

95  
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO MEDIANTE EL USO DE  
UNA MAQUINA PERFORADORA DE TUNELES (MPT)  
DE FABRICACION NACIONAL**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A N

**ARMANDO MARTINEZ GALINDO**

**CARLOS MARTINEZ MORALES**

MEXICO, D.F.

1988.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## P R E F A C I O

A guisa de paráfrasis, el presente trabajo pretende mostrar a lo largo de siete capítulos, los grandes avances tecnológicos que se han presentado en los procedimientos constructivos para la perforación de túneles. Estos avances a nivel mundial han sido puestos en práctica y adaptados a las necesidades de grandes obras construidas en la Ciudad de México, como son: El Gran Emisor Central, los Interceptores Profundos y la Línea 7 Norte del Metro, obra a la cual nos enfocaremos con objeto de destacar las grandes ventajas obtenidas al adoptar una técnica de perforación de túneles mediante el empleo de un escudo o máquina de perforación de túneles (MPT). Para ello el capítulo uno, brinda al lector un panorama general sobre los inicios de la construcción del Metro de la Ciudad de México, el Plan Maestro del Metro y los tipos de líneas existentes, así como algunos aspectos para la selección de una línea del Metro. El capítulo dos, versa sobre los orígenes y desarrollo en la construcción de túneles a nivel mundial y se hace mención de algunas máquinas que han sido desarrolladas para la excavación de túneles. El capítulo tres, hace énfasis en algunas técnicas para la construcción de lumbreras, por considerar a éstas un punto estratégico para el buen desarrollo de la perforación de los túneles de la línea del Metro. El capítulo cuatro, destaca algunos métodos constructivos para la excavación de túneles y se describen las MPT utilizadas en estos métodos, introduciendo así al lector en una gama de técnicas constructivas para la perforación de túneles, en las que su aplicación depende del tipo de terreno por excavar. La descripción de la MPT de fabricación nacional con la cual se llevan a cabo los trabajos de la línea 7 del Metro se trata en el capítulo cinco. Al capítulo seis corresponde el estudio del procedimiento constructivo utilizado en la mencionada línea del Metro; para finalmente tratar en el capítulo siete las conclusiones a este trabajo.

# I N D I C E

## CAPITULO 1.

INTRODUCCION .....	11
--------------------	----

## CAPITULO 2.

### ORIGENES DE LA CONSTRUCCION DE TUNELES

2.1. Desarrollo Histórico.....	20
2.2. Máquinas Perforadoras de Túneles en Suelos Duros.....	20
2.3. Máquinas Perforadoras de Túneles en Suelos Blandos.....	21
2.4. Máquinas Perforadoras en Roca.....	22
2.5. Máquinas Perforadoras de Tierra Balanceada.....	22

## CAPITULO 3.

### CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

3.1. Técnicas Constructivas de Lumbreras.....	25
3.2. Técnica Francesa.....	26
3.3. Técnica Italiana.....	29
3.4. Técnica Nacional.....	33
3.5. Lumbreras Flotadas.....	36
3.6. Lumbreras Hincadas.....	39
3.7. Lumbreras Ademadas con Dovelas.....	41
3.8. Lumbreras con Aire Comprimido.....	44

## CAPITULO 4.

### METODOS MAS RELEVANTES PARA LA CONSTRUCCION DE TUNELES MEDIANTE EL USO DE ESCUDOS DE PERFORACION

4.1. Características Principales.....	47
4.2. Excavación de Túneles mediante el Método Austriaco.....	49
4.3. Escudo de Frente Abierto y Aire Comprimido.....	52
4.4. Escudo de Frente Presurizado.....	58

## CAPITULO 5.

### DESCRIPCION DE LA MPT DE FABRICACION NACIONAL.....

73

## CAPITULO 6.

### PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO EN TUNEL "AQUILES SERDAN-CAMARONES" DE LA LINEA 7 NORTE DEL METRO

6.1. Exploración y Muestreo.....	86
6.2. Estratigrafía.....	88
6.3. Asentamientos.....	90
6.4. Excavación y Construcción de la Lumbreera.....	91
6.5. Excavación del Túnel.....	94

## CAPITULO 7.

CONCLUSIONES.....	105
-------------------	-----

## BIBLIOGRAFIA.

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCION

Fué en el año de 1863 cuando en la Ciudad de Londres Inglaterra, fué puesto en marcha el primer tren subterráneo, que cubría con su doble vía varias poblaciones uniendo en su trazo a cuatro estaciones. La tracción de aquel primer Metro se llevaba a cabo por medio de locomotoras de vapor que utilizaban carbón como combustible, teniendo grandes problemas de contaminación dentro de las estaciones.

En la Ciudad de México el Metro surge como la más adecuada solución a los problemas de transporte que agobiaban a ya más de 10 millones de habitantes. Hacia el año de 1965, dan inicio los estudios correspondientes y análisis de factibilidad económica y financiera para la construcción del Metro de la Ciudad de México, que contaría en su inicio con tres líneas tendidas a lo largo de 42.52 kilómetros estas tres líneas iniciales fueron las siguientes :

- a) La línea 1: Que correría la Ciudad desde la Calzada Ignacio Zaragoza, hasta la Avenida Observatorio.
- b) La línea 2: Que partiría desde el Pueblo de Tacuba, culminando su recorrido en la terminal Taxqueña.
- c) La línea 3 : Que partiendo del Hospital General, culminaba en la Unidad habitacional Tlatelotco.

La aceptación que llegaron a tener estas tres líneas convirtieron al Metro en la columna vertebral de un transporte racional y adecuado, dando inicio a una mayor expansión de este sistema, por medio de la creación del llamado "PLAN MAESTRO".

Si bien es cierto que con la implementación de este plan, se lograría tener un transporte seguro y eficaz, además de no ser contaminante, también es cierto que se requeriría del apoyo y complementación de otros medios colectivos. Con este objeto fue creado el "PLAN RECTOR DE VIALIDAD Y TRANSPORTE DEL DISTRITO FEDERAL". dicho plan se divide de la siguiente manera.

1. Plan del Metro.
2. Plan de Vialidad.
3. Plan de Transporte y Superficie.
4. Plan de Estacionamiento.

Dentro de estos planes, el del Metro es el que por su naturaleza tiene mayor importancia, debido a que es el único sistema de transporte masivo que puede trasladar el mayor número de pasajeros en buenas condiciones de seguridad y confort.

### **El Plan Maestro del Metro.**

En el año de 1965 se tomó la decisión de construir el Metro de la Ciudad de México, partiendo de estudios iniciados en 1958, y después de analizar 30 alternativas de trazo, se seleccionó una de ellas, que cubriera las necesidades más urgentes de transporte colectivo y solucionara al mismo tiempo los problemas del primer cuadro de la zona central de la Ciudad.

Como resultado de estos estudios, se concluye la construcción de dos líneas básicas y un tramo de una tercera. Es así como da principio la primera etapa del Plan Maestro del Metro (fig. 1.1). Este Plan prevee la dotación en el año 2010 de una red con 440 kilómetros de longitud, en la que operarán 807 trenes en 21 líneas, con intervalos mínimos de 100 segundos en las horas de máxima demanda, y teniendo una capacidad de transportación de 24 millones de pasajeros al día. En estas condiciones, la capital

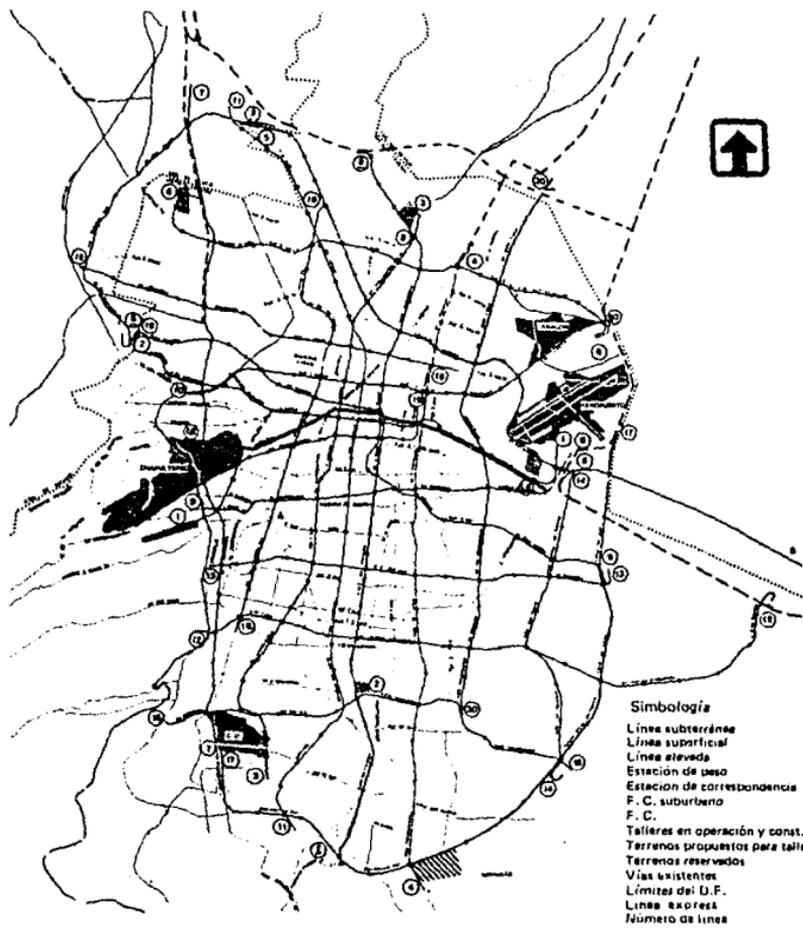


FIG. 1.1 PLAN MAESTRO DEL METRO

del País, contará con una estructura básica que podrá satisfacer la demanda que se presentará para esa época. -

Los principales objetivos que ha perseguido desde su creación el Plan Maestro del Metro, son : -

- Definir una política sistemática de ampliación que induzca a la realización del transporte masivo.
- Establecer las reservas territoriales destinadas a las edificaciones necesarias para la adecuada operación del sistema, y preservar los derechos de vía, tanto para las líneas futuras, como para la integración de otros medios de transporte. ---
- Proporcionar la reestructuración urbana y el ordenamiento del uso del suelo.
- Optimizar el uso de los distintos medios de transporte y la infraestructura existente. -
- Disminuir la contaminación ambiental.
- Crear más opciones de traslado a los centros de trabajo, recreación y servicio. -

El propósito del Plan Maestro es el de tener una base de ordenación del área urbana, que sea el punto de partida del desarrollo ininterrumpido que resuelva por una parte, la deficiente transportación actual y que por otro lado plantee acciones a mediano y largo plazo, adaptándose a la dinámica de una urbe que se perfila como la más grande del mundo en razón de su crecimiento demográfico, económico y social. -

## Selección de la Línea .

El transporte es un problema de carácter dinámico en el cual no existen - soluciones integrales inmediatas, por lo cual el desarrollo de una red de - transporte colectivo solo se logrará apoyándose en los resultados y --- experiencias obtenidas del proyecto, la construcción y la operación de cada línea.

Los trazos ideales están sujetos a modificaciones que son consecuencia de las condiciones de servicio a determinadas zonas, del tipo de subsuelo, de interferencias con instalaciones subterráneas, monumentos históricos, etc.

En su iniciación una red del Metro, debe tener dos líneas principales --- perpendiculares entre sí y desarrollarse mediante la construcción de líneas paralelas, formándose en un futuro una cuadrícula que cubrirá progresivamente el área urbana.

Los principios fundamentales para la estructuración de una red del Metro son su tránsito, operación y construcción.

Respecto al tránsito las líneas deben.

- a) Corresponder a las corrientes establecidas de circulación sobre las que transitan diariamente los mayores volúmenes de - pasajeros y cubrir las zonas de mayor densidad demográfica.
- b) Dar servicio a las zonas más congestionadas.
- c) Abarcar los centros de actividades principales de la Metrópoli.
- d) Permitir a los usuarios un ahorro de tiempo en sus recorridos, por medio de líneas rectas e interconexiones múltiples.

**Con respecto a la operación del sistema se debe :**

- a) **Obtener el mayor número de pasajeros.**
- b) **Lograr un movimiento regular de pasajeros durante el día.**
- c) **Lograr una velocidad comercial alta.**
- d) **Permitir la reestructuración progresiva y completa de los transportes superficiales y su coordinación con el Metro.**

**Respecto a la construcción del sistema se debe considerar :**

- a) **El monto de la inversión que corresponde a los diferentes tipos de construcción de las líneas.**
- b) **Las molestias y el costo que representan los desvíos de transporte durante la construcción.**
- c) **Las ventajas y desventajas a la solución elegida en comparación con otras alternativas de trazo.**

### **Selección del Tipo de Línea.**

**Básicamente existen tres tipos de estructura con las cuales se han venido desarrollando las líneas del Metro que hasta este momento conocemos, estas son :**

- **La línea superficial.**
- **La línea elevada.**
- **La línea subterránea.**

Para la selección de algunas de ellas es necesario tomar en cuenta los siguientes factores :

- Costo de la obra civil por kilómetro.
- Tiempo de ejecución de la obra civil.
- Obstrucción de la vía pública durante su ejecución.
- Interferencia con los servicios municipales.
- Conservación de obras y equipos.
- Mantenimiento de la vía.
- Paisaje Urbano: Aspecto estético y barrera física.
- Futura disponibilidad vial.
- Libramientos viales perpendiculares inducidos.

### **Sistema superficial.**

Este sistema es el que se utilizó en la primera etapa en la Calzada de Tlalpan. Este sistema representó un ahorro considerable ya que se utilizó la infraestructura por donde circulaban los tranvías.

### **Sistema elevado.**

Para tomar la decisión de implementar este sistema se debe tener en cuenta las cantidades de material necesario por kilómetro de línea, así como las dificultades de tipo constructivo y las necesidades de equipo, o sea, el hacer la línea elevada no es más que el resultado de una comparación económica con los otros sistemas de construcción y en el cual este sistema elevado vendría a ser la solución óptima para el paso de ésta línea.

La presencia de una línea elevada afectará en forma notable el ambiente urbano, por lo que hay que tener en cuenta una serie de remodelaciones que deberían hacerse a lo largo de toda la línea, entre otras remodelaciones se pueden encontrar la creación de zonas verdes, carriles amplios en la lateral de la línea, banquetas amplias y las remodelaciones de los barrios que así lo necesiten.

### **Sistema subterráneo.**

El sistema subterráneo implica una técnica utilizada en México a partir de 1968 y que se ha venido poniendo al día a partir de entonces.

La primera técnica utilizada se caracteriza por un cajón subterráneo que se inicia al construir dos brocales de concreto en forma de "L" invertida, los cuales sirven como guías para la excavación de los muros Milán. Una vez listos los muros se les colocan unas vigas de concreto y se procede al armado de la losa superior para el colado en el momento oportuno. Una vez construida la losa superior, se procede al relleno y a la restitución de la carpeta y la vialidad.

La segunda técnica empleada en la construcción de vías subterráneas es aquella en la cual el ducto del Metro será construido por medio de un túnel. Esta técnica se ha desarrollado al sur de la ampliación de la línea 3 y en la construcción de toda la línea 7, línea a la cual nos enfocaremos mas adelante, teniendo en cuenta que es aquí en donde se encuentra trabajando el "ESCUDO MEXICANO".

# Capítulo 2

## **2. ORIGENES DE LA CONSTRUCCION DE TUNELES**

### **2.1. Desarrollo Histórico.**

Desde los inicios del florecimiento de la minería las excavaciones de túneles se hicieron necesarias para la explotación de yacimientos minerales y carboníferos, posteriormente la construcción de estos túneles se extendió para el uso de vías de comunicación, como lo son las vías férreas, las carreteras, así como también la conducción de agua. Desde aquellos remotos tiempos la tecnología en la excavación de túneles ha tenido un considerable avance, mas sin embargo, este avance tecnológico se ha presentado dentro de la ingeniería mexicana hasta hace algunos años con la construcción del Gran Emisor y las obras del Metro. Entre los adelantos más relevantes podemos citar la rapidez y seguridad del trabajo logrado a través del uso de las máquinas perforadoras de túneles o como mas comunmente se les conoce, "ESCUDOS DE PERFORACION".

### **2.2. Máquinas Perforadoras de Túneles en Suelos Duros.**

El Inglés Marc Isambard Brunel, es el precursor en el diseño de máquinas perforadoras de túneles (MPT) o escudos de perforación, ya que en el año de 1818 patentó la primera MPT, con la cual realizaría en el año de 1823 la construcción del túnel bajo el Río Tamesis en Londres; dicho escudo tenía una sección rectangular de 6.75 x 11.40 mts. y estaba provisto de un complicado sistema de plataformas que sostenían el frente por medio de tornillos, mientras que el escudo se movía hacia adelante penetrando en el terreno mediante unos gatos de tornillos apoyados contra el revestimiento final. El uso de este tipo de escudo se fué perfeccionando y para el año de 1869 Greahead, utilizó el primer escudo cilíndrico en la construcción del "Tower Tunnel" en Londres en el cual ya se utilizó como revestimiento final dovelas de hierro fundido.

### **2.3. Máquinas perforadoras de túneles en suelos blandos.**

Durante la excavación de un túnel, la estabilidad en suelos duros puede lograrse de una manera relativamente fácil, por el contrario, en suelos blandos, la estabilidad se logra a base de técnicas más elaboradas. En depósitos aluviales saturados con baja capacidad de carga, el mayor problema en el tuncleo con escudos lo plantea, además del soporte del frente de excavación, el manejo del agua en el sitio de trabajo. La condición para admitir cualquier filtración al túnel es que ésta no debe estar combinada con pérdidas de suelo, por ejemplo, no debe contener partículas finas ni llevar éstas al suelo circundante. Este puede ser el caso cuando el agua se infiltra a través de fisuras en arcillas duras o desde suelos granulares gruesos. Los problemas más delicados en el control del agua se presentan en suelos arenosos finos y en arcillosos de alta plasticidad. En los últimos años la tecnología para perforar túneles en suelos blandos ha evolucionado rápidamente con la aplicación del aire comprimido y el desarrollo de los escudos de frente presurizado. Los orígenes de éstas técnicas de perforación se remontan al año de 1830 cuando el Ingeniero Británico Thomas Chochrane, presentó un método para la excavación de túneles con aire comprimido, basado en las investigaciones del físico Italiano Collac, las cuales planteaban la posibilidad de igualar la presión hidrostática en un suelo saturado incrementando la presión del aire del túnel. En el año de 1879, Greathead utilizó por primera vez el aire comprimido en la construcción de túneles y lumbreras. A partir de esta fecha se ha seguido utilizando este método en donde las condiciones de estabilidad del frente son precarias y los gradientes de filtración hacía la excavación producen situaciones peligrosas, como son los arrastres de material, tubificaciones, ebullición de las arenas, etc.

## **2.4. Máquinas perforadoras en roca.**

La excavación de túneles en roca mediante el uso de estas máquinas dió -  
comienzo en el año de 1958 cuando la compañía Robbins de los Estados Unidos -  
empleó una máquina de 3.20 m. de diámetro en un túnel para drenaje en -  
Toronto. El avance máximo obtenido de 35 m/día demostró sin duda alguna -  
que la época de la construcción de túneles en roca había llegado. A partir -  
de este momento el auge de las MPT hizo que los proyectos imposibles se -  
tornaran en prácticos y comunes. A la fecha en los países desarrollados es -  
una práctica común diseñar grandes proyectos tomando en cuenta la -  
confiabilidad de las MPT con diámetros superiores a los 10.60 m.

