



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

TÉCNICAS DE TUNELEO EN MÉXICO

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

ING. SINUE DE LA VEGA GARCÍA

DIRECTOR DE TESINA: ING. ENRIQUE FARJEAT PÁRAMO

MÉXICO, D.F.

ENERO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

“Una investigación geotécnica pobre o una interpretación aplicada por gente inexperta y mal calificada, combinadas con malas decisiones políticas y económicas, no producen problemas pequeños sino fallas mayores”

Tunnel Channel, Jack k. Lemley

CONTENIDO

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE TÚNELES EN MÉXICO	6
I.1 ESTADO DEL ARTE	6
I.2 TÚNELES EN MÉXICO ANTES DEL SIGLO XIX.....	6
I.3 TÚNELES EN EL MUNDO	7
CAPÍTULO II. TÉCNICAS DE TUNELEO EN SUELOS BLANDOS	8
II.1 PROBLEMÁTICA GENERAL DE LOS TÚNELES.....	8
II.2 ESTUDIOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL	10
II.3 TÉCNICA CON ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO.....	12
II.4 TÉCNICA CON ESCUDOS DE FRENTE PRESURIZADO.....	19
II.5 TÉCNICA CON ESCUDOS DE AIRE COMPRIMIDO.....	24
II.6 TÉCNICA CON ESCUDOS DE PRESIÓN BALANCEADA.....	29
CAPÍTULO III. TÉCNICAS DE TUNELEO EN SUELOS DUROS	32
III.1 ESTUDIOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL.....	32
III.2 TRATAMIENTOS DEL TERRENO	34
III.3 TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN CON EXPLOSIVOS	42
III.4 TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO TBM	45
III.5 TÉCNICAS CON EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE TUNELEO (NATM).....	50
CAPÍTULO IV. PROYECTOS SUBTERRÁNEOS	56
IV.1 EL FUTURO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS	56
IV.2 TÚNELES DE UNIDADES PREFABRICADAS	57
IV.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. División del escudo para diseño	13
Fig. 2. Corte en donde se muestran los gatos de empuje y los gatos frontales	14
Fig. 3. Ciclo teórico.....	15
Fig. 4. Espacio anular formado por la holgura entre el anillo de dovelas y el faldón más el espesor de éste último	17
Fig. 5. Dispositivo de inyección.....	18
Fig. 6. Escudo con frente de lodo (concepción general del sistema).....	19
Fig. 7. Tren de equipo del escudo cortador de frente presurizado	20
Fig. 8. Escudo cortador de frente presurizado	20
Fig. 9. Gráfico réplica, ubicado en la consola de control central	21
Fig. 10. Presión estabilizadora aplicada únicamente en el frente.....	23
Fig. 11. Elementos requeridos para el túneleo con aire comprimido.....	26
Fig. 12. Cámara hiperbárica para exámenes médicos en el aire comprimido	27
Fig. 13. Escudo de presión de tierra balanceada	31
Fig. 14. Plantilla “Cuña Pirámide”	43
Fig. 15. Comparativa entre método tradicional y método austriaco.....	52
Fig. 16. Método Belga	62
Fig.17. Método Alemán	63
Fig.18. Máquinas con cinceles rodantes montados en la cabeza.....	65
Fig. 19. Galerías inclinadas	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formato de registro	16
Tabla 2. Utilizada en la Ciudad de México para descompresión	28
Tabla 3. Clasificación de las rocas según Lauffer	32
Tabla 4. Ventajas y desventajas en equipos TBM de frente abierta	47
Tabla 5. Ventajas y desventajas en equipos TBM de escudo.....	48
Tabla 6. Comparativa entre métodos.....	50

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE TÚNELES EN MÉXICO

I.1 ESTADO DEL ARTE

Podría invertirse mucho tiempo en la grata tarea de recordar el arte del tuneleo desde la antigüedad hasta los tiempos más modernos que se han construido túneles, pero siendo tantos, solo se hará mención a los más importantes, ya que mencionarlos todos requeriría más tiempo del que se disponen; por ello se limita a los más destacados por sus características constructivas.

La presencia de los túneles en la historia del ser humano es sin duda uno de los grandes prodigios dentro de la construcción del mundo.

I.2 TÚNELES EN MÉXICO ANTES DEL SIGLO XIX

A principios del Siglo XIX, el científico Alexander Humboldt tras haber inspeccionado las obras hidráulicas que para esos entonces ya se tenían en México, llegó a la conclusión de que había que completar el plan de Enrico Martínez para solucionar sus problemas de desagüe con un gran canal. Sin embargo, ésto no fue posible pronto debido a los problemas que ya se venían presintiendo con la Independencia de México.

Posteriormente a la Independencia, se inició un nuevo proceso en los trabajos para el desagüe de la Ciudad de México, ya que cada vez eran más alarmantes para las autoridades y decidieron lanzar un concurso para el proyecto de las obras de desagüe, ofreciéndose un premio de doce mil pesos oro al ganador. Fue el ingeniero Francisco de Garay quien tenía la mejor solución al problema que aquejaba a la Ciudad. La solución comprendía la construcción del Gran Canal de Desagüe y el Túnel de Tequisquiac. Ambas obras se inauguraron en 1900, bajo un trabajo colosal en todos los aspectos.

En 1930 se terminó la primera red de drenaje por gravedad, mediante un sistema de tuberías que descargaba al Gran Canal y al Lago de Texcoco. Durante los siguientes años se incrementó en forma importante la población en la Ciudad y cada vez el sistema se volvía un problema. Aunado a ello, el otro problema que empezaba a preocupar a los expertos era el hundimiento cada vez más acelerado del suelo, ocasionado por la sobreexplotación de los mantos acuíferos, que deterioró el sistema y produjo una disminución de la capacidad para desalojar las aguas del Valle de México, lo que motivó la ampliación del Gran Canal y la construcción del segundo túnel de Tequisquiac.

I.3 TÚNELES EN EL MUNDO

Sin duda alguna, el tema de los túneles es muy vasto, sin embargo, la historia de éstos y de las obras subterráneas parece remontarse desde la prehistoria, cuando los primeros hombres hacían excavaciones para buscar protección del clima y de sus enemigos.

Quizá el túnel más antiguo de que se tenga conocimiento, parece haber sido construido por la reina Semíramis, bajo el río Éufrates en Babilonia, por el siglo VIII a. C., el cual tenía una longitud de casi 1 km y sección transversal rectangular. Era un túnel que comunicaba el Templo de Belos y el Palacio Real. Probablemente fue construido como túnel falso, por lo cual no se perforó en galería, sino que se excavó en zanja a cielo abierto y posteriormente fue recubierto, durante el periodo de la época de estiaje. Para aprovechar al máximo su rápida construcción, se cree que fue formándose de mampostería por completo.

A lo largo de la historia y en el seno de distintas culturas, se han proyectado y construido túneles con distintos motivos. Así tanto en el antiguo Egipto, como en las culturas orientales, el túnel ha servido para distintos propósitos de ingeniería, una de las principales razones por las que se empezaron a construir este tipo de obras subterráneas, fue para el abastecimiento de agua en las grandes ciudades. Una de las grandes historias de túneles de que se tenga referencia, fue en la Isla de Samos, donde se construyó un túnel de 1.6 km por Eupalinos de Megara, hacia el 530 a.C., el túnel sirvió como ducto para agua potable de aquel lugar.

El Imperio Romano, también contribuyó al conocimiento en la construcción de túneles con muy diversos propósitos: galerías mineras, drenaje de corrientes, alcantarillado, abastecimiento de agua, uso militar; algunos de ellos fueron construidos en calzadas romanas. Durante la Edad Media la mayoría de los túneles en el mundo fueron utilizados y construidos con fines mineros, y fue ahí donde quedó en el olvido por algún tiempo este tipo de obra. No fue hasta el Renacimiento que el interés por los túneles en el mundo resurgiría, a través de los proyectos que Leonardo da Vinci tenía para las grandes ciudades de poder comunicarse y dar soluciones a las necesidades del agua.

En el siglo XVIII, fue cuando surgió con mayor auge la era de los canales y dentro de ellos los túneles. En el primer túnel para canal fue utilizada por primera vez la pólvora. Este canal resultaría una experiencia valiosísima en el área de la construcción impulsando aún más el tuneleo para el transporte de personas y mercancías. Con el desarrollo del ferrocarril se incrementó la necesidad de construir más y mejores túneles con longitudes cada vez mayores, incorporando progresivamente maquinaria y procedimientos constructivos a partir de los cuales el esfuerzo manual ha ido cediendo en pro de una incipiente mecanización. Hoy sin duda alguna, los túneles en el mundo forman parte de nuestra vida diaria, al servir como obras de construcción para servicios y necesidades.

CAPÍTULO II. TÉCNICAS DE TUNELEO EN SUELOS BLANDOS

II.1 PROBLEMÁTICA GENERAL DE LOS TÚNELES

Nuestro País tiene una gran tradición en la construcción de túneles, motivada por su accidentada orografía y su desigual reparto de recursos hidráulicos. Tradicionalmente han sido los ferrocarriles y más tarde los aprovechamientos hidráulicos para abastecimiento de agua, energía eléctrica o riego. Además, en las grandes ciudades, colectores profundos y emisores para las aguas negras y pluviales, enlaces ferroviarios y galerías de servicio, sitúan debajo de los ciudadanos obras de túneles muy importantes, y de construcción muy delicada por la gran rigidez a que se ven sometidas en materia de trazo, servicio y mantenimiento. Nuestro País, si bien posee una orografía accidentada, no dará origen a grandes túneles mayores de 4 a 5 km de longitud, salvo en obras hidráulicas.

En los túneles se distinguen tres fases bien definidas: construcción, operación y mantenimiento.

Un primer grado de dificultad se presenta cuando el usuario utiliza ciertos elementos en movimiento, dentro del túnel, pero sobre estructuras adicionales, tales como ferrocarriles mineros o de personas, transporte por cable, bandas transportadoras. Mayor dificultad representa un usuario que produzca desgaste del propio revestimiento del túnel, tales como agua potable, aguas negras generadas por la población o industrias, gas. En todos estos casos, las personas solamente entran en el túnel para su vigilancia y conservación. El problema de funcionamiento de un túnel, depende del uso que tenga, por lo que en primer caso, con tracción eléctrica o aún diesel, no se plantea la necesidad de ventilación adicional o iluminación. En el segundo caso, la circulación de vehículos con motores de combustión, contaminan el ambiente, de manera que partir de una cierta concentración se necesita ventilación artificial. Los túneles tienen por objeto facilitar los transportes más diversos y que la mayor complejidad y generalidad de la construcción, operación y mantenimiento, se encuentra en los túneles para transporte de personas y mercancías por carretera o ferrocarril. Un problema que ocurre dentro de los túneles para éstos casos, es la iluminación, el sistema contra incendios y la ventilación, la cual puede llegar a ser más compleja para túneles con longitudes superiores a 3 km.

En general, las alternativas de otros túneles para seleccionar la mejor no suele ser fácil, y requiere ser compartida, lo cual se tratará más adelante dentro de los riesgos compartidos que deben asumir todos los involucrados, a menos de proceder sistemáticamente, con orden y métodos tridimensionales. De aquí la necesidad de; 1) Realizar un estudio previo que permita recomendar una solución y una alternativa y el tiempo óptimo para su puesta en servicio; 2) Efectuar un anteproyecto de la solución recomendada con todos los principales actores en la realización de la obra; 3) Conocer y difundir el proyecto ejecutivo de la obra completa. Con todos estos elementos a la vista, debe ponerse en marcha un estudio de las soluciones posibles para el trazado del túnel, y

también de sus accesos, que a veces tiene tanta importancia o más que el propio túnel. Por ello, debe empezarse por el establecimiento de criterios de proyecto sobre la geometría, drenaje, estructuras, cruces con otros medios de transporte, con instalaciones subterráneas e incluso la estética. También deben investigarse, exhaustivamente los posibles trazos del túnel y dentro de cada túnel los trazos a los accesos; e inclusive, realizar un análisis de riesgos, tanto en la etapa de diseño como en la de construcción, el cual incluya las medidas de mitigación. A lo anterior se le denomina “Etapa de Maduración”.

Esta parte del trabajo debe hacerse con un conocimiento real y global de la geología, orografía y urbanismo de la zona. No debe rechazarse ninguna alternativa con fáciles prejuicios. Con todos estos elementos debe hacerse un estudio de rentabilidad, exponiendo los objetivos que se pretende alcanzar, el método a seguir, su sentido económico y sus límites. La evaluación de la inversión necesaria y de las ventajas directas e indirectas, permitirá llegar a establecer un balance de rentabilidad y a determinar la fecha óptima de puesta en servicio de la obra.

Finalmente, el estudio previo de la obra debe contener una programación de la misma con especial atención al tramo en túnel, que en general suele ser uno de los puntos más importantes en la ejecución de los trabajos. Hay que considerar el ritmo de ejecución del túnel y la conveniencia de sincronizarlo con otros planes de desarrollo industrial o urbanístico de las zonas de influencia. En conjunto, un problema de transporte que comparte la eventual construcción de un túnel importante, debe estar establecido en un contrato, donde permita tomar la mejor decisión con la mejor información posible, de todas las partes.

La construcción de un túnel es siempre un problema complejo que exige una metodología cuidadosa en la consideración de los siguientes aspectos:

1. Un estudio geológico completo.
2. Una clasificación convencional de las calidades mecánicas de los terrenos a excavar y revestir.
3. El análisis mecánico del trazo de la obra subterránea.
4. La tipificación de los procesos de avance y consolidación.
5. Los sistemas constructivos en las actividades de excavación.
6. Los sistemas constructivos en la ejecución del revestimiento, tanto primario como secundario.
7. La evaluación y control de los tiempos en los ciclos de operación de avance.
8. La evaluación y control de los costos en función de los terrenos excavados.
9. El estudio de la construcción de pozos de ventilación.
10. El programa de construcción y su seguimiento.

II.2 ESTUDIOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL

Es de gran importancia resaltar que el tuneleo en México ha resuelto un sin número de problemas muchos años antes que en otros países, sobre todo en suelos blandos. Los grandes ingenieros e investigadores que ha dado nuestro País, han fortalecido y continúan a la vanguardia en nuevos retos en esta rama de la construcción, sin dejar de lado los avances tecnológicos con que se cuenta a nivel mundial, lo cual ha permitido resolver con éxito los retos que se han presentado.

Sin duda alguna, los estudios previos para la construcción de un túnel, están dentro de un tema tan importante como es el análisis de riesgos. Y estos aspectos identificados en el análisis de riesgos que se relacionan directamente con la contratación de dicho tipo de obras que se considera, debiera promoverse como “Riesgos Compartidos Contractuales”, con objeto de distribuir en forma más equitativa el riesgo de la construcción subterránea entre el propietario, el contratista, el supervisor y el diseñador, los estudios previos y otros aspectos que se tratan más adelante.

Los estudios previos se basan principalmente en dos líneas: caracterización del subsuelo e información.

Caracterización del subsuelo.

El trazo por el que se requiere llevar un túnel puede tener muchas condiciones desconocidas a pesar de los estudios realizados. Por ello, las características reales del sitio se conocen a medida que avanza la excavación, lo que lleva a que la responsabilidad por las características del sitio, sea del contratante y por ende de cualquier riesgo asociado a condiciones diferentes a los originales.

Es por ello deseable un programa de investigación del sitio razonable, antes y durante la fase de diseño, para que con ello puedan tener el contratante y el contratista, una base de referencia con la que fundamenten los argumentos para poder incrementar o reducir los pagos por el trabajo y materiales requeridos. Los métodos para caracterizar las condiciones del subsuelo varían en todo el mundo, por lo que debe existir un entendimiento entre ambas partes en cuanto a las definiciones y términos usados para las características del subsuelo.

Aunque las ofertas se elaboran sobre una base uniforme que proporciona el contratante, si las condiciones con que se encuentra el contratista son materialmente diferentes a la caracterización del sitio, es prudente conciliar precios unitarios para las nuevas condiciones, que permitan compensar en forma equitativa al contratista.

Por todo ello se recomienda incorporar en los contratos de construcción:

- a) Definiciones de la caracterización del sitio.
- b) La estimación del contratante de la extensión y ocurrencia de cada conjunto de caracterización del subsuelo.

- c) Previsiones del procedimiento con el cual ambas partes puedan acordar lo más pronto posible, sobre los cambios en los procedimientos de trabajo y los pagos correspondientes.

Información subterránea disponible.

Normalmente el contratante dispone del tiempo adecuado para explorar con suficiencia, analizar y estudiar fuentes de información relativas a las condiciones subterráneas, situación que no es económicamente factible para el contratista, además de no contar con el tiempo necesario durante la preparación de su oferta, y si así lo hicieran, tendrían que reflejarse los costos inherentes en sus propuestas.

Al respecto es recomendable que toda la información geotécnica disponible, sea presentada a los oferentes con los siguientes puntos:

1. Aspectos geológicos del sitio.
 - a. Geología y estratigrafía
 - b. Detalles geológico
 - c. Cortes estratigráficos peculiares
2. Comportamiento geotécnico del sitio.
 - a. Asentamientos regionales
 - b. Fenómenos de agrietamiento
3. Metodología de la exploración geotécnica.
 - a. Aspectos básicos
 - b. Programa y costo de la exploración
4. Sondeos de exploración.
 - a. Exploración geofísica
 - b. Sondeos con cono eléctrico
 - c. Sondeos de penetración estándar
 - d. Sondeos de cono dinámico
5. Sondeos inalterados y pruebas de laboratorio.
 - a. Muestreo con tubo de pared delgada
 - b. Muestreo con tubo doble de pared delgada
 - c. Tubo dentado a rotación
 - d. Tubos dobles a rotación
 - e. Técnica de perforación
 - f. Transporte y conservación de muestras
 - g. Pruebas de laboratorio

II.3 TÉCNICA CON ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO

Esta técnica, se enfoca principalmente en el proceso de excavación y el montaje del revestimiento primario (dovelas), las cuales deben dividirse en etapas más pequeñas, de manera que ambas operaciones sean lo más compatibles o simultáneas. El escudo, consiste de un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel y sirve para resistir la presión del terreno mientras el revestimiento se va construyendo dentro de esta protección. La teoría es que mediante un mecanismo capaz de moverse hacia delante a través del curso del túnel y provisto con medios para resistir la presión del terreno, tanto en el frente como en la periferia del túnel, toda o la mayor parte de la madera de retaque utilizada en los procedimientos convencionales, pudiera ser eliminada.

El escudo moderno de frente abierto, es un cilindro de acero rígido abierto en ambos extremos, que provee facilidades en su frente para la excavación del terreno y en su parte posterior para la erección del revestimiento prefabricado (dovelas). El escudo es impulsado hacia delante por pasos, manteniendo armonía con el avance de la excavación y el trabajo de erección del ademe primario, de manera que quede bien soportado hasta que se cuele el revestimiento definitivo.

El tuneleo con escudo ofrece las siguientes ventajas esenciales:

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

Acciones básicas:

- Estabilizar el frente: Es una acción constructiva básica, mediante la cual se presuriza el frente de excavación, para conservar el estado original de esfuerzos existentes en el terreno.
- Estabilizar el interior del túnel: Consiste en colocar con ayuda del escudo, el soporte inicial del túnel, para recibir con seguridad los empujes que le induce el terreno vecino. Esto se realiza mediante el uso de anillos de dovelas de concreto.
- Revestir el túnel: Regularmente este paso en la construcción del túnel queda definido con la colocación subsecuente de los anillos de dovelas, el revestimiento definitivo de un túnel tiene mucho que ver con la función principal de dicho túnel, ya sea para usos viales o hidráulicos.

Estructura del escudo.

El principal elemento de la estructura del escudo es el forro o camisa, la cual se puede dividir en tres partes principales, en función de su rigidez y del arreglo de acuerdo a su propósito.

El extremo delantero de la camisa, donde se efectúa la excavación, es sumamente reforzado, generalmente con piezas fundidas para formar la cara de corte, y su rigidez se incrementa con anillos atiesadores. Su propósito principal es facilitar el avance uniforme y conducción del cuerpo del escudo cortando al frente, además de proporcionar una distribución de las importantes presiones inducidas. Otra de las principales funciones de la estructura del escudo es darle la protección adecuada a los trabajadores ocupados en el frente de la excavación, además de proporcionar un soporte continuo del frente.

El diámetro de la cara de corte debe ser ligeramente mayor que el diámetro del escudo, con objeto de disminuir la presión del suelo sobre el escudo. La parte intermedia o tronco está destinada para el alojamiento de la maquinaria de empuje (gatos hidráulicos, tableros de control, etc.).

La parte trasera o faldón del escudo está diseñada para soportar el túnel mientras se realiza el montaje de los segmentos del revestimiento (dovelas). Algunos diseñadores piensan que el faldón debe cubrir el ancho de dos anillos completos más una cuarta parte de un tercero, sin embargo, debe considerarse que las secciones del faldón largo pueden deformarse fácilmente.

La adecuada construcción del escudo se complementa con maquinaria especial para la excavación.

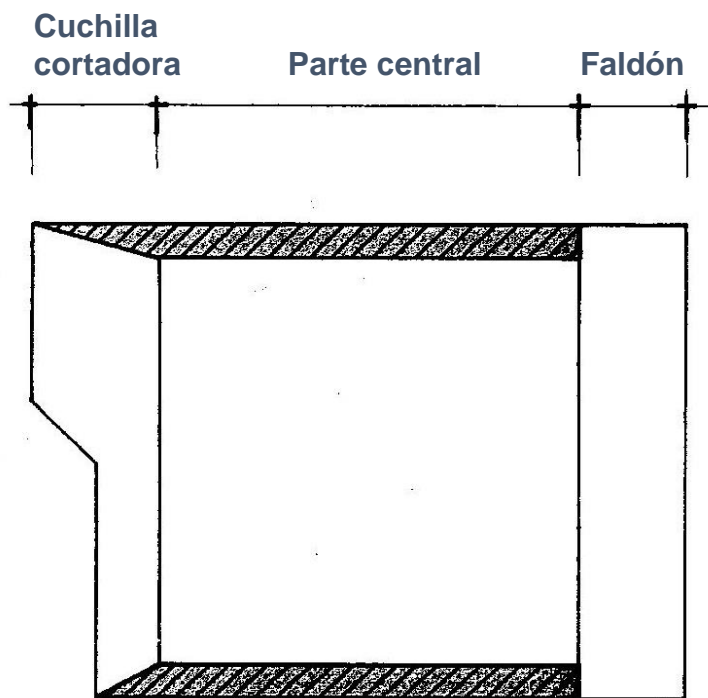


Fig. 1. División del escudo para diseño

Equipo del Escudo

1. Gatos de empuje. El movimiento del escudo se efectúa por medio de gatos hidráulicos, colocados en la estructura, que reaccionan contra los anillos del revestimiento del túnel, previamente erigidos. Para mover el escudo deben ser tomadas en cuenta las siguientes resistencias:
 - a) La fricción del terreno contra la superficie exterior de la camisa del escudo.
 - b) La fricción entre el anillo de dovelas y el faldón del escudo.
 - c) La resistencia del terreno que no ha sido excavado en el frente del escudo.

