



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EL USO DE ESCUDOS EN TUNELES

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
FRANCISCO JAVIER ACEVES MAYLLEN

MEXICO, D. F.

1985



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.

"EL USO DE ESCUDOS EN TUNELES"

INTRODUCCION

I. LOS ESCUDOS EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES

- a) Su aparición en la construcción
- b) Estructura de los escudos
- c) Equipo del escudo
- d) Segmentos para ademe
- e) Ciclo de operación
- f) Inyecciones
- g) Abatimiento del nivel freático
- h) Topografía

II. TIPOS DE ESCUDOS

- a) Escudos de frente abierto
 - a.1.) Escudos con cámara de aire comprimido
- b) Escudos de frente cerrado
 - b.1.) Escudos cortadores de frente presurizado con lodos de bentonita
- c) Otros tipos de escudos

III. APLICACIONES EN MEXICO

- a) Túneles del Metro
- b) Drenaje Profundo

IV. CONCLUSIONES

INTRODUCCION

La construcción de túneles es una actividad que se ha desarrollado desde hace varios siglos en la explotación de yacimientos mineros y carboníferos. Actualmente, es una solución para diversos problemas derivados de la construcción de vías de comunicación, obras hidráulicas y sanitarias e incluso obras de índole militar.

La rica herencia histórica, que como país minero tiene México, le permitió adquirir sus primeras experiencias tuneleras, dando su contribución posteriormente a la construcción de líneas férreas y carreteras, en las cuales se ha asociado la solución de túnel en sus trayectorias a través de la accidentada orografía del territorio nacional, debido a las restricciones de trazo y pendiente que gobiernan en dichas obras, disminuyendo a su vez, las distancias en la comunicación de grandes centros de población.

El incesante crecimiento urbano propicia, en cierta medida, la utilización de obras subterráneas, debido a la necesidad de agilizar el transporte, teniendo rutas directas imposibles de localizar en la congestionada superficie, pero disponibles en el espacio generado en el subsuelo, desarrollándose sistemas de transporte subterráneo de gran eficiencia.

Los grandes proyectos hidroeléctricos y de riego, que se han realizado en el país, han permitido acrecentar notablemente las experiencias tuneleras con obras de desvío, vertederos, conductores de presión y cavernas subterráneas para alojar las grandes centrales eléctricas. A partir de la década de los 60's, se inició la construcción de túneles para desagües profundos, tanto en México, D. F. como en Guadalajara, Jal. y otras ciudades de la República.

La tecnología mexicana ha tenido un gran avance, que ha permitido la realización de obras subterráneas de diversas dimensiones y prácticamente en todo tipo de materiales y condiciones, desde rocas sanas, fracturadas ó alteradas, hasta suelos granulares, limosos y arcillosos blandos.

En la actualidad, se han presentado adelantos muy importantes en la excavación de túneles, gracias al empleo de máquinas perforadoras de túneles, llamadas usualmente ESCUDOS.

La aparición de estos artefactos mecánicos de autopropulsión en la construcción, es realmente reciente. Aun cuando encontramos referencias del uso de aparatos incipientes, desde el siglo pasado, el perfeccionamiento de los mismos hasta adquirir una forma semejante a los actuales, es de unos 50 años a la fecha, siendo su aplicación tan importante que ha obtenido gran éxito en la industria de la construcción.

Con los escudos se reducen varios problemas inherentes a sistemas convencionales de excavación y se implementan otros factores de gran conveniencia para la construcción de un túnel, tales como rapidez, eficiencia y seguridad.

En lo futuro, la construcción de túneles, que es además el futuro de la construcción de importantes obras de ingeniería, tendrá grandes avances gracias a la implantación de nuevas técnicas y al desarrollo en la fabricación de estos nuevos equipos, representando un reto en la capacitación de técnicos e ingenieros mexicanos, para su aplicación en la realización de obras que beneficien a la sociedad.

I. LOS ESCUDOS EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES

a) SU APARICION EN LA CONSTRUCCION.

La utilización de las máquinas perforadoras de túneles en suelos, es decir, los escudos, ha estado sujeta al perfeccionamiento de los mismos desde su aparición en la construcción de túneles bajo el Río Támesis en Londres, en el año de 1818. Casi al mismo tiempo, se encuentran también distintas investigaciones y aplicaciones de aparatos similares en otras ciudades de Europa y Estados Unidos, comenzando una nueva etapa dentro de la construcción de túneles en el mundo.

El primer escudo utilizado en Londres por Brunel, estaba provisto de un complicado sistema de plataformas de ademe, que sostenían al frente por medio de tornillos, mientras que el escudo se movía hacia adelante, penetrando en el terreno mediante gatos de tornillo apoyados contra el revestimiento final de la excavación. La teoría era que, mediante un mecanismo capaz de moverse hacia adelante a través del curso del túnel y provisto con medios para resistir la presión del terreno en el frente, así como las presiones actuando en ángulos rectos en la periferia del túnel, toda ó la mayoría de la madera usada como ademe en los procedimientos convencionales, pudiera ser eliminada.

Anteriormente al uso de escudos, la construcción de túneles en material suave, se hacía por etapas y atacando la sección en partes, para ir ademando poco a poco, comenzando con la clave hasta terminar con el centro del túnel y el piso del mismo. Este procedimiento sigue y seguirá utilizándose, porque la aplicación de los escudos, para ser económicos, requiere entre otras cosas, longitudes de túneles suficientemente grandes que permitan

amortizar esta máquina, la cual es sumamente costosa. Además, se necesita seguridad de contratación en tramos largos, para una sola empresa constructora.

La idea fundamental del escudo es que, el proceso de excavación y el montaje del revestimiento, deben dividirse en etapas lo más pequeñas posible, de manera que ambas operaciones sean lo más concurrentes ó simultáneas, permitiendo la deformación del terreno hacia el túnel, mediante una coraza de metal, al tiempo que se colocan el revestimiento prefabricado ó dovelas, las cuales sirven como ademe provisional del túnel.

b) ESTRUCTURA DE LOS ESCUDOS.

El principal elemento de la estructura del escudo es el forro ó camisa, que está construido con placas de acero, ro-ladas de acuerdo a la geometría de la sección del túnel y lige-ramente mayores que él, ya que protege toda la zona del túnel que se acaba de perforar y que todavía no tiene ademe.

La camisa puede dividirse en tres partes principales para fines de diseño, en función de su rigidez interior y de su arreglo de acuerdo a su propósito: (Figura 1)

1. El extremo delantero de la camisa, donde se efectúa la excavación, es sumamente reforzado por ser la cara de corte. Está formado generalmente por placas de acero con soldadura de carburo de tungsteno, pudiendo incrementarse su rigidez interna con anillos atiesados. Su propósito principal es facilitar el posible avance uniforme y conducción del cuerpo del escudo, cortando el frente, amén de

proveer una distribución hasta donde sea posible, de las importantes presiones inducidas que lo forzan hacia atrás. Además forma un techo protector en la zona recién excavada, impidiendo un desplome del terreno sobre los trabajadores, en caso de que el escudo sea de "frente abierto". El diámetro de la cara de corte debe ser ligeramente mayor que el diámetro del escudo, facilitando su deslizamiento.

En caso de que el escudo sea de "frente cerrado", éste tiene en la parte delantera unas cuchillas que excavan el terreno, al girar cada una de ellas alrededor de un eje y que van desmenuzando el material del terreno para que caiga en la parte inferior de la sección que se está atacando.

2. La parte intermedia ó tronco, está destinada para el alojamiento de maquinaria de empuje (gatos hidráulicos, tablero de operaciones, etc.). Además algunos elementos suplementarios importantes son incorporados en el interior del escudo, la mayoría en combinación con elementos rigidizadores, tales como plataformas de trabajo, montadas sobre atiesadores horizontales y verticales, así como gatos para soportar el ademe del frente, montados sobre las paredes divisorias de las plataformas de trabajo, en caso que el escudo sea de frente abierto. También, es posible alojar en esta sección las guías, que son un elemento auxiliar para dirigir el escudo, mediante el sistema topográfico de rayo laser.

Dentro de esta coraza, pueden existir bandas trans-

portadoras que reciben el material desmenuzado y lo llevan fuera del escudo hasta la zona ya ademada, para descargar en vagonetas y luego ser rezagado en la forma usual.

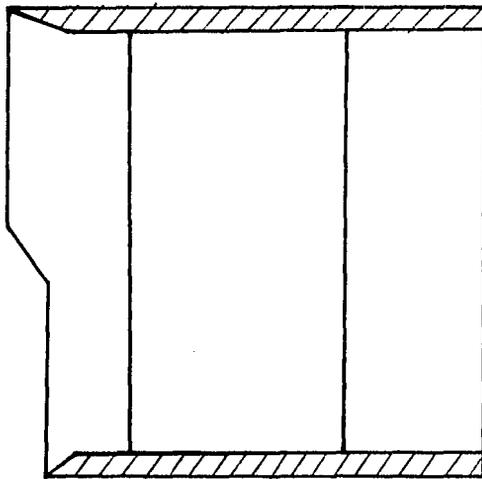
3. La parte trasera ó faldón del escudo, está diseñada para soportar el túnel mientras se realiza el montaje de los segmentos del revestimiento, mediante un brazo erector instalado en esta parte del escudo. Estos segmentos pueden ser de concreto precolado ó metálicos.

La adecuada construcción del escudo se complementa con maquinaria especial para la excavación, rezaga y transporte del material, montaje e inyección y todo lo indispensable en el tuelleo con escudos.

Existe una gran variedad de escudos, pero los escudos circulares, generalmente son los que ofrecen la mejor resistencia a las presiones externas. La experiencia en el diseño de escudos circulares indica que, para mayor facilidad de manejo, entre menor sea la longitud del escudo, será mayor la dificultad de mantenerlo alineado, pero será más fácil desarrollar un giro. Los escudos largos requieren presiones más elevadas en sus gatos de empuje para su operación. Se recomienda respetar la siguiente relación de longitud a diámetro: $L \leq 0.75 D$.

Otra característica común en los escudos es girar alrededor de su eje longitudinal, debido a la estratificación oblicua y a presiones externas asimétricas. Estos giros se llegan a corregir mediante el uso de estabilizadores ó aletas, cuya localización en el perímetro del escudo se hace por tanteos.

cuchilla tronco faldón
cortadora



DIVISION DEL ESCUDO PARA DISEÑO. figura 1.

c) EQUIPO DEL ESCUDO

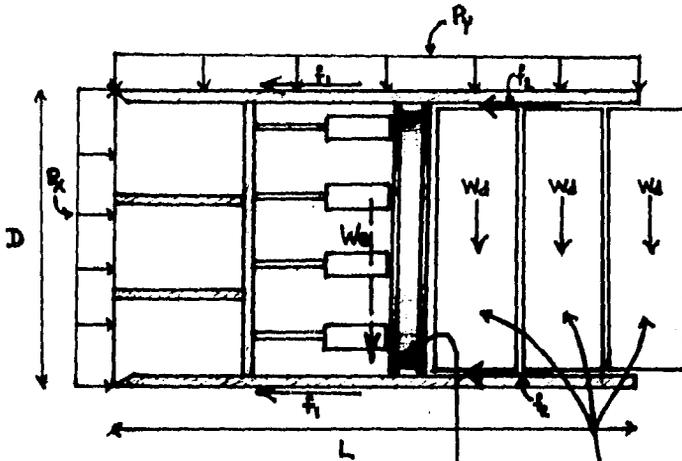
1. Gatos de empuje. Constituyen el sistema de auto-propulsión del escudo y se encuentran colocados en la estructura del escudo, reaccionando contra los anillos del revestimiento del túnel previamente erigidos y controlando la dirección de la excavación, en tangente ó en curva. Para mover el escudo deben tomarse en cuenta las siguientes resistencias: (Figura 2)

- a) La fricción del terreno sobre la superficie exterior de la camisa del escudo.
- b) La fricción del anillo de dovelas en el faldón del escudo.
- c) La resistencia del terreno que no ha sido excavado, en el frente del escudo.

En cuanto a la distribución de los gatos de empuje, generalmente es mayor en la mitad inferior del escudo, pues éste tiende a clavarse.

2. Gatos frontales. El mejor método para soportar el frente mientras el escudo avanza, es mediante gatos al frente, los cuales ejercen una presión constante y uniforme. Los gatos frontales deben llegar más allá de la carta de corte y su carrera debe ser mayor ó igual al ancho de una dovela. Para accionar los mecanismos hidráulicos se usa un equipo instalado en superficie y el fluido que hace accionar los gatos pasa por mangueras, hasta el frente de la excavación.

3. Plataformas horizontales. Este dispositivo provee de áreas de trabajo, para atacar el frente de excavación con el personal dispuesto en la zona. En el caso de excavar en suelos granulares, estas plataformas llegan a estabilizar el frente de ataque en función del ángulo de reposo del material, evitando derrumbes que alteren el ciclo de operación del escudo. (Figura 3)
4. Brazo erector. Para la colocación de las dovelas, el escudo cuenta con este dispositivo, el cual es accionado hidráulicamente, pudiendo girar en ambas direcciones alrededor del eje del escudo y desplazarse en la dirección del mismo eje, una distancia similar al ancho de una dovela. En su extremo, el brazo cuenta con un mecanismo para sujetar las dovelas y colocarlas en su posición correcta. (Figura 4)
5. Herramienta para la excavación del frente. Se provee de personal para atacar el frente de la excavación con pistolas ó martillos neumáticos rompedores ó bien se puede instalar una máquina de ataque selectivo, ya sea por corte o por impacto. Un ejemplo de la primera sería la rozadora Westfalia, provista de una cabeza con picas, cuya dimensión es pequeña en relación con la sección del frente. Esta cabeza está situada en el extremo de un brazo orientable, que realiza el barrido selectivo, a través de toda la superficie del frente. Las máquinas de ataque selectivo por impacto, llevan montado un martillo neumático en el extremo del brazo de barrido y el arranque del material se produce por el golpeteo del útil.



gatos hidráulicos anillo para dovelas colocadas
distribución de presiones

P_y = presión vertical del terreno

P_x = presión horizontal del terreno

L = longitud del escudo

D = diámetro del escudo

W_e = peso propio del escudo

W_d = peso de las dovelas colocadas

f_1 = coeficiente de fricción entre la camisa
del escudo y el terreno

f_2 = coeficiente de fricción entre la camisa del
escudo y las dovelas colocadas.

FUERZAS RESISTENTES AL EMPUJE DEL ESCUDO. figura 2.

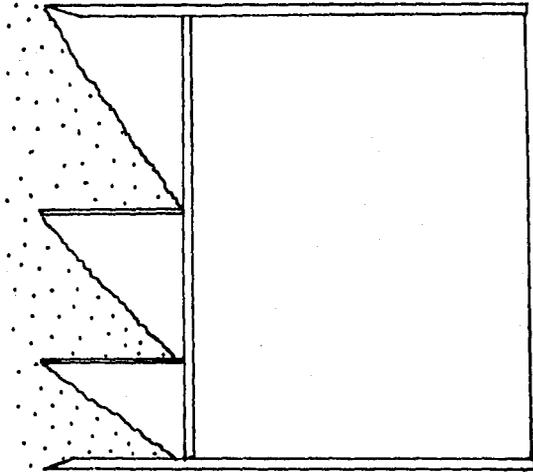


FIG. 3 ESTABILIZACION DEL FRENTE DE ATAQUE
EN SUELOS GRANULARES MEDIANTE
PLATAFORMAS HORIZONTALES

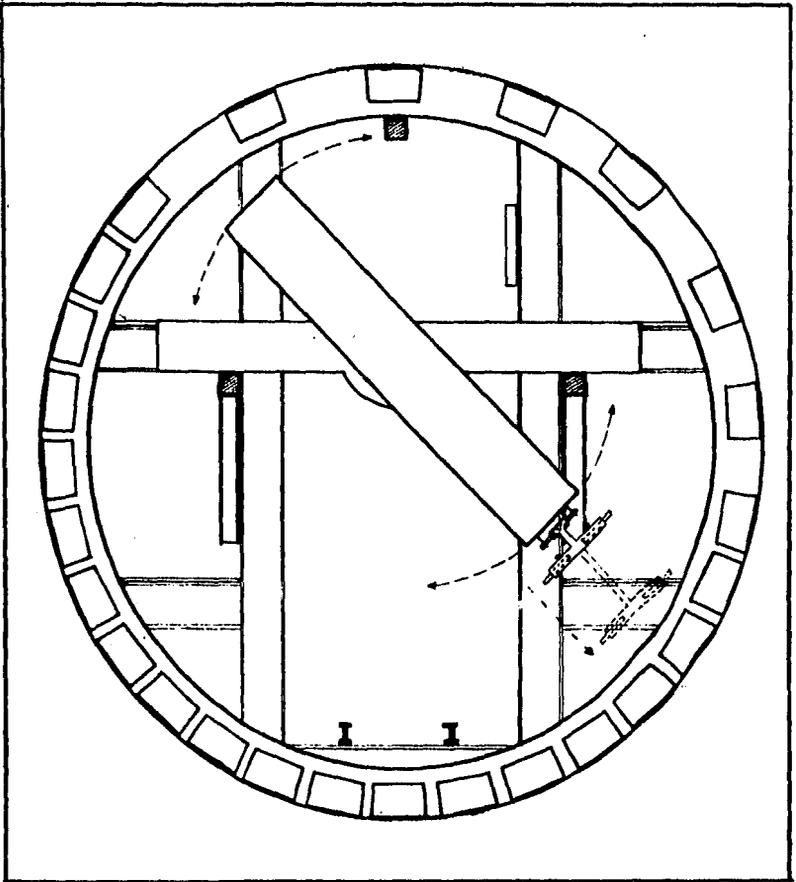


Figura 4. VISTA POSTERIOR DE UN ESCUDO

La variante, en el caso de los escudos con frente cerrado, sería el uso de cuchillas cortadoras oscilantes que desmoronen el material en el frente de ataque, ó bien la disposición de brazos hidráulicos de perforación, montados en el frente del escudo.

d) SEGMENTOS PARA ADEME (DOVELAS).

