Emisor Central, que originalmente se diseñó para desalojar las aguas de lluvia y que más tarde fue utilizado para transportar aguas residuales.

Actualmente está en construcción el Túnel Emisor Oriente (TEO) que apoyara al Túnel Emisor Central en épocas de mantenimiento y que permitirá mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año.

Con relación a este proyecto, la presente tesis tiene como objetivo analizar y describir el procedimiento constructivo de una galería de montaje para el ensamble de una máquina tuneladora. Se analizará el entorno del proyecto, la justificación técnica del procedimiento descrito y que consiste en la construcción de una porción de túnel convencional enfocado a un trabajo específico que involucra instalaciones especiales para el alojamiento y el ensamble de una TBM (por sus siglas en inglés Tunnel Boring Machine) y que se realiza en función de las necesidades particulares del sitio de construcción tales como su geometría, profundidad, seguridad y demás factores técnicos y de proyecto.

Como objetivos específicos se tienen:

- Justificación y descripción del proyecto Túnel Emisor Oriente.
- Excavación mecanizada de túneles.

- Justificación técnica de la galería de montaje.
- Procedimiento constructivo de la galería de montaje y ensamble de la máquina tuneladora.

En el primer capítulo se describen los antecedentes del sistema de desagüe de la Ciudad de México, así como el proyecto del Túnel Emisor Oriente que ayudara a aliviar el sistema de desalojo del agua en la Ciudad de México que actualmente esta en operación y la excavación mecanizada de túneles.

En el segundo capítulo se describe el procedimiento constructivo de una le las lumbreras de montaje con todos los elementos que la conforma como es el brocal, la excavación, el revestimiento primario y el revestimiento definitivo.

En el tercer capítulo se analiza el procedimiento de ensamble y el procedimiento constructivo de una galería de montaje.

Finalmente, se presentan, a manera de conclusión una serie de ventajas y desventajas al ensamblar una TBM por los dos métodos descritos.

Como apoyo, se presentan 8 anexos con la finalidad de facilitar algunos conceptos.

Capítulo 1: Antecedentes

"Qué inapropiado es llamar a este planeta Tierra cuando con claridad es un océano" Arthur C. Clarke

1.1) Antecedentes

El Valle de México es una formación que se origina desde el cuaternario superior junto a la formación de la Sierra del Chichinautzin, hace aproximadamente 700,000 años. Tiene una superficie de 9,560 km² y presenta una variedad de relieves a lo largo de todo el valle, como mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos. Todo esto se presenta en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco; se conforma por 3 secciones: una parte le corresponde al Estado de México, otra al sur del Estado de Hidalgo y el sureste de Tlaxcala y, casi en su totalidad, al Distrito Federal.



Figura 1. Valle de México (Méndez Sánchez, 2003).

1.1.1) Justificación del proyecto

Desde 1930 la ciudad ha crecido exponencialmente, la insuficiencia de los manantiales existentes y su contaminación demandó la sobre explotación de los mantos acuíferos, lo que origina asentamientos regionales.

Por tal motivo se ha ocasionado actualmente la pérdida de pendiente hidráulica del gran canal y por tanto la disminución de la capacidad para sacar las aguas de la Ciudad de México.

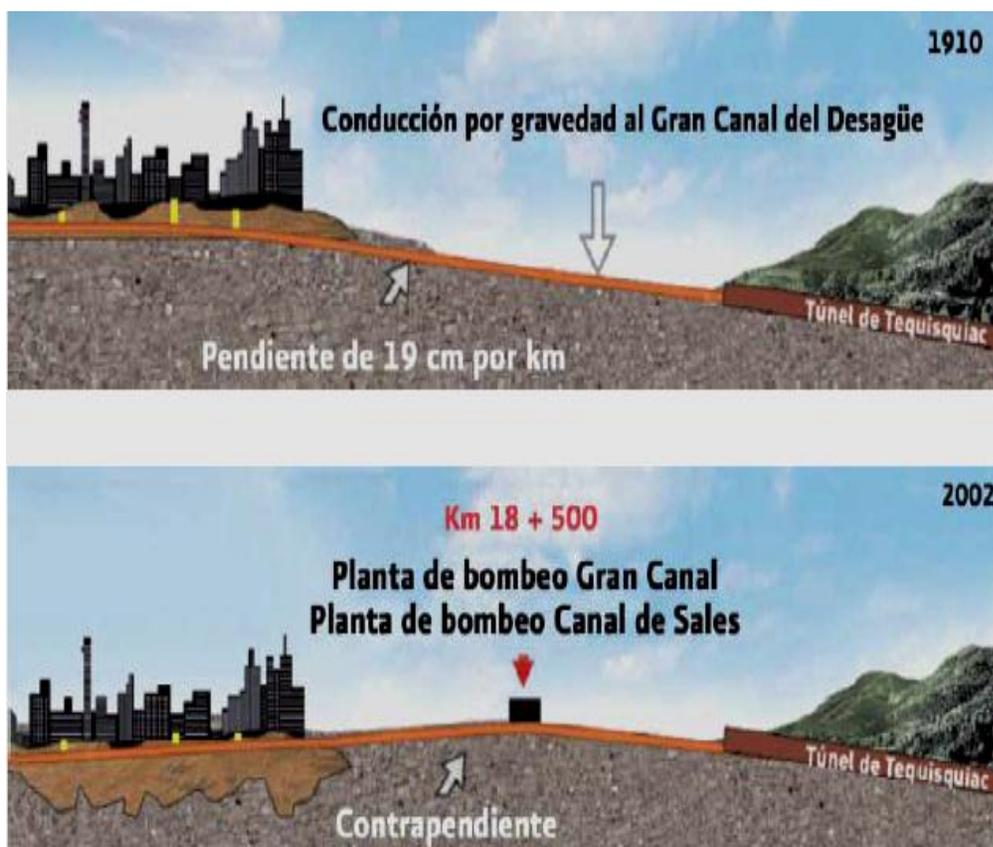


Figura 2. Pérdida de pendiente hidráulica (CONAGUA 2010).

En 2005 se realizaron trabajos de prueba en diversas lumbreras del Emisor Central, con el objetivo de conocer las condiciones actuales del drenaje, encontrando un gran desgaste en el revestimiento lo que representó un aviso urgente para contar con un mantenimiento completo.

En noviembre de 2007, se anunció el programa de sustentabilidad hídrica del Valle de México, en donde se planteó la necesidad de construir el Túnel Emisor Oriente (TEO).

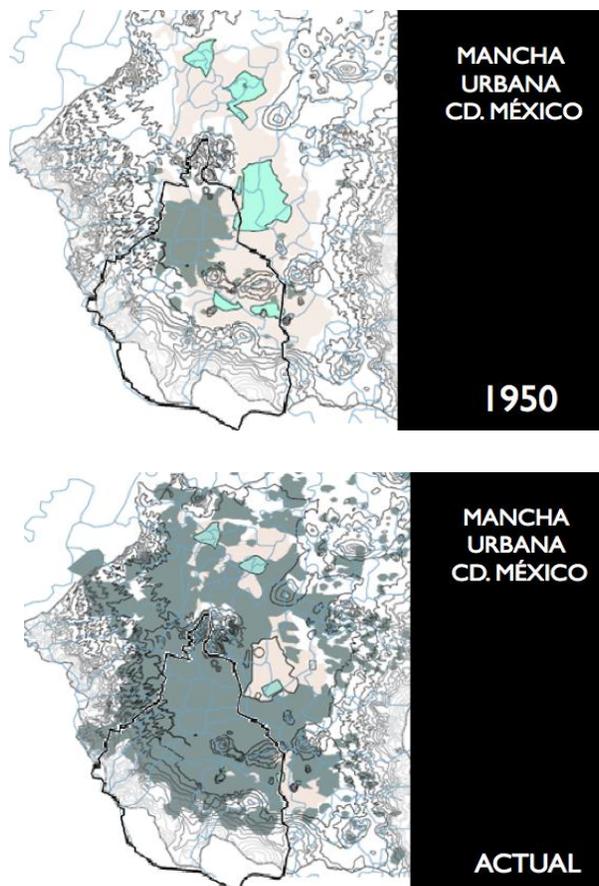


Figura 3. Crecimiento de la mancha urbana.

1.1.2) Proyectos históricos para el desalojo del agua

En orden cronológico:

- Tajo de Nochistongo.
- Gran Canal del Desagüe.
- Túnel Emisor Poniente.
- Túnel Emisor Central.
- Túnel Emisor Oriente.

Tajo de Nochistongo

Construido por Enrico Martínez en 1607, fue la primera salida artificial del Valle de México cuyo propósito era evitar que las aguas del río Cuautitlán afectaran el lago de Texcoco. El proyecto consistió en la construcción de un túnel de 13 km de longitud, teniendo que perforar las montañas para desalojar las aguas y verterlas en el río Tula. La obra terminó aproximadamente ciento cincuenta años después del inicio de su construcción y fue conocida como el Tajo de Nochistongo.

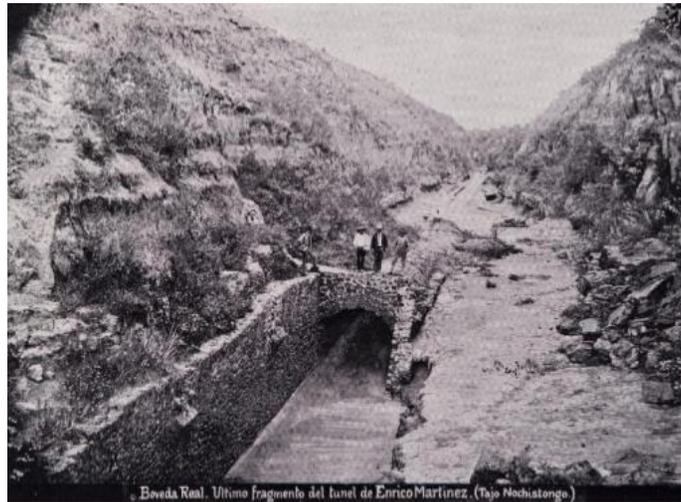


Figura 4. Fotografía de la construcción del Tajo de Nochistongo.

Gran Canal del Desagüe

El emperador Maximiliano de Habsburgo autorizó el proyecto del Gran Canal del Desagüe y el Túnel Tequixquiac y fue Francisco de Garay en 1867 quien comenzó formalmente los trabajos; y en 1900 durante el mandato de Porfirio Díaz se inauguraron los trabajos. La obra fue realizada en 1943. El proyecto contó con la construcción de un canal, un túnel y un tajo de salida. Comienza al oriente de la ciudad, en la Garita de San Lázaro, cuenta con 24 lumbreras de dos metros de ancho con sección transversal con forma ovalada, a la salida del túnel se encuentra el tajo de desemboque de 2.5 km de longitud, que se une con el río Tequixquiac.

Túnel Emisor Poniente

A partir de la década de los años veinte se realizó la construcción del sistema de presas del poniente; y desde 1961 la obra Interceptor Poniente con una longitud de 16.5 km para recibir descargas de caudales de dichas presas, que son conducidos por un sistema de túneles, conduciendo un caudal de 25 m³/s.

Entre 1963 y 1964 la obra se amplió con el Emisor Poniente a 32 km y a su capacidad a 80 m³/s, llevando las aguas pluviales hacia el río Cuautitlán, la Laguna de Zumpango y el Tajo de Nochistongo. El trazo del interceptor va de Naucalpan a Tepotzotlán en el Estado de México, recibe las descargas de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Hondo de Tepotzotlán, los cuales son regulados previamente por las presas Madín, San Juan, Las Ruinas, Guadalupe y La Concepción, en el Estado de México.

Con la operación del túnel se evitó que las aguas del poniente de la ciudad descargarán en la ciudad sin ningún control.

Túnel Emisor Central

El drenaje profundo comenzó a construirse en 1967 integrado por un Túnel Emisor Central (TEC) y nueve interceptores. Fue en 1975 cuando finalmente concluyó la obra del Emisor Central, la componente principal del actual drenaje profundo. Su trazo inicia en Cuauhtepec y concluye en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, el túnel descarga en el río El Salto y continúa hasta el Distrito de Riego 3 del Valle del Mezquital, cuenta con una capacidad máxima de 200 m³/s. En una segunda etapa se construyeron los interceptores oriente y central, túneles que confluyen en el Emisor Central.

El Interceptor Oriente con 10 km de largo se construyó para aliviar al Gran Canal, y el interceptor central de 8 km de largo aliviaría la parte central y norte de la ciudad.

La conducción del drenaje se hace por gravedad a través de túneles desde la Ciudad de México hasta el desagüe del sistema en el río El Salto. Desde su origen el drenaje maneja aguas pluviales, sin embargo, en 1992 como resultado de la pérdida de nivel del Gran Canal se empezó a conducir aguas negras que recibe del Interceptor Oriente y del Central.

Actualmente, el sistema de drenaje profundo cuenta con el Emisor Central, Interceptor Central, Interceptor Centro-Centro, Interceptor Oriente, Interceptor Centro-Oriente, Interceptor del Poniente, Interceptor Iztapalapa, Interceptor Obrero Mundial, Interceptor Oriente Sur, Canal Nacional-Canal Chalco.

Con la construcción del Túnel Emisor Oriente se permitirá mitigar el riesgo de inundación en la Zona Metropolitana del Valle de México, al aumentar la capacidad de desalojo de las aguas residuales en 150 m³/s, a pesar de que el Emisor Central es el ducto del cual depende la seguridad del desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle, existe la necesidad de cerrarlo durante los meses de estiaje para su reparación y mantenimiento. Esto crea la necesidad de disponer de un emisor alternativo que permita mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año.

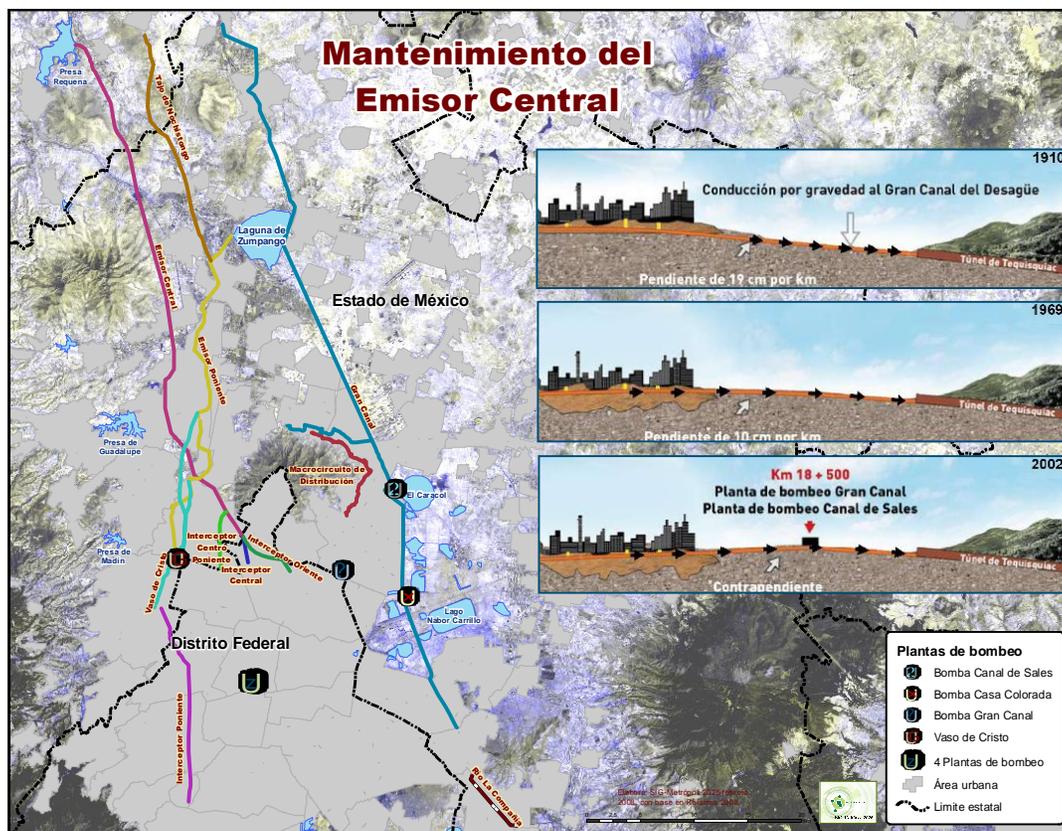


Figura 5. Desalojo del agua en el Valle de México (CONAGUA, 2012).

1.1.3 Túnel Emisor Oriente (TEO)

Esta obra de ingeniería tendrá una capacidad de desalojo de 150 m³/s y permitirá contar con una salida complementaria y alterna al Emisor Central disminuyendo el riesgo de inundación de la Ciudad de México y su zona conurbada, dando seguridad a 20 millones de habitantes y funcionará en temporada de lluvias de manera simultánea con el actual Túnel Emisor Central y alternadamente en época de estiaje, para facilitar su mantenimiento.

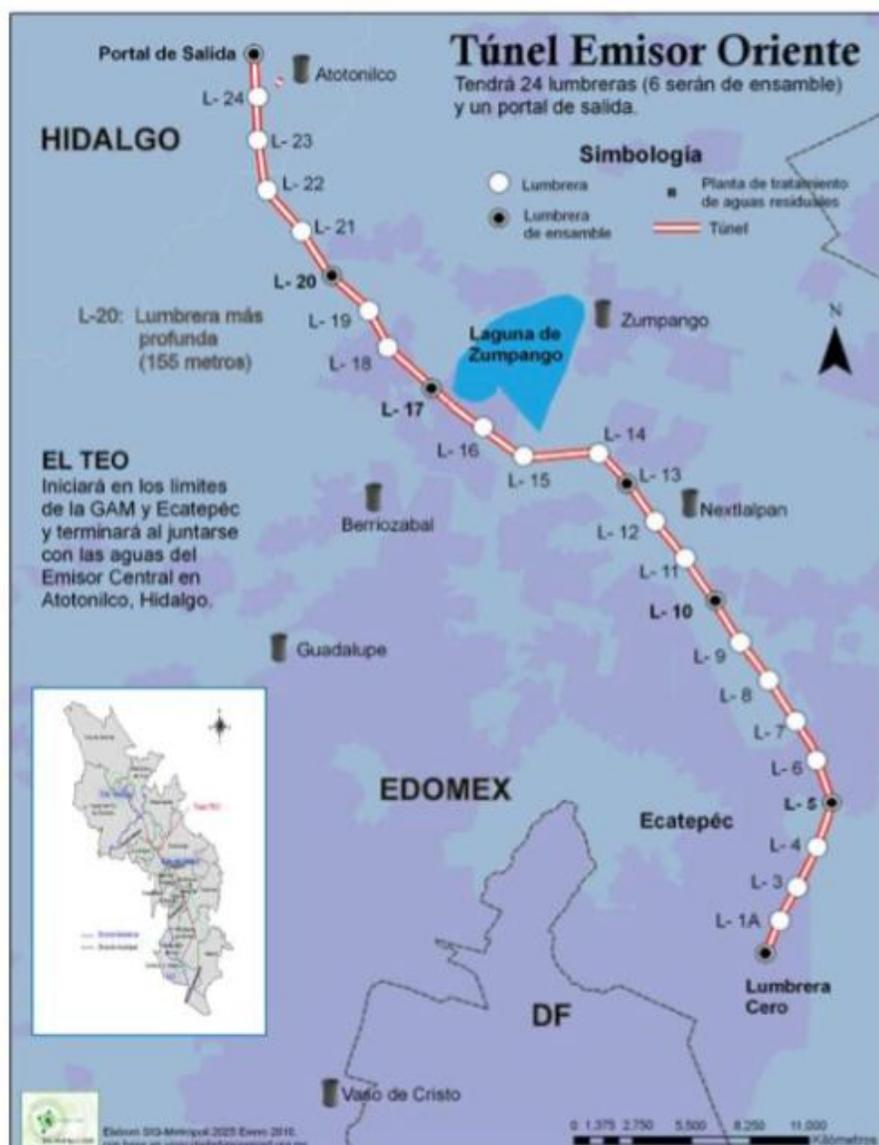


Figura 6. Trazo del TEO.

