



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL TÚNEL
EMISOR ORIENTE, TRAMO I Y II”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

CLAUDIO ALBERTO ÁVILA ALMAGUER

DIRECTOR DE TESIS:

ING. LUIS ZARATE ROCHA



MEXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2012

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres:

Por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y por la formación que durante años he recibido en beneficio de mi persona, debido a sus consejos y enseñanzas, son parte de un “cimiento” importante en mi vida y participes de este logro profesional.

A mis Hermanos:

El apoyo y los consejos que día a día me brindan.

M.I. Sergio Macuil Robles

Por las enseñanzas recibidas en el aula contribuyendo satisfactoriamente al desarrollo académico de la Ingeniería Civil con el propósito de formar futuros profesionales participes de infraestructura que se genere en cualquier lugar y por la oportunidad para desarrollar la Tesis.

A mis Profesores de Clase

A las enseñanzas, consejos, motivación y respeto fomentadas en el Aula de clases.

A mis Amigos.

A su amistad Incondicional compartiendo diversos momentos.

“PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE, TRAMO I Y II”

INTRODUCCIÓN

	Pág.
I. ANTECEDENTES.	6
1.1. Historia del Drenaje de la Cuenca del Valle de México	6
1.2. Obras Hidráulicas en la Cuenca del Valle de México	8
1.2.1 Las tres salidas del Valle de México para el desalojo de Aguas Residuales y de Pluviales	10
1.3. Deterioro del Sistema de Drenaje Profundo del Valle de México	10
II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.	11
2.1 Descripción del Proyecto	11
2.2 Tipo de Contrato	13
2.3 Geología del Trazo	13
2.4 Zonificación Geológica-Geotécnica	17
2.5 Frentes de Trabajo	19
III. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL TÚNEL TRAMO I Y II.	22
3.1 Construcción de Lumbreras	22
3.1.1 Para suelos Mixtos	22
3.1.2 Suelos consistentes o roca	23
3.2 Construcción de Muros Milán	24
3.3 Excavación Convencional en Lumbreras	27
3.3.1 Muro Milán en la primera parte de su profundidad y Excavación convencional	29
3.3.2 Hidrofresa	31
3.4 Bombeo para el abatimiento del Nivel Piezométrico	34
3.5 Procedimiento Constructivo del Túnel	35
3.5.1 Rezaga	38
3.5.2 Ventajas de tratamiento del terreno con espumas	39
3.5.3 Mejoramientos de entrada y salida	40
3.5.4 Jet Grouting	40
3.5.5 Pilas de suelo-cemento	42
3.6 Características básicas de un Escudo EPB (Earth Pressure Balanced)	43
3.6.1 Mantenimiento y reemplazo de herramientas de corte	46
3.7 Ensamble y puesta en marcha de la Tuneladora	47
3.7.1 Trabajos en la lumbrera	47
3.7.2 Armado de la maquina EPB	48
3.8 Construcción de Galerías	49
3.8.1 Bóveda de paraguas	53
3.8.2 Revestimiento	53
3.8.3 Anclas de Fibra de vidrio	53

3.8.4	Inyección de Espacio Anular	56
3.9	Fabricación de Dovelas	57
3. 10	Revestimiento Definitivo del Túnel	59

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

Actualmente el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México es Insuficiente y existe la necesidad de un sistema alternativo con el propósito de evitar inundaciones severas en la Ciudad y zona conurbada, es urgente aumentar la capacidad del drenaje para cubrir con las necesidades generadas por el crecimiento de la población y la demanda en el consumo de agua, el Túnel Emisor Oriente aumentará la capacidad de desagüe del valle de México, será posible realizar alternadamente el mantenimiento necesario en ambos drenajes y por lo tanto una operación adecuada del sistema. CONAGUA determinó que existe la necesidad de la Construcción del Túnel Emisor Oriente actualmente en curso, conforme a las características de un drenaje que, en conjunto con el Emisor Central satisfaga las necesidades de drenaje de la ciudad.

En los últimos años, los desarrollos constantes tecnológicos en las áreas de la Ingeniería de Obras Subterráneas y haciendo énfasis en este documento como es el caso de túneles, es posible disponer de diversos medios y herramientas para proyectar y construir de forma segura, eficiente y económica, los diferentes obstáculos y dificultades que nos muestra la naturaleza, por lo tanto nos provoca interés el área de Obras Subterráneas reduciendo los temores del pasado.

Se describe a continuación en este documento los diferentes procedimientos empleados para la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO), ubicado al norte de la ciudad de México, en una longitud aproximada de 62 km. A lo largo de su recorrido estará conformada para su construcción y posterior operación con 25 lumbreras y un Portal de Salida, en las cuales se combinan el uso del Muro Milán con el llamado "Método convencional" como métodos básicos de construcción, auxiliados con sistemas de bombeo para abatimiento del nivel freático a base de pozos profundos. La profundidad de las lumbreras varía de 32 m a 150 m, y la distancia entre ellas es de aproximadamente 2.5 km en promedio. Se construirán en sitios con diferentes características geotécnicas, atravesando desde depósitos arcillosos blandos de origen lacustre en sus primeros kilómetros, hasta zonas firmes caracterizadas por abanicos aluviales, boleos, roca y arcillas muy consolidadas en su última fase del recorrido, todo esto aunado a una presión hidrostática de hasta 7 bares en sus zonas más críticas. Asimismo se presentan los procedimientos de excavación del túnel mediante tuneladoras tipo EPB (Earth Pressure Balanced).

I. ANTECEDENTES.

1.1 Historia del Drenaje de la Cuenca del Valle de México

La Ciudad de México fundada en una zona tipo lacustre, a lo largo de su historia ha enfrentado retos importantes para el manejo del agua, como lo representan la conformación misma de la Cuenca del Valle donde se asienta y otro aspecto importante parte el enorme crecimiento de la población y de la mancha urbana, que han estado incrementando consistentemente la demanda del líquido, también se encuentran los caudales de aguas residuales y pluviales a desalojar por los sistemas de drenaje.

La Cuenca del Valle de México, localizada al sur de la Mesa Central, cuenta con una superficie de 9,600 km², incluyendo las cuencas tributarias de las Lagunas de Apan, Tecocomulco y Toxac. La conforman porciones territoriales de cuatro entidades federativas: el Distrito Federal, el Estado de México, el Estado de Hidalgo y en menor proporción el Estado de Tlaxcala. Está delimitada por cadenas montañosas con 11 sierras, en los cuatro puntos cardinales; interiormente cruzan la Cuenca otras 5 sierras (figura 1)

Fig. 1: Cuenca del Valle de México



En la gran planicie central esta a una altitud que oscila entre 2,240 m en el sur y 2,390 m en el norte, aunque en las cumbres del Popocatepetl y del Iztaccíhuatl rebasa los 5,250 m; su topografía integrada en tres zonas: la zona baja, la zona de lomeríos y la zona montañosa; ocupa una porción central en la Faja Volcánica Transmexicana. Las metamorfosis geológicas en los periodos Terciario Medio, Superior y Cuaternario, perfilaron sus formaciones estratigráficas, formando en este último, importantes volcanes basálticos.

Posteriormente lavas basálticas entre la Sierra Nevada y la Sierra de las Cruces, formaron la Sierra del Chichinautzin y cerraron la Cuenca, la que hasta entonces drenaba hacia la Cuenca del Río Balsas. Después se rellenó con estratos de cantos rodados, gravas, arenas, cenizas, arcillas lacustres y otras, saturándose de agua; este relleno dio origen a una extensa planicie con lagos someros formados por los escurrimientos de una diversidad de ríos caudalosos, que durante miles de años arrastraron cenizas volcánicas, aluviones y demás materiales, que al irse sedimentando fueron formando el fondo

arcilloso de los mismos; éstos fueron bautizados por los Aztecas con los nombres - enunciados de sur a norte- de Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango, todos de agua dulce, con excepción del Lago de Texcoco, de agua salobre; el Lago de Chalco, dejó de existir a principios del siglo pasado.

1.2 Obras Hidráulicas en la Cuenca del Valle de México

Las obras hidráulicas en la Cuenca del Valle de México iniciadas a partir de la fundación de la Gran Tenochtitlan en 1325. Desde entonces el ingenio y el esfuerzo de sus pobladores generado a través de la historia, complejos sistemas de acequias, diques y albarradones, presas y lagunas de regulación de caudales, calzadas y acueductos, llegando a los túneles profundos, sistemas de bombeo, entre otros, en continua preocupación por desarrollar acciones y obras que han permitido por una parte satisfacer la demanda de agua potable y por otra, el drenaje en forma eficiente de los caudales de aguas residuales y pluviales.

En lo relativo al drenaje y al desagüe pluvial, han estado desarrollandose a través de la historia de la región, obras para el desalojo de los caudales de las aguas residuales y de las aguas pluviales. Entre 1440 y 1450 Nezahualcóyotl, Rey de Texcoco, ingeniero, Arquitecto, Urbanista y además Poeta, diseñó y dirigió la construcción de un albarradón de 16 kilómetros de longitud y cuatro metros de ancho, para la protección de la Gran Tenochtitlan del azote de las inundaciones y de separar las aguas dulces provenientes de Xochimilco y Chalco, de las aguas saladas de Texcoco.

Fue hasta 1608, en que el Ingeniero y Cosmógrafo Enrico Martínez construyó en Nochistongo, cerca de Huehuetoca, la primera salida artificial de la Cuenca, un túnel o socavón de 13 km de longitud, perforando las montañas para desalojar las aguas y verterlas en el Río Tula, obra terminada 150 años después como el Tajo de Nochistongo. En 1803 y 1804 Humboldt evaluó tales obras hidráulicas y concluyó que se tenía que completar el plan de Enrico Martínez para drenar el Valle mediante un gran canal de desagüe. Esta idea pudo concretarse con la construcción del Primer Túnel de Tequixquiac, iniciado en 1865 y la del Gran Canal del Desagüe, de 47 km de longitud, construido con su plantilla a cinco metros abajo del nivel medio de la Ciudad, para conducir sus aguas por gravedad por ese túnel; ambos estuvieron en operación en marzo de 1900 y aún están en funcionamiento.

En 1930 se concluyó con la primera red de drenaje por gravedad, con un sistema de tuberías que descargaban al Gran Canal y al Lago de Texcoco; sin embargo, estas obras

fueron insuficientes debido al crecimiento demográfico y la expansión urbana, además de los problemas del hundimiento del suelo cada vez más acelerado, ocasionado por la sobreexplotación de los mantos acuíferos, que deterioró el sistema y disminuyó su capacidad para desalojar las aguas del Valle, lo que motivó la ampliación del Gran Canal y la construcción del Segundo Túnel de Tequixquiac, inaugurado en 1952.

En la primera mitad del siglo XX, al aumentar la demanda de agua, se inició la perforación de pozos profundos con el consecuente incremento en los problemas de hundimientos del suelo. Como resultado, el drenaje proyectado para trabajar por gravedad requirió de bombeo para depositar las aguas en el Lago de Texcoco y para elevarlas hasta el nivel del Gran Canal, aumentando los costos tanto de operación y de mantenimiento. A partir de la década de los años veinte se realizó la construcción del Sistema de Presas del Poniente y desde 1961 la del Interceptor del Poniente, tiene una longitud de 16.5 km, para recibir las descargas de caudales de dichas presas, que son conducidos por el Emisor del Poniente con longitud de 32.3 km, al Tajo de Nochistongo.

No obstante, el enorme crecimiento de la población, de la mancha urbana y el considerable incremento en los hundimientos del suelo, propicio la insuficiente capacidad de drenaje del Gran Canal y del Emisor del Poniente. Era necesario un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del suelo y que sin necesidad de bombas expulsara las aguas. En 1967 fue iniciada la construcción de una magna obra, de las más trascendentes de la ingeniería mexicana en los últimos años: el Sistema de Drenaje Profundo, singular obra a nivel internacional por las características del suelo de la Ciudad de México dentro del cual se ubica y por su capacidad de conducción y que además de contribuir a la seguridad de la Capital, se ha convertido en un modelo de tecnología urbana. El Sistema de Drenaje Profundo constituye la tercera salida artificial con que cuenta el Valle de México y la principal estructura para desalojar los caudales generados en las temporadas de lluvias.

Actualmente, la Ciudad de México esta conformado con un sistema de Drenaje de gran magnitud y complejidad, sistema de tipo combinado que capta las aguas residuales domésticas e industriales, además de los escurrimientos generados por las lluvias. Su estructura esta constituida con una longitud de 10,240 km de tubería de redes secundarias y 2,087 km de redes primarias, 144 km de colectores marginales, 178 plantas de bombeo, canales a cielo abierto, ríos entubados, presas de almacenamiento y lagunas de regulación y continúa en el sistema general de desagüe y en el Drenaje Profundo, actualmente columna vertebral del sistema, hasta desembocar en la parte alta de la Cuenca del Río Pánuco y posteriormente al Golfo de México.

1.2.1 Las tres salidas del Valle de México para el desalojo de Aguas Residuales y de Aguas Pluviales.

En síntesis, el Sistema de Drenaje y Desagüe de la Cuenca del Valle de México está conformado por tres grandes sistemas de conductos hidráulicos estratégicamente ubicados, que drenan en dirección sensiblemente de sur a norte y constituyen las tres únicas salidas para desalojar los caudales de aguas residuales y de aguas pluviales fuera del Valle, protegiendo a la Ciudad del riesgo de inundaciones; estas salidas son el Interceptor-Emisor del Poniente, por el Tajo de Nochistongo; el Gran Canal del Desagüe, por los túneles de Tequixquiac I y II y el Emisor Central del Sistema de Drenaje Profundo, al Río de El Salto. En 1975 se terminó la construcción del túnel del Emisor Central, de 6.50 m de diámetro y 50 km de longitud, con lumbreras de profundidades que van de 25 hasta 220 m.

1.3 Deterioro del Sistema de Drenaje Profundo del Valle de México.

Este sistema fue diseñado originalmente para trabajar por gravedad durante la temporada de lluvias. El hundimiento regional de la ciudad ha reducido la capacidad de desalojo de aguas negras a través de las salidas antes mencionadas, lo que obligó a que el sistema de drenaje profundo entrara en operación durante todo el año, desalojando además de las aguas de lluvia, aguas residuales. Dicha situación ha generado problemas en el mantenimiento anual del Emisor Central provocando su deterioro y reduciendo además su capacidad de conducción, lo vuelve vulnerable y en consecuencia, un factor de riesgo.

El Emisor Central del Sistema del Drenaje Profundo se inauguró en 1975 con el fin de evacuar el agua de lluvia, tiene 50 km de extensión, capacidad original de 170 m³/s, la capacidad actual de 120 m³/s.

Necesidad de Utilizar Emisor Central sin Interrupción: no fue posible realizar mantenimiento desde 1992 y hasta el 2008, pero su vida útil está limitada por hundimientos, por lo que se requiere de un sistema alternativo que asegure la capacidad de drenaje del Valle a largo plazo.

Para dar solución a lo antes expuesto, existe la necesidad en construir de emergencia un emisor alternativo y recuperar la capacidad de desalojo y aumentar el factor de seguridad para la población del Valle de México. Esta solución es mediante la construcción de un nuevo túnel profundo, denominado **TUNEL EMISOR ORIENTE (TEO)**.

II. DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO

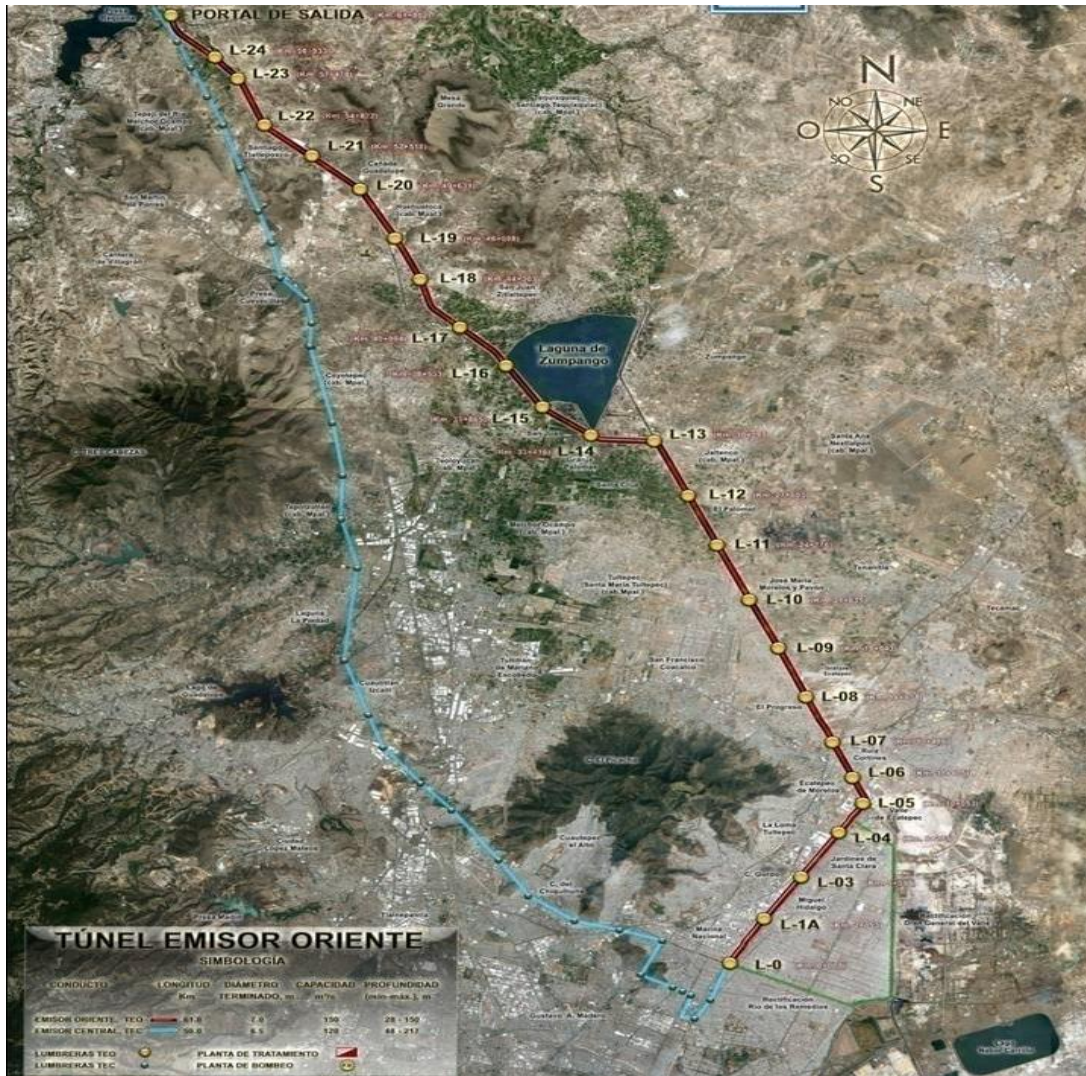
2.1 Descripción del Proyecto

El TEO tendrá una longitud aproximada de 62 km, y a lo largo de su recorrido se auxiliará, para su construcción y posterior operación, de 25 Lumbreras y un Portal de Salida. De las 25 lumbreras por construir 5 de ellas serán lumbreras para el “montaje y desmontaje de los equipos tuneladores”, que tendrán un diámetro mínimo de 16 m. Las lumbreras de operación tendrán un diámetro terminado de 12m, y como función, la operación y mantenimiento del Túnel.

