



## **II.-DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS DE UN TÚNEL PARA EL DESALOJO DE AGUAS RESIDUALES Y PLUVIALES**

La correcta ejecución de los trabajos en la construcción de túneles requiere de estructuras que permitan el acceso tanto de personal como de equipo y materiales requeridos en el frente, así como de elementos que protejan al personal y la maquinaria durante la ejecución de los trabajos y que aseguren la vida útil de la obra y correcta funcionalidad de la misma.

Se tratara en este capítulo acerca de las estructuras indispensables para la construcción de túneles en suelos blandos, ya que sin estas sería imposible concebir tales proyectos que producen grandes beneficios a la sociedad, como puede ser el control de inundaciones, por medio de los cuales se conduce, controla y desaloja los caudales excedentes generados en épocas de lluvia y de esta forma evitar problemas de inundaciones en las comunidades.

Dichas estructuras hacen posible la construcción de túneles y por otro lado permiten el correcto funcionamiento del mismo a lo largo de su vida útil, dentro de la secuencia de construcción la primera estructura en construirse es la lumbrera por donde se da acceso a los equipos de excavación y revestimiento, así como a los materiales y personal necesario para la ejecución de los trabajos, durante la construcción de dovelas se fabrican los elementos que permitirán estabilizar el terreno al momento de la excavación, en cuanto a los trabajos de excavación y estabilización del subsuelo estos se ejecutan a la par y permiten dar el soporte inicial de lo que finalmente sería el túnel, finalmente se aplica el revestimiento definitivo con lo cual se llega al diámetro de diseño y se proporciona el acabado final. En resumen son cuatro procesos los que hacen posible la materialización de un túnel, construcción de lumbreras, construcción de dovelas, excavación y estabilización del terreno y revestimiento definitivo.



## 2.1 LUMBRERAS

Las lumbreras son elementos estructurales auxiliares en la construcción de túneles, estas estructuras son construidas verticalmente, generalmente de arriba hacia abajo, de forma circular, ademadas con concreto reforzado o simple dependiendo de las características del suelo, permiten tener acceso a instalaciones o estructuras subterráneas, así como proveer de recursos y personal necesario para construcción de un tramo de túnel.

El procedimiento constructivo varía según el tipo de suelo sobre el cual se construirá la estructura, los suelos se clasifican en general como blandos, duros y mixtos, según el tipo de suelos los procedimientos constructivos así como los equipos utilizados se modifican.

Las lumbreras en roca son de mayor dificultad que las de suelos blandos, para su construcción pueden aplicarse distintas técnicas tales como:

- a. Ayuda de explosivos
- b. Por medios mecánicos
- c. Por combinación de los anteriores.

En las lumbreras de pequeño diámetro (menor de 6.0 m) generalmente se utilizan las máquinas llamadas contrapoceras, cuyos diámetros pueden variar entre 0.6 y 6.0 m. Se pueden hacer de arriba hacia abajo y viceversa. La manera más eficiente, es barrenar de arriba hacia abajo al túnel o caverna por conectar y hacer la ampliación de abajo hacia arriba con la contrapocera.

En lumbreras de gran diámetro, mayor de 6.0 m, se pueden utilizar métodos convencionales y/o uso combinado de contrapoceras con ampliación o topes integrales.



Los revestimientos en las lumbreras dependen de:

- Calidad del suelo y de las solicitaciones de carga.
- Del uso de la lumbrera (los conductos a presión en ocasiones llevan concreto hidráulico, anclas y camisa de acero)
- Del nivel freático.

Se pueden aplicar los siguientes métodos para revestir lumbreras en suelos blandos:

- Excavación convencional combinada con colocación de anclas
- Concreto lanzado y en algunos casos drenes de alivio
- Uso de explosivos combinado con anclas, concreto lazado y drenes en caso necesario.

En suelos mixtos (suelos blandos y duros):

- Pilas secantes
- Excavación convencional

Para el caso de construcción de **lumbreras en suelos blandos**, ( típicos del Valle de México, debido a sus orígenes lacustres), experiencias previas, durante la construcción de colectores, cárcamos profundos y cimentación de edificios han permitido estudiar con especial cuidado las condiciones geométricas y mecánicas de la excavación para seleccionar el procedimiento constructivo más adecuado de tal suerte que se eviten los dos tipos más comunes de falla en estas estructuras:

### **1. Falla de fondo**

Se presentan levantamientos de fondo, en estructuras además lateralmente, cuando la profundidad esta cercana a sobrepasar los 10 m.



## 2. Extrusión

Las paredes de la lumbrera fluyen colapsando de esta manera la estructura (deslizamiento de talud), se puede presentar entre los intersticios de un ademe abierto, cuando la profundidad es mayor a los 15 m.

Los métodos constructivos han de considerar estas posibilidades de falla para aplicar el método más adecuado.

En los suelos blandos los procedimientos más comunes son:

- ❖ Lumbrera flotada.
- ❖ Muro Millan.
- ❖ Anillos.

Cabe aclarar que existen más métodos sin embargo estos son los de mayor aplicación en la actualidad, con los que se resuelven el tipo de proyectos para desalojo de agua residual en el valle de México.

Los procedimientos antes mencionados para la construcción de lumbreras en suelos blandos tienen en común las primeras etapas de construcción, variando al final del proceso según las características del suelo sobre el cual se construirá la lumbrera. Enseguida se describirá de forma simplificada las etapas comunes entre los métodos mencionados en la construcción de lumbreras.

1.- **Construcción de Brocales.**- Son los elementos guías y de protección al borde de la excavación que alojara el lodo autofraguante de la pantalla perimetral. Para estos propósitos será necesaria la construcción de dos los brocales uno exterior que es definitivo y uno interior que es provisional, el colado de estos elementos es en una sola etapa.



2.- **Pantalla perimetral.**- también conocido como muro pantalla consiste en excavar con almeja y equipo guiado entre los brocales y colocar lodo autofraguante por tableros alternados, formando un cilindro que ayudará a estabilizar las paredes de la excavación para la construcción de la lumbrera.

3.- **Relocalización del brocales.**- Construcción de brocal exterior definitivo, demolición y reubicación del brocal interior provicional y excavación para zanja perimetral rellena de mortero.

4.- **Excavación del núcleo.**- En esta etapa se retira el brocal interior (provisio-  
nal) y se extrae el material que queda en el interior del cilindro formado por la  
pantalla perimetral y se sustituye el material excavado por lodo bentonítico, la  
excavación se efectúa con la almeja loca para el método de flotación, o retroex-  
cavadora con otros métodos, hasta la profundidad deseada.

5.- **Muro perimetral y trabes de liga.**- Es la etapa final del proceso, consiste  
en la construcción del muro de la lumbrera con lo cual queda concluida la  
construcción de la estructura dando el diámetro de proyecto. Esta etapa de-  
pende del procedimiento aplicado.

### **Método de flotación**

Excavado el núcleo y estabilizado con bentonita se procede a colocar el tanque de flotación, sobre el cual se construirá la losa de fondo, conforme se va sumergiendo el tanque se va evacuando el lodo bentonítico de la excavación y por etapas se va colando el muro de la lumbrera hasta alcanzar la profundidad de proyecto. Una vez concluido el muro de la lumbrera se inicia la construcción de las trabes de liga que unirán la estructura de la lumbrera con el brocal exterior definitivo, se inicia la inyección de la zanja perimetral y fondo de la excavación incluyendo el tanque de flotación.



## **Muro Millan**

La pantalla perimetral es construida con concreto reforzado, y al momento de excavar el núcleo quedará como muro de la lumbrera, y finalmente se liga con el brocal exterior definitivo. Es importante mencionar que se puede reforzar con anillos circulares de acero.

## **Método de anillos**

En este método en lugar de colocar una pantalla perimetral se van colocando anillos de concreto que al ensamblarse van formando el muro perimetral, el núcleo se va excavando conforme se van colocando los anillos hasta la profundidad de proyecto, concluido el muro se procede a la construcción de las trabes de liga.

En cuanto a las características de las lumbreras, el diámetro de diseño se determina según la función que vaya a cumplir dicho elemento y del espacio físico disponible para su construcción, distinguiéndose dos tipos de lumbreras:

1. Lumbrera principal o de ensamble.
2. De operación y mantenimiento.

La lumbrera principal o de ensamble, esta estructura tiene un diámetro mayor que la de operación y mantenimiento, es por medio de este tipo de lumbrera por el cual se introduce y se extrae equipo necesario para la construcción del túnel, tomando en cuenta sus prolongadas dimensiones por ejemplo el escudo EPB, y demás maquinaria requerida en el proceso de construcción del túnel.