Debe tener las siguientes características:

1. Suficiente capacidad de carga, para soportar la presión total (suelo más agua), sin que exista deformación ó filtración, en función de la clase y condiciones del terreno.
2. Resistencia a los esfuerzos de impacto debido a un manejo brusco, transporte y colocación.
3. Resistencia a altos esfuerzos axiales, producidos por los gatos de empuje, durante el avance del escudo.
4. Resistencia a la humedad y a los efectos del agua del terreno sobre el segmento mismo, así como resistencia a la corrosión.
5. Economía en construcción y mantenimiento.

Los segmentos pueden ser de diversos materiales:

- a) Hierro fundido
- b) Acero

c) Concreto reforzado

Las dimensiones de un anillo de segmentos dependen de:

a) Capacidad de fabricación

b) Peso que pueda ser manejado convenientemente

c) Dimensiones del faldón del escudo

Debe tenerse en cuenta que, mientras menos segmentos tenga un anillo y su capacidad de movilización permita colocarlos con facilidad, el costo será menor. Por tanto, no se puede decir a priori el número de segmentos más económicos, ni sus dimensiones ó su material.

e) CICLO DE OPERACION.

Una de las ventajas de establecer un ciclo de operación, es la de poder realizar una evaluación de los costos dentro de una fase de un proyecto y del proyecto completo.

Los registros del ciclo de operaciones también permiten conocer cada día, si la productividad de trabajo está funcionando como se estimó y a la vez indican cuáles fases del trabajo necesitan de una atención especial.

Dentro de las operaciones del túnel, el ciclo de operación se compone principalmente de 3 etapas primordiales:

a) Excavación y soporte temporal del frente, desalojan-

do el material de rezaga.

- b) Avance del escudo, con reacción contra el revestimiento previamente erigido.
- c) Colocación de otro anillo del revestimiento. (Figura 6)
 - a) La excavación tiene lugar en el frente y con relación a la seguridad, es la actividad más difícil en el tuneleo con escudos.

El tuneleo con escudos requiere excavar la sección completa, lo cual no es una tarea fácil, considerando que los escudos se utilizan en terrenos de baja resistencia y que se requiere estabilizar áreas de dimensiones considerables.

La herramienta empleada para la excavación del frente, es función del grado de dureza del suelo, siendo común el uso de martillo neumático.

La estabilización del frente se logra a base de tableros de madera, que son detenidos por los gatos frontales.

En ocasiones, se utiliza una compuerta en la parte posterior del escudo que retiene el material producto de la excavación, la cual es bajada, permitiendo el acceso a una máquina rezagadora con banda transportadora después de colocar un pequeño tramo de vía. Se deposita el material en botes ó cajas especiales, que posteriormente se llevan con locomotoras a la lumbrera, donde son tomados por un malacate

para ser vaciados en la superficie a una tolva y de ahí, a camiones de volteo.

Al mismo tiempo, se efectúa la inyección de gravilla entre las dovelas y el terreno, detrás del faldón del escudo, relleno el espacio dejado por el espesor de la camisa y de una ranura efectuada al frente de la excavación, en el perímetro del escudo, en forma de flecha y de una profundidad similar al avance del mismo, con objeto de evitar que la camisa encuentre demasiada resistencia del suelo durante el avance. (Figura 5)

Una vez terminada la excavación, rezaga y adema do del frente se bloquea el paso de rezaga fuera del escudo, subiendo la compuerta, para entonces llevar a cabo el avance del escudo.

- b) El avance del escudo es una operación muy delicada, ya que define los alineamientos y pendientes proyectados, por lo cual es muy importante realizarlo con los gatos de empuje adecuados, apoyándose en el anillo de dovelas previamente colocado en el propio faldón del escudo y retrayendo los gatos frontales, manteniendo siempre una presión de éstos últimos contra el ademe de madera, al frente de la excavación. La amplitud del avance debe permitir tener un espacio suficiente para la colocación del siguiente anillo de dovelas.
- c) Terminado el avance, se limpia la plantilla dentro del faldón del escudo, para realizar el montaje de dovelas. Cada una de las piezas es ba-

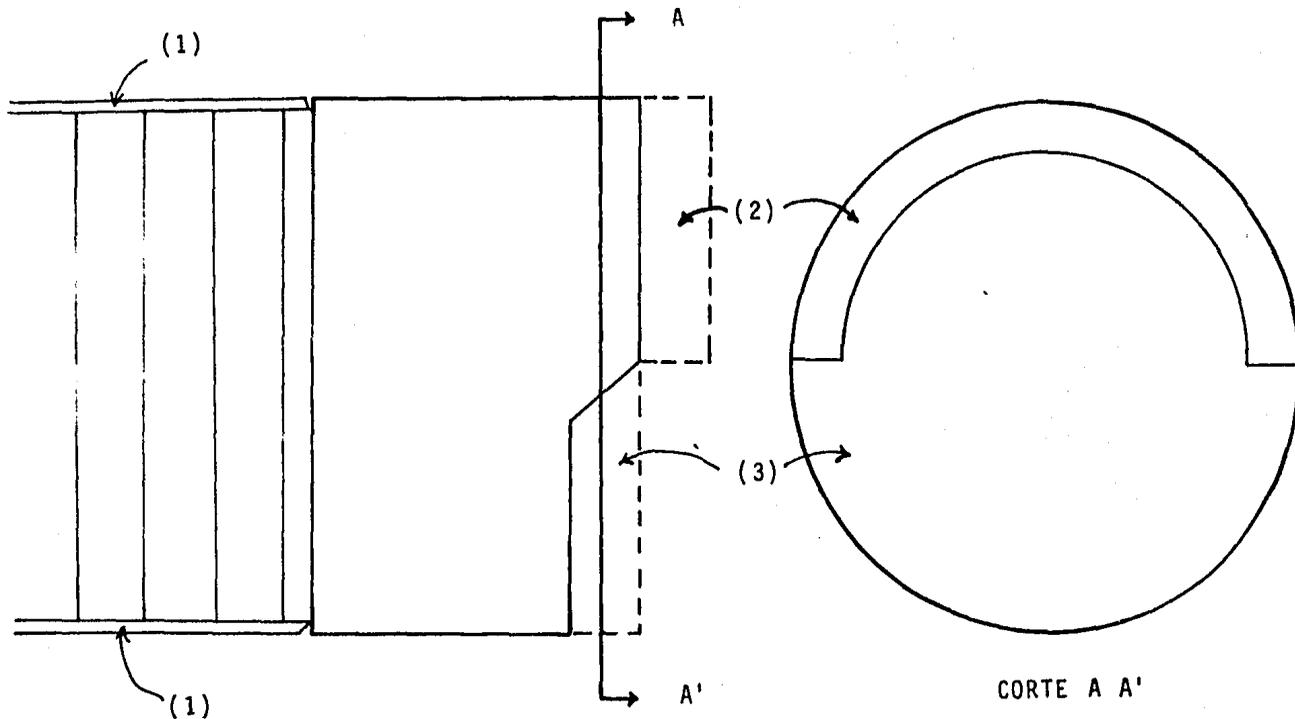


FIGURA 5. (1) ZONA DE INYECCION
(2) RANURA AL FRENTE DE LA EXCAVACION
(3) ZONA DE CORTE

jada de una plataforma especial y tomada por un "brazo erector", que está montado en la parte posterior del escudo y cuya función es tomar cada uno de los segmentos y erigirlo hasta su posición dentro del faldón. Este brazo puede girar alrededor de su eje horizontal a cualquier posición que se requiera y puede extenderse ó retraerse; en su extremo tiene un dispositivo especial para sujetar el segmento.

A medida que el anillo se va ensamblando, los gatos de empuje se van retirando. A continuación, se aprieta la tornillería que une los segmentos entre sí y con el anillo anteriormente colocado. Hecho ésto se permite nuevamente el traslado de la rezaga, iniciando un nuevo ciclo.

Los anillos ya montados, tienden a adoptar una forma oval y no circular como lo pudiera pedir el proyecto, debido al peso propio de los mismos, por lo que resulta necesario colocar un par de puntales, dotados con gatos mecánicos para su ajuste. Este apuntalamiento se conserva hasta después del inyectado, del cual se hablará a continuación.

f) INYECCIONES.

Como se mencionó anteriormente, es una práctica común en túneles construidos con escudos, el llenar con gra-

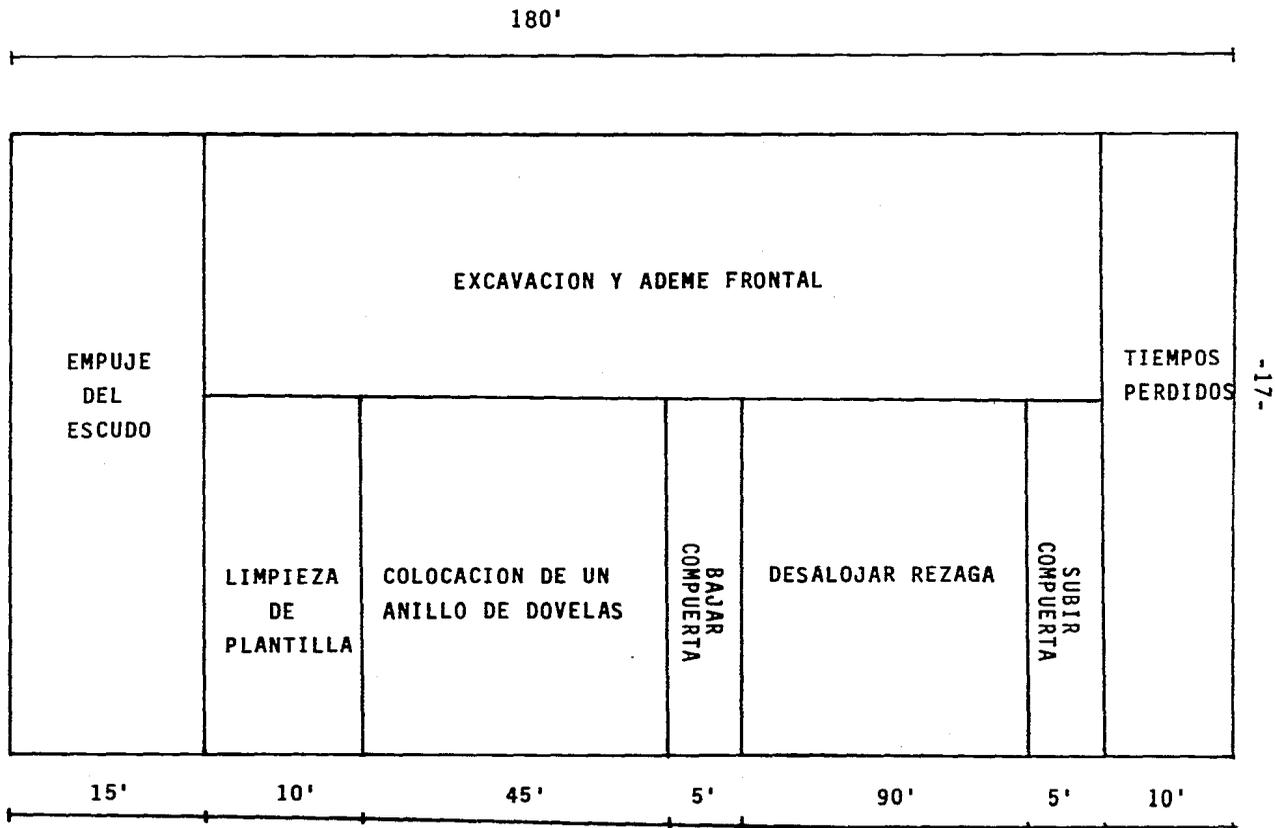


FIGURA 6. CICLO DE EXCAVACION CON ESCUDOS

villa el espacio anular entre el ademe y el terreno excavado.

La gravilla de 5mm es introducida a través de los agujeros de inyección, provistos en los segmentos de ademe. A esto le sigue una inyección de lechada de cemento, que consolida al relleno previo, llenando todos los huecos. Su objetivo inmediato es el de estabilizar el terreno circundante, lo cual reduce la presión del suelo contra el ademe del túnel, actuando además como impermeabilizante.

La inyección de la lechada debe hacerse, una vez que los asentamientos del terreno debidos a la construcción del túnel, hayan alcanzado su condición de equilibrio.

g) ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO.

Para tener una excavación eficiente y segura, cuando el caso lo permita, será conveniente atacar el frente con la menor cantidad ó presión de agua provenientes de los mantos, en los alrededores de la construcción.

Existen métodos de ataque desarrollados para trabajar en frentes saturados utilizando escudos especializados, de los cuales se hará mención en el próximo capítulo.

El abatimiento del nivel freático previo al paso de un escudo, se logra con la ayuda de pozos de bombeo, situados a los lados del eje de trazo y a lo largo del mismo.

Las perforaciones se llevan desde la superficie hasta un nivel bajo la plantilla del túnel, el cual es igual a 2 ó 3 veces el diámetro del túnel y en ellas se instalan bombas

sumergibles.

Cada línea de perforaciones tiene aproximadamente 160 m. de longitud, repartida en dos tramos: 60 m. atrás del escudo y 100 m. adelante de éste.

Para conocer la presencia de cargas hidrostáticas en lentes aislados, que no pueden ser drenadas por los pozos, se instalan piezómetros del tipo abierto ó Casagrande, a la profundidad de la plantilla del túnel. (Ver figura 7)

h) TOPOGRAFIA.

Una vez seleccionado el recorrido de un túnel urbano, por ejemplo, se procede a realizar el planteamiento preliminar del eje de trazo, mediante una poligonal gráfica llevada sobre planos fotogramétricos, tratando de colocar dicho eje en el centro aproximado de la calle ó a cierta distancia de los parámetros, especificada por los estudios de mecánica de suelos. Esto permite colocar en forma semigráfica, la posición de los puntos de apoyo para tangentes de trazo, valor de deflexiones aproximadas, así como el planteamiento de las curvas entre los tramos rectos, y de esta manera, proceder a la verificación de la geometría preliminar que se refiere a localizar en el terreno los puntos obligados del trazo, para que con estos datos se afine el proyecto calculando las curvas reales de acuerdo con medidas lineales y ángulos verdaderos. De esta manera, se procede a la elaboración del proyecto definitivo.

Para el proyecto de perfil, se lleva a cabo una nivelación de precisión, apoyada en los bancos de nivel a lo largo del eje de trazo, realizándolo bajo ciertas limitaciones de

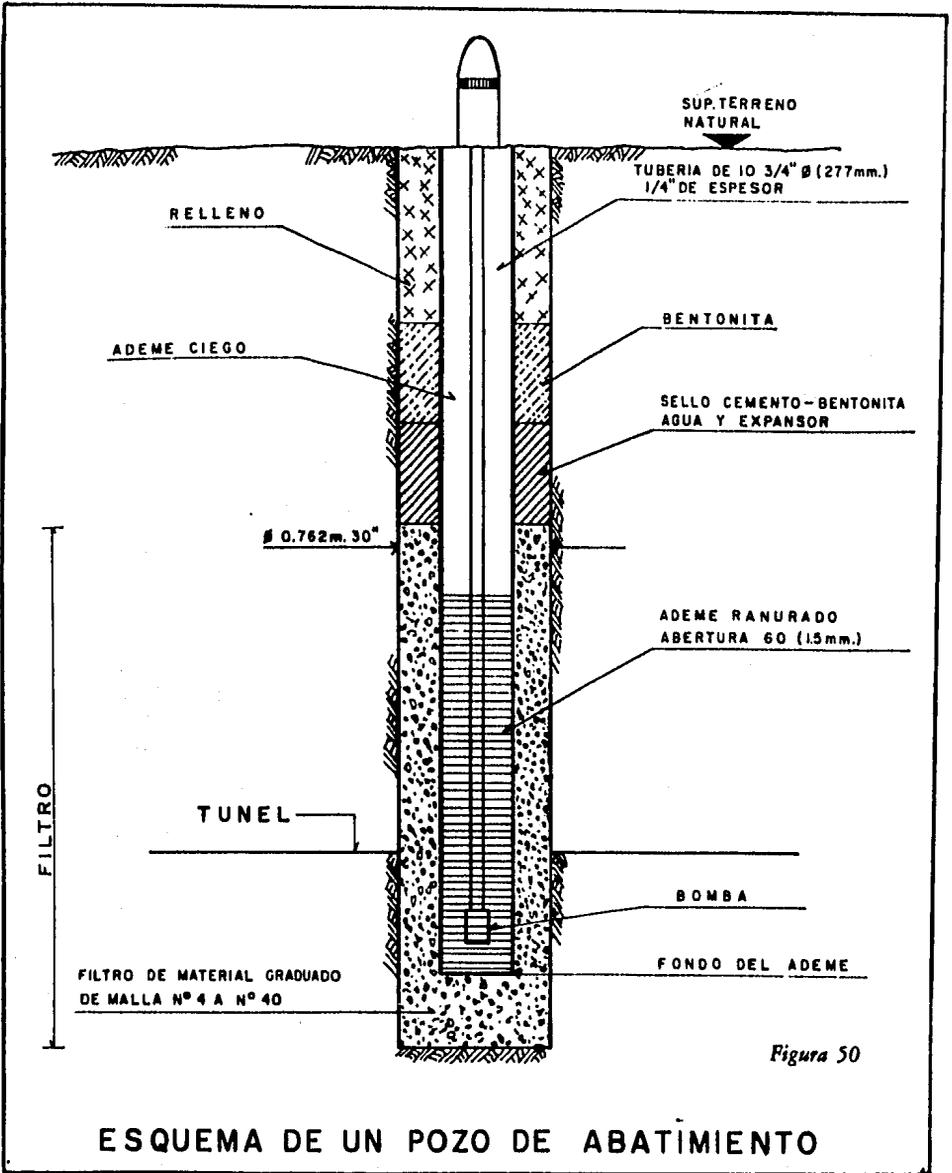


Figura 7

pendientes y profundidades máximas y mínimas.

