

47
Zey



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"CONSTRUCCION DE TUNELES"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

JUAN MANUEL LEAL ZALDIVAR

DIRECTOR DE TESIS: ING. MIGUEL MORAYTA MARTINEZ.



MEXICO. D. F.

DICIEMBRE 1996.

TESIS CON

068231



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-029/97

Señor
JUAN MANUEL LEAL ZALDIVAR
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL MORAYTA MARTINEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CONSTRUCCION DE TUNELES"

- INTRODUCCION
- I. ANTECEDENTES
- II. ESTUDIOS PRELIMINARES
- III. CARACTERISTICAS GEOMETRICAS
- IV. EXCAVACION Y/O PERFORACION
- V. REVESTIMIENTO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de esta

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 29 de abril de 1997.
EL DIRECTOR

ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

JMCS/GMP*lmf

Al Ing. Miguel Morayta Martínez,
agradezco su paciencia y sus
conocimientos para la realización de este
trabajo.

A la Ing. Romero Estrada, por compartir
lo más preciado que tiene, su tiempo.

A la vida que es lo mejor que conozco.

Gracias a mi **Esposa** por su apoyo, a mis hijos **Ali** y **Allan**, por su inocencia de niños que no saben de obstáculos, problemas o negativas, que confían y tienen fe en la vida.

A mi **Padre** que no podrá leerla.

A mi **Madre**, que sí la leerá.

CONSTRUCCION DE TUNELES

<i>Tema</i>	<i>Página</i>
Introducción	1
I. Antecedentes	2
Tipo de túneles	4
II. Estudios preliminares	6
Topografía	6
Geología	11
Sondeos	21
Petrología	33
Impacto ambiental	35
III. Características geométricas	38
Localización	38
Dimensiones	44
Forma (estructural)	46
IV. Excavación y/o perforación	51
Métodos de excavación	51
Tipo de terreno	81
Bombeo	94
Escombro	96
Equipo de excavación	108
Ventilación	113
V. Revestimiento	119
Método	125
Equipo de revestimiento	142
Conclusiones	150
Bibliografía	151

INTRODUCCION.

De todas las áreas de construcción pesada, las obras subterráneas (túneles) son las más riesgosas, porque contienen muchos imponderables, sin embargo el contratista siente una especial atracción por ella, quizá porque como el buscador de oro, siempre espera que detrás de un gran riesgo las decisiones que han de tomarse en la planeación y en el cálculo del costo de este tipo de obras, son de carácter complejo, dado que deberi considerar y ponderar aspectos tan simbólicos como por ejemplo el impredecible comportamiento de una geología heterogénea la selección del método de tuneleo más adecuado, o las consecuencias en el avance, de la descompostura de un determinado equipo.

La construcción de túneles tiene una relación muy íntima con la minería pero sus objetivos difieren en mucho, el objetivo de la minería es la extracción de minerales valiosos, hasta agotar toda la explotación del mineral que resulta temporal, en cambio en la construcción de túneles, el objetivo fundamental es el de adecuar un pasaje u otro espacio para su uso permanente, utilizado de manera segura y por tiempo indefinido. La construcción de túneles proporciona lugares de almacenamiento, instalaciones de plantas, transporte. Los túneles para tránsito son amplios, mientras que las galerías en las minas raras veces serán mayores de 3 metros aproximadamente; la mayor parte de la tecnología es igual para los túneles y las minas, permitiendo así un intercambio de información e ideas.

Para la construcción del túnel se debe establecer previamente la geometría, y seguirla, mientras que en algunos tipos de minas se tiene que excavar toda el área de estratos, dejando solamente el apoyo necesario para controlar el hundimiento y, en otros casos, se sigue hasta donde llegue una veta que contenga determinado mineral, excavando sólo la parte de roca estéril que sea esencial para el acceso, en todos los casos, es necesario un levantamiento cuidadoso.