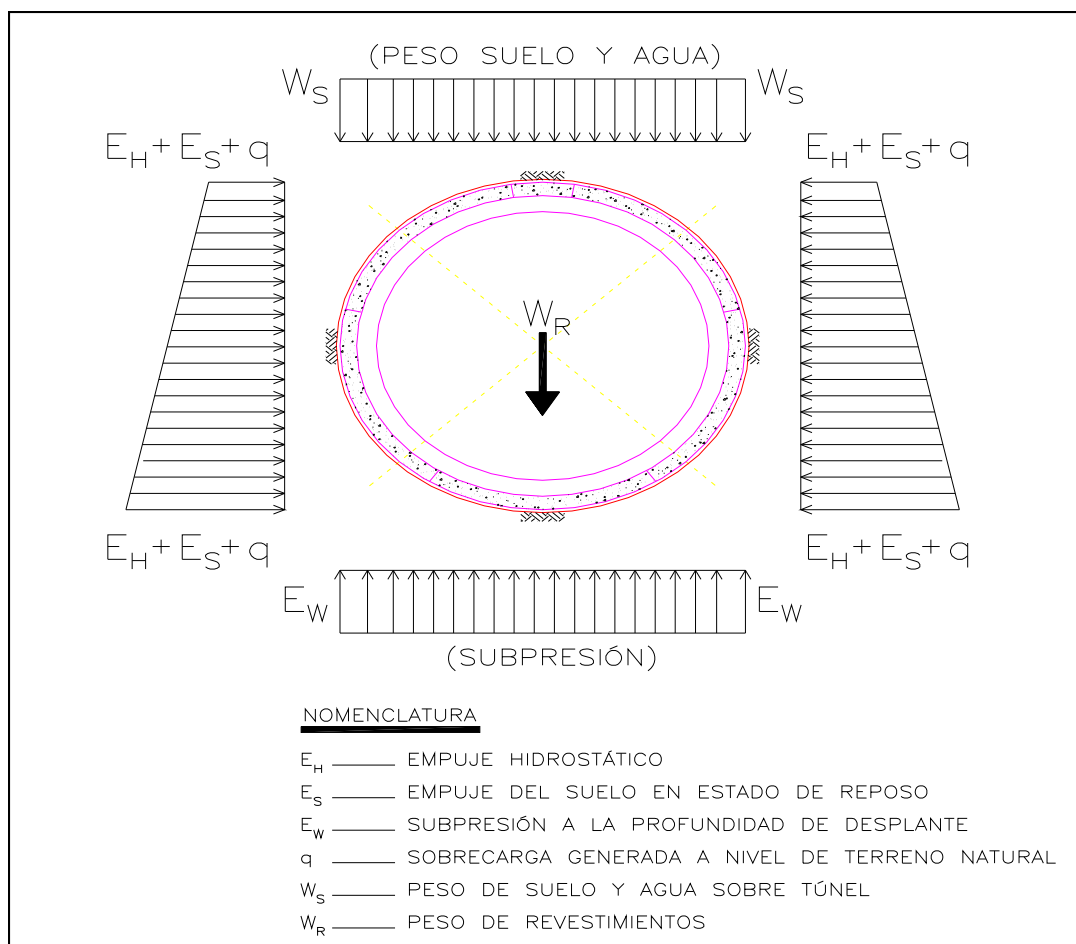
**Fig. 2.1.1 Lumbra de operación y mantenimiento.**

La lumbra de operación y mantenimiento, es de menor diámetro y permite dar mantenimiento a los equipos que se encuentran trabajando dentro del túnel, así como suministrar materiales necesarios en la construcción de este, tales como acero, concreto, etc. Además de la evacuación de rezaga, suministro de materiales, maquinaria y equipo necesarios en los frentes. Por otro lado estas estructuras ayudan a mantener ventilado el túnel durante y después de la construcción, funcionan como respiradero al concluir la construcción de la obra.

## 2.2 DOVELAS

Las dovelas son elementos constructivos, prefabricados, de concreto reforzado, que conforman arcos, anillos y bóvedas, que garantizan la estabilidad del frente, según las características del suelo, pueden funcionar a largo plazo (revestimiento primario es a la vez el definitivo) ó corto plazo, hasta colocación de revestimiento definitivo. Deben ser capaz de resistir los diversos esfuerzos a los que se someta la estructura tales como:

- Cargas verticales
- Empujes laterales
- Y reacción del suelo en la parte inferior



**FIG. 2.2.1 Cargas que actúan sobre túnel y suelo**



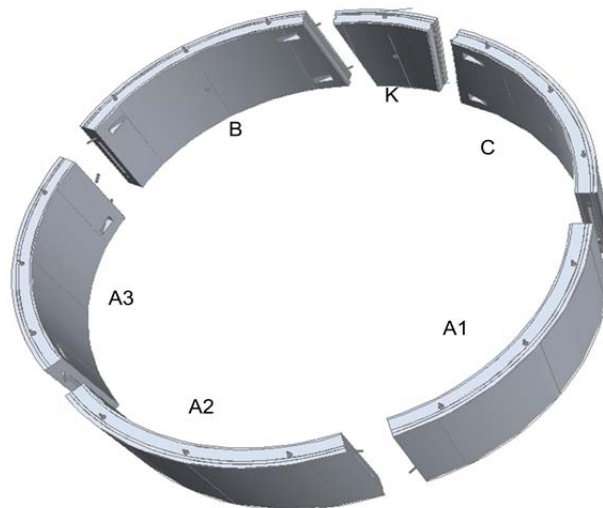


Fig. 2.2.2 Dovelas para soporte inicial en túneles

En cuanto a la geometría de los anillos, pueden ser como se muestran en la Fig. 2.2.3.

De caras equidistantes

- Anillos trapezoidales
- Anillos universales

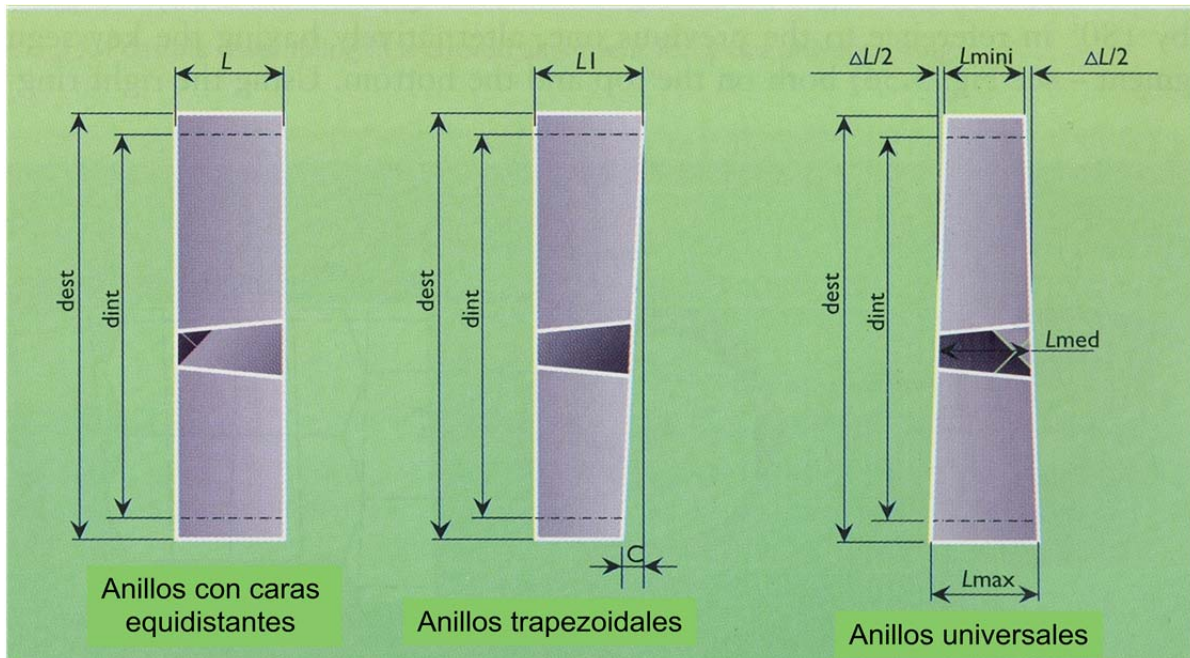


Fig. 2.2.3 Geometría de un anillo

Los anillos de caras equidistantes y trapezoidales, son utilizados en conjunto, los de caras equidistantes son utilizados para revestir tramos cuyo eje del trazo es recto y los trapezoidales o correctivos permiten el revestimiento de curvas tanto en plano horizontal como en perfiles o para corregir pequeñas desviaciones accidentales causados por la TBM. y así regresar al trazo del túnel, es decir se complementan estos dos tipos para dar el trazo requerido.

La principal desventaja que presentan estos anillos es que se deben fabricar ambos tipos y tenerlos preparados en el lugar de trabajo.

En la actualidad la tendencia es trabajar con anillos universales ya que permiten mayor versatilidad en los trabajos y no se requiere la fabricación de piezas especiales o de ajuste, con este tipo de anillos es posible trabajar en tramos rectos así como seguir trazos curvos tanto en dirección horizontal como vertical.