Este proyecto permitirá:

- Disminuir el riesgo de inundaciones en el Valle de México.
- Ampliar la capacidad de desagüe de la Ciudad de México.
- Crear un procedimiento de mantenimiento alternado entre el Emisor Central y Oriente sin suspender su funcionamiento.

Con la finalidad de dar cumplimiento al programa general de obra, fue necesario subdividir el Túnel Emisor Oriente en seis tramos, los cuales se construyen de manera independiente.

El proyecto es tan ambicioso y los plazos tan cortos que se necesitan no una sino seis perforadoras para realizar dicha construcción, esto se hace con tuneladoras TBM, del tipo EPB (por sus siglas en inglés Earth Pressure Balance), diseñadas para el tipo de suelo de esta región.

En total se contempla colocar 41,000 anillos de dovelas de concreto como revestimiento primario, que conformarán los 62 km de túnel, 24 lumbreras, de 12 y 16 m de diámetro a profundidades desde 40 y hasta 150 m y un portal de salida.



Figura 7. Anillo de dovelas de prueba (CONAGUA, 2010).

TRAMO	LUMBRERAS	PROFUNDIDAD	CADENAMIENTO	LONGITUD DEL TRAMO [km]	LONGITUD DEL TRAMO POR EMPRESA [km]
1	L-00	23.29	0+000.000	10.05	21.64
	L-1A	32.63	2+753.213		
	L-3	41.24	5+398.135		
	L-4	45.81	8+207.963		
2	L-5	48.72	10+053.591	11.58	
	L-6	55.22	11+475.642		
	L-7	60.85	13+486.633		
	L-8	65.74	16+031.712		
	L-9	69.87	18+843.767		
3	L-10	72.54	21+635.101	9.16	
	L-11	80.55	24+766.927		
	L-12	80.39	27+603.115		
4	L-13	88.59	30+793.443	10.20	19.36
	L-14	96.13	33+416.090		
	L-15	101.14	35+865.083		
	L-16	107.67	38+533.131		
5	L-17	115.18	40+994.886	8.64	8.64
	L-18	126.42	44+303.970		
	L-19	130.83	46+698.890		
6	L-20	148.15	49+631.890	12.17	12.17
	L-21	122.83	52+518.211		
	L-22	110.22	54+822.982		
	L-23	86.67	57+478.729		
	L-24	85.40	58+933.586		
	Portal de salida	23.19	61+802.948		

Tabla 1. Subdivisión del TEO.

1.1.3.1) Geología

El Valle de México está limitado al norte por la Sierra de Pachuca (1) y la Sierra de Tezontlalpan, al este por la Sierra Nevada (7), la Sierra Calpulalpan y la Sierra de Tepozán (4), al oeste por la Sierra de Monte Bajo y la Sierra de las Cruces (6) y al sur por la Sierra de Chichinautzin (9) siendo esta la última en originarse hace aproximadamente 700,000 años y cerrando el valle.

La acumulación de lluvias de temporada y las precipitaciones dieron origen a los lagos, sin embargo, solo permanecían cierto tiempo gracias a la filtración del terreno y a la evaporación debido al cambio climático, originando una gran acumulación de arenas, limos, arcillas, cenizas, además de clastos provenientes de ríos, glaciares y volcanes rellenando así la parte central de la cuenca; actualmente apenas se tiene señal de los lagos y ríos que conformaban el valle.

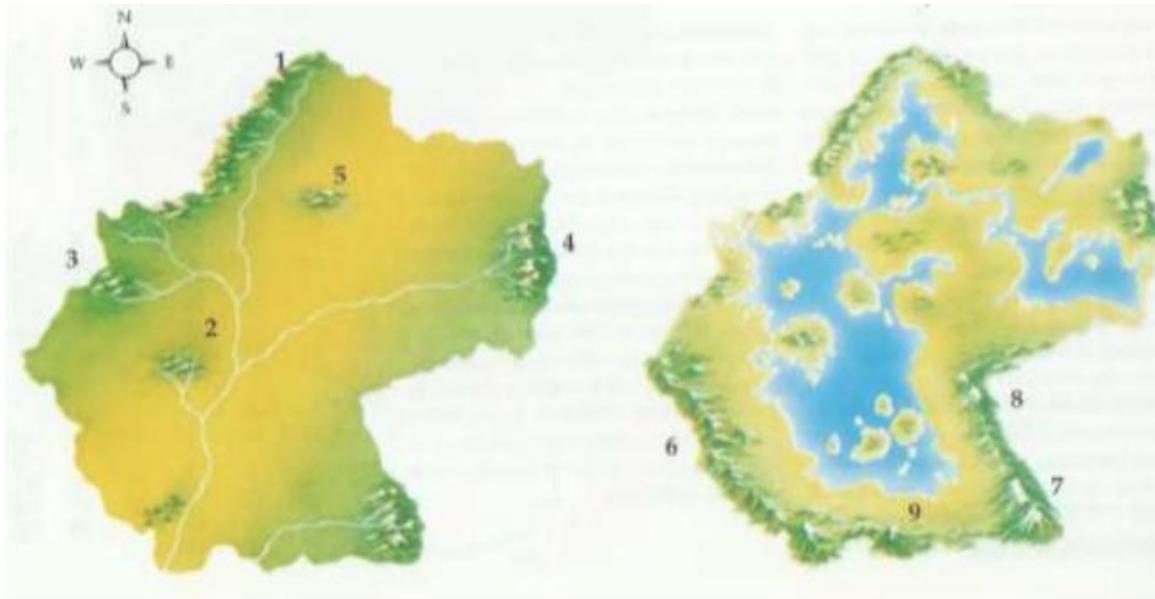


Figura 8. Límites del Valle de México.

Se conoce que los estratos del valle están formados por capas de limos-arenosos, limos-arcillosos, clásticos y pocas capas de cenizas y pómez producto de erupciones volcánicas ocurridas hace millones de años.

Las características del proyecto hacen que para su construcción se tengan que atravesar 6 formaciones geológicas con tipos diferentes de suelo y roca, haciendo que se tenga que trabajar sobre depósitos blandos y roca dura.

Las formaciones que atraviesa el TEO son las siguientes:

- Formación 1: Depósitos lacustres del Cuaternario del norte de la Ciudad de México.
- Formación 2: Lavas, cenizas basálticas y estratos de pómez del Cuaternario del norte de la cuenca de México, y lavas del flanco norte de la sierra de Nochistongo.
- Formación 3: Suelos pre lacustres del Cuaternario de la Cuenca de México.
- Formación 4: Abanicos aluviales del Pilo-Cuaternario de la sierra de Nochistongo.
- Formación 5: Vulcanitas del Plioceno superior de la Formación Huehuetoca.

- Formación 6: Depósitos lacustres Taxhimay del Plioceno medio. Estos se dividen en dos: Taxhimay superior y Taxhimay inferior.

En el Anexo 1 se muestra el tipo de suelo en el que se estará trabajando en los diferentes tramos a lo largo del trazo del TEO.

1.1.3.2) Geotecnia

En sus seis tramos, el Túnel Emisor Oriente está definido por tres zonas geotécnicas principales definidas a partir del tipo de suelos identificados en las exploraciones realizadas que consideraron 260 sondeos, estas son:

1. Zona 1: Comprendida entre las lumbreras L-00 a L-10 y caracterizada por depósitos lacustres del Valle de México y que cubre a suelos pre lacustres antiguos.
2. Zona 2: De la lumbrera L-10 a la L-17 y que considera una zona de depósitos mixtos de sedimentos lacustres intercalados con fluviales del delta del río de Las Avenidas de Pachuca, abanicos aluviales, suelos pre lacustres y lavas pertenecientes al Cerro de Tultepec.
3. Zona 3: De la L-17 al Portal de Salida, corresponde a la sierra de Nochistongo que consta de abanicos aluviales que cubren a depósitos lacustres antiguos (Formación Taxhimay), además de lavas del Cuaternario del flanco norte de la sierra hasta el Portal de Salida.

Lo anterior se resume en la siguiente figura y en una tabla en el Anexo 2, donde se presentan las propiedades geotécnicas de cada tramo a construir en el TEO.

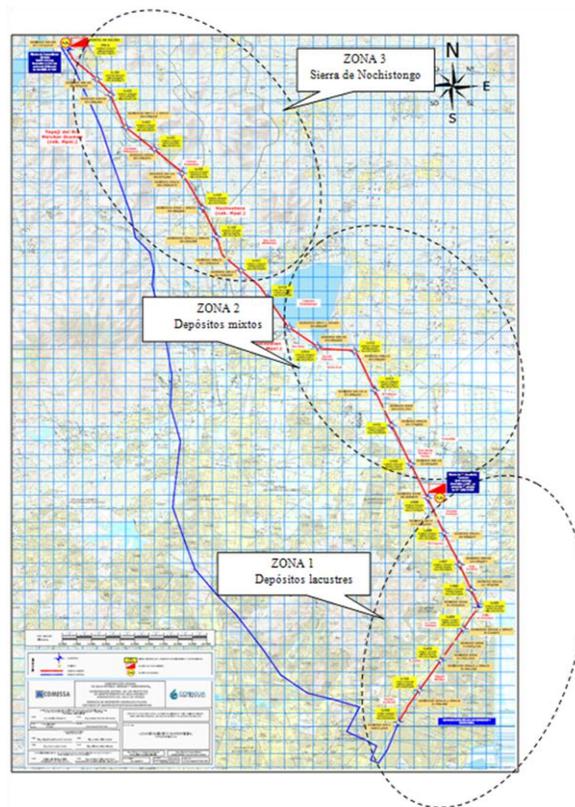


Figura 9. División geotécnica del TEO.

1.1.3.3) Lumbreras

El proyecto incluye la construcción de 24 lumbreras de 12 y 16 m de diámetro a profundidades entre 23 y 150 m, 5 de ellas son lumbreras de montaje y las demás lumbreras se nombran lumbreras de paso.

A las lumbreras donde se realiza el ensamble de las máquinas tuneladoras se les denomina lumbreras de montaje, su principal característica es que cuentan con un diámetro interno mínimo terminado de 16 m y se utilizan para el ensamble, desmantelamiento y extracción de las máquinas tuneladoras.

Las lumbreras de paso, deben tener un diámetro interno mínimo de 12 m y sirven como vía de ingreso y salida del personal, suministros durante la construcción, además de servir como zona de mantenimiento de los escudos en su paso.

Las lumbreras se ejecutan en diferentes condiciones geotécnicas y geológicas, razón por la cual su procedimiento constructivo es diferente uno de otro, dependiendo el tipo de suelo:

- Método de muro milán, que consiste en la construcción de un muro pantalla de concreto reforzado que servirá como soporte y contención.

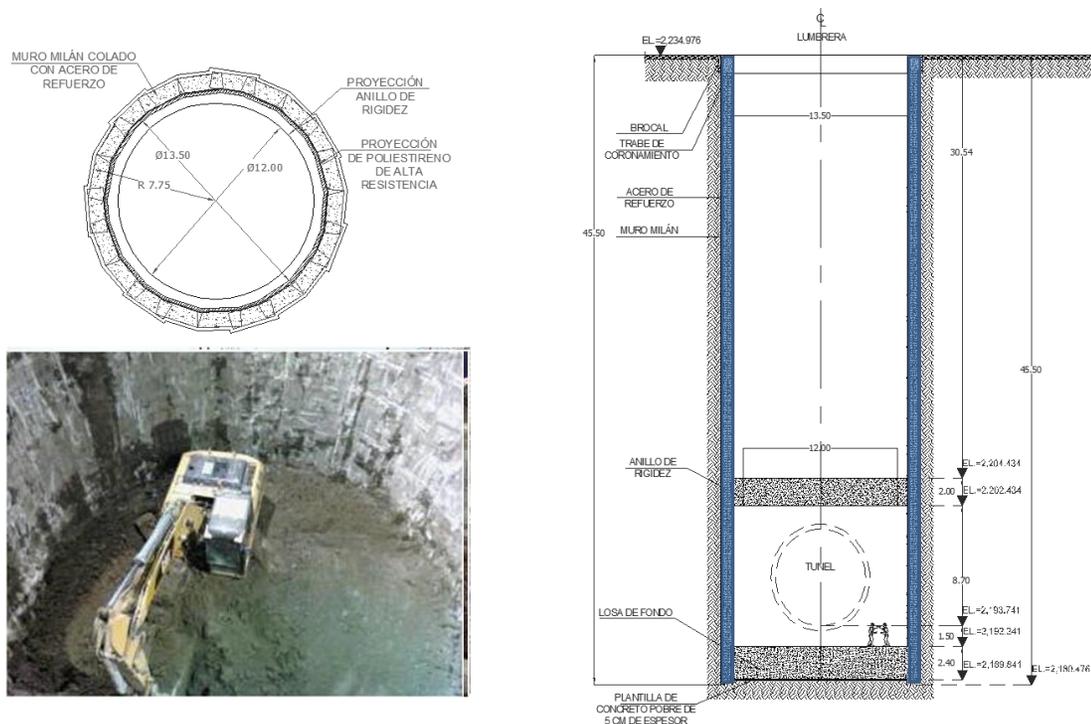


Figura 10. Construcción de lumbreira con muro milán (CONAGUA, 2010).

- Método convencional, consiste en soportar la paredes de la excavación a base de concreto lanzado y marcos o anillos metálicos.

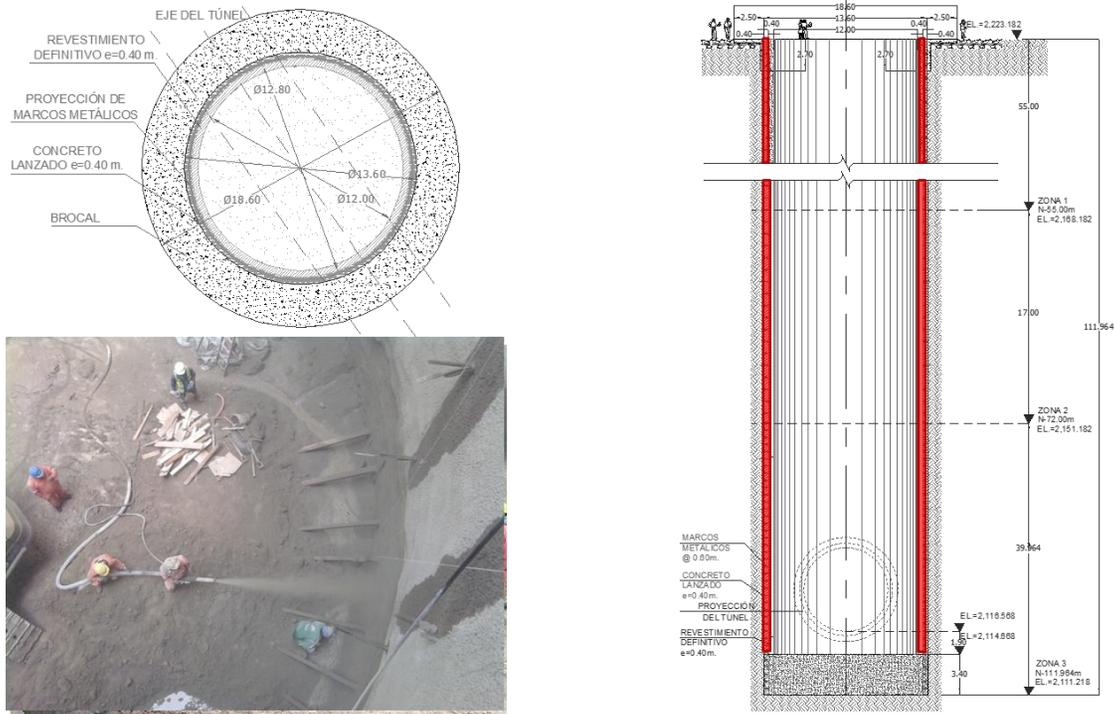


Figura 11. Construcción de lumbreira con método convencional (CONAGUA, 2010).

- La combinación de ambos métodos.

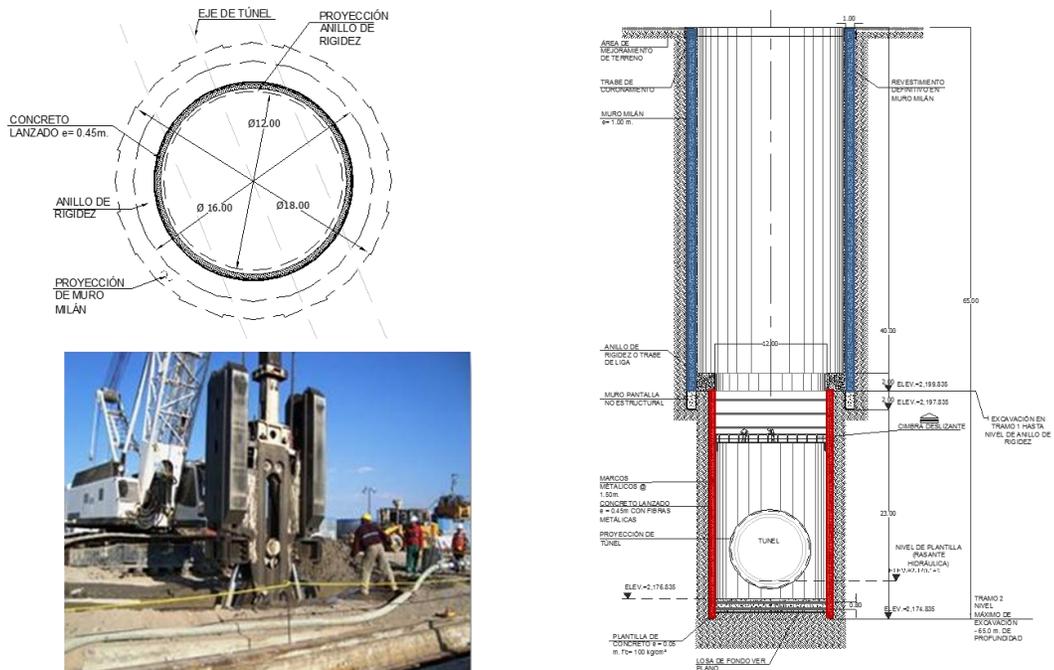


Figura 12. Construcción de lumbreira combinando ambos métodos (CONAGUA, 2010).