El uso de los sistemas Laser en la construcción de túneles, es una alternativa viable, debido a la seguridad que estos equipos proporcionan, teniendo una mayor exactitud y rapidez, reduciendo por consiguiente los costos.

En túneles excavados con escudo en suelos blandos, el uso de un Laser con tarjetas computadas elimina mucho tiempo de chequeo, después de cada empuje, ayudando a acelerar el ciclo de operación. Para ésto, es factible tener una brigada de topógrafos encargados del direccionamiento del escudo, revisando la colocación del Laser, montado en un teodolito, y su proyección en las tarjetas situadas en el escudo y en puntos intermedios de control, sin afectar las actividades del ciclo.

El corazón de un Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation ó amplificación luminosa mediante una emisión estimulada de radiación), consiste en un tubo con plasma helio-neón que produce una viga monocromática de luz concentrada. El tubo está sellado para que no le entre el polvo ni la humedad, estando protegido contra la vibración existente bajo el terreno.

II. TIPOS DE ESCUDOS

En la actualidad, se han desarrollado diversas tecnologías en la fabricación de escudos para la excavación de túneles, dependiendo principalmente del tipo de suelo por atacar. Países como: Japón, Inglaterra, Alemania Federal y Estados Unidos, están construyendo estos equipos en diámetros que superan los 10 m.

Los escudos perforadores de túneles se pueden clasificar en dos grupos, dependiendo del sistema de excavación que se utilice:

a) ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO

b) ESCUDOS DE FRENTE CERRADO

Tanto los escudos de frente abierto como los de frente cerrado, se pueden diseñar con diversos dispositivos para atacar con mayor eficacia al frente de excavación e implementan los sistemas de colocación de dovelas y rezaga de material, principalmente, aunque ambos conservan las características primordiales de diseño, de las cuales se hizo mención en el capítulo anterior.

La diferencia más significativa entre los escudos de frente abierto y los de frente cerrado, consiste en que los primeros están formados por un anillo abierto en sus dos caras, con objeto de tener acceso al frente de ataque y realizar la excavación con el personal y equipo especializados para tal efecto, cuando el frente es regularmente estable.

Si el frente de trabajo es inestable, como ocurre algunas veces en arcilla de extrusión rápida o en arenas que fluyen, se requiere un escudo de frente cerrado. Este tipo de escudos poseen una cabeza cortadora en forma de disco en su cara frontal, que cubre toda el área de la sección y en ella se encuentran los elementos cortadores del terreno, mediante el giro de la cabeza donde se encuentra el sistema de estabilización del frente, que es de diferente índole según el procedimiento aplicado.

a) ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO.

Este tipo de escudos cuentan con plataformas de trabajo, que pueden estar ubicadas a diferentes niveles, para atacar al frente por zonas con medios manuales. Es factible que se puedan utilizar diversos métodos de excavación, debido a la accesibilidad que se tienen en estos equipos, por consecuencia del tipo de suelo que se atraviese.

Es recomendable el empleo de escudo de frente abierto, en suelos muy consolidados como: arcillas, aluviones, cohesivos, arenas, arcillas consolidadas, arenas y gravas compactas; así como para suelos medianamente consolidados como: turbas, arcillas arenosas, arenas húmedas medianamente consolidadas.

Existe la modalidad de inyectar aire comprimido con uso de un escudo de frente abierto, cuando se trata de excavar suelos con gran cantidad de agua, que propicia la inestabilidad del mismo. Este sistema será descrito más adelante.

En el caso en que se tengan suelos muy firmes ó rocas, es más conveniente el uso de otro tipo de máquinas perforado-

ras de túneles llamadas comúnmente "topos", los cuales tienen un sistema de excavación diferente al de los escudos, sin necesidad de colocar los anillos de ademe, utilizando en su lugar un soporte temporal de concreto lanzado ó un sistema de apuntalamiento para, posteriormente, colocar el revestimiento definitivo, cualquiera que éste sea.

Un escudo de frente abierto se puede fabricar o reconstruir, para permitir el acceso o la instalación de maquinaria especializada para el corte del material en el frente de ataque. Esta maquinaria puede variar entre: pala excavadora, cucharones tipo draga, cargador frontal, traxcavo, brazos cortadores giratorios o cabezas rozadoras que desmoronen el material y quede a disposición del mecanismo de rezaga, que puede ser un sistema de bandas transportadoras o tornillos helicoidales, que lleven el material hasta la lumbrera, en el caso de tramos relativamente cortos o que lo depositen en los medios de acarreo (tren de vagonetas o camiones de volteo), para llevarlo a lo largo del túnel, especialmente para distancias largas entre el frente y la lumbrera, para realizar posteriormente el manto del mismo hasta la superficie.

Las máquinas de ataque selectivo por corte o rozadoras, disponen por lo general de una cabeza provista de picas, cuya dimensión es pequeña en relación con la sección del frente. Esta cabeza está situada en el extremo de un brazo orientable, el cual realiza el barrido selectivo a través de toda la superficie de ataque, alternando movimientos verticales y horizontales, haciendo de ésta una máquina muy versátil. Este tipo de máquinas van montadas generalmente sobre un tren de orugas que les permite una gran facilidad de desplazamiento.

Más adelante se hará una descripción más amplia acerca de los escudos de frente abierto, utilizados en la excavación

de túneles para el Metro.

a.1.) ESCUDOS CON CAMARA DE AIRE COMPRIMIDO.

El aire comprimido, como una herramienta para la excavación de túneles, data desde 1830 cuando Thomas Cochrane construyó lumbreras y túneles bajo el nivel freático, en terrenos inestables, movedizos, muy permeables ó semipermeables, con pequeña cohesión y baja resistencia. Consiguió estabilizar las paredes del túnel por medio de aire comprimido, constrarrestando la presión del agua, favoreciendo la creación de fuerzas capilares en el frente, evitándose una falla por extrusión y permitiendo el trabajo en seco bajo la protección del escudo.

Desde entonces se han excavado numerosos túneles, utilizándose la combinación de aire comprimido y escudo.

El empleo de aire comprimido consiste fundamentalmente, en lo siguiente:

Se instala una mampara y una serie de esclusas dentro y fuera de la lumbrera, tal como se muestra en el esquema. (Figura 8)

La mampara está formada por una placa de acero y concreto reforzado, evitando la comunicación del túnel con el exterior. En el lado exterior del tapón, el aire tiene la presión atmosférica; del otro lado, se empieza a inyectar aire, así la sección del túnel entre el frente de excava-

ción y el tapón, queda sujeta a una presión superior a la atmosférica, con rangos de 0.5 a 1.5 kg/cm^2 , según se requiera.

La entrada y salida del personal y de los materiales a esta cámara de trabajo presurizada, se hace por medio de esclusas, que consisten en cilindros de metal que cruzan la mampara con puertas selladas de entrada y salida. Cuando se circula del lado de la presión atmosférica al lado presurizado, se cierran ambas puertas y poco a poco se va inyectando aire a presión, hasta que la presión en la esclusa se iguala con la de la cámara de trabajo; en esas condiciones, se abre la puerta del lado presurizado y el personal puede pasar a la cámara de trabajo. Cuando se transita en sentido contrario se procede a la inversa, aunque el proceso es más tardado, ya que una descompresión súbita puede causar serios daños a los trabajadores.

Con la rezaga, se efectúa la misma operación a través de la esclusa para material; sin embargo, la velocidad con la que se elimina ó eleva la presión, es mucho mayor.

El objeto de formar una cámara presurizada es, principalmente, estabilizar el frente de la excavación. Para el caso de las arenas saturadas, el flujo del aire comprimido del frente de la excavación hacia el terreno, provoca tensiones capilares que evitan que la arena y el agua fluyan hacia el interior del túnel.

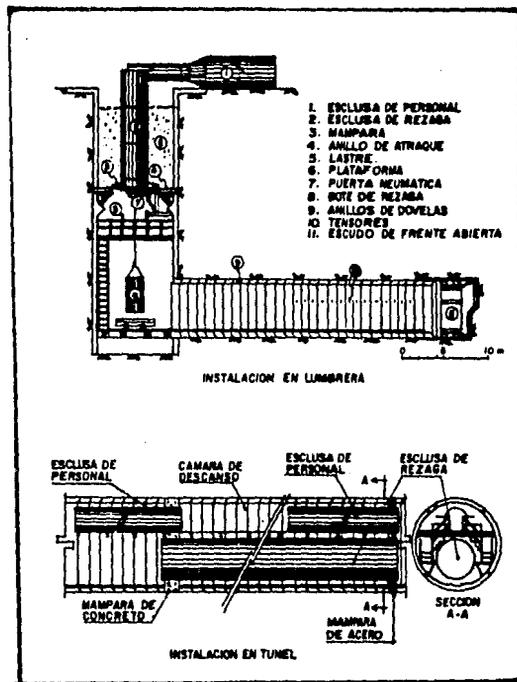
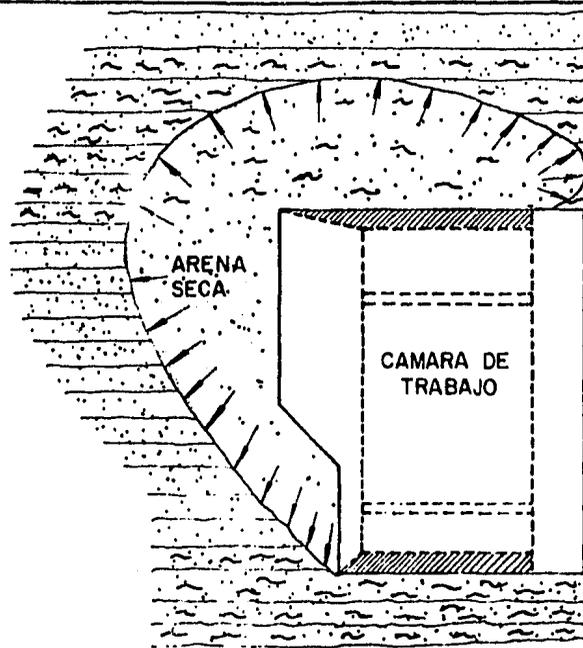


FIGURA 8. EQUIPO USADO EN TUNELES
CONSTRUIDOS CON ESCUDO
Y AIRE COMPRIMIDO



EFFECTO DEL SECADO DE LAS ARENAS
EN EL FRENTE DE EXCAVACION CON
AIRE COMPRIMIDO.

FIGURA 9.

En el caso de arcillas de baja resistencia, se tiene una presión que contrarresta la presión del terreno, evitando así que la arcilla falle por extrusión y penetre hacia el túnel.

Una vez que se han atacado los primeros 200 metros de túnel, se interrumpe el ataque, para trasladar la mampara y esclusas hacia el interior del túnel.

En los casos en que se encuentre un terreno que pueda ser averiado por la presión del aire, se pueden diseñar escudos en los cuales se pueda evitar este riesgo, dejando permanecer el agua en un compartimiento delantero, respetando de cierto modo el equilibrio natural de las presiones en el terreno, haciendo uso de una mampara apoyando el frente, siendo así el caso de un escudo con el frente cerrado.

Este caso se presentó en la construcción del túnel del metro de París, bajo el río Sena, atravesando arenas saturadas sobre las que había calizas burdas fisuradas, con posibilidad de sufrir rompimientos por las presiones del aire comprimido.

En la siguiente figura se observan sucesivamente de izquierda a derecha:

- Un compartimiento delantero con agua
- Un compartimiento con aire comprimido, cuya presión limitada permite en la parte ba-

ja, la comunicación con el agua en el compartimiento delantero para asegurar el paso de la rezaga.

- Un conducto impermeable con banda transportadora bajo presión de aire que conduce los materiales a las tolvas-esclusas.

Actualmente, el uso de este tipo de escudos ha ido decreciendo, debido al riesgo que existe de alguna fuga en la tubería a presión, lo que provocaría una falla en el soporte del frente, especialmente cuando las presiones de aire son altas para soportar suelos con una alta permeabilidad. De igual manera, se puede tener una baja en la productividad, debido a que los tiempos de descompresión son considerablemente largos e incluso, es un factor importante que infla en gran medida los costos.

b) ESCUDOS DE FRENTE CERRADO.

Este tipo de escudos tiene algunas variantes en función de los sistemas de estabilización en el frente, aunque el tipo más significativo y más moderno, usado actualmente en México, es el que se describe a continuación.

b.1.) ESCUDOS CORTADORES DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS DE BENTONITA.

Desde hace más de 30 años, en Japón y Europa, se empezaron a usar escudos cortadores, con los cuales se excava en forma rápida y segura

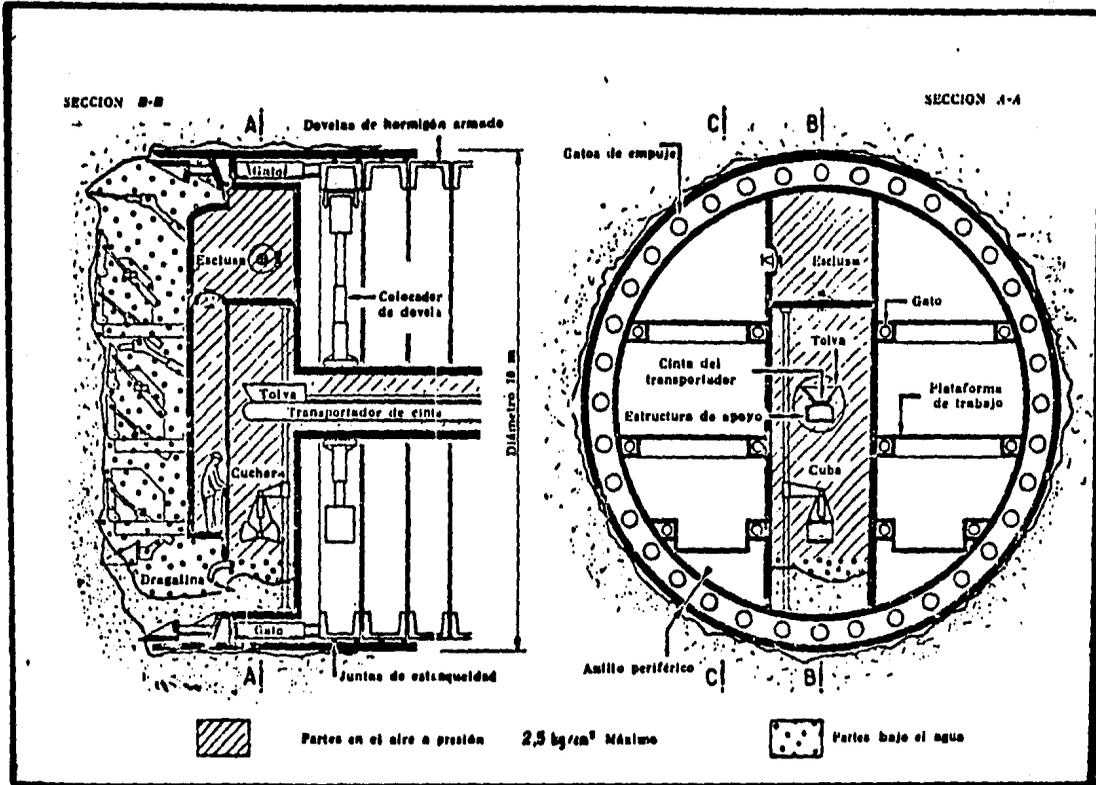


FIGURA 10.

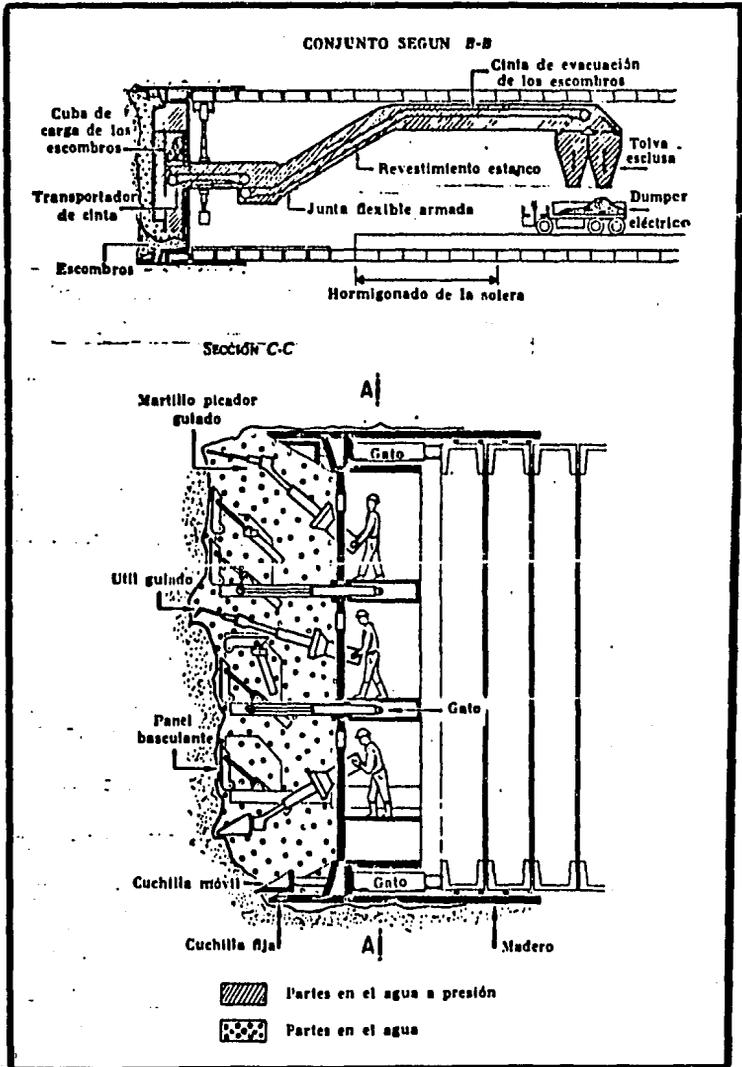


FIGURA 11.

en arcillas blandas con alto contenido de agua, como las que se encuentran en la zona del Lago de la Ciudad de México.