I.- ANTECEDENTES

La construcción de túneles se remonta a los tiempos prehistóricos cuando el hombre primitivo, buscando abrigo y protección contra sus enemigos, excavó cuevas o bien agrandó algunas ya existentes.

El túnel más antiguo fue construido en la antigua Babilonia hace 4 000 años por la reina Semiramis, pasando por debajo del Eufrates comunicando el Palacio Real, con el Templo de Júpiter, su longitud era de un kilómetro y su sección de 3.6 x 4.5 m En el proceso constructivo, el río Eufrates fue desviado, las paredes del túnel se construyeron con ladrillos, pegados con mortero bituminoso.

En Jerusalén, Ezequías, Rey de Judea, hace 2700 años, construyó un túnel de 200 m de longitud y con sección de 0.70 x 0.70 metros; conducía agua desde un manantial cercano. Durante este periodo, los griegos construyeron, con el mismo propósito, un túnel de 1 500 m. de longitud y con una sección de 1.8 x 1.8 metros.

En la época de los romanos se construyeron acueductos, especialmente el construido por el emperador Adriano para dar agua a Atenas, hace 1 800 años. Esta habilidad llegó a México, a través de los españoles y se refleja en la enorme cantidad de galerías construidas para la exploración minera, uno de los ejemplos más notables, es el de la construcción del desagüe de la ciudad de México en Nochistongo. Una parte del desagüe se realizó por el túnel de 3.5 x 3.5 metros y 6 600 metros, de longitud. El Virrey Don Luis de Velasco inició los trabajos el 30 de noviembre de 1607. La obra, se encomendó a Enrico Martínez (Henrich Martín, Hamburgués), fue terminada el 17 de septiembre de 1608, excavando gran cantidad de lumbreras y empleando más de 400 000 indios para su construcción.

En épocas más recientes y en el arranque de la era tecnológica, la aparición del ferrocarril, con sus limitaciones de pendiente, incrementó la construcción de túneles. El primer túnel para un ferrocarril de tracción animal fue construido en Francia para la línea Ruan Andressiex en 1826 y en 1829. En la línea Liverpool Manchester se construyó el primer túnel para un ferrocarril con tracción a vapor. En 1842, el ingeniero Brunel terminó un túnel de 2 carriles bajo el río Támesis, en Londres; en este túnel de 150 metros de longitud con sección de

11.3 metros x 6.7 metros, se empleó un escudo rectangular inventado por el propio Brunel.

Gerathead perfeccionó el método usando un escudo cilíndrico con todo éxito. En la construcción del túnel de la torre, bajo el río Támesis, se utilizaron *dóvelas de hierro fundido como recubrimiento*, perforado con escudo, iniciado en 1825 por la Thames Tunnel Company (Compañía de Túnel Támesis).

En la construcción del túnel de Mont Cenis a inicios de 1857 entre Francia e Italia, se utilizó el taladro hidráulico seguido por la pistola neumática perfeccionado por Sommellier, fue inventada la dinamita en 1864 por Nobel, que fue de gran ayuda para el nuevo túnel, abierto al tránsito de trenes en 1871.

El diseño de equipos y técnicas fueron avanzando en la construcción de los grandes túneles Alpinos; Gotardo, Simplon y Lotschberg en Suiza; Tuerns en Australia; Ronco, Col-di-Tenda en Italia, esto propició el desarrollo de la teoría de la presión de rocas, análisis estructural y dimensionamiento del recubrimiento de túneles.

Con el desarrollo del automóvil y la consecuente construcción de grandes autopistas, fue necesario perforar un gran número de túneles carreteros de gran sección. La misma necesidad se presentó en la construcción de los grandes acueductos, sistema de drenaje, presas, plantas hidroeléctricas, etcétera, En las grandes ciudades, la perforación de túneles ha sido usada para los ferrocarriles urbanos (Metro), drenajes, etcétera, el uso del subsuelo para alojar en él vías masivas de comunicación, entrada de bienes y salida de desperdicios, almacenamiento de mercancía, estacionamientos, tanques para la regulación de aguas de lluvias, etcétera.