1.1.3.4) Túnel

La principal estructura que integra el proyecto corresponde a la construcción de un túnel de 62 km de longitud aproximadamente, con un diámetro terminado de 7 m; excavado con escudo de 8.7 m de diámetro aproximadamente, utilizando anillos prefabricados de dovelas como soporte inicial y un revestimiento de concreto colado en sitio.

El procedimiento de excavación corresponde al accionamiento y giro de la rueda de corte, entrada de material a la cámara de excavación y salida por medio del tornillo sinfín, trasladándolo a la banda transportadora que recorre el túnel hasta llegar a la lumbrera en donde a base de cangilones sube el material y se deposita en la segunda banda horizontal que descarga en la zona de recepción correspondiente.

El túnel debe contar con algunas instalaciones necesarias para la excavación como son: conducto de ventilación, líneas de suministro de energía eléctrica alta y media tensión, suministro y retorno de agua, tubería del bombeo de drenaje de agua subterránea, tubería de aire, rieles sobre durmientes para el tránsito del equipo, tubería para inyección de mortero, alumbrado y tubería de rezaga de material (para suelos blandos) o banda transportadora (para suelos firmes).



Figura 13. Túnel Emisor Oriente.

1.1.3.5) Revestimiento primario

Posterior al avance de la excavación se colocan anillos de dovelas prefabricadas de 35 o 40 cm de espesor y 1.5 m de ancho a base de concreto reforzado tipo CPO (Cemento Portland Ordinario), con resistencias que van desde 350 y hasta 550 kg/cm². Su objetivo es soportar las paredes y la bóveda del túnel como revestimiento primario.



Figura 14. Patio de almacenaje de dovelas (CONAGUA, 2010).

Una vez avanzada la rueda de corte y después de haber colocado el anillo de dovelas, se utiliza una lechada de mortero inyectada a través de la dovela con la finalidad de cubrir el espacio anular entre el terreno natural y el escudo; evitando deformaciones de las paredes de la excavación y el ingreso de agua al túnel.

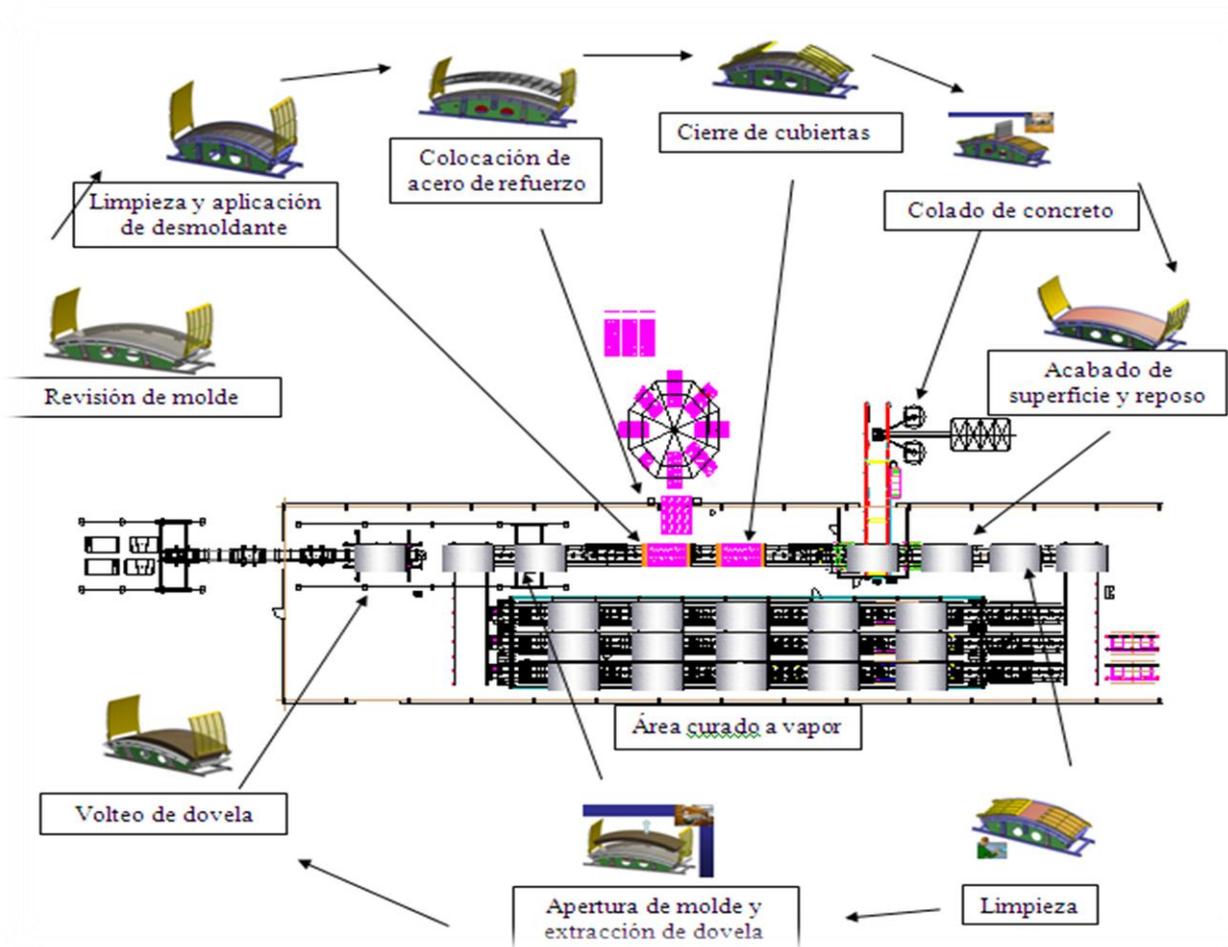


Figura 15. Procedimiento constructivo para la fabricación de dovelas (CONAGUA, 2010).

1.1.3.6) Revestimiento definitivo

El revestimiento definitivo del túnel, será de concreto reforzado con un espesor mínimo de 35 cm; elaborado con cemento CPO RS (Cemento Portland Ordinario Resistente a Sulfatos), con una relación agua-cemento de 0.45 y resistencia a la compresión simple de $f'c$ 350 kg/cm².

El procedimiento se inicia con la colocación del acero de refuerzo, para lo cual, se marcarán referencias topográficas a lo largo del túnel para garantizar que el acero de refuerzo quede en el nivel y la posición correcta. En algunos casos se utiliza cimbra metálica.

1.2) Excavación con tuneladoras

1.2.1) Tuneladoras

La tuneladora o escudo es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva.



Figura 16. TBM.

1.2.2) Tipos de escudo

La relación existente entre los diferentes tipos de escudos y las características de los terrenos a atravesar, se muestra la siguiente tabla de campos de aplicación de las tuneladoras según el fabricante Mitsubishi:

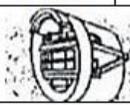
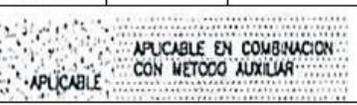
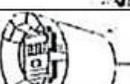
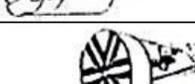
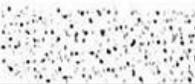
TIPO DE TUNELADORA	TERRENO BLANDO				TERRENO DURO (ROCA)		
	HOMOGENEO		COMPLEJO	BOLO CONFINADO	COMPLEJO		HOMOGENEO
	BLANDO	DURO			BLANDO	DURO	
ESCUDOS MANUALES							
ESCUDOS CON BRAZO EXCAVADOR							
ESCUDOS CIEGOS							
ESCUDOS MECANIZADOS							
ESCUDOS CON BRAZO ROZADOR							
ESCUDOS DE EQUILIBRIO DE PRESIÓN DE TIERRAS (EPB) (SIN LODO DE ALTA DENSIDAD)							
HIDROESCUDOS							
ESCUDOS EPB (CON LODO DE ALTA DENSIDAD)							
EPB / HIDROESCUDOS (CON DISCOS CORTADORES)							
ESCUDO TIPO TBM							
TOPOS							

Figura 17. Tipos de escudo (Fabricante de TBM Mitsubishi).

Escudo manual: Es el más elemental de los escudos de frente abierto por no contar con una herramienta para el ataque del frente, están provistos únicamente por un sistema de empuje y un soporte frontal.

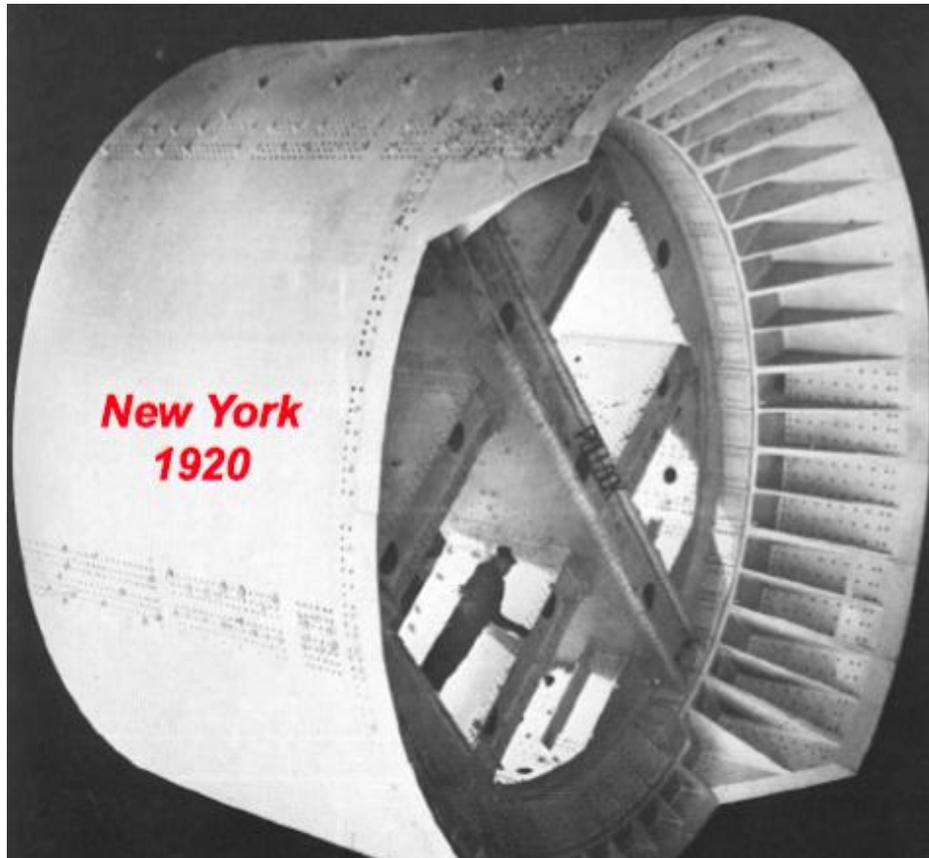


Figura 18. Escudo de tipo manual.

Escudo semimecanizado: Sus características son muy similares a los escudos manuales, con la diferencia de contar con un brazo mecánico para excavar parcialmente el frente y con una serie de bandas transportadoras para la extracción del material excavado.

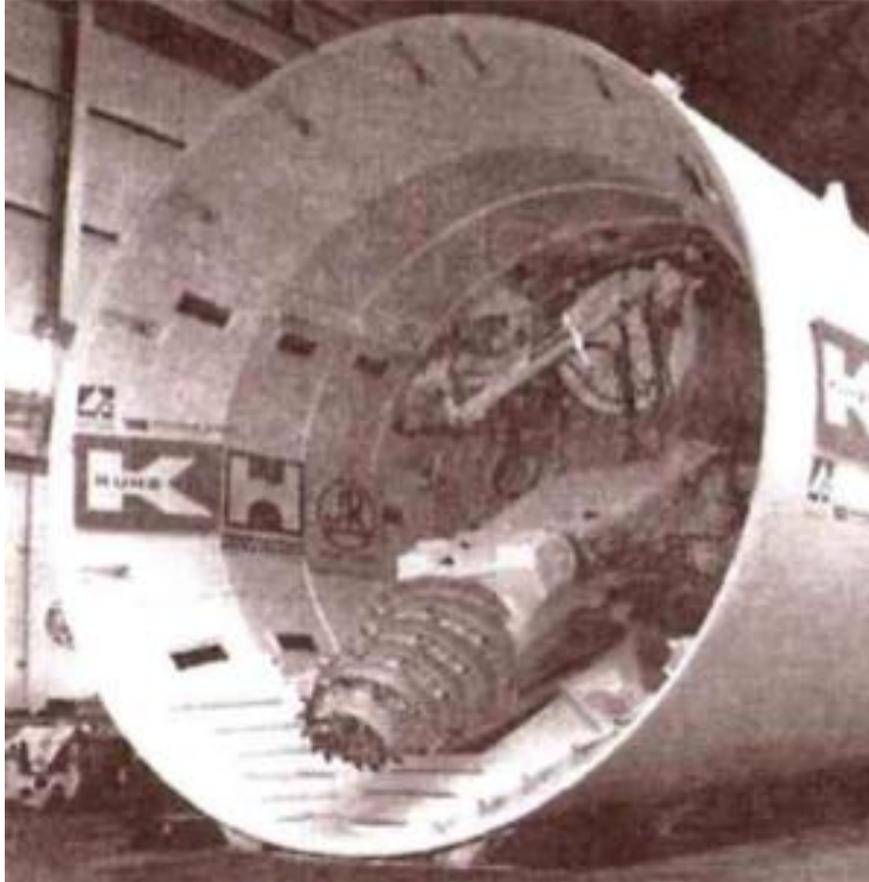


Figura 19. Escudo de tipo semimecanizado.

Escudos mecanizados: Pueden ser frente abierto o cerrado y su característica principal es que cuentan con una herramienta de ataque total en el frente de excavación que puede ser una cabeza cortadora, brazo excavador deslizante o un brazo rozador, teniendo la capacidad de adaptarse a cualquier tipo de aditamento dependiendo el tipo de suelo en el que se va a excavar.



Figura 20. Escudo de tipo mecanizado.

A su vez, existe otra subdivisión que involucra a dos tipos de escudos capaces de trabajar en condiciones de suelos estables e inestables:

Escudos de frente abierto: Su principal característica es que se trabaja de manera directa con el terreno a excavar lo que nos permite realizar cambios de ser necesarios; para suelos inestables la estabilización del frente de excavación solo es posible mediante métodos alternos como, aire comprimido, inyección química del terreno o abatimiento de niveles freáticos; mientras que para suelos estables no se necesita soporte del frente.

Escudos de frente cerrado: A diferencia del anterior, este tipo de escudos cuenta con la ventaja de que la cabeza cortadora excava y soporta mecánicamente el terreno además de poseer un sistema integral de presurizado únicamente al frente de la excavación mediante algún fluido, se dividen en escudos de lodo bentonítico, escudo con cámara de aire comprimido y escudo de presión de tierra balanceada. Para los casos en que el frente es estable, el escudo puede operar como escudo de frente abierto o sin la presurización de la cámara de excavación.



Figura 21. Escudo de frente abierto.

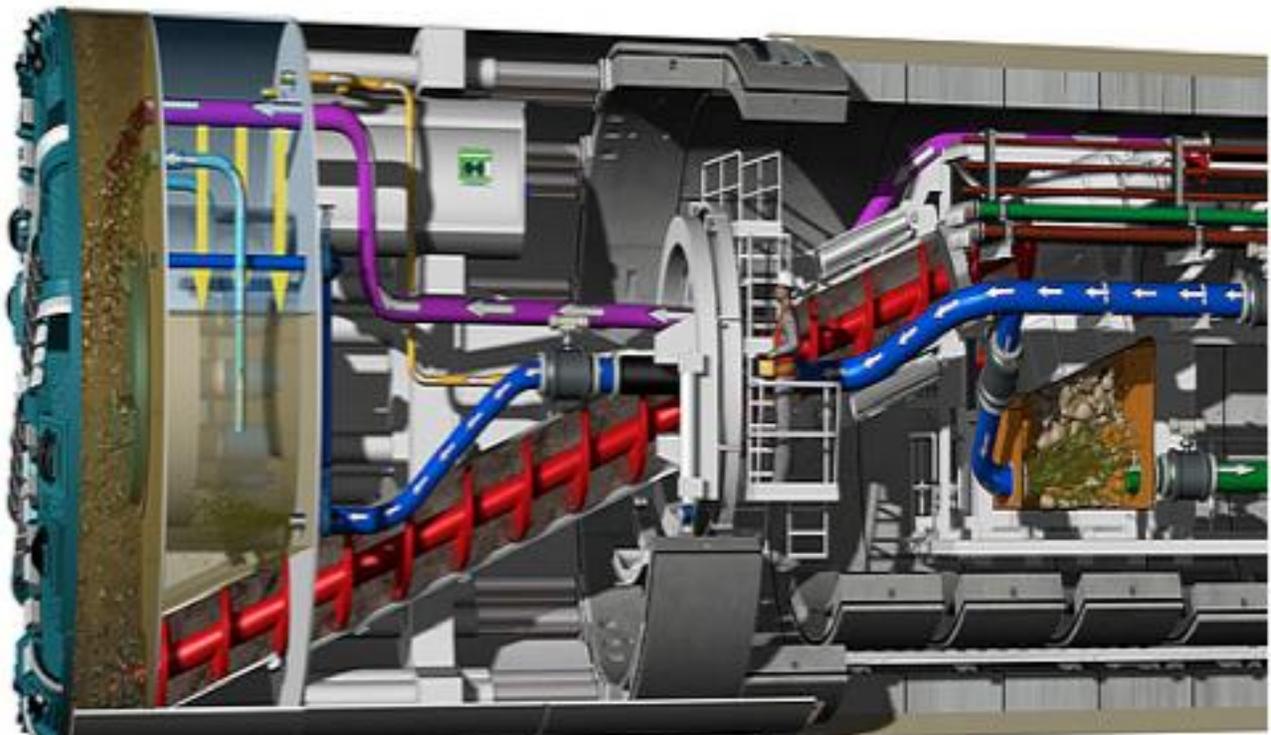


Figura 22. Escudo de frente cerrado.