## **2.5. Máquinas perforadoras de tierra balanceada.**

En Japón se ha desarrollado una nueva técnica de tuneleo en suelos blandos para controlar el agua del subsuelo y prevenir el colapso del frente de -  
excavación. El escudo de presión de tierra balanceada, cuyo principio es -  
que para la protección del frente, el material excavado llene la cámara de -  
presión del escudo y balancee la presión de tierra en el frente de excavación. Este escudo tiene dos modalidades; tipo de presión de tierra y tipo de presión de agua, su funcionamiento es muy simple. El suelo excavado por una cabeza cortadora rotatoria penetra en la cámara del escudo conforme éste avanza y es continuamente removido del frente de manera controlada a través de un transportador de tornillo. El acoplamiento de una cámara de presión de agua en el extremo final del transportador permite al sistema excavar suelos -  
arenosos permeables e inestables con una presión de agua considerable. No existe riesgo de liberación de presión del suelo y agua en el lugar. Por otra parte, el espacio anular que deja el faldón del escudo es rellenado --- inmediatamente y constantemente con un material de inyección presurizada y de alta densidad, mediante el uso de un método de inyección sincronizada. -  
Los volúmenes de excavación y descarga deben ser iguales. Para cumplir con

estas condiciones el avance del escudo es controlado monitoreado, ya sea el volumen de rezaga descargado o la presión de tierra en el frente. El volumen de descarga puede medirse por medio de escalas en el malacate de rezaga o a la salida del transportador del tornillo.

La presión del suelo, se controla mediante la observación de la correa de los gatos del escudo, del par y de la velocidad de rotación de la cabeza cortadora y del transportador de tornillo. El avance del escudo y la rotación del transportador están sincronizados para igualar la presión existente en el frente de la excavación con aquella de la rezaga en la cámara de presión.

La aplicación de este método se caracteriza por lo siguiente :

- Impacto ambiental mínimo. Asentamientos mínimos y un aislamiento virtual de los problemas relacionados con ruido, vibración, daños a la salud de los trabajadores, manejo de lodos de descarga, etc.
- Adaptación a una gran variedad de condiciones del suelo.
- Casi no requiere de técnicas auxiliares de estabilización como abatimiento del nivel freático y tratamientos de inyecciones químicas.
- Instalaciones en superficie más completas.

# Capítulo 3

### 3. CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

#### 3.1. Técnicas constructivas de lumbreras.

Una vez que se ha determinado el trazo definitivo de un túnel y se han llevado a cabo los estudios económicos convenientes, se procede a la construcción de las lumbreras. Las lumbreras son excavaciones verticales, cuya finalidad es facilitar el acceso del equipo y materiales para ejecutar la excavación del túnel y para la extracción del producto de la misma. Las lumbreras pueden ser estructuras temporales o permanentes, en el primer caso, su única función es facilitar la construcción del túnel, por lo que al terminar el proyecto se rellena nuevamente; en cambio las lumbreras permanentes se convierten posteriormente en estructuras de ventilación, cámaras de acceso o de bombeo, captación de colectores, etc.

En la construcción de túneles del Metro de la Ciudad de México la mayoría de las lumbreras tienen profundidades que varían de 15 a 35 m. bajo la superficie del terreno. Las características de su sección transversal dependerá del espacio requerido para la realización de las maniobras o funciones a las que estarán destinadas. Por costumbre las lumbreras casi siempre se diseñan con secciones circulares; el material que se emplea para el revestimiento primario de las lumbreras no solo depende de la finalidad de éstas, sino principalmente del método constructivo a utilizar. En suelos duros se puede utilizar tabique o bloques de concreto adecuadamente impermeabilizados. En suelos medianamente estables, piezas prefabricadas de concreto simple o armado o excepcionalmente, de hierro fundido o concreto colado in situ. En suelos blandos, el revestimiento debe ser de concreto reforzado.

### 3.2. Técnica Francesa.

En este y en los demás procedimientos de construcción de lumbreras con muros colados en el lugar, como las capas superiores del terreno normalmente son rellenos, se requiere la excavación a mano y construcción de un brocal de concreto, el cual sirve como soporte y guía del equipo de excavación, además de sostener cualquier desprendimiento de las paredes. A continuación se procede a la excavación de los sectores anulares que se efectúa con un taladro barrenador guiado montado sobre una vía en la periferia de la lumbreira (fig. 3.1. y 3.2.).

El material de rezaga mezclado con la bentonita que estabiliza la excavación, se extrae por medio de una broca rotatoria y de percusión, que cuenta en su interior con una tubería de succión. Para poder excavar los sectores anulares completos, el taladro cuenta con movimientos horizontales, además de su movimiento vertical rotatorio. En la superficie la rezaga se deposita en un tanque de sedimentación, en el cual se recupera la mayor parte de la bentonita para ser enviada nuevamente a la excavación.

Para las juntas de colado, con el mismo taladro se hacen perforaciones de mayor diámetro en los extremos del sector anular, en las que se coloca una tubería para que sirva como límite. Posteriormente se baja el armado y se cuele. Una vez que el concreto tiene el fraguado suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector (fig. 3.3 y 3.4). En caso de existir escurrimientos considerables por las juntas, se hace un barreno para inyección de lechada, (fig. 3.5) para sellar los huecos que pudieran existir dentro del revestimiento.

Ya que se tienen los muros, se excava el núcleo con almeja, hasta una profundidad tal que, según estudios de Mecánica de Suelos, no se presentan expansiones en el fondo debido a la descarga del suelo. Cuando se llega a

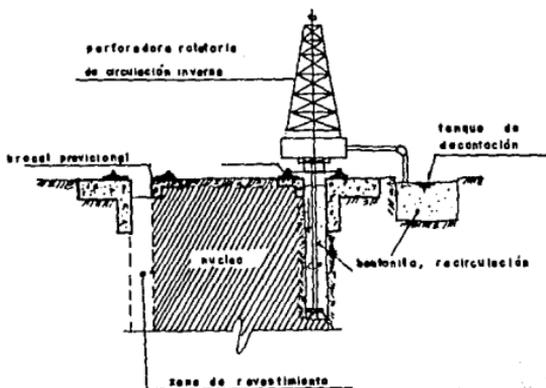


FIG. 3.1 EXCAVACION DE LOS SECTORES ANULARES

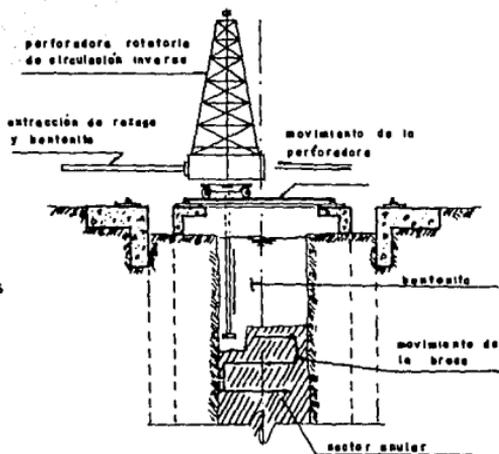


FIG. 3.2 PERFORADORA CON MOVIMIENTOS ROTATORIOS Y HORIZONTALES

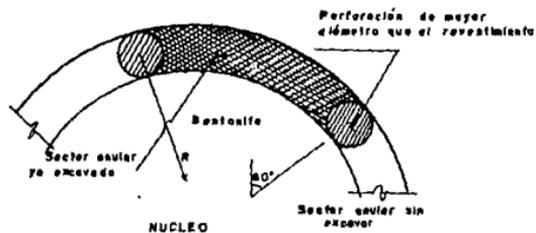


FIG. 3.3 EXCAVACION DE UN SECTOR ANULAR

FIG. 5.4 COLADO DEL SECTOR LIMITADO POR TUBERIAS DE DIAMETRO UN POCO MAYOR QUE EL SECTOR MISMO

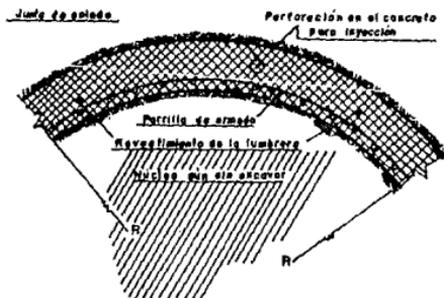
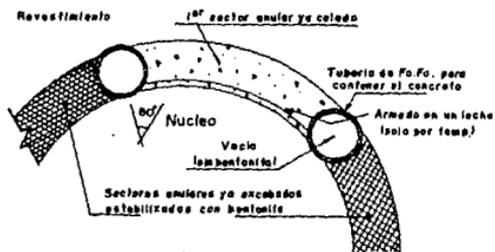


FIG. 3.5 BARRENOS PARA INYECCION DE LECHADA

este nivel (fig. 3.6) se suspende la excavación y se reemplaza el peso del material excavado por un volumen equivalente de agua, para evitar el bufamiento. Posteriormente se continúa con la excavación del núcleo de la lumbrera, extrayendo el material debajo del agua hasta la profundidad deseada.

Inmediatamente después de terminar la excavación, se procede a colar bajo el agua un fondo de concreto a manera de tapón o plantilla y se deja fraguar. Se limpia el azolve, se baja una parrilla de armado y se cuelan un segundo fondo. Una vez hecho esto, se extrae el agua que se encuentra dentro de la lumbrera y se sella el tapón de fondo para evitar la entrada de agua y de material. Después se procede a colar el fondo definitivo de concreto, perfectamente bien anclado a los muros de revestimiento de la lumbrera (fig. 3.7).

### 3.3. Técnica Italiana.

La diferencia en este método radica en lo siguiente :

Antes de comenzar la perforación de los muros de la lumbrera, se procede a marcar sobre el terreno un hexágono circunscribiendo a un círculo, en donde posteriormente se alojarán los muros rectos del revestimiento primario. La excavación de la trinchera inicial se hace siguiendo el trazo del hexágono; primero con perforaciones distribuidas en la periferia y después excavando el material restante con almeja (fig. 3.8). Cada lado del hexágono representa un sector de excavación; se excavan, se baja el armado y se cuelan sucesivamente (fig. 3.9).

Para lograr las juntas de colado, las perforaciones se hacen coincidir con las esquinas del hexágono, en las que se deja una tubería para impedir que el concreto se salga de su lugar y se extrae una vez que el concreto tiene su fraguado inicial (fig. 3.10).

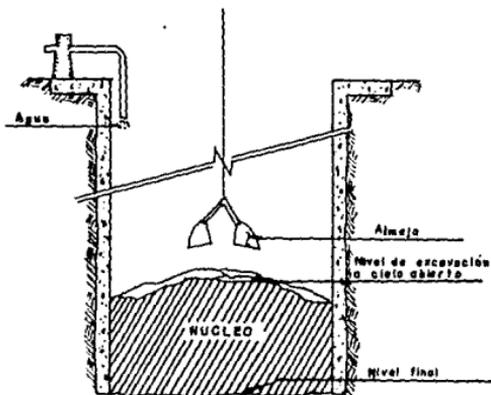
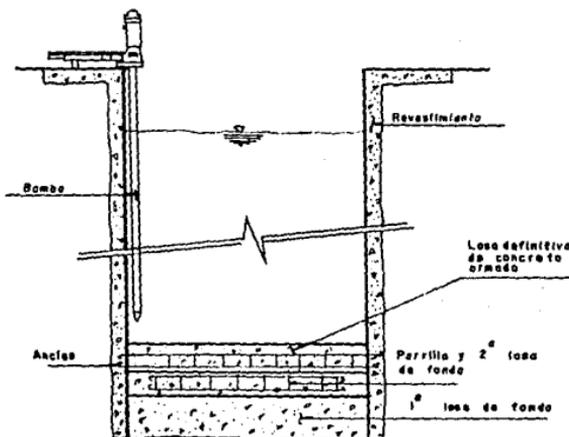


FIG. 3.6 EXCAVACION DEL NUCLEO

FIG. 3.7 COLADO DEL FONDO DEFINITIVO



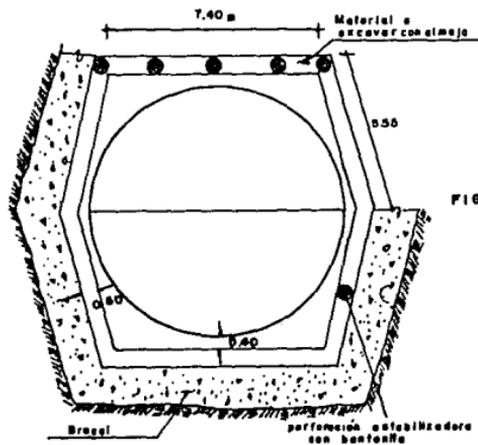


FIG. 3.8 PERFORACIONES SIGUIENDO EL TRAZO DEL HEXAGONO

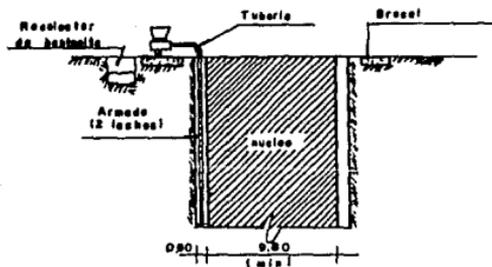


FIG. 3.9 ARMADO Y COLADO DE CADA SECTOR

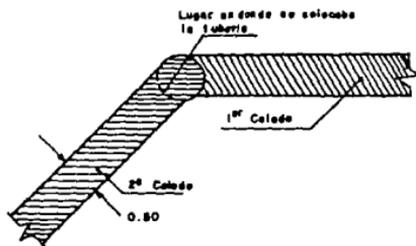


FIG. 3.10 LIMITE DE COLADO MARCADO POR LA TUBERIA COINCIDIENDO CON LAS ESQUINAS DEL EXAGONO

FIG. 3.11 CORONA CIRCULAR Y PRIMER ANILLO

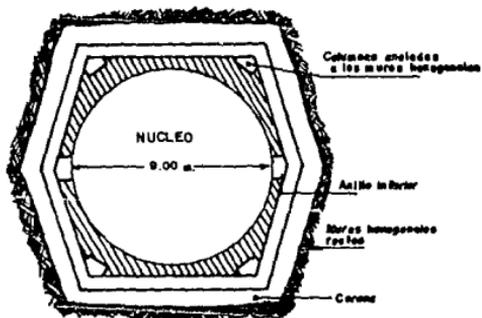
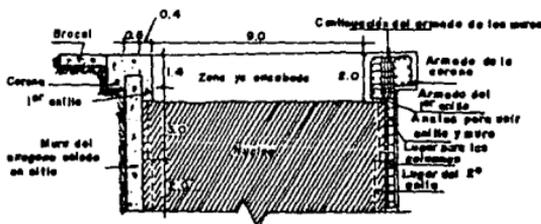


FIG. 3.12 EXVACION DEL RESTO DE LA LUMBRERA, ALTERNANDO ANILLOS Y COLUMNAS

Una vez coladas las paredes del hexágono, se excava una corona circular a base de pico y pala y se cuela monolíticamente junto con el primer anillo del revestimiento secundario. Esto se hace con el fin de dar mayor rigidez a la parte superior de la lumbrera (fig. 3.11).

Después que ha fraguado el concreto de la corona y del anillo, se retira la cimbra y se excava el núcleo por etapas. Primero se excava hasta una cierta profundidad y en las esquinas de las paredes del hexágono se cuelan unas pequeñas columnas cuyo armado se ancla al de las paredes del revestimiento. Las funciones de estas columnas son disminuir las filtraciones, separar los anillos y dar mayor rigidez a la estructura (fig. 3.12). El procedimiento anterior se repite alternando anillos y columnas hasta la profundidad de proyecto. Posteriormente, si hay agua en el interior de la lumbrera, se extrae bombeándola, se baja el armado de la losa de fondo, se ancla y se cuela.

### **3.4. Técnica Nacional.**

En este caso los muros de la lumbrera se excavan con almeja en pequeños tableros, cuyo ancho lo marca la abertura de la misma, formando un polígono de lados iguales (fig. 3.13). Los tableros que coinciden con los ejes X y Y, llevan armado a manera de columnas (fig. 3.14 a y b); los demás tableros son de concreto simple.

El procedimiento tiene la siguiente secuencia :

1. Excavación, armado y colado del tablero # 1, manteniendo llena de lodo bentonítico la excavación (fig. 3.13).
2. Excavación, armado y colado del tablero # 2.
3. Excavación del tablero # 2.
4. Excavación del tablero # 4.

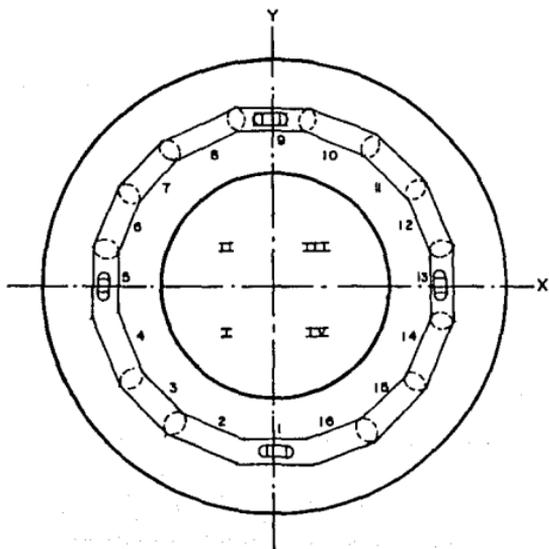


FIG. 3.13 POLIGONO DE LADOS IGUALES

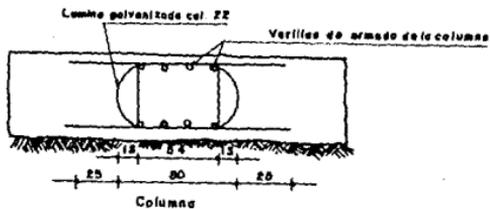


FIG. 3.140 ARMADO DE LOS SECTORES A MANERA DE COLUMNAS.

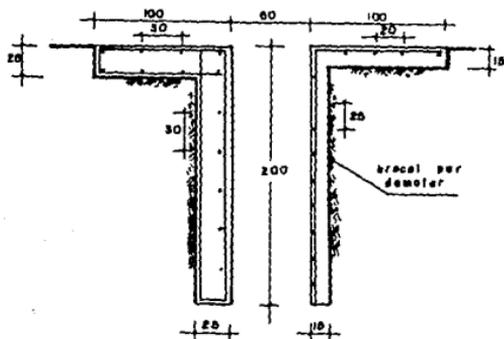


FIG. 3.145 CORTE DE LOS SECTORES ANULARES

5. Excavación del tablero # 3.
6. Colado de los tableros Nos. 2, 3 y 4.

Esta misma secuencia se sigue para los tres cuadrantes restantes.

### **3.5. Lumbreras Flotadas.**

Este tipo de construcciones se han utilizado para profundidades de 35 m., con secciones circulares. Las etapas del procedimiento son las siguientes:

1. Se construye un brocal de concreto que consta de dos coronas, entre éstas se hacen perforaciones distribuidas simétricamente - hasta la profundidad de proyecto de la lumbrera, formando un polígono (fig. 3.15 a y b). El brocal interior tiene como función marcar perfectamente bien los linderos del revestimiento y evitar desprendimiento del terreno.
2. Teniendo como guía el brocal, se excava el material que queda entre una perforación y otra, mediante un cucharón de almeja - y reemplazando siempre el material excavado con lodo bentonítico (fig. 3.16 a).
3. Se prosigue a la demolición de la corona interior del brocal y a la excavación del núcleo de la lumbrera con cucharón de almeja manteniendo la perforación llena de lodo bentonítico, que - continuamente está recirculando con un control muy riguroso de densidad. Durante esta etapa el lodo es una mezcla del material de excavación, bentonita y agua, mientras que durante la - excavación de la trinchera se utiliza bentonita pura.
4. Terminada la excavación, sobre la superficie del lodo se coloca un tanque metálico invertido, que se liga al brocal mediante --- viguetas de acero. Sobre el tanque se cuela la losa de fondo de la lumbrera y el primer tramo de la pared (fig. 3.16 b).