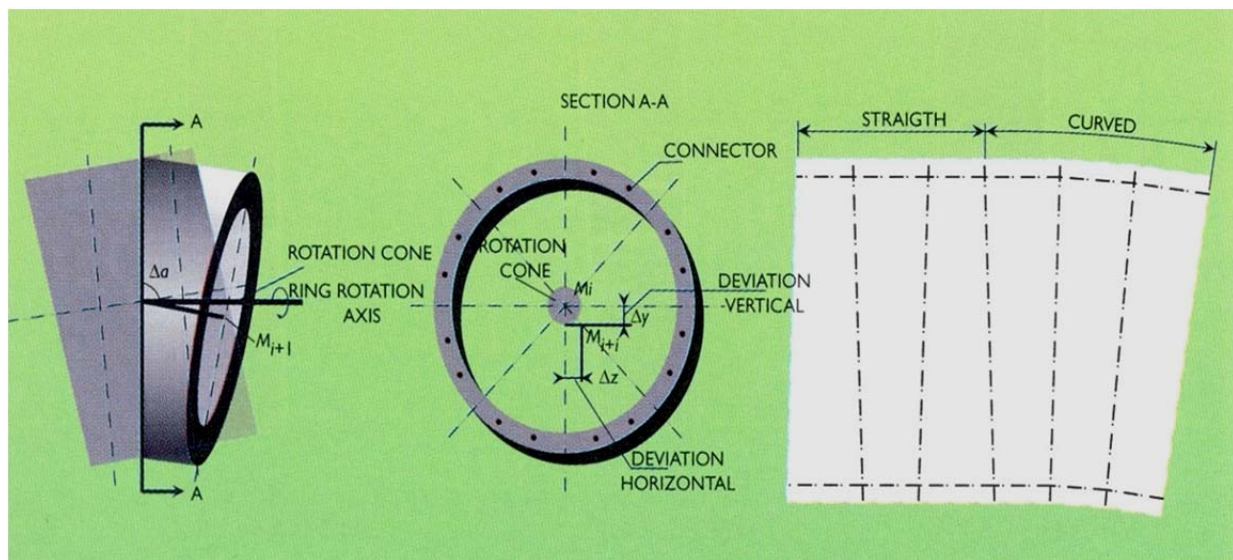


Fig. 2.2.4 Anillos universales en revestimiento de túneles

Mediante el adomado con dovelas se forman anillos, un anillo se compone de “n” piezas de forma troncocónica, las cuales dependen del diámetro a revestir así como del tipo de escudo que se emplee, en general se componen por piezas A, B, C y K, donde la pieza K es llamada cuña y por medio de esta es como que-



da conformado cada anillo, los anillos pueden adoptar varias posiciones según se necesiten (anillos universales) del tal manera que se ajusten al trazo del túnel. Para hacer la unión de las caras laterales o de dovela a dovela se utilizan tornillos, también llevan juntas o sellos flexibles que permiten el sellado entre anillo y anillo para evitar fugas de la inyección de mortero así como del material del terreno.

Otra característica importante de las dovelas es la impermeabilización de las piezas, esta queda garantizada por varios factores, tales como la buena calidad del concreto y de los procesos de fabricación de la piezas, como un adecuado curado para evitar formación de grietas y adecuada transportación para evitar fracturas en los elementos, sin olvidar un cuidadoso colocado de los sellos entre la unión de dovelas.

La construcción de las dovelas, se lleva a cabo en plantas automatizadas, las cuales pueden ser de dos tipos:

### **1. Planta estacionaria**

Los moldes permanecen fijos en un solo lugar, por lo que es necesario acercar los recursos (concreto, acero, insertos, etc.) hacia este para la fabricación de la dovela, este tipo de plantas no es recomendable para proyectos grandes ya que los costos en la mano de obra se incrementan demasiado.

### **3. Planta de carrusel**

En este caso los moldes se mueven a través de una línea de producción durante todo el proceso desde la colocación del armado hasta el túnel de curado. Este tipo de plantas presentan mayor eficiencia que los sistemas estacionarios.

La elección de cualquiera de estos sistemas está en función de la magnitud del proyecto, cantidad de piezas a fabricar y los costos de instalación de la planta,



en cuanto a las áreas requeridas para la planta se requieren revisar tres aspectos muy importantes:

- a) dimensiones de la nave, dependen principalmente del número de moldes en la línea de producción, y la cámara de curado.
- b) dimensiones de los patios de almacenaje.- aquí es importante considerar que para la colocación de las dovelas es necesario que los elementos alcancen el 100% de su resistencia, lo cual sucede a los 28 días el mismo tiempo que se tendrán que tener almacenadas antes de darles salida como consecuencia de esto se deben provisionar un mes de fabricación para su envío al frente de excavación, otro aspecto a considerar es el balance entre lo requerido para la colocación y lo producido en la planta ya que los rendimientos son diferentes, esto debido a problemas que se presentan durante la excavación o paros necesarios, por ejemplo para el paso del escudo a través de las lumbreras de un tramo a otro.
- c) áreas de servicio.- Una vez obtenidas las áreas tanto de la nave como de la superficie de almacenamiento se procede a obtener el área correspondiente a los servicios necesarios para que funcione correctamente la planta tales como; vialidades, oficinas, almacén, comedor, vestidores, vigilancia, enfermería, etc.

Una vez que se tienen los espacios definidos para cada unidad o modulo se inicia la construcción de la nave, así como todos los trabajos necesarios que harán que opere correctamente, concluida la construcción se está listo para iniciar con la producción de las dovelas.

En general el proceso que se lleva a cabo para la elaboración de las dovelas es el siguiente:

- Limpieza del molde y aplicación de desmoldante
- Colocación de acero de refuerzo e insertos.



- Colocación y vibrado del concreto
- Pulido y acabado de la pieza
- Transporte del molde a las cámaras de curado a base de vapor
- Desmolde y desalojo de la pieza
- Inspección y control de calidad.
- Volteo de la pieza
- Almacenaje
- Transporte de dovelas a la zona de almacenamiento donde adquieren la resistencia de proyecto.
- Transporte al frente de excavación.



## 2.3 EXCAVACION

El proceso de excavación de túneles en suelos blandos actualmente en México es realizado por medio de escudo los cuales existen de diferentes tipos, estas maquinas permiten a la vez que excavan estabilizar el frente e ir colocando el revestimiento primario a base de dovelas de concreto armado.

Se entiende como excavación a todos los trabajos necesarios para el retiro y estabilización del terreno sobre el que se construirá el túnel en el caso de excavación de túneles en suelos blandos, la excavación consiste de cuatro etapas:

### 1.-Excavar

Es la etapa en la que se retira parte del subsuelo donde se alojara el túnel, sin afectar al entorno, ni características iniciales de la configuración del suelo (hundimientos), en este caso como se menciona anteriormente, sobre suelos blandos, se facilita la tarea utilizando escudo o túneladora.

### 2.- Rezagar

Es la actividad mediante la cual se extrae el material excavado y es conducido hacia la superficie para ser transportado al tiro. Se puede llevar a cabo por medio de bandas transportadoras, bombas centrifugas ó bombas de pistón, siendo estos métodos los más comunes, aunque existen otras formas. Es importante contar con un adecuado sistema de rezaga ya que de esto depende un rendimiento óptimo de los trabajos y por lo tanto un mayor avance del frente.

Rezagar por medio de **bandas transportadoras**, consiste en una banda continua donde se deposita la rezaga para ser expulsada del frente, proporciona un buen rendimiento en espacios relativamente pequeños y poca mano de obra, con lo que se garantiza un retiro rápido del material excavado, es una solución limpia y reduce el peligro de accidentes, permite además su implementación en curvas cerradas de radio menor a 200 m.

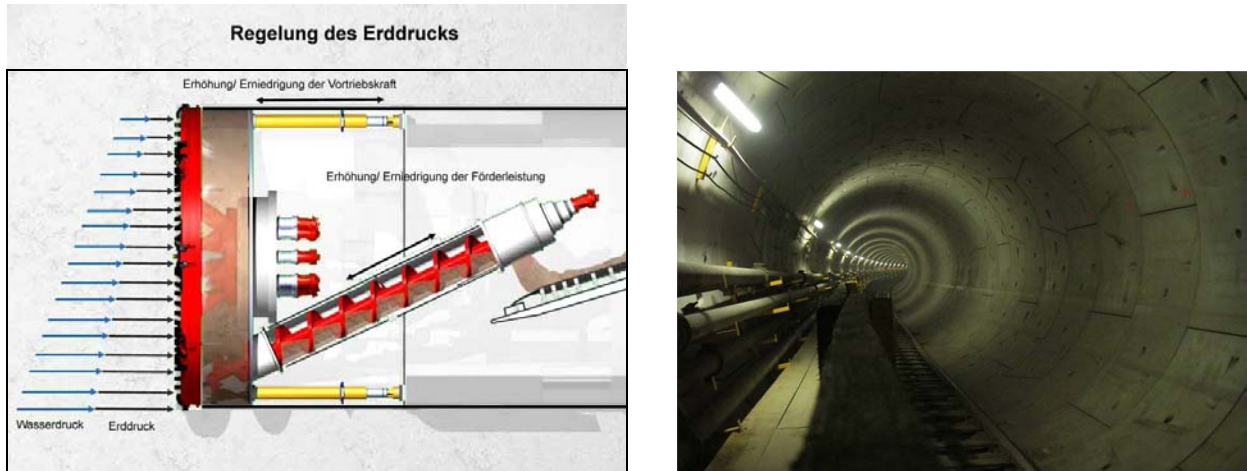


Fig. 2.3.1 Método de extracción de material excavado por medio de banda transportadora

La evacuación de rezaga por medio de **bombas centrífugas** se da por medio de un mezcla de lodo y material excavado, la cual es extraída por medio de una tubería conectada a la cámara de excavación, esta mezcla se efectúa en la cámara de excavación, para hacer que el material excavado pueda ser bombeable, el lodo será suministrado desde la superficie por otra tubería hacia la cámara.