1.2.3) Escudo de presión de tierra balanceada

Los escudos de presión de tierras balanceadas EPB (por sus siglas en inglés Earth Pressure Balance) se usan cuando es necesario aplicar una presión en el frente de excavación para mantener el equilibrio de la masa de suelo y evitar la falla o asentamientos importantes.

El principio básico de operación consiste en igualar la presión del material excavado que se introduce en la cámara frontal, del escudo, es decir, cuando el material excavado satura la cámara, se balancea la presión de tierra en el frente de excavación. El control del material, para evitar asentamientos en superficie se logra regulando la descarga del material producto de la excavación que se introduce a través de las ranuras de la cabeza cortadora, lo cual también impide el flujo del agua al subsuelo.

La cabeza cortadora está provista de dientes cortadores colocados en forma concéntrica con el propósito de que con un solo giro del disco realice el corte del área del frente. Para lograr la condición de igualar los volúmenes de excavación y descarga del escudo es controlado monitoreando, ya sea el volumen del material producto de la excavación descargado o la presión de tierra en el frente.

La cámara de presión es una zona de circulación de la “*rezaga*”, en donde el material cortado es removido en forma simultánea por la acción controlada del tornillo transportador.

La presión del suelo en la cámara de presión se controla mediante la observación de la carrera de los gatos del escudo, del par y de la velocidad de rotación de la cabeza cortadora y del transportador del tornillo.

El transportador de tornillo está equipado con una compuerta plegable o con un alimentador rotatorio para un mejor control de la descarga de rezaga y así evitar la fuga de agua contenida en el suelo.

Para que el escudo funcione de una manera correcta se deben controlar los siguientes factores:

- Rotación del tornillo transportador.

- Apertura de la compuerta, rotación del alimentador rotatorio.
- Velocidad de avance.

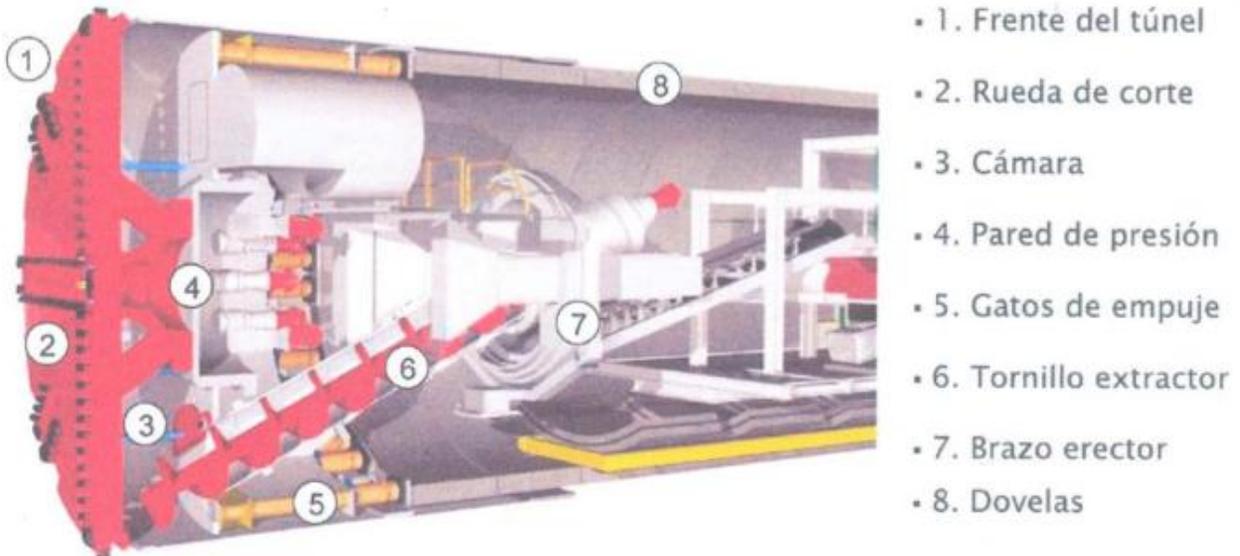


Figura 23. Partes una EPB (CONAGUA, 2010).

1.2.4) Partes de una tuneladora

- **Cuerpo del escudo:** Es un cilindro metálico que tiene como finalidad soportar perimetralmente y en forma inmediata la excavación. Dentro de este cilindro se ubica la cabeza cortadora, la cámara presurizada, la transmisión de la cabeza cortadora, los gatos de empuje y el anillo erector de dovelas. En la parte posterior del escudo se encuentra el faldón, que es el lugar donde se ensamblan las dovelas de concreto precoladas, que forman el revestimiento primario del túnel. Al final de faldón se localizan tres sellos perimetrales, dos de ellos de neopreno y uno de cuerdas de alambre, cuya función es impedir la entrada al escudo de la mezcla inyectada que se coloca en el espacio anular.
- **Cabeza cortadora:** Es un disco metálico situado al frente del escudo, gira sobre su propio eje para realizar la excavación, está provista de dientes y discos cortadores

de suelo, así como escotillas para inspeccionar el frente de excavación. La cabeza cortadora tiene como funciones principales la estabilización del frente de excavación, mediante la presión mecánica que se ejerce con un gato, y el corte del suelo.

- **Cámara presurizada:** Es el espacio comprendido entre la cabeza cortadora y una mampara metálica, las funciones de la cámara son equilibrar la presión hidrostática del suelo mediante el mismo material excavado.
- **Transmisión de la cabeza cortadora:** Su función es proporcionar el torque necesario al cortador, por medio de motores eléctricos.
- **Gatos de empuje:** Proporciona el avance del escudo durante la excavación, apoyándose en el último anillo de dovelas colocado, así mismo los gatos de empuje, se conducen al escudo de acuerdo con la línea del proyecto, cada gato puede ser operado de manera independiente para conducir el escudo.
- **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.
- **Tren de equipo:** Va instalado atrás del cuerpo del escudo y es donde se colocan los equipos necesarios para la operación de escudo, es remolcado por el escudo a lo largo de la excavación.

1.2.5) Ciclo de excavación

El ciclo de excavación está compuesto de las siguientes actividades:

- Excavación y rezaga.
- Endovelado.
 - Colocación de dovelas.
 - Atornillado de dovelas.

- Actividades rutinarias.
 - Extensión de rieles.
 - Extensión de tuberías para suministros.
 - Colocación de estructura para banda.
 - Revisión de suministros.
 - Limpieza de la plantilla.

- Mantenimiento de rutina.

Capítulo 2: Procedimiento constructivo de la lumbrera

L-21A

“La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.” Isaac Asimov

Para la construcción y después mantenimiento del TEO se construyeron 24 lumbreras, la lumbrera L-21A constituye un acceso para el ingreso y salida de materiales, personal y material de rezaga. Se localiza en el tramo 6 en las coordenadas UTM 473,634.659, 2'198,966.820, en el ejido de Santiago Tlaltepoxco, tiene una profundidad de excavación de aproximadamente 109 m. El diámetro de excavación fue de 18.60 m en la mayoría de su longitud y de 19.60 m en la zona de los portales de entrada y de salida del túnel. Su diámetro interior terminado es de 17.40 m en el tramo 1, 16.60 m en los tramos 2, 3 y 4, y 16.40 m en el tramo 5, la zona de los portales.



Figura 24. Localización de la lumbrera L-21A.

La excavación de la lumbrera se realizó por método convencional debido a la calidad y clasificación geotécnica obtenida de sondeos y ensayos de laboratorio.

Para el soporte inicial se colocaron perfiles de acero IR de dimensiones variables con concreto lanzado de espesor acumulado entre 0.45 y 0.70 m, con resistencia $f'c$ de 350 kg/cm² e inclusiones de fibras metálicas.

2.1) Geología

El subsuelo en el cual fue excavada está compuesto en los primeros 35 m por arcilla y limo de baja compresibilidad, de 35 a 40 m se encuentra un estrato arenoso, al cual le subyacen limos y arcillas hasta los 58 m de profundidad, donde se encuentra un estrato de grava de origen basáltico. Entre 58 y 60 m de profundidad se encuentra arena media a gruesa. A partir de 60 m y hasta los 103 m, se presentan sucesiones de tobas de arcilla y limo de alta compresibilidad, atravesados entre 92 y 95 m por un estrato de arena arcillosa. De 103 m hasta el fondo de la lumbrera se registra roca basáltica que inicialmente se presenta como fragmentos en una matriz de limos y arenas, y a mayor profundidad como macizo rocoso poco fracturado.

En el Anexo 3 se muestra de manera esquemática la distribución de los estratos a lo largo de la profundidad de la lumbrera.

2.2) Componentes estructurales de la lumbrera

- Brocal.
- Revestimiento primario.
 - Excavación.
 - Concreto lanzado.
 - Anillos metálicos.
- Losa de fondo.

- Revestimiento definitivo.
- Portales de entrada y salida.

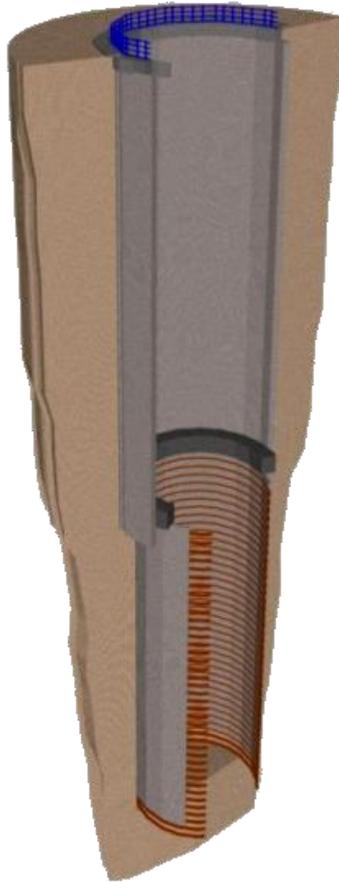


Figura 25. Lumbrera (CONAGUA, 2010).

2.2.1) Brocal

El procedimiento constructivo del brocal inicia con el trazo y nivelación del terreno natural en toda el área de la lumbrera, los niveles del trazo del brocal fueron la base para el cálculo de los volúmenes de excavación.

Se realizó el mejoramiento del terreno en la zona circundante de la lumbrera con material controlado, constituido por grava controlada, colocada para conformar la plataforma de trabajo a partir del paño interior del brocal.

Mediante equipo mecánico y manual, se realizó la excavación de toda el área de la lumbrera, incluyendo el área del alerón exterior y se excavó hasta el nivel de desplante del faldón del brocal.

Terminada la excavación y retirado todo el material producto de la misma, se verificaron los niveles de desplante del brocal y se colocó el acero de refuerzo habilitado previamente, tomando en cuenta la colocación de separadores para asegurar el recubrimiento requerido.

Una vez habilitada y colocada la cimbra se verificaron los niveles y el alineamiento, y se inició el colado del brocal utilizando concreto hidráulico con una $f'c$ de 350 kg/cm^2 , elaborado con cemento tipo CPC RS (Cemento Portland Compuesto Resistente a Sulfatos), con revenimiento de 12 cm.

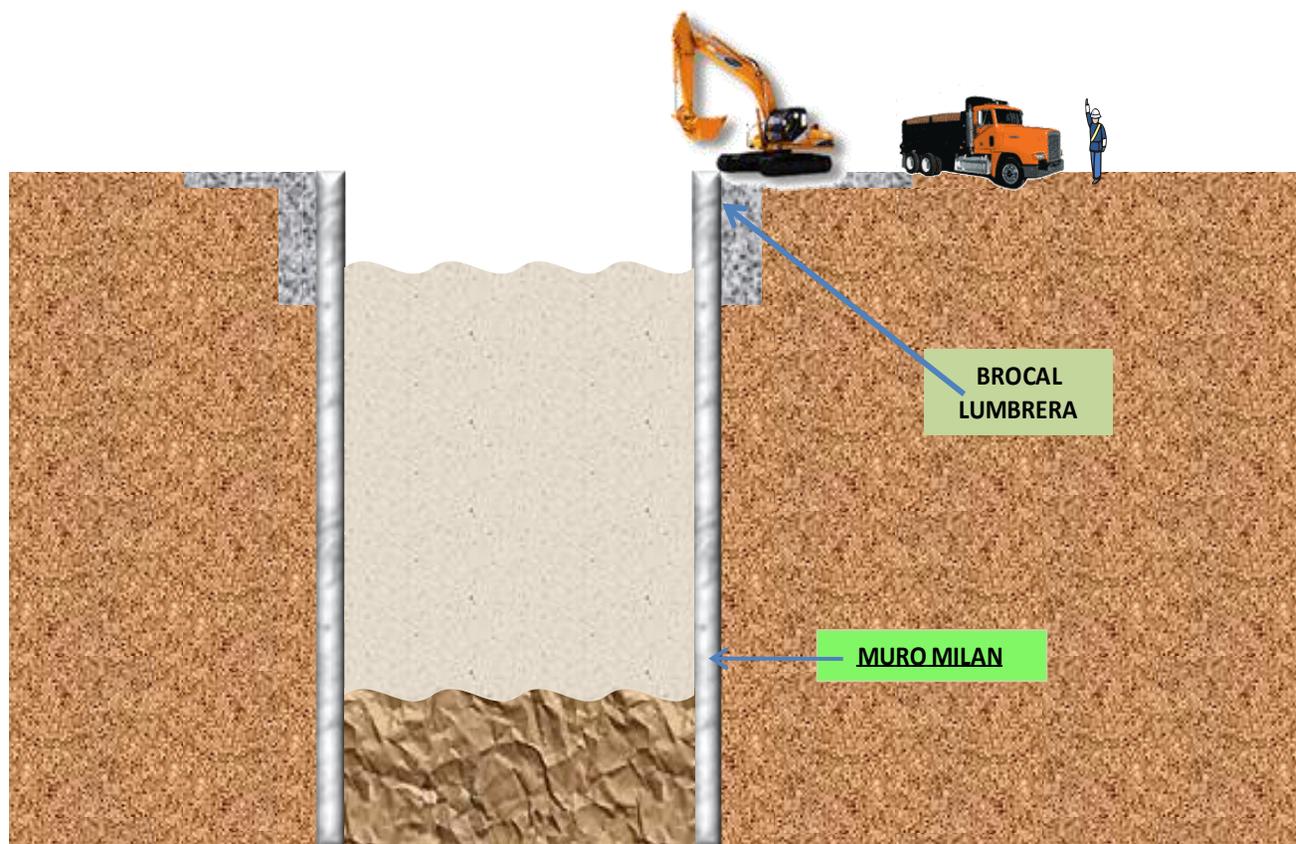


Figura 26. Brocal y muro milán (CONAGUA, 2010).

2.2.2) Revestimiento primario

Para la excavación de la lumbrera se planearon ciclos de avance de 1.0 a 2.5 m, dependiendo de las condiciones mecánicas e hidráulicas del material por atacar,

manteniendo desfasadas las diversas etapas de colocación del concreto lanzado, hasta alcanzar el espesor de proyecto, así como los diversos tratamientos del soporte temporal.

A continuación, se describen las etapas principales para el ciclo de excavación.

2.2.2.1) Excavación

La excavación se realizó por medios mecánicos, el material producto de la excavación se colocó en botes de manto y es llevado a superficie mediante una grúa hidráulica descargando directamente en camiones de volteo o en tolvas para su traspaleo posterior.

Mediante un control topográfico se verificó la excavación para garantizar el alineamiento y los niveles requeridos, para después continuar con el concreto lanzado, la brigada de topografía fue la encargada de definir el máximo nivel de avance para la excavación de la lumbrera.

2.2.2.2) Concreto lanzado

Para estabilizar las paredes de la lumbrera después de la excavación se utiliza concreto lanzado con resistencia $f'c$ de 350 kg/cm^2 fabricado con cemento tipo CPC RS, reforzado con fibras metálicas y fabricado en planta.

Para dar certeza de la resistencia del concreto utilizado se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio:

- Concreto lanzado. Se realizaron ensayos de compresión para determinar si se alcanzaba la resistencia mínima. Considerando que se empleó concreto de fraguado rápido, se hicieron pruebas asegurando que al primer día de fraguado se alcanzara una resistencia no menor del 50 % de la $f'c$.
- Concreto hidráulico: Se tomaron 4 cilindros de concreto, como indica el RCDF, a las cuales se les realizó el ensayo de compresión a 7, 14 y 28 días.

- Acero de refuerzo: Se contó con los certificados de calidad asociados y con la información necesaria especificada por las normas mexicanas.

El lanzamiento de concreto se hizo por medio de una lanzadora de concreto, accionada con aire comprimido a través de una línea de distribución hasta la boquilla de lanzamiento. La distancia entre la boquilla y la superficie se ajustó de acuerdo a la velocidad de descarga, la boquilla se mantuvo perpendicular a la superficie para lograr los espesores requeridos entre 0.45 y 0.70 m.

A lo largo de la lumbrera se manejaron 5 tramos, quedando los espesores de la siguiente manera:

- **Tramo 1:** De 0.0 a 18.0 m, se aplicó una capa de concreto de 0.45 m de espesor.
- **Tramo 2:** De 18.0 a 40.0 m, se colocó una capa de concreto de 0.45 m de espesor.
- **Tramo 3:** De 40.0 a 65.0 m, se aplicó una capa de concreto de 0.45 m de espesor.
- **Tramo 4:** De 65.0 a 92.0 m, se lanzó una capa de concreto de 0.50 m de espesor.
- **Tramo 5:** De 92.0 a 109.0 m, se aplicó una capa de concreto de 0.70 m de espesor.

2.2.2.3) Anillos estructurales metálicos

Para soportar los empujes laterales que genera el terreno durante la construcción de la lumbrera, el soporte de las paredes se complementa con anillos estructurales metálicos formados con perfiles IR armados de peralte variable, los cuales se colocan después de la primera capa de concreto lanzado y en donde se unirán entre sí.

Para el montaje apropiado los anillos se habilitan en secciones de vigas metálicas y se conforman en el sitio unidos mediante soldadura, bridas y pernos.

En el proyecto se definieron 5 tramos para la colocación de anillos metálicos:

- **Tramo 1:** De 0.0 a 18.0 m, no se colocaron anillos estructurales metálicos.
- **Tramo 2:** De 18.0 a 40.0 m, se colocaron anillos metálicos de perfil IR armado 150 mm x 250 mm, con separación de 2.50 m.
- **Tramo 3:** De 40.0 a 65.0 m, se colocaron anillos metálicos de perfil IR armado 200 mm x 250 mm, con separación de 1.50 m.
- **Tramo 4:** De 65.0 a 92.0 m, se colocaron anillos metálicos de perfil IR armado 200 mm x 270 mm, con separación de 1.20 m.
- **Tramo 5:** De 92.0 a 109.0 m, se colocaron anillos metálicos de perfil IR armado 250 mm x 280 mm, con una separación de 1.00 m.