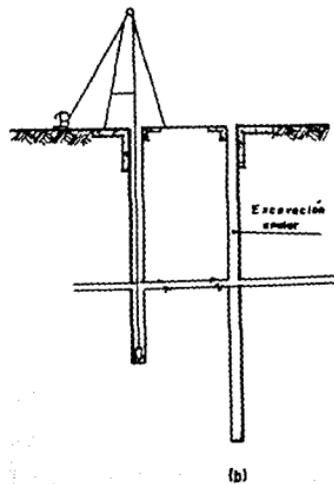
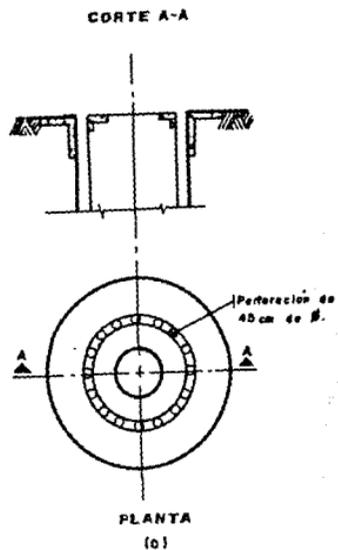


Fig. 3.16 LUMBRERAS FLOTADAS — PERFORACIONES  
DISTRIBUIDAS SIMETRICAMENTE

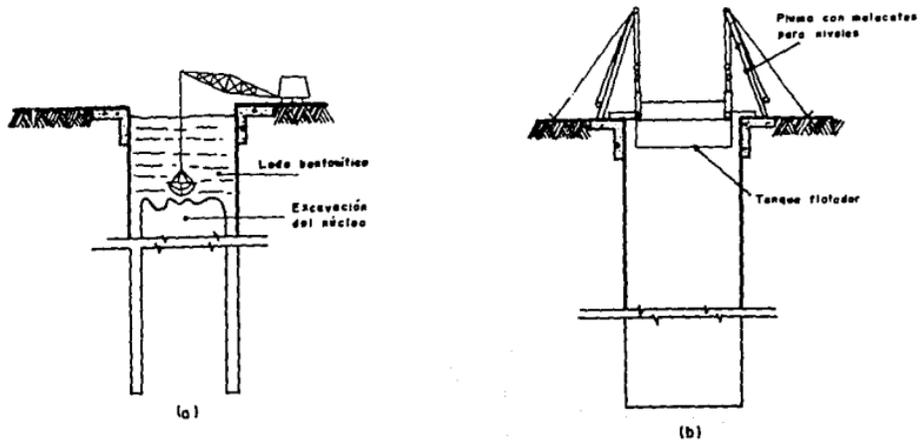


FIG. 3.16 EXCAVACION DEL NUCLEO Y COLADO DE LOSA DE FONDO Y EL PRIMER TRAMO DE LA PARED DEL TANQUE METALICO

5. Después de decimbrar el primer tramo de colado, se inyecta aire al tanque para desplazar el lodo que se encuentra dentro del mismo y permitir que suba hasta anular la carga transmitida por éste a las viguetas metálicas, que son entonces retiradas. El tanque queda así flotando sobre el lodo bentonítico y, mediante válvulas que permiten el escape controlado de aire, puede hacerse descender hasta que ciertas muescas que se dejaron en las paredes precoladas de la lumbrera estén en posición para apoyarse de nuevo en las viguetas. Se cuela otro tramo y se hace descender el tanque sucesivamente hasta llegar a la profundidad de proyecto.

Durante el descenso de la lumbrera, la bentonita desplazada sale por la holgura existente entre la pared de la excavación y el paño exterior del revestimiento y es recolectada por medio de canaletas construidas en el brocal.

Además, durante éste proceso, cuatro malacates colocados en el brocal a  $90^\circ$  entre sí (fig. 3.17 a), permiten equilibrar cualquier tendencia a volteo originada por la flotación. Cuando el empuje de flotación es mayor que el peso de la estructura.

6. Cuando ya se ha alcanzado la profundidad de proyecto, la lumbrera se liga al brocal mediante traveses de concreto. El lodo bentonítico que queda en el tanque metálico y en el espacio anular entre excavación y lumbrera, se sustituye por suelo-cemento de resistencia ligeramente superior a la del suelo original (fig. 3.17b).

### 3.6. Lumbreras Hincadas.

En este procedimiento, al igual que en el de flotación, el colado de los muros de la lumbrera se hace en superficie; la diferencia entre uno y otro radica en el método para hacer llegar los tramos precolados hasta la profundidad requerida. En suelos granulares saturados y en limos suaves, las lumbreras se pueden hincar en el terreno con el auxilio de unas cuchillas en la base de los muros, mientras que el material del interior es removido constantemente.

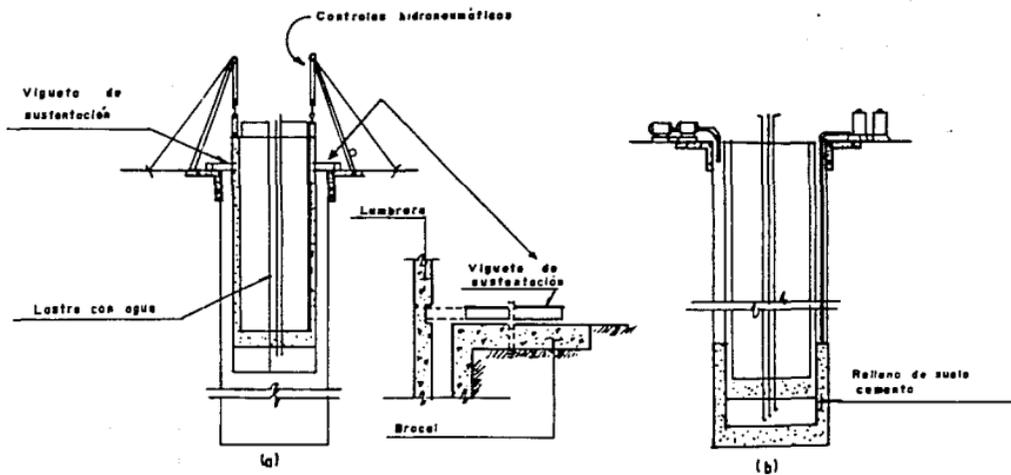


FIG. 3.17 DESCENSO DEL TANQUE HASTA SU POSICION FINAL

Si la lumbrera se tiene que hincar a una profundidad considerable, el hincado debe combinarse con el uso de aire comprimido, con el fin de permitir una remoción más precisa del suelo y de los posibles obstáculos bajo las cuchillas. Esto se puede realizar de dos formas :

- Mediante la construcción de una cámara de trabajo bajo el fondo permanente de la lumbrera con el único propósito de servir para el hincado de ésta, mientras que encima se van construyendo gradualmente los muros impermeables permanentes.
- Mediante la separación de la parte inferior de la lumbrera del resto de la misma por medio de una mampara, con el fin de formar una cámara de trabajo cuando la lumbrera se ha hincado hasta su profundidad final y se ha colocado una plantilla impermeable, y de esta manera poder continuar con la construcción de las conexiones con el túnel.

### **3.7. Lumbreras ademadas con dovelas.**

La idea fundamental de esta técnica es el aprovechamiento de las mismas dovelas que se utilizan como revestimiento primario del túnel, para el ademe de las lumbreras. Este método puede ser utilizado hasta grandes profundidades, incrementando el espesor de revestimiento, de ser necesario, para resistir mayores presiones. Una gran ventaja de este tipo de revestimiento sobre el concreto colado in situ es que en suelos húmedos y difíciles puede irse colando con un mínimo de excavación y el anillo desarrolla completamente su resistencia a la compresión tan pronto como todos sus segmentos están en su lugar. Se ha aplicado en arcillas y limos donde no se presenta falla de fondo.

A diferencia de los anillos en los túneles, no se requiere necesariamente el uso de un juego especial de dovelas de cierre y las dimensiones de la sección transversal de la lumbrera pueden ajustarse a las necesidades, modificando la unión de las aristas de las dovelas, cuando éstas son metálicas.

El procedimiento para su construcción es el siguiente :

1. Localizados y trazados el eje y el radio de la lumbrera, se excava a mano para proceder a armar y colar el brocal de una pieza.
2. De la base del brocal en adelante se excava con martillo neumático, de una de las dos formas siguientes :
  - Si el suelo está seco y firme, puede excavar toda el área de la lumbrera en la profundidad de un anillo, posiblemente requiriendo además un poco las paredes e inmediatamente después montarse el anillo de dovelas.
  - Si el suelo está suelto o saturado, particularmente en suelos granulares, no es conveniente excavar grandes áreas a un tiempo, por lo tanto, mediante la excavación local de un pequeño cajón, cada segmento puede colocarse sucesivamente en su lugar y anclarse, mientras que el núcleo de la lumbrera, aún sin excavar, lo sostiene en su lugar. Cuando se ha completado el anillo se excava el material que queda en el centro (fig. 3.18).
3. Al mismo tiempo que se coloca cada anillo, se van anclando al terreno. Es importante asegurarse de que el peso del anillo terminado, este soportando adecuadamente a fin de que no pueda deslizarse hacia abajo. Se repite el mismo procedimiento para la colocación de cada anillo, hasta alcanzar la profundidad de proyecto y cada tres anillos se coloca un tapón en el fondo para proceder a la inyección de la lechada de cemento y acelerante, no solamente para sellar contra la humedad, sino también para rellenar cualquier cavidad existente entre las dovelas y el terreno y prevenir el asentamiento de éste último y un desequilibrio de presiones en el anillo.

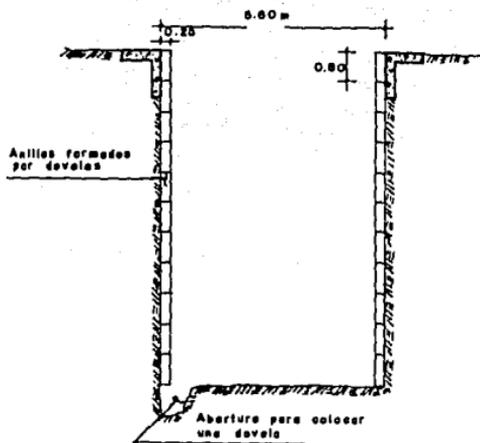


FIG. 3.16 : LUMBRERA ADEMADA CON DOVELA

### **3.8. Lumbreras con aire comprimido.**

Este procedimiento se utiliza en suelos que plantean problemas de falla de fondo.

Una vez conocida la presión necesaria para que no se presente la falla de fondo al excavar, se procede a instalar un banco de compresores de baja presión, para que al tener instalada una mampara (fig. 3.19), así como las esclusas para personal y rezaga, pueda inyectarse el aire.

A través de la esclusa de personal se presuriza al mismo para poder ingresar a sus labores dentro de la lumbrera. Al terminar su jornada de trabajo se despresuriza en forma escalonada, de acuerdo al tiempo y presión a que estuvo expuesto. Este personal básicamente realiza en esta etapa las labores de excavación, ademe y rezaga. La rezaga se extrae a superficie con auxilio de un malacate a través de la esclusa para tal fin; en ella, la compresión y descompresión es repentina, ya que no pasa personal en ningún momento, solo botes de rezaga.

Una vez que se llega a la profundidad de proyecto, se cuela una losa de concreto reforzado para posteriormente realizar el revestimiento definitivo de la lumbrera, que normalmente se hace con auxilio de una cimbra deslizante, para lo cual se retira previamente las instalaciones de aire comprimido y esclusas que sirvieron para la fase de excavación.

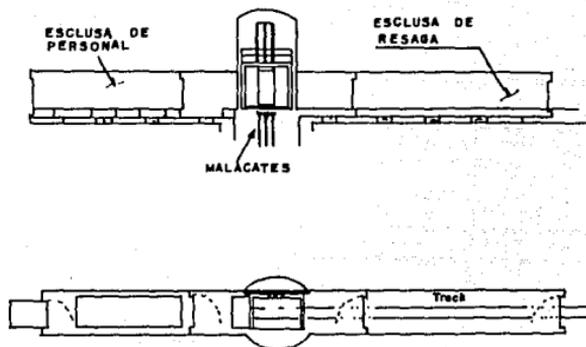


FIG. 3.19 LUMBRERA CON AIRE COMPRIMIDO

# Capítulo 4

#### **4. METODOS MAS RELEVANTES PARA LA CONSTRUCCION DE TUNELES MEDIANTE EL USO DE ESCUDOS DE PERFORACION.**

##### **4.1. Características principales.**

El gran desarrollo tecnológico del cual han sido objeto las máquinas perforadoras de túneles (MPT), ha tenido como consecuencia la creación de muy diversos equipos de perforación, más sin embargo, todas estas máquinas perforadoras trabajan bajo los mismos principios, las MPT, están constituidas básicamente por una coraza metálica, que es el soporte móvil que provee las áreas de trabajo seguras para la excavación del frente del túnel y generalmente están compuestas por tres partes principales.

1. PARTE FRONTAL O VISERA.
2. CUERPO
3. FALDON

Es en la visera en donde se realizan las actividades de excavación del frente y en la mayor parte de los casos alojan la maquinaria y al personal con el que se realiza dicha actividad. El cuerpo aloja todo el equipo hidráulico propio para el movimiento del escudo, además de servir de apoyo para la instalación del equipo con el que se ejecuta la excavación del frente y colocación del revestimiento. En el faldón se coloca el revestimiento del túnel en forma continua a medida que el escudo avanza, para esto el escudo se apoya en el revestimiento recién colocado empujándose a través de un sistema de gatos hidráulicos los cuales al desarrollo de toda su carrera dejan espacio para la colocación del revestimiento.

Las actividades fundamentales que se realizan en la excavación de túneles son las siguientes :

- a) Excavación del frente.
- b) Rezaga y transporte del material de excavación.
- c) Colocación del revestimiento.
- d) Manteo o eliminación del material excavado.

Sin embargo, dependiendo del grado de mecanización de los escudos, dichas actividades pueden ejecutarse en forma simultánea.

En un consenso general existen dos grandes grupos de escudos, en función a la forma de ataque del frente de excavación :

- Escudos de frente abierto.
- Escudos de frente cerrado.

#### ESCUDOS DE FRENTA ABIERTO :

- Escudo manual.
- Escudo con rejilla de frente.
- Escudo con cabeza cortadora oscilante.
- Escudo excavador.
- Escudo con cabeza cortadora giratoria.

#### ESCUDOS DE FRENTA CERRADO :

- Con cabeza cortadora giratoria.
- Con mampara de presión.
- Con frente presurizado por lodos.
- Con presión de tierra balanceada.

## 4.2. Excavación de túneles mediante el método Austriaco.

Este método de excavación es uno de los más simples, el escudo cuenta con gatos frontales y plataformas accionadas hidráulicamente para ademar el frente. Su uso está restringido al rango de suelos blandos o poco compactos, puesto que la eficiencia en el avance de la excavación, disminuye conforme se incrementa la compacidad del suelo. el ciclo de operación de este escudo se divide principalmente en cuatro fases.

1. Excavación de la sección.
2. Extracción de la rezaga.
3. Colocación del ademe provisional.
4. Colocación del revestimiento definitivo.

La excavación se inicia en la sección superior del frente de ataque, siguiendo la secuencia indicada en la figura 4.1. El ataque va formando un banqueo - cuya longitud máxima de avance es de 2.4 m., la excavación del frente se hace en forma vertical utilizando maquinaria o en forma manual.

Conforme se va atacando al frente de excavación, el material de rezaga se transporta por medio de vagonetas montadas en trucks para vía y son acarreadas por una locomotora hasta la lumbrera en donde se procede a extraer la rezaga hasta la superficie, mediante una draga o malacate. Una vez descubiertas las paredes del túnel y extraída la rezaga, se procede a colocar una primera capa de concreto lanzado de 3 cm. de espesor y en seguida se coloca una segunda malla de acero, con una preparación de traslape con la malla de sección inferior, finalmente se lanza una tercera capa de concreto de 3 cm. de espesor (fig. 4.2).

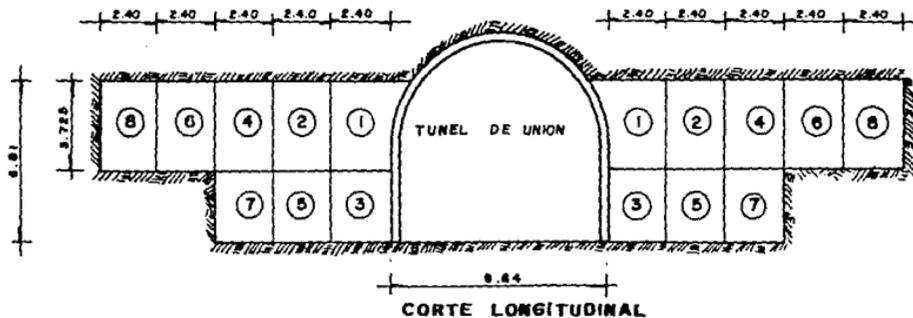
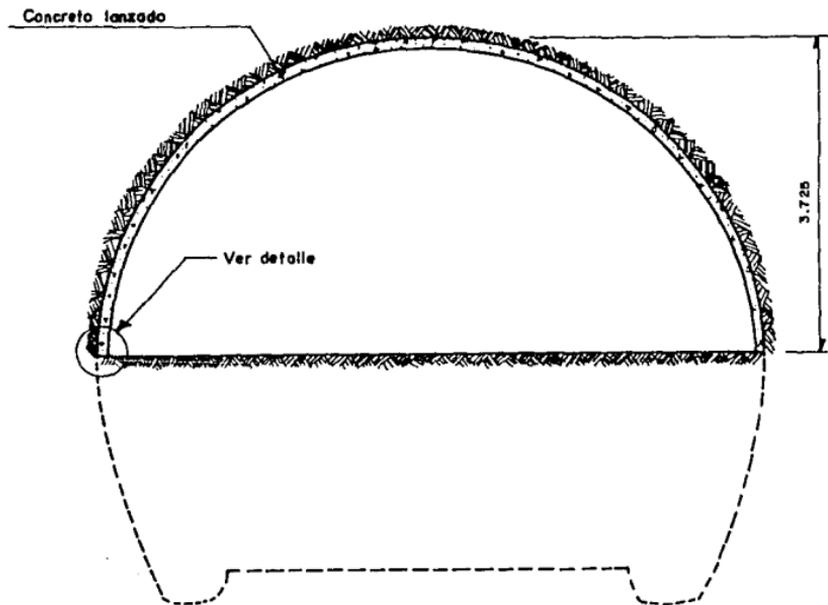
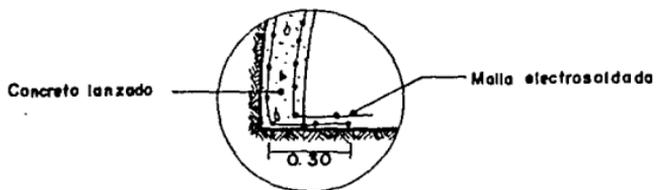


FIG. 41 ETAPAS DE EXCAVACION



CORTE TRANSVERSAL

Excavación de sección superior y colocación de ademe provisional.