A) DESCRIPCION GENERAL.

El escudo cortador de frente presurizado con lodos, proporciona soporte mecánico del frente excavado, mediante una cabeza cortadora que puede cerrarse totalmente, y además, soporte hidrostático mediante lodo fluido a presión.

Componentes y descripción del sistema:

- Escudo
- Cabeza cortadora
- Erector de dovelas
- Tren de arrastre
- Sistema hidráulico
- Sistema de lubricación
- Sistema de manejo de lodos
- Sistema de distribución de electricidad y de control
- Revestimiento de dovelas precoladas de concreto

El escudo es un cilindro, hueco abierto por un extremo, en el que todos los componentes de la máquina se alojan en su interior.

La cabeza cortadora gira en una cámara sellada de mezclado, que contiene lodo fluido a presión,

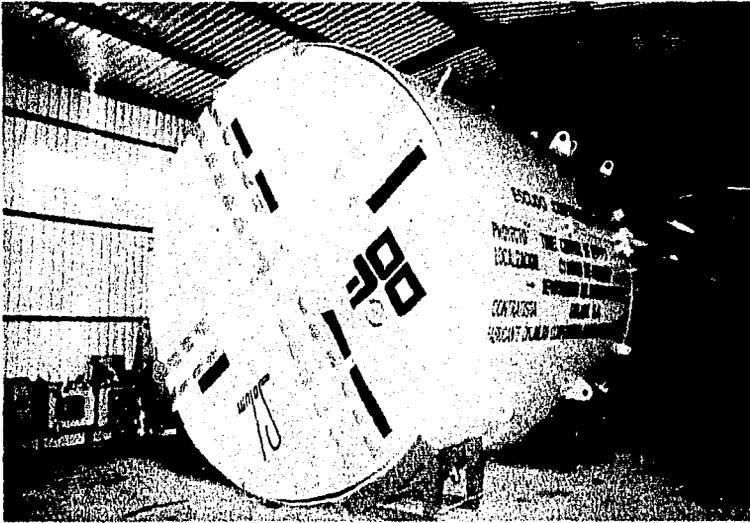
para soportar el frente de suelo. La cabeza cortadora está diseñada estructuralmente para soportar el empuje del terreno y contiene compuertas de ranura para permitir pasar el material excavado hacia la cámara de mezclado de lodo.

Las ranuras también tienen herramientas para cortar.

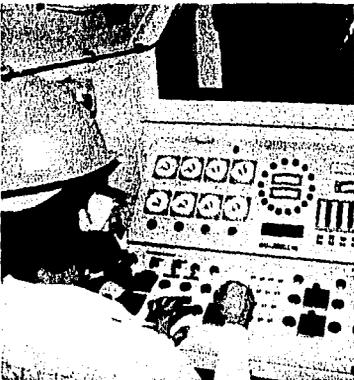
La cabeza cortadora es accionada por motores eléctricos de dos velocidades conectados a reductores de velocidad que hacen trabajar al cortador a 1.1 y 1.6 r.p.m. Dicha cabeza es soportada por un sistema estructural con rodamientos, diseñados para soportar el empuje total y las cargas que se desarrollen durante la excavación. Los rodamientos están protegidos de la entrada de lodo y rezaga mediante sello y un flujo positivo de lubricación. La cabeza cortadora se hace avanzar y es empujada contra el frente por gatos hidráulicos.

Todo el material excavado y el lodo fluido son depositados en la cámara de lodo, la cual contiene licuadoras para mezclar lodo con material excavado.

Los gatos para empujar el escudo, se localizan atrás de la cámara de mezclado de lodo. Se ubican circunferencialmente, dispuestos a intervalos iguales. Están diseñados para hacer avanzar y guiar el escudo. Mediante una bomba de lodos, se envía el lodo fluido desde tanques superficia-



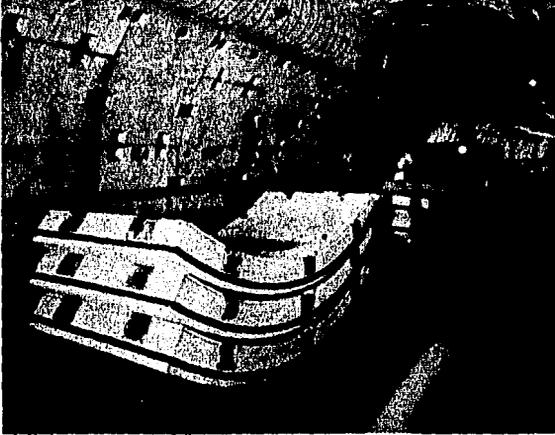
ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS



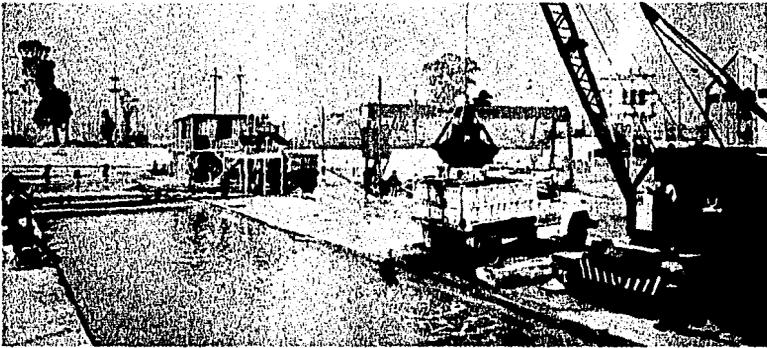
CABINA DE OPERACION



CONSOLA DE CONTROL



TUNEL REVESTIDO Y TRANSPORTE DE DOVELAS



TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LODOS

les hasta la cámara de lodos, donde se aloja la cabeza cortadora. La descarga del lodo fluido conteniendo al material excavado, se bombea fuera de la cámara por un sistema de bombas de lodo, que la regresan a los tanques superficiales. La circulación de lodo fluido se controla para mantener la presión preestablecida en el frente. El sistema de circulación de lodos tiene un desvío alterno (bypass), para iniciar su funcionamiento, para ajustarlo y para pararlo.

La presión de lodo fluido en el frente, la velocidad del flujo y la densidad del abastecimiento y de las descargas se miden, se registran y se manipulan en la consola central. También se miden la carrera y presión del aceite de los gatos de empuje, así como también la velocidad del avance del escudo, para su registro y manipulación como control de la máquina.

Todo el equipo necesario para la operación de la máquina, tal como las bombas de lodos, compresores de aire, sistemas hidráulicos de potencia, transformadores eléctricos y tableros de conexiones, están montados en un tren de arrastre, atrás de la máquina.

El revestimiento de dovelas, se coloca en su sitio mediante un anillo erector operado hidráulicamente, que se ubica dentro de la máquina, en el extremo posterior del escudo. Las dovelas se erigen después que la máquina ha avanzado la carrera completa de los gatos

de empuje. Después de erigir las dovelas, el espacio anular entre éstas y el terreno se llena con inyección.

Tanto la tubería que abastece de lodo fluido al frente, como la que retorna a los tanques superficiales, están equipadas con secciones telescópicas, que permiten la circulación del lodo, al tiempo que avanza la máquina. Los nuevos tramos de tubería para conducción de lodo se instalan cuando la máquina está parada.

La presión del lodo en el frente se mantiene cerrando las válvulas, durante la instalación de las nuevas secciones de tubería.

En la superficie, se extrae del lodo el material excavado y se vuelve a recircular el lodo fluido.

Una consola central en superficie y el panel de control del operador en la máquina controlan al escudo cortador. El panel central de control contiene todos los controles de seguridad, todos los registradores y carátulas de observación, el arranque y paro de licuadoras y el control de la circulación de lodo. El panel del operador, en la máquina, contiene todos los controles de operación para la rotación de la cabeza cortadora, para las aberturas de las compuertas de ranura, los gatos de empuje del escudo, los gatos de la cabeza cortadora y las licuadoras.

El panel del operador también controla el anillo erector. El operador controla la velocidad de avance, la pendiente y el alineamiento.

A continuación, se describe cada uno de los elementos principales del sistema del escudo cortador:

- El escudo es un cilindro hueco. El extremo delantero está biselado para funcionar como borde cortador. El escudo constituye el elemento estructural básico al cual todos los demás componentes se le adicionan. Todos los componentes se ubican en el interior del escudo y su exterior proporciona una superficie lisa sin obstrucciones, al avanzar a través del terreno. El escudo está provisto con una mampara-estanca, que forma una cámara para mezclado de lodo.

Se instalan en el escudo los siguientes sensores de instrumentación:

- Posición de las compuertas de ranura de la cabeza cortadora
- Presión del aceite en los gatos de las compuertas de ranura
- Posición de los gatos de empuje
- Presión del aceite en los gatos de empuje
- Posición de giro de la cabeza cortadora
- Posición de los gatos que avanzan la cabeza cortadora
- Presión del aceite en los gatos que avanzan la cabeza cortadora

- Inclínación del escudo
 - Giro del escudo
 - Presión en la cámara de lodos
- Gatos de empuje del escudo

Se instalan gatos igualmente espaciados, alrededor de la circunferencia interna del escudo. La camisa de los gatos se aloja en el escudo y el pistón con su zapata, se apoyan en las dovelas de concreto.

Durante la operación, los gatos de avance se extienden empujando el escudo hacia adelante y reaccionando contra las dovelas de concreto.

Cuando llegan al extremo de su carrera, se retraen por grupos o individualmente, para facilitar la instalación del revestimiento primario.

La carrera de los gatos de empuje y la velocidad de avance del escudo se miden continuamente, desde el panel de control central. De igual manera, ocurre con la presión de aceite en los gatos.

Todos los controles de los gatos, se localizan en un tablero de control del operador, quien además controla la velocidad de avance.

- Gatos de la cabeza cortadora

Se han diseñado gatos para ejercer una presión

de sostenimiento contra el frente del túnel, así como también hacer avanzar la cabeza cortadora, durante la fase de excavación. Estos gatos se instalan entre la estructura del escudo y el extremo posterior de la flecha de la cabeza cortadora, teniendo una carrera de ± 30 cm.

La carrera de los gatos del cortador y la presión de empuje es continuamente registrada e indicada en el pánel de control.

- Sistema accionador de la cabeza cortadora

La cabeza cortadora está montada en una flecha que rota sobre chumaceras de bronce y además se desplaza axialmente. La rotación de la cabeza cortadora se proporciona por motores que hacen girar un engrane maestro, el cual hace girar a la flecha. El avance de la cabeza cortadora, se logra mediante gatos de empuje.

Los cojinetes sobre los que gira y desliza longitudinalmente la flecha de la cabeza cortadora, tienen lubricación forzada. El sistema de lubricación forzada, proporciona además, una presión positiva en los sellos de la flecha para evitar entrada de material extraño en los baleros.

Los motores eléctricos transmiten su fuerza mediante embragues de aire. El sistema de embrague con aire permitirá arrancar los motores sin carga, uno a la vez, y cuando los cuatro están

funcionando.

Los cuatro embragues se accionan para transmitir el par a la cabeza cortadora.

Los motores de la cabeza cortadora son reversibles, a fin de auxiliar la corrección de giros del escudo.

- Guía y control del escudo

Cuando el escudo ha girado en el subsuelo hasta su límite tolerable, según se verá en el indicador de giro, éste debe corregirse. Esto se realizará, invirtiendo el giro de la cabeza cortadora y aplicando el par de corte, al accionar el embrague neumático. Al corregir el giro, el sentido de rotación de la cabeza cortadora regresará a su posición normal, para continuar la excavación.

Los gatos de empuje se emplean para hacer correcciones de pendiente y alineamiento durante las operaciones de tuneleo. Esto se realiza, ajustando la velocidad de extensión de cada grupo de gatos de empuje. Esto obliga a un lado del escudo a avanzar más aprisa que el otro, resultando con ello un cambio en la alineación. La pendiente y el alineamiento del escudo, se registra continuamente, mediante sistema laser ó con métodos convencionales de topografía.

B) SISTEMA DE LODOS.

El flujo general de lodo bentonítico es del tanque de mezclado a la bomba P_1 , pasando por un medidor del flujo de suministro, un medidor de densidad y la válvula reguladora de presión de suministro, hasta llegar a la cámara del cortador. La descarga se realiza desde la cámara del cortador, pasando por la válvula reguladora de presión de descarga, el medidor de densidad en la descarga, la bomba de descarga P_2 , las bombas intermedias P_n , el medidor de flujo en la descarga y retornando al tanque para descarga de lodos.

Un sistema de bypass se instala para arranque inicial del sistema de lodos, paro de emergencia y paro total del sistema de circulación de lodos. Cuando se usa el sistema de bypass, no se envía lodo a la cámara del cortador y circula en un circuito cerrado.

Para entender el sistema de circulación de lodos, es necesario hacer la siguiente descripción de los componentes, así como su interacción para formar dicho sistema:

1. Bomba P_1

Esta bomba es de suministro y tiene la rama de succión conectada al tanque de lodos. La rama de descarga está conectada a la tubería de suministro de lodos.

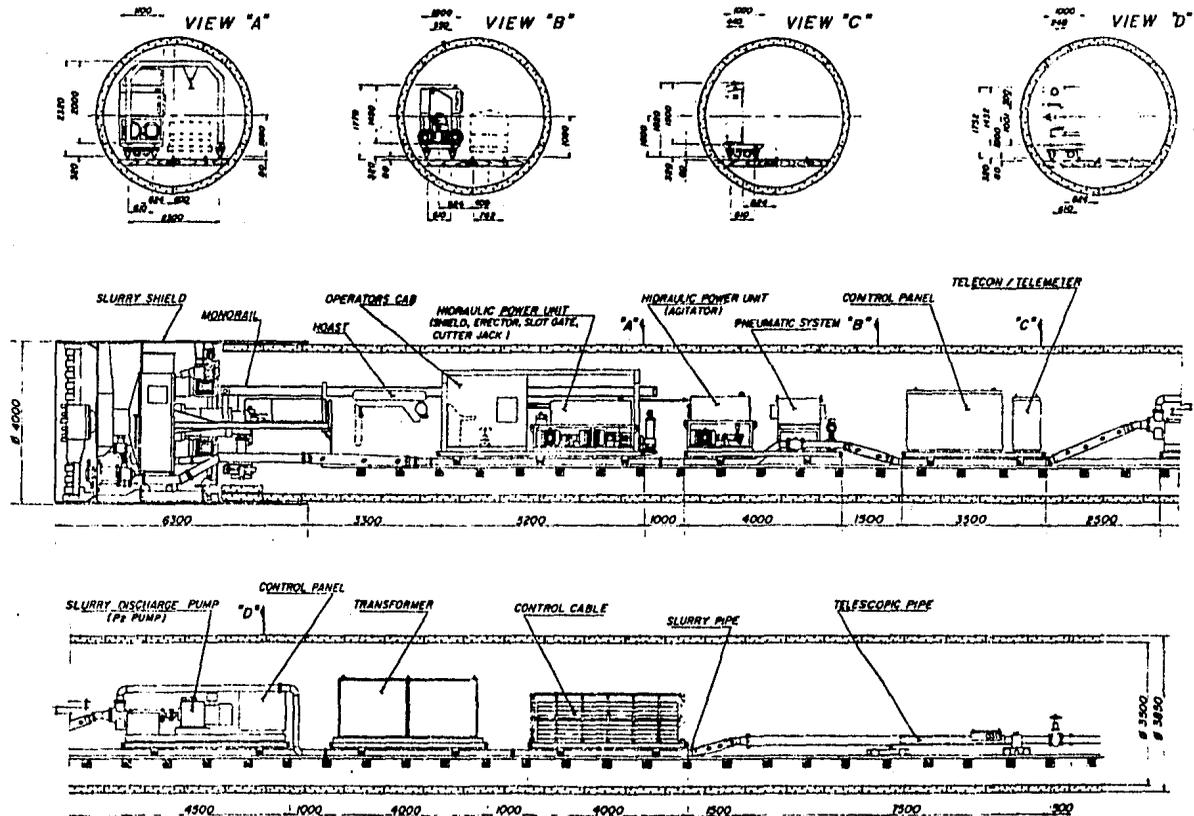


FIGURA 13. TREN DE ARRASTE Y EQUIPO DE UN ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO CON LODOS

La unidad de bombeo consiste de un motor eléctrico, de velocidad constante, conectado a la bomba por un acoplamiento de velocidad variable ó embrague.