Los avances se verificaron por métodos analíticos, como los que emplean el análisis de elementos finitos.

2.2.3) Losa de fondo

La losa de fondo tiene 3.70 m de peralte, el nivel de piso de la losa de fondo se encuentra por debajo del nivel de plantilla del túnel, para que el material de excavación ocupe este espacio disponible y que no se interfiera con la continuidad de las labores de construcción.

Como actividades previas al inicio de los trabajos de construcción de la losa de fondo, se inició por verificar, afinar, limpiar y nivelar el terreno en toda la profundidad de la lumbrera,

para después colar una plantilla de concreto pobre de $f'c$ igual a 150 kg/cm^2 con 5 cm de espesor, posteriormente se continuó con la colocación del acero de refuerzo.

Se consideró la colocación de referencias para los topes de concreto, y se realizó el colado de concreto hidráulico con $f'c$ de 350 kg/cm^2 , el colado se hizo en forma masiva y continua.

Para evitar la deshidratación del concreto, se aplicó una membrana de curado de base acrílica.

2.2.4) Revestimiento definitivo

Una vez terminada la construcción del revestimiento primario y la losa de fondo, se inspeccionó a detalle la configuración de la lumbrera con el fin de realizar los preparativos para la colocación de la cimbra deslizante.

La cimbra fue a base de duela machimbrada, en superficie se instaló un sistema de izaje compuesto por gatos hidráulicos y barras con capacidad suficiente para realizar el deslizado del sistema. Toda la instalación de las secciones de la cimbra tanto en el fondo de la lumbrera como en las paredes se realizaron con una grúa de maniobras, en la cimbra deslizante, se instaló una plataforma de trabajo para facilitar la construcción del revestimiento definitivo.

Posteriormente se procedió a colar de manera continua el muro de revestimiento definitivo en sentido inverso al proceso de excavación, mediante la cimbra deslizante. El concreto utilizado fue de 350 kg/cm^2 para todos los tramos, elaborado en planta, en la zona de los portales se colocó poliestireno antes del colado del revestimiento definitivo.

2.2.5) Portales de entrada y salida

Se realizó el habilitado del acero para la construcción de la trabe de borde que forma parte de la estructura de los portales de entrada y salida de la tuneladora, una vez realizado el habilitado del acero, se continuó con el proceso de excavación del núcleo de la lumbrera.

Las aberturas se llevaron a cabo una vez terminado el revestimiento definitivo en la totalidad de la lumbrera.

Capítulo 3: Procedimiento constructivo de galería de montaje

"No basta tener buen ingenio; lo principal es aplicarlo bien" René Descartes

Como alternativa al inicio mecanizado de excavación y debido a la profundidad de algunas lumbreras y la complejidad para ensamblar completamente el escudo y ponerlo en funcionamiento; se construyen galerías de montaje, basadas en la excavación convencional de un túnel; a base de marcos metálicos y concreto lanzado y protegiendo la excavación con una bóveda paraguas para evitar algún derrumbe.

En esta galería se ensamblan parcialmente las tuneladoras con los complementos básicos para iniciar el arranque de la misma e iniciar la construcción propia del túnel hasta tener el espacio suficiente para ensamblar completamente la máquina y los aditamentos necesarios para proseguir con la excavación.

De lo anterior se deriva el método de construcción para la galería de montaje en la lumbrera L-21A.



Figura 27. Galería de montaje (CONAGUA, 2011).

El procedimiento más común para la construcción de una galería de montaje es el siguiente:

Actividades previas

Son las actividades que se refieren a la preparación para la construcción de la galería, y se realizan de manera simultánea, como son:

- Construcción de muro secundario de lumbrera, dejando sin la colocación de concreto el área que define la envolvente de excavación de la galería.
- Construcción de la estructura de emportalamiento.
- Trazo sobre la pared de la lumbrera del eje y diámetro definitivo de túnel, así como del perímetro de excavación de la galería.
- Formación de plataforma para trabajos auxiliares.
- Construcción de pozos de bombeo profundos.
- Construcción de primera etapa de la bóveda paraguas.

Bóveda paraguas

Para incrementar el factor de seguridad en la clave del túnel evitando caídos locales, se propone hacer una bóveda de elementos estructurales, formada por perforaciones longitudinales al trazo del túnel, perimetrales al diámetro de excavación de la galería.

Durante la continuación de la excavación de la galería y hasta el cambio de sección de la misma, los tubos metálicos que conforman la segunda etapa de la bóveda deberán ser cortados con equipo de oxicorte.

Anclas de fibra de fibra vidrio

Para iniciar la excavación de la galería, el muro primario de la lumbrera construido para garantizar la estabilidad durante el proceso de excavación y construcción de la lumbrera,

debe ser demolido, esto genera en la masa de suelo un alivio de esfuerzos por la eliminación del soporte. El suelo expuesto se conoce como frente de excavación.

La secuencia constructiva para la colocación de las anclas de fibra de vidrio es el siguiente:

- Barrenación en el diámetro y longitud igual a la indicada para las anclas.
- Equipamiento del ancla con la estructura de la misa.
- Inyección de lechada.

Las actividades de barrenación, limpieza, equipamiento e inyección deben ser continuas, para reducir la posibilidad de derrumbes del suelo de la perforación.

Revestimiento

Durante la etapa de excavación, el revestimiento estará formado por una losa de concreto lanzado, reforzado con fibras metálicas y marcos metálicos de sección IR donde los marcos metálicos quedan ahogados en el concreto lanzado.

La secuencia de trabajos para el revestimiento es la siguiente:

- Se colocan los marcos metálicos fijándolos a la masa de suelo con varillas cortas hincadas con marro. Para garantizar la adecuada posición de los primeros marcos metálicos que forman la galería, así como para asegurar la estabilidad de los primeros metros de excavación.
- Después de la colocación de los marcos, se lanza concreto hasta alcanzar el espesor final del revestimiento.

Finalmente, conforme avance la excavación de la sección inferior de la galería y los marcos metálicos se vayan completando, junto con el respectivo revestimiento de concreto lanzado, se deberán colocar elementos de rigidez horizontal, ligando ambos extremos del revestimiento.

Sistema de bombeo

Con el fin de poder realizar la excavación de la galería de montaje, bajo las condiciones más favorables y seguras, es necesaria la instalación de un sistema de bombeo que permita, tanto reducir el flujo de agua hacia el interior de la excavación, como disminuir las presiones hidráulicas para favorecer la seguridad de la misma.

El sistema de bombeo propuesto consiste, de forma general en pozos equipados con bombas sumergibles. Para el sistema de bombeo, se consideran plantas de luz, cada una con la capacidad necesaria para atender el número total de bombas requeridas y piezómetros abiertos.

3.1) Descripción del proyecto

Para el caso de la Galería que se construyó en la lumbrera L-21A, se parte del concepto de un túnel con forma de herradura de 28 m de longitud. En los primeros 13 m, a partir de la lumbrera, tendrán una altura y ancho de excavación de 12 m y 12 m, respectivamente, y en el tramo restante de 14 m, su altura y ancho serán de 11 m y 10 m respectivamente.

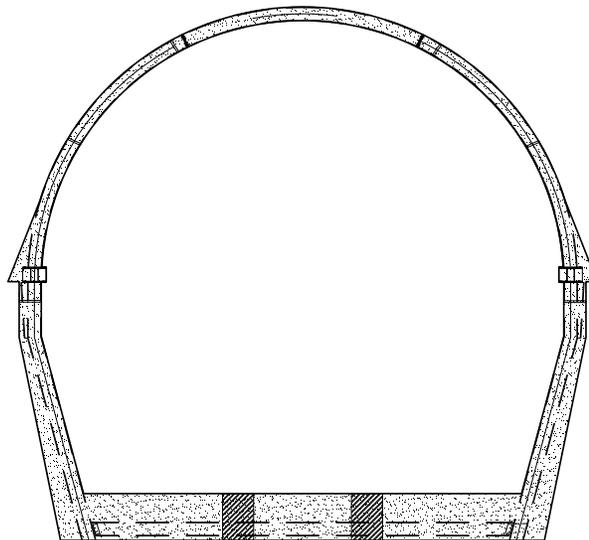


Figura 28. Geometría de la galería de montaje (CONAGUA, 2011).

3.1.1) Geología

La geología de la zona donde se construyó la galería está conformada de diversos materiales y de los siguientes estratos:

Estrato A: De 0.00 a 2.70 m de profundidad, espesor de 2.70 m. Arcilla de color café oscuro con arena fina y grumos de caliche, con materia orgánica y algunas raíces. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 17.73 kN/m^3 . De las propiedades de resistencia, la cohesión es 95.1 kPa y el ángulo de fricción es 0.0. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.46 y el módulo de deformación es 9,700 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.46.

Estrato B: De 2.70 a 4.50 m de profundidad, espesor de 1.80 m. Arcilla de baja compresibilidad, color café oscuro con arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 17.83 kN/m^3 , la densidad de sólidos es 2.59, el contenido de agua es 21.95 %, la relación de vacíos es 0.74, el grado de saturación es 77.1 % y la porosidad es 42.44 %. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 465.5 kPa y el ángulo de fricción es 40.7° . De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.30 y el módulo de deformación es 143,913 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.56. Según la SUCS, la clasificación es CL, arcilla de baja compresibilidad.

Estrato C: De 4.50 a 35.00 m de profundidad, espesor de 30.50 m. Formación de limo de baja compresibilidad, color café claro con arena fina y grumos duros del mismo material. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 16.17 kN/m^3 , la densidad de sólidos es 2.60, el contenido de agua es 38.32 %, la relación de vacíos es 1.18, el grado de saturación es 84.3 % y la porosidad es 54.16 %. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 614.6 kPa y el ángulo de fricción es 42.3° . De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.35 y el módulo de deformación es 169,051 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.59. Según el SUCS, la clasificación es ML, limo de baja compresibilidad.

Estrato D: De 35.00 a 40.00 m de profundidad, espesor de 5.00 m. Arena limosa de color café claro. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 14.98 kN/m^3 , la densidad de sólidos es 2.65, el contenido de agua es 48.36 %, la relación de vacíos es 1.57, el grado de saturación es 81.5% y la porosidad es 61.11%. De las propiedades de resistencia, la

cohesión es 415.4 kPa y el ángulo de fricción es 40.0°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.30 y el módulo de deformación es 254,471 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.60. Según SUCS, la clasificación es SM, arena limosa.

Estrato E: De 40.00 a 55.00 m de profundidad, espesor de 15.00 m. Toba de limo de baja compresibilidad, color café claro con grumos duros del mismo material, con arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 16.80 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.62, el contenido de agua es 45.71%, la relación de vacíos es 1.23, el grado de saturación es 97.3% y la porosidad es 55.20%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 624.1 kPa y el ángulo de fricción es 42.4°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.35 y el módulo de deformación es 253,098 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.60. Según el SUCS, la clasificación es ML, limo de baja compresibilidad.

Estrato F: De 55.00 a 58.10 m de profundidad, espesor de 3.10 m. Arcilla de alta compresibilidad color café claro, con grumos del mismo material y con arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 16.64 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.63, el contenido de agua es 39.59 %, la relación de vacíos es 1.16, el grado de saturación es 89.4% y la porosidad es 53.78%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 704.8 kPa y el ángulo de fricción es 43.2°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.40 y el módulo de deformación es 296,262 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.57. Según el SUCS, la clasificación es CH, arcilla de alta compresibilidad.

Estrato G: De 58.10 a 60.00 m de profundidad, espesor de 1.90 m. Grava (origen basáltico), color gris claro, con poco limo. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 20.00 kN/m³ y el contenido de agua es 10.70%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 704.8kPa y el ángulo de fricción es 43.2°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.33 y el módulo de deformación es 888,786 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.57.

Estrato H: De 60.00 a 67.50 m de profundidad, espesor de 7.50 m. Arcilla y limo de alta compresibilidad, color café claro, con grumos duros del mismo material y con arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 18.11 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.61, el contenido de agua es 35.91%, la relación de vacíos es 0.92, el grado de saturación es 100% y la porosidad es 47.98%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es

520.4 kPa y el ángulo de fricción es 41.3. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.38 y el módulo de deformación es 88,682 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.52. Según el SUCS, la clasificación es CH-MH, arcilla y limo de alta compresibilidad.

Estrato I: De 67.50 a 79.00 m de profundidad, espesor de 11.50 m. Toba de arcilla de alta compresibilidad, color café claro, con grumos del mismo material e indicios de arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 17.15 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.62, el contenido de agua es 46.71%, la relación de vacíos es 1.19, el grado de saturación es 100% y la porosidad es 54.43%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 1,085.5 kPa y el ángulo de fricción es 45.7°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.40 y el módulo de deformación es 157,009 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.49. Según el SUCS, la clasificación es CH, arcilla de alta compresibilidad.

Estrato J: De 79.00 a 92.30 m de profundidad, espesor de 13.30 m. Toba de limo de alta compresibilidad, color gris verdoso, poco cementado, con CaCO₃ e indicios de arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 17.17 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.61, el contenido de agua es 41.00%, la relación de vacíos es 1.10, el grado de saturación es 97.0 % y la porosidad es 52.49%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 803.9 kPa y el ángulo de fricción es 44.0°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.35 y el módulo de deformación es 181,289 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.45. Según el SUCS, la clasificación es MH, limo de alta compresibilidad.

Estrato K: De 92.30 a 95.00 m de profundidad, espesor de 2.70 m. Arena arcillosa. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 17.23 kN/m³, la densidad de sólidos es 2.63, el contenido de agua es 38.77%, la relación de vacíos es 1.07, el grado de saturación es 94.7% y la porosidad es 51.80%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 677.4 kPa y el ángulo de fricción es 42.9°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.30 y el módulo de deformación es 189,529 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.42. Según el SUCS, la clasificación es SC, arena arcillosa.

Estrato L: De 95.00 a 103.00 m de profundidad, espesor de 8.00 m. Toba de limo de alta compresibilidad, color café claro, con grumos duros del mismo material y con arena fina. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 18.98 kN/m³, la densidad de sólidos es

2.62, el contenido de agua es 24.23 %, la relación de vacíos es 0.68, el grado de saturación es 92.9 % y la porosidad es 40.59%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 543.0 kPa y el ángulo de fricción es 41.6°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.35 y el módulo de deformación es 111,442 kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.40. Según el SUCS, la clasificación es MH, limo de alta compresibilidad.

Estrato M: De 103.00 a 110.00 m de profundidad, espesor de 7.00 m. Fragmentos de basalto de color gris claro, en matriz limo arenoso color café claro. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 24.90 kN/m³ y el contenido de agua es 11.19%. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 481.2kPa y el ángulo de fricción es 40.9°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.25 y el módulo de deformación es 1.88X10⁶ kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.39.

Estrato N: De 110.00 a 140.00 m de profundidad, espesor de 30.00 m. Basalto color gris claro o café rosado, con vetas de cuarzo, escasas oquedades y fracturas naturales. De las propiedades índice, el peso volumétrico es 25.40 kN/m³. De las propiedades de resistencia, la cohesión es 350 kPa y el ángulo de fricción es 40.0°. De las propiedades de deformación, la relación de Poisson es 0.25 y el módulo de deformación es 3.16X10⁶ kPa. El coeficiente de empuje en reposo es 0.36.

El Anexo 4 muestra un resumen de las propiedades de cada estrato.

3.2.1) Procedimiento constructivo

El procedimiento realizado para construir la galería de montaje en la lumbrera L-21A se divide en 2 secciones, la construcción de la media sección superior y la construcción de la media sección inferior “*banqueo*”, donde los dos trabajos se realizan de manera simultánea dejando cierta distancia entre el avance superior y el inferior.

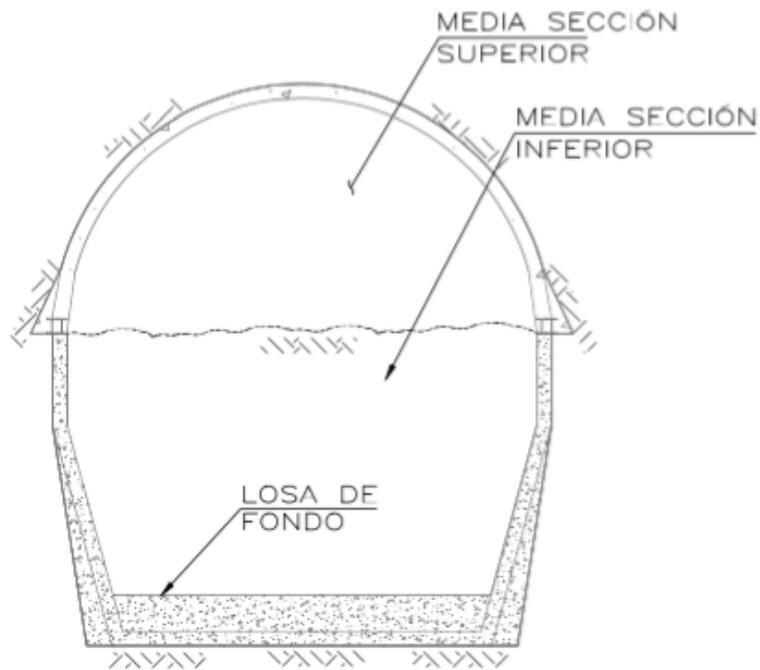


Figura 29. Distribución de la galería de montaje (CONAGUA, 2007).

3.2.1.1) Media sección superior

A continuación se describen las etapas del procedimiento constructivo de la media sección superior:

1. Verificación topográfica de la posición del trazo y elevación de la galería con respecto a la lumbrera para definir la zona a demoler.

2. Relleno del fondo de la lumbrera hasta el nivel de desplante de la zapata de la media sección superior de la galería, para el relleno se utilizó grava arena limosa compactada al 90% de la prueba Proctor Estándar.



Figura 30. Material de relleno de fondo de la lumbrera (CONAGUA, 2015).

3. Demolición del muro del revestimiento primario de la lumbrera, de la zona correspondiente a la media sección superior de la galería de montaje. Para la demolición se empleó un martillo hidráulico, para la retirar la parte correspondiente de los marcos metálicos de la lumbrera se utilizó equipo de corte.



Figura 31. Demolición del revestimiento primario de la media sección superior (anillos metálicos y concreto) (CONAGUA, 2015).

4. Excavación de espacios laterales “coyoterías”, en las cuales se alojarán las vigas rastra que servirán para el apoyo de la sección superior del marco metálico.



Figura 32. Excavación de coyoterías (CONAGUA, 2015).

5. Colocación de vigas rastra dentro de los espacios laterales excavados teniendo cuidado de tener un buen contacto con el suelo.