La distribución de los gatos de empuje es simétrica con respecto a un eje vertical, pero con respecto a una horizontal, presenta una mayor concentración en la parte inferior con el objeto de contrarrestar la tendencia del escudo, a inclinarse hacia delante.

2. Gatos frontales: Uno de los métodos para soportar el frente mientras el escudo avanza, es mediante gatos frontales que ejerzan una presión constante. Estos gatos deben llegar más allá de la cara del corte y su carrera debe ser, al menos, igual al ancho de un anillo de dovelas.
3. Plataformas deslizantes: Son elementos para proveer áreas de trabajo acercándolas al frente de la excavación.

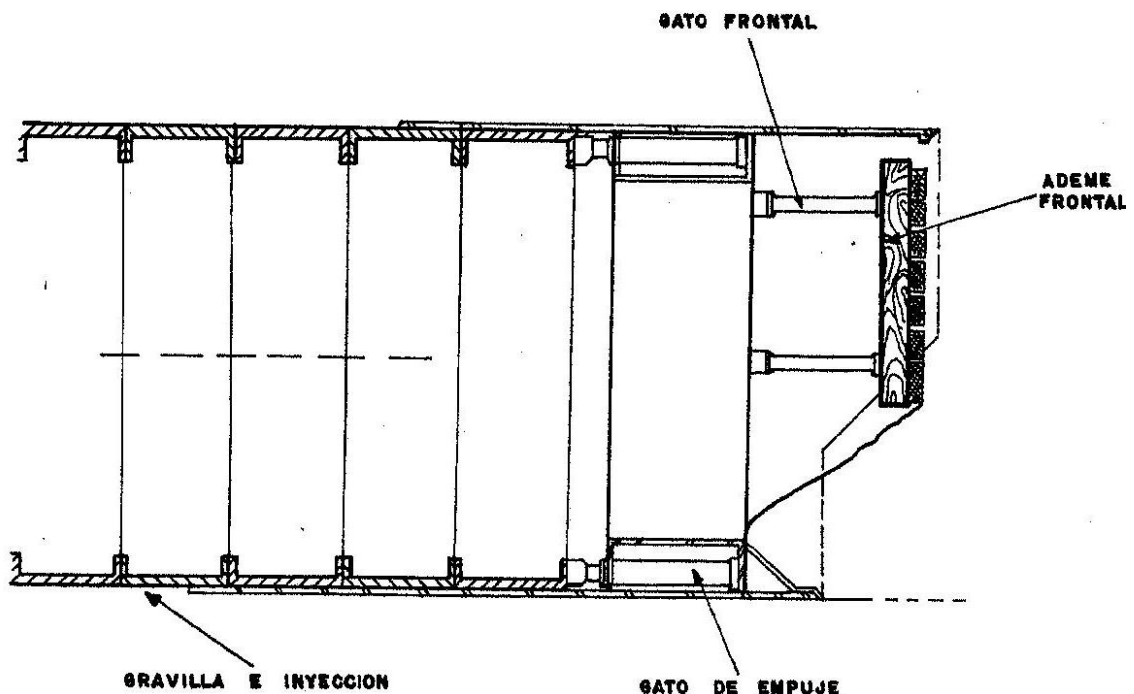


Fig. 2. Corte en donde se muestran los gatos de empuje y los gatos frontales

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

El diseño de un escudo es realmente un “traje a la medida”, hecho a las necesidades del proyecto. La experiencia en el diseño de escudos circulares, indica que para mayor facilidad en el manejo, la relación longitud a diámetro debe ser de 0.75 ó menor, ya que a menor longitud es mayor la dificultad de mantenerlo alineado, pero es más fácil girarlo. Los escudos más largos requieren de presiones más elevadas en sus gatos de empuje. Es común, según la experiencia, que los escudos giren alrededor de su eje longitudinal; ésto se debe a la estratificación oblicua, a presiones externas asimétricas, o a una excavación no uniforme. La corrección de este giro se hace mediante el uso de estabilizadores (aletas).

Ciclos de operación y rendimientos

El propósito de establecer y anotar los ciclos de operación, es realizar una comparación de costos de una fase del proyecto y poder estimar el costo total del proyecto en ejecución. Los reportes del ciclo de operación, también sirven para conocer día a día si la productividad del trabajo está desarrollándose como se planeó y a la vez indican cuales fases del trabajo necesitan de una atención especial.

Etapas del Ciclo de Operaciones:

- Excavación y soporte temporal del frente a una profundidad adecuada.
- Avance del escudo, con reacción contra el revestimiento previamente erigido.
- Colocación de otro anillo del revestimiento.
- Rezaga.

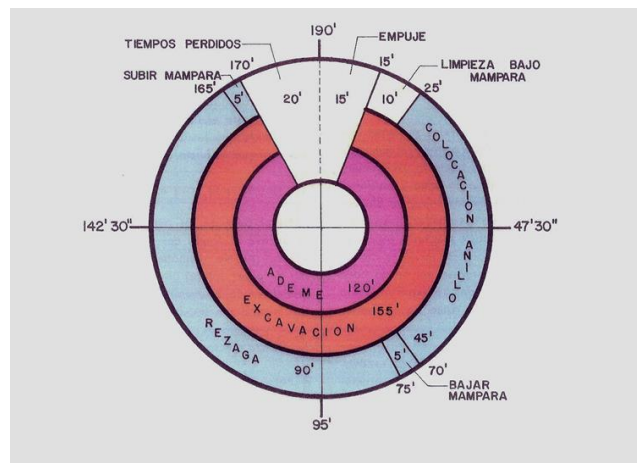


Fig. 3. Ciclo teórico

Escudo No.: _____ Lumbrera: _____ Frente: _____
 Anillo No.: _____ Cadenamiento: _____
 Fecha: _____ Reporte: _____
 Jefe de Frente: _____

Tiempos Optimos: Avance = 7.5 Anillos/Día

Concepto	Inicio	Término	Diferencia
Empuje			
Limpieza bajo mampara			
Colocación de anillo			
Bajar mampara			
Rezaga			
Subir mampara			
Excavación			
Ademe			

Tabla 1. Formato de registro típico

El tuneleo con escudo de frente abierto requiere excavar la sección completa, lo que no es tarea fácil considerando los escudos que se utilizan en terrenos de baja resistencia y que se requiere estabilizar áreas que exceden los 50 m².

Las herramientas empleadas para la excavación del frente, dependen del grado de dureza del suelo, siendo común el uso de martillos neumáticos. Esta excavación se inicia al terminar un empuje del escudo y es simultánea a la colocación en suelos duros del último anillo.

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

Una mampara en la parte posterior del escudo, que retiene el material producto de la excavación es bajada para permitir el acceso a una máquina rezagadora con banda transportadora. Ésta deposita el material en góndolas, para posteriormente ser jaladas por locomotoras pequeñas a la lumbrera, donde las góndolas son vaciadas en tolvas y tomadas por malacates para llevarse el material a la superficie.

Paralelamente a la excavación y rezaga, en el perímetro interior de la camisa del escudo se hace una “ranura”, para evitar que la camisa tenga demasiada resistencia del suelo durante el avance.

Una vez terminada la excavación, rezaga y ademe del frente, se levanta la compuerta de rezaga para llevar a cabo otro avance del escudo.

Esta es una operación muy delicada del ciclo, ya que es la que define los alineamientos y pendientes proyectadas, por lo que es muy importante realizar el avance con los gatos de empuje y frontales adecuados.

Terminado el avance, se limpia la plantilla dentro del faldón del escudo para poder proceder al montaje del revestimiento primario (segmentos prefabricados de concreto reforzado: "dovelas"). Cada "dovela" se instala por medio de un brazo erector de accionamiento hidráulico montado sobre el cuerpo del escudo; dicho brazo tiene la particularidad de poder girar alrededor de su eje horizontal a cualquier posición que se requiera y puede extenderse o retraerse (en su extremo tiene un dispositivo especial para sujetar al segmento por instalar).

A medida que el anillo se va ensamblando, los gatos de empuje se van retirando. A continuación se coloca y aprieta la tornillería que une los segmentos entre sí y con el anillo anterior. Terminado el paso anterior se baja la compuerta de rezaga para iniciar otro ciclo en la operación.

Los anillos ya montados tienden a adoptar una forma ovalada y no circular como lo pide el proyecto, por lo que algunas veces es necesario colocar un par de puntales dotados con gatos mecánicos para su ajuste; este apuntalamiento se conserva hasta después de un inyectado en el túnel.

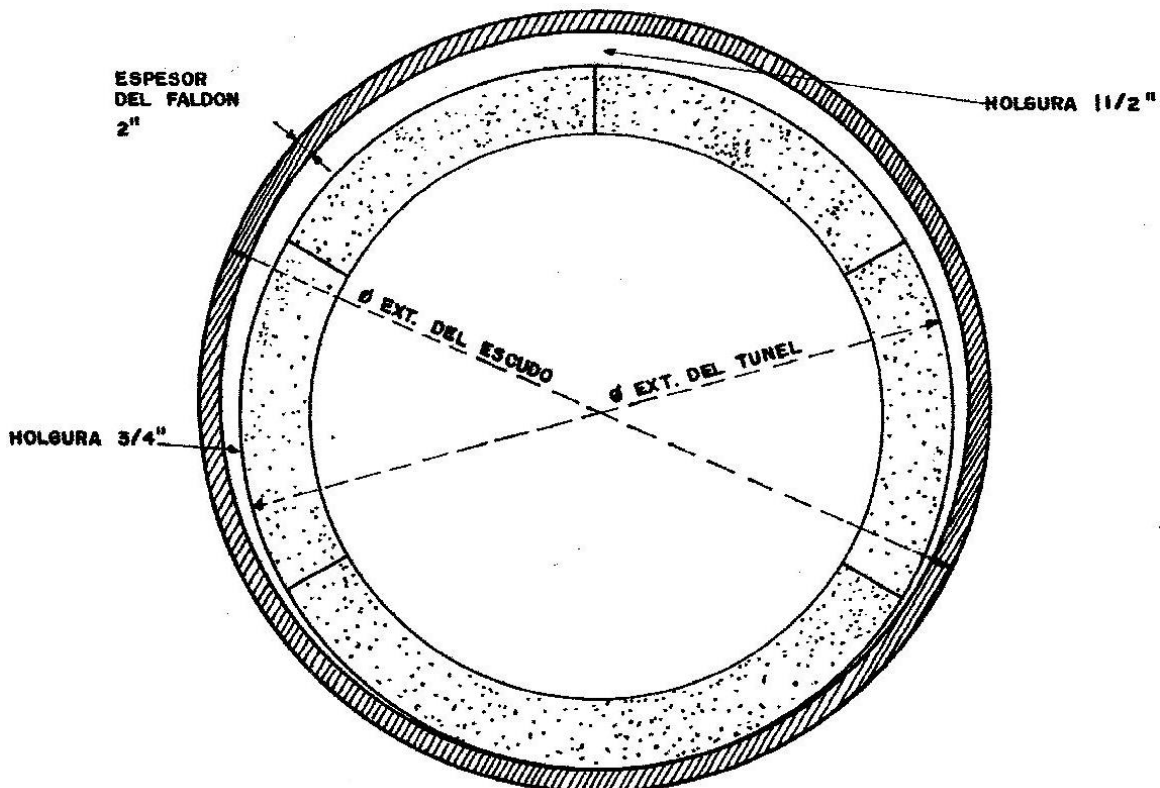


Fig. 4. Espacio anular formado por la holgura entre el anillo de dovelas y el faldón más el espesor de éste último

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

Para minimizar asentamientos en la superficie y lograr una distribución lo más uniforme posible de presiones del terreno alrededor de la camisa del escudo, se inyecta un relleno con gravilla en el espacio anular alrededor del ademe, espacio dejado por el espesor del faldón al avanzar el escudo.

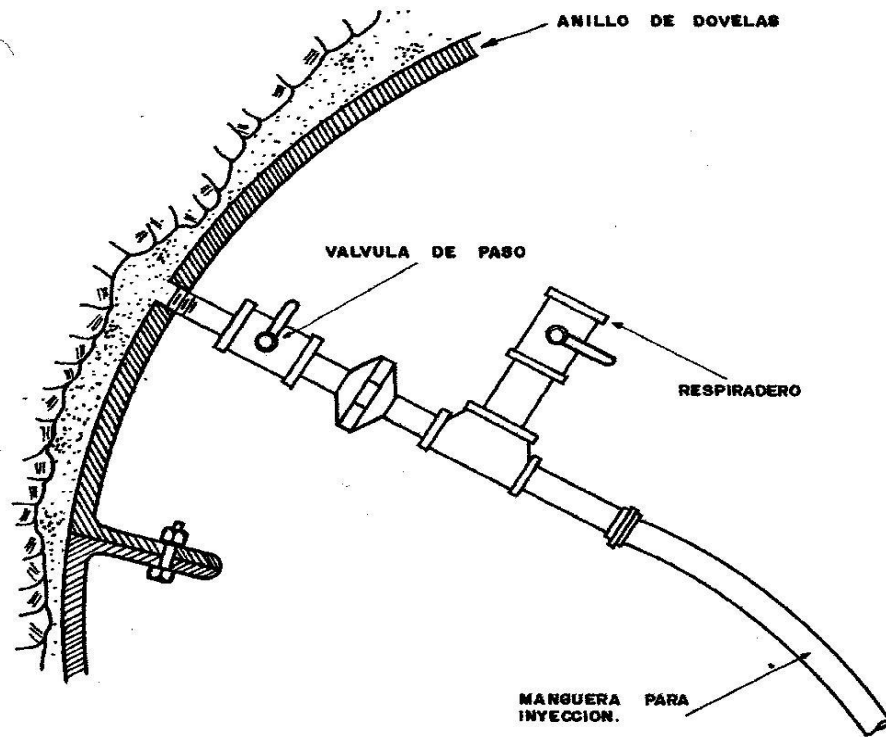


Fig. 5. Dispositivo de inyección

La gravilla es introducida a través de las perforaciones para la inyección, previstos en los segmentos de ademe. Las ventajas de la inyección de gravilla son:

- La gravilla puede mantenerse hasta el faldón del escudo.
- Se puede ir colocando simultáneamente con el avance del escudo.
- El costo es menor, en comparación de una inyección de lechada de cemento.
- Forma un relleno efectivo.
- El tamaño de la gravilla debe ser uniforme de, 4 a 6 mm.

La inyección es un procedimiento muy importante y requiere de personal ampliamente experimentado y capacitado para su aplicación y técnica. Requiere de conocimiento en cuanto al tamaño del grano, presión de inyección para no causar daños a los anillos. Los objetivos de la inyección son:

- Establecer un relleno compacto.
- Estabilizar el terreno circundante, reduciendo la presión del suelo contra el ademe del túnel y minimizar asentamientos en la superficie.
- Actúa como sello para el agua.

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

La inyección se realiza en dos pasos, el primero es para rellenar el espacio anular y el segundo es para sellar y estabilizar. El segundo paso debe llevarse a cabo hasta que finalice la construcción del túnel, para realizar la inyección cuando los movimientos de éste por la construcción y los asentamientos del terreno alcancen su condición de equilibrio.

Generalmente a la gravilla le sigue una inyección de lechada de cemento, que consolida por último al relleno previo de grava llenando todos los huecos.

II.4 TÉCNICA CON ESCUDOS DE FRENTE PRESURIZADO

Esta técnica, consiste básicamente en que el frente del túnel es soportado primera instancia por la cabeza cortadora en y que permite además sostener el frente de excavación presurizando, introduciendo lodo bentonítico a la cámara de excavación. La cámara de excavación conocida como “pleno”, es el espacio que existe entre el frente de excavación y la mampara de acero. Este espacio es el lugar en donde se almacena el lodo bentonítico y su mezcla con el suelo que ha sido excavado. Un sistema de bombeo permite realizar las funciones de alimentar con lodo bentonítico nuevo al frente, mientras que a su vez se retira la rezaga hacia y desde el pleno a través de tuberías.

El lodo bentonítico está compuesto básicamente por una mezcla de bentonita, agua limpia y en ocasiones algunos aditivos. El balance entre el lodo que entra y el que sale durante el ciclo, permite mantener el lodo dentro del pleno a presión. A través de la variación en el flujo de entrada y salida del lodo, es posible controlar el valor de la presión para soportar el frente.

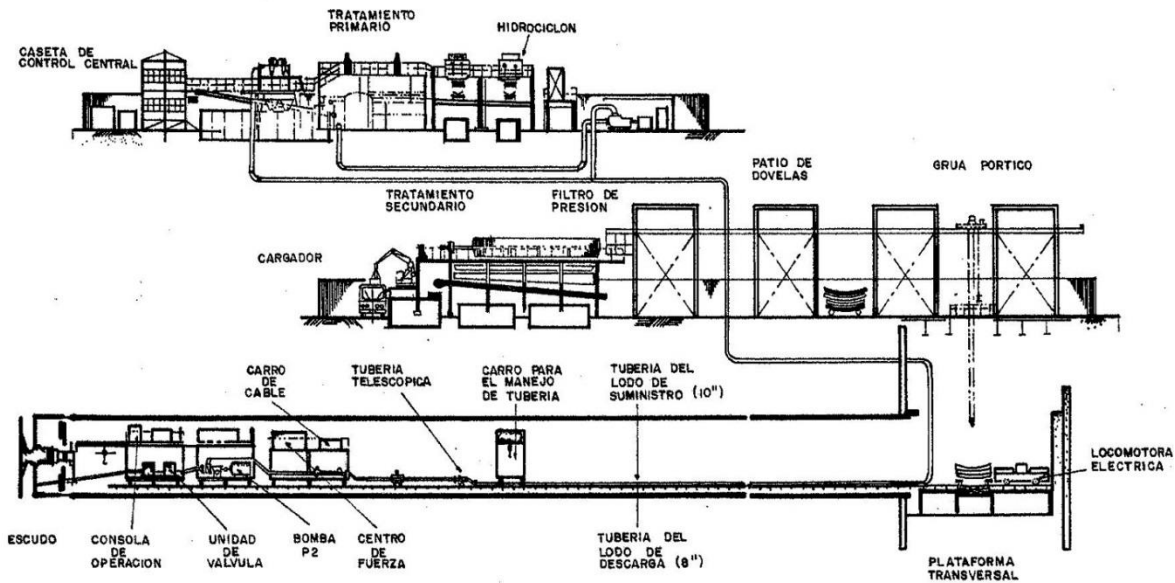


Fig. 6. Escudo con frente de lodo (concepción general del sistema)

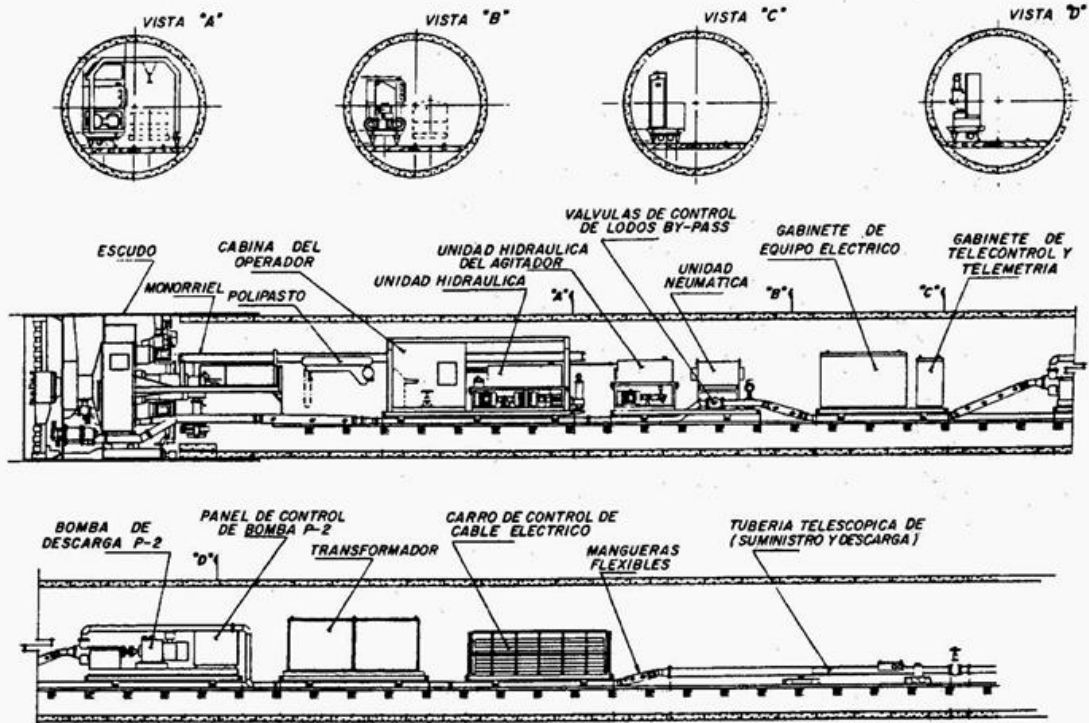


Fig. 7. Tren de equipo del escudo cortador de frente presurizado

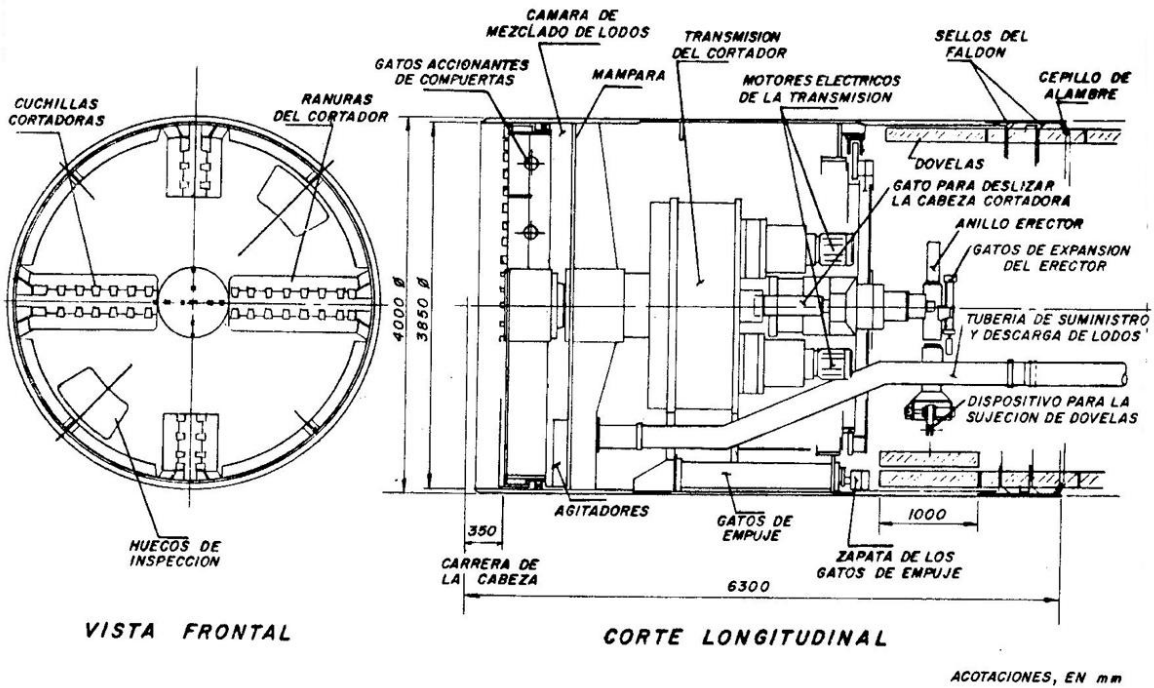


Fig. 8. Escudo cortador de frente presurizado

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

Para realizar la correcta operación del escudo, de manera que se mantenga la presión requerida en el frente en todo momento, se requiere de un sistema de circulación de lodos controlado por un mando de cabina central, el cual monitorea el suministro de lodo a través de una bomba acoplada a una tubería de alimentación y su extracción respectiva a través de una tubería de descarga; a esas tuberías que se acoplan las bombas de lodos necesarias para transportar a lo largo del túnel y hasta la superficie. De la mezcla del lodo con el suelo excavado, generalmente se recupera el primero separándolo del segundo por medio de tanques de sedimentación, o se procesa por medio de un sistema de separación y secado que permite preservar la ecología de los lugares en los que dicho material es depositado para su desecho final.