Las revoluciones de la bomba pueden variarse, cambiando la corriente eléctrica al acoplamiento. El acoplamiento desliza en proporción a la corriente aplicada. Un acoplamiento ó caja de control eléctrico de la bomba, está montado en la armadura de la bomba. La flecha de la bomba mueve un tacómetro que genera una señal eléctrica, para usarse en el control de la velocidad de la bomba y dar una indicación visual en el medidor del tablero.

2. Bomba P_2

Esta es la bomba de la tubería de descarga. La bomba, el acoplamiento, el motor y la descripción para el control de la velocidad, son idénticos a la bomba P_1 .

3. Bombas intermedias P_n

La descarga del sistema de circulación requiere bombas de inyección secundaria ó impulsadoras, debido a la carga y longitud de la línea de retorno, además de la densidad más alta del lodo de descarga. El diseño de las bombas impulsoras prevé un máximo de 5 en la tubería de descarga, que puede llegar a longitudes de 1.5 km. por la dis-

tancia entre lumbreras y la separación de los tanques almacenadores a la lumbrera de operaciones.

- Todas las bombas intermedias son de una sola velocidad fija.

4. Medidores de flujo

Los medidores de flujo y descarga son idénticos para propósitos de descripción. Son electromagnéticos y operan en base al principio de inducción de Faraday. El flujo de lodo pasa a través de dos bobinas energizadas por un campo magnético de corriente alterna. El flujo de lodo desarrolla una fuerza electromotriz (voltaje) que es detectada por sensores. El voltaje generado es proporcional a la velocidad del lodo y debe ser amplificado a través de un amplificador diferencial. Después de ser amplificada y rectificada, la corriente de salida es una señal de corriente directa proporcional a la velocidad del flujo.

5. Medidores de densidad

Los medidores de densidad para el suministro y descarga, también son idénticos para propósitos de descripción. Los medidores de densidad operan en base al principio de una señal ultrasónica reducida en su intensidad por la presencia de sólidos en suspensión. El incremento de sólidos en suspen-

sión, tiene un efecto reductivo mayor en la señal, que el debido a disminuir los sólidos en suspensión. Transductores eléctricos, uno transmisor y el otro receptor, están montados directamente opuestos uno del otro.

La señal de la corriente de salida del medidor de densidad es generalmente en miliamperes y debe ser procesada electrónicamente, para ser aplicada al control.

6. Presión de lodo en la cámara del cortador.

Esta presión es medida por un transductor de presión, que transmite la señal eléctrica resultante como voltaje.

7. Presión de lodo de suministro.

Esta presión es medida por un transductor de presión, que transmite la señal eléctrica resultante como un voltaje.

Durante la operación del sistema, se siguen los siguientes objetivos:

- Contener las presiones de tierra e hidrostáticas de la cara del túnel. Una presión de lodo debe mantenerse en la cámara del cortador a un valor constante, en conjunto con la presión de la cabeza cortadora.

- El lodo suministrado más el agua y ma-

teriales excavados, son retornados mediante bombeo hasta la superficie, sustituyendo un sistema convencional de rezaga y manto de material excavado.

La presión de lodo que se necesita mantener en la cara, es controlada por las revoluciones de la bomba de suministro en relación a las revoluciones de la bomba de descarga. La presión se incrementa al incrementar las revoluciones de la bomba de suministro, arriba de las de la bomba de descarga. La operación contraria es para reducir la presión de la cámara.

La presión de la cámara podría también incrementarse, en función de la relación de descarga del material excavado. El monto del flujo de descarga del material excavado será más grande que el monto del flujo de suministro. Esto se usará más tarde en la instrumentación, para determinar el volumen excavado. Por ejemplo: la diferencia entre los flujos de suministro y descarga, es aproximadamente igual al volumen de excavación.

C) SECUENCIA DE OPERACION.

1. Conectar el interruptor de energía eléctrica. La energía de los tableros permitirá

operar los controles.

2. Arrancar el compresor de aire. Oprimir el botón del arrancador. El compresor arrancará y llenará el tanque con aire comprimido. El compresor trabajará en vacío, cuando se cierre el switch de presión de aire al tanque.

Cuando la presión del tanque está en el punto de trabajo, el switch de presión se cerrará y activará dos válvulas solenoides que se operan neumáticamente y que además, cierran las válvulas reguladoras de suministro y descarga de lodos y abren la válvula de lodos del bypass.

3. Arrancar la bomba P_1 de suministro.
4. Arrancar la bomba P_2 de descarga.
5. Arranque de las bombas intermedias P_n .
6. Si alguna bomba no arranca ó se para debido a una falla, todas las bombas se pararán.
7. Todas las bombas trabajando. La presión en la cámara del cortador es estable, indicada por el sensor de presión en el frente y la estabilización del flujo se indica con los medidores de flujo. Esta condición se ajusta manualmente, variando las revoluciones de las bombas P_1 y P_2 , según se necesite.

8. Switch para el control automático de la circulación de lodos. El circuito automático de medición de flujo es accionado. Las bombas P_1 y P_2 pasan de la moda manual a la de control automático, con velocidad variable.

El sistema automático está en la posición de ordenar y ajustará la presión de lodo de suministro (revoluciones de la bomba), para igualar la presión de lodo en la cara.

9. Estabilización de la presión y flujo. El sistema está listo para pasar de la moda bypass a una total circulación. El sistema de circulación está en moda automática.
10. Cierre de la válvula bypass. Con ésto, se inicia la siguiente secuencia: Conforme la válvula del bypass se cierra, se incrementa la presión en la línea de suministro, debido al cambio del orificio de la válvula. Cuando la presión de suministro (detectada por el transductor de presión en la línea de suministro), es igual a la presión de la cámara (detectada por los transductores de presión en la cámara), la válvula neumática de solenoide, que suministra aire comprimido a la válvula de suministro, actuará y abrirá la válvula de suministro. La válvula de solenoide también energizará un timer. Después de un cierto lapso, una válvula, solenoide neumática que controla la válvula de descarga, abrirá dicha válvula.

11. El sistema de lodos está ahora listo para la excavación.
12. Durante la excavación. Sistema de lodos en automático (operando en moda de circulación).

El escudo ha avanzado y el cortador está girando y avanzando. El flujo de descarga es mayor que el de suministro. La diferencia se detecta con los medidores de flujo, se compara y la computadora calcula y muestra en el tablero el volumen excavado.

Los siguientes indicadores del tablero están trabajando:

- Volumen excavado
- Volumen de excavación por unidad de tiempo
- Relación Presión de lodo de suministro/ Presión de lodo en la cara cortadora
- Revoluciones por minuto de la bomba P_1
- Revoluciones por minuto de la bomba P_2
- Concentración (densidad) de lodo de suministro
- Concentración (densidad) de lodo de descarga
- Relación de flujo de lodo de suministro
- Relación de flujo de lodo de descarga
- Presión de lodo en la cámara del cortador
- Registro de los siguientes datos:
 - Volumen de excavación

- Densidad del lodo de suministro
- Densidad del lodo de descarga
- Relación de flujo del lodo de suministro
- Relación del flujo del lodo de descarga

D) CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL ESCUDO.

El diseño de un escudo cortador incorpora una serie de características que contribuyen a cumplir ciertas condiciones para el correcto funcionamiento del mismo. Estas características se resumen a continuación:

1. El borde cortador del escudo, se proyecta un mínimo de 30 cm. adelante de la cabeza cortadora y alrededor de su periferia.

El objetivo de ésto es hacer mínimo el remoldeo del suelo, adelante y alrededor del escudo por la acción de la cabeza cortadora. Se busca con ello aplicar el principio del muestreo inalterado, mediante tubos de pared delgada. Por lo tanto, el borde cortador se hincará en suelo prácticamente inalterado y la cabeza cortadora operará bajo la protección del borde cortador, auxiliando con ello el control de la excavación, con las ventajas y desventajas siguientes:

- a) Al hacer mínimo el remoldeo en el borde

cortador, será más fácil guiar el escudo.

- b) Si el remoldeo exterior al escudo se hace mínimo, se tendrá una mejor redistribución de cargas y deformaciones sobre el revestimiento primario.
- c) El borde cortador contribuirá a formar un tapón de arcilla, el cual actuará como sello, para restringir la pérdida del fluido a presión.
- d) El borde cortador cortará y confinará las grietas, transversales angostas, que se encuentren en la trayectoria del escudo, antes de que la cabeza cortadora y el lodo lleguen. Esto reducirá las pérdidas de presión y los ajustes subsiguientes en el fluido, por efecto del llenado de grietas.
- e) Una desventaja es que la longitud del escudo se incrementa en 30 cm., lo que a su vez aumenta la fricción lateral y la dificultad de la guía del equipo.
- f) La cabeza cortadora no puede utilizarse para cortar el material duro, ya que éste debe ser penetrado primeramente por el borde cortador del escudo.

2. La cabeza cortadora no está fija al escudo, sino que tiene deslizamiento longitudinal-

mente, durante la excavación. Se busca con ello, separar las actividades de empuje y guía del escudo de la excavación, además de proporcionar soporte mecánico y/o hidrostático del frente, en todo momento. El avance normal del escudo cortador alterna, por lo tanto, empuje del escudo con excavación de la cabeza cortadora.

- a) Si en un determinado momento no se requiere soporte total del frente, el dispositivo de retracción permite disminuir la fuerza de empuje de la cabeza cortadora, para excavar suelo duro, ubicado dentro del borde cortador.

La reducción de fuerza de empuje hace más eficiente el par motor disponible, que de otra manera, se mermaría por fricción.

- b) El independizar excavación y empuje, mejora el control de guía.
- c) El control de excavación se mejora y por lo tanto, el remoldeo del suelo adelante de la cabeza cortadora se hace mínimo.
- d) El control del volumen excavado también se mejora.

- 3. El suelo que pasa a través de las aberturas de la cabeza cortadora, se controla mediante compuertas de ranura. El objetivo es permitir el control de la excavación y so-

porte mecánico de las aberturas, cuando ello se requiere.

- a) Las compuertas de ranura funcionan como puertas con resorte, para controlar el volumen de suelo que entra en la cámara de lodos, a través de la cabeza cortadora.
 - b) Las compuertas de ranura pueden cerrarse durante paros prolongados y en condiciones de emergencia, proporcionan soporte mecánico total de frente.
4. El escudo cortador será guiado mediante operación de los gatos de empuje por cuadrantes, apoyados en el ademe primario. Para avanzar el escudo cortador, el operador seleccionará la velocidad de empuje y las presiones de los gatos se ajustarán a tal velocidad. El avance de los gatos será registrado con sensores, a fin de proporcionar información para la operación de guía.
 5. El mecanismo de transmisión para la cabeza cortadora, proporcionará el par necesario para arrancar y hacer girar dicha cabeza, al mismo tiempo que mantiene la presión de soporte simple y confiable, con selección opcional de dos velocidades de operación.
 6. El escudo cortador tendrá un erector para instalar dovelas de concreto en tiempo mí-

nimo. El erector tendrá capacidad para reemplazar los segmentos del segundo anillo ubicado dentro del faldón, si es que se daña durante el avance.

- a) Puesto que el anillo erector tiene su centro hueco, no habrá interferencia con las tuberías de lodo del escudo y las líneas hidráulicas y eléctricas.
- b) La operación del anillo erector, se hará con un control portátil de mano, para facilitar la visión y seguridad del trabajo.

7. Los sistemas hidráulicos individuales se proporcionan para agitadores del lodo, gatos de empuje, gatos de la cabeza cortadora, gatos de las compuertas de ranura y erector de dovelas.

8. El sistema de circulación de lodos proporcionará la presión continua necesaria para estabilizar el frente, además de retirar el suelo cortado de la cámara de lodos, a suficiente velocidad para que el escudo alcance su rendimiento de diseño.

- a) El lodo de baja densidad puede recircular por el frente ó ser desviado por la ruta alterna (bypass) que no pasa por la cámara de lodos, según los requerimientos de operación del escudo cortador. La ruta alterna se utiliza siempre que la cabeza cortadora no se encuentre excavando.

- b) El lodo de baja densidad se mezcla con el suelo, que entra a la cámara de lodos, a través de las ranuras de la cabeza cortadora, durante la fase de excavación es agitado por espas situadas en el reverso de la cabeza cortadora y por 4 licuadoras. La mezcla resultante se retira por bombeo de la cámara de lodos, como un lodo de alta densidad.
 - c) La circulación del lodo se acciona por una combinación de bombas de velocidad variable y constante, ubicadas en superficie, sobre el tren de arrastre, a lo largo del túnel y en la lumbrera.
 - d) En la superficie, el lodo de alta densidad es sedimentado y el excedente ligero se rebomba al túnel, después de añadirle agua y reacondicionarlo; el excedente pesado se elimina.
9. Es necesario agitar y mezclar suelo y lodo para lograr una mezcla bombeable. La agitación se logra con las espas de la cabeza y las 4 licuadoras de operación independiente, situadas en la base de la cámara de lodos.
10. Se proporcionará un sistema semiautomático de observación y control para asegurar la estabilidad continua del frente, realizar la máxima velocidad de avance y asegurar la confiabilidad del escudo.

- a) Es vital conservar la presión del lodo para soportar el frente y controlar la excavación. Por lo tanto, esta función es semiautomática para evitar pérdidas de presión inadvertidas, que pudiesen provocar inestabilidad del suelo.
- b) Las funciones de operación serán observadas y controladas para asegurar que el volumen del suelo excavado, sea siempre igual con el volumen teórico avanzado, para evitar:
- sobre excavación, que provocaría inestabilidad del frente, con posibilidad de crear asentamientos en superficie.
 - infra excavación, que provocaría esfuerzos de compresión en el suelo, su consecuente remoldeo y nuevamente inestabilidad del frente, propiciando que se pueda bufar el terreno.
- c) El sistema de circulación de lodo y las funciones de guía, serán observadas y exhibidas en una consola central ubicada en superficie. Ahí, una computadora calculará continuamente los volúmenes, excavado y avanzado, indicando además los pasos a seguir para corregir las diferencias observadas, ajustando la velocidad de avance de la cabeza, las compuertas de ranura ó la presión del lodo.
- d) Todos los controles directos de guía, es-

tarán en la cabina del operador ubicada en el tren de arrastre.

11. Se han seleccionado tres modos alternativos de operación para hacer avanzar el escudo.

a) La operación normal requiere ciclos alternados de empuje y excavación para máximo rendimiento y control de guía.

Avances de empuje y excavación de 30 cm. se alternarán hasta lograr un avance total de 1.15 m., requerido por el ancho de las dovelas de 1.00 m., después de lo cual éstas serán instaladas.

b) Si las condiciones del suelo lo permiten, el escudo puede también operar empujando y excavando, simultáneamente.

En esta condición, la proyección del borde cortador adelante de la cabeza de corte puede mantenerse entre 30 y 60 cm. para lograr las condiciones más ventajosas de avance. La velocidad de avance se limitará a la capacidad del sistema de lodos.

c) Bajo condiciones de emergencia, cuando se vuelve necesario ejercer presiones mayores de las normales, el sistema hidráulico de alta presión de 700 kg/cm^2 , puede entrar a operar y así se duplicará la capacidad de empuje. Bajo estas condiciones, la

velocidad de avance será de 4 cm/min.

12. El revestimiento primario se tendrá con empaques para permitir inyección inmediata de los anillos al salir del faldón del escudo. La inyección se requiere para proporcionar interacción entre el suelo y el revestimiento.
13. Se requiere un tren de arrastre para proporcionar espacio para el montaje del equipo, así como para la línea de suministro de dovelas, la cabina del operador, el equipo eléctrico e hidráulico, los recipientes de aceite para el sistema hidráulico, la instrumentación y controles mecánicos, las bombas de lodos, el sistema de ruta alterna (bypass), las válvulas, las bombas de inyección, sus tanques de almacenamiento y el sistema de recirculación.
14. El soporte de emergencia del frente a base de aire comprimido, permitirá acceso a la cámara de lodos y al frente, bajo condiciones extraordinarias, cuando esto se requiera. Tal acceso puede realizarse mediante:
 - a) Cerrar las ranuras de la cabeza cortadora y mantener la presión contra el frente.
 - b) Reemplazar el lodo en la cámara de lodos por aire comprimido, a la presión requerida por estabilidad.

- c) Abrir las compuertas de las ranuras y hacer retroceder la cabeza cortadora, si se requiere.
- d) Entrar en la cámara de lodos a través de una de las dos esclusas de personal, ubicadas en la mampara principal.
- e) Entrar al frente, por una de las dos puertas ubicadas en la cabeza cortadora.

El aire comprimido será proporcionado por un compresor portátil de baja presión, situado dentro del túnel ó con tubos conectados a una planta de aire.

Concluyendo, en comparación con los métodos conocidos para la construcción de túneles en suelos blandos, el uso de escudo cortador con frente presurizado por lodos, es el más adecuado en la actualidad en la Ciudad de México, puesto que ofrece seguridad en el frente de excavación, reduce la plantilla de personal y sus instalaciones son mínimas, además de que la productividad en el túnel es considerablemente mayor. El uso de equipos electrónicos en la construcción de túneles hacen de este método un sistema prácticamente automatizado, reduciendo aún más la posibilidad de que ocurran equivocaciones de carácter humano.

C) OTROS TIPOS DE ESCUDOS.

El riesgo principal durante la excavación de un túnel en formaciones arcillosas, es la posible extrusión ó invasión del terreno por cualquier resquicio que exista, en especial en el frente de excavación. Una variación en los escudos para contrarrestar este problema ha sido la del escudo con frente enrejillado, que da soporte a la arcilla por apoyo directo. Una serie de compuertas ó ventanas en el enrejillado permiten el ingreso controlado del material a una tolva dentro del escudo, donde se desmenuza y se licúa para enviarlo al exterior por vía hidráulica.