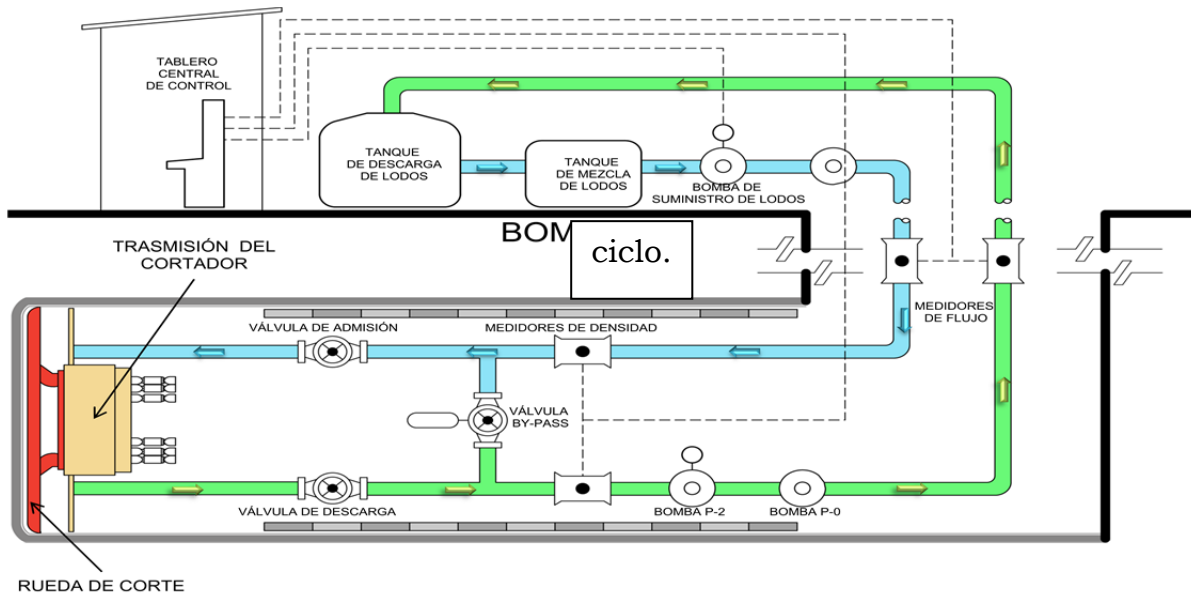


Fig. 2.3.2. Esquema de planta para separación de lodo

una separación de lodo y el material excavado se realiza en la estación de regulación de una planta de tratamiento de lodos donde se separa ambas partes, y una vez

separadas es nuevamente transportado hacia la cámara para iniciar un nuevo ciclo. Conforme la distancia de evacuación aumenta es posible la colocación de más bombas para el traspaleo del material, lo que dependerá de la longitud a la que se encuentre la excavación desde el frente de trabajo hasta la superficie.

La extracción por medio de **bombas de pistón**, es un método, en donde el lodo debe estar saturado de tal forma que tenga la plasticidad adecuada para ser bombeado por medio de la tubería y la bomba de pistón, la cual se encarga de desplazar el material bombeado creando un flujo.

Las ventajas de este método son: ahorro de espacio para conducir tuberías en un pequeño túnel, transporte limpio y seguro de la rezaga excavada sobre distancias largas de alto rendimiento.

La mezcla de componentes sólidos y líquidos en un lodo debe ser tal que da lugar a una masa plástica deformable. Se debe tener especial cuidado con el lodo, es decir que este cuente con la fluidez adecuada y que no caigan dentro de la bomba obstrucciones que puedan dañar la bomba, por lo cual llevan unas rejillas o trampa que las protege de obstrucciones.



**3.- Estabilización del frente** Fig. 2.3.4 Material rezagado con bomba de pistón





Consiste en presurizar el frente de excavación con el propósito de mantener inalterado el estado de esfuerzos que se tenían antes de la excavación, su fin es que no se altere o modifique la configuración original del terreno por encima de la excavación y que no sufra hundimientos ni abultamientos, además debe mantener seguro el frente de trabajo, tal propósito se puede lograr por varios métodos y depende de la túneladora con que se realicen los trabajos se pueden destacar los siguientes:

- Rejillas
- Tableros verticales accionados por gatos hidráulicos.
- Aire comprimido
- Lodo a presión
- Con el propio material

Estos métodos se describirán más adelante cuando se vean los equipos de utilizados para la excavación.

#### **4.- Estabilidad del túnel o de las paredes**

Consiste en colocar con o sin ayuda del escudo, el soporte inicial del túnel o también llamado revestimiento primario, para recibir con *seguridad* los empujes que le induce el terreno vecino. Tradicionalmente, este soporte se ha resuelto con el uso de anillos de dovelas de concreto armado. Sin embargo se han aplicado otras técnicas con el mismo objetivo, las cuales se ilustran a continuación.

- Concreto lanzado y anclas

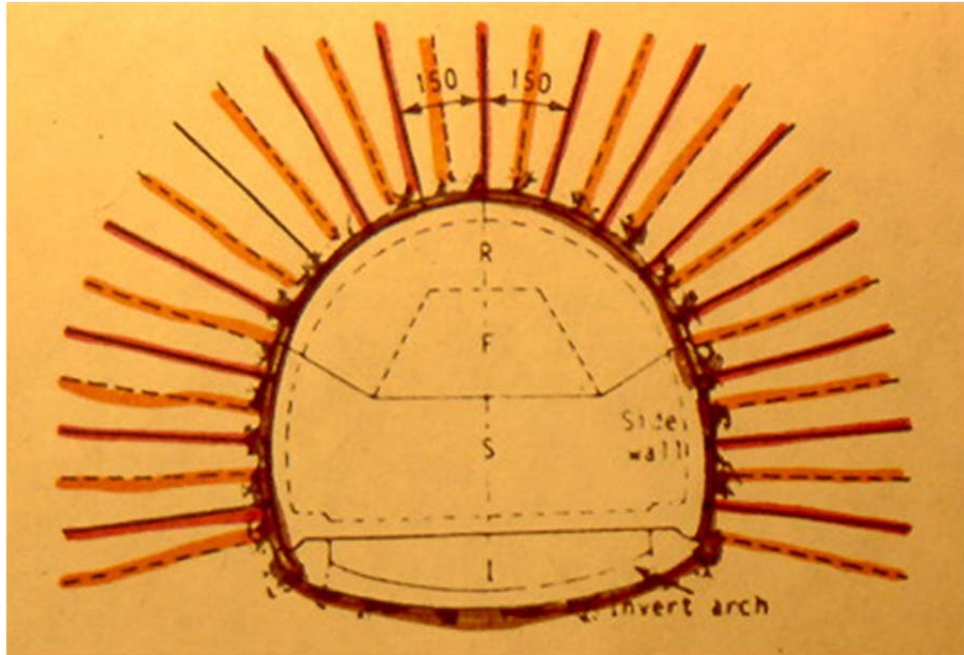


Fig. 2.3.5 Estabilizado de las paredes del túnel por medio de concreto lanzado y anclas.

- Anillos metálicos y polines de madera.



Fig. 2.3.5 Estabilizado de paredes del túnel por medio de anillo metálico y polines.

- Dovelas de placa metálica



**Fig. 2.3.6 Estabilizado de paredes del túnel por medio dovelas de placa metálica**

Las actividades preliminares al inicio de la excavación comprenden trabajos tanto en superficie como en el fondo de lumbrera mediante las cuales se proveen de las estructuras y equipos necesarios para el correcto desarrollo de los trabajos relativos a la excavación, los cuales se mencionan a continuación.

### **1. En superficie**

Corresponden a la distribución de las instalaciones, con base en planos, de tal manera que no interfieran en la bajada y ensamble del escudo en el fondo de la lumbrera, estas actividades comprenden la ubicación de los patios para la recepción de la túneladora y los equipos que la componen, así como la construcción de una plantilla o losa de concreto misma que posteriormente servirá como patio de almacenaje de dovelas, ubicación de la zona de bajada de dovelas (grúa pórtico), subestación eléctrica, líneas de agua, luz y aire, talleres, bodegas, ves-



tidores, planta de inyección y oficinas, disposición de un lugar para recepción de la rezaga (mampara de rezaga), de igual forma es importante contar con un sistema para el acceso y salida del personal de obra (escalera de caracol y un elevador).

## 2. **En fondo de lumbrera.**

Son las instalaciones cuya objetivo es facilitar la entrada de la túneladora, es decir ponerla en contacto con el terreno para iniciar los trabajos de excavación y posteriormente facilitar las maniobras de suministro de recursos al interior del túnel, consisten en tres estructuras principales:

- a) Trabe de borde.- Su función es la de soportar el empuje del terreno en la zona de entrada o salida del escudo, transmitir los esfuerzos al muro de lumbrera de tal manera que trabajen juntos tanto la trabe de borde como el muro de la lumbrera, es por ello que el armado de este elemento se anclara al del muro de lumbrera, siendo necesaria la demolición de una parte del muro de la lumbrera hasta descubrir el acero de donde se sujetara el armado del portal. Se incluye en la construcción de este elemento la colocación de placas metálicas de forma trapezoidal en todo el perímetro con la finalidad de colocar un sello de neopreno que selle la holgura que queda entre el escudo y la trabe de borde y evitar que salga material por la presión del equipo así como el mortero que se inyectara en los primero anillos.
- b) Cuna de recepción del escudo.- Puede ser de concreto reforzado o de acero, su finalidad es proporcionar un apoyo al desplazamiento del escudo durante los empujes al inicio de la excavación.
- c) El muro de atraque.- Es una estructura de concreto reforzado que va anclada al muro de la lumbrera, transversal al eje del túnel que junto

con la estructura de reacción permiten que se apoyen las dovelas (provisionales) sobre las que se apoyaran los gatos hidráulicos del escudo durante los primeros empujes de este, dicha estructura transmite los empujes al muro de la lumbrera de tal manera que las cargas en el muro sean lo más uniforme posibles.