Particularmente se ubicará al Nororiente de la Ciudad de México, pasando por el Distrito Federal, y los Estados de México e Hidalgo. Inicia en la intersección de las Av. Gran Canal y Río de los Remedios; corre casi paralelo a la margen izquierda del Gran Canal con dirección Norte-Oriente unos 10 km; cambia su dirección hacia el Norte-Poniente, por la margen derecha del Gran Canal, y cruza los municipios de Ecatepec, Coacalco y Tultepec, a lo largo de otros 20 km. A partir de aquí se separa del Gran Canal, pasa al poniente de la Laguna de Zumpango y cruza los municipios de Teoloyucan y Huehuetoca por 20 km más; después sigue por la margen derecha del Tajo de Nochistongo, atraviesa el municipio de Melchor Ocampo, y llega al Portal de Salida en el Ejido de Conejos, en el Estado de Hidalgo (figura 2).

El portal de salida se ubica paralelo a la desembocadura actual del Emisor Central del drenaje profundo, en el Río El Salto, en el Estado de Hidalgo.

Fig. 2: Trazo del Túnel Emisor Oriente (TEO)



Las lumbreras se ubicaran distantes entre sí unos 2.5 km en promedio y sus profundidades alcanzaran desde 28 hasta 150 m, y la construcción se localiza en sitios con diferentes características geotécnicas. Razón por la cual, se puede decir que los procedimientos constructivos de las lumbreras se agrupan en tres modalidades:

- Procedimiento de muro Milán en toda la longitud de la lumbrera
- Procedimiento mixto: muro Milán hasta cierta profundidad + muro convencional.
- Procedimiento de muro convencional en toda la longitud de la lumbrera

La pendiente del túnel será de 0.19% de la Lumbrera L-00 a la Lumbrera L-07, y de 0.16% de la lumbrera L-07 al Portal de Salida.

2.2 TIPO DE CONTRATO.

La edificación del Túnel Emisor Oriente se asignó a las empresas Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea (Comissa), Carso Infraestructura y Construcciones S. A. B de CV (Cicsa), Ingenieros Civiles Asociados (ICA), Construcciones y trituraciones, Constructora Estrella y Lombardo Construcciones, la construcción del Túnel Emisor Oriente.

Dichas obras se realizan bajo el esquema de obra pública mixta sobre la base de precios unitarios, precio alzado y tiempo determinado.

2.3 GEOLOGÍA DEL TRAZO

El túnel se excavará en el sur y centro en depósitos lacustres cuaternarios de la planicie septentrional de la Cuenca de México. En el norte se excavará, al cruzar la Sierra de Nochistongo, primero en las vulcanitas pliocénicas Huehuetoca y enseguida, parcialmente, en los depósitos lacustres, igualmente pliocénicos, de la formación Taximay, dispuesta ésta en bloques tectónicos cubiertos por Abanicos Aluviales y algunas lavas basálticas próximas al portal de salida.

Con sus 61.8 Km de longitud, el túnel se trazó de tal manera que atravesara un mínimo de formaciones rocosas. Por consiguiente, atraviesa primero depósitos poco consolidados del norte de la Cuenca de México a lo largo de aproximadamente los primeros 40 km. Después, para alcanzar el Río El Salto, al sur de Tula, Hidalgo, atraviesa en sus últimos aproximadamente 21.8 km principalmente formaciones más duras que corresponden a tobas terciarias consolidadas de Nochistongo y a veces a formaciones rocosas, estas últimas representadas por algunas coladas de lavas y por conglomerados fluviales parcialmente cementados. Así, se cortarán depósitos blandos ó consolidados en la mayor parte de la longitud del túnel (aproximadamente 65%) y formaciones más duras y a veces rocosas en una fracción menor de la longitud (aproximadamente 35%).

En resumen, el túnel cruzará las siguientes seis formaciones principales:

Formación 1. Depósitos Lacustres del Cuaternario del norte de la Cuenca 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 Plio-Cuaternario de la Sierra de Nochistongo.

Formación 5. Vulcanitas del Plioceno superior de la Formación Huehuetoca.

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

Descripción particular:

Formación 1. Depósitos Lacustres del Cuaternario del norte de la Cuenca de México: Consiste en su mayor parte de una interestratificación de arcillas, limos y arenas derivadas principalmente de lluvias de erupciones volcánicas pumíticas, caídas en un lago de aguas dulces someras (tirante de 1 a 2 m). En la secuencia estratigráfica aparecen, de vez en cuando, suelos de muy reducido espesor, los cuales se formaban cuando las aguas del lago se evaporaban. También se detecta la incidencia de escasas cenizas basálticas y de frecuentes cenizas pumíticas.

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: El túnel avanzará cortando y rozando cenizas basálticas y lavas intercaladas entre los limos y arcillas lacustres. En este intervalo, entre las lumbreras 10 y 12, pueden presentarse fuertes entradas de agua al túnel, ya que las lavas de basalto están fracturadas y las cenizas son muy poco cementadas.

Formación 3. Suelos Pre-lacustres del Cuaternario de la Cuenca de México: Consisten estos suelos principalmente de limos arenosos de color café. Pueden manifestarse en ellos estratos de arenas y de gravas fluviales. No se prevén aquí aportaciones importantes de agua al túnel por la generalmente avanzada compactación y baja transmisibilidad de estos depósitos. No hay indicios de tectónica aquí, es decir de fallas, en la secuencia esencialmente horizontal de estos depósitos cuaternarios que se cortarían en intervalos sobre un total de aproximadamente 6 Km.

Formación 4. Abanicos Aluviales del Plio-Cuaternario de la Sierra de Nochistongo: Se trata de depósitos compuestos de suelos, arenas y gravas muy compactos, bastante cementados, de color rojizo por su sedimentación en los flancos de las elevaciones contiguas. Forman un conjunto de irregulares estratos subhorizontales oxidados a la intemperie y depositados arriba del antiguo nivel freático regional. Los Abanicos Aluviales están afectados por poca tectónica en su porción inferior. Puede mencionarse de ellos que son, por lo general, poco permeables y poco transmisibles.

Formación 5. Vulcanitas del Plioceno superior de la Formación Huehuetoca: Éstas quedan contenidas en ciertas partes de los Abanicos Aluviales que forman el centro y los flancos de la Sierra de Nochistongo. Afloran al suroeste de Huehuetoca, en un montículo de ignimbritas color rosa. Los barrrenos que penetraron a esta formación revelan una gruesa secuencia de ignimbritas semiduras en alternancia con tobas rojizas consolidadas. En ciertos puntos se encontraron lengüetas de lavas ácidas fracturadas, pero también brechas y flujos piroclásticos del tipo *lahar*. Además aparecen a veces gravas y boleos fluviales de poca extensión. Se concluye que el túnel atravesará esta formación sobre un total de aproximadamente 7 kilómetros.

Formación 6. Depósitos lacustres Taximay del Plioceno medio. Estos se dividen en dos: Taximay superior y Taximay inferior: Esta formación es de origen lacustre. Se asigna al Plioceno medio, tiempo en el que abundaron numerosos lagos extensos, aunque someros, en el Eje Volcánico Transmexicano. Contiene la Taximay secuencias alternantes, finamente estratificadas y consolidadas, de arcillas, arcillas limosas, limos arenosos, arenas de playa, y a veces suelos; pero de vez en cuando también contiene capas de pómez, fina o granular.

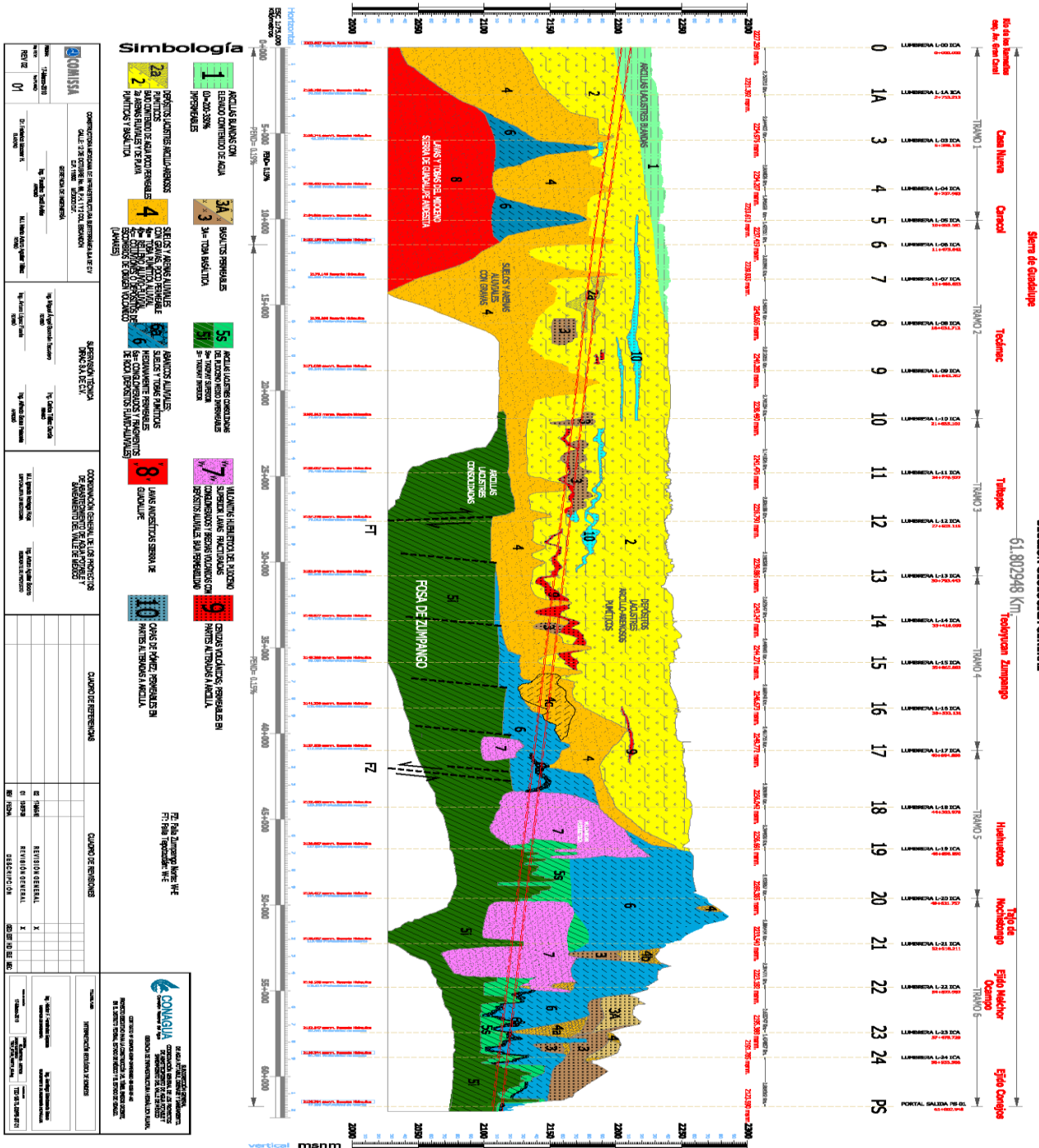
Las exploraciones realizadas demostraron que la formación Taximay consiste de una mitad inferior, compuesta de arcillas lacustres verdes oscuras, fuertemente consolidadas y de una mitad superior algo menos consolidada, con arcillas de color verde claro o café. Cabe señalar que la Taximay inferior su color verde oscuro se debe a las cenizas de un vulcanismo basáltico y la Taximay superior, sus colores claros, a las pomeces de un vulcanismo ácido.

La Taximay se caracteriza por permeabilidad y una transmisibilidad hidrológica muy baja a nula, debido a su avanzada consolidación general. Un intenso tectonismo le impartió una estructura en bloques, separados por fisuras, formando fosas y pilares; sin embargo, no le causó ninguna permeabilidad secundaria.

Cabe comparar la formación lacustre Taximay con la formación igualmente lacustre del norte de la Cuenca de México. Ambas fueron formadas en ambientes lagunares similares, por lo que son similares en muchos detalles. Sin embargo se distinguen en tres aspectos: primero en edad (diferencia de unos 2 millones de años, siendo más antigua la formación Taximay); segundo en compactación y contenido de agua en sus arcillas (la formación Taximay está muy consolidada y es de bajo contenido de agua); tercero en tectónica; la formación Taximay muestra fallamiento antiguo actualmente inactivo. Este tectonismo fue formándose conforme aumentaba su sedimentación, generando fallas crecientes, que afectaron mucho a la Taximay inferior, algo menos a la Taximay superior y muy poco a los Abanicos Aluviales superpuestos.

En la **figura 3** se muestra el perfil geológico del TEO, con las formaciones arriba descritas

Fig. 3: Perfil Geológico del TEO



2.4 Zonificación Geológica-Geotécnica

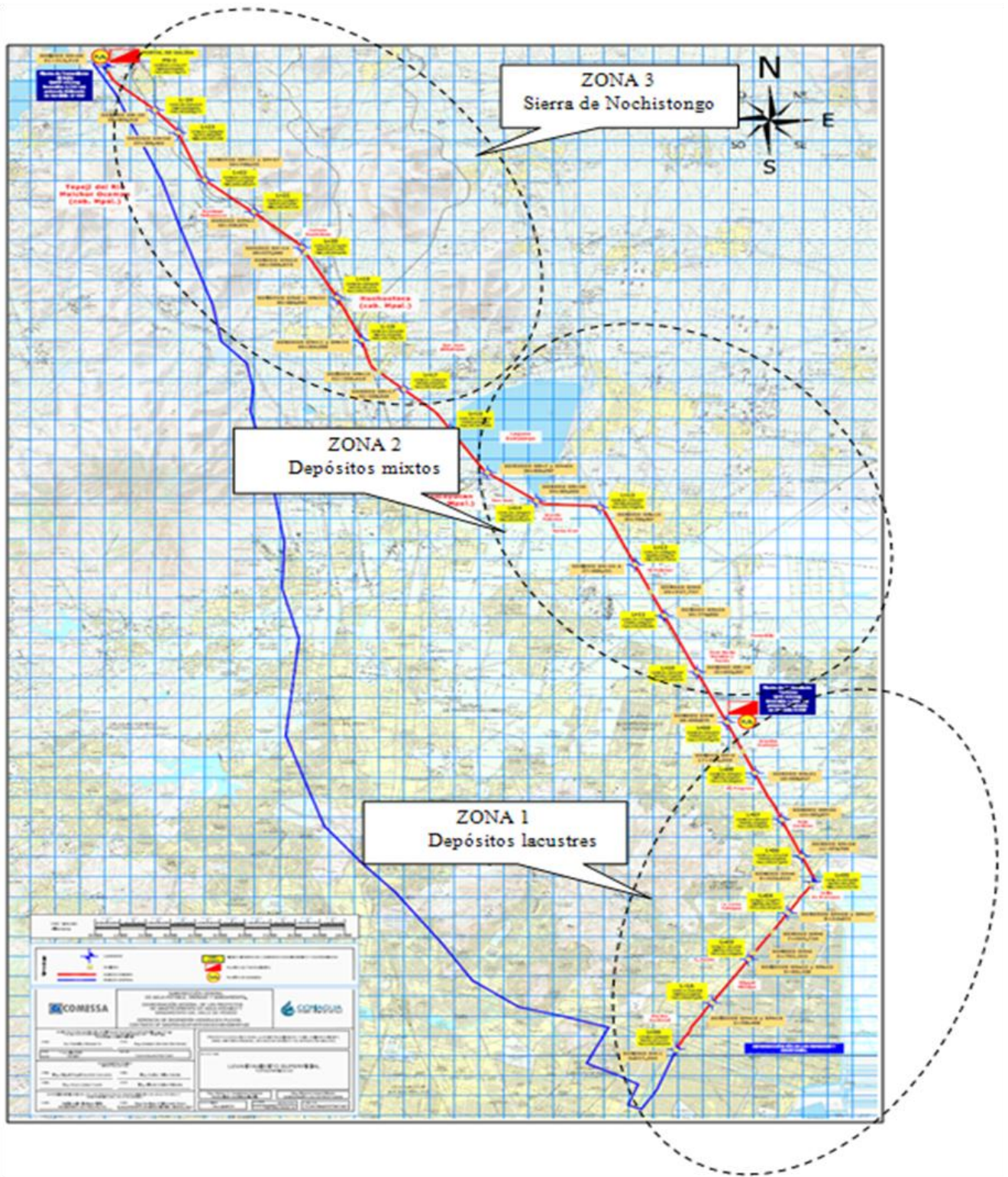
Un panorama simplificado de los ambientes geológicos geotécnicos que cruzarán a lo largo del TEO estaría representado por las siguientes zonas, definidas a partir del tipo de suelos identificados en las exploraciones realizadas (figura 4):

Zona 1: Área que comprende de las Lumbreras L-00 a la L-10. Corresponde a los depósitos lacustres de la Cuenca del Valle de México, cubriendo a suelos prelacustres antiguos.