Este tipo de escudo, de 4 m. de diámetro, se usó para excavar algunos de los colectores del centro y oriente de la Ciudad de México, a profundidades entre 12 y 15 m.

Otro escudo también muy utilizado, de casi 3 m. de diámetro, es uno con frente provisto de brazos cortadores oscilantes en forma de paletas, tres superiores y tres inferiores, que aparte de cortar el material mediante dientes, se apoyan contra el frente y parcialmente lo sostienen.

Este tipo de escudo ha sido utilizado también en túneles poco profundos, como han sido varios sifones o desvíos construidos para dejar paso libre a la obra del Metro.

El revestimiento más utilizado con este tipo de escudo, ha sido a base de dovelas de placa de acero acostilladas, en tanto que para el de frente enrejillado, han sido dovelas de concreto unidas a hueso y separadores de acero.

III. APLICACIONES EN MEXICO

a) TUNELES DEL METRO.

El Plan Rector de Vialidad y Transporte Urbano del Distrito Federal preveé dentro del Plan Maestro del Metro, que las futuras líneas serán construídas en zonas muy transitadas y en avenidas ó calles relativamente estrechas, por lo cual una solución superficial, elevada ó en cajón, será cada vez más difícil de aplicar, dando lugar a la posible realización de líneas en túneles profundos, minimizando afectaciones al tráfico, reduciendo las obras inducidas y afectaciones a instalaciones de Servicios Públicos.

Las primeras líneas del Metro, alojadas en túneles profundos, corresponden a la prolongación hacia el sur de la línea 3 a partir de la estación Viveros y a la totalidad de la línea 7.

Estas dos líneas se ubican en zona de transición, donde se encuentran suelos firmes, usándose en su construcción, métodos convencionales de perforación ó un escudo de frente abierto.

Este escudo se ha empleado en la prolongación hacia el poniente de la línea 1, de la estación Tacubaya a la terminal Observatorio; así como en un tramo de 981 m. entre las estaciones de Constituyentes y Tacubaya de la línea 7 y en un tramo de 1,048 m. de longitud de ambas cabeceras, norte y sur, de la estación Tacuba en la misma línea 7, estación de correspondencia con la línea 2.

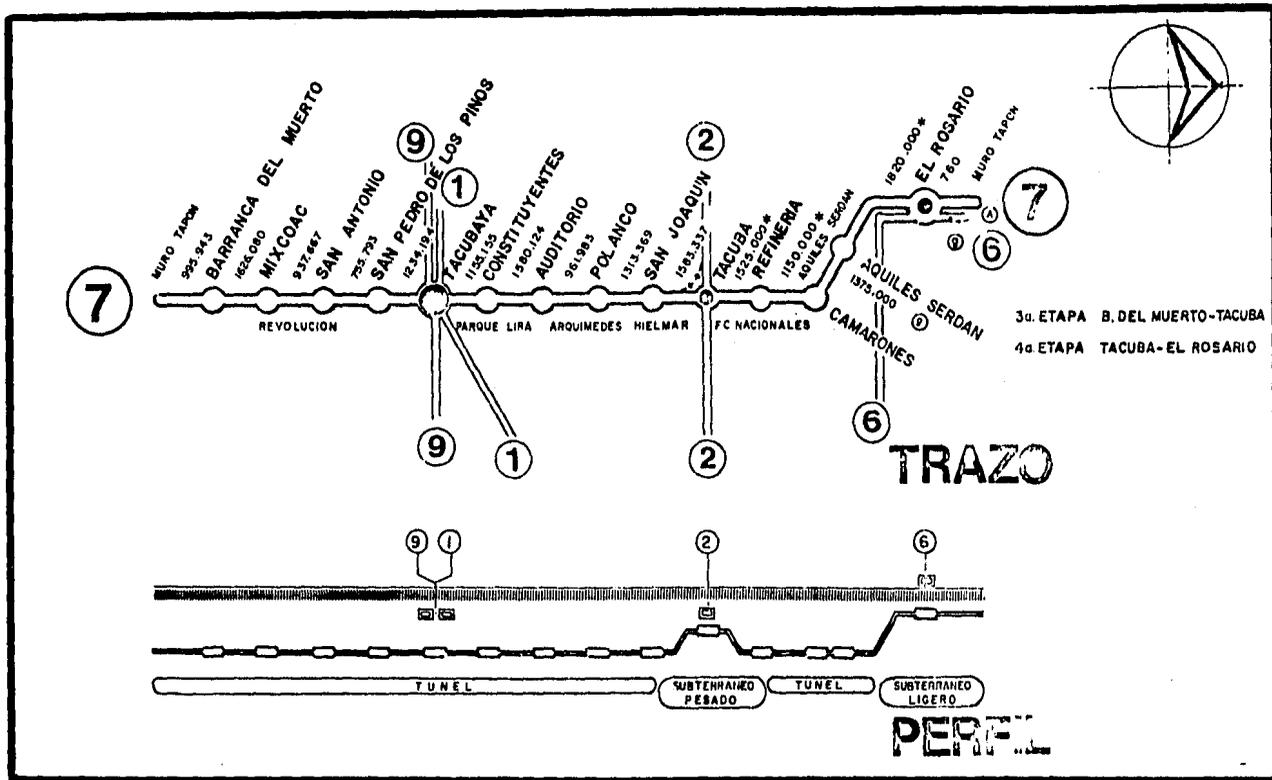


FIGURA 15.

El tramo excavado con escudo en la línea 1 atraviesa, además de construcciones, el anillo periférico y a la Vía del Ferrocarril de Cuernavaca, en abanicos aluviales del río Tacubaya. El escudo usado, es de frente abierto de 9.15 m. de diámetro y relativamente corto, de 4.60 m. en sentido longitudinal, con aproximadamente 150 toneladas de peso.

El procedimiento constructivo fue similar al descrito posteriormente para el tramo de la línea 7 norte-norte.

Actualmente, se lleva a cabo la construcción del túnel de la línea 7 norte-norte, que irá de la estación El Rosario, de correspondencia con la línea 6, a la estación Tacuba, de correspondencia con la línea 2, pasando por las estaciones intermedias de Aquiles Serdán, Camarones y Refinería.

El tramo entre El Rosario y Aquiles Serdán, será excavado con el mismo escudo usado para los tramos anteriores. A este escudo se le hicieron algunos implementos para usar dispositivos para la excavación mecanizada en el frente y aumentar así el avance por día, el cual era del orden de 6 m. lineales diarios, en los tramos en que se atacó el frente manualmente, con herramientas neumáticas

Las mejoras hechas al escudo, permiten el acceso al frente de ataque a una máquina rosadora marca Westfalia con capacidad de $40 \text{ m}^3/\text{hr}$, un cargador frontal de descarga lateral izquierda, que vacía la rezaga en vagonetas de 6 a 8, y con un sistema implementado para la rezaga, descrito posteriormente, se espera tener un rendimiento entre 8 y 10 m. lineales por día laborable. Se trabajará en dos jornadas de 12 horas cada una, deteniendo el avance los Domingos, para realizar el mantenimiento preventivo de las partes hidráulicas y del equipo del escudo.

Este avance considera que el equipo esté trabajando normalmente y con la fábrica de dovelas produciendo, conforme al programa constructivo.

Es interesante resaltar que, en el primer tramo excavado con este escudo, en México, se tuvo un avance promedio de 1.2 m. por día, en un lapso algo menor a tres meses. Este rendimiento tan bajo se debió a varias circunstancias, como la novedad del uso de un escudo de tales dimensiones, la implementación del método de rezaga utilizado y el comportamiento del terreno arriba del túnel, que sufrió fuertes asentamientos y paralizaban el ritmo del avance.

Utilizando los métodos convencionales en la excavación de los túneles del Metro, se han llegado a tener avances promedio de 3 a 4 m. lineales por día.

El resto del tramo, es decir, de la estación Aquiles Serdán a Tacuba, se excavará con la ayuda de otro escudo de frente abierto, actualmente en proyecto y con características similares al anterior. Este escudo será fabricado en México por Industria del Hierro, S. A. y agilizará la construcción del tramo de la línea 7 norte-norte.

Para escoger el tipo de escudo conveniente, sustituyendo en partes el empleo del método convencional de excavación, el Departamento del Distrito Federal, por medio de COVITUR, realizó un estudio de factibilidad sobre su utilización en diversas zonas de la Ciudad de México. En dicho estudio se definen como potencialmente útiles para la zona de arcillas blandas, los escudos de frente cerrado y para la zona de transición, en donde encontramos suelos bastante más estables, se recomendó el uso de escudos de frente abierto.

Con el fin de escoger el escudo idóneo para cada caso, se concentraron, entre otros datos, los rendimientos de diversos escudos en el mundo, las ofertas de suministro de éstos, comparaciones de costos con métodos convencionales, así como los costos por unidad de longitud excavada por modelos diferentes y variadas condiciones del subsuelo. Dichos datos se obtuvieron del estudio realizado en Octubre de 1982.

- En cuanto a los rendimientos de los escudos, se tienen los siguientes datos:

| <u>PROYECTO</u> | <u>DIAMETRO DEL ESCUDO</u> (m.) | <u>AVANCE</u> (m1/día) |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Metro de Caracas (poniente) | 5.60 | 4.04 |
| Metro de Caracas (oriente) | 5.60 | 6.15 |
| Sistema de drenaje, San Fco., Cal. | 3.66 | 9.14 |
| Metro de Amberes | 6.40 | 5.85 |
| Metro de Berlín | 6.40 | 10.05 |
| Túnel Vracar, Belgrado | 7.30 | 12.00 |
| Alcantarillado de Tokio | 6.65 | 6.25 |
| Ferrocarril Nacional Japonés | 7.24 | 8.50 |

- Con relación al costo para diferentes diámetros de túnel, utilizando escudos de frente cerrado, tenemos:

| <u>FABRICANTE</u> | <u>DIAMETRO (m.)</u> | <u>PRECIO</u> <u>(\$ U.S. DLS. x 10⁶)</u> |
|-------------------|----------------------|---|
| Bade and Theelen | 8.50 | 3.96 |
| Bade and Theelen | 6.65 | 3.07 |
| Hitachi | 6.53 | 3.23 |
| Zokor | 6.40 | 3.36 |

- Relación de costos de construcción de túneles excavados con escudo y el método convencional, en suelos firmes de la Ciudad de México:

| <u>CONCEPTOS</u> | <u>CON ESCUDO</u> | <u>CONVENCIONAL</u> |
|--|-------------------|---------------------|
| Excavación | 1.00 | 0.95 |
| Ademes: Temporal: -concreto lanzado | 0.00 | 0.30 |
| -marcos de acero | 0.00 | 0.13 |
| Definitivo: | 1.00 | 0.94 |
| | 2.00 | 2.32 |

A este respecto, cabe señalar que la comparación se hizo entre el uso del escudo de frente abierto, sin medios mecánicos para la excavación en el frente, en una pequeña parte de la línea 7 y el empleo del método convencional, utilizando cortadoras giratorias frontales, para una mayor longitud de la misma línea y para algunos tramos de la línea 3 sur.

De la tabla, se puede comparar que la excavación con el escudo es 5% mayor en costo que la correspondiente al método convencional; pero en lo que toca al ademe de los túneles,

resulta 37% más costoso el método convencional que para el caso del escudo, en el cual, siendo el túnel circular, se tienen ciertas ventajas en cuanto a su comportamiento estructural. La ventaja económica que refleja la comparación anterior no puede tomarse como definitiva, debido a las particularidades de cada caso, además que el análisis se realizó con base a la situación económica prevaleciente en el país, a tal fecha.

De hecho, en la mayoría de los casos, las diferencias de costos entre ambas técnicas, no sobrepasa tanto para la toma de decisiones, como la diferencia de rendimientos, los cuales resultan bastante más altos en el caso de los escudos, justificando su aplicación, aunado esto a las múltiples ventajas que estas máquinas ofrecen.

- Los costos por metro lineal de túnel excavado, varían dependiendo de las características de la obra, así como del país donde se realice la misma. Entre ellas destacan:
 - El costo de mano de obra, en relación con el costo de la maquinaria.
 - La longitud de los túneles excavados con un mismo escudo, lo cual depende para la amortización de la máquina.
 - Problemas geotécnicos de cada región que puedan causar retrasos de la obra.
 - Diámetro del túnel por excavar
 - Tipo de escudo
 - Tipo de revestimiento.

- Método de rezaga, utilizado.

Los análisis muestran una dispersión acentuada de costos en función de los antecedentes anteriores, aunque se ha establecido una media en que sobresalen los escudos de frente abierto, resultando un costo del orden de \$20,000 U. S. Dls. por metro lineal, cifra que resulta congruente con el costo para métodos convencionales en túneles construidos en México.

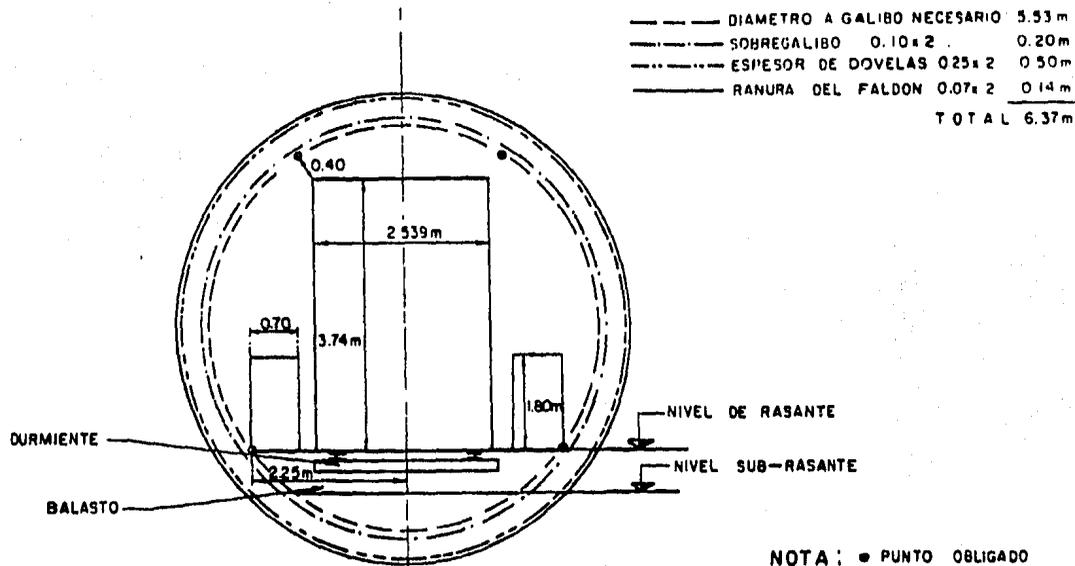
Las características geométricas del túnel, como son: diámetro, ubicación del trazo y profundidad, son algunas condicionantes para la construcción y operación del metro.

- En primer lugar, el diámetro está en función del número de vías que deban alojarse y de la distribución de los andenes en las estaciones. Asimismo, se verá sujeto a las deformaciones inducidas permisibles, las cuales serán mayores a medida que el diámetro aumente.

El diámetro conveniente del escudo para la excavación de los túneles, se calculó para que se alojen las dos vías del metro, o sea 9.15 m. de diámetro exterior.

- El trazo del túnel está influenciado por aspectos de construcción de las estaciones en sitios propicios y por las deformaciones del terreno sobre la clave del túnel, que no deben causar daños en superficie, por lo cual se ha buscado ubicar los ejes del túnel a lo largo de vialidades ó bajo construcciones que no tengan cimentaciones profundas.

Cabe señalar que, en excavaciones con métodos convencionales, se han registrado deformaciones de hasta 4 cm. con un promedio de 1.7 cm. y que la excavación con escudo logra tener menores movimientos.



**DEFINICION DEL DIAMETRO EXTERIOR DEL ESCUDO NECESARIO
PARA TUNEL DE TRAMO PARA UNA VIA DEL METRO.**

FIGURA 16.