- d) Plataforma de trabajo.- Esta facilita las maniobras ya que permite un mayor espacio de trabajo para el suministro de materiales y equipos necesarios en el túnel, se instala una vez que ha entrado la túneladora completamente y se han retirado los troqueles y anillos de atraque.

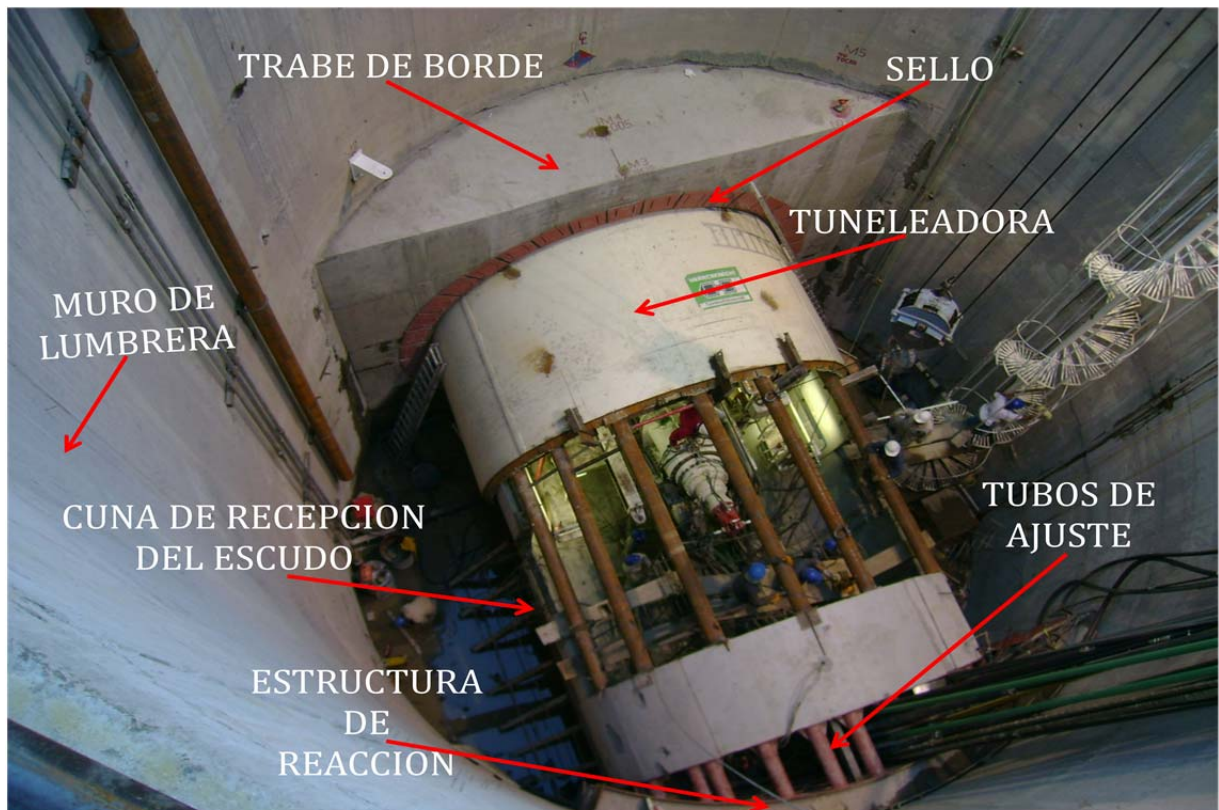


Fig. 2.3.7 Instalaciones en el fondo de lumbrera



A continuación se presenta la secuencia llevada a cabo durante la bajada del escudo y puesta en marcha o arranque de la excavación.

1. Posicionamiento inicial de la cuna en el fondo de lumbrera
2. Descenso del escudo medio
3. Descenso del escudo frontal con motores acoplados
4. Descenso de la rueda de corte
5. Ensamble de la rueda de corte al escudo e inicio de la demolición del núcleo de la lumbrera.
6. Empuje de la cuna con el escudo y colocación del sello de neopreno
7. Adición de la cuna de complemento
8. Empuje del escudo hacia el interior del portal
9. Descenso y colocación del erector de dovelas y tornillo sin fin
10. Descenso y colocación del faldón
11. Colocación del muro de atraque y comienzo de las conexiones hidráulicas y eléctricas.
12. Colocación de anillos y troqueles de atraque para transmitir el empuje del escudo al muro de la lumbrera.

Colocado el muro de reacción se conectan las mangueras y cables necesarios para el escudo y la cabina de mando, una vez conectados los equipos del escudo se procede a hacer las pruebas correspondientes tanto en los sistemas de avance, corte, extracción de material, articulaciones, etc. Para asegurarse de que todo funcionara adecuadamente al comienzo de la excavación.

Una vez que se han probado los equipos y que funcionan correctamente, la siguiente etapa consiste en la instalación de los primeros anillos auxiliares llamados “anillos de atraque”, en el fondo de la lumbrera, cuya función será permitir el apoyo o soporte para que avance el escudo en los primeros metros de



excavación y colocación de dovelas, estos anillos provisionales quedan ubicados entre el muro de reacción y el faldón, la bajada de las dovelas para este fin se realiza por medio de una grúa, la cual baja pieza por pieza hasta el fondo de la lumbrera, estas dovelas son introducidas entre el faldón y el muro de atraque, una vez en el fondo, son llevadas hasta el brazo erector del escudo por medio de “tilfors” donde se colocan en su posición correspondiente, la cantidad de anillos de atraque dependen del diámetro de la lumbrera.

Colocados los anillos de atraque necesarios se procede entonces a la demolición del mortero colocado en el portal, teniendo el cuidado de que permita la entrada del escudo y que el sello de neopreno cubra completamente la camisa del escudo y que cumpla con su función de contener la presión que se ejerce entre el escudo y el portal. Una vez que el anillo coincide con el portal se ajustan las placas que sujetan el anillo perimetral hasta quedar casi en contacto con el anillo de dovelas.

Terminada la demolición del mortero se inicia el accionamiento de los cilindros hasta tener un avance suficiente (1.6 a 1.9 m aprox.) para la colocación del siguiente anillo, ya que avanza el escudo se retiran los cilindros de propulsión y se coloca el anillo. Estos primeros anillos de la excavación se refuerzan por medio de tubería de acero en la parte superior para que el escudo pueda trabajar de manera adecuada.

Colocados los primeros cuatro anillos ya se debe tener listo el equipo para iniciar la inyección a base de mortero y bentonita para rellenar las oquedades que se presentan en la zona anular del túnel dejada por el escudo entre la dovela y el terreno una vez que los anillos quedaban expuestos o liberados del faldón.

Los primeros metros de excavación se realizaron solo con el escudo, el tren de equipos y la cabina de mando se encuentran en superficie desde donde se reali-



za el control y monitoreo del escudo, el resto del equipo se baja según se va presentado el avance.

En un principio el lodo se saca por medio de botes maromeros o artesas y con ayuda de una grúa hacia la superficie, hasta que se cuente con el espacio suficiente para la instalación de la tubería por la que se desalojara el lodo hacia la superficie.

Las dovelas bajadas al fondo de la lumbrera son transportadas hasta el erector por medio de plataformas lo que permitía dejar las dovelas al alcance del brazo erector para su colocación, de esta manera se trabaja hasta contar con la distancia necesaria para bajar el tren de equipos de la túneladora.

Conforme se van presentando el avance y longitudes necesarias para la instalación del tren de equipos, este se va bajando al frente, para lo cual se hace una pausa para las conexiones necesarias, esto sucede en la bajada de cada carro, se aprovecha también para hacer las instalaciones necesarias dentro del túnel, tales como iluminación, tubería de rezaga, el cambio california, instalación de teléfono, etc.

La colocación de anillos subsecuentes sigue la siguiente secuencia, en una túneladora EPB:

- a) Se comienza el empuje de los gatos programados del escudo, los cuales reaccionan con el anillo anterior e impulsan el escudo contra el terreno, obteniendo de esta manera el espacio en el que se alojara la primera dovela del anillo.
- b) Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición que ocupara la nueva dovela.





- c) La dovela es tomada por el brazo erector y trasladada a su posición de colocación.
- d) Se sujeta la pieza por uno o dos gatos del escudo según su posición y se retira el brazo erector para ir por la siguiente dovela.
- e) Se retraen los gatos para alojar la siguiente pieza y se hacen coincidir los orificios de los elementos de sujeción y se atornillan.
- f) De nueva cuenta se apoya uno o dos gatos según convenga para liberación del brazo erector.
- g) Se repiten las actividades de los incisos “b” a “f” hasta completar el armado de un anillo más, entonces se está en condiciones de realizar otro empuje para la colocación del siguiente anillo.

La colocación de las dovelas fue traslapada de acuerdo a su construcción geométrica evitándose de esta manera líneas de falla longitudinales.