Zona 2: De la Lumbrera L-10 hasta la L-17. Pertenece a una zona de depósitos mixtos, de sedimentos lacustres intercalados con fluviales del delta del Río de Las Avenidas de Pachuca, abanicos aluviales, suelos prelacustres y lavas pertenecientes al Cerro de Tultepec.

Zona 3: De Lumbrera L-17 al Portal de Salida, correspondiente a la Sierra de Nochistongo. Consta de abanicos aluviales que cubren a depósitos lacustres antiguos (formación Taximay); además de lavas del cuaternario del flanco norte de la sierra hasta el portal.

Fig. 4. Planta del TEO mostrando las tres zonas geotécnicas



2.5 Frentes de Trabajo

Con el fin de cumplir puntualmente con los programas de Obra, sumamente restringidos, fue necesario dividir la longitud del túnel en 6 tramos, cuya distribución se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de distribución de los tramos

TRAMO	1	2	3	4	5	6
Longitud, en metros	10,055	11,580	9,160	10,190	8,650	12,171
De lumbrera a lumbrera:	0 a 5	5 a 10	10 a 13	13 a 17	17 a 20	20 al Portal de salida

Se determinó utilizar 6 máquinas tuneladoras tipo EPB (Earth Pressure Balanced), asignada una para cada tramo establecido. Este tipo de máquinas fueron seleccionadas para la longitud total de este túnel debido a que tienen una amplia aplicación y versatilidad para atacar diferentes condiciones de terrenos.

De acuerdo con la distribución mencionada en la Tabla 1, se presentaran diferentes tipos de suelo por excavar en el frente, clasificándolos desde el punto de vista geológico-geotécnico en tres grandes zonas, a saber: *Zona lacustre* del Valle de México, *Zona de sedimentos mixtos (de transición)*, y *Zona de abanicos aluviales duros* y lavas correspondientes a la *Sierra de Nochistongo*.

La descripción y los parámetros mecánicos que caracterizan a estos diferentes tipos de suelo se muestran en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2. Descripción y parámetros geotécnicos representativos de los diferentes tramos

		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 fragmentos de roca	Limos compactos, gravas y boleas
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/m ³	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 2.24×10^{-4}	5.91 a 12.8×10^{-4}	2.30 a 3.11×10^{-4}	1.51 a 9.34×10^{-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 **Cerchar**

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

De acuerdo con la revisión detallada de los perfiles geológicos disponibles, se prevén los siguientes escenarios, relacionados con el paso de las máquinas tuneleras:

- En la formación de Depósitos Lacustres se espera que el avance se logre sin dificultades, por lo blando de las arcillas en el sur y lo poco consolidado de los limos pumíticos del centro y norte. Habrá ciertas incursiones repentinas de agua al cortar lentes de arena de playa, algunos horizontales de cenizas o pómez y en el delta del llamado *Río de las Avenidas* capas de arenas y gravas fluviales. Sólo hay que tomar en cuenta que en los tramos 1 y 2 se tendrá el efecto de la consolidación regional, que afectará el diseño del revestimiento definitivo, debido al bombeo profundo de los acuíferos del Valle de México.
- Al atravesar las lavas y cenizas cuaternarias del cerro de Tultepec entre las lumbreras 10 a 12, la máquina tunelera se encontrará con la desventaja de atacar en ciertos tramos en la mitad superior roca, y cenizas en la mitad inferior, ambas acuíferas.
- En la formación de Suelos Pre lacustres la máquina tunelera avanzará a través de estratos limo arenosos medianamente consolidados e irregularmente cementados. La aportación de agua será reducida, excepto cuando se tope con gravas y arenas de un antiguo valle fluvial que conduce agua.
- Al cruzar los distintos tramos de la formación de *Vulcanitas Huehuetoca* la máquina tunelera tendrá que vencer una gama muy variada de tipos litológicos cambiantes sobre cortas distancias; habrá lavas duras, ignimbritas semiduras, tramos de tobas arcillosas, lahares arenosos consolidados, reducidos paleocauces fluviales **con boleos en matriz de arenas**. Las incursiones de agua podrán ser frecuentes, pero no duraderas.
- El problema mayor para la máquina tunelera será, sin duda, cruzar, como ya se expresó, las zonas de **conglomerados y boleos**, contenidos en arenas sueltas mal cementadas, que predominan al fondo de la formación de los Abanicos Aluviales, precisamente en su contacto con la formación Taximay,

En los depósitos lacustres de la formación Taximay, se considera que la máquina tunelera podrá avanzar sin dificultades de flujos y presiones de agua (de acuerdo a las experiencias obtenidas en la construcción del Túnel Emisor Central). Las arcillas y limos fuertemente consolidados de la formación Taximay son impermeables, por lo cual los aportes de agua pudieran ser nulos. Las fallas que afectan a la formación están totalmente selladas, por lo que se prevé que tampoco se tengan aportaciones de agua a través de ellas.

III. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DEL TUNEL TRAMO I Y II

3.1 Construcción de Lumbreras

La forma de construir túneles de longitudes importantes es por tramos.

La longitud de estos tramos, es decir, la distancia entre lumbreras, se determina por un estudio técnico-económico. Este estudio consiste en analizar el costo promedio por lumbrera y el tramo económico de acarreo en túnel y con esto se determina el menor costo probable de la obra, que en términos generales resulta en una distancia de 2 a 3 km.

Lumbreras.- Son accesos a los túneles que sirven para que a través de ellos se realicen todas las operaciones necesarias para la construcción del túnel: ventilación, bombeo, rezaga, revestimiento, introducción de equipos, instalaciones eléctricas y acceso de personal.

El procedimiento constructivo de una lumbrera está en función del tipo de terreno donde se construirá ésta. Se podría subdividir en tres grandes grupos:

- Suelos blandos
- Suelos Mixtos (blandos y consistentes)
- Suelos consistentes o rocas

Dependiendo del tipo de suelo se aplican diferentes procesos constructivos entre los que podemos mencionar

- Para suelos blandos:
- Pilas tangentes o secantes
- Muros Milán
- Lumbreras flotadas

3.1.1 Para suelos Mixtos

- Pilas tangentes o secantes y excavación convencional
- Muros Milán y excavación convencional

3.1.2 Suelos consistentes o roca

-Excavación convencional combinada con colocación de anclas, concreto lanzado y en algunos casos drenes de alivio.

-Mediante el uso de explosivos combinada con anclas, concreto lanzado y drenes en caso necesario.

Atendiendo al tipo de suelo para cada ubicación particular de las lumbreras, y tomando de referencia la información de los capítulos anteriores, se emplearon básicamente 3 procedimientos para la construcción de las lumbreras en el TEO, a saber:

- a) Muro Milán en toda la profundidad de la lumbrera
- b) Excavación convencional en toda la profundidad de la lumbrera
- c) Muro Milán en la primera parte de su profundidad y Excavación convencional.

En la **Tabla 3** se presenta a continuación un resumen de los procedimientos aplicados a cada lumbrera, en la que también se muestra el tipo de lumbrera (operación, montaje o salida).

Tabla 3. Procedimientos de construcción aplicados a las lumbreras del TEO.

TRAMO	LUMBRERA	TIPO DE LUMBRERA	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO
1	1A	OPERACIÓN	MURO MILÁN EN TODA SU LONGITUD
	3	OPERACIÓN	MURO MILÁN EN TODA SU LONGITUD
	3A	SALIDA	MURO MILÁN EN TODA SU LONGITUD
	4	OPERACIÓN	MURO MILÁN EN TODA SU LONGITUD
	5	MONTAJE	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
2	6	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	7	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	8	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	9	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL

3	10	MONTAJE	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	11	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	12	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	13	SALIDA	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
4	14	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	15	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	16	OPERACIÓN	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	17	MONTAJE	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
5	18	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	19	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	20	MONTAJE	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
6	21	OPERACIÓN	MURO MILÁN + EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	22	OPERACIÓN	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	23	OPERACIÓN	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL
	24	OPERACIÓN	EXCAVACIÓN CONVENCIONAL

Notas: la lumbrera L-00 (**de montaje**), que no se muestra en la tabla, ya se encontraba construida al momento de iniciar la construcción del TEO, y es de las llamadas lumbreras “*flotadas*” debido a su método de construcción. La lumbrera L-3A (**de salida**) se incluyó posteriormente al Proyecto Ejecutivo del túnel a fin de agilizar la terminación del tramo 1.

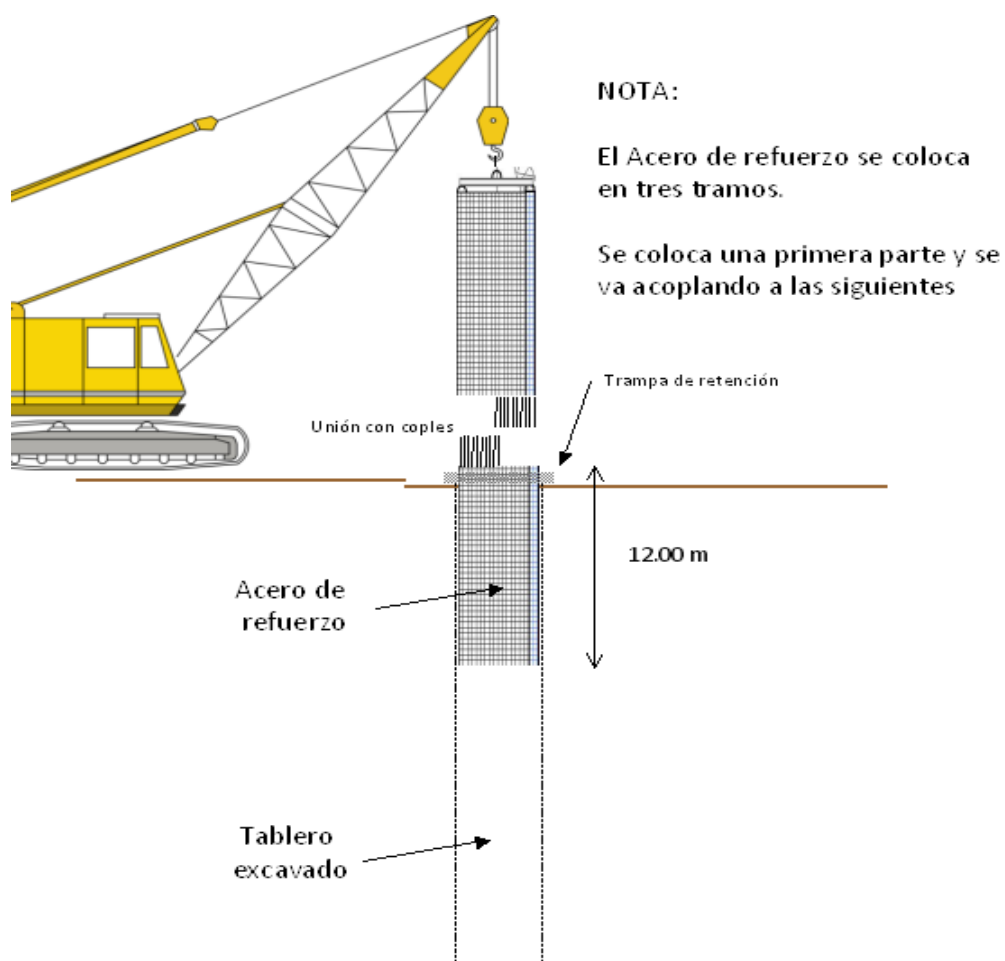
3.2 Construcción de Muros Milán

Este método se utilizó principalmente en las lumbreras del Tramo 1, dada su relativamente poca profundidad siendo un elemento de retención perimetral de concreto reforzado de 0.80 hasta 1.20 m de espesor, es capaz de soportar el empuje del terreno en tanto se excava el núcleo de la lumbrera. Para su construcción se utiliza un equipo de perforación tipo almeja *bivalva*, accionada por procedimiento mecánico o hidráulico, guiada por simple gravedad, por kelly o semikelly, de características adecuadas al terreno y especificaciones de la obra a realizar. Como elemento constructivo auxiliar previamente a la excavación se construye un brocal de concreto como estructura temporal, utilizada como guía para construcción del muro y como elemento de soporte de los armados durante la etapa de colado.

Con la excavación perfilada se procede a la colocación del acero de refuerzo previamente habilitado, en los diámetros y longitudes indicados en los planos de proyecto tanto en aleros

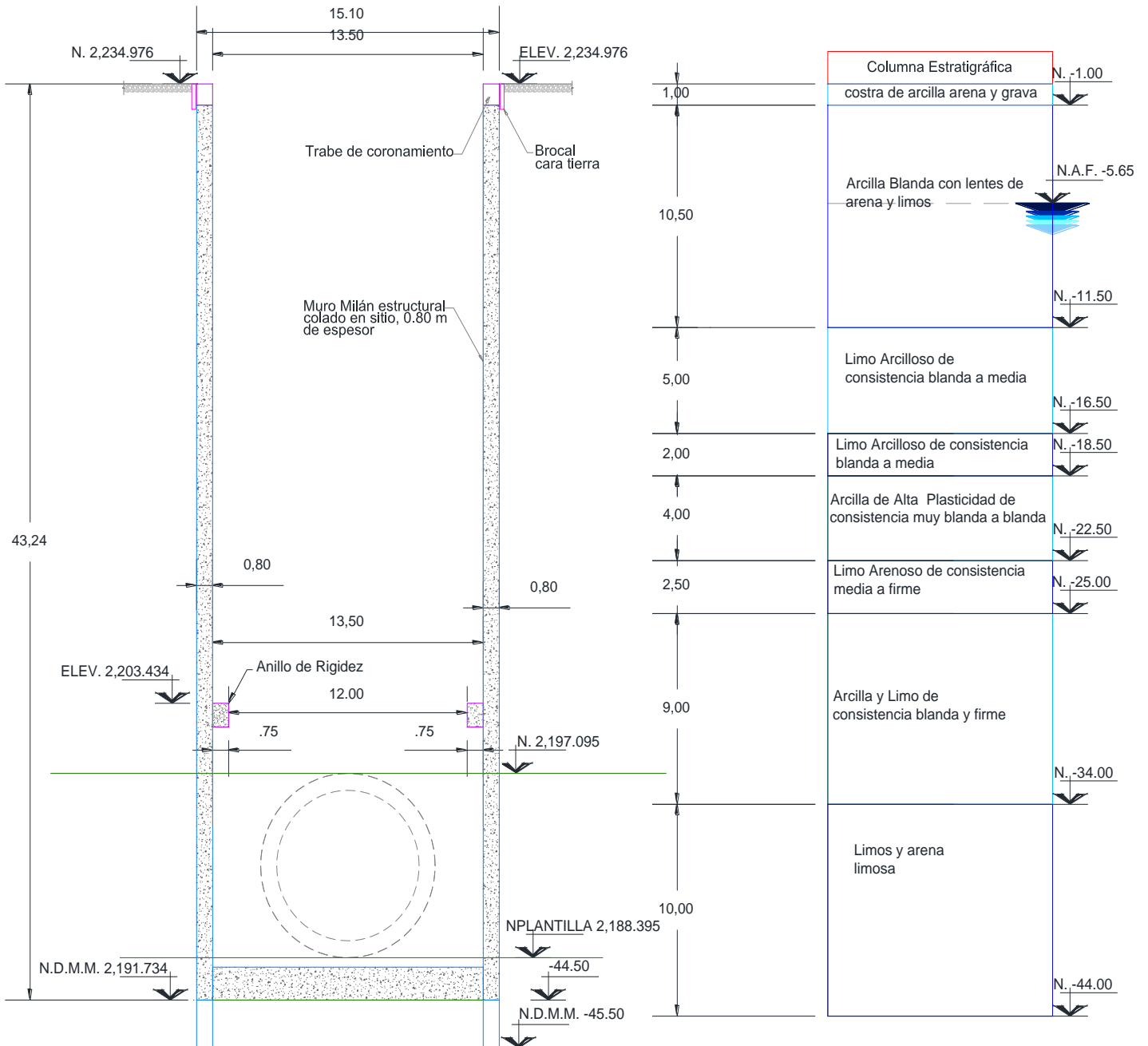
como faldones del brocal, atendiendo en todo momento que se coloquen los separadores para asegurar los recubrimientos especificados y las placas embebidas de acero para el arriostramiento posterior de vigas de acero que forman las juntas de los tableros del muro Milán.