Figura 33. Viga rastra (CONAGUA, 2015).

6. Excavación de la media sección superior en una longitud suficiente para la colocación del primer marco metálico.



Figura 34. Excavación para la colocación del primer marco metálico (CONAGUA, 2015).

7. Colocación del primer marco metálico al inicio de la galería.



Figura 35. Almacén de marcos metálicos (CONAGUA, 2015).

8. Excavación de la media sección superior de la galería de montaje. La excavación se realizó con maquinaria convencional y con equipo manual. Inmediatamente a la terminación de la excavación del avance, se retira el material excavado “rezaga” para permitir la colocación del sistema de soporte de la media sección superior de la galería.



Figura 36. Excavación de la media sección superior (CONAGUA, 2015).

9. Colocación de la estructura del revestimiento de la media sección superior de la galería, mediante marcos metálicos y concreto lanzado.
 - I. Colocación del marco metálico correspondiente al avance de la excavación, queda apoyado sobre las vigas rastra colocadas previamente. Entra cada marco se colocan tensores o “acopladores” y tubos separadores. Para asegurar el contacto entre el marco y el suelo se colocan cuñas de madera.
 - II. Colocación de la cimbra y lanzado de concreto entre los anillos metálicos. Previamente a la aplicación del concreto se instalaron drenes formados por tubos de PVC hidráulico, los cuales están distribuidos en el contorno de excavación.



Figura 37. Colocación de tensores entre marcos (CONAGUA, 2015).



Figura 38. Lanzado de concreto en el espacio entre marcos (CONAGUA, 2015).

10. El proceso de construcción será cíclico, en las etapas de excavación de la media sección superior de la galería (similar a la etapa 8) y colocación de la estructura de soporte mediante marcos metálicos y concreto lanzado (similar a la etapa 9).

Cuando se haya avanzado en la excavación y en el recubrimiento en una longitud equivalente a la longitud de las rastra, se realizará la excavación de nuevas coyoterías, para la colocación de nuevas rastras para apoyo de los marcos metálicos de la estructura de la galería.



Figura 39. Etapas subsecuentes de excavación y revestimiento (CONAGUA, 2015).

11. Una vez que se haya terminado la excavación y revestimiento de la media sección superior de la galería se procederá a la aplicación de la protección del frente mediante una capa de concreto lanzado de 10 cm de espesor. Se utiliza concreto de las mismas características del concreto lanzado para el refuerzo de la media sección superior.

En el Anexo 5 se presentan las etapas constructivas de la media sección superior de la galería de montaje en un diagrama.

3.2.1.2) Media sección inferior

12. Retiro del relleno del fondo de la excavación de la lumbrera hasta alcanzar el nivel inferior del orificio para entrar a la galería.
13. Demolición del muro del revestimiento primario correspondiente a la lumbrera de la media sección inferior.
14. Excavación de una longitud suficiente para colocar el complemento del primer marco "patas".



Figura 40. Demolición del revestimiento primario de la media sección inferior (CONAGUA, 2015).

15. Colocación de patas y tornapunta del primer marco metálico.
16. Excavación de la sección inferior "banco".
17. Colocación de las elementos complementarios de la sección inferior de marcos metálicos y tornapunta, tensores entre cada marco.
18. Colocación del concreto lanzado, previamente a la aplicación del concreto se colocan drenes de PVC distribuidos en la periferia de la sección.

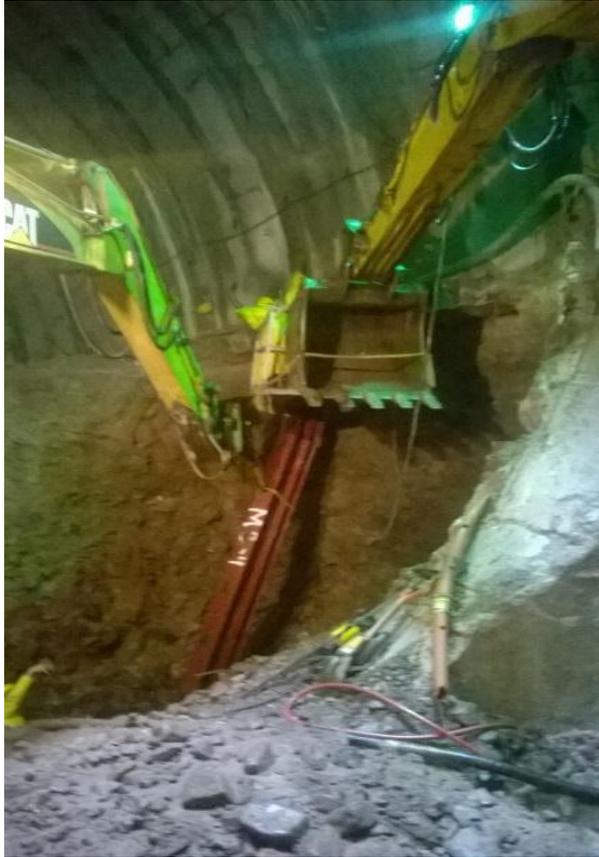


Figura 41. Colocación de patas (CONAGUA, 2015).

19. Una vez concluida la excavación y el revestimiento de la media sección inferior se procede a la colocación del soporte del suelo del frente, mediante una capa de concreto lanzado de 10 cm de espesor y un sistema de anclas de fibra de vidrio cuidando que el corte del suelo en el frente de la galería tenga una inclinación de 0.125:1.
20. Colocación del armado de refuerzo colado de la losa de fondo en toda la longitud de la galería.

El Anexo 6 muestra las etapas constructivas de la media sección inferior de la galería de montaje en un diagrama.

3.3) Procedimiento de ensamble de máquina tuneladora

Derivado de que la longitud de la tuneladora y sus componentes es de aproximadamente 150 m, y por evidente poco espacio en la lumbrera, el ensamble se realiza por partes. Para esto, existen dos métodos que son:

a) Ensamble en lumbrera con umbilicales

Este procedimiento considera el ensamble de la TBM en superficie, en paralelo a la construcción de un emboquillamiento. Una vez concluidas estas actividades, así como las necesarias para recibir la TBM en el fondo de lumbrera, principalmente el muro de apoyo, la cuna metálica y el portal de salida, se procede a la bajada.

Cabe señalar que el espacio en el fondo de lumbrera es reducido por lo que los componentes de la TBM se deben ubicar en múltiples niveles que permiten la separación de los componentes de la máquina y otorgan mayor espacio para maniobras. Por lo tanto, se necesita una planeación muy extensiva para calcular exactamente en dónde y cuántos niveles se requieren.

Conforme a lo anterior, la tuneladora se ensambla paulatinamente dentro de la lumbrera y, a medida que va excavando dentro del túnel, se realiza el montaje del resto de sus componentes como se muestra a continuación.

Inicialmente se procede con la bajada y ensamble de la cabeza de corte y sus accesorios:

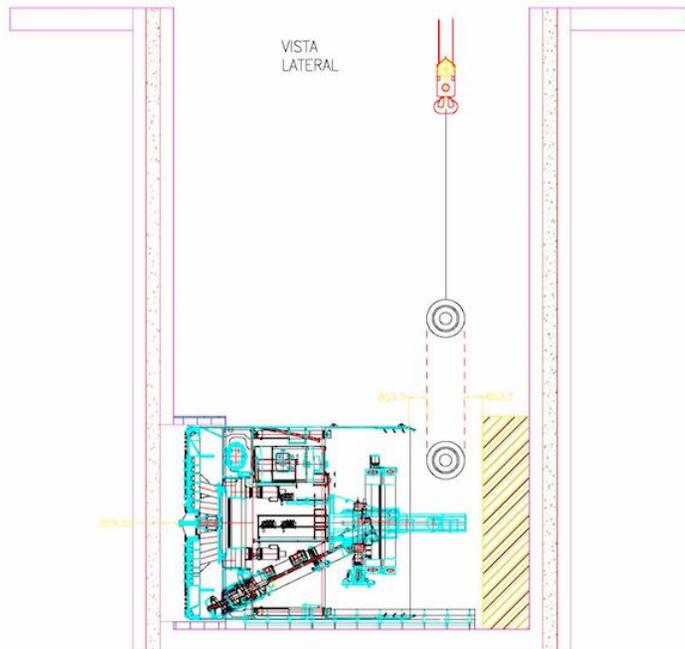


Figura 42. Bajada de la cabeza de corte y el tornillo sinfín (CONAGUA, 2010).

Una vez avanzada la cabeza de corte se colocan dovelas metálicas y soportes a base de puntales, que resisten el empuje del escudo a partir de gatos hidráulicos, hasta excavar 1.50 m para colocar el primer anillo de dovelas sobre el terreno, situando una a una las piezas en la grúa transportadora que las llevará hasta el erector que las colocará en la posición de montaje.

La excavación se efectúa instalando las dovelas como revestimiento primario y se utiliza la inyección de lechada de cemento para unir la dovela con el terreno natural.

La cabeza cortadora produce una presión en el frente oponiéndose a la presión del suelo, logrando con esto un punto de equilibrio de presiones en el frente de excavación. Este proceso se controla a través del extractor del material o tornillo sinfín y de la velocidad de rotación del escudo durante el proceso de excavación.

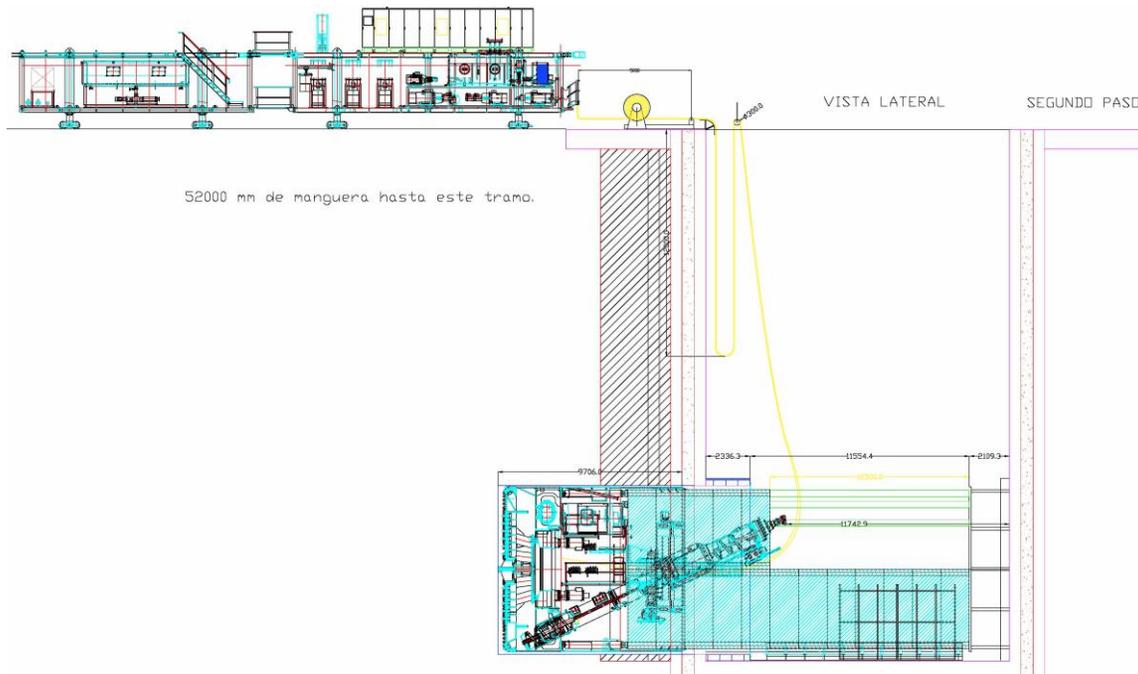


Figura 43. Conexión mediante umbilicales entre la cabeza cortadora y los carros 1 y 2 (CONAGUA, 2010).

Al contar con el espacio necesario para la bajada del carro 1 se detiene el equipo, se procede a la bajada de dicho carro y se desliza sobre los anillos colocados. A su vez, se inicia la desinstalación de cordón umbilical junto con los equipos principales y la conexión definitiva entre el carro 1 y el escudo.

Una vez terminada esta conexión se realizan pruebas de funcionamiento de la TBM la cual estará lista para continuar con la excavación del túnel hasta contar con el espacio para la bajada de los demás carros. Con el ingreso del segundo carro, se permite la operación de un sistema provisional de rezaga a base de botes o vagonetas lo que permite el ingreso paulatino del resto de los carros hasta completar el ensamble del equipo auxiliar del escudo.

Una vez ensamblada totalmente la tuneladora se retira el atraque de la lumbrera, los anillos metálicos y se realiza la construcción de la plataforma de trabajo, instalación de un cambio california, tuberías, la banda vertical, la banda horizontal y las instalaciones necesarias para reiniciar la excavación del túnel.

En suma, con su equipo de apoyo que mide aproximadamente 150 m, la TBM continúa la excavación de los metros subsecuentes de túnel hasta llegar a la primera lumbrera de paso.

b) Ensamble en lumbrera con galería de montaje

Esta alternativa para el montaje de la TBM consiste en la excavación de un túnel convencional para el ensamble del escudo más los dos primeros carros de éste que alojan el sistema de rezaga. Lo anterior se definió por las condiciones particulares de la lumbrera L-21A, como su gran profundidad (110 m). Para esto, se diseñó en dos secciones: la sección 1 (sección mayor) tiene la función de albergar a la estructura de reacción contra la cual se apoyará la TBM y cuenta con una longitud de 13 m. La sección 2 (sección menor) alojará el cuerpo de la TBM durante el proceso de ensamble de los carros pórtico y tiene una longitud de 14 m, dando como resultado una longitud total de galería de 28 m.

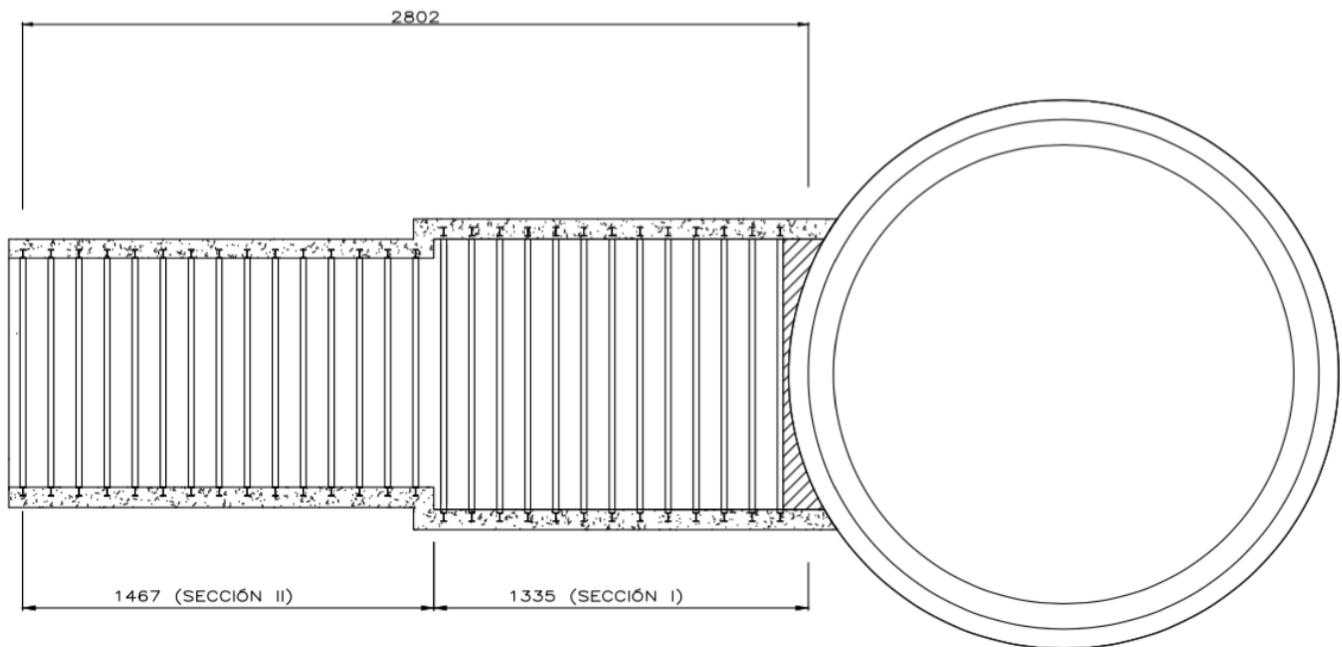


Figura 44. Seccionamiento de la galería de montaje (CONAGUA, 2010).

Cabe señalar que para el ensamble de la TBM en el fondo de la lumbrera es necesario construir una serie de elementos estructurales que permiten las maniobras de ensamble que se describen a continuación:

- Cuna para recepción: Es una estructura de concreto reforzado, anclada a la losa del fondo de la lumbrera, cuya finalidad proporcionar apoyo al escudo y conformar un elemento de continuidad del túnel en la lumbrera.
- Sello de salida: Es un elemento de contención que impide la circulación del material hacia la lumbrera, por la holgura existente entre la camisa del escudo y la pared de la excavación durante los primeros empujes.
- Estructuras de concreto (muertos): Son estructuras de forma trapezoidal construidas de concreto y que sirven como soporte para los contraventeos de la estructura de reacción, la cual servirá para lograr los primeros empujes de la TBM.
- Ensamble de la TBM: Se realiza mediante la utilización de una grúa de 800 toneladas lo que permite bajar con seguridad los componentes del cuerpo del escudo que son 4: rueda corte, media sección superior, media sección superior y faldón.
- Deslizado de la TBM dentro de la galería en zona de sección mayor: Esto se realiza para dejar a la TBM en la posición suficiente para realizar el arranque apoyada en la estructura de reacción.

Una vez que en la galería ya se cuenta con las condiciones necesarias para la bajada de los carros, se procede a la conexión de cada tren y en el orden que se muestra a continuación:

- El carro 2, que cuenta en su parte superior con el tablero principal de control y el sistema de inyección de lechada que se coloca en la sección anular entre el terreno y los anillos de dovelas colocados. Este carro mide 14 m y se desliza sobre vías.
- El carro 3, que cuenta con el sistema de enfriamiento y compresores y que mide 12 m.

- El carro 4, que cuenta con la extensión del sistema para el suministro y retorno de agua de enfriamiento, mide 12 m.
- El carro 5, que tiene el sistema de rezaga por medio de bandas transportadoras, la conexión con el sistema de ventilación al interior del túnel, la extensión de las líneas de alta y baja tensión que abastecen de energía a la máquina y alumbran el túnel, el sistema de tuberías para rezaga y bomba de achique. Este carro mide 13 m.