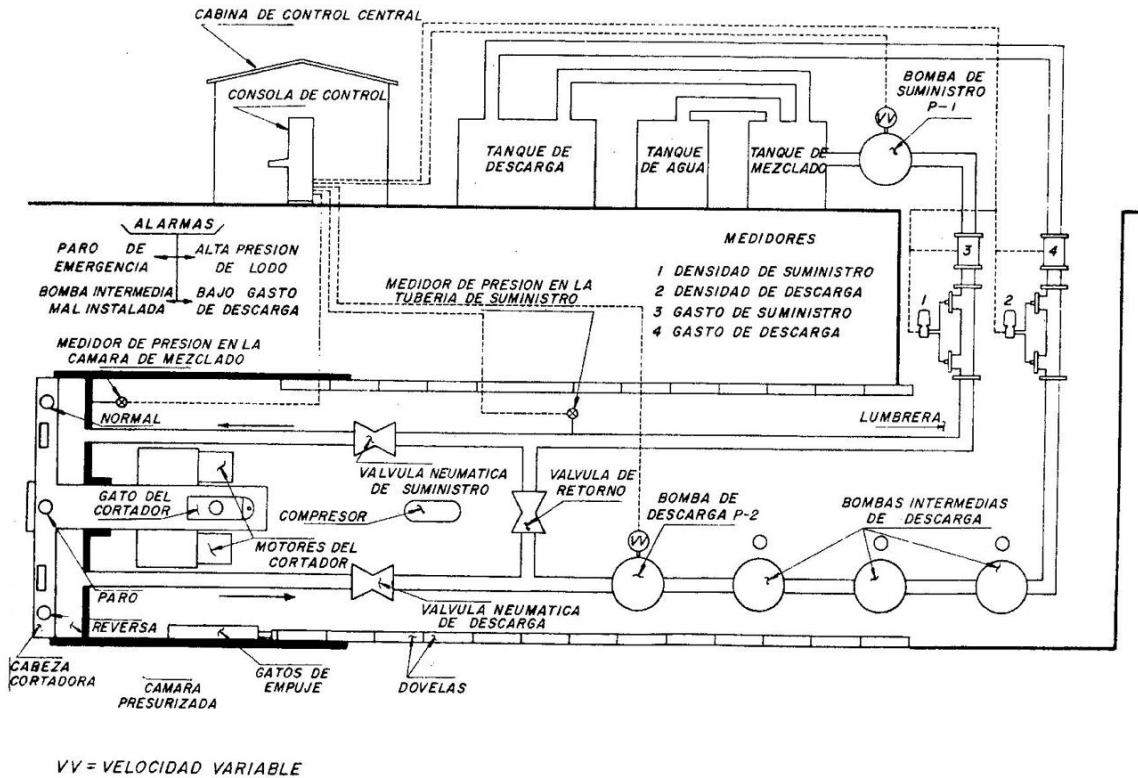


Fig. 9. Gráfico réplica, ubicado en la consola de control central

El sentido de la rotación de la cabeza cortadora se programa en cada avance del escudo y tiene como finalidad contrarrestar la tendencia natural de éste último a girar a causa de fuerzas de fricción del terreno y de la distribución de los pesos de los distintos componentes que lo integran. Para controlar la admisión del suelo excavado, la cabeza cuenta con ranuras provistas de compuertas accionadas hidráulicamente, las cuales limitan la apertura en función de las propiedades del subsuelo. La velocidad de excavación está en función de la velocidad de empuje de los gatos de avance del escudo y de la capacidad de transporte del sistema de circulación de lodos.

Este tipo de escudos cuenta con un sistema de sellos perimetrales en el faldón, el cual resulta indispensable para el control de la presión en el frente de la excavación, pues impiden la fuga del

lodo contenido en la cámara de trabajo, al mismo tiempo que impide la fuga de los materiales de la inyección que se aplica en la parte trasera del escudo. Para evitar o reducir los asentamientos del suelo circundante al túnel excavado. Los sellos se fabrican en hule y en cepillos de acero formando un conjunto.

Para la colocación del revestimiento primario, debido a la localización de las tuberías e instalaciones alojadas en el cuerpo del escudo, se emplean erectores de dovelas del tipo anillo, tecnología que ha sido desarrollada especialmente para dicha actividad.

Las dovelas que conforman el revestimiento, generalmente se fabrican de concreto reforzado de alta resistencia y en tolerancias muy estrictas, pues es de suma importancia que en combinación con sellos perimetrales de neopreno o materiales similares, reduzcan al máximo las posibles filtraciones de agua subterránea, además de garantizar una buena estructura de reacción para los gatos de empuje.

La tecnología de escudos de frente presurizado con lodos antes descrita, fue desarrollada por empresas japonesas. Existe una variante a dicha tecnología que es importante de mencionar y que fue desarrollada por empresas alemanas, conocidas como HYDROSHIELD. La forma de lograr la presurización del frente, en este caso es, mediante el empleo de una esclusa o diafragma localizado en la cámara de trabajo, operando con aire comprimido el cual regula la presión necesaria para estabilizar.

Es una práctica normal que en los escudos de frente cerrado se instale una esclusa de aire comprimido, que funciona como un sistema adicional para trabajos de mantenimiento a la cabeza cortadora o en caso de emergencia; si por alguna razón se requiere hacer separaciones a la cabeza cortadora y los equipos contenidos en la cámara de trabajo, así como por problemas encontrados en el frente (rocas, cavernas), resulta de suma importancia dicha instalación.

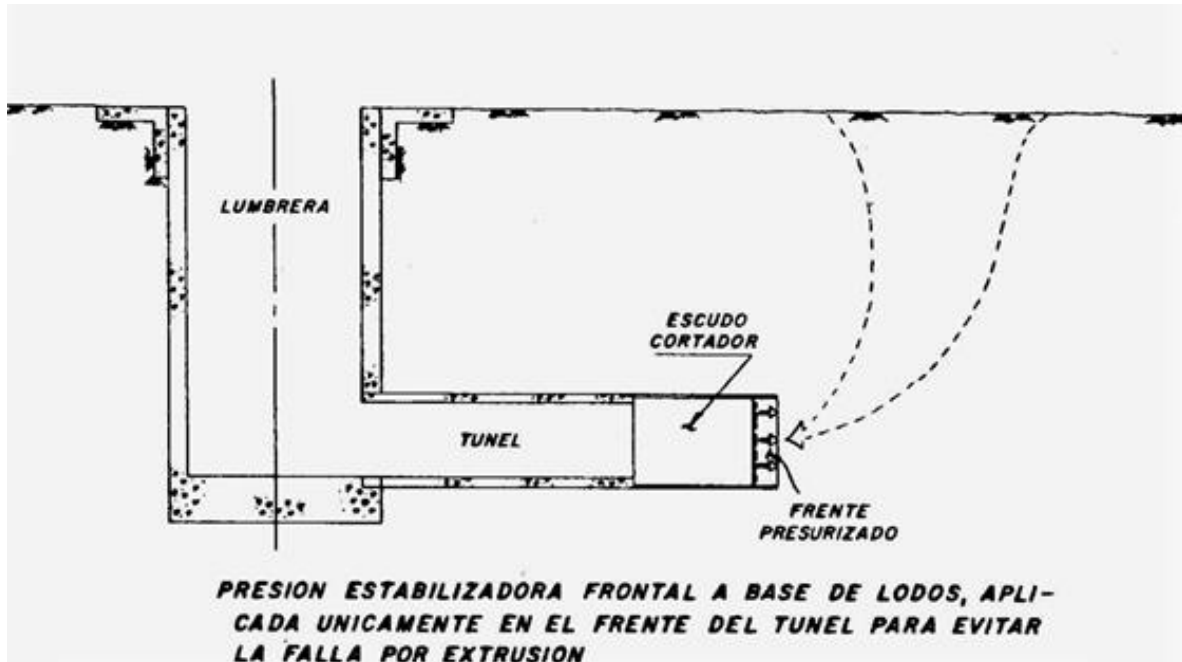


Fig. 10. Presión estabilizadora aplicada únicamente en el frente

Control de la presión frontal en un escudo de frente presurizado con lodos durante el proceso de excavación:

- La cabina del operador del escudo forma parte integral del tren de equipo.
- Dentro de la cabina, el operador cuenta con un tablero electrónico de medidores, indicadores e interruptores que le permiten controlar la presión frontal.
- Los indicadores principales para controlar la presión frontal existentes son: el indicador de presión frontal y el indicador de velocidad de avance del escudo, indicador de gastos de lodo de descarga e indicador de compuertas hidráulicas en la cabeza cortadora.

Causas que originan un incremento brusco de presión frontal durante el proceso de excavación:

- Una mala operación en el equipo de rezaga.
- Fallas en el equipo de bombeo y rezaga de material.
- Taponamiento en la salida de descarga en la cámara frontal; éstos taponamientos son derivados de la alta densidad del material a extraer debido a un mal mezclado con el lodo bajo en densidad, suministrado desde la superficie.
- La velocidad del escudo durante el proceso de excavación es alta y origina que la aportación del material excavado hacia la cámara frontal sea con una velocidad mayor a la que tiene la bomba de extracción.

Causas que originan un decremento brusco de presión frontal (despresurización):

- Existe una falla en la línea de suministro de lodo de baja densidad, combinada con una velocidad lenta de excavación del escudo.
- El sistema de bombeo de rezaga (línea de descarga) está operando a alta capacidad de extracción.
- Mala operación y fallas en el equipo de bombeo.

Solución a un incremento brusco de presión frontal del escudo:

- Suspender el proceso de excavación del túnel deteniendo el avance del escudo, evaluando siempre el costo por paro de la máquina.
- Mantener operando los equipos de bombeo y extracción o descarga de material de la cámara frontal, con el fin de liberar y nivelar la presión.
- Mantener la cabeza cortadora girando con las compuertas hidráulicas cerradas.
- No reiniciar el proceso de excavación hasta que la presión frontal este normalizada.

II.5 TÉCNICA CON ESCUDOS DE AIRE COMPRIMIDO

La construcción de túneles con esta técnica en suelos blandos en México, planteó en gran reto para la ingeniería mexicana, ya que uno de los grandes problemas es el poder estabilizar el frente de ataque, cuya solución requiere de procedimientos muy especiales. Cabe mencionar que todas las experiencias conocidas y ejecutadas con esta técnica en el extranjero han sido a nivel del mar o cercanos a éste, por lo que hubo que estudiar con un grupo de médicos expertos (neumólogos), las consecuencias que podrían tenerse para los trabajadores, con esta técnica, en las condiciones de la Ciudad de México, debido a su altura sobre el nivel del mar (2240 m.).

Las condiciones a las cuales se encuentra un trabajador en la excavación de un túnel presurizado con aire comprimido, son muy similares a las condiciones de compresión y descompresión con las que se enfrenta un buzo. Es decir, en función a la profundidad (presión) y al tiempo de exposición, el buzo debe regresar a la superficie por etapas, es decir, va subiendo ciertas distancias y en cada una de ellas espera determinado tiempo para evitar enfermedades por descompresión, que pueden ir desde severos daños auditivos hasta estallamiento de los pulmones.

Equipo necesario para la construcción del túnel y medidas de seguridad.

Por aire a baja presión se entiende aire comprimido a una presión mayor que la atmosférica, introducido al túnel y confinado ahí durante la construcción, para contrarrestar la tendencia del agua y del terreno a fluir dentro de la excavación.

La presión a la cual el aire debe ser entregado en el túnel y sostenido en éste, es función de la carga hidrostática en el mismo, las características del terreno y el tamaño del túnel. Si el terreno se cierra y tiene alguna cohesión, la presión utilizada para conservar el túnel seco será aproximadamente igual a la carga de agua sobre la plantilla del túnel. Si el terreno es abierto, esta presión no puede usarse generalmente, pues se tiene el peligro de romper el terreno y causar una

salida del aire. Usualmente en este caso, la presión empleada equilibra la carga de agua tanto en la clave como al nivel medio del túnel; consecuentemente, la parte inferior del túnel no se puede conservar seca con presión de aire en un suelo blando con poca o ninguna cohesión, a través del cual el escudo puede manejarse fácilmente. La presión del aire puede ser menor que la carga hidrostática mientras no se lleve a cabo ningún trabajo adelante del escudo, la presión se aproximará a la combinación de la presión del agua y el terreno.

Equipo:

- a) Equipo de aire comprimido a baja presión y las tuberías para llevarlo a la cámara de trabajo (túnel).
- b) Equipo de aire comprimido en alta presión para rompedoras, equipo de inyección, bombas, etc.
- c) Planta para el sistema hidráulico.
- d) Equipo de bombeo para agua potable.
- e) Generador eléctrico para iluminación del túnel.
- f) Sistema de comunicación de los servicios desde superficie al túnel.
- g) Planta de bombeo para lodos.
- h) Equipo de excavación
- i) Plataforma de trabajo inmediatamente después del escudo.
- j) Equipo para inyección de gravilla.
- k) Equipo para inyección de lechada de cemento
- l) Mamparas y esclusas
- m) Dispositivos de seguridad para usarse en aire comprimido

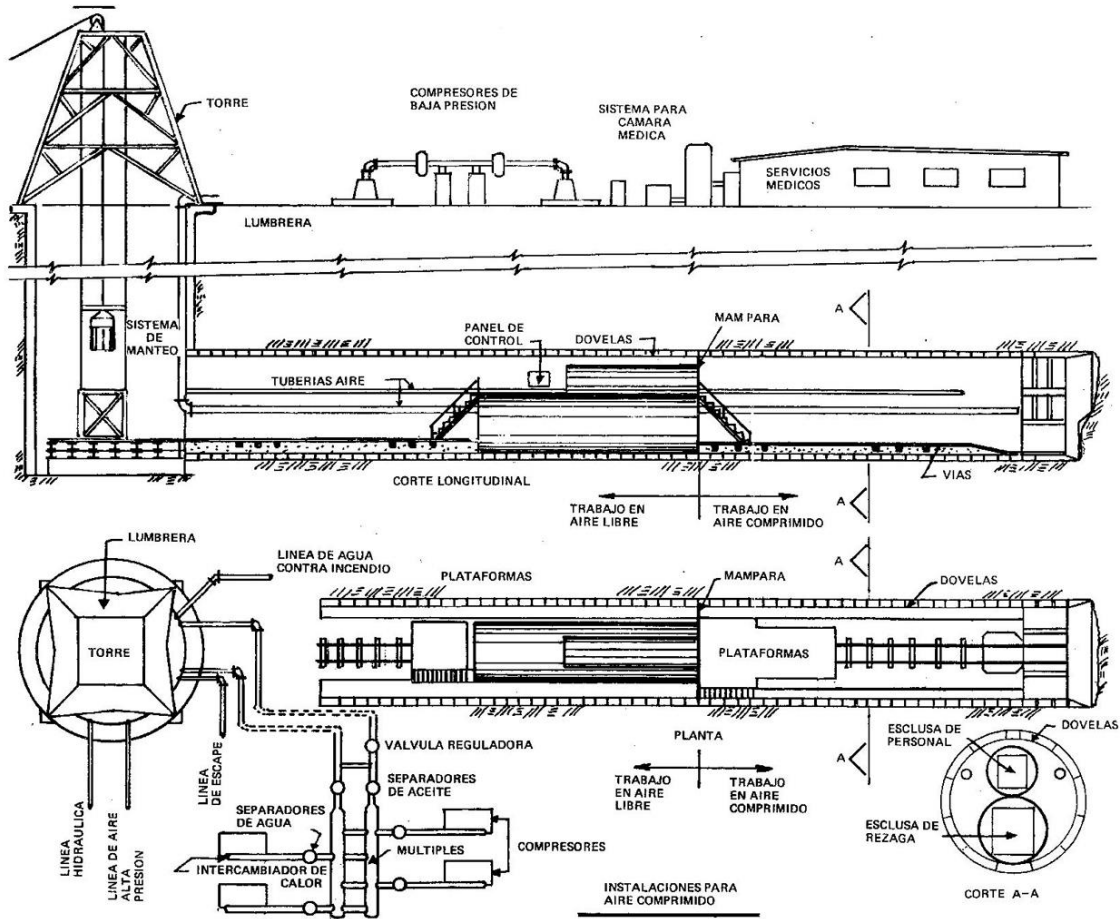


Fig. 11. Elementos requeridos para el tuneeo con aire comprimido

- n) Una esclusa de personal en donde se realiza la compresión de los trabajadores para poder entrar a la cámara de trabajo y la descompresión para salir de la misma.
- o) Una esclusa de rezaga que sirve para el paso de materiales y equipo a la cámara de trabajo.

Se ha procurado que la cámara de trabajo sea lo más larga posible, con objeto de que las oscilaciones de presión sean insignificantes. El volumen de aire a presión necesario en la zona de la Ciudad de México, puede determinarse a través de fórmulas ya conocidas, que toman en consideración las condiciones del suelo y el tamaño del túnel.

En el suministro del aire existen dos aspectos que hay que cuidar: la temperatura del aire dentro de la cámara de trabajo y zona de esclusas y la concentración de contaminantes en el aire; para lo cual se dispone de enfriadores y separadores de aceite a la salida de los compresores de baja presión que controlan estos dos aspectos.

Instalaciones médicas.

Los estudios realizados por el cuerpo médico para determinar los efectos del aire comprimido a la altitud de la Ciudad de México, han permitido establecer las normas de seguridad e instructivos de operación muy detallados, mismos que se hacen del conocimiento de todo el personal involucrado en el proyecto. El personal aprobado para trabajar en aire comprimido, además de cumplir con cursos de inducción, deberá haber recibido el visto bueno del cuerpo médico que estará a cargo en los turnos de los trabajos y respetar estrictamente las normas que se hacen de su conocimiento, cuya finalidad es cuidar la salud del trabajador bajo condiciones hiperbáricas.

Los requerimientos de buena salud y condición física son especialmente rigurosos, ya que, como se ha señalado, las enfermedades originadas por una mala descompresión pueden poner en riesgo la vida del trabajador. En el lugar de trabajo existe una cámara hiperbárica para dar atención a los trabajadores en caso necesario.