DETALLE

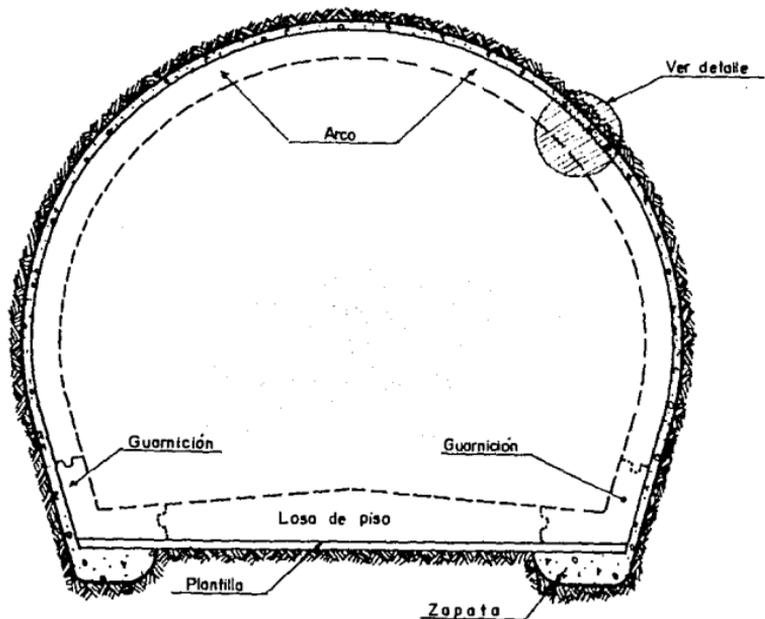
FIG. 42 REVESTIMIENTO PRIMARIO

A continuación se excava la parte inferior del túnel incluyendo las zanjas para las zapatas en una longitud máxima de 2.4 m. y se coloca la primera capa de concreto lanzado de 3 cm. de espesor, incluyendo en las zanjas para las zapatas. Se coloca la primera malla de acero, ligándola a la malla de la sección superior y formando también el armado de la zapata correspondiente. Se coloca la segunda capa de concreto lanzado de 9 cm. de espesor y en seguida la segunda malla de acero, con la que se cierra el armado del ademe provisional y se procede a colocar la tercer y última capa de concreto lanzado de 3 cm. de espesor, terminando así el colado de las zapatas. Una vez realizado lo anterior, se procede a colar una plantilla de 10 cm. de espesor a base de concreto simple. Una vez ademadas las paredes del túnel, se inicia el colado de la guarnición del túnel y se procede a colar el resto del arco. El recubrimiento definitivo del túnel se lleva 20 m. atrás del frente de ataque, el colado de la losa de piso se realiza hasta el último, con objeto de no interferir con el sistema de transporte del material de rezaga (fig. 4.3).

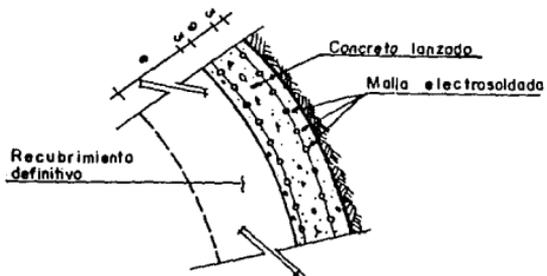
#### **4.3. Escudo de frente abierto y aire comprimido.**

En suelos blandos, la estabilidad del frente no es fácil obtenerla por el simple hecho de que excavar y soportar el frente para estabilizar son actividades antagónicas, es decir, se requiere liberar del soporte al frente para que éste pueda ser excavado y tal liberación puede producir inestabilidad (fig. 4.4).

Para resolver este problema se han desarrollado métodos que estabilizan el frente sin estorbar las labores de excavación, esto se logra con el uso de aire comprimido, en combinación con escudos de frente abierto que a manera de fuerza invisible sostiene el frente, permitiendo su excavación (fig. 4.5).



CORTE TRANSVERSAL



DETALLE

FIG. 4.3 REVESTIMIENTO DEFINITIVO



La teoría de este método es muy simple. Al túnel se le adiciona aire comprimido a una presión mayor que la atmosférica que actúa en las paredes y el frente, ayudando así a mejorar la estabilidad, evitando y disminuyendo las filtraciones hacia la excavación. La presión a la cual el aire debe ser entregado en el túnel y sostenida en éste, es función de la carga hidrostática, las características del terreno y el tamaño del túnel. Si el terreno se cierra y tiene alguna cohesión, la presión utilizada para conservar el túnel seco debe ser aproximadamente igual a la carga de agua sobre la plantilla del túnel, si el terreno tiene grietas, esta presión no puede usarse generalmente, pues se tiene el peligro de romper el terreno y causar una salida. Usualmente en este caso, la presión empleada, equilibra a la carga de agua, tanto en la clave como en el nivel medio del túnel, consecuentemente la parte inferior del túnel no puede conservarse seca con presión de aire (fig. 4.6).

En suelos blandos con poca o ninguna cohesión, a través del cual el escudo puede manejarse fácilmente, la presión del aire puede ser menor que la carga hidrostática mientras no se lleve a cabo ningún trabajo adelante del escudo, si es necesario trabajar al frente del escudo la presión se aproximará a las presiones del agua y del terreno.

### **Equipo necesario.**

La aplicación del aire comprimido contempla el uso de los siguientes elementos básicos adicionales a los normalmente utilizados en la excavación con escudos de frente abierto (fig. 4.7).

Un mamparo estanco (tapón que limita la zona presurizada del túnel en construcción); una esclusa de personal, adosada al mamparo que permite la entrada y salida de los trabajadores al área presurizada sin dejar que la presión del aire se baje; una esclusa de rezaga, también adosada al mamparo por la cual se extrae el material excavado y se introducen los materiales necesarios para la excavación y estabilización de las paredes; una planta

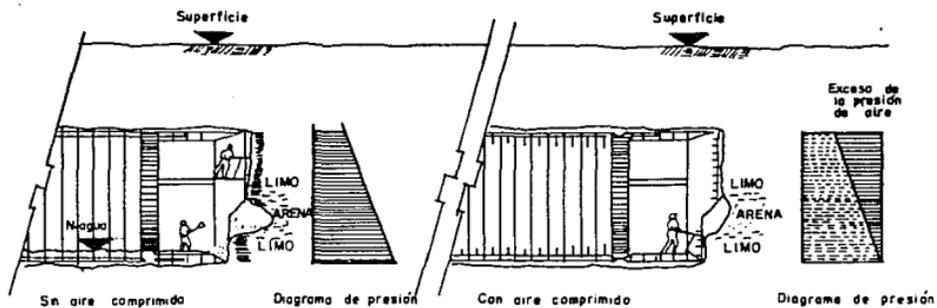


FIG. 4.8 EFECTO DEL AIRE COMPRIMIDO EN EL FRENTE DE EXCAVACION

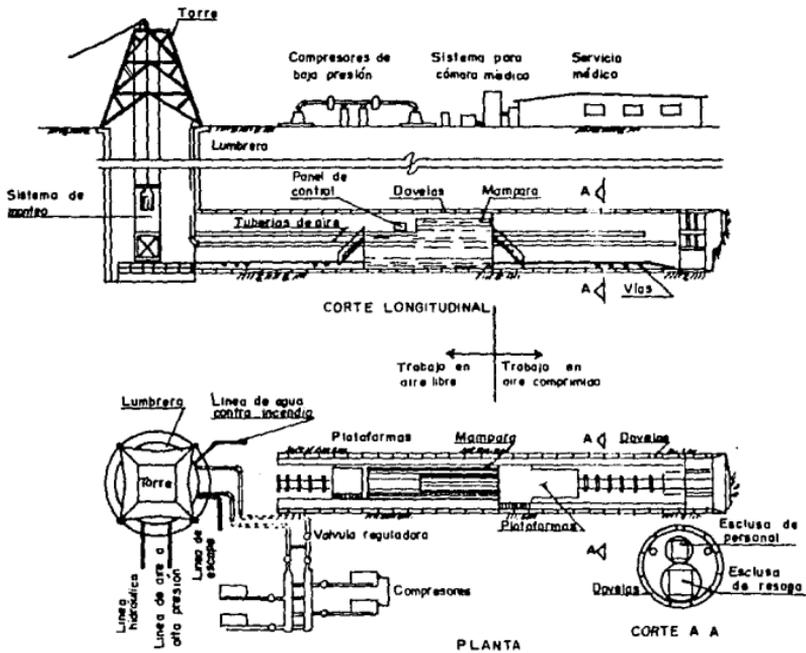


FIG. 4.7 ELEMENTOS REQUERIDOS PARA EL TUNEL CON AIRE COMPRIMIDO.

generadora de aire comprimido respirable, en cantidades suficientes para cumplir con las necesidades biológicas de los trabajadores y a la presión necesaria para mantener estable la excavación; una cámara hiperbárica para dar atención a los trabajadores que hayan sufrido algún accidente dentro del túnel, así como todas las instalaciones necesarias para dar servicio médico a todo el personal durante el desarrollo de la obra.

#### **4.4. Escudo de frente presurizado.**

La excavación de túneles en suelos blandos y bajo el nivel freático, se puede llevar a cabo mediante el uso de aire comprimido como se mencionó en el inciso anterior, mas sin embargo el uso de aire comprimido produce efectos adversos a la salud de los trabajadores, es así como surge una nueva alternativa para la estabilización del terreno, mediante el uso del escudo de frente presurizado el cual estabiliza el frente a base de lodos a presión. Las metas fundamentales que se persiguen al utilizar este escudo son las siguientes :

- a) Contar con la capacidad de excavación en suelos inestables.
- b) La no alteración de la posición del nivel freático.
- c) Realización de los trabajos a presión atmosférica.
- d) Evitar al mínimo los asentamientos en la superficie.

#### **Descripción del sistema.**

El escudo cuenta con los siguientes elementos :

Cámara de presión, mediante esta cámara se lleva a cabo la estabilización del frente por medio de la inyección de lodos a presión; un disco cortador al frente de la cámara de presión, que al girar excava el suelo; un sistema de agitación en el cual se lleva a cabo el mezclado de los lodos y el suelo excavado; un sistema de bombeo, que extrae la mezcla suelo-lodo de la cámara de presión y la envía a la superficie para su posterior eliminación.

## Descripción de la máquina excavadora.

La máquina esta integrada por :

- Escudo
- Equipo auxillar
- Sistema de lodos
- Sistema de control

**ESCUDO.** Es la parte de la máquina que permite realizar la excavación -  
manteniendo la estabilidad de las paredes y en el frente de ataque (fig. 4.8).  
El escudo es mecanizado para excavar automáticamente el frente de trabajo y  
cuenta con los siguientes elementos :

- a) **Camisa.** Su finalidad es soportar las paredes de la excavación,  
mientras se coloca el revestimiento primario.
  
- b) **Cortador.** Es un disco que girar en ambos sentidos sobre su -  
eje y a diferentes velocidades, tiene un sistema de cuchillas -  
colocadas diametralmente con las cuales corta el material en el -  
frente del túnel. Las ranuras del cortador están provistas de -  
compuertas, que tiene la finalidad de regular la entrada del -  
material excavado, de acuerdo a la velocidad de avance del -  
escudo. Estas compuertas evitan el flujo incontrolado de material  
a través de las ranuras del cortador lo cual podría ocasionar el  
colapso en el frente. La cara interior del cortador está provista  
de paletas mezcladoras. Otro tipo de escudos utilizan una -  
estrella de 6 ó 7 picos con dientes en sus bordes, que sobresalen  
del resto de la cara frontal, dejando así ranuras perimetrales por  
las que entra el material. Con ello teóricamente se reduce la -  
fricción contra el terreno al momento del corte.

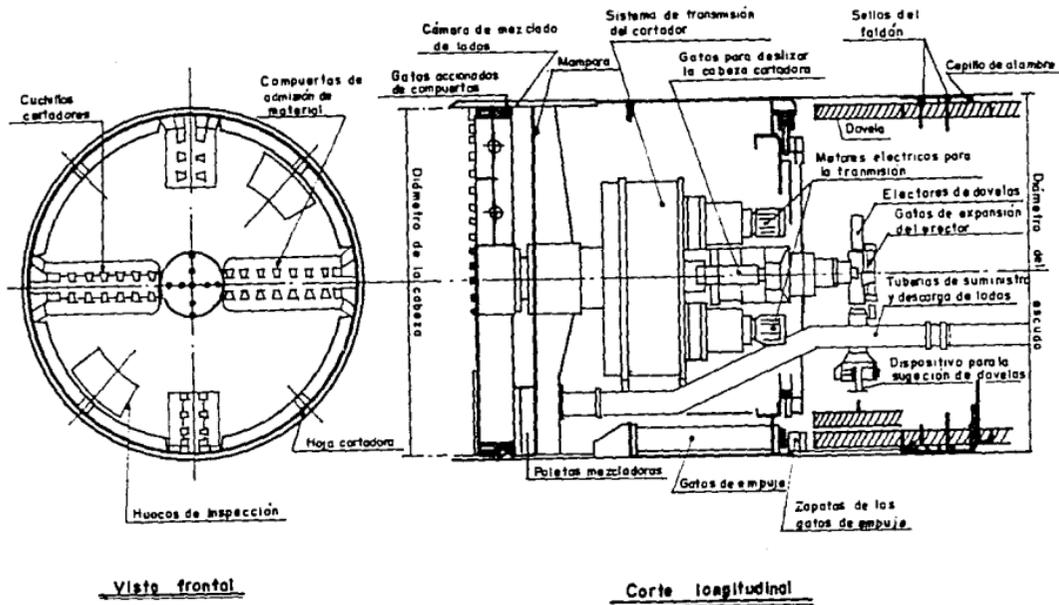


FIG. 4.8 ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESUARIZADO

El cortador está conectado a una flecha central que es accionada por un sistema de engranes que permite que la flecha y el cortador deslicen al mismo tiempo que giran. Su mecanismo de empuje está constituido de gatos hidráulicos (fig. 4.9).

- c) **Anillo Erector.** A diferencia de los escudos de frente abierto, los escudos con frente de lodo no tienen del todo libre el espacio interior del faldón, debido al paso de las tuberías de suministro y descarga de lodos y de las instalaciones eléctricas, es por esta razón que se ha sustituido el brazo erector, por un anillo para el montaje de las dovelas, el cual tiene la posibilidad de deslizarse longitudinalmente, girar, acoplarse a la dovela y colocarla en su posición final.

#### **EQUIPO AUXILIAR.**

1. **Tren de Equipo.** El tren de equipo es arrastrado por el escudo y está integrado por: La cabina del operador, unidades hidráulicas, compresor, sistema neumático, gabinete de equipo eléctrico, gabinete transmisor, bomba de descarga, transformador, carro para cables y tubería telescópica (fig. 4.10).
2. **Instalaciones.** Además del sistema básico integrado por el escudo cortador, el tren de equipo y sistema de control son necesarias otras instalaciones y equipos auxiliares para completar la realización del túnel, entre los que se pueden mencionar las que se encuentran en la lumbrera y las que tienen en superficie, tales como: Planta de inyección para el mezclado del mortero inyectado entre dovelas y terreno, almacenador de lodos o vertedor; una grúa pórtico de suficiente capacidad, instalada sobre la lumbrera para el suministro de materiales usados en la construcción del túnel; una grúa con almeja y camiones de volteo

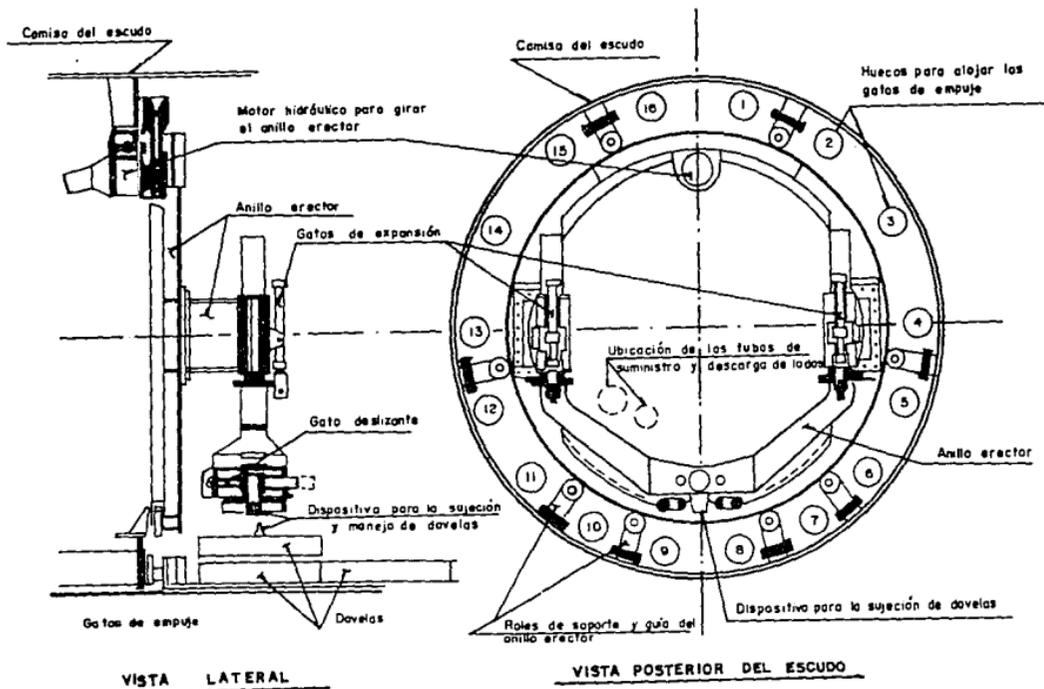


FIG. 4.9 ANILLO ERECTOR Y DISTRIBUCION DE LOS GATOS DE EMPUJE

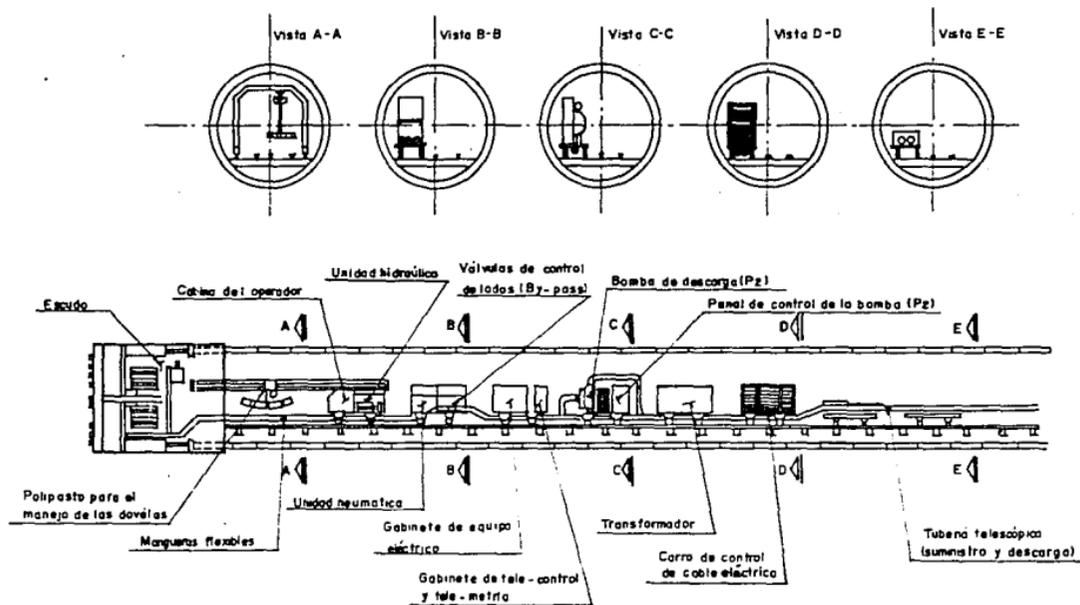


FIG. 4.10 TREN DE EQUIPO

para el retiro del material sólido, y el suministro constante de agua que permita ajustar la operación de recirculación de lodo. Es importante también mencionar las subestaciones eléctricas que suministran la energía para los diferentes equipos.