Una vez instalados todos los carros de la TBM, se realiza el habilitado e instalación de ménsulas metálicas y la estructura de reacción; la finalidad será dar soporte al primer anillo de dovelas que se colocará en el túnel para que, a partir de él, se lleve a cabo la excavación. Las ménsulas formarán un círculo con diámetro de 8.60 m (equivalente al diámetro exterior del anillo de dovelas) y separadas entre ellas a cada metro.

Una vez terminada la instalación de ménsulas se realiza el ensamble del primer anillo de dovelas.

Posteriormente, se procede con el empuje de la TBM y se instala el segundo anillo de dovelas.

Previo al inicio del empuje y ensamble del anillo de dovelas, se instalan dos cuñas y dos troqueles en el primer anillo con el objeto de brindar soporte y evitar la deformación del mismo.

A continuación, se realiza el empuje y ensamble de los anillos de dovelas 3 y 4.

El anillo 4 cuenta con una estructura metálica que sustituye a la cuña de la dovela sirviendo de ventana de acceso al espacio ubicado entre las dovelas y la pared de la galería.

A continuación, se realiza el empuje y ensamble del anillo de dovelas número 5.

Al igual que en el anillo de dovelas 4 se sustituye la cuña por una estructura metálica.

A continuación, se realiza el empuje y ensamble del anillo número 6.

Por medio de la ventana de acceso se realizan los trabajos de troquelamiento de los anillos 2 y 3.

Por último, se rellena el espacio comprendido entre las dovelas y el muro de la galería mediante el empleo de gavilla de 3/8”.

En los Anexos 7 y 8 se muestran las etapas para el ensamble de la TBM y el procedimiento de arranque de la máquina.

A continuación se muestra un modelo representativo del armado de la TBM en la galería para montaje:

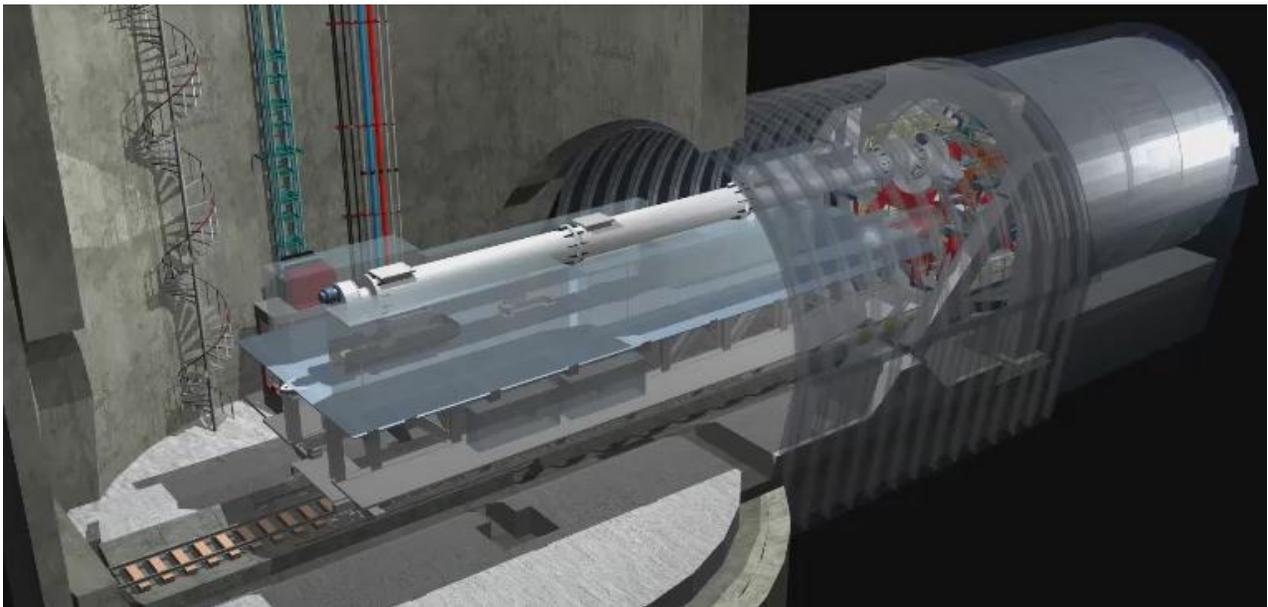


Figura 45. Modelo de TBM en el fondo de la lumbrera (CONAGUA, 2010).

Una vez ensamblada totalmente la tuneladora con su equipo de apoyo que mide aproximadamente 95 m, continuará el proceso de excavación de manera sistematizada en ciclos de 1.5 m, lo cual consiste en excavar y colocar anillos de dovelas de manera sistemática, continuando así el proceso hasta llegar a la siguiente lumbrera, según se muestra a continuación.

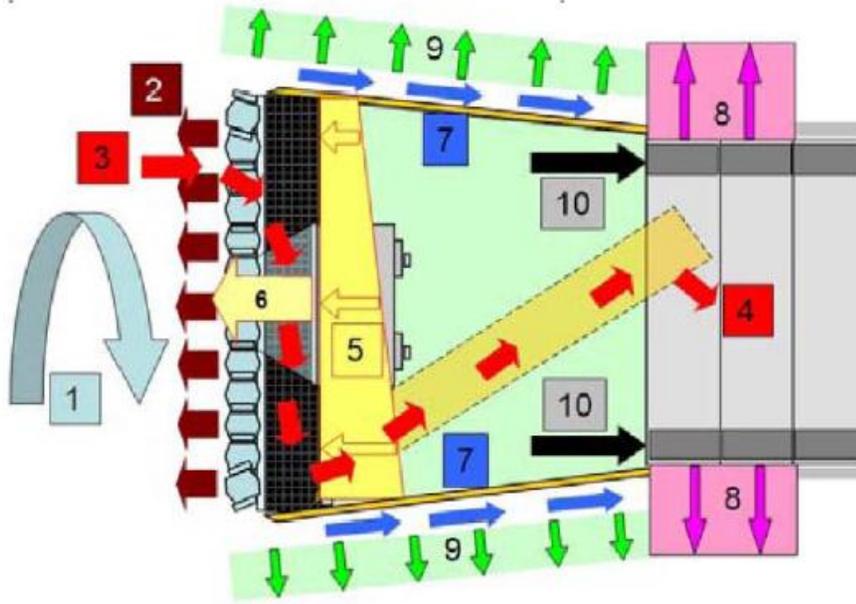


Figura 46. Principio operativo del escudo EPB (CONAGUA,2014).

Secuencia operativa:

- | | |
|--|---|
| 1. Giro de la rueda de corte. | 6. Fuerza de empuje. |
| 2. Empuje transmitido a la cabeza. | 7. Estado de inercia del escudo. |
| 3. Flujo de material a través de la cabeza de corte. | 8. Inyección de mortero. |
| 4. Material rezagado a través de tornillo sinfín. | 9. Fuerza de fricción entre el terreno y el escudo. |
| 5. Presión en la cámara de excavación. | 10. Cilindros de empuje |

Capítulo 4: Conclusiones

“El poder más fuerte no es el que sirve para destruir si no para construir.” Daniel E. Villamil

Para resolver el problema del drenaje profundo en la Ciudad de México es necesaria la construcción de una nueva obra que amplíe la capacidad de desalojo, por lo que el Túnel Emisor Oriente, se propone como una obra indispensable para recuperar la seguridad contra inundaciones en la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que permitirá duplicar la capacidad actual del sistema de drenaje, disminuida por el crecimiento poblacional y por hundimientos en cauces importantes que impiden llevar a cabo labores de mantenimiento al sistema de drenaje profundo, poniendo en riesgo su integridad estructural.

A nivel mundial, esta obra representa el más importante proyecto hidráulico derivado de su complejidad constructiva que involucra diversas condiciones geológicas y sus dimensiones sin precedentes.

Particularmente, en esta tesis se analiza y describe el procedimiento constructivo de una galería de montaje para el ensamble de una máquina tuneladora en el proyecto Túnel Emisor Oriente, actualmente en construcción, enfocado en la lumbreras de montaje L-21A. Una galería de montaje es una porción de túnel convencional construida especialmente para alojar instalaciones especiales para el montaje de una máquina tales como poleas, polipastos y rieles, y por tal motivo requiere de un proyecto específico que considere dimensiones extras, necesarias para la correcta realización de las maniobras.

Como ya se describió, existen dos procedimientos para el ensamble de una máquina tuneladora a nivel de túnel, mediante umbilicales y con una galería de montaje.

En el caso particular de la lumbrera de montaje L-21A, se determinó que la mejor alternativa era una galería, sobre todo por su gran profundidad ya que ronda los 110 m. Para la selección finalmente del procedimiento de ensamble mediante galería se revisaron

y compararon las siguientes ventajas y desventajas, basadas en experiencias y cálculos del fabricante de la TBM:

Procedimiento mediante umbilicales:

- a) El utilizar este sistema dada la gran profundidad de la lumbrera implica dificultades y problemas por el riesgo que acarrea manejar cables y mangueras desde 110 m de altura, lo cual hace además ineficiente la operación del equipo.
- b) El costo de adquisición en líneas de alta presión es alto, y en la parte eléctrica se tiene el problema de caídas de voltaje, pues el control de éste se lleva en la cabina desde la superficie habiéndose estimado por experiencia que dicha caída puede ser hasta del 15%, y esto está directamente relacionado con la potencia de operación de la máquina. De acuerdo con los expertos, si el panel de potencia llegara a fallar se tendría una situación de emergencia que podría poner en riesgo la vida del personal y la máquina
- c) Debido a los esfuerzos a los que están sometidos los cables, éstos necesitan estar asegurados a la pared del túnel en varios tramos cortos; si esto no se hace correctamente el peso propio de los cables colgando de la lumbrera podría dañarlos ocasionando fallas eléctricas. También podría generar situaciones peligrosas para la gente que se encuentra trabajando en el fondo de la lumbrera.
- d) La TBM necesita perforar entre 70 y 100 m antes de retirar los cables umbilicales; si no se tiene la máquina completamente ensamblada, esto toma mucho más tiempo que las operaciones normales con una máquina completa, ya que aumenta el tiempo para sacar la rezaga, para la inyección del relleno anular, para limpiar las líneas de inyección y otros procesos.

En resumen, el tiempo y los riesgos involucrados son mayores que con un inicio estándar utilizando una máquina completamente ensamblada, para lo cual existe la alternativa de la galería de montaje.

Procedimiento mediante galería de montaje:

- a) No existe el riesgo por el manejo de cables, tuberías ni ningún otro tipo de aditamento.
- b) No existe el riesgo en el funcionamiento y capacidad de los equipos y componentes de la TBM.
- c) El sistema de la Galería permite ensamblar el escudo y el puente de operación en conjunto lo cual garantiza una correcta operación en el arranque de la TBM.
- d) Permite casi de forma inmediata iniciar los preparativos para instalar el sistema de rezaga en la lumbrera.
- e) Permite el inicio de la excavación del túnel de forma más segura, disminuyendo los riesgos en la funcionalidad del equipo y del propio personal, permitiendo realizar otros trabajos en el fondo de la lumbrera al tener más espacio.
- f) Por todo lo anterior, se determinó que la mejor opción fue la de la de construir una galería de montaje que en este caso fue un túnel convencional de 28 m de longitud en forma de herradura.

Si bien la galería de montaje entra en el terreno de los túneles convencionales, en este caso particular requiere de un método constructivo especial que permita la ejecución de maniobras de precisión durante el armado de la TBM; además en muchas ocasiones estas galerías son solicitadas por el propio fabricante de las máquinas tuneladoras para garantizar su correcto funcionamiento.

Para la galería de la lumbrera L-21A, fue necesario implementar obras auxiliares para su construcción, tales como la perforación de pozos de bombeo, adicionales a los de la propia lumbrera, para el abatimiento y control de las presiones piezométricas, objetivo que se alcanzó ya que durante la apertura del hueco en la pared de la lumbrera y en la excavación de la galería las filtraciones de agua remanentes fueron totalmente controlables mediante bombeo de achique. Otros trabajos auxiliares complementarios a la galería son los de la llamada obra civil que terminan afinando a la obra principal, y que incluyen una cuna de concreto con un riel embebido y alineado para facilitar el arrastre de la TBM hacia el frente

de excavación, un marco de reacción con elementos de cimentación y empotramiento en la losa de fondo de la galería, así como instalaciones menores como losas de ajuste de niveles y travesaños empotrados en el techo de la galería.

Cabe señalar que no obstante al ser un túnel convencional los tiempos de construcción de la galería superan a los normales debido a las características funcionales previstas de la misma y a la geología del sitio que determinó finalmente el procedimiento constructivo por etapas (excavación a media sección superior y media sección inferior), con la colocación de rastras a la mitad del túnel y tornapuntas en el fondo de la galería, lo cual afecta los ciclos de excavación, que finalmente repercuten en plazos más largos de construcción.

Cabe señalar que la construcción de la galería de montaje y el ensamble de la tuneladora representan actividades muy significativas en el proyecto, por la complejidad tanto en su construcción como en el procedimiento de armado y alojamiento del equipo, lo que involucra un alto grado de especialización y el involucramiento de muchas disciplinas dentro del diseño, construcción, montaje y puesta en marcha de la excavación.

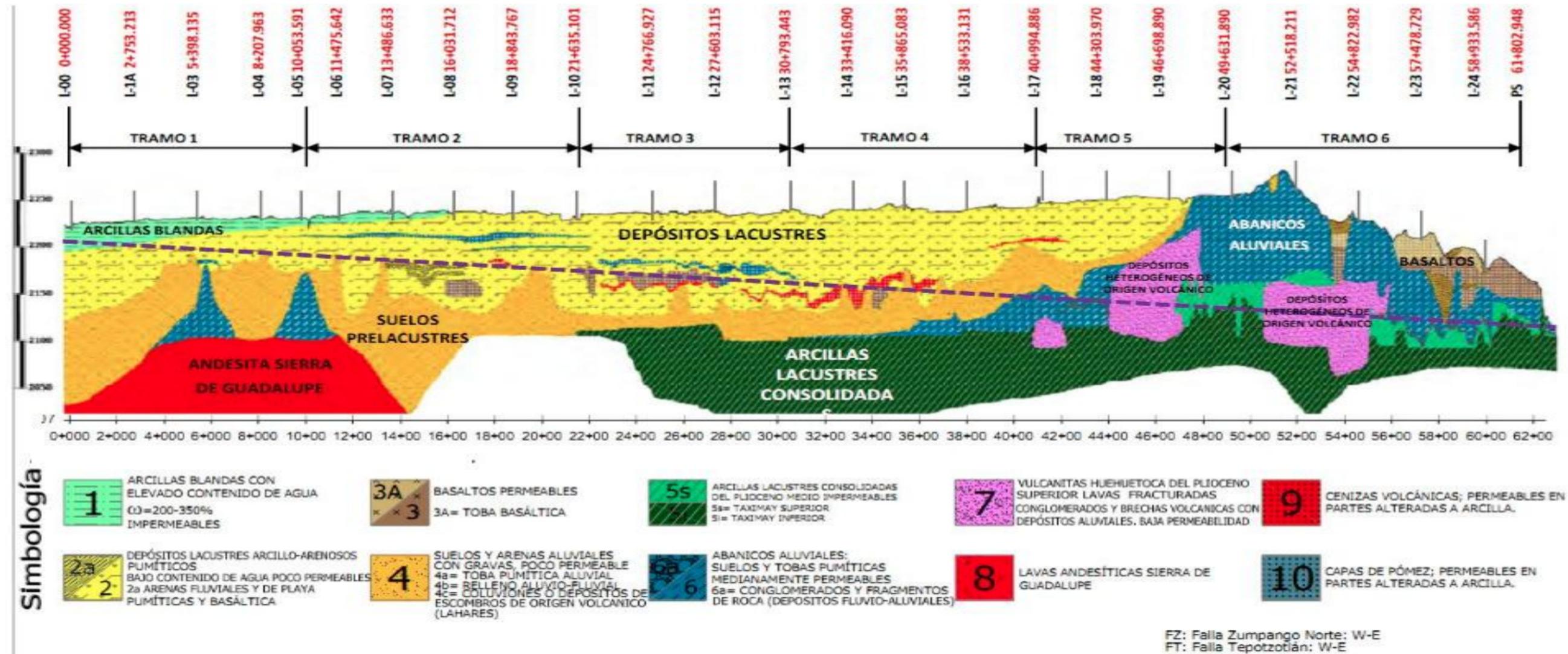
Referencias

- Aguayo, J. E. Marín, S. (1989). Evolución Geológica de la Cuenca de México. Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. México, D. F.
- Aguilar M. A. (2012). Túnel Emisor Oriente: Análisis, diseño y comportamiento. En Geotecnia, Vol. 223, pp. 22-32.
- Alvarado M. Hernández C. y Solís J. (2007). Ontología para: Prevención y remediación de problemas debido al cambio climático provocado por la emisión de contaminantes en el Valle de México. Centro de Investigación de Estudios Avanzados.
- *Arce J. L. Escolero O. Morales-Casique E. (2014). Geología del Valle de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 67, número 2, p. 1-2.*
- CONAGUA. (2012). Traslado y ensamble del escudo HK S-497 para el tramo 1 del Túnel Emisor Oriente. México.
- CONAGUA. Construcción de la lumbrera L-21A. Planos TEO-6-L-21A-PC-01(2014). TEO-6-L-21A-PC-06(2014).
- CONAGUA. Construcción de la gallería de montaje. Planos TEO-6-T-21A-BT-PL-001g (2014).
- CONAGUA. (2012). Construcción del Túnel Emisor Oriente. México. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS%20BLANCOS/CONAGUA-05%20Construcci%C3%B3n%20del%20T%C3%BAnel%20Emisor%20Oriente.pdf>
- De Jesús A. Lúna H. (2014). Sistema de Gestión de Calidad Aplicado en la Construcción del Túnel Emisor Oriente. Tesis de licenciatura en ingeniería civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Perri G. (2008). Construcción mecanizada de túneles urbanos mediante “TBM”. Tercer seminario andino de túneles. Bogotá, Noviembre.
- Gutiérrez P. Análisis y diseño del revestimiento de un túnel en suelos del Valle de México. Proyecto terminal en ingeniería I y II. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Herrenknecht. [citado 2016-08-15]. [En línea]. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>
- Juárez H. F. (2012). Procedimiento de construcción de las dovelas para el Túnel Emisor Oriente. Tesis de licenciatura en ingeniería civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Robbins [citado 2016-08-15]. [En línea]. Disponible en: <http://www.therobbinscompany.com/en/our-products/tunnel-boring-machines/>
- Saenz C. R. Construcción de túneles y lumbreras en suelos blandos y firmes. CSF construcciones, s.a. de c.v.
- Sampayo G. (2015). Análisis de estabilidad de Galería de Montaje. Cuarto Coloquio de Jóvenes Geotecnistas. México, Octubre.
- SEMARNAT. El Túnel Emisor Oriente duplicará la capacidad del drenaje profundo del Valle de México. México. Disponible en: http://www.atl.org.mx/aguadf/images/docs/Folleto_El_Tunel_Emisor_Oriente.pdf
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México. México. Disponible en: <http://es.slideshare.net/CICMoficial/2030-los-retos-pasado-presente-y-futuro-del-agua>

Anexos

Anexo 1. Geología en el trazo del TEO (CONAGUA, 2010).