Paralelo a la excavación y colocación de los anillos se va inyectando lechada que como se había mencionado anteriormente para rellenar el espacio anular entre el terreno y las dovelas con el objeto de evitar movimientos del terreno (hundimientos superficiales) para lo cual se instala en superficie una planta de inyección. Aunado a estas actividades se colocan durmientes con espaciamientos adecuados para el tránsito del tren de equipos, carros y locomotoras que abastecerán de lo necesario durante la excavación.

Durante el desarrollo de los trabajos de excavación es necesaria la construcción de pozos auxiliares mediante los cuales se extraerá material producto de la excavación por medio de una línea de tubería y lo conducirá hasta la superficie hasta mamparas de rezaga y de esta manera lograr mantener los rendimientos del escudo.

Finalmente se da por terminada la excavación de un tramo cuando llega la túneladora a la lumbrera siguiente es cuando se realizara un paro para verificar las condiciones en las que se encuentra el equipo después de recorrer el tramo, cambiar los dientes de la rueda cortadora, darles mantenimiento y hacer reparaciones de ser necesario, previamente se inician los preparativos en la lumbrera de llegada para la recepción de la túneladora; como demolición de las preparaciones de mortero, colocación de la cuna y nivelación, etc. Y se procede a aplicar el mismo procedimiento de excavación del tramo anterior.



**FIG. 2.3.8 Cruce del escudo por lumbrera de un tramo a otro**



## 2.4 EQUIPO UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES PARA DESALOJO DE AGUA RESIDUAL

### ❖ EQUIPO UTILIZADO EN LA EXCAVACION

La ejecución de los trabajos de excavación para un túnel en suelos blandos requiere esencialmente de un escudo que cumpla con las funciones de excavar, rezagar y estabilizar el frente y las paredes del túnel, grúas para suministro de materiales y equipo al frente de excavación, equipo de ventilación, planta de inyección de mortero y finalmente planta generadora de electricidad.

#### ▪ Escudos

Un escudo consistente en un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel, sirve para resistir las presiones del terreno mientras el revestimiento se va construyendo dentro de esta protección.

El tuneleo con escudo ofrece las siguientes ventajas esenciales:

- 1) La excavación del túnel puede hacerse a sección completa.
- 2) Ofrece un soporte constante al terreno, en todas direcciones.
- 3) Facilita el trabajo de construcción.
- 4) Evita deformaciones excesivas del terreno, reduciendo los asentamientos en la superficie.

En general se conocen dos tipos de escudos; de frente abierto y frente cerrado, sin embargo son de mayor aplicación en la actualidad los de frente cerrado.

#### 1. Escudo de frente abierto

El escudo de frente abierto, es un cilindro de acero rígido abierto en ambos extremos; provee facilidades a su frente para la excavación del terreno y en su parte posterior para la erección del revestimiento prefabricado. El escudo es impulsado hacia adelante por pasos manteniendo armonía con el avance de ex-



cavación y el trabajo de erección del ademe primario, de manera que el frente quede bien soportado hasta que se cuele el revestimiento final, en caso de que se requiera.

Este tipo de escudos ha sido utilizado para excavar en materiales de Zona de Transición y en algunos de Zona del Lago.

Dentro de los escudos de frente abierto se distinguen tres tipos utilizados para excavación de los primeros túneles para drenaje en el Valle de México los cuales se mencionan a continuación.

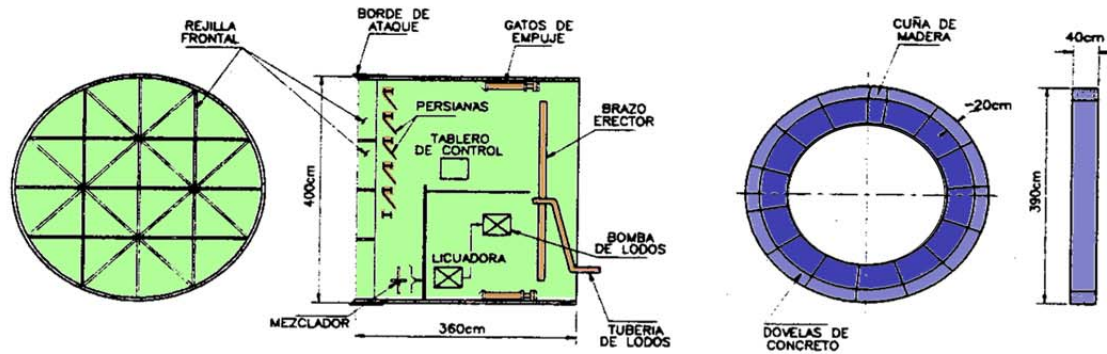
### **A. Escudo de rejillas**

Son de **forma cilíndrica circular**, y el frente que se proyecta hacia la excavación, tiene *una rejilla de placas metálicas* que forman triángulos rectángulos, de aproximadamente un metro de lado.

En su interior, cuenta con *gatos hidráulicos* que se apoyan en el soporte inicial previamente colocado, y que le proporcionan suficiente fuerza de empuje, para **“encajar”** su rejilla frontal. Mediante estos escudos con rejillas frontales, cuyos diámetros han sido de 2 a 4m, entre los años 1961 y 1975 se excavaron casi 10 kilómetros de túneles, principalmente de drenaje. Sus rendimientos han llegado a ser del orden de 200m por mes.

La rejilla frontal cumple con *dos propósitos fundamentales*, forma bloques del suelo arcilloso excavado, para *facilitar su amasado*, licuación y eventual expulsión del túnel, mediante bombas centrífugas, y también *estabiliza el frente*, desarrollando una fuerza de fricción entre el suelo y las paredes de la rejilla.

En la parte posterior de la máquina y con la protección del **“faldón”** se va colocando el soporte inicial del túnel, generalmente formado a base de dovelas de concreto, prefabricadas, que forman anillos circulares.



SEGUN: CRAVIOTO Y VILLARREAL (1969)

**Fig. 2.4.1 Escudo de frente abierto de rejillas**

Estos escudos estabilizan el frente de excavación, mediante una serie de gatos frontales, la excavación se realiza con ayuda de herramientas manuales, y para ello *se subdivide* el área de excavación, en tantas “ventanas” como gatos frontales se dispongan. Cuando la “ventana” correspondiente a un gato frontal, ha sido excavada, se le coloca un tapial de madera, y el gato en cuestión se extiende hasta hacerlo presionar contra lo excavado. Cuando toda el área ha sido excavada y los correspondientes *gatos frontales* se encuentran extendidos, se procede a realizar el empuje del escudo mediante los gatos correspondientes alojados perimetralmente, los cuales reaccionan contra el *anillo de dovelas* del soporte inicial, previamente colocado. Durante ese proceso de empujado, los gatos frontales se retraen simultáneamente, sin perder la presurización frontal asignada.

**Fig. 2.4.2 Escudo con gatos frontales**



## **B. Escudos con Aire Comprimido.**

Es el proceso de excavación mediante el que se *mantiene estable* el frente de trabajo, gracias a la presión de aire que se le inyecta, para lo cual se utilizan esclusas, tanto para el acceso y salida del personal que excava y coloca el soporte inicial del túnel.

A pesar de que la utilización de aire comprimido para la excavación de túneles en otros países a dado buenos resultados su adaptación a las condiciones de altitud del Valle de México, ha requerido una revisión cuidadosa del comportamiento físico humano.

Fue empleado en excavaciones en donde la resistencia al corte era baja y aunado a la presencia de lentes de arena con tendencia a tubificarse y fluir hacia el frente de trabajo llevó a la decisión de construir y operar un sistema de suministro de aire comprimido a baja presión combinado con abatimiento del nivel freático y un escudo de frente abierto.

El diseño del sistema de aire comprimido y las presiones de trabajo necesarias fueron realizados en base a las condiciones de estabilidad del frente, habiéndose definido un rango de presiones de trabajo entre 0.45 y 0.8 atmósferas sobre la presión atmosférica. Este sistema tiene por objeto crear un flujo de aire hacia el frente de excavación, que en el caso de las arenas produzca tensiones capilares y evite el arrastre de las mismas, y en el caso de las arcillas extruibles las haga estables.

Con los *escudos de frente abierto*, se excavaron entre los años 1972 a 1986, casi 15.7 kilómetros de túneles, de los cuales 8.6 se realizaron presurizando el frente con *aire comprimido*.

## 2. ESCUDOS DE FRENTE CERRADO

Los escudos de frente cerrado se emplean en suelos que son inestables (suelos no cohesivos) además de aquellos saturados de agua y en los que existen presencia de arenas, estas máquinas tienen la posibilidad de presurizar el frente para equilibrar las presiones que ejerce el terreno vecino, existen dos tipos de escudos cerrados:

### A. Escudo presurizado con lodo

Este escudo es totalmente mecanizado, realiza el proceso de excavación mediante un disco cortador ubicado al frente, que “rasura” progresivamente al terreno que encuentra en su trayectoria, haciéndolo entrar el material excavado en una cámara presurizada con lodo bentonítico, con el cual se mezcla formando un lodo más pesado, que es expulsado por tubería al exterior del túnel, mediante un sistema accionado por bombas centrífugas, de esa manera se estabiliza el frente, el balance entre el lodo que sale y el que entra permite mantener la presión en el frente.