3. **Sistema de Lodos** . Tiene el doble propósito de soportar el frente de la excavación, al mismo tiempo que remueve el material cortado por medio de bombas centrífugas. Para evitar que el frente se despresurice por la extracción del material, constantemente se añade un fluido delgado, formado principalmente por agua, a la que se le añade bentonita o únicamente el propio material de excavación. En otros sistemas similares, se utiliza adicionalmente un colchón de aire comprimido que ayuda a conservar la presión del fluido en el frente dentro del rango especificado.
4. **Sistema de Control** . Tiene como principal finalidad suministrar información confiable mediante la cual se confirma que el volumen excavado coincide con el volumen teórico de avance de la máquina. Además, coordina todas las operaciones del sistema en forma automática o semi-automática, según se requiera.

## **Ciclo de Operación.**

### **Trabajos previos a la excavación.**

Para dar inicio a la excavación del túnel, es necesario llevar a cabo el tratamiento del suelo en la periferia de las lumbreras, tanto en la llegada como a la salida del escudo en cada una de las lumbreras; este tratamiento pretende dar un aumento a la resistencia del suelo con el fin de evitar que el material excavado fluya hacia el interior de la lumbrera.

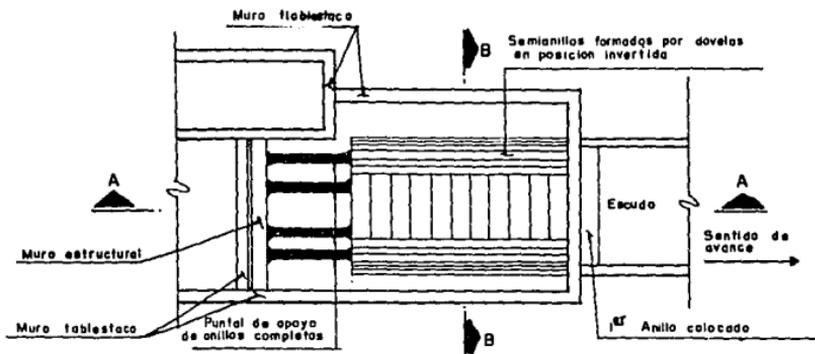
Con el propósito de facilitar el desplazamiento del escudo durante el empuje de los gatos, se construye una estructura de apoyo del escudo (cuna), que le da continuidad entre el túnel y la lumbrera (fig. 4.11).

Para dar inicio a la perforación del túnel el escudo se apoya en una estructura de atraque formada por semi-anillos de concreto armado colados en posición invertida, los cuales a su vez se apoyan sobre el muro estructural correspondiente; este conjunto constituye la estructura de atraque que transmite el empuje de los gatos al muro tablaestaca opuesto al frente de ataque del escudo.

Una vez demolido el muro de la lumbrera se da inicio a la excavación del túnel, en la que gran parte del escudo quedará fuera del túnel; con objeto de evitar que el lodo del frente fluya, por la parte externa del escudo hacia la lumbrera es necesario colocar un sello de salida constituido por un conjunto de anillos metálicos que permiten el paso del escudo.

### **Inicio de la excavación.**

La excavación se inicia demoliendo con martillos neumáticos la pared de la lumbrera hasta llegar a tener contacto con el suelo inyectado dejando un hueco mayor que el diámetro del escudo; simultáneamente a la operación de demolición, en la parte trasera del escudo se colocan las dovelas de atraque para formar el primer apoyo. Al terminar ambas operaciones se inicia el avance del escudo, el empuje de los gatos reaccionan sobre los anillos de dovelas de atraque, comenzando el deslizamiento del escudo sobre la cuna e introduciéndose en el suelo excavado a mano, en este momento el sello de hule se deforma sobre la camisa del escudo en todo su perímetro. Cuando la cabeza cortadora del escudo hace contacto con el terreno inyectado, el avance se detiene para proceder a presurizar la cámara con lodo estabilizador. Es importante mencionar que al constituir el sello de salida se coloca una válvula en la parte superior del anillo metálico, que libera el aire atrapado al momento de iniciar la presurización con lodo de la cámara frontal del escudo, como se muestra en la fig. 4.12.



### PLANTA DE LUMBRERA

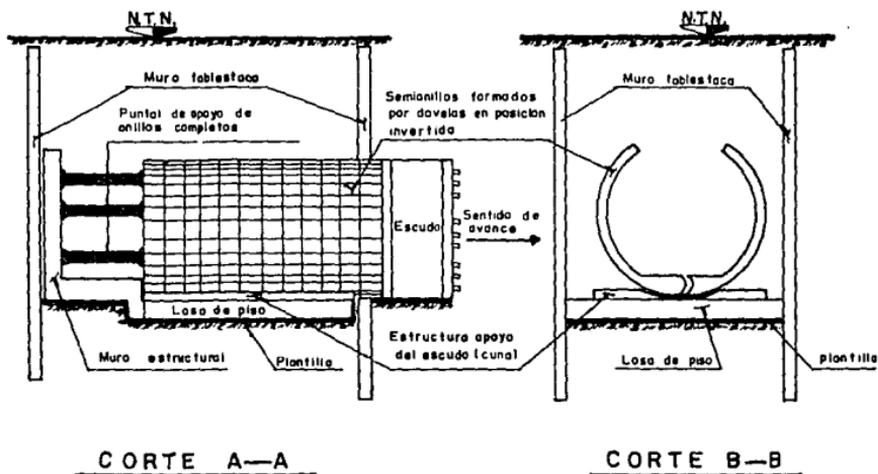


FIG. 4.11 APOYO DEL ESCUDO

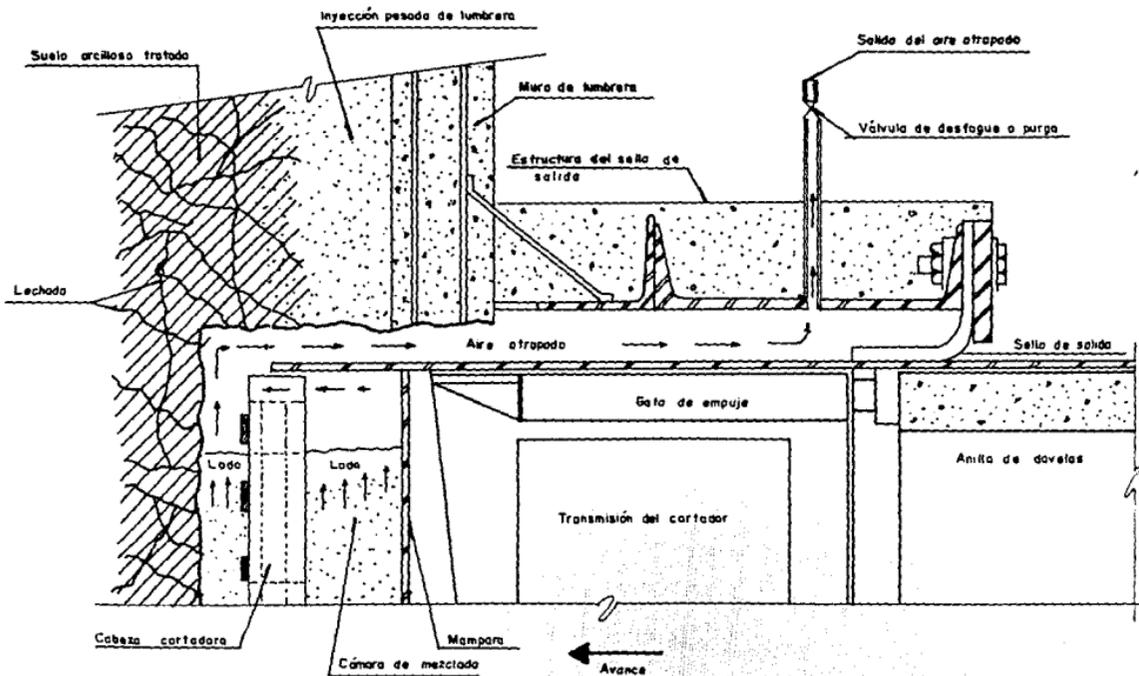


FIG. 4.12 PRESUARIZACIÓN DE LA CAMARA DE MEZCLADO AL INICIO DE LA EXCAVACION.

Cuando el lodo haya alcanzado la presión para estabilizar el frente se inicia la excavación del túnel, comenzando a girar el cortador del escudo con las ranuras abiertas, y a extenderse los gatos de empuje, originando el movimiento del escudo hacia el frente. El suelo excavado pasa a la cámara de mezclado en donde se incorpora a la recirculación del lodo estabilizador mediante la ayuda de los agitadores y la paletas colocadas en la parte posterior de la cabeza cortadora logrando enviar así el material excavado a la superficie por medio de tuberías (fig. 4.13.).

Cuando los gatos de empuje se han extendido totalmente, el movimiento del cortador se detiene y se cierran las compuertas de las ranuras para evitar que el material del frente fluya hacia la cámara de mezclado. La recirculación de lodos a través del frente se mantiene hasta que la densidad del lodo de descarga sea igual a la del lodo de suministro; esto garantiza que ha sido desalojado de la cámara de mezclado todo el material producto de la excavación. Posteriormente, con ayuda del anillo erector se procede a colocar un nuevo anillo de dovelas, retrayendo los gatos de empuje para dejar el espacio necesario y facilitar la operación, convirtiéndose este anillo en el nuevo apoyo del escudo; conforme el escudo va penetrando en el terreno, el espacio que deja atrás, se aprovecha para ir colocando en su posición la cabina del operador y todos los demás carros del tren de equipo, a medida que el espacio aumenta. Esto ocurre durante los primeros cincuenta metros de excavación, en los cuales se tienen que realizar una serie de maniobras para unir el escudo con su tren de equipo; todo lo anterior hace que el avance no sea continuo, interrumpiéndose al momento de introducir al túnel cada uno de los componentes del tren.

Al terminar las labores correspondientes a los primeros cincuenta metros de excavación, se procede a ejecutar de manera cíclica todas las actividades correspondientes a la excavación y construcción de los metros subsecuentes.

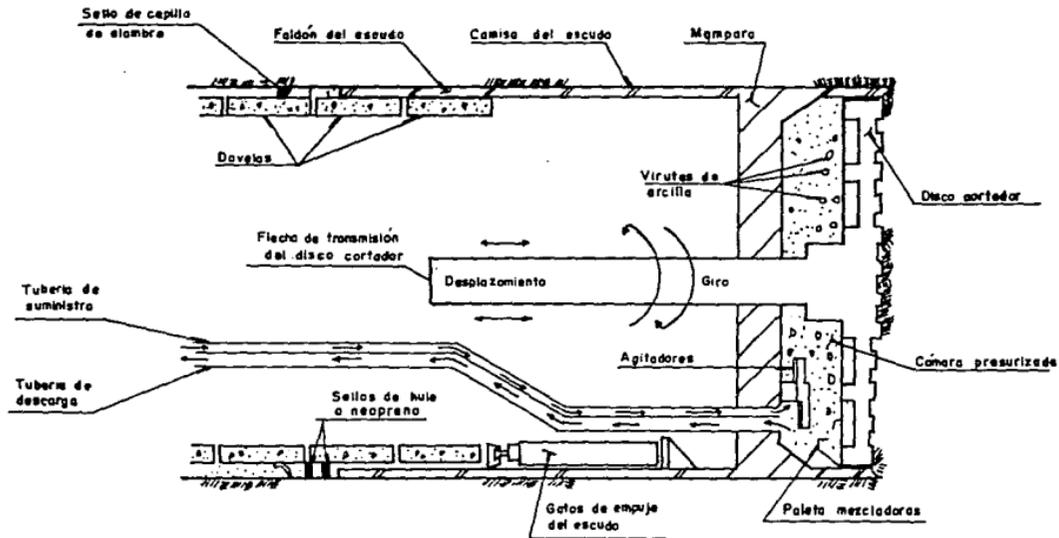


FIG. 4.13 EXTRACCION DEL MATERIAL EXCAVADO

## **Ciclo de trabajo.**

### **1. EXCAVACION, EMPUJE E INYECCION, SIMULTANEAMENTE.**

Una vez establecida la recirculación de lodo a través de la cámara presurizada y controlada la presión de suministro y descarga, se hace girar el cortador para iniciar la excavación, permitiendo su entrada a la cámara de mezclado, simultáneamente a la apertura de las compuertas se comienza a extender los gatos de empuje previamente seleccionados para controlar la línea y el nivel del escudo; esta selección se basa en los datos topográficos y en la posición del último anillo colocado dentro del faldón del escudo. El material que penetra a través de las ranuras es mezclado y enviado a la superficie para su tratamiento inmediato con el fin de volver a enviarlo al frente, estableciendo así un ciclo. Cuando la carrera de los gatos de empuje es de 1.50 metros aproximadamente, se para el avance del escudo y el giro de la cabeza cortadora, procediendo a cerrar las compuertas de las ranuras, se mantiene la recirculación del lodo por el frente, hasta que las densidades de los lodos de suministro y descarga se igualen, parando entonces la circulación del mismo, con lo que se da por terminada la excavación; simultáneamente a la excavación y al empuje, se realiza la inyección del hueco dejado entre el último anillo de dovelas colocado y el terreno natural, originado por el espesor del faldón; la inyección se efectúa a través de los insertos que poseen las dovelas.

### **2. COLOCACION DEL ANILLO DE DOVELAS.**

Una vez terminada la excavación, el empuje y la inyección de contacto del último anillo, se procede a la colocación de las dovelas correspondientes al siguiente anillo, para lo cual se utiliza el brazo erector del escudo.

## **COLOCACION DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO.**

Al finalizar la excavación y colocación de dovelas (revestimiento primario) se inician las actividades correspondientes a la construcción del revestimiento de concreto reforzado para obtener finalmente el diámetro interior del túnel; para este propósito se utiliza una cimbra metálica telescópica.

## **INYECCION ENTRE DOVELAS Y REVESTIMIENTO DEFINITIVO.**

Esta inyección tiene como objeto sellar las probables oquedades menores que se hayan presentado por contracción del concreto del revestimiento definitivo durante su fraguado. Este tratamiento se lleva a cabo a lo largo de todo el túnel.

# Capítulo 5

## 5. DESCRIPCION DE LA MPT DE FABRICACION NACIONAL

Durante el desarrollo de este capítulo se presentará al lector la descripción de la máquina perforadora de túneles, con la cual se realizó el túnel Aquiles Serdán - Camarones de la Línea 7 Norte del Metro, así como la presentación de las innovaciones introducidas en esta línea, resultado de la experiencia adquirida a través de los ya largos años de construcción del Metro de la Ciudad de México.

La concepción técnica de esta máquina perforadora es totalmente mexicana, emanada de una comisión técnica en la cual se plantearon todos los requisitos con que debía cumplir el escudo y para lo cual se contrataron los servicios de asesoramiento de una empresa estadounidense para el dimensionamiento del escudo, y posteriormente adquirir los sistemas que lo conforman, en el que la gran mayoría son sistemas mexicanos a excepción del excavador que fué importado de Austria.

Todo el conjunto de accesorios mide aproximadamente 120 metros de longitud y tiene un peso estimado de 530 toneladas (fig. 5.1), las secciones que lo conforman son las siguientes :

Escudo excavador (fig. 5.2), sistema transportador de material de rezaga, cinco plataformas con pórticos que alojan al sistema hidráulico, eléctrico, de carga de vagonetas y almacenamiento de dovelas, cinco plataformas sin pórticos y tres secciones de rampa. Se considera que este conjunto es capaz de excavar entre 12 y 20 metros diarios de túnel, dependiendo de las condiciones de terreno por excavar, siendo necesario aclarar que estos rendimientos se han logrado obtener debido a que la realización de estos trabajos se esta llevando a cabo en la zona de transición de la Ciudad de México.

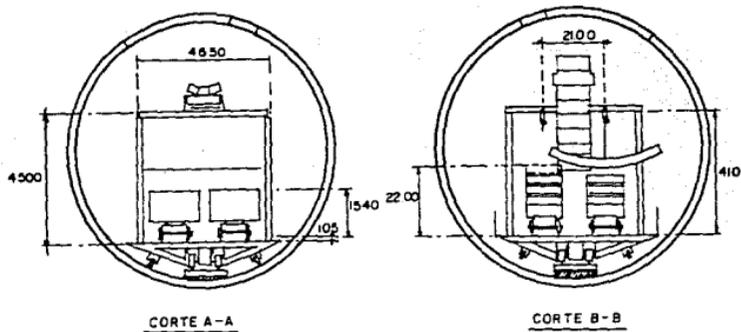
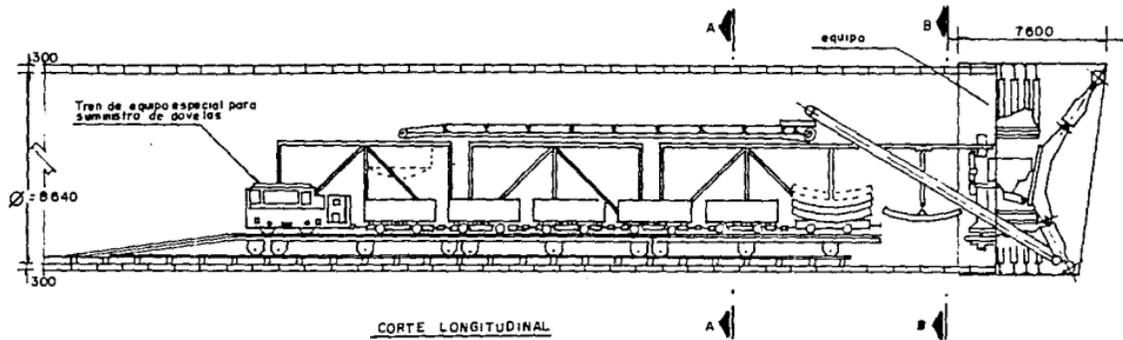


FIG 51

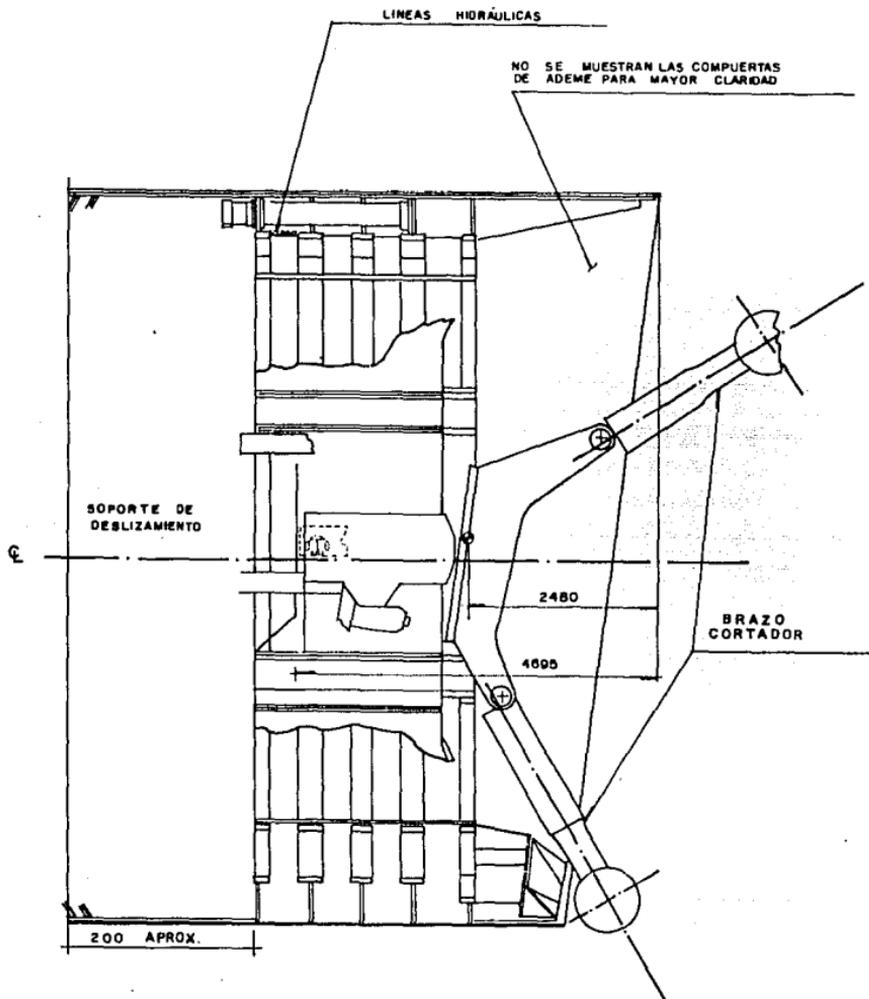


FIG. 6.2 ESCUDO EXCAVADOR

Este escudo se encuentra provisto en la parte frontal de un mecanismo excavador, dotado de dos brazos cortadores que terminan hacia el frente con rozadores en forma de púa con picas intercambiables, estos brazos trabajan periféricamente describiendo una circunferencia, uno de los brazos trabaja periféricamente (fig. 5.3), mientras el otro lo hace internamente (fig. 5.4), siendo por ello este brazo más corto que el anterior. Los brazos giran mediante la acción de tres motores eléctricos y conforme se va excavando el frente, el material va cayendo al delantal del escudo (fig. 5.5), pasando a una banda transportadora primaria que conduce la rezaga durante 17 metros (fig. 5.6) hasta conectarse con la banda secundaria que transporta la rezaga a través de todas las plataformas hasta alcanzar el pórtico número cinco de donde se procede a descargar el material producto de la excavación, al tren que transporta seis vagonetas con capacidad de cuatro metros cúbicos cada una (fig. 5.7). Existe una sola vía de trabajo (fig. 5.8) que es maniobrada mediante una plataforma "California" que sirve para desviar el tren de vagonetas cuantas veces sea necesario. Las vagonetas vuelcan la rezaga sobre las tolvas y mediante skips es elevado el material por la lumbrera para descargarlo en los camiones que lo conducen hasta un tiradero en San Juan Iztacala.