Anexo 2. Características geotécnicas (CONAGUA, 2016).

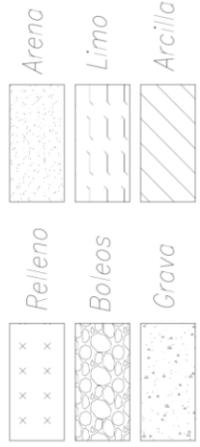
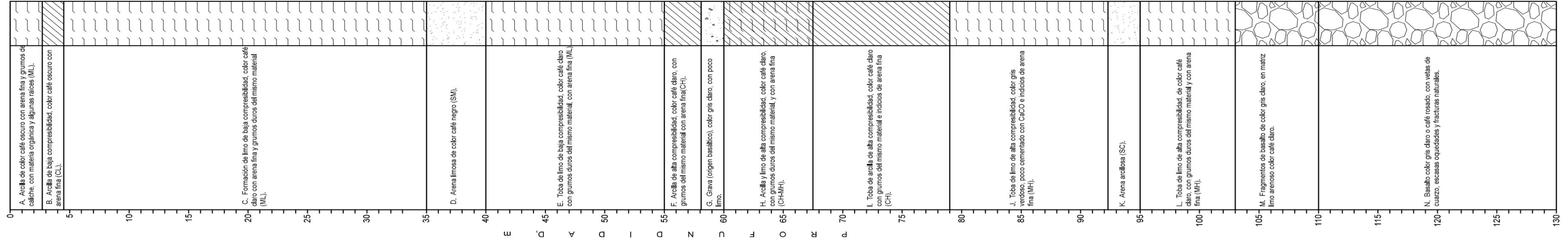
	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6
Principales tipos de suelo esperados en el frente del túnel	Arcillas lacustres y limos de mediana a alta compresibilidad	Arenas limosas y arcillas lacustres pumíticas compacidad media	Limos arenosos, arenas limosas (tobas) y basalto	Limos compactos y arcillas arenosas (tobas)	Arcillas, limos, arenas y fragmen-tos de roca	Limos compactos, gravas y boleos
Cobertura de suelo sobre el túnel [m]	15 a 40	40 a 65	65 a 80	80 a 105	105 a 135	10 a 135
Peso volumétrico húmedo [kN/m³]	12.5 a 15	15 a 18	13 a 17 (suelos) 25 (roca)	17 a 18	16 a 18	17 a 18 (finos) 20 a 26 (gruesos)
Resistencia al corte no drenada (suelos) [KPa]	60 a 200	88 a 350	160 a 550 (suelos) 937 (roca)	310 a 670	243 a 600	530 a 2300 (finos) 20 a 38 (gruesos)
Rigidez, Módulo E [MPa]	7 a 28	10 a 90	45 a 140 (suelos) 860 (roca)	45 a 129	190 a 246	114 a 965 (finos) 50 a 3,000 (gruesos)
Contenido de agua [%]	30 a 300	25 a 90	5 a 30	30 a 40	30 a 40	45
Permeabilidad [cm/seg]	Muy baja**	Muy baja**	0.68 a 2.24 x 10 ⁻⁴	5.91 a 12.8 x 10 ⁻⁴	2.30 a 3.11 x 10 ⁻⁴	1.51 a 9.34 x 10 ⁻⁴
Abrasividad [CAI*]	No aplica	No aplica	2.9 a 4.2	No aplica	No aplica	0.7 a 1.5
Presiones hidráulicas potenciales [Bar]	0.0. a 1.6	0.0 a 1.9	0.5 a 3.5	3.5 a 5.5	3.5 a 7.5	5.0 a 6.5

*CAI: Índice de abrasividad de Cerchar.

**El problema de permeabilidad se tiene en los lentes de arena o limos arenosos intercalados en la formación arcillosa.

Anexo 3. Modelo geotécnico de la lumbrera L-21A (CONAGUA, 2014).

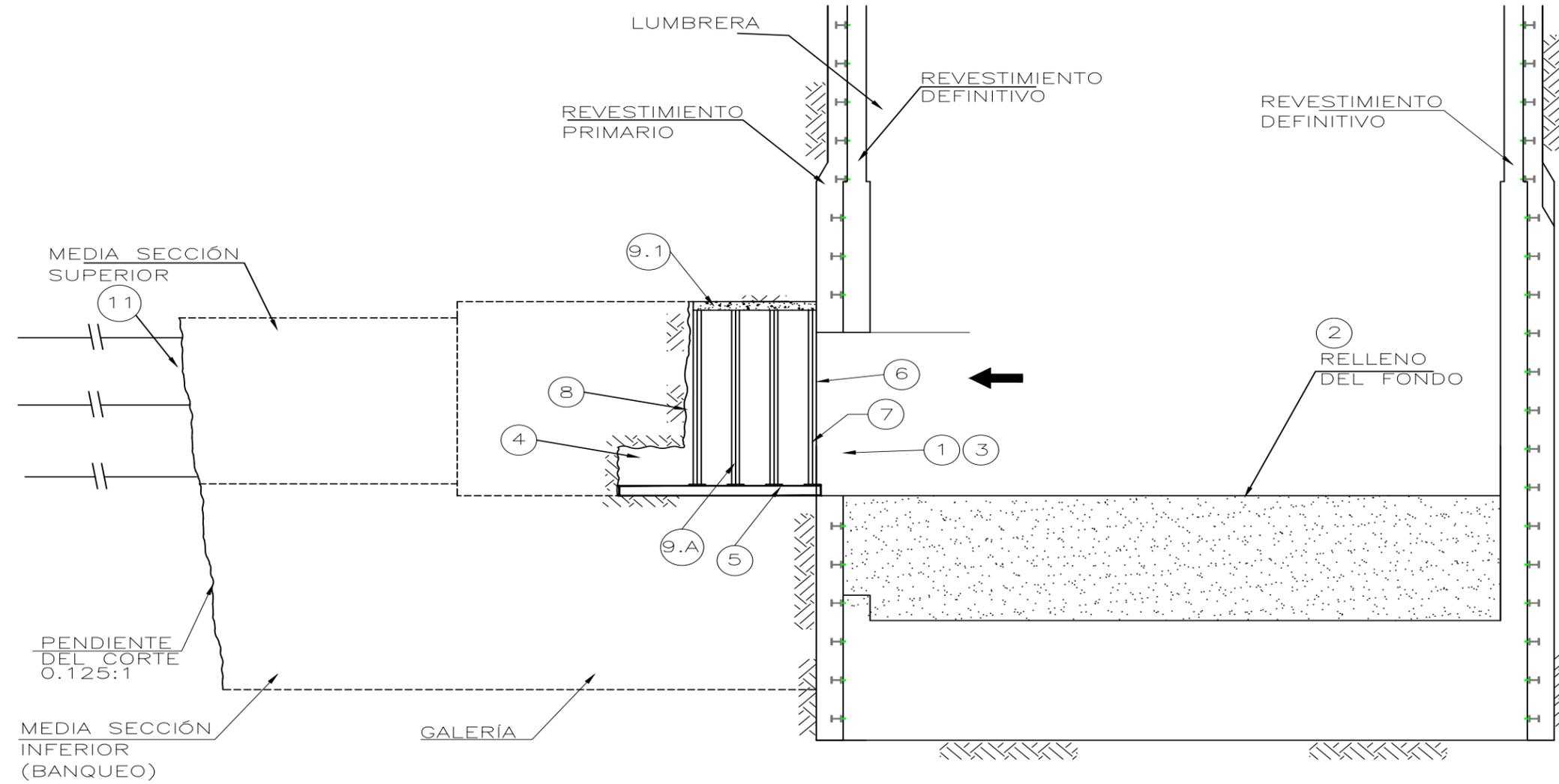
MODELO GEOTÉCNICO L-21A



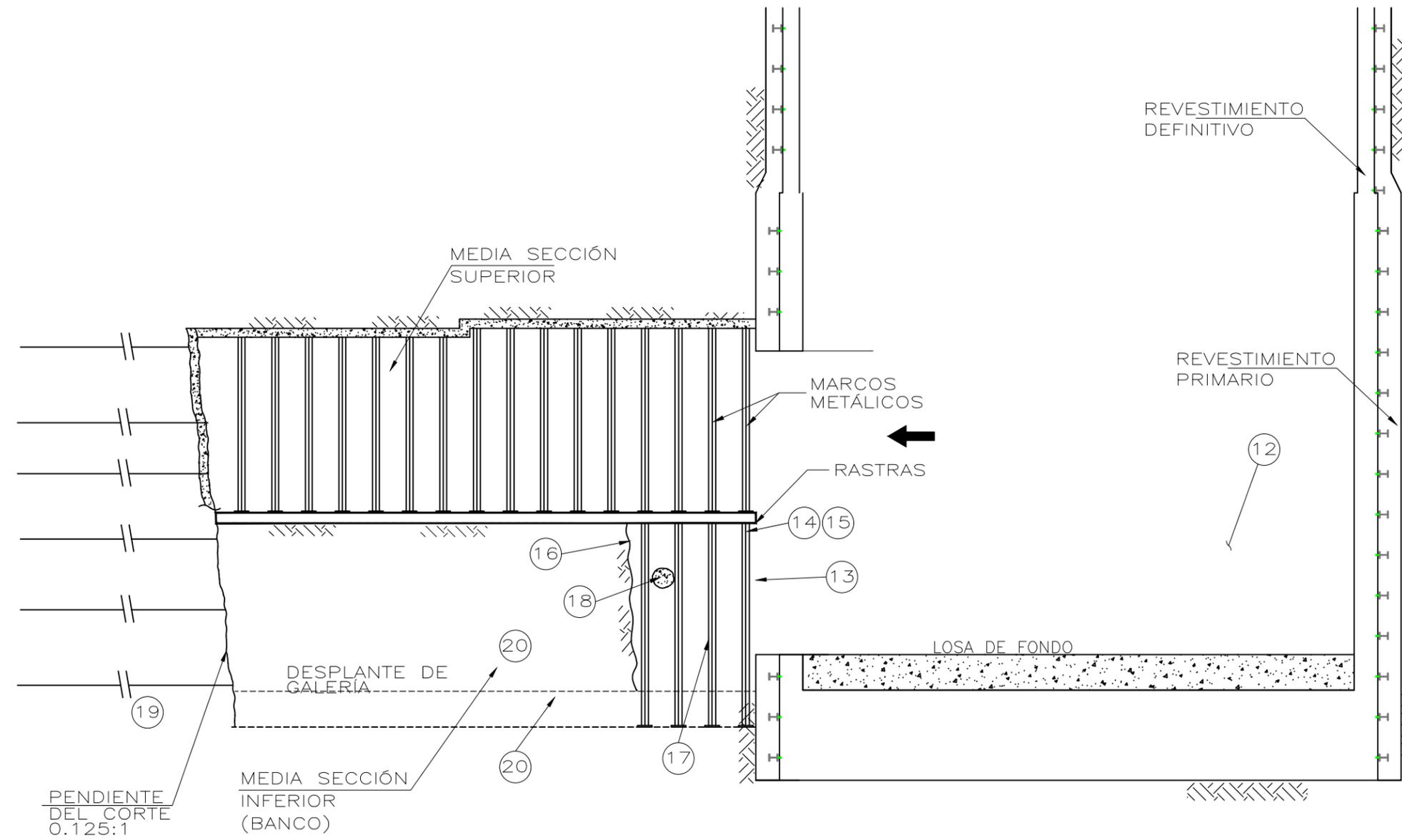
Anexo 4. Características estratigráficas del trazo (CONAGUA, 2015).

Estrato	Descripción	S.U.C.S.	Profundidad m	H m	γ kN/m ³	c kPa	ϕ °	ν -	k_0 -	E kPa
A	Arcilla de color café oscuro con arena fina y grumos de caliche, con materia orgánica y algunas raíces.	-	0.00	2.70	17.73	95.1	0.0	0.46	0.46	9,700
			2.70							
B	Arcilla de baja compresibilidad, color café oscuro con arena fina.	CL	2.70	1.80	17.83	465.5	40.7	0.30	0.56	143,913
			4.50							
C	Formación de limo de baja compresibilidad, color café claro con arena fina y grumos duros del mismo material.	ML	4.50	30.50	16.17	614.6	42.3	0.35	0.59	169,051
			35.00							
D	Arena limosa de color café claro.	SM	35.00	5.00	14.98	415.4	40.0	0.30	0.60	254,471
			40.00							
E	Toba de limo de baja compresibilidad, color café claro con grumos duros del mismo material, con arena fina.	ML	40.00	15.00	16.80	624.1	42.4	0.35	0.60	253,098
			55.00							
F	Arcilla de alta compresibilidad, color café claro, con grumos del mismo material y con arena fina.	CH	55.00	3.10	16.64	704.8	43.2	0.40	0.57	296,262
			58.10							
G	Grava (origen basáltico), color gris claro, con poco limo.	-	58.10	1.90	20.00	704.8	43.2	0.33	0.57	888,786
			60.00							
H	Arcilla y limo de alta compresibilidad, color café claro, con grumos duros del mismo material y con arena fina.	CH-MH	60.00	7.50	18.11	520.4	41.3	0.38	0.52	88,682
			67.50							
I	Toba de arcilla de alta compresibilidad, color café claro, con grumos del mismo material e indicios de arena fina.	CH	67.50	11.50	17.15	1,085.5	45.7	0.40	0.49	157,009
			79.00							
J	Toba de limo de alta compresibilidad, color gris verdoso, poco cementado, con CaCO e indicios de arena fina.	MH	79.00	13.30	17.17	803.9	44.0	0.35	0.45	181,289
			92.30							
K	Arena arcillosa.	SC	92.30	2.70	17.23	677.4	42.9	0.30	0.42	189,529
			95.00							
L	Toba de limo de alta compresibilidad, color café claro, con grumos duros del mismo material y con arena fina.	MH	95.00	8.00	18.98	543.0	41.6	0.35	0.40	111,442
			103.00							
M	Fragmentos de basalto de color gris claro, en matriz limo arenoso color café claro.	-	103.00	7.00	24.90	481.2	40.9	0.25	0.39	1.88E+06
			110.00							
N	Basalto color gris claro o café rosado, con vetas de cuarzo, escasas oquedades y fracturas naturales.	-	110.00	30.00	25.40	350.0	40.0	0.25	0.36	3.16E+06
			140.00							

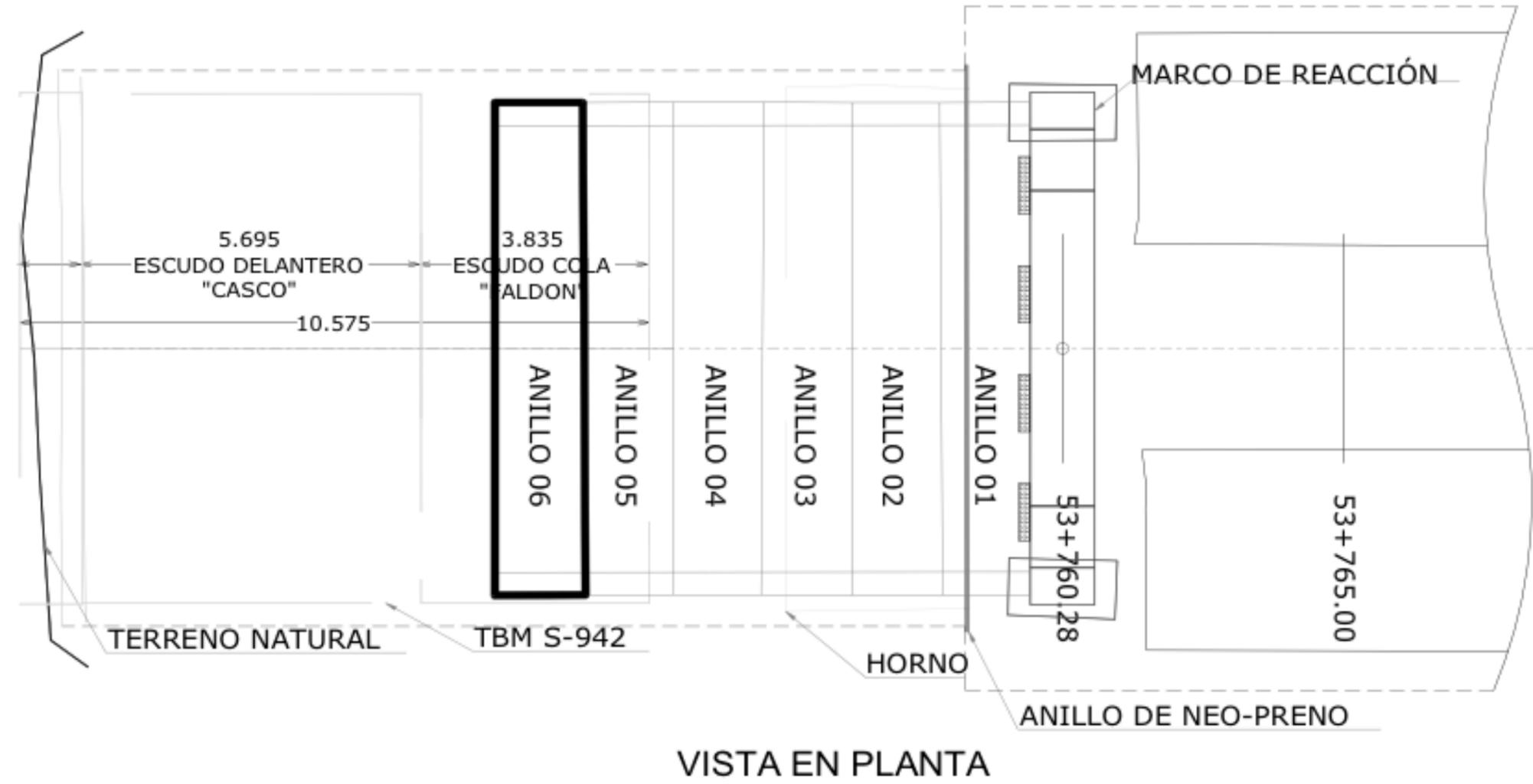
Anexo 5. Etapas constructivas de la media sección superior (CONAGUA, 2007).



Anexo 6. Etapas de la construcción de la media sección inferior (CONAGUA, 2007).



Anexo 7. Etapas del ensamble de la TBM (CONAGUA, 2016).



Anexo 8. Etapas del ensamble de la TBM (CONAGUA, 2016).