Al excavar en el suelo arcilloso de la Ciudad de México, es común no adicionar bentonita al sistema, ya que basta con la que contiene la arcilla de la Ciudad de México, y solo es necesario agregarle agua para hacerla bombeable. Ello constituye un significativo ahorro de materiales en el proceso de excavación.

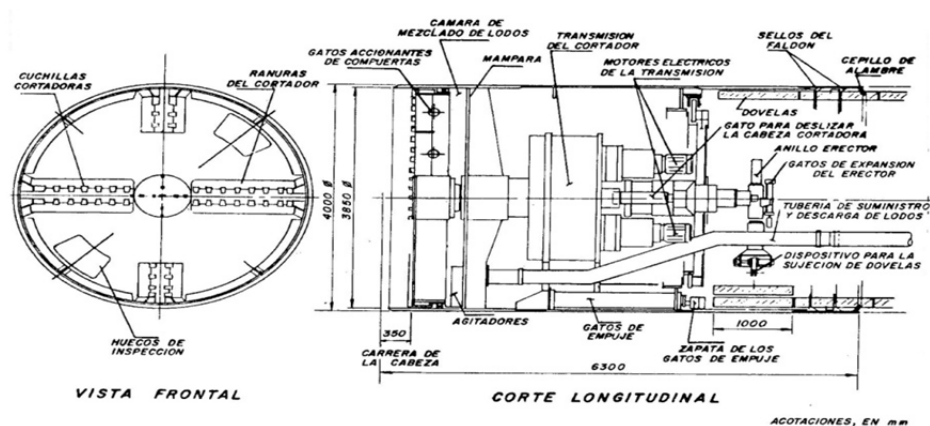


Fig. 2.4.3 Escudo de frente abierto de rejillas

## B. Escudo Presurizado con el Material Excavado

Este tipo de máquinas *presuriza* el frente con el mismo material que está en proceso de excavación, el cual se va extrayendo sistemáticamente de la cámara frontal, con ayuda de *un tornillo sinfin*, que es el accesorio mecánico distintivo de este concepto de máquinas de tuneleo. El tornillo sinfin, viene a ser la “*válvula reguladora*” que controla la presión que debe mantenerse en el frente de trabajo, para evitar descompresión del terreno natural, y con ello desfavorables asentamientos del terreno.

Dependiendo de las características geotécnicas propias del material por excavar, en ocasiones es necesario agregarle ciertos *aditivos*, entre espumantes y plastificadores, que le proporcionan un cierto grado de “*condicionamiento*” para que funcione eficientemente como válvula reguladora, el objeto es obtener una especie de “*masa*”, tan homogénea como sea posible, de manera que se pueda operar a presión dentro del pleno y permita su manejo al utilizar el tornillo transportador para su extracción. Un anillo de dovelas prefabricadas se instala en la sección trasera del escudo y se realiza la inyección de contacto para rellenar el espacio anular entre el terreno y los anillos de dovelas.

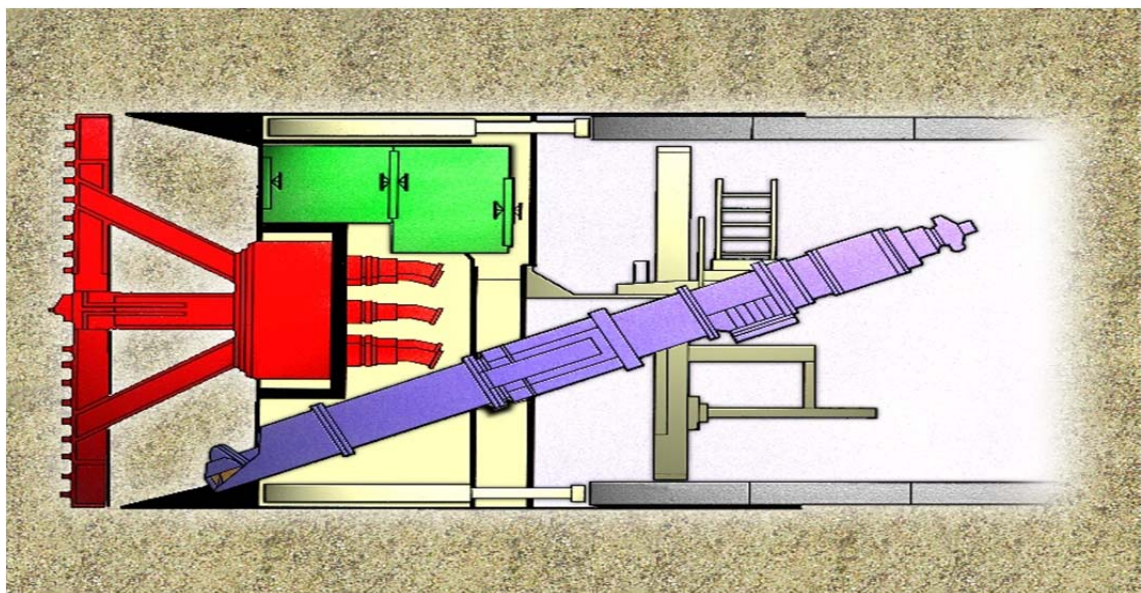


Fig. 2.4.4 Escudo presurizado con lodo



- **Equipo para suministro de materiales y equipo**

Para el suministro de materiales y equipo se emplearon grúas hidráulicas hasta 500 ton. Para descenso y posicionamiento del escudo, los materiales y equipos tales como dovelas, durmientes rieles, tuberías, bombas o transformadores se suministraban por medio de una grúa pórtico o una grúa hidráulica.

- **Ventilación**

Es indispensable contar con un sistema de ventilación que suministre aire fresco al frente y así sanear el medio ambiente, esto se logra mediante la utilización de ventiladores.



Fig. 2.4.5 Ventilación del túnel

- **Planta generadora de electricidad.**

Equipo requerido en caso de emergencia, cuando por cualquier motivo no se cuente con suministro de energía eléctrica y sólo funcionara para mantener iluminado el túnel.



### **Planta de Inyección.**

Esta inyección es conocida como de contacto dovela-terreno, es a base de mortero y se realiza en el espacio anular entre la dovela y el suelo que queda al momento de impulsarse el escudo hacia adelante para la colocación de la primera dovela del siguiente anillo y tiene la función de evitar los asentamientos en la superficie del terreno. Para la realización de tal inyección se requiere de una planta la cual se ubica en superficie y se encarga de suministrar el mortero, sus componentes principales son:

- ✓ Silo para cemento.
- ✓ Silo para bentonita.
- ✓ Tolva de pesado
- ✓ Agitador
- ✓ Tanque de almacenamiento de agua potable.
- ✓ Líneas de conducción



## 2.5 EQUIPO UTILIZADO EN EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Concluida la excavación de un tramo del túnel se llega a la etapa del Revestimiento Definitivo, el cual se debe ejecutar de acuerdo a los diseños realizados.

En general en el revestimiento de túneles, se pueden emplear equipos considerando dos métodos de revestimiento una consiste en la colocación del concreto de revestimiento por medio de cimbra telescópica y la otra es por medio de concreto lanzado, abordaremos el tema iniciando con el equipo requerido en la cimbra metálica telescópica y posteriormente en el de concreto lanzado.

### ▪ CIBRA TELESCÓPICA

El equipo empleado para revestir por medio de cimbra telescópica consiste desde luego en el equipo propio de la cimbra y una serie de accesorios que la complementan como se mencionara a continuación.

#### **Tableros**

La cimbra metálica, en su sección transversal se compone de cinco **tableros** distribuidos de la siguiente manera:

El primer tablero, clave de la cimbra se localiza en la parte superior del elemento y se compone de una pieza.

El segundo y tercer tableros son los laterales, localizados en los costados de la cimbra, uno a la izquierda y otro derecha.

El cuarto y quinto tableros corresponden a la cubeta de la cimbra.

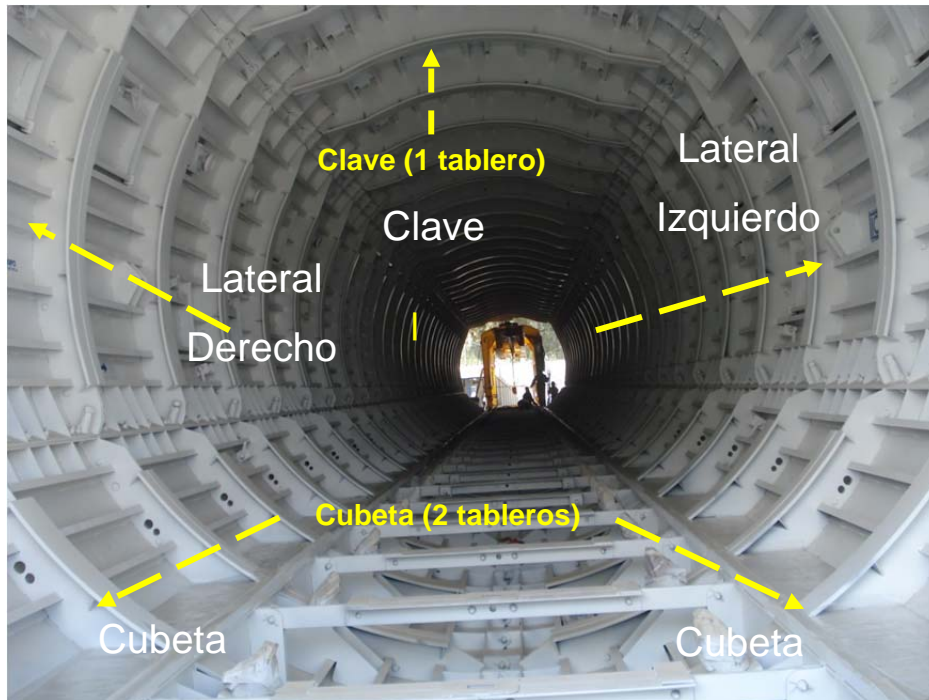


Fig. 2.5.1 Tableros de la Cimbra metálica telescópica.