Este escudo cuenta con 31 gatos hidráulicos (fig. 5.9), los cuales permiten el movimiento del escudo con una fuerza de empuje de 5,600 toneladas en conjunto: En la parte posterior del escudo se encuentra un mecanismo giratorio denominado anillo erector de dovelas (fig. 5.10), el cual permite colocar en cualquier posición y con gran precisión a través de dispositivos hidráulicos las dovelas de concreto que son el recubrimiento del túnel. Dichas dovelas son transportadas desde la primer plataforma hasta el escudo, por medio de polipastos.

Las dovelas son prefabricadas de concreto con resistencia  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , con una junta de neopreno en sus lados (fig. 5.11), que durante su colocación permiten un sellado eficiente que se logra al presionar una con otra.

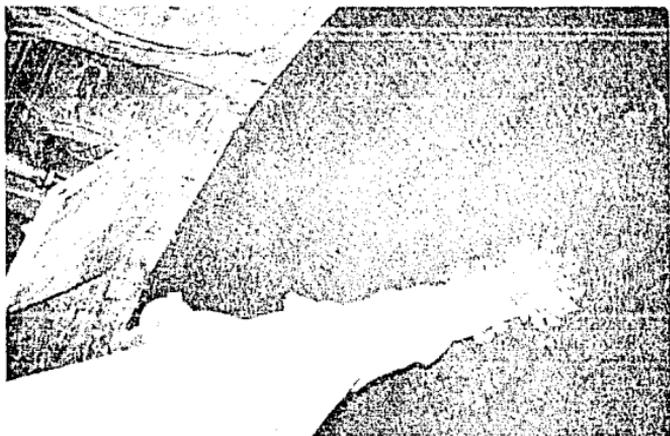


FIG. 5.3 BRAZO DE CORTE PERIFERICO .

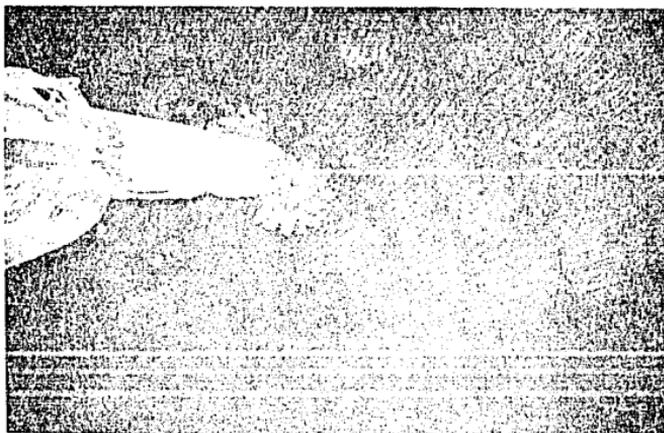


FIG. 5.4 BRAZO DE CORTE INTERNO.

FALLA DE ORIGEN

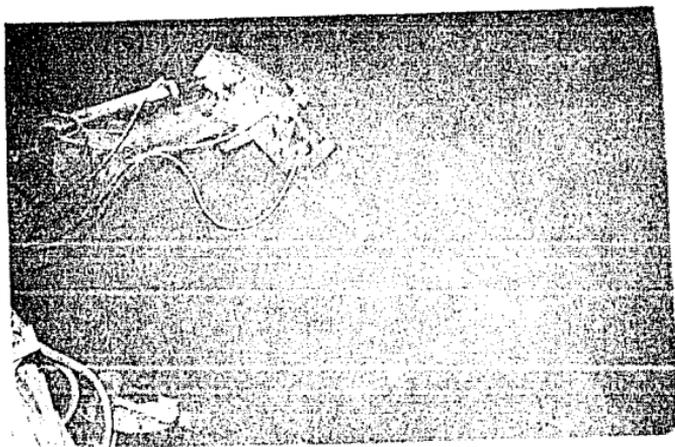


FIG. 5.5 DELANTAL DEL ESCUDO

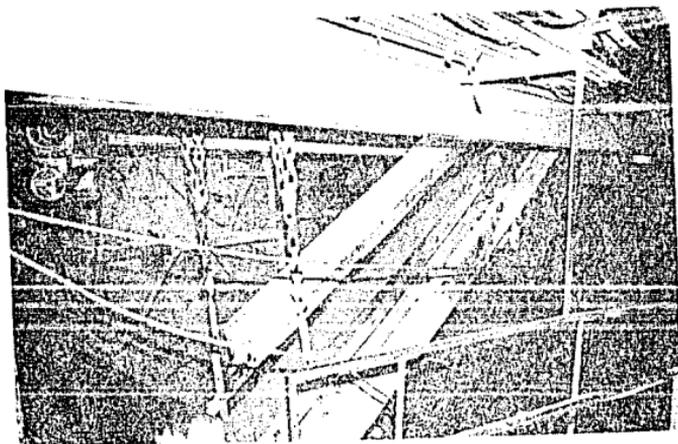


FIG. 5.6 BANDA TRANSPORTADORA DE REZAGA

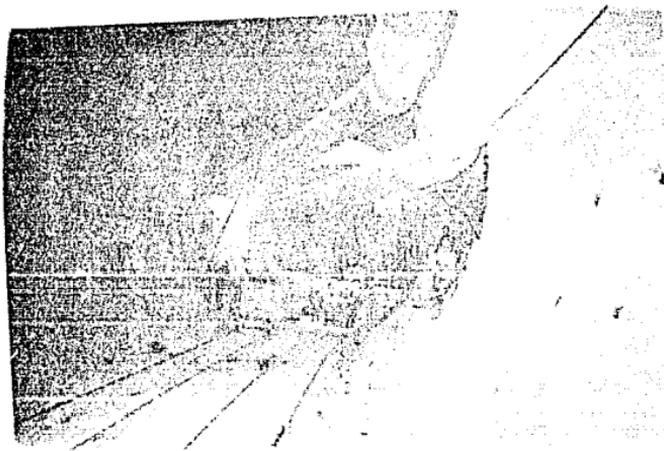


FIG. 5.7 TRANSPORTE DE REZAGA EN VAGONETAS.

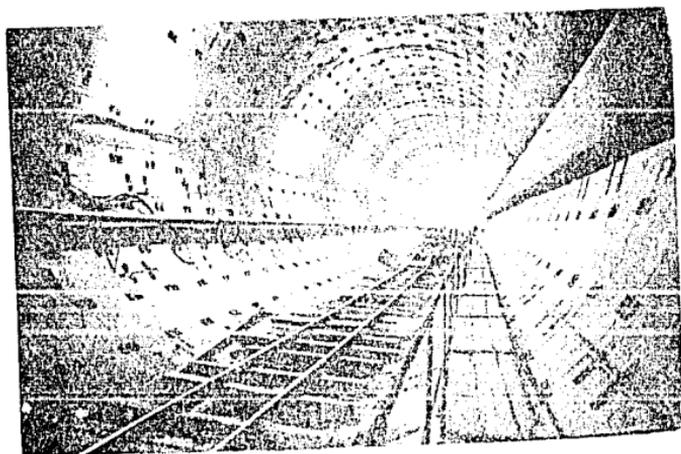


FIG. 5.8 VIA DE TRABAJO.



FIG. 5.9 GATOS HIDRAULICOS DE EMPUJE.

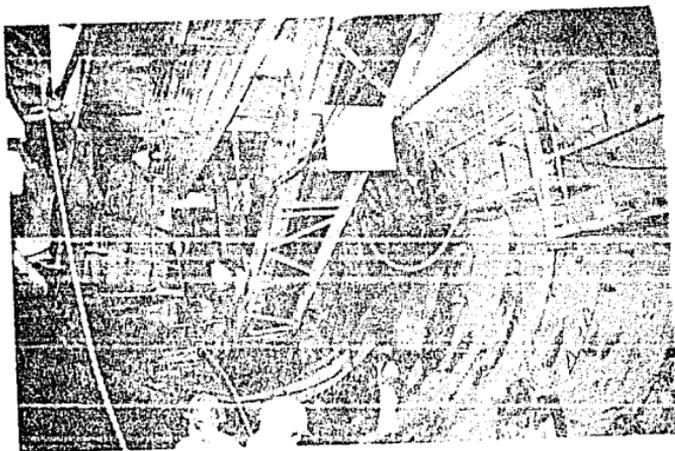


FIG. 5.10 ANILLO ERECTOR DE DOVELAS.

FALLA DE ORIGEN

El anillo erector toma las dovelas una a una y las coloca en la posición que les corresponde comenzando con la más baja que es la cubeta, y las va intercalando de izquierda a derecha hasta llegar a la clave donde se cierra el anillo.

Las dovelas cuentan con una identificación previa a su colocación, existen tres tipos de dovelas, cinco dovelas tipo "B" que forman la cubeta, una dovela tipo "A" que se coloca en la clave del túnel y dos dovelas tipo "C".

En cuanto a la seguridad en el trabajo de excavación, el escudo cuenta con un sistema de protección, éste se compone de seis placas metálicas de ademe dispuestas en forma circular (fig. 5.12), siendo accionadas desde el comando de la cabina del escudo, para que en caso de presentarse una inestabilidad del terreno, este pueda ser contenido por las placas de ademe.

El control de maniobras del escudo se encuentra distribuido en tres tableros que son manejados por los operadores desde la cabina del escudo; (fig. 5.13); uno de los tableros controla el empuje de los 31 gatos hidráulicos, contando con un botón para cada gato; el segundo tablero controla las bombas hidráulicas que producen el flujo necesario para accionar el equipo necesario para accionar el equipo; finalmente el tercer tablero controla el cortador, la banda primaria y los carros rezagadores.

Dentro del equipo con que se cuenta en el túnel se encuentra el sistema de ventilación, mediante el cual se extraen los polvos contaminantes (fig. 5.14).

Dentro de las innovaciones introducidas en la línea 7, se encuentra el perfeccionamiento de los accesos del usuario, aprovechando la lumbrera para lo cual estas se hacen de mayor diámetro para alojar la escalera de concreto que al seguir la forma cilíndrica de la lumbrera se convertirá en una escalera elicoidal. Este es un perfeccionamiento de los accesos de

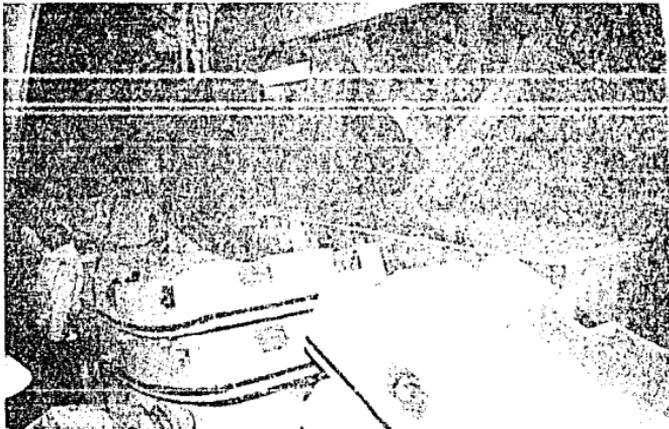


FIG. 5.11 DOVELAS DE RECUBRIMIENTO.



FIG. 5.12 PLACAS DE ADEME.

FALLA DE ORIGEN

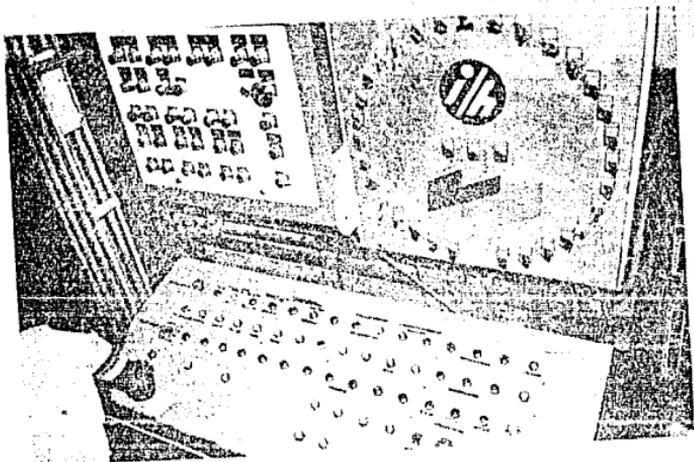


FIG. 5.13 TABLEROS DE CONTROL.



FIG. 5.14 SISTEMAS DE VENTILACION.

de anteriores líneas que abarcaban una mayor superficie para su construcción. Otra de las innovaciones más sobresalientes es hacer pasar el escudo de un extremo a otro de las estaciones sin desarmarlo para continuar con la excavación del siguiente tramo de túnel; este proceso se logra mediante la construcción de las estaciones con dimensiones de 12.50 metros de altura y un ancho de 15.60 metros, por donde pasa el escudo sin ninguna --- interferencia; finalmente se puede mencionar que debido a las ventajas que proporciona el terreno de transición se prescindirá del uso de durmientes y balasto, por lo cual las vías por donde transitará el convoy se apoyarán directamente en la losa de piso.

# Capítulo 6

## **6. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO EN TUNEL AQUILES SERDAN-CAMARONES DE LA LINEA 7 NORTE DEL METRO**

La Línea 7 del Metro unirá en su trazo a las estaciones de correspondencia TACUBA - EL ROSARIO, mediante las estaciones Refinería, Camarones y - Aquiles Serdán. Dentro de esta última ampliación a la línea 7 se encuentra localizado el tramo AQUILES SERDAN - CAMARONES, tramo al que haremos alusión para describir el procedimiento constructivo mediante el cual se - llevaron a cabo los trabajos de excavación y construcción del túnel comprendido entre las lumbreras 5N y 7N.

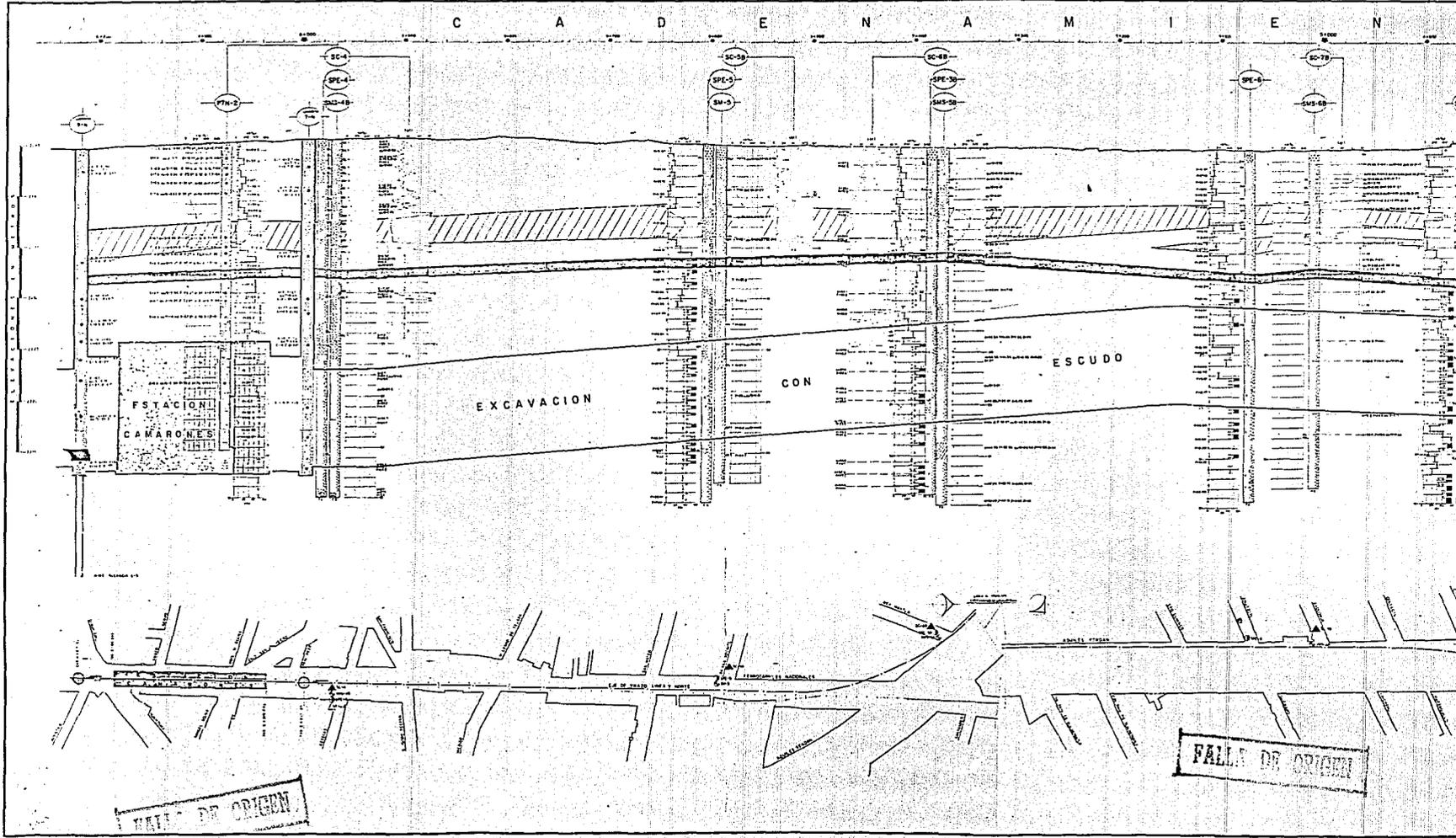
Este túnel fué excavado con el escudo de frente abierto descrito en el - capítulo anterior, y a continuación presentamos los aspectos más relevantes para la construcción de este tramo en túnel, sin considerar el trazo de la línea, así como la selección de la misma (elevada, superficial, subterránea) por haber sido tratado con anterioridad dentro de este trabajo.