Durante el proceso de colado, se procede a la colocación del concreto premezclado mediante la utilización de tubería tremie,



En la **figura 5** se muestra un esquema representativo de este procedimiento con muro Milán en toda la profundidad de la lumbrera en el caso particular de la lumbrera L-03:

FIGURA 5: Procedimiento con muro Milán para la lumbrera L-03



3.3 Excavación Convencional en Lumbreras

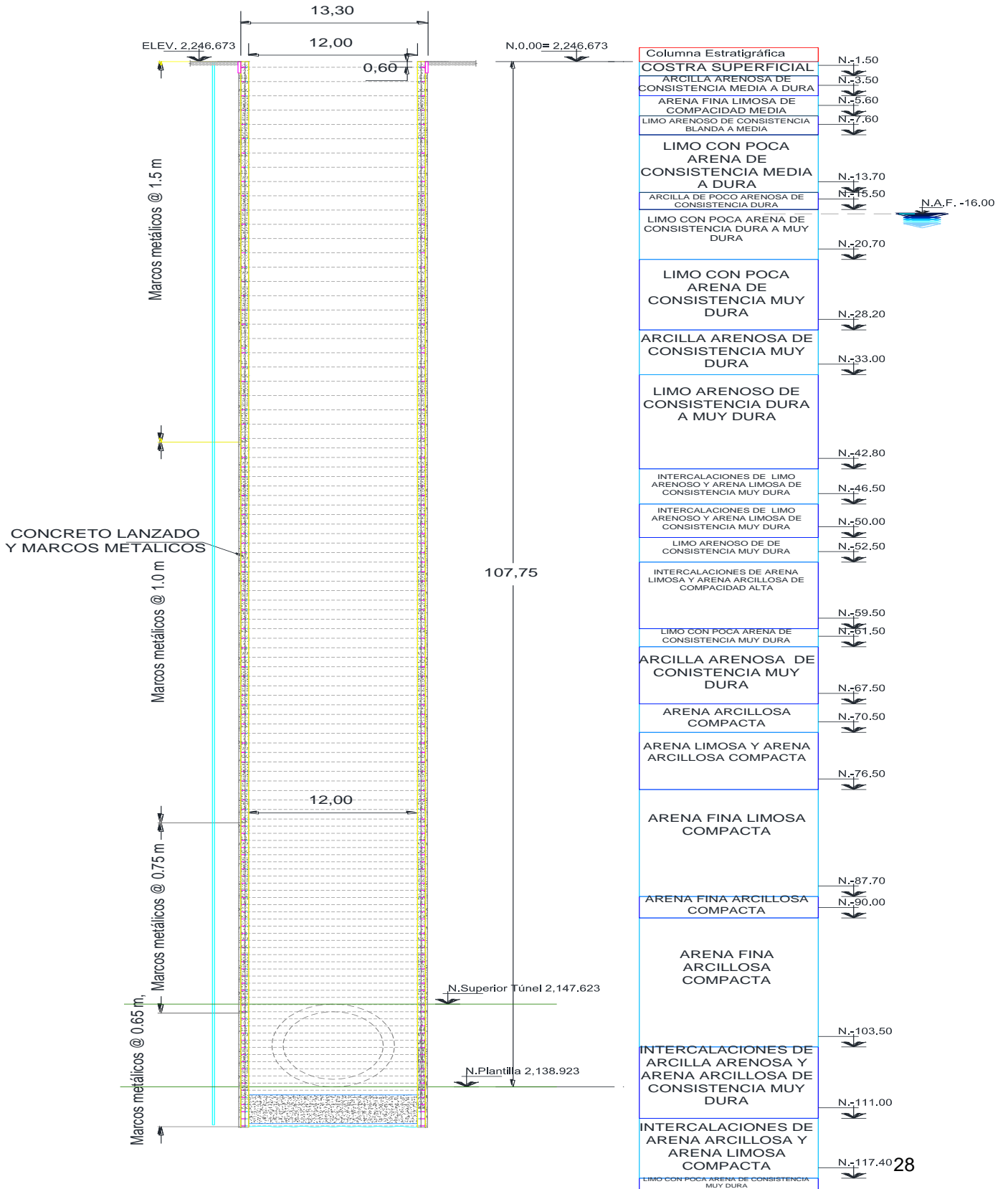
Este método se utilizó en las lumbreras de los tramos 4 y 6, dadas las características competentes del suelo circundante a la lumbrera que permiten realizar la excavación del núcleo a cielo abierto con equipo mecánico (martillos neumáticos (rompedores) y/o excavadoras) en las zonas que se requieran, dando avances de 2.50 m a 3.0 m de profundidad. Al término de cada avance se coloca un recubrimiento de concreto lanzado del espesor indicado en el proyecto (un valor típico puede ser del orden de 40 cm), reforzado eventualmente con fibras metálicas. El soporte de la lumbrera se complementa algunas veces con anillos metálicos formados con perfiles de acero IPR colocados a separaciones del orden de 1.0 m, generalmente. Finalmente se termina la pared interior de la lumbrera con un revestimiento definitivo de concreto reforzado colado in situ, con cimbra deslizante.

El material excavado se rezaga mediante botes de manto, que son extraídos a la superficie por medio de una grúa hidráulica y descargada directamente a camiones de volteo o a una tolva para su traspaleo posterior.

Es importante señalar que no siempre es requerido el uso de marcos o anillos metálicos para complementar el recubrimiento de concreto lanzado, como es el caso de la lumbrera L-17 donde únicamente se utilizó como soporte primario una capa de concreto lanzado y anclas cortas de varilla, sin anillos metálicos.

La **figura 6** muestra un esquema representativo de este procedimiento con método convencional en toda la profundidad de la lumbrera para el caso particular de la lumbrera L-16, en la que también se utilizaron marcos metálicos como soporte complementario del concreto lanzado:

Figura 6. Procedimiento constructivo excavación convencional para la lumbrera L-16



3.3.1 Muro Milán en la primera parte de su profundidad y Excavación convencional.

Este procedimiento se utilizó en la mayoría de las lumbreras del TEO, y consiste en una combinación de muro Milán, empleado en la primera parte de la profundidad de la lumbrera, para posteriormente continuar con el método de excavación hasta alcanzar el fondo de la misma. Como ya ha mencionado, para la construcción del muro Milán se efectúa la excavación de los tableros mediante una almeja hidráulica montada sobre una grúa, hasta la profundidad definida por la capacidad del propio equipo de construcción (en este caso esa profundidad se estableció en 42 a 48 m para un equipo convencional) sustituyendo en todo momento el material excavado por lodo bentonítico. Se inicia la excavación del núcleo por medios mecánicos que permitan realizar los ciclos de excavación y rezaga de manera satisfactoria conforme vaya avanzando. El material excavado se coloca en botes de manto (rezaga), con descarga de fondo, que son extraídos a la superficie, por medio de una grúa en la superficie y se descargan directamente a camiones de volteo o a una tolva para su traspaleo posterior.

Al llegar la excavación del núcleo al nivel de desplante del muro Milán (-42.0 m de profundidad) se construye una **trabe de liga (o de rigidez)** y se da inicio a la construcción del muro con el método convencional.

El procedimiento para la excavación de la lumbrera se plantea en ciclos de avance del orden de 1.0 m, valor que podrá cambiar dependiendo de las condiciones mecánicas e hidráulicas del material a atacar a cierta profundidad, manteniendo desfasados las diversas etapas de colocación del concreto lanzado, hasta alcanzar el espesor establecido de proyecto, también en los diversos tratamientos de soporte temporal.

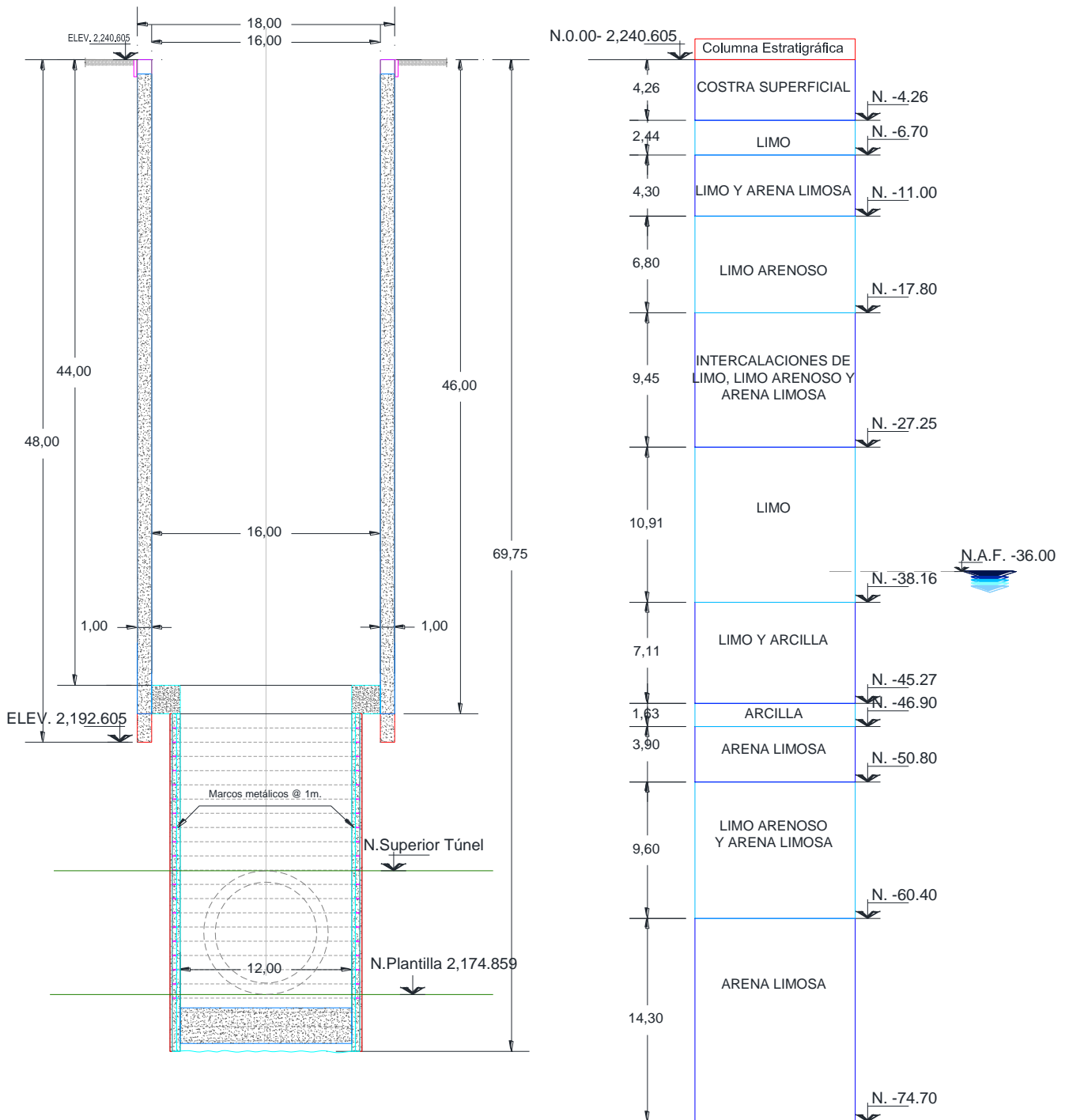
Para soportar los empujes laterales que genera el terreno durante la construcción de la lumbrera el soporte de las paredes puede complementarse, como ya se dijo, con anillos metálicos formados con perfiles tipo IPR o similares, los cuales se colocan posteriormente de la primera capa de concreto lanzado. Posteriormente se aplica una o dos capas de concreto lanzado hasta terminar el espesor que indique el proyecto estructural (valores típicos son de 30 a 40 cm) para ahogar el patín exterior y fijarlo completamente a la pared de la lumbrera.

Llegado al nivel máximo de excavación con el revestimiento primario, se construirá la losa de fondo de concreto reforzado la cual se integrará al muro de concreto lanzado y marcos metálicos, por medio de los conectores de cortante. En el muro secundario se dejarán las preparaciones para los accesos del túnel.

La **figura 7** muestra un esquema representativo de este procedimiento mixto de muro Milán combinado con excavación convencional para el caso particular de la lumbrera L-08, en la

que también se utilizaron marcos metálicos como soporte complementario del concreto lanzado:

Figura 7. Procedimiento constructivo de muro Milán combinado con excavación convencional para la lumbrera L-08



3.3.2 Hidrofresa

Un equipo particularmente útil para la construcción de muros Milán a grandes profundidades, que ha sido utilizado en el TEO para algunas lumbreras como las L-18, L-19 y L-20, lo constituye la “*Hidrofresa*”.

La Hidrofresa es una máquina pesada de excavación continua que opera de manera semejante a una perforadora de circulación inversa. Todas sus partes están montadas en una estructura en forma de armadura en cuya parte inferior se encuentran los cuatro grandes discos verticales de corte montados en dos ejes horizontales paralelos; los de un lado giran en sentido directo y los otros dos en inverso, el material cortado por los discos es lanzado por la fuerza centrífuga a la succión de la bomba sumergible ubicada inmediatamente arriba de los discos. La bomba centrífuga que succiona el lodo de la parte inferior de la zanja y los detritus del material cortado los conduce por una tubería y mangueras de presión hasta la superficie donde se separan los sólidos del lodo y este se vuelve a introducir en la parte superior de la zanja para cerrar el circuito de flujo del lodo; la posición de la estructura se corrige con los esquíes laterales que son accionados con gatos hidráulicos; en la **Figura 8** a continuación muestra un esquema de esta compleja máquina cuya operación es controlada con una computadora en donde se registran las señales de los sensores electrónicos de profundidad, verticalidad y posición, así como del flujo de lodo.

La construcción con estas máquinas ha sido posible gracias a los motores hidráulicos que accionan los discos y la bomba. Estas máquinas se desarrollaron para cortar suelos muy duros y rocas de hasta 100 kg/cm² de resistencia a la compresión simple, han alcanzado profundidades de hasta 120 m (de manera general), particularmente para la formación de barreras impermeables de material rígido o flexible. El fabricante de la Hidrofresa especifica en su ficha técnica del equipo, una desviación máxima permisible de 0.3 %.

Antes de iniciar la excavación, se realiza la autonivelación de la Hidrofresa mediante su propio sistema de registro de verticalidad. El equipo de excavación proporciona la rectificación rápida de la verticalidad y el centrado constante y fijo de la herramienta de corte en la posición correcta de la excavación. Con el equipo de hidrofresa se pueden llevar a cabo excavaciones para el muro Milán hasta profundidades de 120 m en sectores de corte primarios que miden 1.20 m de ancho por 2.80 m de largo. Terminados de excavar y colar estos sectores primarios, se excavan los sectores secundarios, pero debido a la geometría de la lumbrera y los paneles, cuando se excavan los paneles secundarios, la Hidrofresa corta una parte de los paneles primarios ya colados. En todo momento el material excavado se sustituye por lodo bentonítico.

Análogamente al caso de los equipos convencionales para construir muros Milán, también con la hidrofresa se pueden tener lumbreras con métodos combinados de muro Milán y excavación convencional como es el caso de las lumbreras L-18, L-19 y L-20.