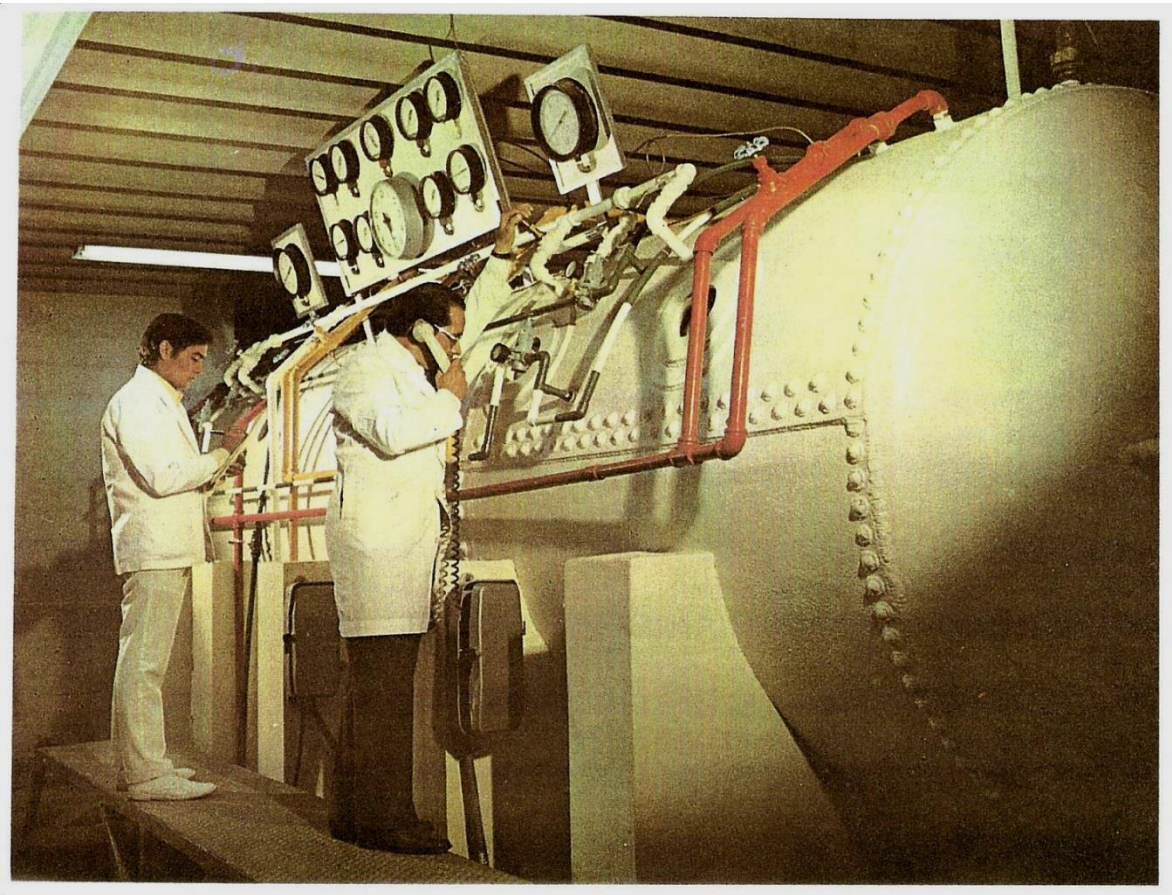


Fig. 12. Cámara hiperbárica para exámenes médicos en el aire comprimido

El tiempo total requerido para la descompresión en la Ciudad de México, está relacionado con la presión a nivel del mar. Esta presión es tal que el tiempo de descompresión derivado de tablas estándar para el nivel del mar, es muy similar para la cámara de trabajo en la Ciudad de México.

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

Las tablas estándar para descompresión al nivel del mar, han sido desarrolladas considerando la reducción de la presión, de tal forma que ésta sea una relación aceptable entre la presión absoluta del gas en los tejidos y la presión atmosférica.

Como se mencionó anteriormente, la presión equivalente se basa en los puntos establecidos por la carta estándar. Para el desarrollo de nuevas tablas, podrá efectuarse una interpolación lineal entre puntos conocidos. Las tablas de descompresión para periodos de trabajo de entre 6 y 8 horas, o más, fueron calculadas de esta manera. Las etapas de descompresión y tabla de descompresión para exposiciones repetidas, también fueron derivadas de las estándar al nivel del mar.

Estas tablas indican que la presión ambiente en la esclusa del personal, no se reduce en proporción uniforme, sino en una serie de pasos, donde la presión se mantiene constante durante un tiempo específico y entonces se aumenta la velocidad al próximo paso inferior o superior, donde nuevamente es mantenida constante por algún tiempo.

TABLA DE DESCOMPRESION											
TIEMPO DE LA DESCOMPRESION EN MINUTOS											
PRESION DE TRABAJO Kg/cm ²	PERIODO DE LABOR (HORAS).										
	1/2	1	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8	+8
0.6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0.7	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12	24
0.8	7	7	7	7	7	7	13	21	35	55	61
0.9	8	8	8	8	9	12	33	48	56	61	73
1.0	8	8	10	12	13	28	56	68	77	88	112
1.1	8	8	12	19	24	53	76	86	96	116	125
1.2	11	11	19	25	43	76	102	111	120	133	140
1.3	12	14	25	29	58	96	121	128	134	140	156
1.4	14	17	30	36	76	111	132	145	147	150	171
1.5	16	24	33	45	101	132	149	159	160	172	188
1.6	18	29	39	65	109	147	169	172	184	192	208
1.7	20	36	44	86	128	167	182	197	207	218	231
1.8	22	40	59	99	152	181	197	220	226	236	254
1.9	24	44	64	113	172	200	224	236	244	256	277
2.0	28	49	73	128	180	207	227	244	256	266	281
2.1	32	50	85	142	185	215	235	249	261	272	293
2.2	36	55	99	147	191	218	245	260	265	272	297
2.3	43	65	115	154	200	232	255	268	271	273	297
2.4	44	70	130	164	207	240	262	269	280	285	310
2.5	48	80	146	185	224	256	280	292	—	—	—
2.6	55	89	160	201	244	274	305	319	—	—	—

Tabla 2. Utilizada en la Ciudad de México para descompresión

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

Una vez revisados todos los elementos que integran el sistema de aire comprimido, se desarrolló una etapa de pruebas de acuerdo con un programa incluyendo los siguientes puntos:

- a) Control de presión.
- b) Control de temperatura.
- c) Arranque del generador de emergencia.
- d) Arranque de compresores.
- e) Pérdida de presión en el túnel suspendiendo el suministro del aire.
- f) Control de ventilación para la cámara de trabajo.
- g) Prueba del sistema contra incendios.
- h) Pérdida de presión en el túnel sin ventilación.
- i) Simulacros.

Esta serie de pruebas sirvió para ajustar el comportamiento de los diferentes elementos, al mismo tiempo que permitió comprobar la validez de los cálculos teóricos efectuados.

Por otro lado, las condiciones de trabajo en el frente de ataque mejoraron radicalmente con la instalación del sistema de aire comprimido, lográndose muy buenos avances en la excavación.

II.6 TÉCNICA CON ESCUDOS DE PRESIÓN BALANCEADA

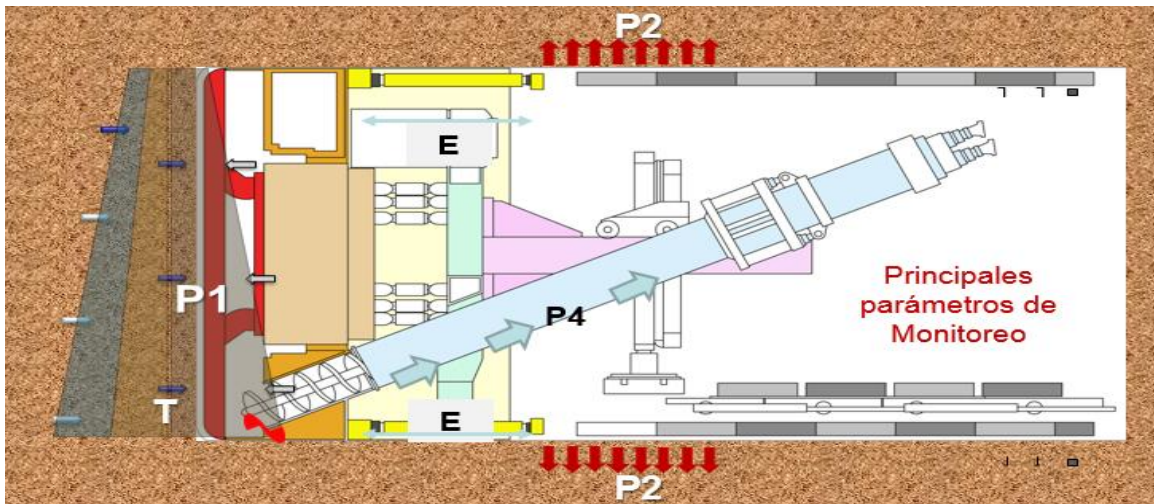
Como puede observarse, la utilización de procedimientos de tuneleo con el uso de aire comprimido, tiene un límite económico, ya que si se requiere utilizar presiones superiores a 1.0 kg/cm², los riesgos de enfermedades por descompresión se incrementan, así como los costos de las actividades de tuneleo. Es así como resulta conveniente el empleo de escudos de presión balanceada.

Este método de excavación se basa en el principio de que el soporte del frente se obtiene a través del material excavado (acondicionado en forma adecuada). Una mampara separa al túnel de la parte frontal del escudo, donde opera la cabeza cortadora, creando así la cámara de excavación o pleno.

El principio consiste en crear una “acumulación” de material en el pleno controlando la extracción y midiendo la “presión de tierra” resultante, asegurando así que se conserve de acuerdo al nivel requerido por los cálculos. La rezaga se extrae de la cámara usando un tornillo transportador, el cual es la herramienta para controlar y regular la cantidad de material extraído. Debido a este efecto se le conoce como Escudo de Presión Balanceada (EPB).

El acondicionamiento de la rezaga se realiza mediante inyecciones hacia el frente, delante de la cabeza cortadora. Los materiales inyectados son comúnmente agentes espumosos, bentonita y/o polímeros. El objeto es tener una especie de masa, tan homogénea como sea posible, de manera que se pueda operar a presión dentro del pleno y permita su manejo al utilizar el tornillo transportador

para su extracción. Un anillo de dovelas prefabricadas se instala en la sección trasera del escudo y se realiza la inyección de contacto para rellenar el espacio anular entre el terreno y el anillo de dovelas.



P1: presión de frente

P2: presión de inyección de mortero

E: elongación de los cilindros de empuje

P4: Volumen de material de rezaga

T: fuerza de torque

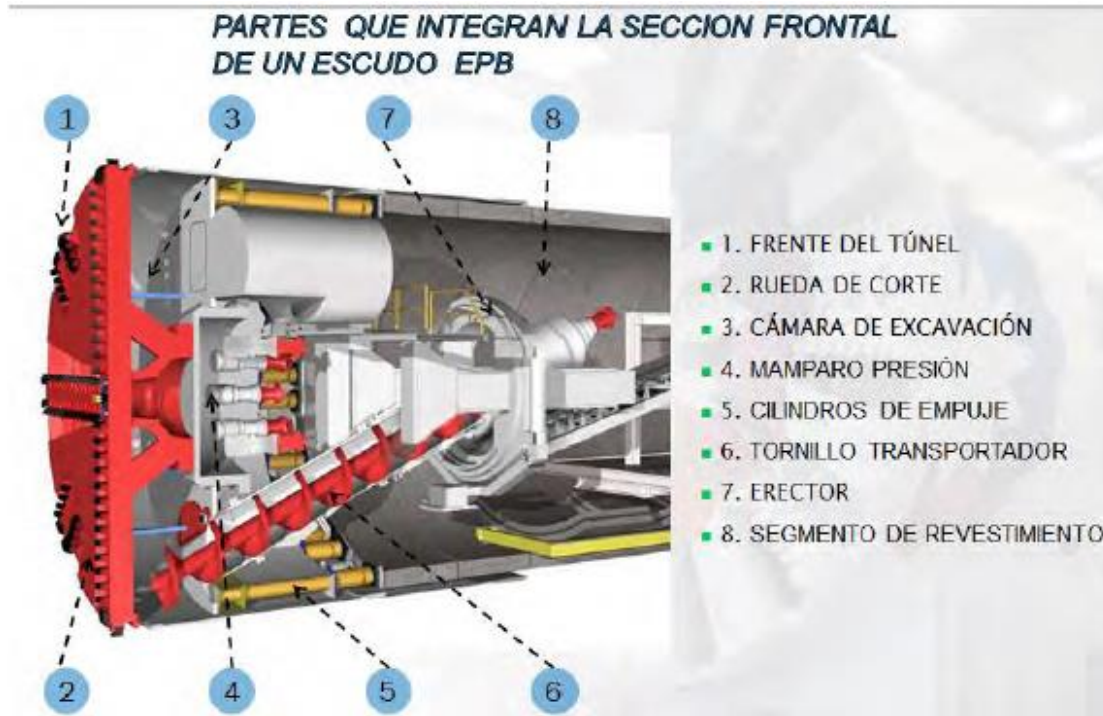


Fig. 13. Escudo de presión de tierra balanceada

La descarga del tornillo transportador puede ajustarse variando las revoluciones del mismo o modificando la abertura de la compuerta deslizante. Una de las grandes ventajas de este sistema consiste en que el suelo excavado puede ser transportado a la parte trasera del escudo, para su retiro al exterior del túnel en camiones, vagonetas montadas sobre vías férreas, bandas transportadoras, etcétera, representando un problema menor para su eliminación desde el punto de vista ecológico.

CAPÍTULO III. TÉCNICAS DE TUNELEO EN SUELOS DUROS

III.1 ESTUDIOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL

Los proyectos de ejecución son realizados a partir de observaciones hechas sobre las galerías experimentales y también sobre los resultados de ensayos geotécnicos “in situ” y en laboratorios.

El proyecto de ejecución es elaborado conjuntamente a partir de:

A) Clasificación geotécnica de los suelos

El criterio de clasificación adoptado es la duración de estabilidad de la excavación experimental sin ningún revestimiento (Lauffer 1958), y esto conduce a determinar si el terreno se encuentra en la zona A, B o C, según sea el caso, parámetros definiendo las dimensiones de diámetro y longitud de la excavación no revestida. Con todo rigor, no hay diferentes tipos característicos de sostenimiento: sino más bien una continuidad entre cada uno de ellos. Conviene también precisar que todo revestimiento puede ser reforzado después de su colocación y puede así pasar de una clase a otra.

Clasificación según Lauffer

CLASE	DESCRIPCIÓN	SOSTENIMIENTO	LONGITUD (L) (m)	TIEMPO	OBSERVACIONES
A	Sana	--	4	20 días	--
B	Algo fracturada	Techo	4	6 meses	Terreno bueno
C	Fracturada	Techo	3	1 semana	Terreno medio
D	Friable	Marcos ligeros	1.5	5 horas	Rocas Blandas
E	Muy friable	Marcos pesados	0.8	20 min	Baja cohesión
F	Empuje inmediato	Pesado y frente	0.4	2 min	Terreno muy malo
G	Idem (fuerte)	Pesado y frente	0.15	10 seg	Idem

Tabla 3. Clasificación de las rocas según Lauffer

B) Ensayes geotécnicos

La finalidad de los ensayes geotécnicos ejecutados “in situ” o en el laboratorio es:

- Obtener datos sobre las deformaciones del terreno que permitan efectuar cálculos teóricos para conocer la distribución de esfuerzos alrededor del túnel para cada etapa de ejecución en el suelo.
- Determinar las características mecánicas del material para cada clase de terreno, es decir, las curvas o zonas intrínsecas.

La determinación de las características mecánicas de los terrenos juega un papel importante en el dimensionamiento del revestimiento. Las contracciones, calculadas o medidas, son un efecto de confrontación con las resistencias del terreno, lo que condiciona, en el estudio del proyecto de ejecución, las características de sostenimiento necesario para asegurar la estabilidad del túnel.

C) Estudio teórico

Los cálculos teóricos se basan especialmente sobre la simulación del comportamiento mecánico del medio alrededor de la cavidad, estos datos de las distribuciones de esfuerzos, determinan las zonas de baja, mediana y alta plasticidad, (convergencia en el túnel y posibles hundimientos). Esta simulación es desarrollada en programas de computadora, los cuales arrojan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en campo.

Durante la ejecución de los trabajos es necesario realizar las siguientes actividades en campo:

A) Obtención de las deformaciones

Las medidas de deformación son realizadas con ayuda de tasómetros, extensómetros o aparatos para medición de convergencias. Estos tres tipos de aparatos dan variaciones de longitudes entre unos puntos sólidos del terreno o del revestimiento. Es en función de la amplitud de las deformaciones como son ajustadas las características del sostenimiento (espesor del concreto lanzado, importancia del montaje de cimbras, densidad de las anclas), de acuerdo con las exigencias reales del terreno, toma como revestimiento de principio el determinado por el estudio teórico.

La obtención de deformaciones en túneles de poca profundidad, genera datos muy útiles al obtenerlos por los tasómetros o extensómetros situados desde la superficie del terreno, antes de la ejecución en la construcción del túnel. La experiencia muestra que las primeras deformaciones aparecen netamente antes de que el frente de corte en el túnel haya alcanzado los primeros 50 m de profundidad en el corte.

Para excavaciones de gran sección, este problema no se plantea, porque se tiene en efecto la posibilidad de colocar extensómetros de base transferible, a partir de una galería de reconocimiento.

Las medidas de deformación completadas por una brigada de topografía en superficie o subterráneo a partir de dos puntos fijos, permiten determinar los desplazamientos absolutos en la periferia del túnel. Estas medidas de deformación son uno de los elementos más importantes para la puesta en marcha del método austriaco, permiten, además, controlar el comportamiento del terreno y de ajustar exactamente el revestimiento. Además, han dado la posibilidad de aprovechar una de las grandes ventajas del método austriaco; mostrando que incluso para terrenos muy difíciles, las perturbaciones y las deformaciones en la periferia de la excavación, son más reducidas por este método que por todas las técnicas tradicionales de construcción de túneles.

B) Medidas de contracción

Estas medidas son más delicadas que las de deformación, la dispersión de datos es bastante grande y la interpretación de los resultados algunas veces resulta un tanto complicada. Se puede decir que el control de las fuerzas de anclaje constituyen una medida indirecta de las contracciones, por lo que este tipo de estudios requieren de mayor profundidad, no nos adentraremos en el mismo.

III.2 TRATAMIENTOS DEL TERRENO

Existen varios métodos para realizar el tratamiento del suelo con el fin de modificar su comportamiento durante la excavación de un túnel. Los principales objetivos son el control del agua y el fortalecimiento de las fuerzas cohesivas; los medios incluyen: 1) inyección de selladores en los poros y fisuras; 2) congelación, y 3) abatimiento por drenaje de los niveles del agua subterránea.

Normalmente, los métodos de tratamiento del terreno se aplican con mayor eficiencia desde la superficie, antes de proceder a la excavación; pero también se pueden aplicar dentro del túnel, aunque estas operaciones se efectúan en espacios restringidos y retrasan en gran medida el progreso del túnel. Hoy en día, las técnicas de tratamiento del terreno pueden hacer que las arenas movedizas se pueden cementar y convertirlas en areniscas, los limos húmedos se pueden convertir por congelación en un sólido compacto.

1) Inyección de selladores

Es el proceso de inyectar una lechada de cementantes con selladores, que pueden ser una solución o una suspensión de partículas, para que llenen los poros o los huecos en el terreno o entre una estructura y el terreno. Si el suelo tiene un alto contenido de agua, se diseñará la lechada adecuada, o en caso de que no haya agua, sólo rellene los huecos. Al ser inyectada de este modo, la lechada reacciona física o químicamente y puede fraguar para formar un gel o un sólido, reduciendo la porosidad y aumentando generalmente la fuerza de cohesión del suelo.

Actualmente existe una gran variedad de materiales, técnicas de inyección y de equipos para adaptarse a los requisitos particulares de cada proyecto, sin embargo, los dos objetivos principales son:

1. Reducir la permeabilidad del suelo y
2. Reforzar y estabilizar el suelo

Por lo general, se necesita cumplir con estos dos objetivos en la construcción de túneles. Cuando se opera con aire comprimido, la reducción de las pérdidas de aire puede ser tan importante como la reducción de la entrada de agua. La aplicación de materiales de relleno adecuados en los huecos, contribuirá a un aumento en la resistencia al cortante y a la compresión del suelo, al mismo tiempo que reduce la permeabilidad, pero será necesario emplear los materiales y técnicas de aplicación que convengan en el terreno. Si el volumen que se va a tratar contiene una variedad de suelos, es posible que se necesite más de un tipo de lechada y aplicaciones en diferentes formas.

Tipos de lechada

Las lechadas se pueden clasificar de un modo muy amplio como sigue:

1. Suspensiones de partículas: El cemento Portland con agua es la lechada más común, y sólo será aplicable en el caso que las dimensiones de los poros sean lo suficientemente grandes como para admitir las partículas del cemento.
2. Suspensiones de bentonita u otra arcilla: Estas tienen el grano más fino y por consiguiente penetran con más libertad.
3. Lechadas químicas: Son soluciones acuosas que forman líquidos puros. Sus propiedades de penetración dependen de su viscosidad, mismas que pueden aumentar con el tiempo, después de iniciada una acción química o física de fraguado para formar un gel. Se podrá utilizar un fluido “de una sola aplicación”, que dependen del tiempo o “de dos aplicaciones”, que reaccionan en el terreno.
4. Otras, como las emulsiones bituminosas, asfaltos, que no se utilizan mucho en construcciones de túnel por su alto costo.

La selección, diseño del material, secuencia y técnicas más apropiadas de inyección, solo se pueden hacer después de realizado un buen estudio en mecánica de suelos o rocas del sitio, haciendo hincapié en la permeabilidad y el análisis de mallas. Es posible que se requieran especialistas en inyecciones para todos los casos, con excepción de los más simples. En la bibliografía existente, se encuentran casos en los que es raro que la inyección sea efectiva en todo el volumen, debido a que la lechada pueda penetrar en él de manera desigual y es probable que haya permeabilidad residual. Es preciso establecer un equilibrio entre el costo y el tiempo de un tratamiento detallado, cada vez más elaborado y saber en qué punto se deben detener los trabajos sobre la estabilidad y el control de agua subterránea para que se tenga una construcción permanente satisfactoria.

Principios en que se basa la inyección de lechada

Los principales factores que determinan la selección de las mezclas de lechada y los métodos de aplicación son los siguientes:

- 1) Características del suelo.
 - a. Permeabilidad del suelo
 - b. Flujo del agua subterránea
 - c. Presión del agua subterránea
 - d. Profundidad y accesibilidad de la zona que se va a tratar.
- 2) Propiedades de la lechada de cementantes.
 - a. Tamaño de las partículas en suspensión
 - b. Viscosidad
 - c. Tiempo y velocidad de fraguado
 - d. Presión y velocidad de inyección de la lechada
 - e. Compatibilidad química

La permeabilidad total del terreno se deriva en parte de la estructura de los poros del suelo y en parte del patrón de juntas y fisuras. La mayoría de los suelos se pueden estabilizar o impermeabilizar, pero mientras más fina sea la estructura del poro es más difícil, lenta y costosa la inyección eficaz. Cuando los estratos son variables, las inyecciones de lechada inicialmente seguirán la línea de menor resistencia.