### Ventanillas

Estos elementos se encuentran en los laterales y clave de la cimbra y permiten suministrar concreto así como verificar el avance de este al interior de la cimbra.



Fig. 2.5.2 Ventanillas de la Cimbra metálica telescópica.

### Piernas de flotación

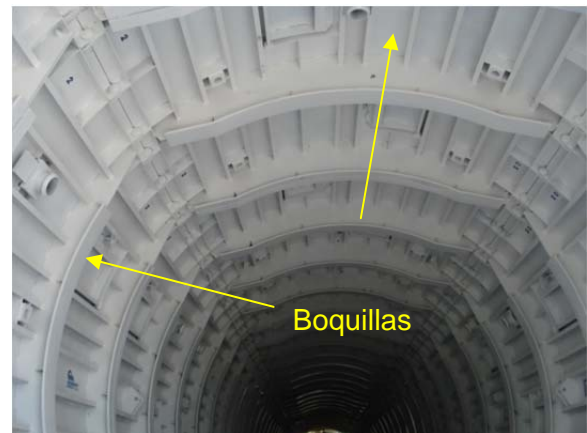
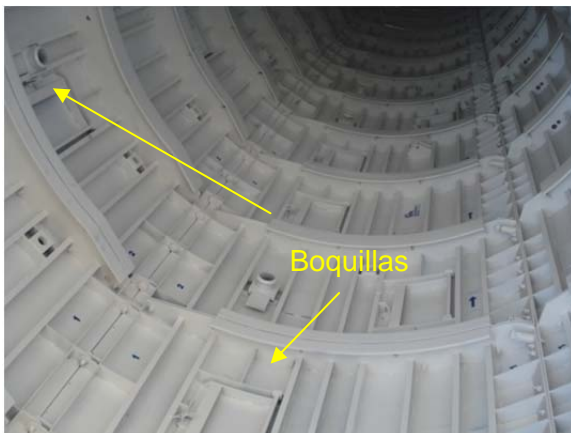
Permiten mantener la cimbra en su posición ya que restringe el movimiento causado por el concreto en toda la superficie perimetral produciendo un efecto de flotación, por otro lado las piernas de la cubeta permiten nivelarla cada que se traslada a una nueva posición.



Fig. 2.5.3 Piernas de flotación de la cimbra.

### **Boquillas para suministro de concreto**

Para la colocación del concreto con un sistema electromecánico de distribución Snorkel, se requiere de boquillas metálicas de colado, permiten la inyección de concreto hacia el interior de la cimbra y se encuentran distribuidas a lo largo de cada tablero de la cimbra, además cuentan con guillotinas de cierre que permiten hacer los cambios de boquilla impidiendo que salga el concreto que se encuentra en la cimbra.



**Fig. 2.5.4 Boquillas para suministro de concreto a la cimbra.**

## Vibradores

Para este tipo de cimbras se emplean vibradores de pared los cuales se alimentarán desde distribuidores existentes en cada sección de la cimbra, se instalan en el primer modulo donde se iniciará el colado, éstos deben estar equipados para poder retirar y ensamblar en sus base de forma rápida, por medio de tornillería que garanticen su fijación durante el proceso de vibrado y su desensamble fácil.

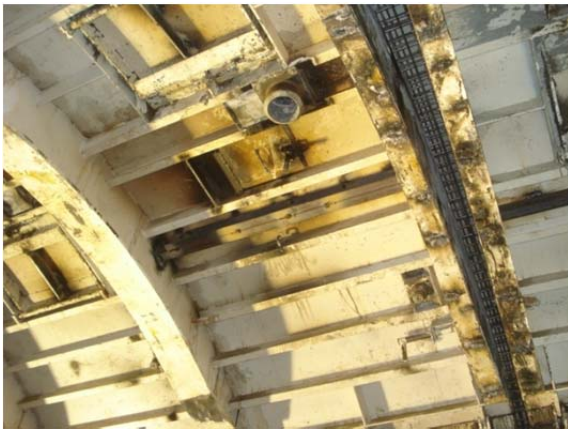


fig. 2.5.5 Vibradores para la cimbra

## Sistema de alimentación eléctrica e iluminación

Se deben colocar las líneas de tuberías conduit de 1" de diámetro para la alimentación de energía eléctrica en cada sección, de módulo por módulo, y de esta conectar las lámparas para el servicio de alumbrado de los módulos, adicionalmente se dejarán contactos tipo intemperie, para la conexión de equipos auxiliares.



FIG. 2.5.5 A Alimentación eléctrica e iluminación

### **Inyección de concreto a la cimbra**

La colocación del concreto es por medio de un sistema electromecánico de distribución llamado Snorkel el cual se trata de un sistema de tuberías articuladas que conectan la línea de conducción del concreto hacia la cimbra metálica, se requiere de boquillas metálicas de colado. La cimbra cuenta con una distribución de boquillas de colado de 5" de diámetro, por lo que se deben verificar las guillotinas de cierre. También se tiene una plataforma para el distribuidor de concreto (Snorkel), durante el proceso de colado se necesita estar desplazando el Snorkel y al final del colado éste distribuidor debe alojarse en una plataforma para poder garantizar el llenado del último módulo de la cimbra.

La plataforma tiene la misma sección de una de las cubetas y la cual se va manipulando colado tras colado con el Jumbo Transportador.



**Fig. 2.5.6** Plataforma del distribuidor de concreto (Snorkel)



**Fig. 2.5.7** Sistema electromecánico de distribución de concreto (Snorkel)



### **Transportador de la cimbra (Jumbo Transportador)**

Es el equipo integrado a la cimbra metálica que permite el armado y traslado de los componentes de esta (laterales o muros, clave y cubeta) hacia su nueva posición colado tras colado.



**Fig. 2.5.8 Sistema transportador de la cimbra**

### **Compresor**

Es el equipo que se encarga de suministrar el aire hacia la cimbra para el funcionamiento de los vibradores y limpieza de la línea de colado.



**Fig. 2.5.9 Compresor para suministro de aire a presión**

### **Bomba para concreto**

Se trata de una bomba de alto alcance y se encarga del suministro de concreto desde la superficie hacia el interior del túnel por medio de una línea de conducción, este equipo debe estar orientado en dirección a donde se realizara el colado.



**Fig. 2.5.10 Bomba para suministro de concreto**

### **Línea de conducción**

Son los conductos por medio de los cuales se suministra el concreto hacia la cimbra y se trata de tubería de 5" de diámetro de alta resistencia HD, calculada para poder soportar presiones del concreto superiores a 120 bar. la tubería se colocará apoyada en la superficie de la cubeta, es importante contar con tuberías estancas y con uniones rígidas que eviten se giren durante el desarrollo del transporte del concreto.



**Fig. 2.5.11 Tubería para transporte del concreto hacia la cimbra**

## ▪ EQUIPO UTILIZADO EN EL LANZADO DE CONCRETO

Para el revestimiento por medio de concreto lanzado vía húmeda se emplea el mismo equipo de suministro de aire y concreto que para la cimbra solo que en este caso se utiliza un robojet o lanzadora para realizar la colocación del concreto.

### **Compresor**

Es el equipo que se encarga del suministro de aire para el correcto funcionamiento del proceso de lanzado, este equipo se encuentra en la superficie y cuenta además con un tanque de almacenamiento que ayuda al compresor a trabajar con mayor efectividad.

### **Robojet o Lanzadora**

Es el equipo proyector de concreto con las características necesarias para conducir y manejar mezclas a través de líneas de mangueras y boquillas, con gravas de tamaños de 1/2" a 3/8" adaptada con líneas de suministro de aditivos acelerantes de fraguado.



Fig. 2.5.12 Equipo para colocación de concreto lanzado

### **Boquilla de lanzado**

Elemento necesario para proyectar el concreto el cual esta equipado con un cuerpo de dosificación de aditivo y aire que adicionara todos los elementos al momento de pasar el concreto.



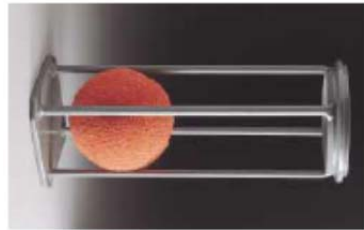
**Fig. 2.5.13 Boquilla para lanzado de concreto**

### **Línea de suministro de concreto**

Es la tubería por medio de la cual se suministra concreto a la lanzadora, desde la superficie con características similares a la línea de suministro de concreto para la cimbra telescópica.

### **Equipo de limpieza**

Son los aditamentos como bolas de esponja y/o tapón de neopreno que permiten la limpieza de forma adecuada de la línea de conducción por medio de aire.



**Fig. 2.5.13 Equipo para limpieza de la línea de conducción**