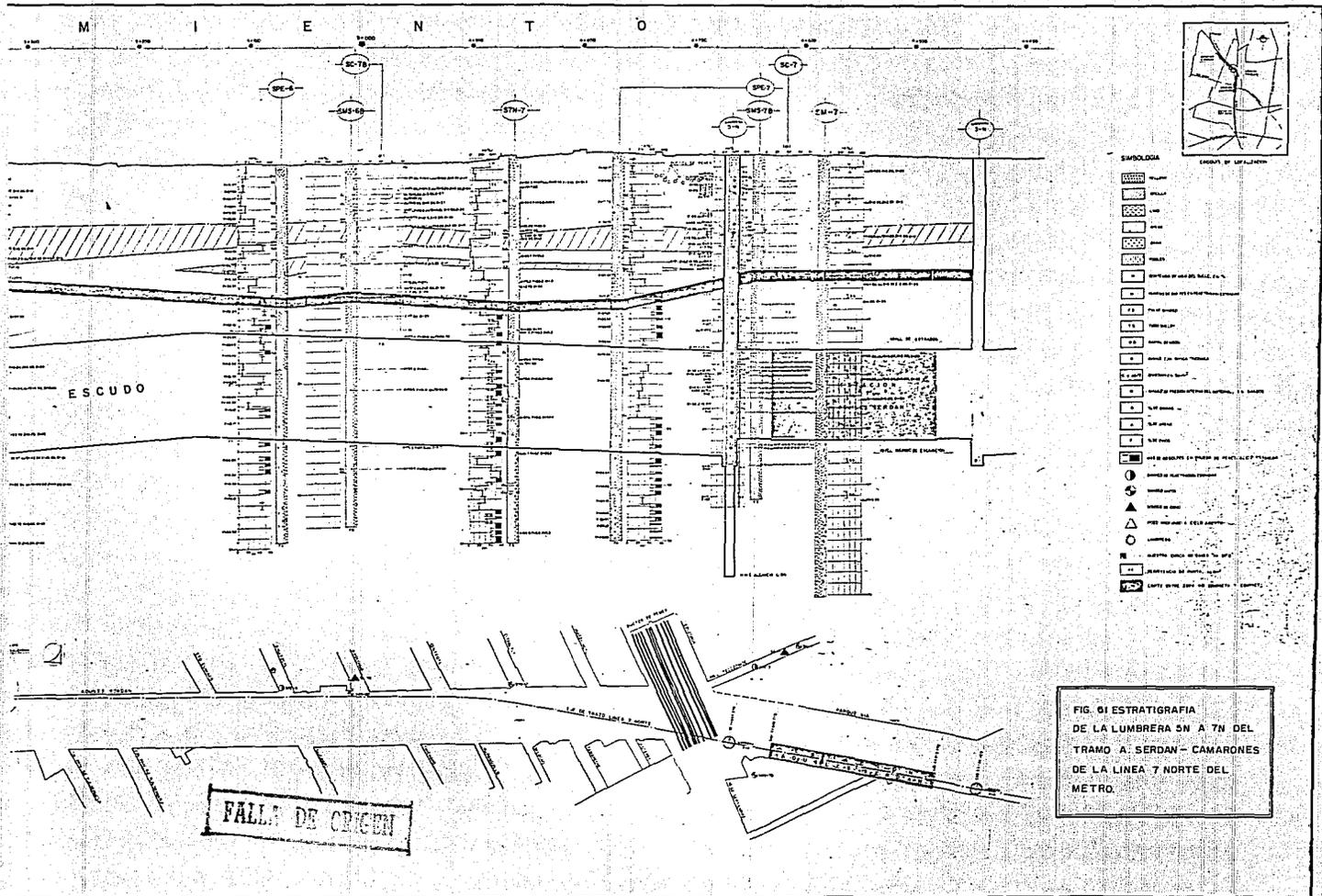
### **6.1. Exploración y muestreo.**

Para determinar las características estratigráficas del subsuelo a lo largo - del tramo Aquiles Serdán - Camarones, se llevaron a cabo seis sondeos - mixtos, cinco de penetración estándar y cinco de cono, a una profundidad promedio de 30 m. La localización de los sondeos, así como el perfil estratigráfico se muestran en la figura 6.1.

Los sondeos mixtos se efectuaron con máquina rotatoria alternando el - muestreo alterado con el inalterado, en el cual el primero se llevó a cabo por el método de penetración estándar empleando un muestreador de pared gruesa hincado a percusión, el muestreo inalterado se realizó hincando a presión un muestreador tipo Shelby. El sondeo mediante cono es una -

C A D E N A M I E N





prueba de penetración del tipo estático en el cual el cono se empuja a razón de 2 cm/seg. en donde la resistencia al cono es la fuerza necesaria para que el cono avance, dividida por el área de la base. En su forma más sencilla este aparato consiste en un cono a 60° que tiene un área en la base de 10 cm<sup>2</sup>. La profundidad promedio a las que fueron realizadas estas pruebas son de 15 m.; teniendo como presiones máximas y mínimas 216 y 5 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, haciendo notar que las presiones de 5 kg/cm<sup>2</sup> se localizan en las inmediaciones de los primeros diez metros de profundidad. En la tabla 1 se presenta el tipo de sondeo efectuado, su cadenamamiento y la profundidad a la que fueron efectuados.

## 6.2. Estratigrafía.

De acuerdo a los estudios realizados en campo y laboratorio se obtuvo un perfil estratigráfico (fig. 6.1), en el cual se puede apreciar que el tramo del túnel esta formado en su gran mayoría por material limo arenoso de consistencia dura y algo cementada, formando grumos muy compactos a lo largo del tramo, también suelen aparecer pequeñas lentes de arena limpia y mal graduada y aglomerado cementado con arena poco limosa.

A partir del nivel del terreno natural y hasta una profundidad de 11 m. se encuentra el límite entre la zona compacta y no compacta como se puede apreciar en la misma figura. Dentro de la zona no compacta se encuentra un contenido de agua del suelo del 80% y un promedio de N (número de golpes a la penetración estándar) de 40.

## SONDEOS EFECTUADOS

SONDEO	TIPO DE SONDEO	CADENAMIENTO	PROFUNDIDAD (m)
SC-7	CONO	4 + 618	14
SPE-7	PENETRACION ESTANDAR	4 + 640	31
SMS-7B	MIXTO	4 + 640	31
S7N-7	MIXTO	4 + 860	35
SC-7B	CONO	4 + 980	16
SMS-6B	MIXTO	5 + 005	33
SPE-6	PENETRACION ESTANDAR	5 + 070	35
SMS-5B	MIXTO	5 + 370	35
SPE-3B	PENETRACION ESTANDAR	5 + 380	34
SC-6B	CONO	5 + 440	21
SC-5B	CONO	5 + 520	10
SMS	MIXTO	5 + 590	33
SPE-5	PENETRACION ESTANDAR	5 + 600	35
SC-4	CONO	5 + 900	21
SMS-4B	MIXTO	5 + 970	35
SPE-4	PENETRACION ESTANDAR	5 + 980	35

TABLA 1.

La clave del túnel de menor profundidad a lo largo de todo el tramo, se encuentra localizada a 15 m. por debajo del terreno natural, a partir del cual el porcentaje de agua disminuye notablemente hasta alcanzar porcentajes casi nulos y valores de N mayores a 60 golpes.

### 6.3. Asentamientos .

Para excavar siempre es necesario extraer material y, en consecuencia, se produce un cambio en el estado de esfuerzos en el suelo, debajo y a los lados del espacio excavado. Este cambio ocurre, se entiben o no los frentes de corte. Como ningún material puede sufrir un cambio de esfuerzos sin las deformaciones correspondientes, la excavación siempre está asociada a movimientos de la superficie del terreno adyacente. Estos movimientos usualmente tienen carácter de asentamientos, pero en algunos otros casos, la superficie del terreno puede subir.

Es por ello que para esta excavación no se ha prescindido de los estudios que nos proporcionen los asentamientos a lo largo del túnel. De los resultados obtenidos en estos estudios podemos destacar las siguientes observaciones: Los bancos de nivel muestran que el terreno comienza a deformarse, cuando el frente de la excavación se encuentra a una distancia variable comprendida entre 1.5 y 0.5 diámetros y se estabiliza cuando el túnel se ha alejado una distancia de 3 a 5 diámetros. La deformación máxima obtenida a lo largo del tramo fué de 69 mm., por lo que se puede notar que el túnel se comporta dentro de lo especificado. En cuanto a las medidas de convergencia la deformación máxima fué de -11.05 mm. puede así concluirse, en forma general que la deformación en términos adimensionales es igual a diámetro / 800.

#### **6.4. Excavación y construcción de lumbreras.**

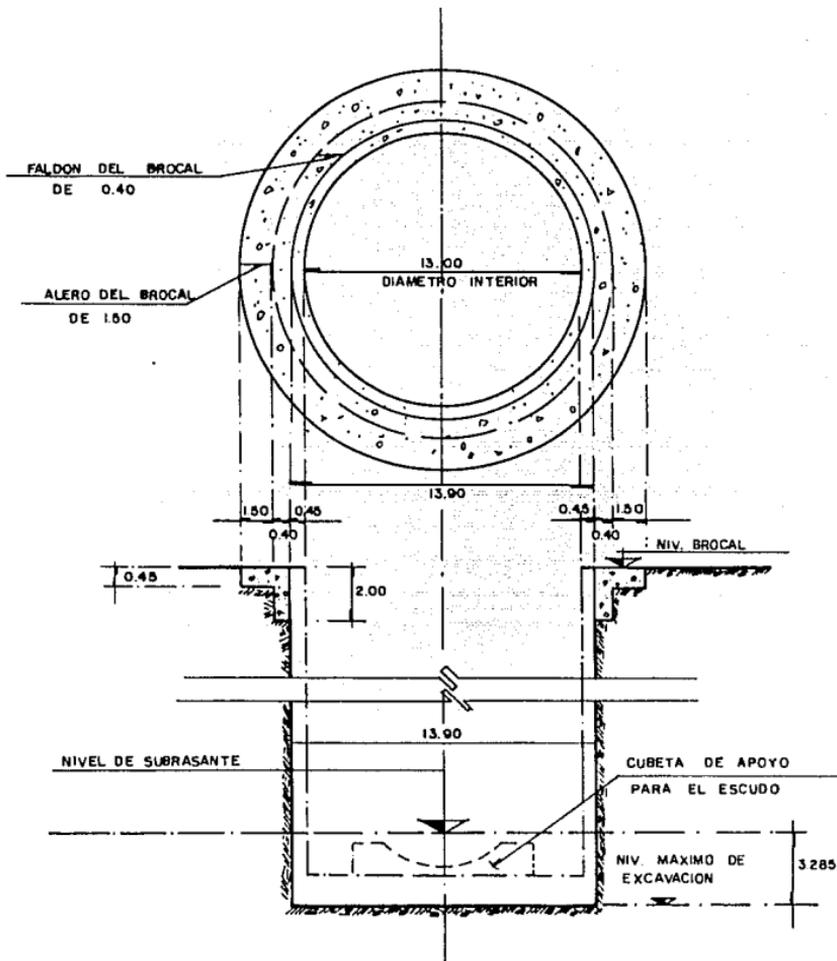
Las lumbreras son de sección circular con un diámetro libre de 13 metros; en la figura 6.2. se muestran los detalles.

La construcción de estas lumbreras tienen la finalidad de poder introducir el equipo necesario para la construcción de túnel, dar ventilación al mismo y posteriormente ser utilizadas como acceso al túnel por los usuarios del metro.

#### **Procedimiento constructivo de las lumbreras.**

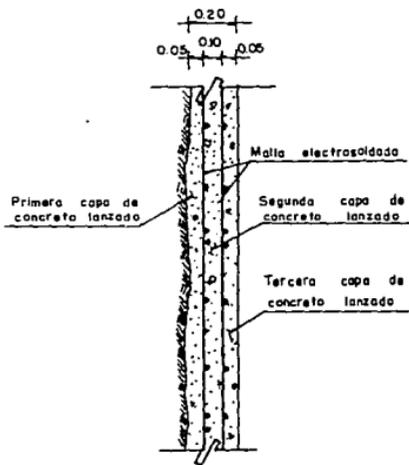
Una vez que sobre el terreno se ha definido el trazo de la lumbarrera, se excava hasta una profundidad de dos metros y en un ancho de un metro - donde quedarán alojados los faldones del brocal, estos faldones se colocan utilizando una cimbra apoyada contra el terreno por puntales, los cuales se colocan a cada 2.5 m. de separación horizontal y en sentido vertical se colocan dos niveles separados 1.2 m. entre sí, la rama horizontal del --- brocal debe formar una pequeña losa, la cual sirve para que la maquinaria de excavación pueda rodar libremente sin peligro de que se produzca algún caído en la superficie de la lumbarrera. La sección del brocal se muestra en la figura 6.2.

Una vez que el brocal haya alcanzado su resistencia de proyecto, se estará en condiciones de iniciar la excavación para la construcción de la lumbarrera; la excavación se realiza en toda el área de la lumbarrera en tramos de 2 - metros de profundidad, una vez alcanzada la profundidad de excavación - de cada tramo, se procede a colocar una estructura de retención formada - por un revestimiento primario, el cual esta constituido por tres capas de - concreto lanzado con un espesor total de 20 cm. y reforzado con dos mallas electrosoldadas. En la figura 6.3 se muestran los detalles del revestimiento.

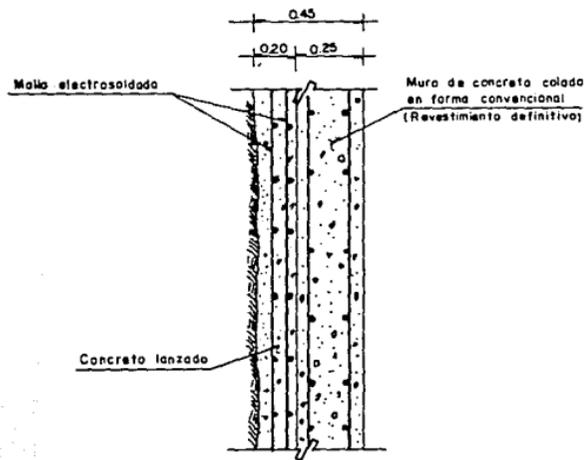


**DETALLE DE LUMBRERA**

FIG 6.2.



**DETALLE**  
REVESTIMIENTO PRIMARIO



**DETALLE**  
REVESTIMIENTO DEFINITIVO

FIG. 6.3.

Una vez que se ha alcanzado la profundidad de proyecto de la lumbrera, se continúa con la colocación de la plantilla de fondo con un concreto pobre de 10 cm. de espesor, provisto de un aditivo acelerante de fraguado, dos horas después de colada la plantilla se inicia el armado y colado de la losa de piso, dejando las preparaciones necesarias para la liga estructural con el muro del revestimiento definitivo, así como con la estructura de apoyo del escudo. Veinticuatro horas después de colocada la losa de piso de la lumbrera, se inicia la construcción del revestimiento definitivo, el cual consistirá en un muro de concreto armado, una vez que la losa de fondo de la lumbrera alcance su resistencia de proyecto se coloca el armado, cimbrado y colocado de la estructura de soporte para el escudo, tal como se muestra en la figura 6.4.

Dentro de los aspectos importantes a considerar en la construcción de la lumbrera, se encuentra el bombeo de achique ya que en caso de presentarse filtraciones hacia el interior de la lumbrera, el agua producto de las filtraciones se controlará mediante zanjas ubicadas en las orillas del fondo de excavación, de las cuales terminarán en cárcamos cúbicos de 30 cm. de donde se extraerá el agua por medio de bombas.

Con objeto de tener una mayor información sobre las características del subsuelo en la zona de construcción de la lumbrera, se llevará a cabo la extracción de muestras cúbicas de 25 cm. a profundidades de 3.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10, 11.5, 14.5, 16.0, 20.0, 23.5 y 25 m.

## **6.5. Excavación del túnel.**

El túnel tendrá un diámetro interior de 8.64 m. y un diámetro exterior de excavación de 9.513 m., contará con una longitud de desarrollo de 1329 m. aproximadamente medido a ejes de lumbreras. El revestimiento del túnel está constituido por una serie de anillos formados por siete dovelas y una

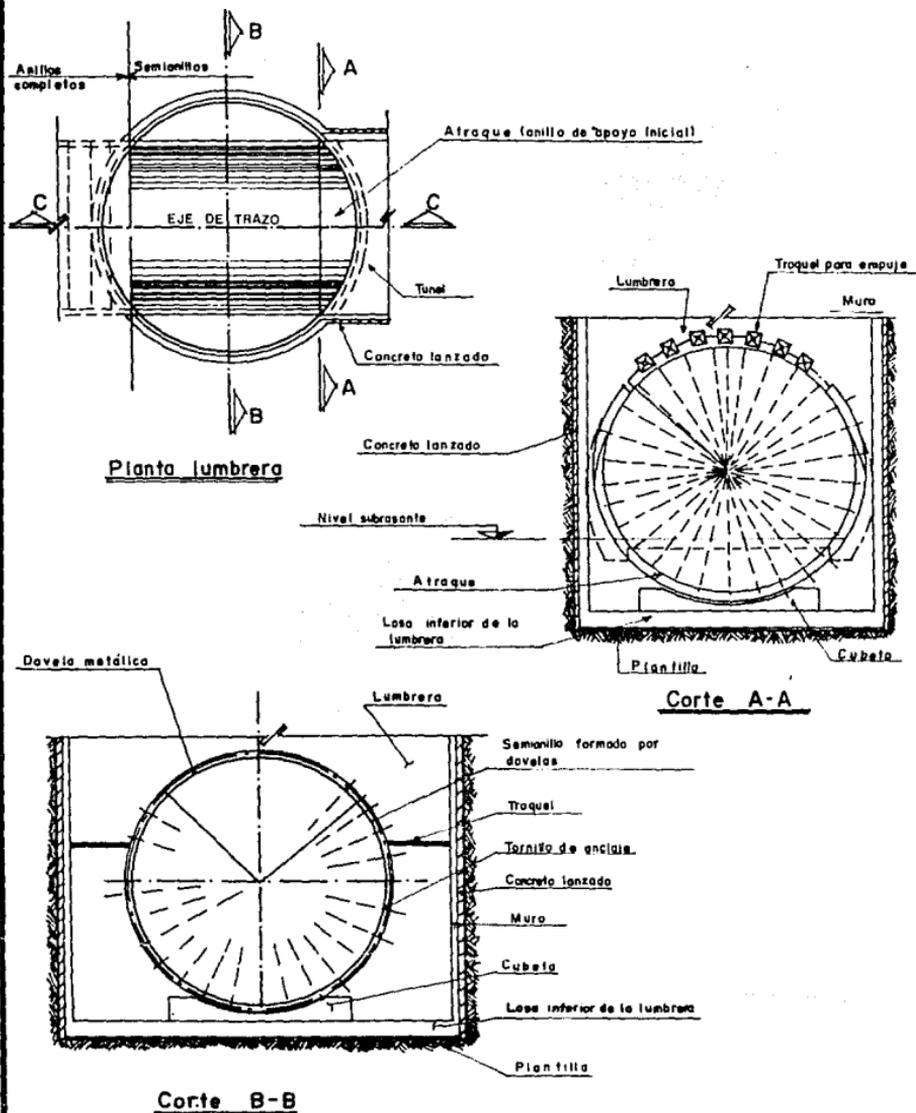


Fig. 6.4. ESTRUCTURA DE ATRAQUE

cuña, cada anillo contará con cinco dovelas tipo "B", dos dovelas tipo "C" y una dovela menor tipo "A" que funciona como cuña, la colocación de las dovelas puede observarse en la figura 6.5 y en la figura 6.6 se muestra una planta de la bóveda de la colocación de las dovelas, éstas tendrán un ancho de 1.2 m. y un espesor de 0.30 m. Para iniciar la excavación del túnel, el escudo se apoyará en una estructura de atraque integrada por cinco dovelas tipo "B" y completada por un atraque metálico, el cual esta formado por dos dovelas metálicas de diferente longitud, las cuales podrán ser removidas tantas veces como sea necesario, para adecuarse a las condiciones que presente el proceso constructivo, estas dovelas se apoyarán en el anillo inicial colado en sitio. En los anillos incompletos se apoyarán los troqueles. Todo este conjunto constituye la estructura de atraque que transmitirá el empuje de los gatos a una sección adosada al revestimiento definitivo del túnel de transición, opuesto al frente de ataque del escudo. Los detalles de esta estructura se muestran en la figura 6.4.