La presión de inyección tiene que ser cuidadosamente calculada y controlada, ya que cualquier intento de acelerar el proceso de inyección puede dar por resultado la penetración local de la lechada a lo largo de un plano de baja resistencia y su escape más allá de la zona de tratamiento, o la elevación en la superficie, sin que se traten efectivamente las arenas más finas. Este proceso se puede emplear deliberadamente a fin de estabilizar una arcilla fisurada u otro material impermeable al establecer una red de fisuras rellenas de una lechada espesa.

Tal vez se tenga que tomar en cuenta la cuestión de la compatibilidad química entre los cementantes y el suelo, como pudiera ser un suelo muy ácido o muy alcalino o si hay sulfatos. Algunas lechadas tienen componentes tóxicos, lo que hace tener mucho cuidado y control muy especial para la colocación de la lechada.

Materiales de inyección

- **Partículas en suspensión**

Cemento: Se utiliza cemento Portland común en las gravas y las arenas gruesas y también en la inyección de fisuras. El tamaño promedio de las partículas del cemento portland comercial es de 30 μm . Se utiliza la técnica de espesar progresivamente la lechada para las inyecciones sucesivas, con el fin de obtener la máxima penetración del cemento, una mezcla inicial diluida de aproximadamente 100 litros de agua por cada 50 kg de cemento, permite que la lechada llegue a penetrar bien y selle los poros más pequeños y el exceso de agua es expulsado hacia el terreno

circundante manteniendo la presión, al reducir en las etapas subsecuentes la relación agua-cemento se tiene la seguridad de que se rellenan los poros más grandes. El procedimiento garantiza la máxima resistencia y el mínimo de permeabilidad, el tiempo inicial del fraguado es de una hora, pero el endurecimiento es más tardado.

Cemento/arcilla: Las mezclas de cemento con arcilla pueden ofrecer una lechada mucho más barata que cuando se utiliza cemento puro. La resistencia es menor, pero no se debe dañar la impermeabilidad del suelo y no en todos los casos es aplicable.

La bentonita es una arcilla muy especial que tiene propiedades tixotrópicas cuando se mezcla con agua, es decir, se comporta como un fluido mientras está en movimiento o se le agita, pero cuando esta inmóvil forma un gel con propiedades de baja permeabilidad y poca fuerza cohesiva. Se puede utilizar sólo para reducir la permeabilidad en las gravas y las arenas gruesas, si no se requiere una resistencia sustancial.

Puzolanas: Las puzolanas son materiales finamente divididos que no son solubles en agua, pero sí químicamente reactivos; toman el nombre de una toba volcánica típica, tiene algunas propiedades cementantes o se pueden utilizar como aditivos del cemento Portland. La ceniza de los combustibles pulverizados (CCP) es un producto de desecho de las estaciones de energía alimentadas con carbón, cuyas propiedades son similares a las de las puzolanas y son de fácil obtención.

- **Selladores químicos**

Los que se utilizan corrientemente se pueden clasificar como silicatos, ligninas y resinas.

Silicatos: Las técnicas más antiguas y más conocidas de inyección de silicatos son el proceso de dos aplicaciones, en el que se inyectan primeramente silicatos de sodio seguidos por una solución de cloruro de calcio, que inicia una reacción química inmediatamente, que da por resultado un gel de silicato de calcio que une la arena. Puede que la consistencia del gel no sea uniforme y esté determinada por los cambios en la porosidad del terreno, el proceso se ha probado bastante y resulta eficaz si se aplica bien, pero su uso está restringido por la alta viscosidad del silicato, debido a que no se puede esperar una penetración satisfactoria.

Ligninas: Es posible producir lechadas de baja viscosidad, con una capacidad penetrante que sea adecuada para las arenas finas, a partir del lignosulfito, un producto secundario de la industria del papel, también varía la viscosidad y la resistencia final del gel.

Resinas: Los selladores con mayor penetración son los producidos por la polimerización de productos químicos orgánicos, incluyendo las resinas, productos que se pueden utilizar en permeabilidades bajas.

Equipo

La planta esencial para el tratamiento del suelo por medio de inyección, incluye los accesorios siguientes:

1. Equipo de perforación
2. Equipo de dosificación y mezcla
3. Bombas
4. Tubo de inyección de cementantes

La operación puede variar desde procesos relativamente simples, como la aplicación desde la superficie de inyección de cemento o bentonita, hasta el tratamiento de suelos diversos y difíciles con una sucesión de selladores especializados e inyecciones a alta presión desde un espacio confinado en un túnel piloto. Muchas lechadas químicas y de resinas implican procesos patentados, que resulta complicado publicar detalles de su procedimiento y uso.

Se utilizan barrenas de percusión, de rotación o lodos bentoníticos para evitar un derrumbe, en caso necesario. La planta de dosificación y mezcla deberá ser cuidadosamente planeada y situada para su mayor optimización. Puede ser un tanque en el que se mezclen el agua y el cemento, o una artesa para inyectar la lechada en el túnel, utilizando aire comprimido, cuidando siempre que la viscosidad y el tiempo de fraguado sean los correctos.

Las bombas deben permitir el control de las cantidades inyectadas y de las presiones empleadas y, por lo tanto, son generalmente del tipo de desplazamiento positivo, ya que también pueden ser diferentes los gastos de inyección y las presiones.

Los tubos para la inyección pueden tener los extremos abiertos, posiblemente equipados con una punta desechable a fin de evitar el bloqueo al inyectar o se pueden utilizar tubos perforados que permitan inyectar en un tramo.

Aplicación

El tratamiento se puede aplicar al total de un estrato permeable o de poca cohesión que afecta a un túnel y en especial, al área inmediatamente afuera de la excavación. Tal vez no sea necesario tratar toda la circunferencia del túnel, puede ser adecuada una “campana” sobre la corona de la excavación u otra área limitada donde una capa delgada del terreno permeable obstruya la excavación.

Una de las mayores desventajas de trabajar desde el propio túnel, es que el tratamiento del suelo y la excavación del túnel no se pueden realizar al mismo tiempo, por lo que se tiene que alternar la planta apropiada y la labor especializada de las dos operaciones en un ciclo, y puede resultar en una construcción lenta y costosa.

El tratamiento del suelo por adelantado desde un túnel piloto, tiene la ventaja de la continuidad de operación y menos interrupciones cuando se encuentra algo inesperado. Cuando se va a construir

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

un túnel de gran tamaño, se puede perforar un túnel piloto dentro de su área, que puede ser concéntrico o estar a un nivel más alto o más bajo. Los tubos para la inyección se hacen pasar a través de los agujeros preparados en el revestimiento del túnel piloto y deberán ser más o menos radiales. Esto impone dos limitaciones: la longitud del tubo que se puede insertar sin una junta y el espacio de trabajo.

El tratamiento del suelo por inyección de una lechada, es necesariamente una operación costosa en la que el costo por volumen unitario del suelo variará tanto aún cuando se utilice la misma lechada.

2) Congelación

Cuando se tiene el éxito en la congelación de un terreno acuífero permeable, se obtiene simultáneamente un sello contra el agua y un reforzamiento considerable del suelo poco cohesivo. No es necesario inyectar materiales especiales, el terreno normalmente vuelve a su estado original. Es aplicable a una gran cantidad de suelos. Toma un tiempo considerable establecer un muro de hielo sustancial y la congelación se deberá mantener por refrigeración continua todo el tiempo que se requiera.

Como en todas las técnicas de tratamiento del suelo, es necesaria una adecuada investigación del sitio que permita seleccionar el mejor sistema y diseñar la serie de tubos de congelación y escoger una planta con la potencia adecuada.

Como la congelación se puede aplicar uniformemente sobre una amplia variedad de tipos de suelos en una sola operación, podrá ofrecer con mejores resultados en terrenos mixtos, que el tratamiento por inyección de diversas lechadas. La versatilidad del principio en su aplicación a la construcción de túneles queda demostrada por la variedad de sus aplicaciones, por ejemplo:

- a) Construcción de tiros a través de estratos acuíferos
- b) Construcción de tiros totalmente dentro de un terreno poco cohesivo
- c) Excavación del túnel a través de un frente totalmente en suelos granulares
- d) Excavación de túneles en terrenos mixtos
- e) Estabilización urgente en una zona aislada del suelo

Se podrá tomar una decisión para utilizar algún método para congelar el suelo, como resultado de la información obtenida en los estudios previos, sin embargo, probablemente será necesario hacer sondeos, muestras y pruebas adicionales. Los aspectos que conciernen especialmente a la congelación son los siguientes:

1. Extensión del terreno que se va a congelar
2. Contenido de agua de los diferentes materiales, especialmente los limos y arcillas finas que pueden ejercer un empuje ascendente.
3. Salinidad del agua subterránea cuando afecta el punto de congelación.
4. Movimiento del agua subterránea

Proceso

La congelación puede ser:

1. Indirecta, por circulación de un refrigerante secundario a través de tubos introducidos en el suelo.
2. Directa, por circulación, del flujo refrigerante primario a través de los tubos en el suelo.
3. Por inyección en el terreno de un refrigerante, como nitrógeno líquido.

Refrigeración indirecta

Se utiliza la planta de refrigeración primaria para extraer el calor de un refrigerante secundario que circula por tubos introducidos en el suelo que se va a congelar. El proceso primario de refrigeración es básicamente el ciclo de Carnot de compresión y expansión invertidas. El calor generado por la compresión del refrigerante primario deberá ser extraído por enfriamiento de aire o por circulación del agua.

El tiempo requerido para congelar el suelo dependerá obviamente de la capacidad de la planta de refrigeración, en relación con el volumen del suelo que se va a congelar y también del espaciamiento y tamaño de los tubos de refrigeración y el contenido de agua del suelo.

Refrigeración directa

En este sistema, el refrigerante primario se hace circular por el sistema de tubos situado en el suelo, extrayendo directamente el calor latente de la ebullición y teniendo, por tanto, una eficiencia más alta que la del proceso indirecto. El tiempo de congelación directa es similar al del proceso indirecto.

Nitrógeno líquido (N₂)

La disposición del nitrógeno licuado depende de la existencia de un abastecimiento regular a la industria pesada. Las principales diferencias de esta técnica para la congelación del suelo, estriban en que no se depende de una planta refrigerante en el lugar y de que la temperatura es mucho más baja, y por consiguiente es de aplicación más rápida.

Tiene una particular ventaja en caso de emergencia, a saber, una rápida congelación sin una planta fija ni equipos complejos; esto puede ser doblemente ventajoso en sitios lejanos de las fuentes de energía (pero accesible por carreteras). En estas condiciones el nitrógeno se puede descargar directamente a través de los tubos hundidos en el terreno que se está tratando, para luego permitir que escape a la atmósfera.

3) Desagüe

El desagüe del terreno, mejora la estabilidad del frente del túnel y proporciona condiciones de trabajo más secas y más seguras. Es posible abatir el nivel del manto freático sobre una amplia área por medio de bombeo. Aunque ya se mencionó en otra técnica de tuneleo anterior el uso de este tipo de tratamientos, es importante mencionarlos nuevamente, hay dos métodos comunes: los pozos puntas y los pozos profundos. Estos procesos son muy utilizados en excavaciones a cielo abierto y algunos otros tipos de túneles.

Pozos Punta

Esta técnica se utiliza cuando se necesita desecar un área de terreno permeable hasta una profundidad menor a unos 6 m, limitado por la altura de aspiración al vacío de una bomba, se puede unir las puntas tubulares de aproximadamente 125 mm de diámetro; estos pozos se hunden por inyección de agua, en intervalos de un metro o mayores, la parte inferior de cada tubo está perforada y equipada con un cedazo de alambre; los tubos se conectan en la superficie a través de un tubo colector a una bomba de succión. Tal vez sea necesario bombear el agua durante algunos días para abatir los niveles de agua y mantenerlo así el tiempo que sea necesario.

Pozos profundos

Este método es para profundidades mayores como su nombre lo indica, el diámetro de los pozos puede variar, sin embargo, se recomienda tener diámetros no menores a los 30 cm, con espaciamentos de cuando menos de 3 m, para formar un anillo por debajo del nivel requerido. Se forma un filtro de grava con una graduación adecuada en el fondo de cada perforación, alrededor de cada tubo perforado y luego se instalan bombas sumergibles al nivel apropiado dentro del tubo.

Se podrían considerar en circunstancias especiales de suelos de grano muy fino, la consolidación por vacío y la electrólisis.

Sistema de vacío

Este método se aplica a suelos de finos, de baja permeabilidad, como son los limos y arcillas. Es una modificación del sistema de los pozos punta, en la cual se crea un vacío en éstas y en el suelo circundante, el cual se consolida por el efecto diferencial de la presión atmosférica sobre la superficie del terreno.

Electrólisis

Una corriente eléctrica entre electrodos hincados en un suelo arcilloso saturado, hará que el agua de los poros se desplace del ánodo al cátodo. Si el cátodo está constituido por un ademe metálico, el agua de filtración se puede extraer progresivamente por bombeo, lo cual dará por resultado consolidación del suelo.

III.3 TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN CON EXPLOSIVOS

Los explosivos son de uso muy común para la excavación en roca. Se utilizan además para cortes de taludes, de bancos y excavaciones de obras subterráneas, sin embargo, su uso en obras subterráneas requiere de técnicas especializadas para su buena y segura ejecución.

En el diseño de una voladura en un túnel se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

Tipo de roca: La propagación de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca. La propagación de onda es más rápida en una roca dura que en una roca blanda. También la composición de la roca tiene una gran influencia en la fragmentación de la misma y muchas rocas duras se rompen con mayor facilidad que una roca suave (comportamiento frágil).

Tipo de explosivo: Cada explosivo cuenta con características propias como lo son su densidad, velocidad de detonación, resistencia al agua, energía disponible, que son de importancia para decidir el tipo de explosivo a utilizar en el proyecto.

Factor de carga: Se define como la capacidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca. El factor de carga depende del tipo de roca, de su intemperismo y de la sección a excavar.

Geología: La geología de la masa rocosa a excavar es el factor más importante en el diseño total de una voladura. Las estructuras geológicas tales como las fisuras, oquedades, fallas y posición de los estratos, juegan un factor muy importante en los resultados de una voladura, por lo que, se debe tomar las medidas de precaución pertinentes para optimizar los resultados en cuanto al factor de carga, al tipo de explosivo y a las longitudes de los barrenos.

Barrenación: Los factores a considerar son el diámetro, la profundidad, el paralelismo de barrenación y la sub-barrenación.

Es importante que los barrenos sean dados en la posición y orientación correcta. La localización de los barrenos en la cara (frente), antes de ser perforados, deben hacerse con gran exactitud, los errores en la perforación tienen un efecto muy significativo en las excavaciones subterráneas.

En las voladuras de un túnel o lumbrera, es necesario crear una segunda cara libre (cuña), hacia donde la roca puede quebrarse y desplazarse. La segunda cara libre se logra mediante la localización y orientación de los barrenos en el frente y disparos en un predeterminado orden, antes del resto de la voladura. Después de que se hace el corte, el resto de los barrenos se disparan hacia la cara libre, de acuerdo al diseño de retardos. El diseño de los barrenos restantes en el disparo se puede comparar a una voladura de banco.

Método de sección completa: Este es un método usual en túneles de pequeño y mediano tamaño. Como su nombre lo indica, la voladura es a sección completa. La secuencia ideal consiste en: perforación, voladura y rezagado completo del material acumulado por el disparo y tratamientos eventuales en las paredes del túnel. El patrón de perforación, la profundidad, el número de barrenos, el equipo de perforación, el rezagado, la ventilación. Deben ser por lo tanto bien seleccionados para llevar a cabo el ciclo completo.

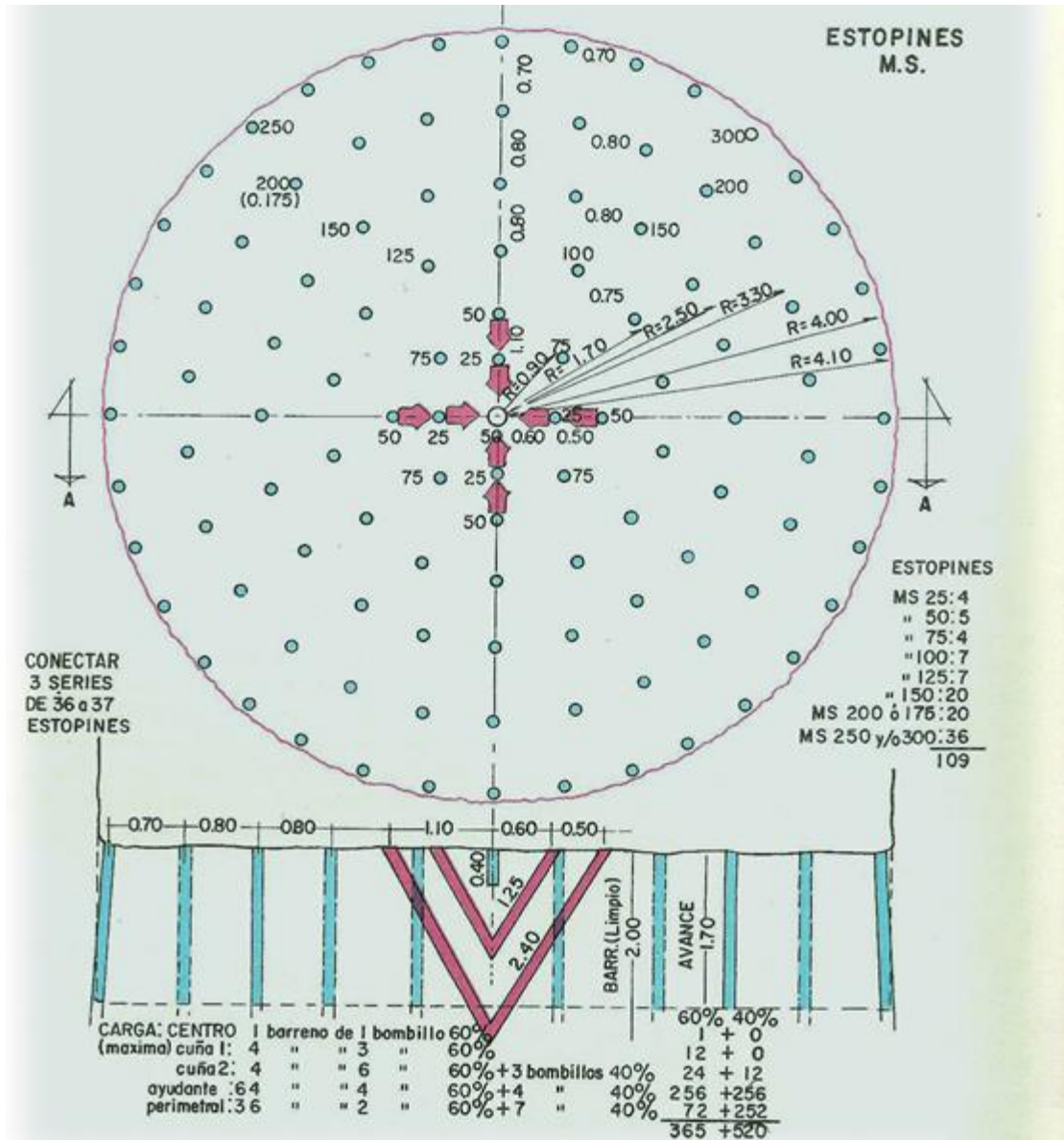


Fig. 14. Plantilla "Cuña Pirámide"

Método de ataque superior y banco: Este método es muy utilizado en el caso de túneles de tamaño considerable y consiste en abrir un túnel a lo largo del techo de la sección, consiguiéndose acceso para reforzar la roca en dicha zona. El resto de la sección se remueve con uno o más bancos.

Tipos de Cuñas

La parte inicial y más crítica en la apertura de un túnel es la cuña. La función esencial de este corte es proporcionar una cara libre adicional hacia donde la roca quebrada pueda desplazarse. Existen dos tipos de cuñas: en ángulo y en paralelo.

Cuñas en paralelo

Cuñas en paralelo: Se le conoce también como “cuña quemada” y está formada por barrenos en paralelo de igual o diferente diámetro, con la salvedad que algunos barrenos de la cuña no se cargan porque sirven de alivio a la roca fragmentada para empujarla durante la voladura. Para el funcionamiento correcto de estas cuñas, es necesario un alineamiento y espaciamiento adecuado entre los barrenos, con el fin de obtener el avance esperado por la voladura.

Secuencia y tiempo de disparo

En las cuñas en paralelo, los primeros barrenos en detonar deberán estar por lo general muy cerca de los barrenos vacíos. La roca fragmentada por los dos primeros barrenos en la cuña, son empujados hacia los barrenos sin carga, antes de ser proyectados hacia afuera. Cuando los retardos entre barrenos sucesivos se incrementan, se generan los siguientes beneficios:

- a. La cuña tiene una alta probabilidad de salir completa y el disparo tendrá también un avance completo.
- b. La rezaga tiene un alto y corto perfil.
- c. Los niveles de vibración son bajos ya que los barrenos tienen una cara libre efectiva.

Barrenos de producción

El espaciamiento de los barrenos de producción fuera del área de la cuña depende de muchos factores, que incluyen: el tipo de roca, diámetro del barreno, sección del frente y fragmentación requerida por el equipo de rezaga.

El patrón de barrenación está afectado por el diámetro de perforación y el tipo de roca. Se deberá desarrollar y seguir un patrón sistemático de perforación. En el caso de túneles no es muy común que se utilicen barrenos mayores a 45 mm; el diseño de bordos y espaciamientos aproximados son distintos para diferentes diámetros de perforación. Rocas más suaves o más duras requerirán menor o mayor número de barrenos.

Medidas contra el sobre-rompimiento

En rocas competentes pudiera no ser necesario el uso de técnicas especiales para obtener paredes y perfiles satisfactorios; sin embargo, el espaciamiento entre barrenos perimetrales y de alivio deberán ser reducidos.