Figura 8: Esquema de una “Hidrofresa”

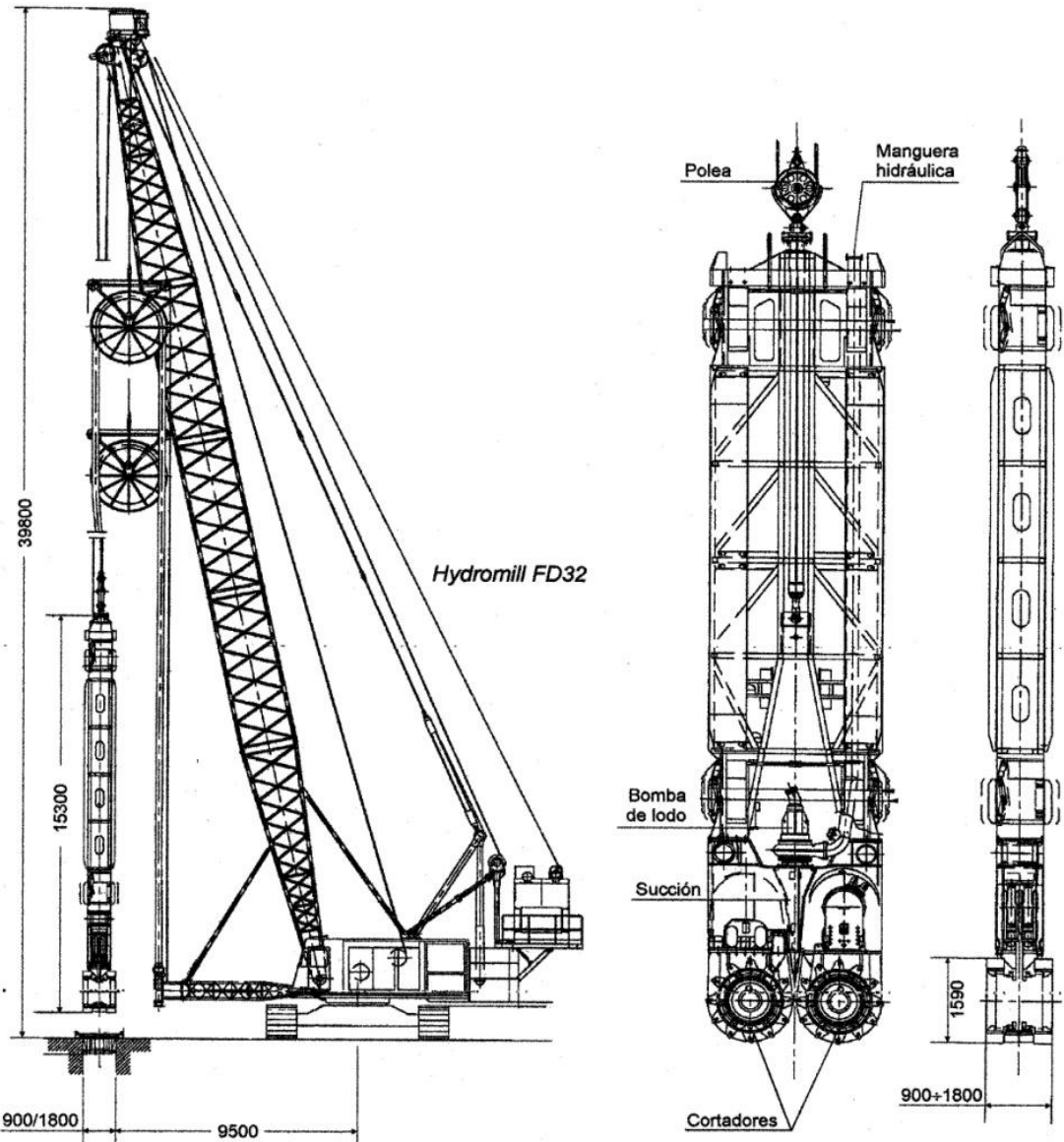




Foto 1. Hidrofresa en la lumbrera L-19



Foto 2. Detalle del cortador de la Hidrofresa

3.4 Bombeo para el abatimiento del Nivel Piezométrico

Una condición común en prácticamente todas las lumbreras del TEO (principalmente a partir de la lumbrera L-10 hacia el Portal de Salida) es la presencia de agua subterránea, a lo que obligo el diseño y construcción de sistemas de bombeo para abatimiento del nivel piezométrico de tal manera que permitiera la construcción en seco de las lumbreras y las condiciones de seguridad tanto para la propia estructura (para prevenir falla de fondo) como para los trabajadores.

Los sistemas de bombeo constituyen en la construcción de una serie de pozos profundos perforados a profundidades mayores que el fondo de proyecto de las lumbreras, para abatir los niveles del agua y de la presión hidrostática. El número y disposición de los pozos se determinaron en base a los parámetros hidráulicos de suelo tales como la permeabilidad, transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, obtenidos con pruebas in situ (de bombeo, Lefranc y/o Lugeon). A partir de los gastos esperados se diseñó el equipo de bombeo el cual está conformado por bombas sumergibles eléctricas, de caudal constante, cuya potencia puede variar desde 10 hasta 135 o más HP. Los pozos por lo general son perforados en 17 ½" de diámetro con ademe de 12".

Un caso interesante de bombeo para abatimiento del nivel del agua es el de la lumbrera L-12 donde se recomendaron de proyecto 16 pozos perimetrales a profundidades de 100 y 135 m, equipados con bombas de 135 HP y 41.8 HP. Actualmente se encuentran en operación 14, de los cuales 10 están equipados con bombas de 135 HP, y 4 con bombas de 41.8 HP, registrando gastos de 56 lps los de 135 HP, y de 5 lps los de 41.8 HP, obteniendo por resultado un **gasto total real de 580 lps entre los 14 pozos**. Se considera que esta es una de las lumbreras que se tienen registros de la mayor cantidad de agua en el Proyecto TEO.

Complementando el bombeo perimetral de los pozos, se instala en todas las lumbreras un bombeo “*de achique*”, típico en este tipo de trabajos.

3.5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TÚNEL

El túnel se conformará por dos capas de revestimiento; la primera capa se denominará “*Revestimiento primario*”, y estará conformado por dovelas de concreto; la segunda capa será el “*Revestimiento definitivo*” y está conformado por concreto armado colado “*in situ*”. En todos los casos, el diámetro terminado del túnel será de 7m.

Debido a las diferentes condiciones geotécnicas e hidráulicas presentadas en el sitio, se ha planteado tener dos tipos de secciones o geometrías de revestimiento primario a lo largo del trazo del TEO:

La primera sección se conforma por un anillo dividido en **seis dovelas más una dovela de cierre** (total: 7 piezas), el espesor de estas dovelas será de 35cm, este tipo de sección se aplicará para los Tramos 1 y 2, **Figura 9**.

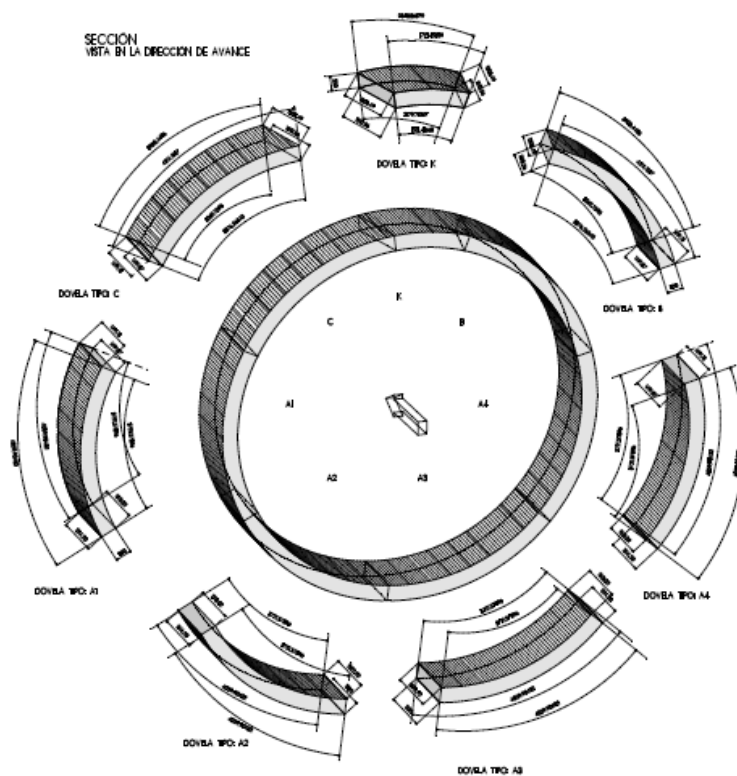


Figura 9: Esquema del anillo de dovelas para los tramos 1 y 2

La segunda sección, se prevé para los tramos 3 a 6, y contempla tener un anillo dividido en **7 dovelas** de concreto más una dovela de cierre (total: 8 piezas), el espesor de las dovelas de estos tramos será de 40cm; **Figura 10**.

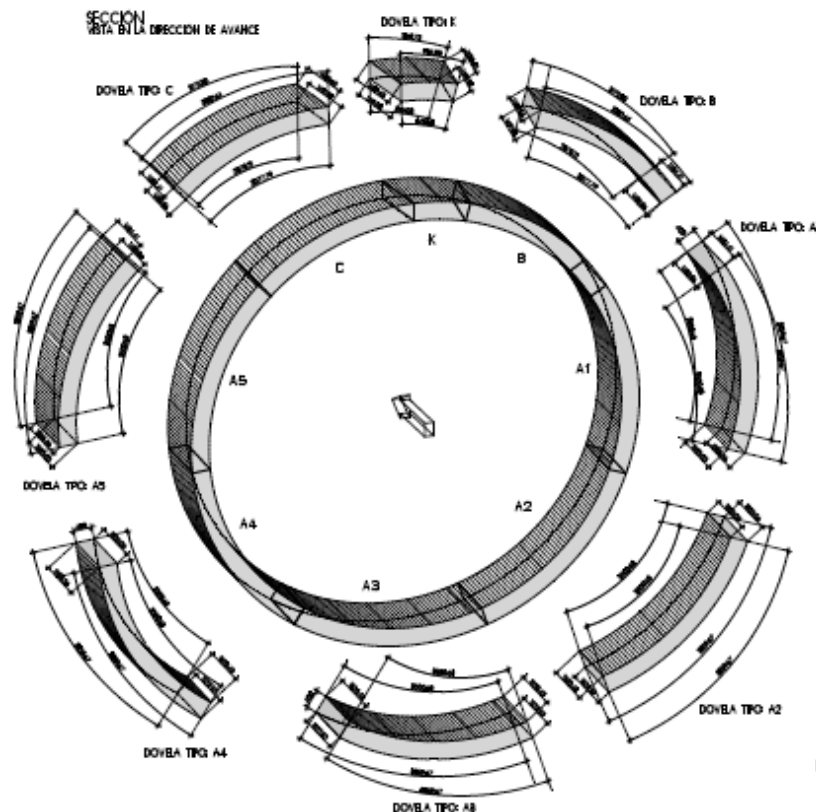


Figura 10: Esquema del anillo de dovelas para los tramos 3 a 6.

El diámetro exterior del túnel, asignado por la geometría de las máquinas tuneladoras, es de 8.74 m para los tramos 1 y 2, y de 8.93 m para los tramos 3, 4, 5 y 6, dependiendo de la marca de las máquinas. Por lo tanto, se tendrá, en términos generales, un espesor del revestimiento definitivo de 35 cm.

El procedimiento constructivo adoptado, que se describe en los párrafos siguientes, debe garantizar que la deformación diametral máxima no debe exceder de **0.010 veces el diámetro** del túnel. Para la excavación de túnel se utilizarán 6 tuneladoras del tipo **EPB** (*Earth Pressure Balance*), estratégicamente instaladas en seis frentes de trabajo con el fin de atacar de manera independiente y simultánea la totalidad del trazo del túnel. Tres de las

máquinas son de la firma alemana **Herrenknecht**, y las otras tres son de la firma japonesa-estadounidense **Robbins - Mitsubishi**.

La distribución de las máquinas tuneleras para los diferentes tramos, se hizo como sigue:

Tramos 1-2

Marca: *Herrenknecht*

Diámetro de excavación: 8.74 m

Torque nominal: 6.613 KN-m

Velocidad de rueda de corte: 0 a 3 rpm

Fuerza nominal de empuje: 73,187 KN

Número de cilindros de empuje: 13 pares de cilindros

Potencia instalada: 2,150 Kw

Tramos 3-4 y 5

Marca: *Robbins*

Diámetro de excavación: 8.93 m

Torque nominal: 14.916 KN-m

Velocidad de rueda de corte: 0 a 3 rpm

Fuerza nominal de empuje: 84,000 KN

Número de cilindros de empuje: 28 cilindros simples

Potencia instalada: 1,900 Kw

Tramo 6

Marca: *Herrenknecht*

Diámetro de excavación: 8.74 m

Torque nominal: 10.251 KN-m

Velocidad de rueda de corte: 0 a 2.55 rpm

Fuerza nominal de empuje: 62,437 KN

Número de cilindros de empuje: 14 pares de cilindros

Potencia instalada: 4,000 Kw

3.5.1 Rezaga

Para la rezaga del material excavado se emplean en el TEO los métodos tanto de bombeo a través de tuberías, o mediante bandas transportadoras, de acuerdo a la siguiente distribución en los diferentes tramos del túnel:

- Para el tramo de la lumbrera L-00 a la L-3A: **Bombeo a través de tuberías**, debido al tipo de material (arcilloso) que puede manejarse como un fluido viscoso.
- Para el tramo de la lumbrera L-3A a la L-05: **Banda horizontal y bombeo vertical**.
- Para el tramo de la lumbrera L-05 a la L-10: **Bombeo**.
- Para el resto del trazo (de la lumbrera L-10 al Portal de Salida): **Bandas transportadoras, tanto horizontales como verticales** (figura 11).

La distribución anterior atendiendo principalmente a la amplia gama de materiales por excavar, cuya estructura original puede modificarse para su mejor manejabilidad mediante la adición de aditivos tales como *agua* en el caso más simple de arcillas blandas, o bien *espumas* como en el caso de los suelos más compactos como la formación Taximay del tramo 6, así como bentonita o polímeros para el caso de los suelos granulares altamente permeables.

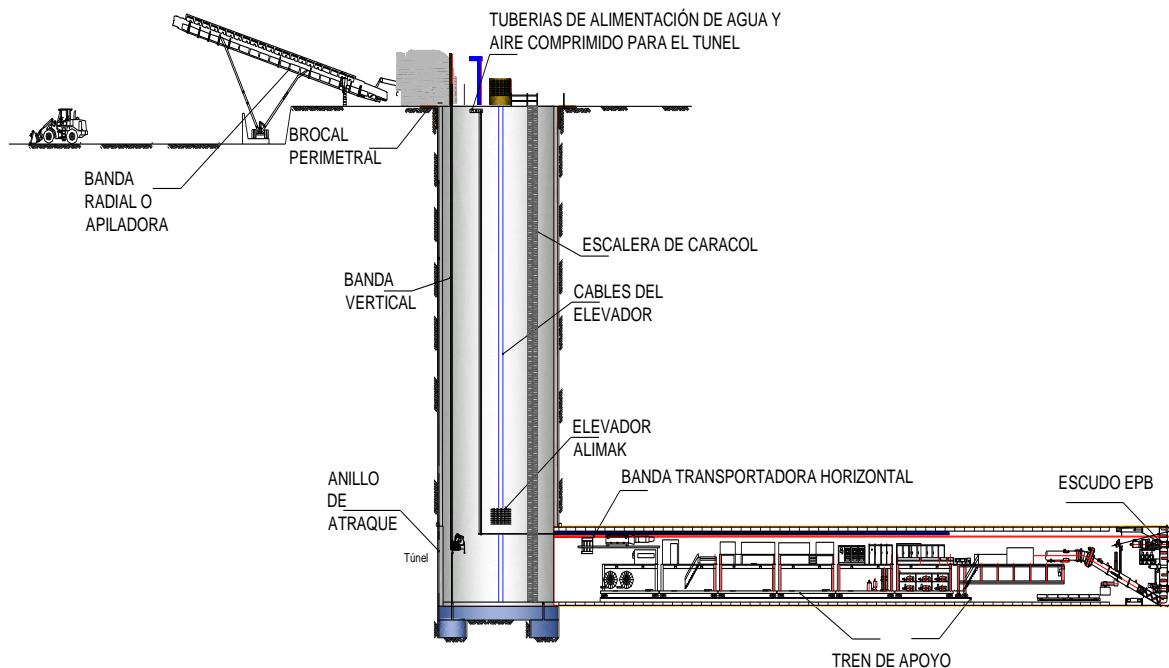


Fig. 11: Sistema de bandas transportadoras en túnel y lumbrera

En el caso del tramo 1 (lumbreras L-00 a L-05) la rezaga se está optimizando mediante la construcción de pozos interlumbreras a fin de reducir la longitud de bombeo a través del túnel y con esto aliviar la presión de las bombas (fig. 12).

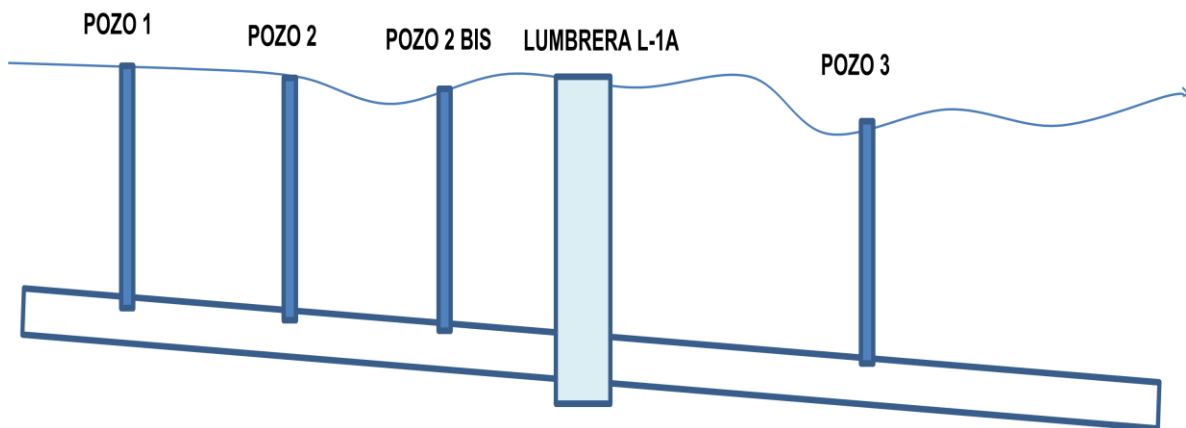


FIG. 12: PLAN INTEGRAL DE POZOS DE REZAGA

3.5.2 Ventajas de tratamiento del terreno con espumas.

- Forma un material de consistencia ``plástica``, mejorando el transporte del material A través de la banda transportadora.
- Minimiza la formación de bloques de suelo.
- Mejora la distribución de la presión en la cámara de excavación.
- Reduce la permeabilidad en el suelo (mejor control del agua).

Frecuentemente, el empleo de tuneladoras tipo TBM-EPB sin su química implicada significa bajos rendimientos de producción y peligrosos incrementos del riesgo de colapso del terreno. Incluso en casos extremos, sin el apoyo de la química resulta imposible el avance de un solo milímetro.