Una vez que el escudo esta ensamblado y probado bajo la lumbrera, podrá iniciarse la demolición del muro de la lumbrera y colocarse a su vez el primer semi-anillo dentro de la camisa del escudo, ya colocados los dos primeros semi-anillos se realiza el avance del escudo en tramos, de acuerdo a la longitud disponible de los vastagos de los gatos de empuje, para dar oportunidad a la colocación de los semi-anillos completos, se iniciará cuando la proyección del paño de la lumbrera lo exija, en el anillo 9 ó 10, ésto es, cuando el escudo esté prácticamente a punto de desaparecer de la lumbrera. Antes de realizar cualquier avance del escudo, se procede a efectuar el corte del material existente en todo el frente definido por el perímetro interior del escudo, en una longitud de 1.35 m., la cual se puede realizar en una o más etapas hasta alcanzar dicha longitud. Para las zonas de curva en el trazo, la excavación de la sección puede permitir ligeras sobre-excavaciones, que no deben exceder de 15 cm., con el fin de facilitar el control topográfico del escudo, evitando de esta manera posibles daños a los anillos previamente colocados. Efectuando el corte de la sección se

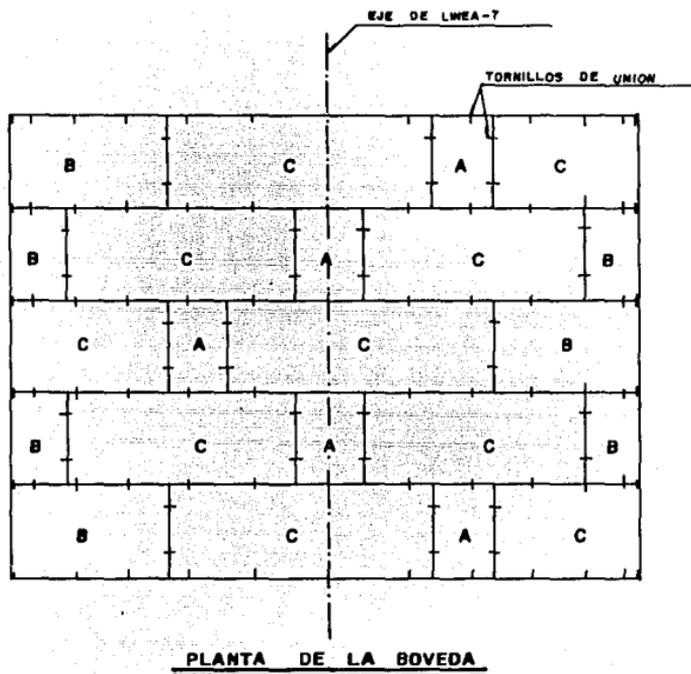


Fig. 6.6.

procede a dar un avance de 1.35 m., con objeto de facilitar las maniobras de ensamble de dovelas dentro del faldón del escudo, el avance del escudo se logra mediante la operación de los gatos ubicados en la parte trasera, - los cuales se apoyarán por medio de sus zapatas en los anillos ya colocados. Cuando la presión en los gatos de empuje para un avance cualquiera rebase los  $350 \text{ kg/cm}^2$ , se debe realizar en la superficie de contacto de la camisa del escudo con el terreno la inyección de una mezcla compuesta por lodo --- bentonítico, al cual se le agrega el 5% de aceite soluble, estas inyecciones se realizan a través de las preparaciones existentes en el escudo, siendo la presión máxima de inyección de  $3 \text{ kg/cm}^2$  y el volumen de inyección de  $1 \text{ m}^3$  por barreno. El objeto de esta inyección es el de reducir las fuerzas de - fricción que se generan en la superficie de contacto entre la camisa del - escudo y el suelo circundante, evitando de esta manera presiones excesivas en los gatos de empuje que pudieran dañar a los anillos previamente --- colocados, en caso de que en un determinado tramo se mantengan altas las presiones de empuje, se podrá efectuar la inyección a cada 10 m.

### **Procedimiento para la colocación de los anillos.**

El orden de colocación de las dovelas sigue una sección ascendente, esto es, se instalan en primer lugar las dovelas tipo "B" comenzando por las - inferiores que forman la cubeta, posteriormente se colocan en su sitio las dovelas tipo "C", para --- terminar colocando la dovela tipo "A"; las dovelas son colocadas por medio del anillo erector que se encuentra integrado al - escudo en su parte posterior.

### **Extracción de rezaga.**

En el inicio de la excavación las plataformas que alojan al equipo hidráulico y eléctrico son instaladas en el túnel de transición y conforme el escudo - avanza se colocan a lo largo del túnel por excavar, esto implica que durante los primeros 180 m. se desaloja la rezaga lateral, el cual formará con el -

material producto de la excavación una plataforma de trabajo para el tránsito del equipo a utilizar y posteriormente descargar directamente a vagonetas montadas en trucks para vía, las cuales serán acarreadas hasta la lumbrera por locomotoras para ser izados por una draga que descarga directamente el material a los camiones. Una vez que la longitud del túnel haya alcanzado los primeros 180 m. de longitud se suspende la construcción del túnel para llevar a cabo la implementación del tren de equipo de rezaga y suministro de dovelas.

### **Inyecciones para la reducción de los asentamientos.**

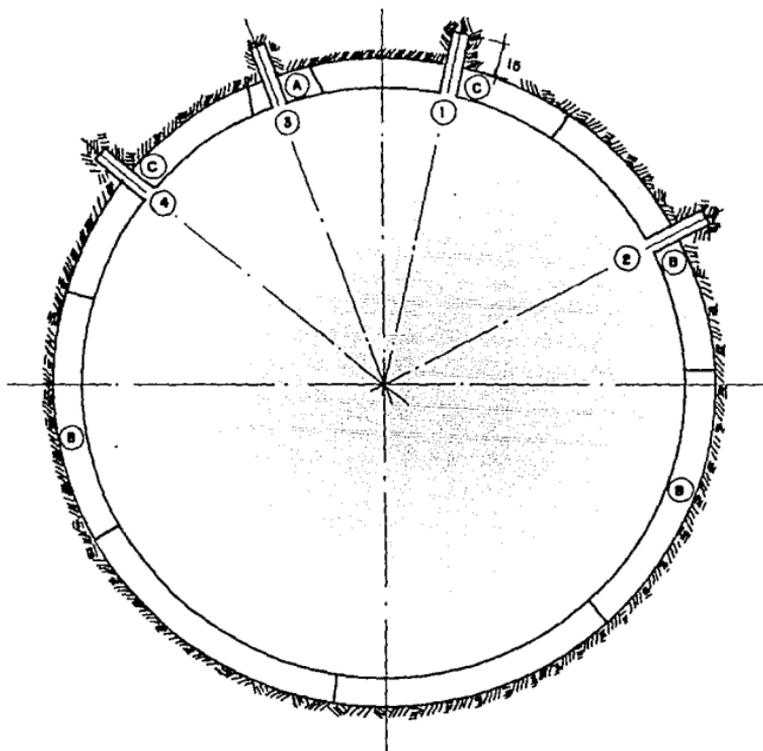
Con objeto de reducir tanto los asentamientos superficiales que puedan presentarse durante la excavación del túnel, como las posibles filtraciones del agua hacia el túnel, se realizan en cada uno de los anillos un proceso de inyección el cual consta de dos fases:

#### **Primera Fase.**

Esta inyección se realiza a través de los agujeros con que cuentan las dovelas, inyectándose exclusivamente en los insertos 2 y 4 mientras los insertos 1 y 3 se dejan abiertos para que funcionen como testigos, mientras que en los insertos restantes las boquillas permanecerán abiertas hasta el momento que aparezca la lechada por cada uno de ellos para ser posteriormente cerrados. La inyección de esta primera fase se lleva a cabo inmediatamente después de que el anillo por inyectar se encuentra fuera del faldón del escudo. En la figura 6.7 se pueden observar los insertos con que cuentan las dovelas.

#### **Segunda Fase.**

En esta inyección el anillo por inyectar deberá tener una distancia igual a cuatro anillos, es decir, el quinto anillo localizado atrás del faldón será el que se este inyectando en segunda fase, esta fase se realiza en los insertos 1 y 3.



INYECCIONES DE 1º Y 2º FASE

Fig. 6.7.

Los volúmenes a inyectar para estas fases son de  $2.0 \text{ m}^3$  a una presión de  $0.5$  a  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  para la primera fase y  $1 \text{ m}^3$  a una presión de  $1.5$  y  $1.7 \text{ kg/cm}^2$ , suspendiéndose las inyecciones cuando se alcance el volumen máximo.

---

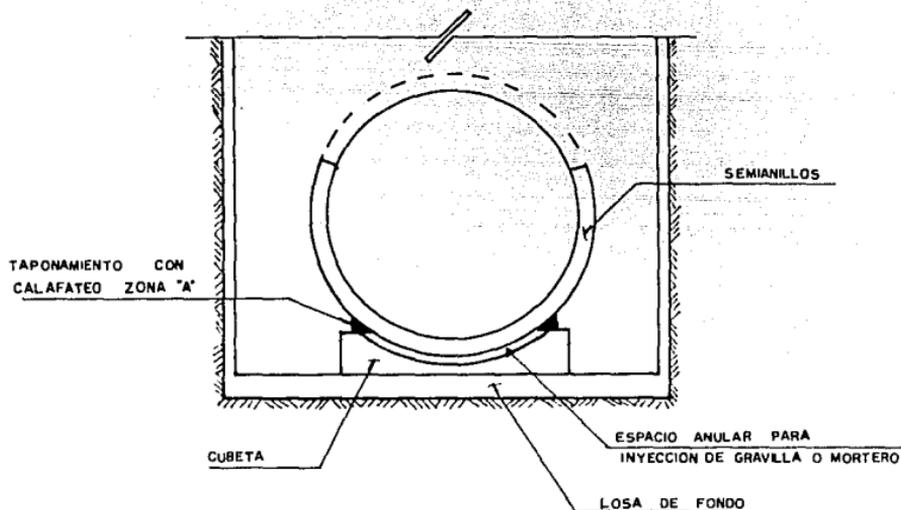
**PROPORCIONES DE LAS INYECCIONES**

---

	1a. FASE	2a. FASE
AGUA (Lts.)	300	198
CEMENTO (Kg.)	100	250
BENTONITA EN POLVO (Kg.)	10	4.5
ARENA (Lts.)	270	67
ACELERANTE DE FRAGUADO (Kg.)	2.6	--

---

El espacio anular entre la cubeta y las dovelas de los primeros tres anillos se rellenan de concreto pobre, mientras que los semi-anillos restantes se podrán llenar inyectando gravilla o mortero, colocando previamente un taponamiento por medio de un calafateo, como se observa en la figura 6.8, para evitar que fluya el material hacia el exterior. Antes de iniciar la inyección se debe calafaterar y colocar concreto lanzado contra el muro de la lumbrera en todo el perímetro del anillo. La inyección de primera fase se realiza en todos los anillos en tanto que la segunda fase se efectúa en anillos alternados comenzando por el primer anillo completo colocado.



C O R T E   T R A N S V E R S A L

Fig. 6.6.

# Capítulo 7

## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de la Epoca Prehispánica, la Colonia y el Siglo XIX, México se ha labrado una tradición en la construcción de excavaciones subterráneas con obras tan importantes como lo son el "Diseño de Abastecimiento de Agua Potable y Drenaje del Valle de México", a cargo del Rey Netzahualcoyotl, el cual se llevó a través de acueductos compuestos de algunos túneles y canales. Durante la Epoca Colonial se da en México el apogeo de la construcción de galerías, socavones y túneles con el afán de obtener por parte de los Españoles una mayor cantidad de oro y plata, para lo cual desarrollarían una intensa actividad minera en estados como Zacatecas, San Luis Potosí, Pachuca, Taxco, etc. Otra importante aportación en la construcción de túneles en nuestro país, se da con la construcción de túneles para el paso de vías férreas. Esta aportación da inicio durante el Imperio de Maximiliano, con la construcción del ferrocarril que uniría a la Ciudad de México con el Puerto de Veracruz, la construcción del ferrocarril continuaría durante el Gobierno del Presidente Juárez y concluiría durante el régimen del Presidente Lerdo de Tejada. Estos túneles fueron construidos por compañías inglesas, siendo de una escasa longitud y realizados por secciones utilizando equipo de mano para barrenación, empleando como explosivo la pólvora negra y revistiendo las paredes con mampostería y la bóveda con bloques de piedra.

Durante el régimen de Porfirio Díaz, se construyó el túnel ferroviario "Barrientos", que contaba por primera vez con doble vía y tenía una longitud de 337 metros y una sección terminada de 10 metros de ancho, revestido con paredes de ladrillo y mampostería, también son importantes los túneles construidos en el ferrocarril Chihuahua-Pacífico, de los cuales los más importantes son los llamados "El Descanso" y "El Continental", éste último con una longitud de 1,260 metros.

Las construcciones hidráulicas han dejado una basta experiencia en la construcción de túneles, tanto en los que respecta a la perforación de túneles para desvíos de ríos en la construcción de presas, como en la construcción de agua para irrigación en túneles de presas para alimentación de plantas hidroeléctricas, así también son de especial importancia las excavaciones subterráneas realizadas para alojar grandes casas de máquinas para plantas hidroeléctricas, como es el caso de las plantas "Mal Paso", "Infiernillo" y "Chicoasén". Así con el transcurrir de los años y las experiencias adquiridas en la construcción de una infinidad de obras subterráneas, los métodos y procedimientos empleados para la excavación de túneles, han venido mejorando sistemáticamente, al inicio de la era industrial se emplearon las perforadoras de vapor, posteriormente se mejoraría esta técnica, utilizando el aire comprimido, más tarde se inicia el uso de máquinas con pierna neumática y jumbos de mayor peso y potencia, ya en últimas fechas los jumbos usarían el tipo de soporte para las perforaciones con base a mandos hidráulicos, siendo el último avance tecnológico en perforación de túneles el empleo de los escudos, con los cuales en México se han construido algunas líneas del Metro, los interceptores profundos y el emisor central en el que la tecnología desarrollada en el diseño de construcción del escudo corría totalmente a cargo de países como Japón, Alemania, Inglaterra y Estados Unidos, sin embargo, como ya es característico en la ingeniería civil mexicana, ésta se ha preocupado por estar a la vanguardia de los últimos avances tecnológicos, es por ello que una de las aportaciones más importantes en la construcción de túneles lo es la Máquina Perforadora de Túneles de Fabricación Nacional, con la cual se construyó la ampliación de la Línea 7 Norte del Metro, en donde a esta máquina se han logrado adaptar nuevas técnicas de construcción, las cuales ofrecen una serie de ventajas de las cuales hacemos mención a las más importantes.

- La total mecanización del ciclo de trabajo permite un gran ahorro en la mano de obra.

- La excavación del frente mediante el uso de dos brazos cortadores que operan simultáneamente, evitan la utilización de personal en el mismo, ahorrando tiempo al mejorar métodos como la perforación a base de banqueo.
- La utilización de dovelas prefabricadas como revestimiento definitivo, mejorando técnicas como la del Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles, utilizado en los inicios de esta misma línea.
- La mecanización en la extracción de rezaga en el cual el material producto de la excavación es conducido por bandas transportadoras y vagonetas de carros de vía, evitando la introducción al túnel de equipo para la extracción de rezaga.
- El ademe en el frente se lleva a cabo por medio de placas metálicas controladas desde el interior del escudo, protegiendo al personal en caso de presentarse alguna inestabilidad en el frente.
- El sistema de control que maneja independientemente cada uno de los gatos de empuje, permite seguir el trazo topográfico con gran precisión.
- El paso del escudo por la estación, sin la necesidad de desarmarlo para continuar la excavación.
- Los nuevos avances obtenidos con este escudo han llegado a duplicar los rendimientos obtenidos por escudos similares que trabajaron en el primer tramo de esta línea, ya que se han logrado avances con el escudo nacional de hasta 18 metros diarios.

- Los tableros de control son de fácil operación.
- El perfeccionamiento de los accesos del usuario aprovechando las lumbreras, para lo cual ésta tendrá un mayor diámetro en donde se alojarán la escalera helicoidal.
- Evitar la utilización de durmientes y balasto ya que las vías se apoyan en la losa de piso.

Como desventajas de este escudo pueden mencionarse las siguientes :

- Este escudo fué diseñado para trabajar en terrenos con las características del suelo de transición de la Ciudad de México.
- La instrumentación del túnel es mínima, debido a que la colocación de las dovelas no permite la implementación de la instrumentación en el terreno natural del túnel.

Para finalizar este trabajo podemos mencionar que a lo largo de la construcción de este último tramo de la Línea 7, se han logrado obtener grandes experiencias que vendrán a beneficiar y enriquecer la capacidad de técnicos e ingenieros mexicanos y por ende el desarrollo de nuestro país en las técnicas de construcción de túneles.

## BIBLIOGRAFIA

"Programa Maestro del Metro"  
Departamento del Distrito Federal.  
COVITUR.

"Los Constructores en México son Mayores de Edad"  
Primera Sesión del Consejo Directivo.  
Revista Mexicana de la Construcción.  
Agosto 1981, No. 322.

"El Metro de la Ciudad de México"  
OBRAS  
Enero 1985. Número especial.

"Túneles y Excavaciones Subterráneos"  
Victor, Hardy.  
S.M.M.S

"Túneles Carreteros"  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos  
1984.

"Los Túneles Carreteros"  
Revisión Conjunta  
S.M.M.S.

"Instrumentación y Medición de Túneles"  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

"Túneles en Suelos Blandos y Firmes"  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

"Reporte Técnico del Departamento de Mecánica de Suelos"  
Ingeniería de Sistemas de Transporte Metropolitano.

**"Experiencias sobre algunos Túneles Construidos"**  
Reunión Técnica.

**"Fundamentos de la Mecánica de Suelos"**  
Juárez Badillo, Rico Rodríguez  
Editorial Limusa, Tomo 1.

**"Ingeniería de Cimentaciones"**  
Ralph B. Peck  
Editorial Limusa