Donde el terreno no es muy consistente, o el riesgo de caídos de roca puede ser muy importante, por lo que es esencial usar métodos de voladuras perimetral. El éxito de cada técnica es muy independiente de la exactitud de perforación, el tipo de roca y el explosivo utilizado.

Las voladuras perimetrales tienen importantes ventajas para proporcionar paredes y perfiles firmes y bien cortados, sobre todo cuando se utiliza un diseño adecuado de voladura para este fin.

En las voladuras perimetrales, el sobre-rompimiento o afectación de la roca son minimizadas por:

- Reducción de la energía del explosivo por metro en los barrenos perimetrales.
- Reducción del espaciamiento entre barrenos perimetrales, usualmente de $\frac{3}{4}$ " del espaciamiento normal.
- Asegurar que el desplazamiento de los barrenos de perímetro sea de 0.6 a 0.78 veces el bordo.
- Disparar los barrenos perimetrales en el último retardo, una vez que el resto de los barrenos hayan creado una cara libre efectiva.
- Cargar los barrenos de pared con cargas desacopladas o con productos de menor energía.

III.4 TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO TBM

Frente a la alta demanda en la excavación de obras subterráneas en roca durante las últimas décadas, la investigación relativa a las máquinas tuneladoras de sección completa (TBM, Tunnel Boring Machine), se ha desarrollado de manera muy importante logrando rendimientos que difícilmente otros métodos de excavación, permitirían lograr.

Desde los años cincuenta, el desarrollo de las máquinas TBM se ha enfocado, en un diseño capaz de excavar diferentes condiciones geológicas y tipos de roca, ya sea de buena o mala calidad (roca dura, roca sana y abrasiva), integrando en cada caso el tratamiento de las paredes del túnel atrás de la máquina.

La primera máquina TBM moderna fue diseñada y construida en 1956 con un diámetro de 3.28 m para ser usada en un túnel de drenaje. Actualmente las TBM son: de Frente Abierto, de Viga Principal, de Doble Escudo Single Shield TBM.

Según las definiciones indicadas anteriormente, una roca dura se caracteriza por una resistencia media a muy alta. Una máquina TBM de frente abierto típico para roca dura, consta de tres conjuntos estructurales principales, a saber:

Cabeza cortadora, provista de cortadores de disco de diferentes tipos: cortadores dobles de disco para la parte central de la cabeza cortadora, cortadores de un sólo disco y cortadores de contorno.

Soporte de la cabeza cortadora con las unidades de accionamiento y el cojinete principal: el apoyo de la cabeza cortadora y la viga principal constituyen la parte medular de una máquina TBM y proporcionan la base de sustentación de las otras partes.

Sistema de sujeción y sistema de empuje, son dos tipos diferentes, las máquinas de doble agarre con dos sistemas fijos de sujeción y las máquinas con una sólo fijación dotadas de empujadores delanteros deslizantes (zapatas de apoyo extensibles) adicionales. Estos últimos se mueven hacia adelante en forma simultánea con el proceso de avance y son los responsables de la estabilización de la cabeza cortadora.

TBM con escudo

Los TBM con escudo se usan cuando las condiciones de la masa de roca son menos favorables y se requieren medidas amplias para el soporte sistemático de la roca. Se pueden clasificar en escudos sencillos y escudos dobles (telescópicos). Con la cabeza al frente, la parte restante de estas máquinas está integrada a una estructura cilíndrica de acero. En la parte posterior protegida del escudo se puede colocar el revestimiento del túnel mediante la erección de dovelas de concreto.

El procedimiento típico mediante un TBM con escudo es el siguiente:

- Excavar la longitud correspondiente a una carrera (el TBM avanza hacia delante por el empuje de los gatos)
- Detener la máquina y retraer los gatos de avance
- Instalar los segmentos prefabricados de concreto en el espacio libre de la cola del escudo para formar un anillo completo de dovelas.
- Empujar con los gatos actuando contra el nuevo anillo de dovelas instalado e iniciar la excavación para la siguiente carrera.

VENTAJAS CONTRA DESVENTAJAS EN EQUIPOS TBM DE FRENTE ABIERTA

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Listo para funcionar óptimamente en la excavación de túneles con excelente rapidez de avance.	El proceso tuneleo implica una gran flexibilidad para adecuar el soporte del túnel y la logística a la situación real.
Soporte temporal de la roca a continuación de la demanda real local, con posibilidad de ser reforzada en etapas posteriores, en caso necesario.	Soporte temporal de la roca muy complejo (costoso) a pesar del revestimiento final.
Acceso más fácil al frente del túnel y a las paredes laterales para consolidación e inyectado o trabajos de sellado.	Tasas de avance relativamente bajas en condiciones de roca de mala calidad (en comparación con otros escudos).
Fácil control del comportamiento de la masa rocosa en combinación con mediciones geotécnicas; posibilidad de optimizar el diseño del revestimiento final.	No hay plena garantía de que la máquina TBM no se vaya a atorar en zonas falladas o debido a convergencias altas.
Posibilidad de diámetros variables de excavación.	Hay problemas de sujeción y de maniobrabilidad en terrenos pobres o en formaciones locales de roca muy blanda.
La inversión en el equipo tuneleo se puede prorratear entre varios proyectos de túneles, con una fácil rehabilitación de la TBM para diferentes diámetros de excavación.	

Tabla 4. Ventajas y desventajas en equipos TBM de frente abierta

VENTAJAS CONTRA DESVENTAJAS EN EQUIPOS TBM DE ESCUDO

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Excavación muy sistemática del túnel que permite una “curva de aprendizaje” de corta duración para que el contratista se familiarice.	Riesgo de que se atore el Escudo debido a convergencia o a efectos expansivos del túnel excavado (el riesgo es mayor durante suspensiones para mantenimiento o días feriados).
El comportamiento del túnel es casi independiente de un amplia gama de condiciones de la masa rocosa para lograr una rutina eficiente de trabajo de operación y logística de la TBM.	Posibilidades de maniobrabilidad limitadas para la máquina en terrenos muy blandos.
Enfoque seguro y sistemático para diseñar el revestimiento del túnel. No intervienen los tipos de soporte de roca ni las variaciones locales.	Enfoque conservador (costoso) para el diseño del soporte del túnel (dovelas): se relaciona con coberturas de masas de roca pobres y consecuentemente sobre diseño en tramos más favorables del túnel.
Condiciones de trabajo seguras para el personal.	Mayor capacitación para equipos tuneleo y para fabricación de dovelas de concreto.
	Menores posibilidades para el contratista de encontrar un nuevo proyecto para el Escudo excavador; cambios muy limitados y muy costosos del diámetro de la excavación; mayor amortización de la inversión.

Tabla 5. Ventajas y desventajas en equipos TBM de escudo

Los parámetros importantes a tomar en cuenta en un proyecto de excavación de túnel en roca mediante TBM son:

Parámetros geológicos:

- Resistencia de la masa rocosa y sus propiedades elásticas.
- Tipo de rocas atravesadas (echados de la roca).

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

- Grado de perforación y abrasividad de las rocas (análisis petrográfico).
- Clasificación de la masa rocosa según los sistemas estándares internacionales (RMR de Bieniawski, Q de Barton, RQD).
- Posibilidad de existencia de gas.

Parámetros relativos al túnel:

- Características geométricas del trazo: pendientes, radios de curvas, etc.
- Requerimientos de soporte: anclas, concreto lanzado, concreto colado, marcos metálicos o dovelas de concreto.
- Limitaciones de la presión del agua.

Parámetros necesarios para el diseño de la máquina TBM:

- Especificación del tipo, espaciamiento y perfil de los cortadores.
- Otras especificaciones relativas a la capacidad de los motores para asegurar el torque necesario para el avance de la máquina TBM.

COMPARATIVA DE MÉTODOS

Los métodos convencionales dominaron la técnica de tuneleo hasta la década de los ochenta y primera parte de los noventa. La mecanización de la excavación utilizando máquinas tuneladoras o topes (TBM), ha mantenido un constante aumento desde el principio de los ochenta.

Es interesante comparar ambos métodos usando criterios comunes a los dos en sus fases de construcción y operación. La siguiente tabla muestra esta comparación:

Fase	Criterio	Método Convencional	Máquina tuneladora
Construcción	Soporte del frente	Variable	Más seguro
	Espesor del revestimiento	Variable	Constante
	Seguridad del personal	Más baja	Más alta
	Higiene	Más baja	Más alta
	Grado de mecanización	Limitado	Alto
	Grado de estandarización	Condicional	Alto
	Riesgo a caídos	Alto	Bajo
	Tiempo de construcción (túnel corto)	Más corto	Más largo
	Tiempo de construcción (túnel largo)	Más largo	Más corto
	Costo de construcción (túnel corto)	Más bajo	Más alto
	Costo de construcción (túnel largo)	Más alto	Más bajo
Operacional	Sección del túnel	Variable	Constante
	Forma de la sección	Como se desea	Generalmente circular
	Grado de utilización de la sección	Generalmente alto	Generalmente bajo

Tabla 6. Comparativa entre métodos

III.5 TÉCNICAS CON EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE TUNELEO (NATM)

Introducción

Los recientes progresos realizados en la construcción de túneles y el desarrollo de las nuevas técnicas, se explican en gran parte por el hecho de que el ingeniero ha tomado conciencia en la apertura de una nueva excavación perturbando al mínimo las condiciones naturales en el suelo.

En el estado inicial, el terreno se encuentra en condiciones naturales. Este estado se encuentra notablemente transformando durante la excavación de un túnel que tiene por efecto descomprimir el terreno. Es por tanto necesario adoptar métodos de construcción que permitan evitar o limitar al máximo la descompresión del terreno en las proximidades de la excavación. Esta descompresión interna se acompaña, de una dilatación y de una caída irremediable de las características mecánicas del medio, al punto que en un terreno suelto debe tenerse mucho cuidado con la técnica de excavación.

Una primera limitación, aunque reducida, de las perturbaciones y el estado del medio natural, viene seguida por excavaciones sin explosivos por medio de la excavadora mecánica o máquina de

avance, o incluso, cuando el explosivo es necesario, para la aplicación de las nuevas técnicas de pre-corte.

Sin embargo, por medio de la sustentación es posible limitar al máximo la descompresión y sus efectos. De estas experiencias ha nacido el Método Austriaco en la construcción de túneles, debido al profesor austriaco Rabcewicz, y desarrollado en los países de lengua alemana desde hace más de una decena de años. Este método abandona la sustentación provisional, siempre problemática, utilizando desde la apertura de la excavación en sección parcial o total, el concreto lanzado como revestimiento definitivo. La acción del concreto lanzado, con una capa ligera e incrementada por un anclaje, da como resultado que el terreno sea apto para soportarse a sí mismo y eliminar los riesgos en el túnel.

Principio del Nuevo Método Austriaco

Para comprender bien los principios de este método, es conveniente compararlo con los métodos convencionales en todas las etapas de la ejecución de los trabajos.

Según las técnicas tradicionales, la excavación se hace con la sección más grande posible y guardando como objetivo la rentabilidad de la perforación, debiendo ser la sección mínima a arrancar compatible con la dimensión de los elementos de sustentación (cimbras metálicas). Por el contrario, éste método tiene como objetivo reducir al máximo los desórdenes en el terreno, trabajado en sección parcial muy débil, si es posible con excavaciones mecánicas o en caso contrario con un plan de tiro finamente calculado, franqueando unos problemas de rendimiento previstos.

Después de la excavación con el método convencional, el sostenimiento provisional es asegurado por cimbras metálicas, muy pesadas, sobredimensionadas, que no se adaptan en absoluto al perfil exterior. Cualesquiera que sean las técnicas adoptadas, se realiza así un sostenimiento rígido que no tiene nada más que contactos parciales con el macizo. A menudo, este contacto no se establece nada más que después de una deformación importante (convergencia) arrastrando la aparición de zonas de suelo duros. Este proceso tiene consecuencias múltiples muy desfavorables: por una parte, una disminución de la resistencia de los terrenos en las zonas tocadas por la descompresión y por otra la movilización de fuerzas concentradas muy elevadas en el punto de contacto entre el sostenimiento provisional y el macizo. Estas fuerzas concéntricas son a veces tan elevadas, en razón de su carácter de punta, que llevan un deterioro (que puede llegar hasta la rotura) de las cimbras metálicas. Utilizando el concreto lanzado, ligeramente armado con varillas soldadas, se realiza por el contrario un sostenimiento continuo, solidario con el terreno, adaptándose a las irregularidades del perfil y rellenado los vacíos y fisuras del macizo. A esto, se añade que el concreto lanzado es de colocación muy rápida sea cual sea la sección del túnel. Las primeras capas de concreto lanzado, desde su aplicación, aseguran una protección del macizo contra toda forma de alteración. El sostenimiento con concreto lanzado, incluso considerado como provisional, presenta incontestablemente una gran superioridad, tanto sobre el plano geotécnico, tecnológico, como económico, sobre el sostenimiento tradicional por cimbras metálicas o cerchas.

Las diferencias esenciales entre el procedimiento convencional y el Nuevo Método Austriaco aparecen quizá todavía más netamente en el estudio final de la construcción. La figura representa esquemáticamente las técnicas utilizadas en cada uno de ellos.

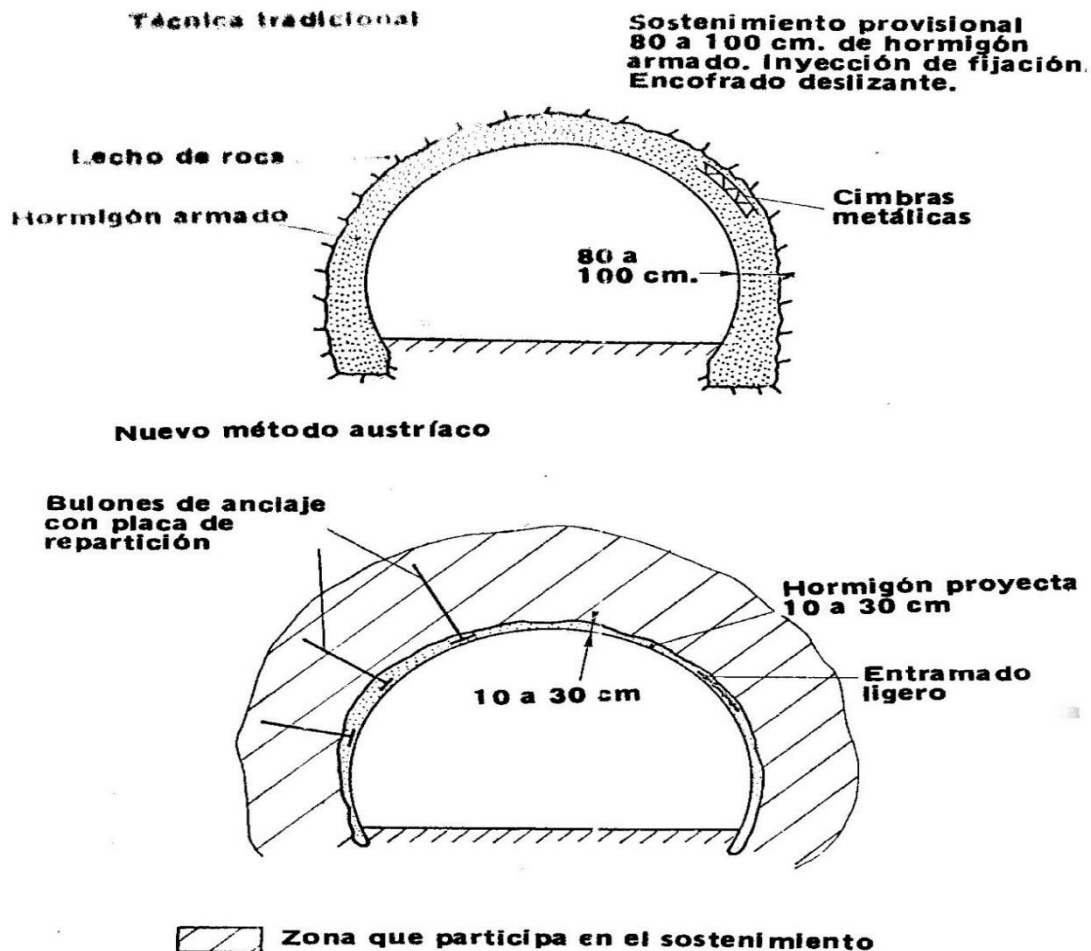


Fig. 15. Comparativa entre método tradicional y el Nuevo Método Austriaco

Las diferencias llevan en primer lugar a los tres primeros puntos.

- Técnicas de colocación en obra del sostenimiento.
- Tiempo de colocación en obras del sostenimiento.
- Técnicas de procedimiento constructivo del sostenimiento

El último punto es, en gran parte, resultado de las dos anteriores. La sustentación tradicional está constituida por una bóveda de concreto encofrado, colocado según la abertura de la excavación en sección total. En ciertos casos, el sostenimiento provisional (marcos o cimbras metálicas) es dejado en obra y juega un papel de armadura para el túnel. A pesar de la inyección de relleno, es siempre

difícil tener una buena unión entre la bóveda y el macizo, por lo que se llegan a alcanzar espesores hasta de 100 cm, por lo que entonces, el revestimiento final del túnel llegue a ser muy rígido y pesado, e implica la necesidad de encofrados deslizantes importantes que pueden paralizar la obra, lo que excluye en general la posibilidad de ejecutar el sostenimiento definitivo e inmediatamente después de la excavación.

La bóveda tradicional de concreto colada con cimbra constituye, por tanto, una sustentación:

- De mucho tiempo para ser puesta en operación.
- Demasiado rígida para las exigencias del terreno y del proyecto.
- No está ligada al macizo, por lo que resulta impráctica.

Por lo antes mencionado, el Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles se caracteriza esencialmente por la utilización del concreto lanzado para el revestimiento definitivo, una vez que la excavación, en sección parcial o total es realizada con el fin de bloquear en cierto modo el macizo; es decir, de limitar al máximo el colapso del material y con ello mejorar la resistencia mecánica del terreno y haciéndole capaz de sostenerse por sí mismo.

El concreto lanzado protege el terreno desde su colocación contra todos los agentes externos de intemperismo. Su comportamiento y la adherencia del revestimiento al macizo quedan asegurados por la colocación de una red de anclajes de poca longitud, (de 3 a 6 metros para los túneles de sección inferior a los 100 m²). Las fuerzas de anclaje son generalmente inferiores a las 20 ton. La presión de anclaje está determinada por el diseño. El espesor del revestimiento terminado se encuentra generalmente entre 10 y 30 cm. Para una sección útil dada de túnel (abertura libre), la sección del revestimiento tradicional y de los rellenos (por inyección) pueden sobrepasar, según Müller, el 50 % de la sección útil, mientras que por el Nuevo Método Austriaco, esta misma sección alcanza raramente el 10% de la misma sección útil y permite hacer una reducción en costos en comparación con otros métodos de tuneleo.

El concreto lanzado, el armado y el anclado al macizo, contribuyen a dar al terreno en las proximidades de la excavación, una presión de confinamiento suficiente como para aumentar considerablemente su resistencia mecánica. El conjunto constituido por el revestimiento y anclajes permite al terreno participe, en una gran parte, en el sostenimiento del medio, lo cual da como resultado una bóveda monolítica entre el terreno y la estructura del túnel. El terreno, ayuda en cierto modo por el revestimiento exterior y se vuelve auto-portante. Por su propia naturaleza, la bóveda así realizada conserva cierta flexibilidad que le permite, adaptarse mucho mejor a las modificaciones del medio debido a la excavación y a la redistribución de las contracciones. Las deformaciones de las secciones iniciales son frecuentemente asimétricas en los terrenos anisótropos. Tal comportamiento no puede intervenir en el caso de una bóveda rígida (método convencional), que se encuentra a menudo sobre-dimensionada en ciertas zonas y demasiado solicitada, o incluso sub-dimensionada en otras.

Para explicar los dos procesos de sostenimiento por el método tradicional y la nueva técnica austriaca, es cómodo razonar sobre el diagrama de resistencias de Mohr. La puesta en obra de las técnicas tradicionales se acompaña generalmente siempre de una descompresión, que lleva consigo una dilatación del macizo y una dislocación sobre todo localizado en la corona. Esta dislocación, incluso cuando es insignificante, lleva consigo una disminución de las resistencias del terreno. En tales circunstancias, la resistencia límite se encuentra ampliamente rebasada (el círculo de contracciones corta a la curva intrínseca 1), aparecen entonces unos desórdenes y roturas más o menos importantes en el macizo.

Con la utilización del concreto lanzado colocado en los minutos que siguen a la excavación, la descompresión del macizo no tiene tiempo de intervenir (la sección de arranque total o parcial, será elegida de manera que este imperativo sea respetado).

La primera capa de concreto lanzado bloquea al macizo en superficie, une los bloques rocosos, rellena las fisuras y grietas, mejorando así la cohesión del macizo y aportando al mismo tiempo un ligero confinamiento. Este confinamiento juega un papel muy importante. Sobre el diagrama de resistencia de Mohr, tiene por tanto una evolución esquematizada sobre el diagrama opuesto a la que interviene en el caso del método tradicional. Se beneficia de una mejora de las características intrínsecas del material y además de una transferencia del círculo de contracciones en el sentido de las contracciones normales positivas, en razón de la dirección P (confinamiento) aportada por el revestimiento continuo del concreto lanzado. Esta reacción se encuentra muy favorablemente amplificada por la puesta bajo tensión de los anclajes. Así, por el Nuevo Método Austriaco, el material no se deteriora mecánicamente sino que al contrario, se mejora y por consecuencia los riesgos de desórdenes del diagrama de Mohr roturas se encuentran alejados. Las dimensiones del revestimiento deben ser tales que los círculos que representan los estados de contracción, alrededor del túnel no se encuentran donde las curvas intrínsecas del material.

En el comportamiento del macizo a través del cual se abre una excavación, tres fenómenos son de primera importancia a saber:

1. La influencia de la descompresión y de la dilatación del macizo sobre la resistencia mecánica.
2. La influencia del grado de funcionamiento $n=3/1$ sobre la resistencia.