3.5.3 Mejoramientos de entrada y salida

En los casos en que la estabilidad del suelo en la vecindad de la lumbrera a la salida del escudo no satisface los factores de seguridad requeridos, es necesario mejorar las propiedades mecánicas del terreno mediante la aplicación de tratamientos externos que han sido a base de inyecciones de consolidación, *Jet Grouting*, columnas de mortero, anclas de fricción, etc. Cuando es requerido, el mejoramiento del suelo también se realiza a la llegada del escudo a la lumbrera.

3.5.4 Jet Grouting

En el Proyecto TEO se ha utilizado esta técnica de mejoramiento del suelo particularmente en las lumbreras L-1A, L-03 y L-04, y consistió básicamente en sustituir la masa de suelo con un material de mayor resistencia, en zonas de entre 3 y 7 m de longitud horizontal en el sentido de avance del túnel, dependiendo de la calidad del suelo a mejorar. En el sentido vertical se aplica el mejoramiento considerando un diámetro por arriba de la clave del túnel, la zona del túnel y medio diámetro por debajo de la rasante del túnel (figura 13)

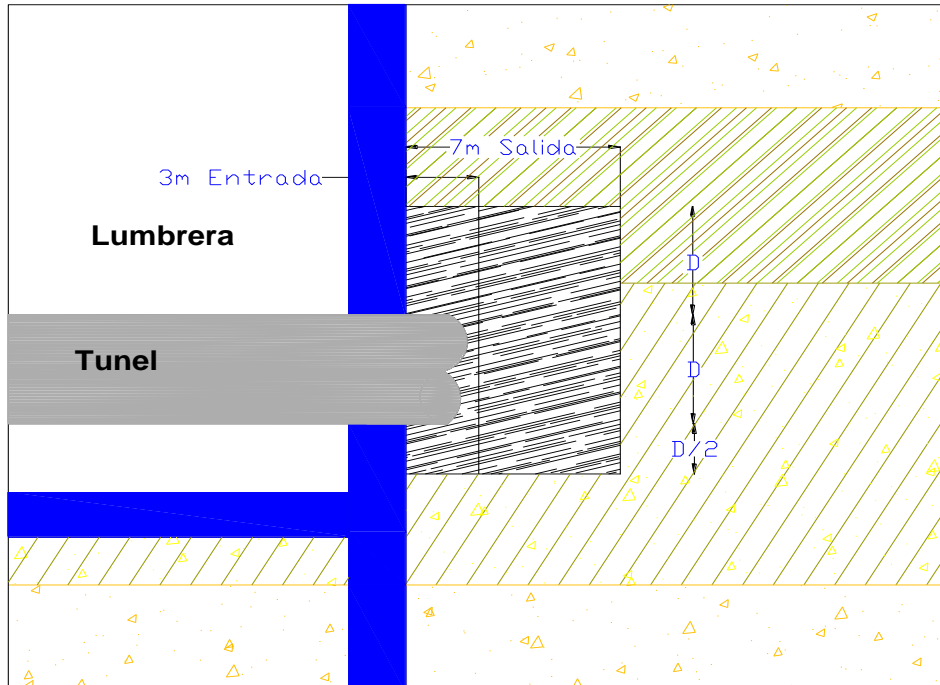


Fig. 13: Esquema de la zona de mejoramiento de la entrada y salida del túnel.

En la **figura 14** se muestra un arreglo típico en planta de mejoramiento a base de Jet Grouting.

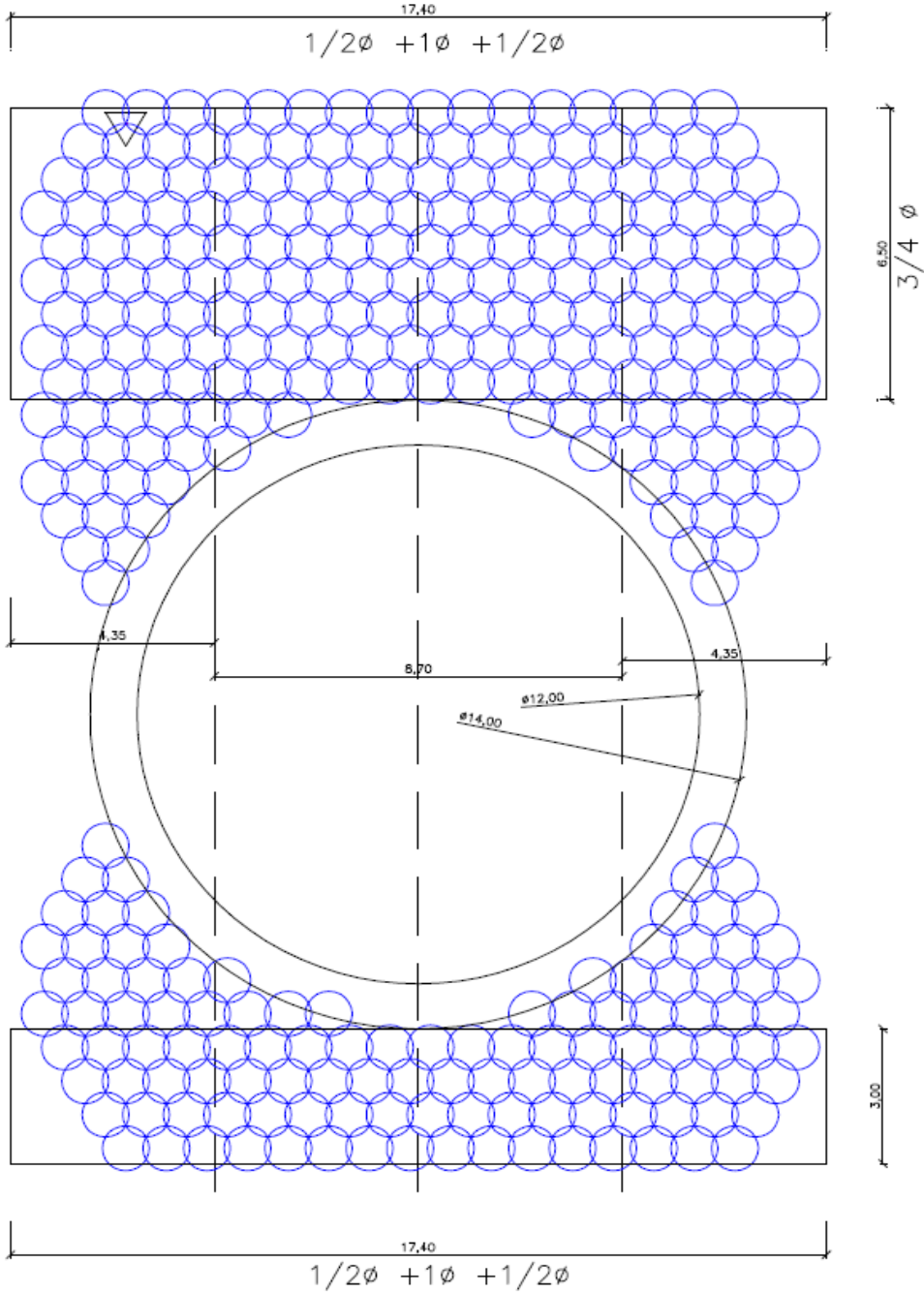


Figura 14 Esquema del mejoramiento mediante Jet-Grouting.

3.5.5 Pilas de suelo-cemento

Eventualmente el mejoramiento del suelo se obtiene mediante la sustitución de material del sitio, utilizando pilas de suelo-cemento, diseñadas para una resistencia mínima de 25 kg/cm². Para realizar la perforación se requiere utilizar una perforadora hidráulica, y una línea de tuberías tremie de 10" de diámetro para la colocación de la mezcla de suelo-cemento.

En el Proyecto TEO, las pilas de suelo cemento fueron de 120cm y 60cm de diámetro, con una longitud de 51.00m.

3.6 Características básicas de un Escudo EPB (EARTH PRESSURE BALANCED)

El Escudo EPB (Earth Pressure Balanced) Es una Máquina de forma cilíndrica a manera de protector contra la presión de tierra, utilizada para la excavación de túneles que va conservando la estabilidad del terreno vecino y permite colocar el soporte inicial formado por dovelas prefabricadas de concreto. Para la estabilización frontal aprovecha la excavación del suelo y la rezaga con la que forma la cámara de presurización del frente y la estabilización del mismo. El retiro del material de la cámara de extracción se realiza mediante un tornillo sinfín (figuras 15, 16 y 17).

Figura 15. Vista general exterior de un Escudo EPB

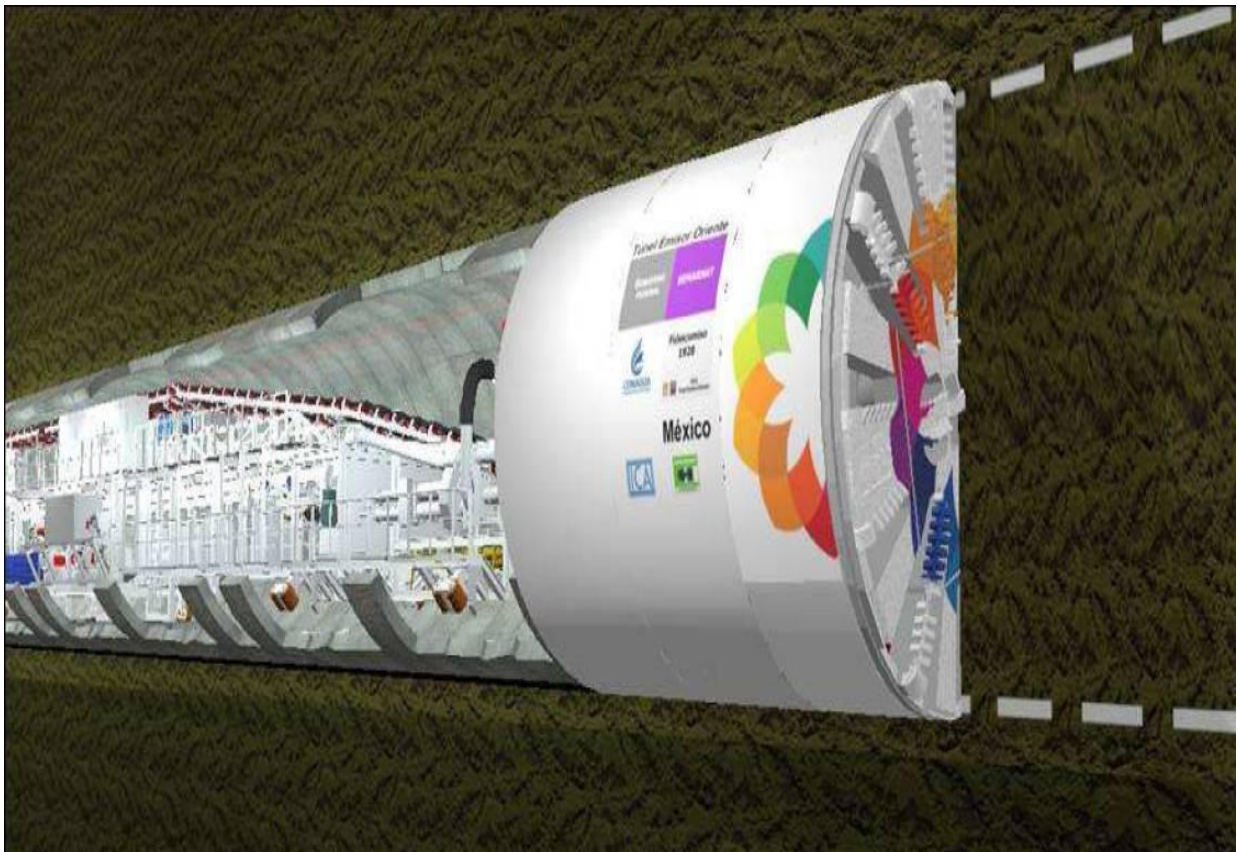
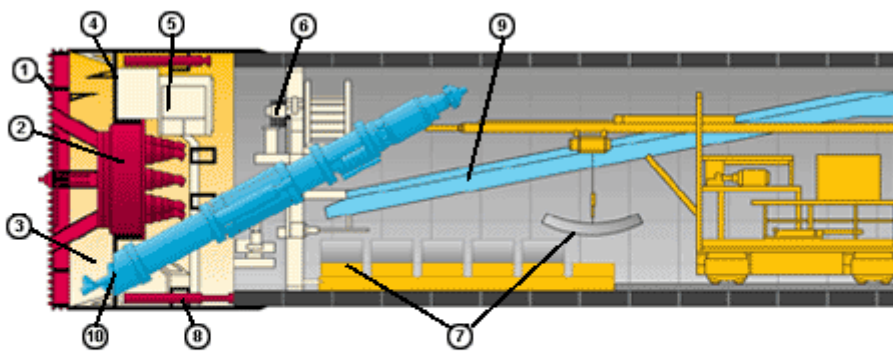




Fig. 16. Vistas estilizadas del Escudo empleado en el TEO, en México, D.F.

Esquema básico de un escudo EPB:



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

Figura 17. Esquema básico de un escudo EPB.

Controlando en tanto la velocidad del mismo y la fuerza de los cilindros de empuje se puede conservar una presión constante sobre el frente lo cual es posible excavar un túnel sin incidencias en las infraestructuras existentes en la superficie.

Los componentes de una EPB se pueden englobar en 2 grandes grupos, a saber: El **Escudo** (*rueda de corte, tornillo sinfín, erector de dovelas y gatos de empuje*), y el **Back up**, corresponden a equipos auxiliares de rezaga y transporte de dovelas. Cabe resaltar que el *Escudo* tiene la capacidad de perforar por sí solo, apoyándose en el revestimiento primario de dovelas para su avance. El *Back up* su función principal es de alojar los equipos: eléctricos, hidráulicos, de control, de operación, equipo de inyección de espuma, de mortero, y de guiado.

El elemento principal de excavación es la cabeza cortadora, que está constituida por diferentes herramientas de corte, como son: dientes con tungsteno o de disco, sencillo o doble cuyo número y disposición se determina con respecto a las características del suelo por excavar.

Es importante mencionar como aditamentos auxiliares los cepillos del faldón, que son de acero, cuya función principal es la de mantener estanco el interior del túnel, evitando la entrada de agua, de suelo y de mortero de inyección. Entre cada anillo de cepillos se coloca una grasa densa para formar el sello (*figura 18*).

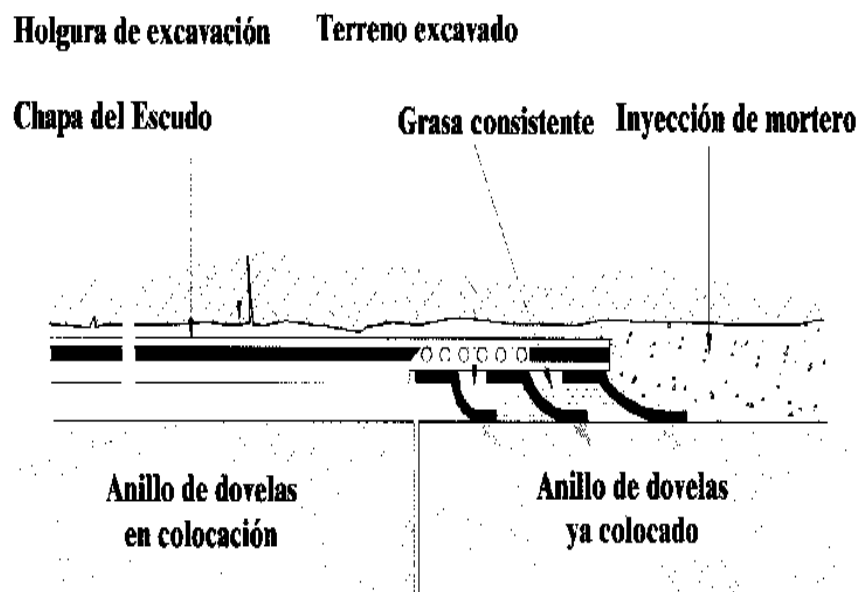


Figura 18. Cepillos del faldón

3.6.1 Mantenimiento y reemplazo de herramientas de corte

- ✓ Considerando algunas de las condiciones geológicas y geohidrológicas descritas anteriormente, se prevé la necesidad de llevar a cabo intervenciones hiperbáricas al frente para la sustitución de las herramientas de corte, para lo cual algunos de los escudos han sido equipados con cámaras de descompresión con capacidades hasta de 7 bares.
- ✓ Debido a la abrasividad de los materiales en algunos tramos, se estima que las herramientas de corte tengan una vida útil de 250 m³.
- ✓ Por lo anterior, será necesario tener intervenciones de manera constante al frente de excavación, lo que disminuirá el avance de las máquinas.

3.7 Ensamble y puesta en marcha de la Tuneladora.

Primeramente se conformaron plataformas con capacidad suficiente para soportar las cargas transmitidas por el peso de los equipos de montaje y los elementos que constituyen el propio escudo.

Entre las actividades principales se localiza el área de maniobras para proporcionar los materiales que se utilizarán durante la etapa de construcción del túnel como son la zona de descarga y bajada de dovelas, utilizando la grúa pórtico o alguna similar, la subestación eléctrica, trincheras, líneas de servicios, agua, aire comprimido, ventilación, bombeo, también la zona de servicios de apoyo como son la construcción de talleres, con especialidad eléctrica, soldadura, mecánica, los vestidores, almacenes, vigilancia, etc..

Para el caso que nos ocupa las cargas máximas a maniobrar son del orden de 200 ton.