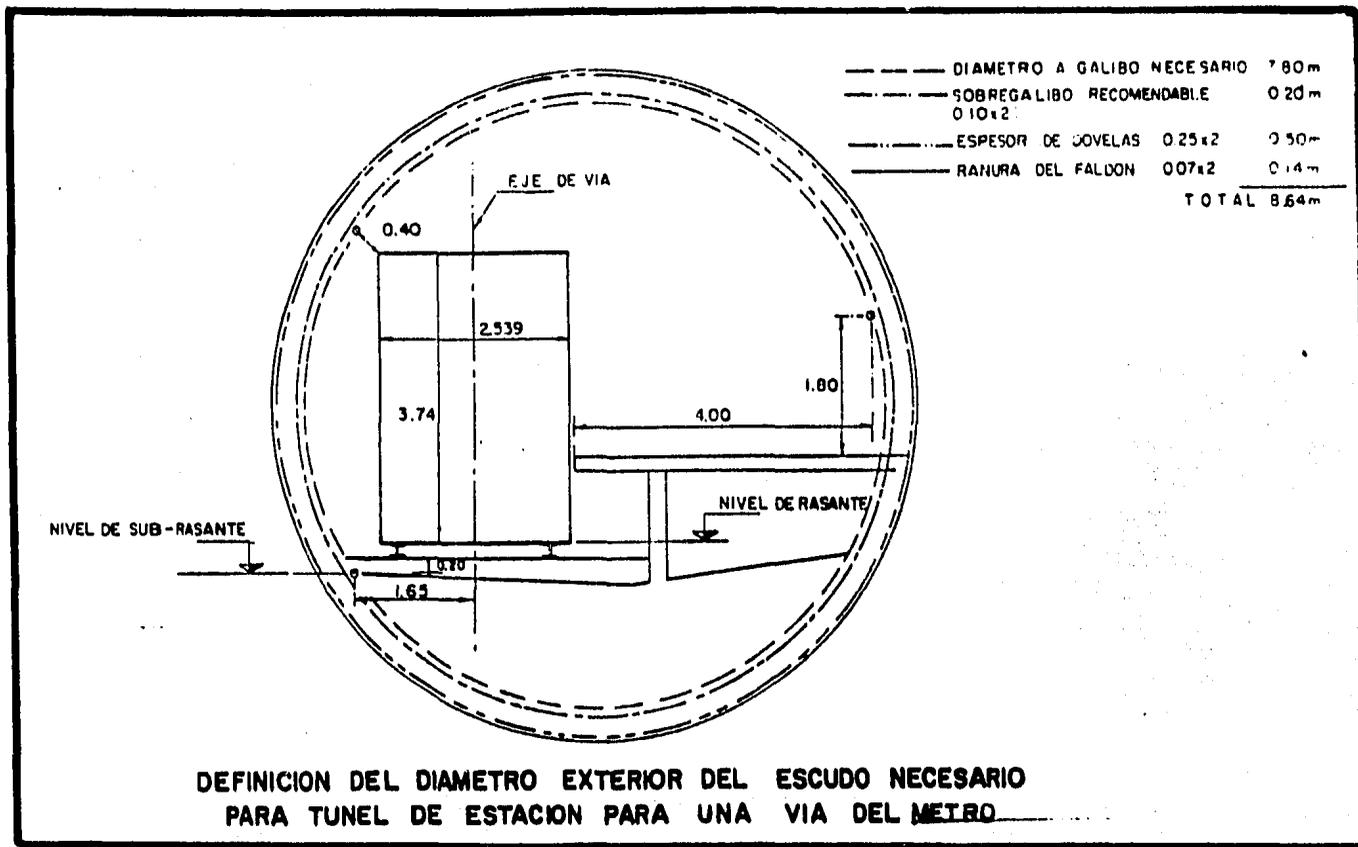


FIGURA 17.

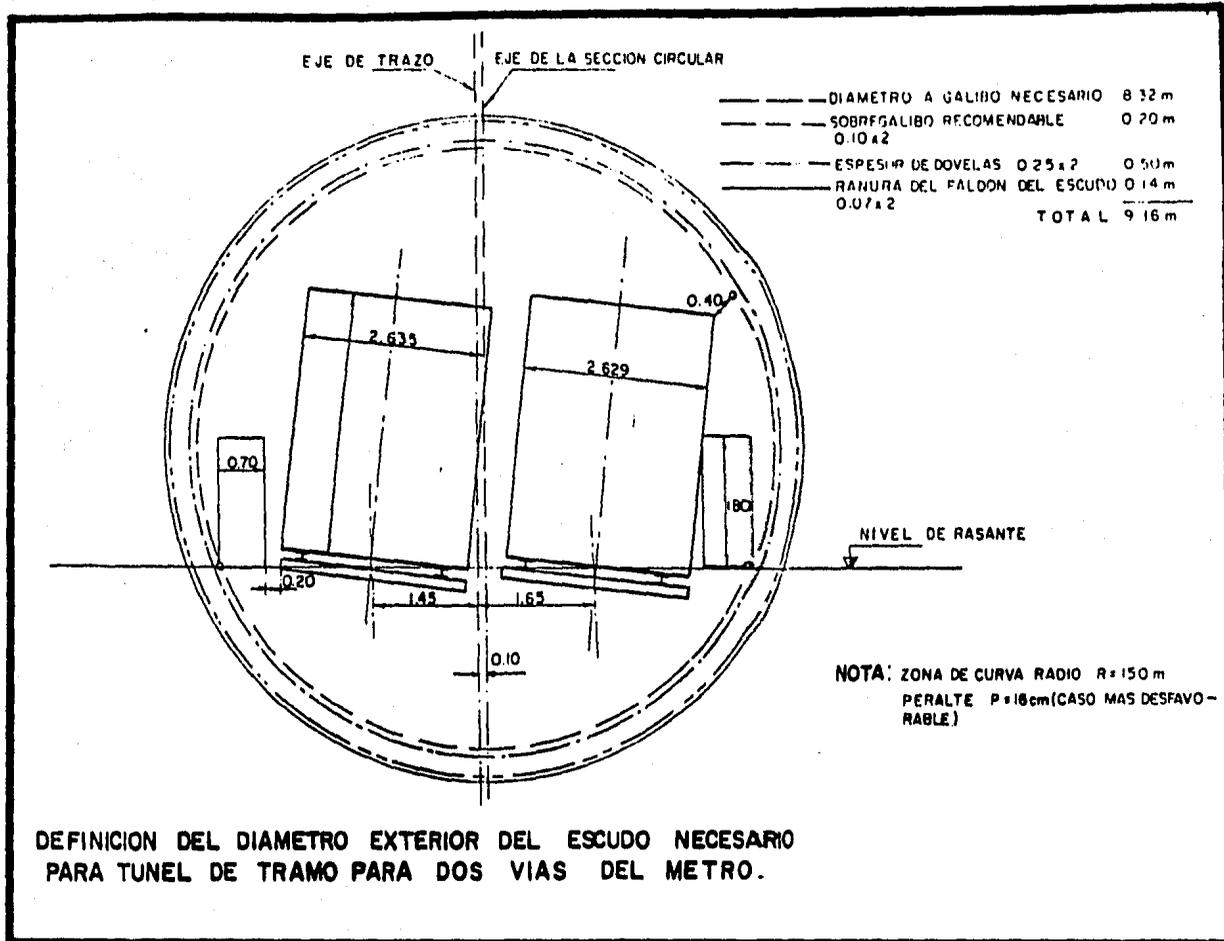


FIGURA 18.

- La profundidad de los túneles se liga a la profundidad de las estaciones de acceso, siendo ésta la menor posible por cuestiones de comodidad para los usuarios y de costo de construcción, buscando reducir al mínimo las deformaciones inducidas y lograr la menor presión de estabilización en el frente, facilitando y economizando su construcción.

La profundidad de desplante de la plantilla varía entre los 20 y 30 metros, quedando ubicado el túnel por debajo de los servicios municipales y de las cimentaciones que pudieran encontrarse en su recorrido.

En cuanto al procedimiento constructivo utilizado, en la excavación y construcción del túnel con un escudo de frente abierto, según especificaciones elaboradas por COVITUR para la línea 7 del Metro, se podrían mencionar las siguientes consideraciones, aunadas con la explicación del funcionamiento de los escudos, descrita anteriormente y en particular, de los escudos de tipo de frente abierto:

- El túnel tendrá un diámetro interior de 8.64 m. y 9.15 m. de diámetro exterior, correspondiente al diámetro del cilindro de acero que forma al escudo.
- El revestimiento del túnel será a base de dovelas de concreto. Cada anillo está formado por 3 dovelas: a, b y c. Las 2 primeras forman los costados y la clave; la dovela c forma la cubeta. Su ancho será de 0.80 m. si se trata de las del tipo normal y de 0.750 a 0.725 m. para las dovelas correctivas derecha e izquierda, las cuales darán la curvatura del túnel.
- Para iniciar la perforación del túnel, el escudo se apoyará en semianillos formados por dovelas a y b, en posición

invertida, las cuales se apoyarán sobre un anillo colado en sitio, en la pared de la lumbrera, opuesta al frente de ataque del escudo, constituyendo en conjunto la estructura de atraque, que transmitirá el empuje de los gatos a dicho muro.

Cuando el frente del escudo esté en contacto con el muro de la lumbrera que será demolido, se iniciará la colocación del primer semianillo dentro del faldón del escudo mediante los 2 brazos erectores del mismo.

A continuación, se realizarán los avances en tramos de 0.80 m. medidos en la carrera de los vástagos de los gatos de empuje, una vez hecha la excavación del frente y la ranura perimetral, para facilitar el avance del escudo.

La colocación de anillos completos, se hará una vez que éstos estén fuera del área de la lumbrera, es decir, dentro del túnel.

- Cuando la presión de los 28 gatos de empuje exceda los 3700 lb/in² (260 kg/cm²), se inyectará una mezcla de lodo bentonítico y aceite, a través de los barrenos de 2", ubicados en el capuchón del escudo, con objeto de reducir la fricción generada entre la camisa y el suelo circundante, evitando que los gatos dañen los anillos previamente colocados.
- En la colocación de anillos, se seguirá un orden que consiste en colocar la dovela c ó cubeta con el cargador frontal, sujetándola con cables en las preparaciones de la misma dovela. A continuación, se colocarán las dovelas a y b, acoplándolas a los brazos erectores del lado respectivo.

Las dovelas son llevadas de la lumbrera al escudo por medio de trucks ó carros transportados sobre rieles, con una loco-

motora.

- Posteriormente, se coloca un troquel horizontal en los insertos de las dovelas a y b, y un puntal vertical de 6" de diámetro, el cual, una vez salida la dovela del faldón del escudo, transmitirá una carga a las dovelas mediante gatos de expansión, colocados en el puntal y en los espacios entre las dovelas a-c y b-c, provocando una expansión para ocupar el espacio del espesor del faldón, quedando las dovelas en contacto con el terreno circundante.

Terminada la expansión, se colocan dos tramos de tubo de 3" de diámetro en los espacios entre las dovelas a-c y b-c, retirando los gatos y colocando dicho hueco con concreto de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, quedando ahogados los tubos.

Los troqueles permanecerán un mínimo de 24 horas en la posición indicada.

- El control hidráulico del escudo se llevará en superficie hasta que se tenga un avance de 400 m., después de lo cual será bajado al túnel.

Asimismo, el escudo tiene instalado en su plataforma superior, un panel que indica el funcionamiento de los gatos y permite su manejo.

- La excavación en el frente se realizará con pistolas neumáticas, empezando por la ranura perimetral y la parte superior del túnel; posteriormente, se realizará el ataque del frente con una máquina rosadora, desde la parte posterior del escudo, con un brazo que en su extremo más lejano posee una cabeza giratoria, con insertos de tungsteno para disgregar el material del frente.

- La rezaga se desalojará por medio de un cargador frontal de descarga lateral izquierda, el cual depositará el material en los trucks para vía. Una vez que los trucks con la rezaga lleguen a la lumbrera, depositarán el material en 2 skips ó cajones de 5 m³ de capacidad cada uno, que serán izados con un malacate de 20 toneladas, instalado en la torre de manteo, de manera alterna para descargar en la tolva reguladora. Este sistema de manteo de rezaga es comúnmente llamado alcancía.
- Con objeto de reducir los asentamientos superficiales que puedan presentarse durante la excavación y reducir las filtraciones de agua, se harán inyecciones a través de cada anillo en 3 fases, con distintos proporcionamientos cada una: de cemento, arena, bentonita, agua y acelerante de fraguado, a medida que el escudo se vaya alejando.
- Se deberá respetar la frecuencia de lecturas en las secciones de control de niveles y diámetros del túnel, así como el trazo mediante rayo Laser después de cada empuje.

b) DRENAJE PROFUNDO.

La excavación de los túneles para desalojar las aguas negras y pluviales de la zona urbana de la Ciudad de México, se llevó a cabo en 60 km. de longitud, a través de los cuales se presentaron los más diversos materiales.

Los factores que más influyeron en el proyecto de los sistemas constructivos fueron, fundamentalmente, las condiciones geológicas e hidrológicas de los sitios por los que el túnel atravesaría, así como sus dimensiones.

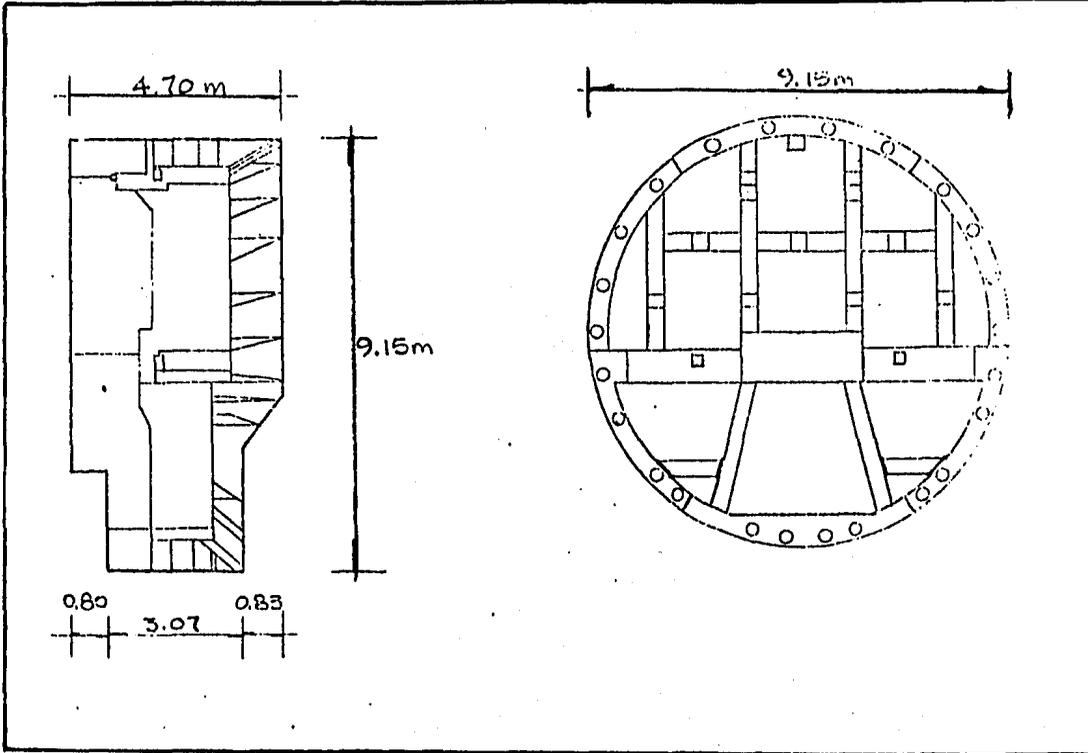


FIGURA 19.

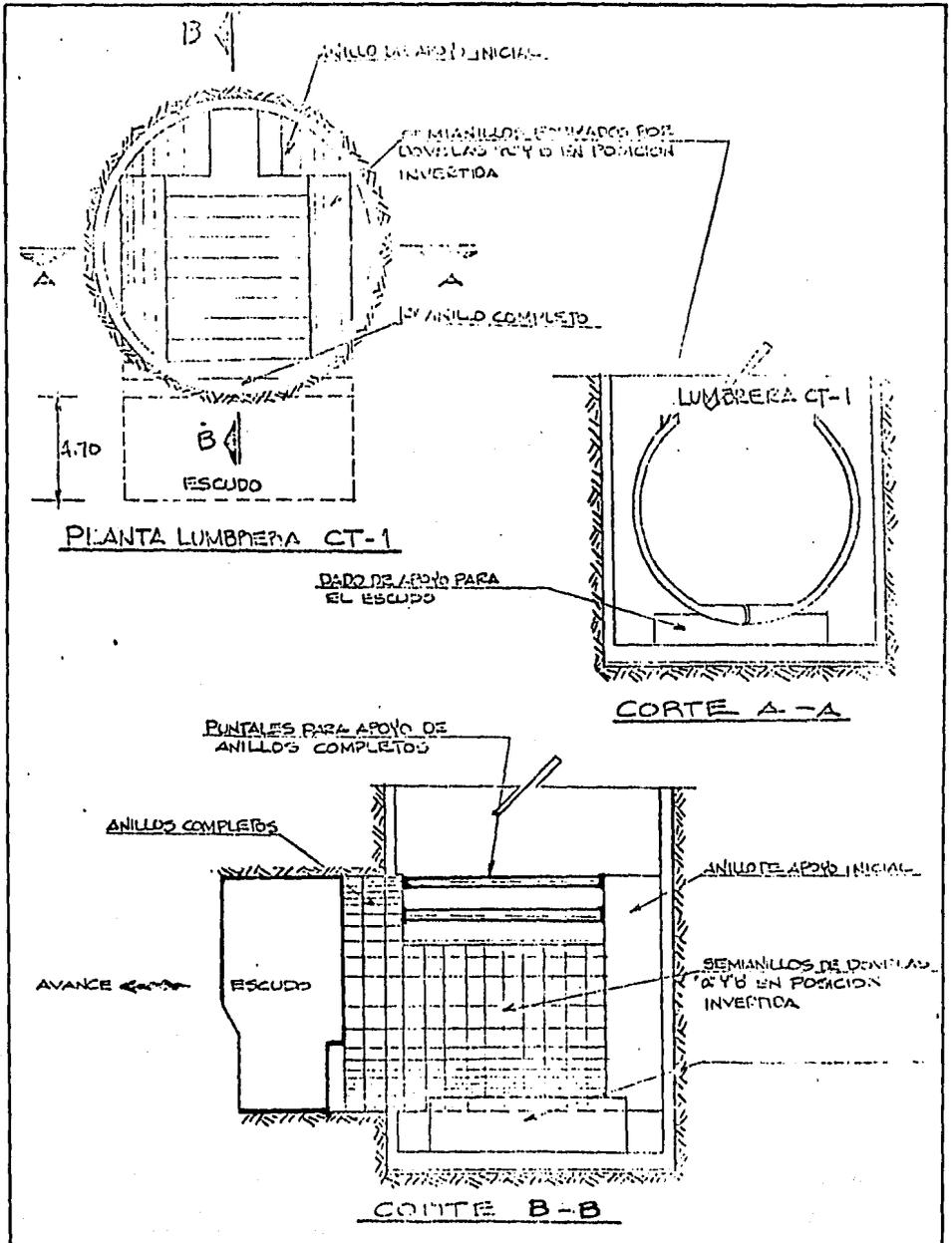
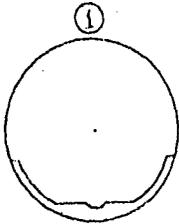
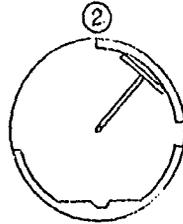


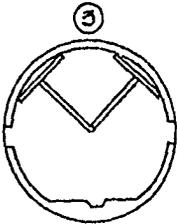
FIGURA 20.