Es necesario evitar que el terreno trabaje en tensión (en corona) o en compresión uniaxial (en pie derecho). La resistencia de los medios naturales, a menudo fisurados, dependen estrechamente del grado de confinamiento y de la orientación del tensor de contracción.

3. La influencia del “factor tiempo” sobre la descompresión del macizo y sus consecuencias.

El factor tiempo juega un papel muy importante en el proceso de descompresión, seguido de los fenómenos de dilatación y de dislocación. El Nuevo Método Austriaco, tiene una mayor probabilidad de éxito, ya que se requieren las cosas más rápido.

A estos tres puntos corresponden evidentemente tres imperativos fundamentales a respetar cuando se trata de la construcción de túneles:

- 1) Evitar o limitar el colapso o dislocación del macizo en las cercanías de la excavación.
- 2) Aportar en cuanto sea posible a la pared de la excavación un confinamiento continuo, para neutralizar los estados de contracciones uniaxiales.
- 3) Utilizar lo mejor posible el tiempo disponible antes de que el macizo se deforme.

Está claro que ninguna de éstas tres condiciones se respeta en el método convencional. Esto tiene por consecuencia hacer invertir unas sobrecargas anormalmente amplificada en razón de las consecuencias de la descompresión. En función del problema planteado y del fin a alcanzar, el Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles permite:

- Sostenimiento del túnel inmediatamente después de la excavación.
- Constituye un revestimiento definitivo.
- Puede intervenir en sección total o parcial, incluso de bajas dimensiones, para los terrenos muy difíciles o los túneles de gran sección.
- Es flexible y se adapta por ello al terreno.
- Es perfectamente solidario al terreno y forma con él una bóveda monolítica.
- Mejora las características mecánicas del medio natural.
- Aporta una presión radial de confinamiento estabilizadora en el macizo.

Sobre el plano geotécnico, la elaboración del proyecto de ejecución necesita en contrapartida:

- Un buen conocimiento del medio y de las características mecánicas de los materiales (en obra y en su evolución)
- Una evaluación del estado de las contracciones en el macizo alrededor de la cavidad excavada, en sección parcial o total.
- Un control muy preciso de las deformaciones “in situ” en el estudio de la ejecución de los trabajos en vista a comprender el sostenimiento a las necesidades, jugando sobre los parámetros variables (espesor de concreto lanzado, tratamientos del terreno).

Estos tres puntos definen perfectamente la naturaleza y la importancia de los estudios geológicos y geotécnicos (observaciones sobre el terreno, ensayos “in situ” y en laboratorio, análisis del terreno en software especializados), que deben preverse para poner en obra el Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles.

CAPÍTULO IV. PROYECTOS SUBTERRÁNEOS

IV.1 EL FUTURO DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS

Hoy en día se estima que se han construido en el país más de 500 km de túneles, de todos tipos y secciones, cronológicamente, aproximadamente más del 70 % en los últimos 60 años. La longitud mencionada incluye túneles para drenaje, agua potable, sistemas de transporte, hidroeléctricas, mineros, para riego, ferrocarrileros y carreteros.

Sin embargo, la capital de la República afronta problemas de magnitud espectacular, para contribuir a resolverlos, ha sido necesario construir más de 200 km de túneles en el Valle de México, que representa casi el 50 % de todos los túneles excavados en toda la historia de nuestro país.

Por un lado, no puede olvidarse el gigante que representa el área metropolitana de la Ciudad de México, que seguirá necesitando más túneles para distribución de agua potable y requerirá completar el sistema de Drenaje Profundo. Por lo que se refiere al Metro, el Plan Maestro contempla una ampliación de 200 km, donde seguramente se requerirán túneles. En relación al agua potable, será necesario traer agua de otras fuentes, por lo que también requerirá largos túneles. Por otra parte, no hay que olvidar que a nivel mundial se están demoliendo los “segundos pisos”, dadas las molestias de ruido que afectan a personas de edificios cercanos, a que en su parte inferior se han creado centros de drogadicción, así como otro tipo de molestias y se están substituyendo por túneles. Así mismo, también en otros países se han dado a la tarea de respetar el medio ambiente, creando áreas verdes en superficie y haciendo uso del espacio subterráneo para alojar no sólo túneles para vialidades, sino construyendo otro tipo de instalaciones.

Las ciudades de Monterrey, Guadalajara, Hermosillo, Puebla, Querétaro, Acapulco, por citar algunas, requerirán grandes proyectos para resolver sus problemas de drenaje, agua potable, transporte colectivo, y la construcción de túneles será indispensable.

En relación a las plantas hidroeléctricas, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), tiene pensado agotar todos los lugares propicios y se estima que se construirán más centrales hidroeléctricas, que requerirán túneles. Por lo que se refiere a la Comisión Nacional del Agua, se piensa aumentar considerablemente las zonas de riego, lo que traerá como consecuencia la construcción de presas de almacenamiento y derivación, y consecuentemente la necesidad de construir túneles. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes tiene ambiciosos planes para aumentar las redes ferroviarias, autopistas y carreteras federales, por lo que requerirá también de gran cantidad de túneles.

Conservadoramente, es probable que para el año 2030, México tenga el doble de kilómetros construidos de túneles respecto a los que tiene hoy en día. Este reto es formidable, sin embargo, es

totalmente factible ejecutarlo con ingeniería, tecnología extranjera e ingeniería mexicana, siempre utilizando la experiencia nacional y extranjera.

Actualmente existen Asociaciones, Sociedades, Universidades y empresas comprometidas con la importancia de la enseñanza, divulgación y capacitación en relación a las obras subterráneas, por lo que son el futuro en el desarrollo de este tipo de obras.

IV.2 TÚNELES DE UNIDADES PREFABRICADAS

Un túnel de este tipo es fundamentalmente un paso subterráneo construido con elementos prefabricados, sumergidos y elementos en una zanja preparada. También se usa el término “tubo inmerso”, y los elementos de construcción prefabricados se conocen como “unidades”, los cuales unidos en todas sus piezas forman un todo integrado.

Las técnicas de construcción tienen muy poco en común con las técnicas de los túneles excavados con máquinas; no obstante, la estructura terminada debe cumplir con los mismos requisitos fundamentales para la sección transversal del tráfico, pendientes, alineamiento, ventilación, iluminación e integración con el medio ambiente. Las técnicas especiales empleadas se realizan con la fabricación de estructuras de acero o de concreto reforzado, el manejo de las unidades flotantes en una corriente de agua con un control preciso de los patrones de flotación y de los esfuerzos, y el establecimiento de la uniformidad del soporte y juntas impermeables.

La mayoría de los túneles de unidades prefabricadas se han construido bajo aguas de esteros y bajo los canales de navegación, aunque el método se utiliza debajo de los ríos y canales, en puertos y a corta distancia de la costa.

Cuando el diámetro del túnel es pequeño, se puede combinar con la técnica de tendido de tuberías. Este tipo de túneles por lo general están por debajo de los niveles de los estratos, sin embargo, si sus condiciones se encuentran parcialmente o por encima del nivel del lecho del cuerpo de agua, con un terraplén de protección que los cubra, será suficiente para la ejecución de los trabajos del túnel, siempre y cuando no sea un riesgo para la navegación y no sea de por sí vulnerable.

A veces hay más exigencias en la construcción de túneles prefabricados para los cruces bajo el agua en comparación con los túneles excavados, sin embargo, en muchos casos se ha visto que son el mejor método para la construcción de túneles a utilizar en este tipo de proyectos. En particular hay dos aspectos importantes en los que este sistema frecuentemente tiene ventajas sustanciales, sobre los demás; requieren una profundidad más somera y es menor la demanda de recursos especializados.

Profundidad del túnel

La profundidad de un túnel por debajo de una vía acuática navegable está determinada por: 1) la profundidad del canal y el dragado que se proyecte a una mayor profundidad; 2) profundidad de la

cubierta protectora sobre la corona del túnel; 3) espesor del techo; 4) altura libre al techo encima de la superficie de la vía u otro nivel de referencia en cuanto al diseño; 5) profundidad de la construcción por debajo del nivel de la vía.

1. La profundidad especificada del canal para navegación es la misma, ya sea que se trate de un túnel perforado o prefabricado, se define como la profundidad a baja marea y se aplica en todo el ancho del canal accesible a la navegación.
2. El túnel prefabricado tiene la ventaja de que no es necesario que la cubierta de la estructura terminada no sobrepase 1.5 m aproximadamente, lo cual da protección a las anclas de los buques. Es importante trabajar con seguridad en el frente, ya que una profundidad inadecuada, puede alterar el programa de obra y tener altos costos (se requiere de un buen análisis de riesgos). La naturaleza del estrato no es muy significativa en este contexto, a menos que exista el riesgo de socavación, ya que es posible depositar el material adecuado para la protección de la clave, como puede ser material de relleno, concreto colado bajo agua, tetrápodos, todas estas posibles protecciones deben ser consideradas en el diseño de la estructura que los soportará, ya que influyen de manera muy significativa en el diseño del túnel y pueden aumentar el costo del mismo.
3. El espesor del techo del túnel es una parte fundamental, ya que como se mencionó anteriormente, es la losa superior la que debe cargar con la protección del túnel, la cual debe estar diseñada para soportar las cargas de protección al túnel y cualquier otro efecto ante cargas adicionales.
4. En el caso de un túnel subacuático perforado, es casi inevitable el uso de una sección circular; sin embargo, este tipo de sección aporta espacio suficiente para la ventilación dentro del mismo, pero por otro lado, reduce la altura del gálibo para el tránsito que circula por él. En otros lugares del mundo es común encontrar este tipo de estructuras de forma rectangular, las cuales se diseñan para aprovechar al máximo su altura libre.
5. De modo similar, la profundidad de la plantilla abajo del nivel de una carretera es mayor cuando es circular, pero ésta no afecta el nivel de la carretera.

Por consiguiente, estos tres factores: profundidad de dragado, recubrimiento y estructura hasta el nivel de la carretera, fijan el nivel al que llegará el túnel y normalmente presentan una ventaja de varios metros a favor del túnel prefabricado, lo cual permite a su vez que las pendientes de acceso desde los portales sean más cortas, con una reducción en la longitud de la construcción de un túnel o que se puedan hacer con menos pendientes.

Recursos

Las diferentes demandas de los recursos para los métodos alternativos finalmente se tendrán que comparar en términos de costo y tiempo.

En el caso de los túneles prefabricados, casi todo el trabajo de construcción se hace a cielo abierto, en astilleros o en diques secos, con algunas limitaciones en cuanto a la velocidad de avance; las

otras operaciones pueden avanzar simultáneamente. La mano de obra necesaria se puede hallar en un campo más amplio y menos especializado que en un túnel perforado.

En el esquema de trabajo para un túnel prefabricado a veces es necesario considerar un dique seco adecuado, y también el diseño y fabricación de equipos flotantes especializados o grúas de torre con equipo de control para colocar y ensamblar las unidades. Para un solo túnel de poca longitud, el tiempo y el costo de equipo especial podrían ser indebidamente onerosos, pero en el caso de túneles más largos y túneles sucesivos que pasan por la misma región, se podría volver a usar parte de estas instalaciones e incluso el equipo y maquinaria pueden ser utilizados en proyectos de este tipo. El gravamen de los intereses por el costo extra de las instalaciones que no sean inmediatamente esenciales, se deberá oponer a esto.

Secuencia de operaciones

En la construcción, las operaciones principales son las siguientes:

1. Fabricación inicial
2. Preparación de la zanja
3. Habilitación, flotación y hundimiento
4. Ensamble, colocación sobre el lecho y relleno

El contenido y la importancia relativa de las diferentes operaciones cambian de acuerdo al tamaño y forma de la primera protección, que puede ser de acero o de concreto reforzado y de forma circular o rectangular. Son muy marcados los procedimientos constructivos cuando se proyecta un cilindro de acero o una estructura de concreto, sin embargo, los principios generales son los mismos y tienen mucho en común. Las técnicas particulares de ensamblaje y de obra terminada, se adoptan hoy en día según se considere más apropiado para un sitio determinado.

Túneles de concreto rectangulares

El peso total de la estructura terminada, por longitud unitaria, será aproximadamente proporcional a la capacidad de tráfico, porque está controlada de acuerdo a las demandas de flotación. No obstante, una unidad de acero cilíndrica constituye menos del 10 % del peso final y es en sí estructuralmente rígida e impermeable; sin embargo, el concreto proporciona rigidez adicional y el lastre necesario, además de proteger el cilindro de acero. En las unidades de concreto reforzado, ya sean circulares o rectangulares, es necesario que sea colocada la mayor parte del volumen total del concreto antes de que se pueda mover a su lugar de colocación final, ya que resultaría más complicado si se coloca después.

El segundo aspecto es la impermeabilidad. En este caso se han desarrollado diferentes técnicas, aunque la más común son las membranas de placa de acero soldadas. El tercer aspecto importante es proporcionar un apoyo uniforme debajo de la amplia base plana. Una parte fundamental de este tipo de túneles son las juntas entre elementos, para lo cual se han desarrollado juntas de hule comprimido, de modo que por lo general no requieren mucha atención por los buzos.

Para la fabricación de estos elementos se requiere una dársena para el colado del concreto o un dique seco para poder construir las unidades hasta llegar a la etapa de flotación. Es usual excavar una dársena especial para el colado en la que todas las unidades o la mitad de ellas puedan ser construidas, antes de que se hayan echado a flotar. Cada unidad deberá tener una cimentación firme y es probable que sea necesario el abatimiento del nivel freático para mantener seco el dique e impedir el empuje ascendente desde el fondo.

La longitud de las unidades será la máxima apropiada para su manejo en el dique y en el agua. Por ello en el caso de unidades de dos y cuatro carriles a una profundidad moderada, es relativamente factible cumplir con las condiciones de la sección transversal de concreto reforzado, ya que cumplir con un claro de tres y a profundidades mayores de 15 m por debajo de los terraplenes, sería necesario un preesfuerzo transversal, porque el peralte estructural no se puede aumentar sin perder su capacidad de flotación.

La capacidad de flotación es de mucha importancia, ya que proporciona un factor de seguridad contra el esfuerzo de ascenso vertical. Estos requisitos determinan justamente las proporciones de la sección transversal del túnel en términos de: a) espacio libre, b) espesor del muro, techo y piso, c) lastre de concreto.

En la práctica, es normal que se cuele primero toda la losa de la base por tramos, con dispositivos verticales que evitan el paso del agua y que sellan la junta de construcción necesaria entre la base y el muro. Esta se cuela en secciones de 15 a 25 m para reducir las grietas por contracción, utilizando de nuevo los dispositivos de sello a través de las juntas de construcción. Cuando no se tienen las membranas, cada sección de concreto se enfría artificialmente durante el proceso de fraguado con el fin de extraer el calor de hidratación y hacer mínimo el agrietamiento por contracción, causado por el diferencial de temperaturas entre concretos.

Equipamiento y hundimiento

Cuando se hayan terminado los elementos en el dique seco, se equipan con pantallas en los extremos y, si es conveniente, con torres de alineamiento y con tiros temporales de acceso, antes de proceder al llenado del dique. Generalmente se tienen tanques de agua para el lastre en cada unidad, para poder controlar la flotación por medio de bombeo. En muchos casos se dejan las unidades total o parcialmente sumergidas dentro del dique de construcción hasta que llegue el momento de su colocación y se echen a flotar una por una hasta que finalmente se acondicionan para su hundimiento. Los pontones son el equipo más usual para la regulación del hundimiento, pero se pueden usar grúas flotantes o plataformas especiales provistas de gatos.

Los procedimientos para el hundimiento son muy semejantes a los del cilindro de acero: aunque el peso bruto puede ser de tres a cuatro veces mayor, el peso neto se mantiene bastante bajo, pero se deberán observar muy cuidadosamente las cargas dinámicas e hidrodinámicas y mantenerlas bajo control. El movimiento de la unidad no se puede cambiar con rapidez.

Para poder hacer estimaciones sobre la energía necesaria para el remolque, anclaje y predecir el comportamiento de las unidades en las corrientes, se recomienda hacer pruebas de los modelos en un laboratorio hidráulico, bajo las condiciones lo más reales posibles.

La presión neta producida sobre el terreno por estos túneles es tan baja que, de acuerdo a los modelos realizados en software, los asentamientos suelen ser poco significativos, aunque en limos blandos podría haber un asentamiento general apreciable. En algunos casos el proyectista responsable de la obra ha propuesto pilotes como cimentación final, y apoyos adecuados por inyección de lechada con selladores entre las cabezas de los pilotes y la viga de apoyo.

Ensamblaje y relleno

Al unir dos unidades se utiliza un empaque de hule para la junta, lo que constituye el sello inicial contra el agua, permitiendo realizar los trabajos internamente dentro del túnel adecuadamente, sin problemas con el agua. El sello de hule, se fija con pernos en la pared del elemento y es ensamblado con la contraparte del elemento subsecuente, con un segundo hule secundario.

El agua encerrada, que se encuentra a una presión de acuerdo a la profundidad, se extrae o se bombea, liberando la presión y desequilibrando la presión sobre la pantalla del extremo más lejano. Esto hace que las unidades tengan un contacto más estrecho en la junta y se comprime el bloque principal de hule duro. Si es necesario, se pueden instalar topes límite de acero para evitar un excesivo movimiento a compresión.

Enseguida se puede soldar una placa de acero de lado a lado dentro de la protección del empaque de hule y se pueden retirar las pantallas. Se termina el revestimiento de concreto entre las dos unidades; los detalles dependen del grado y naturaleza de las deflexiones futuras que se vayan a tener.

Topografía

La topografía más favorable para la selección de un túnel prefabricado será cuando el cruce del río es amplio y somero, con un fondo arenoso y con cama y márgenes de una suave pendiente y que además no tenga grandes corrientes. La experiencia en túneles de este tipo no ha sobrepasado las profundidades de 30 m, por lo que para hacer la elección entre un puente y un túnel para un nuevo cruce, primero se tiene que hacer un estudio detallado, que implica probablemente el trazo del perfil, relación costo-beneficio del proyecto, detalles técnicos, aspectos socio culturales, por sólo mencionar algunos.

Sin embargo, suponiendo que se proponga un túnel, se necesita evaluar las ventajas relativas de los túneles perforados y prefabricados para el caso en particular, como ya se mencionó anteriormente cuales son las ventajas de un túnel prefabricado, será necesario examinar aún más las dificultades especiales que este tipo de obras pudiera tener. Por lo general, se puede solucionar todas estas dificultades, pero si varios factores resultan desfavorables, el costo podría ser excesivo y tomar otra alternativa para el proyecto.

IV.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS

Las obras subterráneas hoy en día son sin duda una parte fundamental en las extensas ramas de la construcción de instalaciones subterráneas, energía hidráulica, carreteras, propósitos militares, etc. Por ello es comprensible que los métodos técnicos también se desarrollen de un modo especialmente brioso, en pos de la obtención de una mayor rentabilidad y seguridad. Sin embargo, el progreso técnico no debe ser solamente atribuido al desarrollo de los métodos de construcción, sino que también debe tener en cuenta los nuevos conocimientos sobre la mecánica de suelos y de rocas, ya que su estudio en los proyectos es indispensable en todos los aspectos.

Bases de un proyecto

Es bien conocido que cuanto mayor sea la obra subterránea, mayores son los riesgos. Este tipo de obras no sólo dependen del propósito para el que servirán, sino que también de modo muy determinante, del subsuelo. Como ya se mencionó anteriormente, los estudios previos al desarrollo de un proyecto de esta magnitud, requieren vital atención e importancia, ya que son la parte medular quizá de todo el proyecto. Actualmente existen varios programas y software que ayudan en este tipo de estudios previos y que agilizan el estado de análisis de los mismos.

Técnicas alternas de excavación

Métodos tradicionales

El método convencional para la excavación mediante explosivos, compite cada vez menos con los nuevos métodos mecanizados de excavación con ayuda de máquinas fresadoras. Los equipos de perforación permiten en una roca, por lo menos temporalmente estable, perforar con perforadoras conducidas sobre rieles todo el corte del túnel en una sección de hasta unos 80 metros cuadrados. Para un túnel con una sección mayor, no pudiendo ser excavados en sección entera, se emplea el método de excavación de soporte o también llamado “Método Belga”.

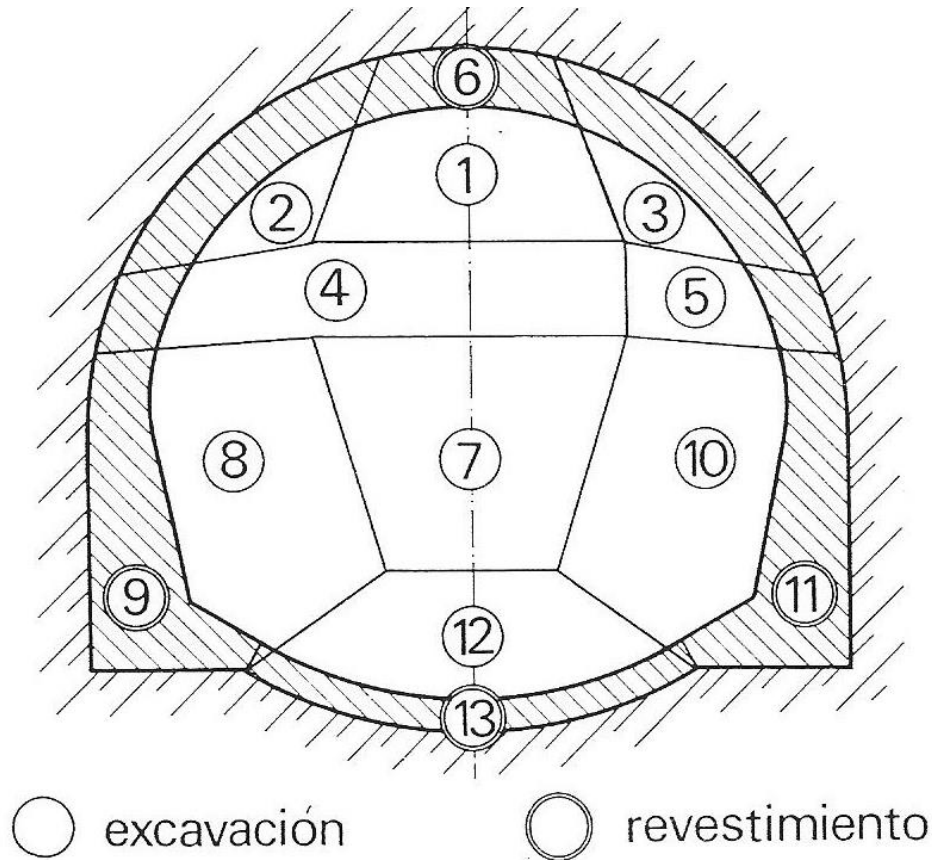


Fig. 16. Método Belga

Con este procedimiento, en primer lugar se ensancha la parte superior a partir de una galería de clave hacia ambos lados avanzando en franjas; luego de abrir la parte superior, se va revistiendo la bóveda. Después se excava la parte inferior del túnel y para ello se emplean distintos métodos o como lo indica la fig 16. Después de revestir la bóveda, se excava la parte central a excepción de las franjas de roca lateral que sirven de soporte para la bóveda. Abierta la parte central se procede a excavar la sección izquierda o la derecha en dos fases, primero la parte que constituye el hueco del túnel y posteriormente la franja que sostiene la parte superior de la bóveda para poder sostenerla lo más pronto posible. Una vez realizada esta parte, se hace lo mismo con el lado contrario y por último se excava la parte inferior, que se conoce como la cubeta del túnel.