3.7.1 Trabajos en la lumbrera

La segunda parte son las instalaciones que van en la pared de la lumbrera, como pueden ser la bajada de los servicios: tubería para suministro de agua, cables para la energía eléctrica y tuberías para el suministro de aire comprimido, tubería de ventilación para el túnel, tubería para la mezcla de inyección, bombeo, escalera de caracol, bandas de rezaga, elevador, asimismo se tienen las estructuras principales en el fondo de la lumbrera:

- a. Estructura de salida del escudo (portal)
- b. Estructura de reacción de la máquina (atraque)
- c. Cuna de recepción del escudo
- d. Tratamiento del suelo a la salida y llegada de las máquinas
- e. Plataforma de trabajo.
- f. Sistema de bombeo de achique.

3.7.2 Armado de la máquina EPB

El proceso de armado de las máquinas ha sido tal y como indica el fabricante, para lo cual fue muy importante tomar en cuenta el peso y volumen de cada uno de los elementos.

Para realizar dicho armado, la máquina se divide en dos partes: el cuerpo propio de la EPB y el tren de equipo para el funcionamiento y control de la misma.

En el caso de la EPB (escudo), su ensamble en el fondo de la lumbrera se realiza sobre una estructura denominada “cuna”, diseñada ex profeso para las dimensiones de la máquina. Adicionalmente se requiere de una estructura metálica de reacción, en la parte posterior del equipo, misma que recibirá el empuje de los gatos y permitirá el avance de la máquina en el terreno.

Para el armado de las máquinas Robbins, es necesaria la construcción de una “Galería de Montaje”, debido a la propia geometría de las máquinas así como a la profundidad de las lumbreras, cuyos detalles de construcción se describen en los siguientes párrafos. Dicha Galería no es necesaria en el caso de las máquinas *Herrenknecht*, para las cuales se utilizó en el Proyecto TEO el sistema de *umbilicales* que consiste en armar todo el equipo excavador en el fondo de la lumbrera, proporcionando energía eléctrica, hidráulica, aire, etc., desde la superficie de la lumbrera mediante mangueras o cables (**Foto 3**)

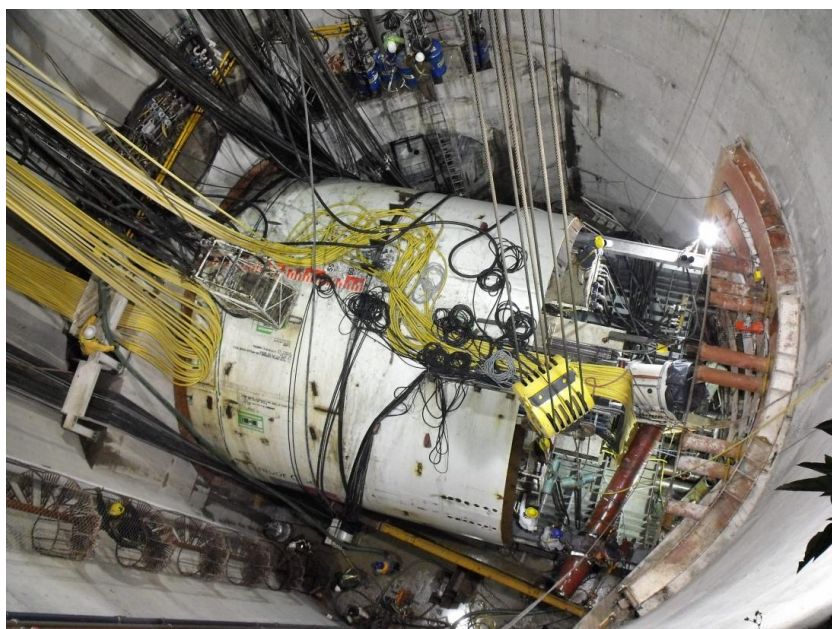


Foto 3. Armado de máquina *Herrenknecht* en fondo de lumbrera L-00 con el método de *Umbilicales*.

3.8 Construcción de la Galería:

Para empezar la excavación de la galería el muro primario de la lumbrera (concreto lanzado y marcos metálicos) debe ser demolido. Para garantizar la estabilidad del frente de excavación, previo a la demolición del muro, se deberá haber terminado la primera etapa del tratamiento de suelo como pre-confinamiento del frente, a base de anclas de fibra de vidrio.

Necesidad de Galería para ensamble de la tuneladora:

Tomando en consideración la presión piezométrica a la profundidad del túnel, la cual presenta valores muy altos (>4 ó 5 bares), hace imposible el inicio de la excavación utilizando sólo el primer tornillo sinfín, no tiene la capacidad suficiente para contener la presión hidrostática, haciendo lo necesario para la colocación de los dos tornillos. En tales condiciones en el fondo de la lumbrera no caben los dos tornillos por lo que es necesario la construcción de una Galería de Montaje (figuras 19 y 20)

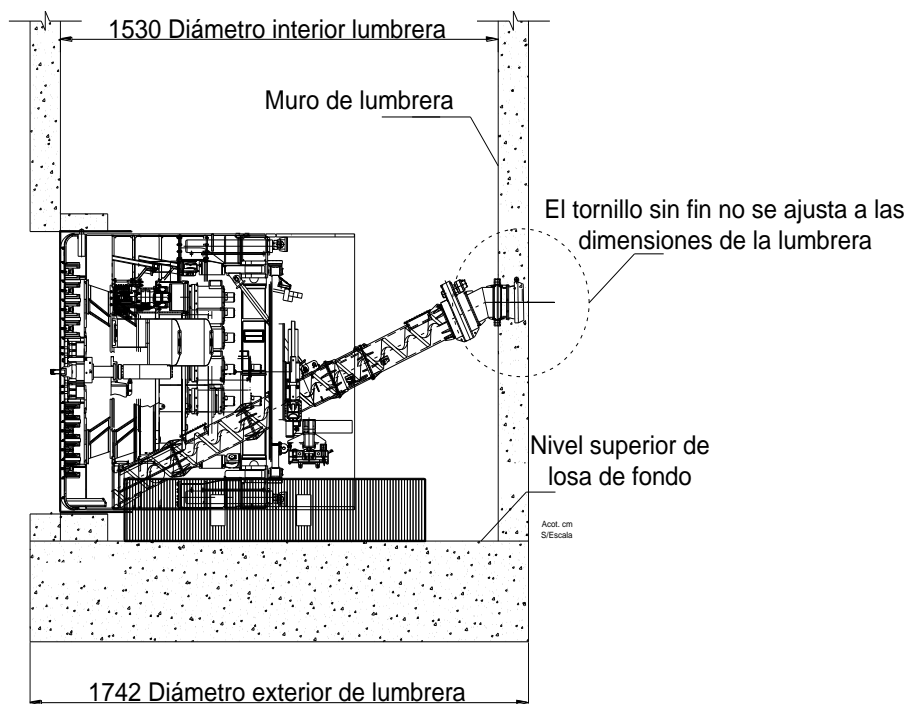


Fig. 19: Arreglo de la tuneladora y el primer tornillo sinfín en L-10

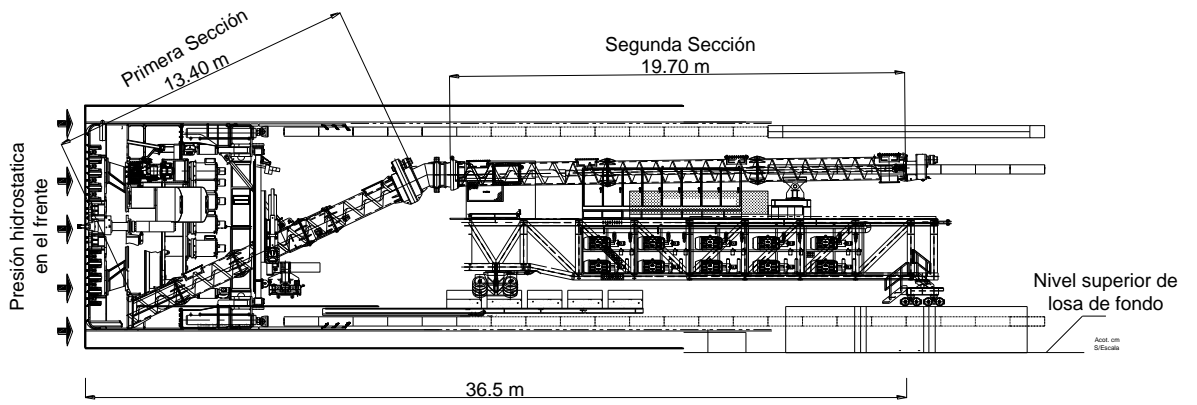
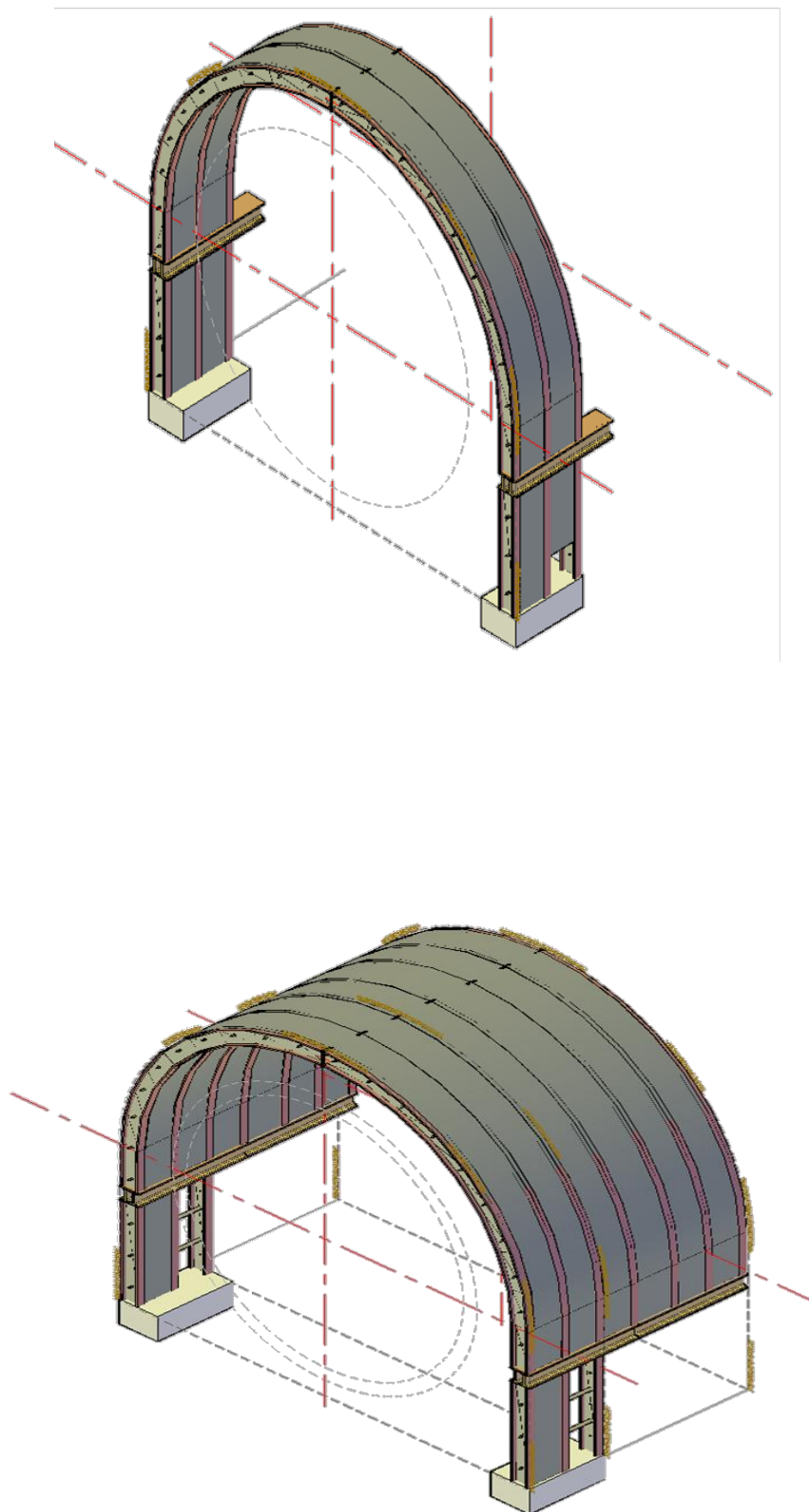


Fig. 20: Arreglo de la tuneladora con los dos tornillos sinfín en L-10

Figura 21. *Secuencia constructiva de la Galería de Montaje*



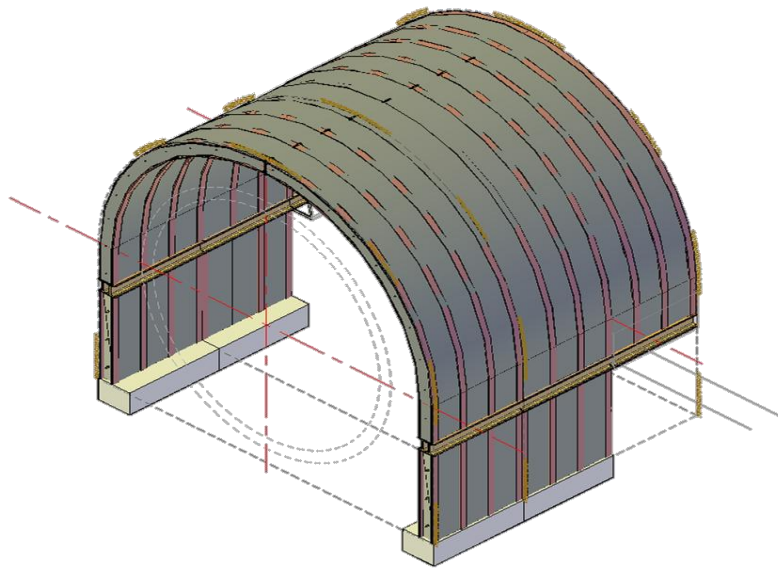
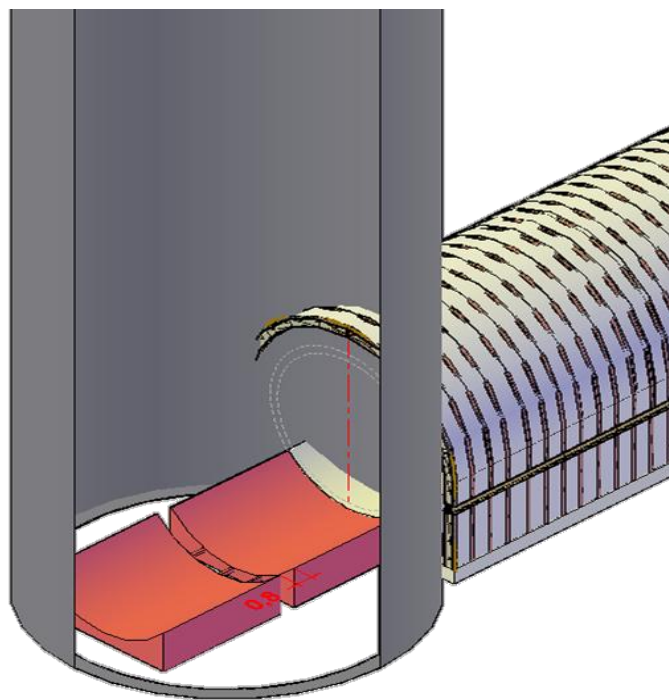


Figura 22. Conexión Lumbra – Galería de Montaje



Las principales actividades a realizar correspondientes a la construcción de la galería, son las siguientes:

3.8.1 Boveda de Paraguas

Para incrementar el Factor de Seguridad en la clave del túnel evitando caídos locales, se realizó una bóveda de elementos estructurales, formada por perforaciones longitudinales al trazo del túnel, perimetrales al diámetro de excavación de la galería, de 20 cm de diámetro, separadas entre sí 50 cm, equipadas con tubos metálicos de 15 cm de diámetro cédula 40, inyectadas con lechada cemento:agua, La perforación tiene una inclinación ascendente de 4° con respecto a la horizontal, la perforación se realizara con barras de perforación y brocas perdidas (foto 4).

3.8.2 Revestimiento

Durante la etapa de excavación, el revestimiento estará formado por una capa de 40 cm de concreto lanzado, reforzado con fibras metálicas y marcos metálicos de sección IPR, con separaciones de 75 cm. Los marcos metálicos quedan ahogados en el concreto lanzado.

3.8.3 Anclas de Fibra de Vidrio

El objetivo de este tratamiento de suelo es el aplicar un pre-confinamiento del frente de excavación, para limitar las deformaciones horizontales y mantener el equilibrio del mismo, garantizando su estabilidad. Este pre-confinamiento su función es proporcionar al suelo un refuerzo interno basado en anclas pasivas cuyo trabajo es a fricción, de la misma magnitud que el esfuerzo horizontal en la masa de suelo generado por la demolición del muro “empuje activo”. Adicionalmente y como una consideración constructiva, el mejoramiento se basa en anclas pasivas beneficia la estabilidad local del suelo, por lo tanto reduciendo la posibilidad de desprendimientos o fallas locales.