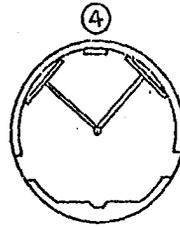
COLOCACION DE LA DOVELA "C"



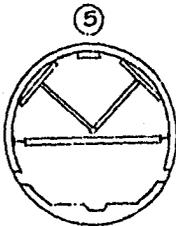
COLOCACION DE LA DOVELA "A"



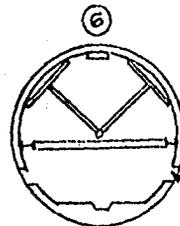
ERECCIÓN DE LA DOVELA "B"



COLOCACION DE LA PLACA
EN LA CLAVE



COLOCACION DEL PUNTAL HORIZONTAL



ZONA PARA COLOCAR
LOS GATOS DE EXPANSION

FIGURA 21.

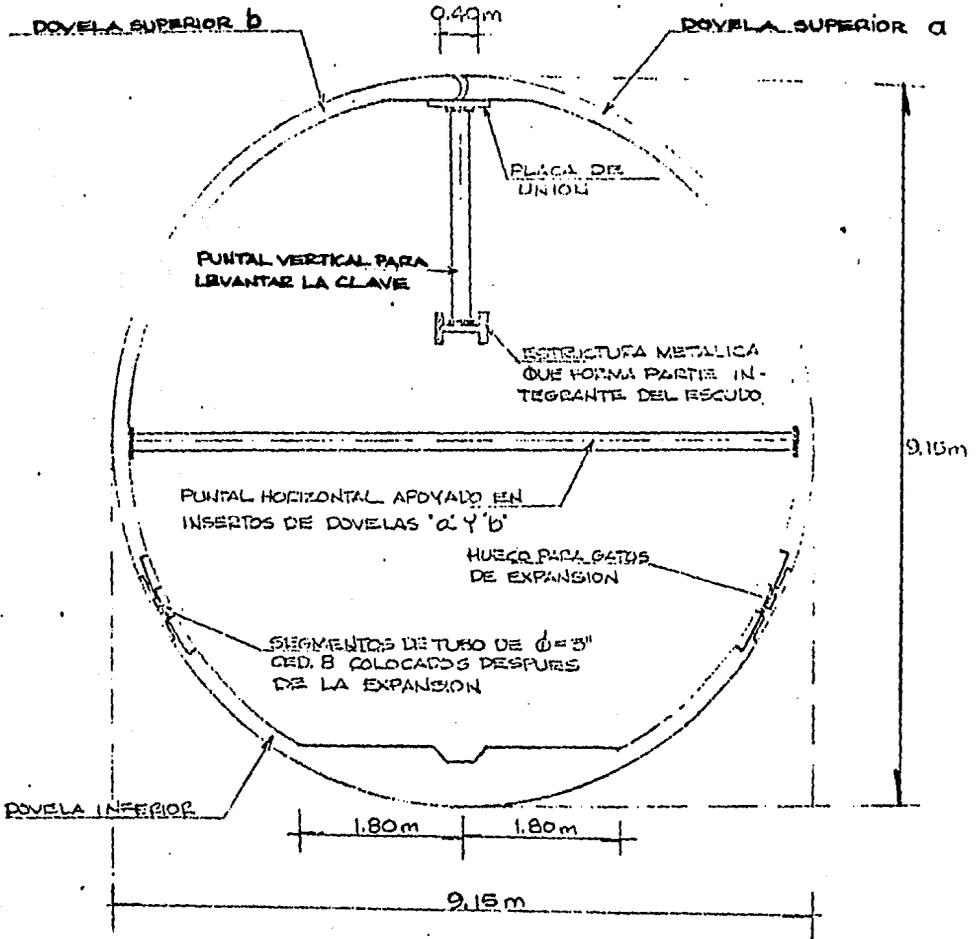


FIGURA 22.

Dadas las diferentes calidades del material encontrado, desde roca sólida con poco fisuramiento, hasta suelos limosos y arenas sueltas, la combinación de las operaciones en el tuneleo, varió de acuerdo a las necesidades constructivas, a las herramientas de trabajo, al equipo y a los medios empleados para extraer la rezaga.

Los tramos de túnel que se excavaron mediante explosivos, se localizan fundamentalmente en el Emisor, excepto en los tramos entre las lumbreras 8 y 9, así como entre la lumbrera 18 y el portal de salida, los cuales se excavaron con ranura y media sección.

La excavación con escudos se localiza principalmente en el Interceptor Central, en el tramo entre las lumbreras 13 y 0 del Interceptor Oriente y en el Colector Semi-profundo de Iztapalapa.

El sistema de Drenaje Profundo consta de los Interceptores Central y Oriente y del Emisor Central. Los Interceptores con diámetro de 5 m., captan las aguas negras de colectores y ríos con una capacidad de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, y posteriormente la conducen hasta su entronque, en la lumbrera 0, en donde comienza el Emisor Central, de 7.10 m. de diámetro final y una capacidad de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Este desaloja las aguas de desecho a la altura del Portal de Salida en el Río El Salto, en el Estado de Hidalgo, recorriendo una distancia de 49.7 km., con una pendiente de 0.0019.

La profundidad por la que atraviesan los Interceptores, varía entre 25 y 50 m. y hasta 225 m. en el caso del Emisor Central.

El proyecto del Interceptor Central atraviesa prác-

ticamente las 3 zonas de suelos definidas en el Valle de México: Lago, Transición y Lomas, con una longitud de 7.9 km. En su extremo norte, se excavó en Zona de Transición, en la que alternan arcillas lacustres con limos y arenas. La distribución de los estratos es mucho más heterogénea que en la zona de Lago. Asimismo, el manto freático es relativamente superficial, encontrándose a 3 ó 4 m. de profundidad. En su tramo central, actualmente en construcción, se atraviesa la Zona de Lago, en la que predominan las arcillas sobre los limos y las arenas, con un gran contenido de humedad.

Con dichas condiciones, se decidió utilizar en principio, escudos cortadores con cámara de presión de lodo al frente. Fueron los primeros escudos de este tipo, usados en México. Se fabricaron e instalaron 3 escudos de este tipo, de los cuales sólo 2 de ellos trabajaron en tramos muy cortos y con muchas dificultades, uno en el Interceptor Oriente y el otro en el Interceptor Central, que ahora se comenta:

Dicho escudo, después de haberse excavado unos 60 m., quedó sepultado por un talud de arena y limo con agua; se rescató posteriormente y se convirtió en un escudo de frente abierto, como los demás escudos (cuatro), que se utilizaron finalmente en este tramo.

Estos escudos son no cortadores, de 6.34 m. de diámetro exterior, 6.22 m. de diámetro interior, 7 m. de longitud y aproximadamente 100 toneladas de peso. Su parte frontal forma una ligera cachucha, que favorece la estabilidad del frente de excavación.

Debido a que el terreno excavado no es estable por sí mismo, se eligió utilizar un ademe que apoya contra el escudo con un elemento adicional de soporte: presión de aire com-



FIGURA 23.

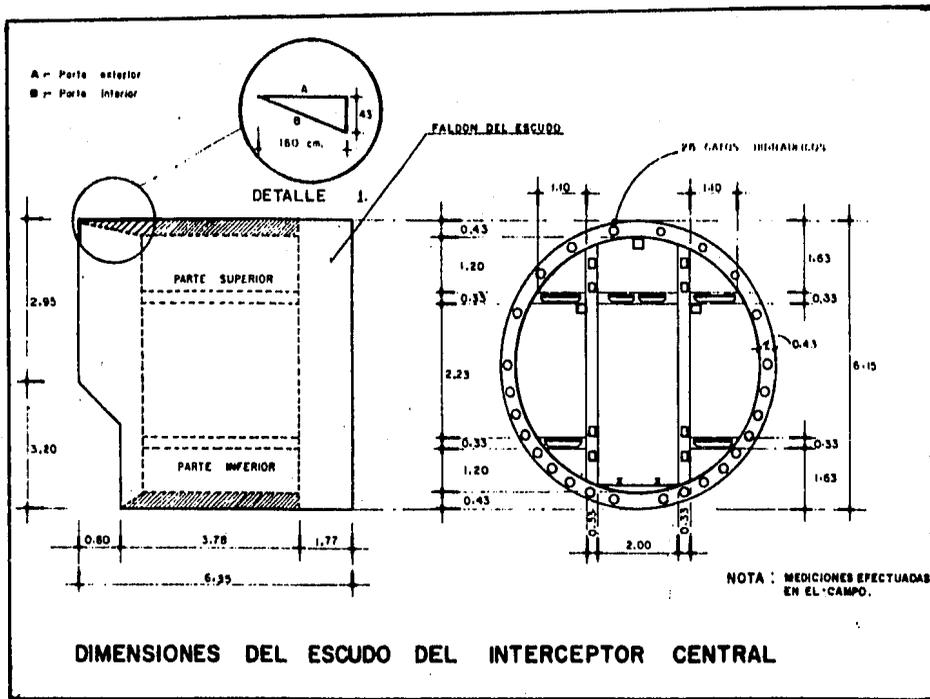


FIGURA 24.

primido.

En esta primera aplicación de este sistema en México, se usaron presiones superiores a la atmosférica, sirviendo para 2 propósitos:

- a) ayudar a la estabilidad del frente de excavación y a la consiguiente reducción del abatimiento del nivel freático, y
- b) aprovechar para entrenar al personal para trabajar bajo aire comprimido, en un rango de presiones de 0.5 a 1.5 kg/cm².

Actualmente, se encuentra también en construcción el Colector Semiprofundo Iztapalapa, en el cual se está utilizando un escudo cortador de frente presurizado por lodos, de 4 m. de diámetro.

Este túnel tendrá 6 km. de longitud a una profundidad de 12 m. y tendrá un diámetro terminado de 3.20 m. y 3.50 m. en el revestimiento primario, a base de dovelas colocadas por el mismo escudo.

El Colector Semiprofundo Iztapalapa conducirá hacia el Río Churubusco, las aguas de la Laguna de Regulación de Iztapalapa al oriente de la Ciudad de México, incorporando en su recorrido las aguas de colectores, entre los cuales se encuentra el de la Central de Abasto.

En principio, las aguas serán bombeadas al Río Churubusco y en el futuro, captadas por gravedad cuando se construya el Interceptor Oriente-Sur del Drenaje Profundo.

El Colector Semiprofundo Iztapalapa será excavado en túnel a través de suelos muy blandos, pertenecientes a la formación arcillosa lacustre del Valle de México, donde los suelos alcanzan más de 300% de contenido natural de agua y resistencias al corte de 2 ton/m^2 . (Ver Figura)

El acceso al túnel es una lumbrera de 12.5 m. de diámetro y 16 m. de profundidad, por donde se alimentan materiales y equipo hacia el túnel, con ayuda de una grúa-pórtico, de 5 toneladas de capacidad.

Las dovelas de concreto con $f'c$ de 350 kg/cm^2 , forman anillos de 6 piezas de 17.5 cm. de espesor y 1 m. de ancho.

En el perímetro de cada dovela se han colocado sellos de hule duro espumoso, para mantener estanco al túnel.

Al finalizar la excavación del túnel, se procede a colocar con cimbra telescópica, el revestimiento definitivo de concreto reforzado, colado en el lugar.

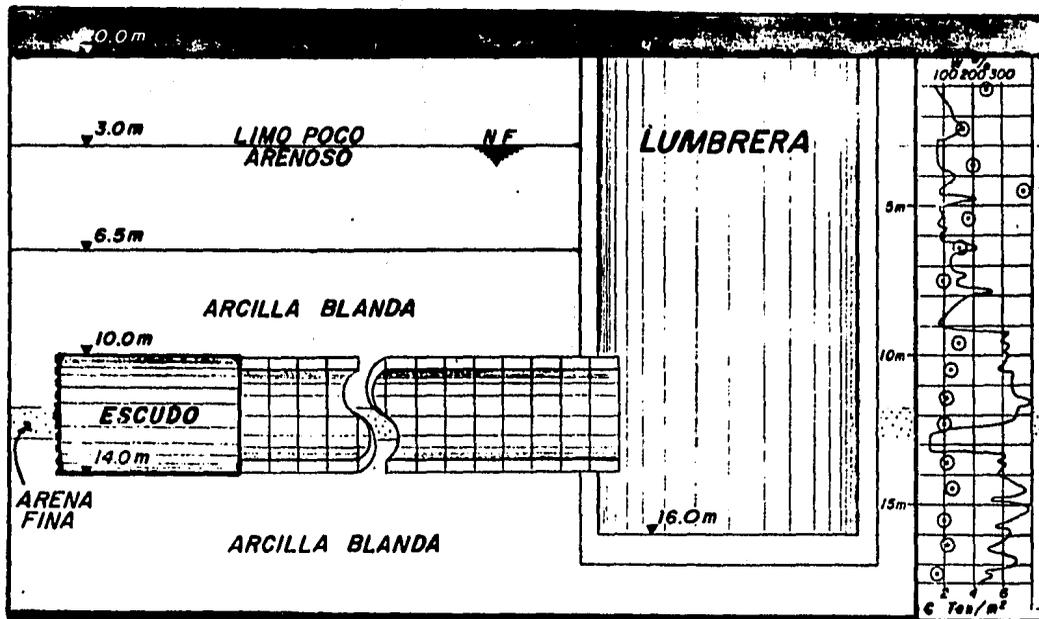


FIGURA 25.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se da a conocer la importancia que tiene actualmente la aplicación de la máquina denominada "escudo" en la construcción de túneles, haciendo referencia a la forma en que se han utilizado en México.

Se consideró necesario, por ser una máquina relativamente novedosa, hacer una descripción general de sus partes y variantes diversas, acompañándola de material gráfico para mayor claridad.

Teniendo en cuenta que los escudos facilitan notablemente los trabajos con múltiples ventajas, es recomendable su uso en obras que emplean principalmente la condicionante de volumen por excavar, justificándose el costo del escudo.

Entre las ventajas que ofrece el empleo de los escudos se podrían mencionar en resumen, las siguientes:

- La sección del túnel puede conservarse durante el avance con sus dimensiones completas.
- Ofrece un soporte constante al terreno, en todas direcciones.
- Facilita el trabajo de construcción.
- Evita deformaciones excesivas del terreno hacia el túnel, y por lo tanto, reduce los asentamientos en superficie.
- Se lleva un control preciso de los asentamientos del terreno.

- Su costo es comparable con el de métodos convencionales de excavación, obteniéndose con el escudo, rendimientos mayores.
- Realización de la obra con absoluta seguridad.
- Confiabilidad en el cumplimiento de los programas de trabajo.
- La utilización del recubrimiento primario de dovelas como definitivo.
- Mayor limpieza en la realización de los trabajos.
- Mayor control en la construcción del túnel por la sistematización y mecanización de los escudos.
- Mayor rapidez en el manejo de la rezaga.

Al excavar en suelos blandos, siempre existe el riesgo de causar desplazamientos del terreno y asentamientos importantes en superficie, favorecidos por el descuido en la guía y empuje del escudo, el inoportuno ó insuficiente ademe del frente, la insuficiente impermeabilización del ademe e inyección de retaque, ó la descompresión rápida de tramos sujetos a aire comprimido.

Por todas estas experiencias han pasado los túneles en suelos blandos realizados en el subsuelo de la Ciudad de México, pero ello ha servido para ir perfeccionando las técnicas de tuneleo e ir teniendo más dominio de todos aquellos detalles que estén relacionados con la utilidad de los

escudos.

Es importante que quienes intervengan en la construcción de túneles no piensen que el empleo de los escudos, se reduce al de una máquina universal, que sólo requiere moverle una palanca para llevar a cabo la realización de la obra.

FUENTE DE INFORMACION

- Trascendencia futura, estado del arte y desarrollo histórico de las obras subterráneas en México.
Asociación Mexicana de ingeniería de túneles y obras subterráneas, A. C. Sept. 1983.

- Estudio sobre el uso de máquinas perforadoras para túneles en el suelo de la Ciudad de México.
D.D.F. COVITUR, Dirección de Construcción, Subgerencia de Proyectos.

- Especificaciones técnicas para la línea 7 del Metro.
ISTME.

- Excavación de túneles en suelos blandos utilizando escudo cortador de frente presurizado con lodos.
Ing. Mario J. Orozco C. Ing. Pedro Camacho O.
SOLUM, S. A.

- Ponencia Nº 31 CNIC.
Procedimientos de Construcción de túneles en suelos:
La utilización de los escudos en la construcción de túneles en material suave.
J. Limón Patiño.

- Diseño y construcción de túneles.
Excavación con escudos.
D. Ferjeat. Páramo.
DECFI.UNAM. 1984.

- Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del D. F.
Tomo 3: Aspectos técnicos y administrativos.
Tomo 4: Atlas de planos técnicos e históricos.

**Esta Tesis se imprimió en Mayo de 1985
empleando el sistema de reproducción Foto-Offset
en los Talleres de Impresos Offsail-G, S. A.,
Av. Colonia del Valle No. 535 (Esq. Adolfo Prieto),
Tels. 523-21-05 523-03-33 México 03100, D. F.**