Otro de las técnicas es la llamada “Método Alemán”, en el cual se comienza por la excavación de las franjas laterales siguiendo con la parte superior. Este método parece ser lo contrario al método Belga, ya que su excavación requiere de dejar la parte central del túnel como un soporte para las anteriores, es decir, excavar inicialmente el lado izquierdo o derecho, cualquiera de los dos, hasta tener el revestimiento final del túnel, posteriormente excavar la parte superior del túnel y sus extremos, sin llegar hasta la parte donde llevará el revestimiento final, para realizar la excavación de toda la parte superior en una sola operación y dejar hasta el último la excavación de la parte central del túnel (ver fig 17).

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

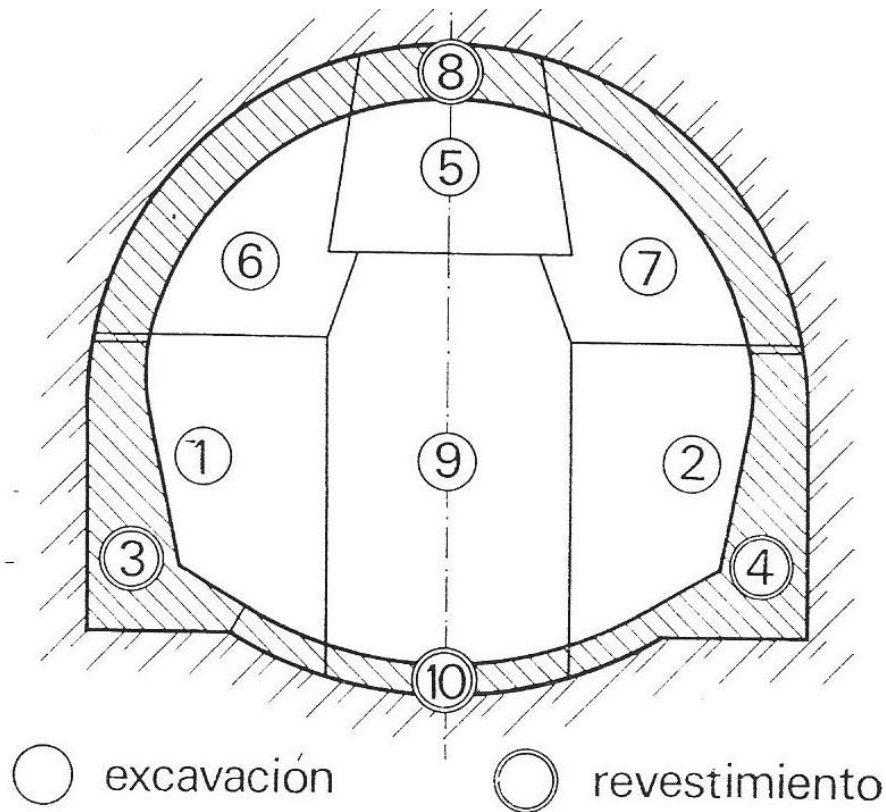


Fig. 17. Método Alemán

En el caso de túneles con mayor área de sección transversal, y que requieren un perfil exacto, existe otra técnica denominada “Método de Pre-fraccionamiento”, para el cual a lo largo del perfil se perforan los barrenos uno al lado del otro y se hacen volar con precaución mediante un explosivo diluido con la ayuda de material sintético espumado. Gracias al corte separador que ello provoca en la estructura rocosa, cuando se produce la voladura principal, la onda expansiva no se propaga a la roca circundante. La zona perturbada por la explosión que normalmente alcanza una profundidad entre 1.0 y 1.5 m, se reduce bastante con este sistema. De gran importancia son los detonadores eléctricos de milisegundos que disminuyen las sacudidas por medio de pequeñas diferencias de tiempo entre explosión y explosión, es decir, ofrecen voladuras más suaves y al mismo tiempo desmenuzan mejor la roca.

Excavaciones mecanizadas

La escasez de mano de obra en general, y particularmente en los sectores profesionales sometidos a los mayores esfuerzos corporales, así como también aspectos salariales, ha obligado a tener una mejora considerable en el área de las nuevas técnicas para estos trabajos mecanizando la excavación día con día, así como también evitar ruidos y vibraciones en trabajos realizados en zonas habitadas.

Máquinas fresadoras para la sección entera

Las máquinas fresadoras de galerías y túneles que perforan toda la sección de la roca, se clasifican en:

- Máquinas con cinceles rodantes montados en la cabeza.
- Máquinas con cabezales porta-cuchillas.



Fig.18. Máquinas con cinceles rodantes montados en la cabeza

Para el sistema de cinceles rodantes se aprieta con gran fuerza, mediante la parte frontal de la máquina, una serie de cinceles contra la superficie de la roca, de modo que la zona de contacto esté sometida a una presión que sobrepase la resistencia de la roca, logrando romper su estructura. Haciendo rodar los cinceles por encima de la superficie, se obtiene un proceso cincelar continuo. Ello exige una gran presión en el sentido de avance.

El cincel rodante es más adecuado para rocas duras (sanas). Según el tipo de roca se puede elegir entre tres clases de cinceles: de botones, dentado o de platillo.

El sistema con cabezales porta-cuchillas trabaja con cinceles fresadores montados alrededor de discos rotatorios, mientras que para el sistema con cinceles rodantes las principales fuerzas actúan en el sentido del avance, necesitando así la fuerza en el sentido del momento de rotación.

Ambos métodos, se encuentran en periodo de desarrollo tecnológico, por lo que aún no es posible definir cual resulta más eficiente ante una roca dura o blanda. Como se ha mencionado, los grandes diámetros no se perforan solamente en una excavación total; hay procedimientos en los que se requiere abrir galerías piloto de 1/3 del diámetro final. Con este tipo de máquinas no

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

solamente se pueden obtener perfiles circulares, sino que con las fresadoras porta-cuchillas, haciendo oscilar los cabezales fresadores, se pueden perforar perfiles rectangulares, siendo una ventaja especialmente para pequeñas galerías transitables.

Galerías inclinadas

Entre los tipos de máquinas citadas para el avance en galerías inclinadas (ver fig 19), se menciona el método Alimak que no es un método de excavación propiamente mecanizado, pero que, se sirve de dispositivos mecánicos para facilitar considerablemente la excavación convencional. Se adapta a toda clase de roca que sea temporalmente estable. La excavación se efectúa de abajo hacia arriba, en general la sección no puede sobrepasar los 4 m² de área en sección transversal; las secciones mayores se ensanchan de arriba hacia abajo. Una jaula para mineros y una plataforma de trabajo colocada encima son elevadas y descendidas eléctricamente o por aire comprimido mediante una barra de guía fijada a la roca por medio de pernos de anclaje. En la barra de guía se encuentran las condiciones para aire y agua y, en su caso, los cables eléctricos.

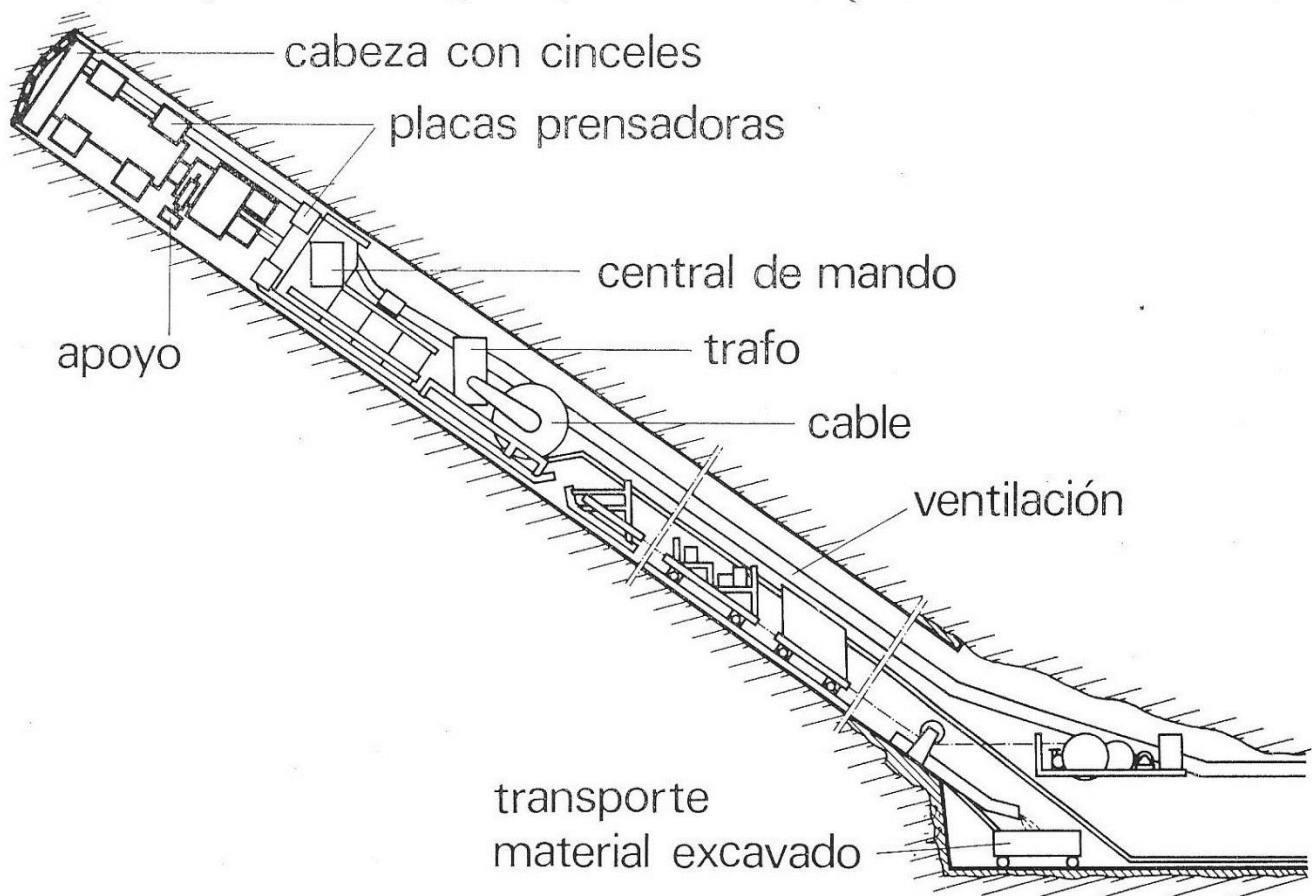


Fig. 19. Galerías inclinadas

Después de la subida del personal por medio de una jaula hasta el frente de ataque, éstos proceden a la perforación de la roca desde la plataforma y carga de barrenos con cartuchos. A continuación, tanto la jaula como la plataforma, se retiran a una galería horizontal, procediéndose acto seguido a la voladura. Después de ventilar y regar minuciosamente el boquete provocado por la explosión, el personal sube de nuevo y prolonga la barra de guía en el nuevo sector de la excavación.

Como resumen de las características generales de la excavación mecanizada se puede concluir que:

El avance sin voladuras no altera la resistencia natural de la roca alrededor de la excavación. Por lo tanto, se puede contar con una duración de la estabilidad de la roca hasta su revestimiento, superior a lo que se puede esperar utilizando el procedimiento convencional con explosivos.

La excavación se ejecuta de modo totalmente conforme al perfil deseado, lo que aumenta la rentabilidad del procedimiento mecanizado, aprovechando las jornadas completas de trabajo y manteniendo el equipo en buenas condiciones, para evitar posibles fallas y paros innecesarios.

En trazos rectos se controla bien la dirección de avance con un rayo Laser como guía.

Es importante mencionar que también existen desventajas en este tipo de métodos, ya que una excavación mecanizada depende exclusivamente del funcionamiento de una máquina con un alto costo. Esta tiene que ofrecer pues, una garantía absoluta de seguridad de servicio, ya que debe estar incluido en algún contrato de tantos que hay en el proyecto.

El diámetro de excavación de una máquina determinada, solamente puede ser variado dentro de ciertos límites. Los rendimientos de cada máquina tuneladora dependen de muchos factores que intervienen en todo el proyecto; sin embargo, es bien conocido el rendimiento que pueden tener cada una de estas máquinas, siempre bajo las condiciones que los fabricantes recomiendan.

El tema de rendimiento y costos de operación van muy ligados, por lo que el contratista y el cliente deben tener un contrato adicional, donde se estipule un precio global por la instalación de la máquina y un precio por metro cúbico excavado. El precio de amortización de las máquinas fresadoras de grandes túneles está fijado en unos 10 km de avance. Por ello algunos especialistas consideran que es más barata la excavación de un túnel con este tipo de máquinas que con el método convencional, ya que puede elevar su costo hasta más de doble.

Problemas especiales durante la construcción en las obras subterráneas

El transporte y depósito del material excavado, resulta ser uno de los problemas más comunes; por lo que se refiere al transporte. Los trenes con vagonetas sobre rieles o los vehículos sobre neumáticos, ofrecen ventajas diferentes: el transporte sobre rieles, con locomotoras eléctricas, resulta de gran eficiencia, pues mantienen limpio del suelo del túnel aún en suelos arcillosos y húmedos, no contaminan el aire con gases y solo requieren un pequeño gálibo; sin embargo, sus desventajas son su sensibilidad a las pendientes y su modo de funcionamiento poco flexible limitado a la construcción de galerías y túneles horizontales.

Las ventajas de los vehículos sobre neumáticos, son su adaptación al servicio, la posibilidad de subir rampas de fuerte inclinación y empleo en otro tipo de trabajo dentro de la obra. Dentro de sus desventajas están los gases de escape, que pueden ser decisivos para túneles largos, sobre todo si no se cuenta con un sistema de ventilación eficiente y en que pueden convertir el suelo de la excavación en polvo y barro.

Otro de los grandes problemas es encontrar el banco de tiro adecuado para todo el material excavado. En algunas ocasiones es necesario realizar estudios en el lugar donde será depositado el material, debido a que puede tener consecuencias mecánicas en el suelo que está sobre cargando, o generar problemas ambientales.

Durante la excavación pueden aparecer dificultades especiales a causa de presiones unilaterales, material expansivo, filtraciones de agua, entre otras cosas. Algunos de estos problemas se tratan de acuerdo al capítulo (III.2 Tratamiento del terreno).

El “Sistema Bernold”, es un procedimiento patentado y simple, que se utiliza para el ademado de túneles. Permite colocar una bóveda de concreto vibrado inmediatamente después de realizar la excavación. Dicha bóveda, constituida por chapa-concreto vibrado, proporciona una resistencia uniforme al terreno que garantiza la unión entre las partes.

El sistema utiliza cerchas de montaje (articuladas), que son perfiles de patín ancho, curvados de acuerdo a la geometría del túnel y que son articulados para poder ser transportados hasta el frente de trabajo. Están dimensionadas para soportar el empuje del concreto hasta que éste alcanza la totalidad de su resistencia. Se utilizan también chapas tipo “Bernold”, que realizan la función de cimbra en el concreto, se montan sobre las cerchas y se solapan unas a otras con pernos; cada chapa cubre un área de 1 m². Las chapas tienen nervaduras cada 1.2 m, para poder articular la estructura.

El procedimiento es el siguiente: inmediatamente después de la excavación y rezaga, se colocan de una a tres cerchas de montaje, dependiendo de la excavación realizada. La distancia de una cercha a otra, está dada por las chapas de 1.2 m. Comenzando por la base se colocan las chapas en ambos lados del túnel y se unen con pernos, para dejar preparado el encofrado y llevar a cabo la realización del vertido de concreto entre la chapa y la roca, hasta realizar nuevamente el siguiente tramo de avance para el sistema. Los promotores de este sistema garantizan una mayor seguridad en la estructura del túnel, mejores rendimientos e incluso menores costos.

Dentro de los problemas especiales, también está el drenaje que puede ocasionar dificultades para el avance significativo del túnel, otro problema es la impermeabilización contra filtraciones de agua; para ello regularmente se emplea una hoja de material sintético que se pega al fondo liso mediante una pintura adhesiva. Existe también el problema respecto al revestimiento definitivo, a las inyecciones a alta y baja presión, mencionadas en capítulo anterior y a las medidas de seguridad para el personal, por lo que una de las principales líneas para la dirección de obra es la vigilancia, enseñanza y educación al personal de trabajo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Las técnicas de construcción de túneles en México no son nuevas, sin embargo se requiere investigar y estudiarlas continuamente, ya que la tecnología hoy en día avanza a pasos agigantados. Es conveniente retomar este tipo de trabajos con el mayor conocimiento posible de las nuevas técnicas, pues ello ayudará mucho a mejores decisiones en la elaboración de proyectos tuneleros en el País.

La decisión de utilizar determinado método depende de un exhaustivo y muy completo estudio de la mecánica de suelos y rocas, ya que son la parte fundamental para la toma de decisiones en cuanto a los procedimientos constructivos a utilizar y la selección de equipos para la excavación de los túneles. El cliente debe estar convencido de la gran importancia que tiene el conocimiento preciso de la geología y la geotecnia, y debe utilizar el tiempo necesario que permita desarrollar un proyecto ejecutivo hasta lograr su etapa de maduración.

El avance que se obtiene utilizando este tipo de técnicas, depende de varios factores, como son:

- a) Características del terreno que influye en el avance del proyecto.
- b) Selección del equipo, así como un buen mantenimiento y operación del mismo.
- c) Implementación de sistemas adecuados para el avance, es decir sistemas eficientes para desalojar el material de rezaga del túnel, así como de todas las actividades que intervienen en los ciclos, tanto de excavación como de revestimiento.
- d) El factor humano, debido a que es el trabajador de quien dependen en gran medida las condiciones reales de operación del ciclo.

Es importante hacer hincapié en el alto índice de seguridad que proporciona el método de excavación con escudo, es muy superior al que proporcionan otras técnicas. Se han logrado con las diferentes técnicas utilizadas en el Valle de México, altos rendimientos de avance, ocasionando un mínimo de daños a la construcción urbana de la superficie, buena calidad en los trabajos ejecutados y condiciones de trabajo seguras para el personal.

La ejecución de las obras subterráneas requiere que exista una comunión entre la teoría, la tecnología y las mejores prácticas constructivas que la experiencia permite, para que la comunicación entre todos los actores del proyecto al estar trabajando en equipo, permitan llegar al logro del objetivo común, que es realizar los trabajos con la mejor calidad, de acuerdo a un proyecto ejecutivo, a las normas y reglamentos vigentes, y cumpliendo con el tiempo y costo pactados. Esta relación, una vez adjudicado el contrato, debe empezar desde las etapas de estudios geológicos, geotécnicos, topográficos, de impacto ambiental y análisis de riesgos, pero deberán continuar durante el desarrollo de los trabajos, ya que la ejecución de un túnel, a pesar de que se haya realizado con el mayor cuidado, siempre se presentan situaciones imprevistas.

México es un país extenso y montañoso que requiere de una gran cantidad de proyectos subterráneos, veamos con optimismo el futuro cercano que este tipo de obras puede impulsar al desarrollo del país.

Por último, y como ya se mencionó, debido a los altos riesgos involucrados en este tipo de obras, es recomendable y razonable, la necesidad de adoptar la práctica internacional de incluir en las bases de licitación, el documento denominado “Geotechnical Baseline Report for Underground Construction” (GBR), que puede traducirse como “Reporte Geotécnico de Referencia para Construcciones Subterráneas” e incluirlo en el contrato de obra, en todos y cada uno de los proyectos a realizar en México.

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, “Túneles en México”, México, D.F.; Mayo 2012.

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, Curso “Víctor Hardy 1998”, México, D.F.; Mayo 2012.

Ing. Luis Ayestarán, Ing. J. Jacobo Schmitter, Ing. Enrique Farjeat P, Solum S.A., Aire Comprimido en Túneles; Noviembre 1973

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, 3^{er} Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en Suelos y Roca, “Riesgos en Túneles”, Enrique Farjeat Páramo. TRADECO, México, 2013.

José Manuel Ruiz Galindo, Tesis “Excavación de túneles en México”, México, 2012.

Técnica Moderna de Voladura de Rocas. Langefors y Kihlstrom. Suecia 1968.

Tunnel Shields and the use of compressed air in subaqueous Works. Copperthwaite. London 1906.

Shield and compressed air Tunneling. Hewet and Johannesson. London 1922.

Evolution of Tunnelling Methods in Mexico during the last 20 years. Enrique Farjeat. Washington 1991.

Diseño de dovelas para túneles del Metro alojados en arcillas compresibles de la Ciudad de México. Farjeat y Delgado. Madrid. Junio de 1988.

Mechanized Tunnelling in Urban Areas. Guglielmetti, Grasso, Mahtab, Xu. London 2008.

Recomendaciones de la ITA sobre el riesgo compartido previsto en contratos para excavaciones subterráneas. AMITOS. Octubre 1992.

The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK. London 2003.