Teniendo en cuenta el proceso constructivo del túnel, las anclas propuestas son de fibra de vidrio colocadas en una perforación llena de lechada, con el fin de que no haya una oposición al proceso normal de excavación con la rueda de corte del escudo (figura 23).⁰⁰

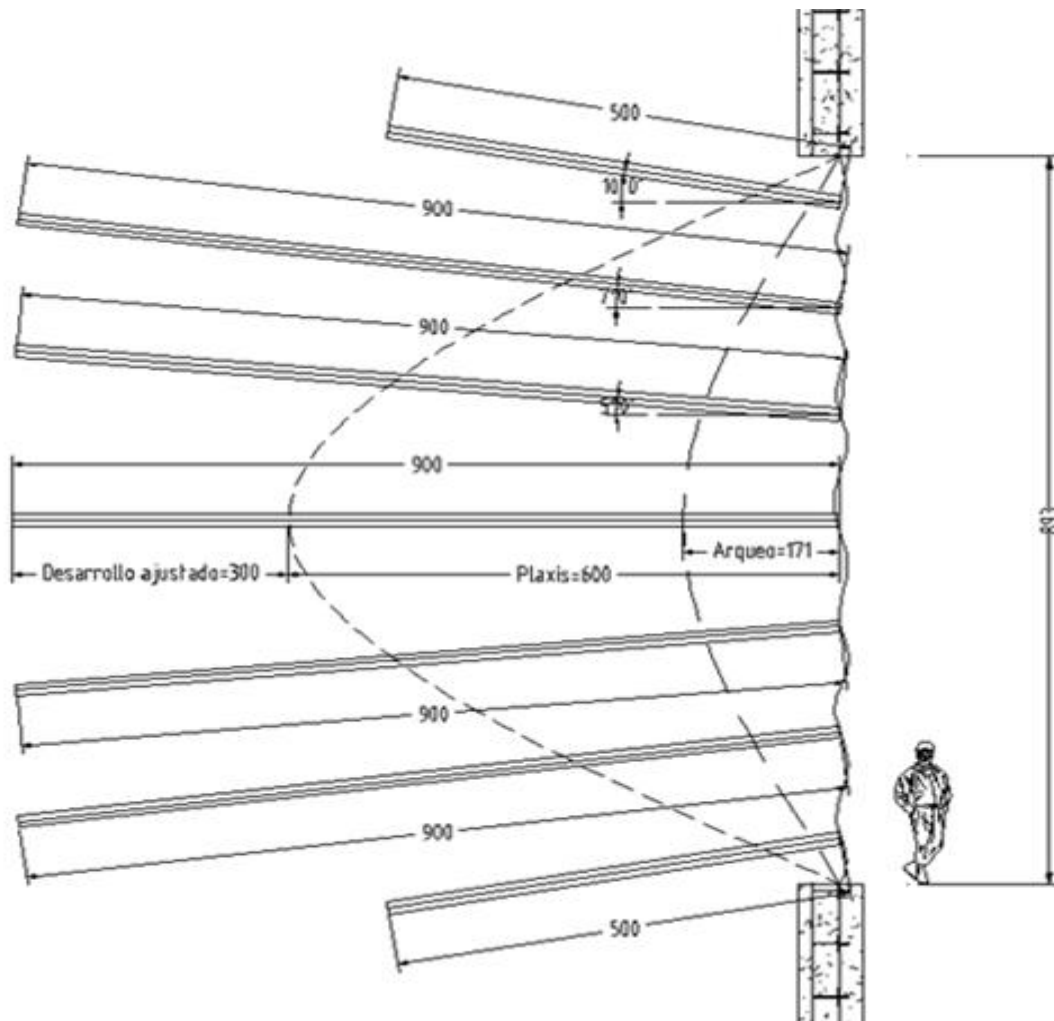


Figura 23: “Ejemplo de un frente de excavación pre-confinado por anclas de fricción de fibra de vidrio”

Para incrementar el Factor de Seguridad en la parte frontal del túnel, evitando deformaciones en el frente de excavación, se colocaron anclas de fricción, a base de fibras de vidrio, inyectadas con lechada cemento: agua (ver foto 4).

Foto 4. *Bóveda paraguas y anclas de fibra de vidrio en galería de montaje*



La construcción de la Galería se lleva a cabo en dos etapas: la primera excavando la media sección superior, y la segunda excavando la media sección inferior (por “banqueo”). La excavación se realiza con “rozadoras” o bien con excavadoras, dependiendo de la competencia del material del frente.

Foto 5. Galería de montaje terminada (lumbreira L-10)



3.8.3 Inyección del espacio anular

- ✓ Esta inyección tiene por objeto rellenar el espacio anular existente entre la excavación que va realizando el cuerpo exterior del escudo (camisa) y el diámetro exterior de las dovelas una vez colocadas dentro del faldón del escudo excavador, cuyo fin principal es evitar desplazamientos del terreno propiciados por dicho hueco y así evitar que se reflejen asentamientos en la superficie. Esta inyección se efectúa por medio de las tuberías instaladas en el faldón del escudo siendo parte del sistema del equipo. En el caso del TEO se usa el tipo **monocomponente** en lugar de **bicomponente** por los beneficios que presenta en cuanto a economía y facilidad de manejo.
- ✓ Las mezclas de inyección conforme a los datos de laboratorio se irán ajustando para tener los resultados adecuados tomando como referencia la dosificación que se presenta en forma particular para cada tramo.

3.9 Fabricación de dovelas

Las dovelas se utilizarán como revestimiento primario durante la excavación del túnel, para lo cual se formarán anillos con siete u ocho piezas más una cuña, mismas que se almacenarán por 28 días para que adquieran la resistencia de proyecto para ser transportadas al lugar de utilización y posteriormente se bajarán por la lumbrera para que la maquina tuneladora las instale conforme al avance de la excavación lo permita.

Dada la necesidad de producir los anillos suficientes en cada uno de los respectivos tramos que componen el TEO; y basado en los rendimientos técnicos de las máquinas tuneladoras, fue necesario construir tres plantas para producir los anillos, las cuales se ubicaron estratégicamente a lo largo del proyecto túnel emisor oriente.

Planta No. 1 (km 0+000 al km 21+617) **Ecatepec** (Capacidad: 63 dovelas por semana)

Planta No. 2 (km 21+617 al km 49+573) **Zumpango** (Capacidad: 62 dovelas por semana)

Planta No. 3 (km 49+573 al km 62+049) **Huehetoca** (Capacidad: 73 dovelas por semana)

Las plantas están automatizadas y son del tipo *carrusel*. Se anexa diagrama (Figura 24).

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA LA FABRICACION DE DOVELAS.

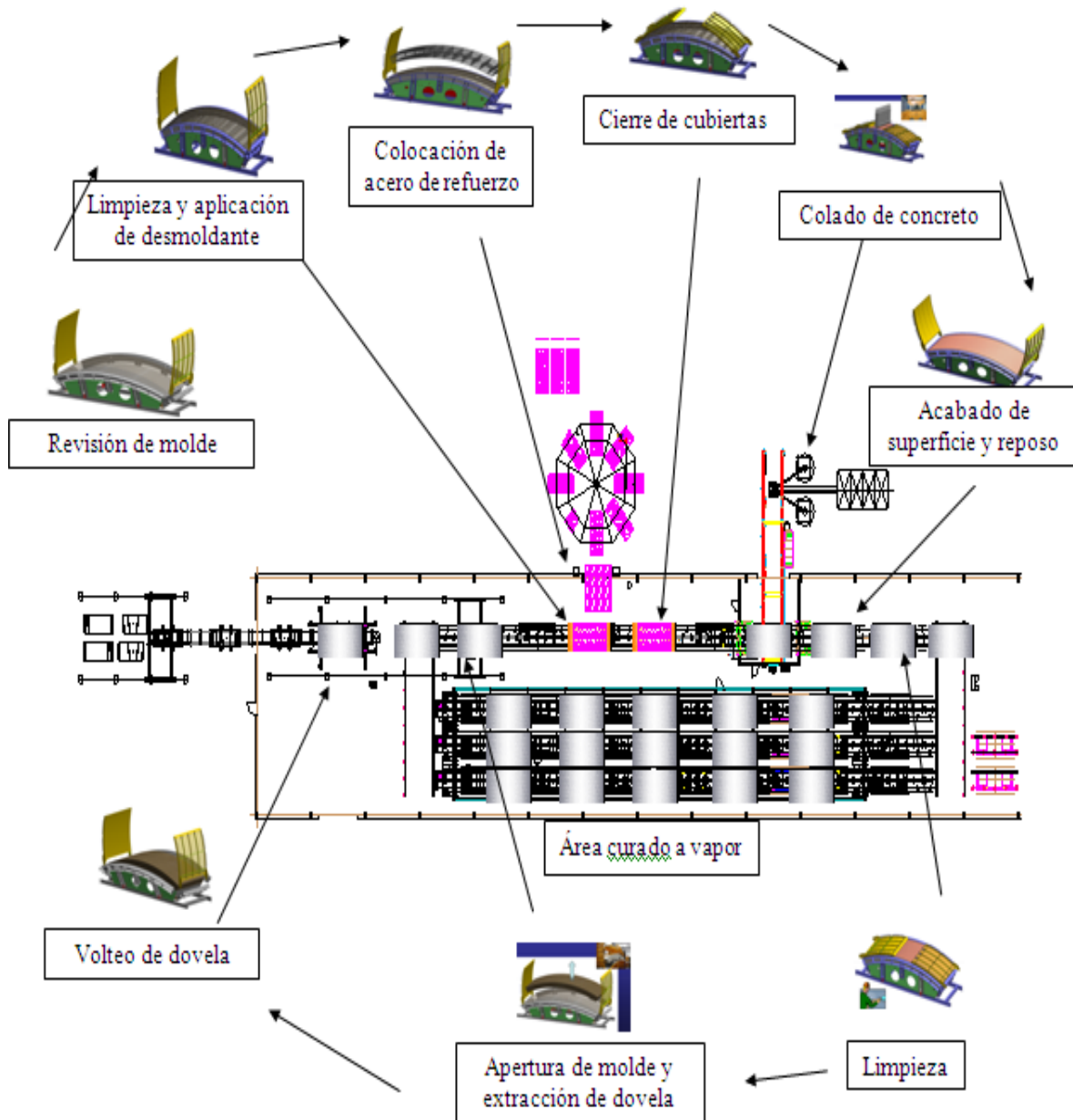


Figura 24: Ciclo de fabricación de dovelas

3.10 Revestimiento definitivo

Al término de la construcción del revestimiento primario a base de dovelas de concreto, el diámetro exterior actual es de 8.40 m, mientras que el interior es de 7.70 m (ambos teóricos), será un colado monolítico continuo (sin juntas como el anillo de dovelas) con un espesor de 35 cm. El diámetro terminado de esta forma del TEO será de 7 m (teórico).

Para los dos casos de revestimiento, se ha empleado acero de refuerzo y concreto con una resistencia a la compresión $f'c$ de 350 kg/cm², lo que garantiza que se cumpla con los estados límite de falla y de servicio para ambos elementos.

Para el caso del revestimiento definitivo, se empleará una cimbra telescópica de acero estructural A36, con una longitud total de 45 m (ya ensamblada). Esta cimbra se desplazará con avances de 45 m a 36 m, hasta la llegada en la lumbrera 1A.

Materiales

- Acero de refuerzo corrugado con límite elástico mínimo igual a F_y de 4200 kg/cm², y deberá de cumplir con las normas NMX-B-6, NMX-B-294 ó NMX-B-457.
- El acero de refuerzo tendrá un módulo de elasticidad E_s de 2,039,000 kg/cm².
- Concreto estructural clase I, con peso volumétrico en estado fresco de 2.4 t/m³, con resistencia a la compresión no confinada $f'c = 350$ kg/cm²
- Concreto elaborado con cemento tipo CPO 40.RS ó CPC-40-RS, con una relación agua-cemento de 0.45 como máximo. El concreto deberá cumplir con la Norma NMX-C-414-ONNCCE
- Módulo de Elasticidad del concreto $E_c = 14000\sqrt{f'c} = 261,916$ kg/cm².
- Acero estructural tipo A-36 con resistencia a la fluencia F_y de 2530 kg/cm², y resistencia última a la falla $F_u = 4080$ kg/cm² (para perfiles IPR)
- Acero estructural tipo A-50 con resistencia a la fluencia F_y de 3510 kg/cm², y resistencia última a la falla $F_u = 4576$ kg/cm² (para perfiles HSS)
- Soldadura tipo E70-XX con resistencia a la ruptura $F_{us} = 4915$ kg/cm².

Como se muestra en la figuras 25 y 26, .

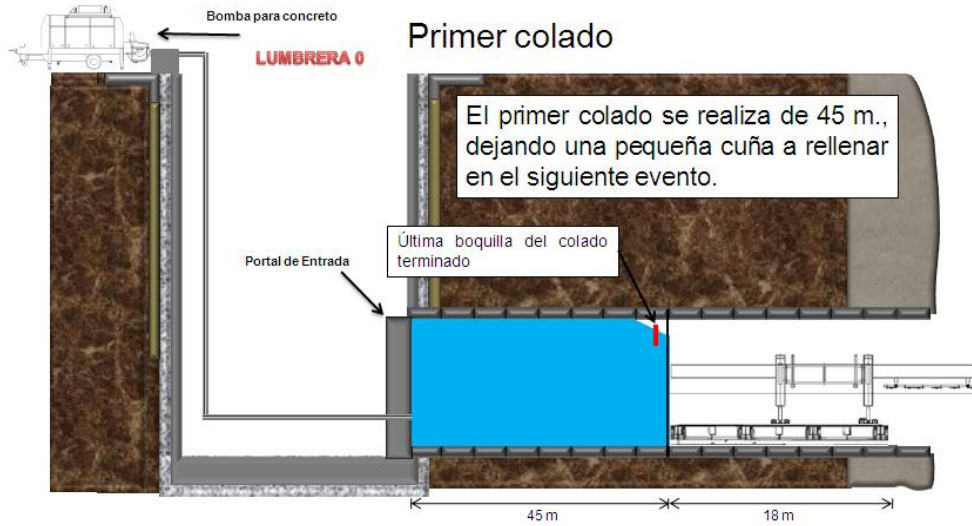


Fig. 25: Colocación del revestimiento definitivo (primer colado)

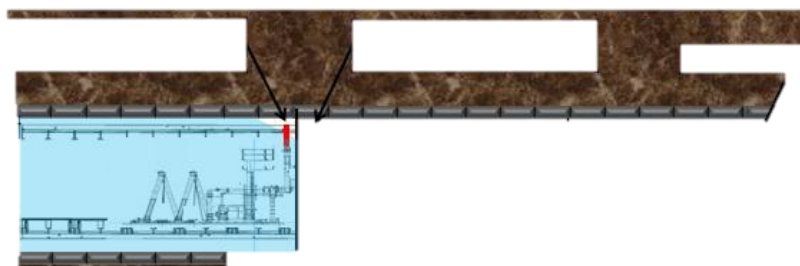


Fig. 26: Colocación del revestimiento definitivo (colados subsiguientes)

IV. CONCLUSIONES.

En estos últimos años se ha retomado el desarrollo de infraestructura de Obras Subterráneas es importante continuar con la construcción de estas obras por las ventajas que implica como son: acortamiento de distancias, representan sitios más seguros y los diversos equipos y herramientas existentes que facilitan la ejecución del proyecto.

La construcción de este mega proyecto como es el Túnel Emisor Oriente actualmente en proceso en México D.F. se tiene el apoyo de información de Ingeniería básica disponible y también exploraciones complementarias para la retroalimentación del proyecto ejecutivo, esta obra de infraestructura forma parte de la historia del drenaje de la Ciudad de México. Ha sido posible enfrentarse al reto de esta construcción en la excavación del túnel por medio de maquina tuneladora (EPB), debido a la amplia variedad de suelos que atraviesa y las constantes modificaciones realizadas a las maquinas tuneladoras adicionando su respectivo mantenimiento adecuado, mediante el personal calificado de la empresa Herrenknecht y Robbins en sus respectivos tramos y personal de apoyo de maquinaria por parte de la empresa contratista encargada de la construcción ,por lo tanto adaptándolas a escenarios geotécnicos reales, así también en el estudio de posibles cambios de trazo en algún diferente tramo al mencionado. Sobre la marcha se fue desarrollando infraestructura a lo largo del procedimiento constructivo como son: construcción de lumbreras con respectivos tratamientos para la bajada de las maquinas tuneladoras o pre-confinamientos al frente para el continuo avance de excavación, pozos de rezaga (en algunos tramos) y los acondicionamientos generales para la instalación del sistema de bandas transportadoras en la maquinas tuneladoras (Robbins) con el propósito de generar considerables avances de obra y no se generen problemas imprevistos en el desarrollo de esta construcción, cumpliendo con los requerimientos de calidad necesarios como lo indica el proyecto. Es una obra de emergencia que actualmente se esta desarrollando, permitirá incremento de la capacidad de desalajo de aguas residuales en 150 m³/s y operar un sistema de conducción profundo que sea posible operar alternadamente el TEO y el TEC y así proporcionar el mantenimiento al drenaje profundo (durante el estiaje) y no se sigan generando problemas severos de inundaciones en varias partes de la ciudad.

Bibliografía

- **Túnel Emisor Oriente**, Memorias de diseño de las Lumbreras y del Túnel (2010, 2011). Varios autores.
- **Túnel Emisor Oriente**, Procedimiento de Colado del Revestimiento Definitivo Tramo 1A L00-L1A (2010, 2011). Varios autores.
- **Lombardo Adrián & Comulada Marc & Maidl Ulrich** (2010), *“Túnel Emisor Oriente in México, the world’s most challenging EPB shield tunneling Project”*
- **Santiago Alberto** (2009), “Construcción de Lumbreras utilizando concreto lanzado para estabilizar las paredes , o bien marcos metálicos”
- **Saenz Carlos** (2011), “Procedimientos Constructivos de Túneles en Suelos”