Actualmente los métodos rápidos de túneles están en continuo perfeccionamiento de los equipos, tanto para el método convencional como el escudo y topes.

1.1.- TIPOS DE TUNELES.

El túnel se puede definir como "estructura subterránea dedicada al transporte de personas o bienes y son construidos, generalmente, sin afectar la superficie". El propósito de los túneles es asegurar transportación a través de ciertos obstáculos, estos pueden ser, montañas, ríos, áreas urbanas densamente pobladas.

Los túneles subterráneos se pueden clasificar en cuatro categorías, como primera instancia:

- 1) Aquellos empleados en la industria minera, que comprenden pasajes más o menos permanentes que sirven de redes de transporte del mineral obtenido y otras en las zonas de explotación, cambiando continuamente de acuerdo con las vetas. Existe una diferencia básica entre las estructuras (minas) descritas antes y los túneles. El propósito de la minería, es la explotación de los minerales, y las cavidades hechas son un subproducto que crea el problema adicional de un mantenimiento subsecuente para prevenir el colapso del sistema entero. Por otra parte, los túneles son construidos casi invariablemente como estructuras permanentes, cuyo objetivo básico, es la excavación de cavidades adecuadas para el tránsito o la transportación. **La gran diferencia entre un túnel y una mina se puede resumir paradójicamente en un trabajo permanente efectuado por una organización temporal y la mina es un trabajo efímero ejecutado por una comunidad permanente.**
- 2) Estructuras subterráneas, están constituidas por los túneles propiamente dichos, como son; acueductos, sistemas de drenaje, ferrocarriles, túneles carreteros.
- 3) Estructuras subterráneas, que proporcionan protección a las personas contra ataques aéreos, materiales y aún a fábricas enteras de gran importancia estratégica desde el punto de vista militar, o bien sirve para alojar instalaciones, como el caso de la casa de máquinas en los sistemas hidroeléctricos

- 4) En las grandes ciudades fue indispensable la utilización de estructuras subterráneas para diferentes servicios, estacionamientos, garajes, bodegas, etcétera.

Dependiendo de su finalidad los túneles se pueden clasificar en:

- 1) Túneles para tránsito: ferrocarril, caminos, peatones, navegación y Metro.
- 2) Túneles para transporte: de presiones (centrales hidroeléctricas); abastecimiento de agua; drenajes; alojar instalaciones diversas, servicios públicos, energía, comunicación, etcétera y transporte de mercancía y material en ciudades y plantas industriales.
- 3) Almacenamiento y plantas: estacionamiento para coches; petróleo en depósitos subterráneos; estaciones subterráneas de emergencia; usos militares y eliminación de residuos radiactivos.
- 4) Protección de personas: refugio y puestos de control.

Uno de los factores más importantes para la construcción de túneles es el de hacer factible el paso por debajo de obstáculos que pueden ser colinas o montañas, ríos o mares, las calles de una ciudad y los edificios u otras estructuras. El paso a través de una cadena montañosa presenta un ahorro considerable en tiempo y energía. Un túnel carretero justifica el costo de inversión si se cuenta con suficiente tráfico.

II.- ESTUDIOS PRELIMINARES.

En esta etapa se realiza la recopilación y análisis de la información existente, y un reconocimiento preliminar del área de interés. En esta fase se pretende conocer el ambiente geológico-geotécnico general para planear y, fundamentalmente las investigaciones subsecuentes.

En túneles, mas que en cualquier otra obra de ingeniería, el método de construcción determina el diseño y viceversa. Es decir, hay una alta dependencia entre los dos. Pero además, por ser obras que están enteramente encerradas en un ambiente natural, en un ambiente geológico, al que se tiene poco o ningún acceso de antemano, su construcción depende de la reacción de este ambiente, la cual, en gran medida, se va conociendo conforme se manifiesta, y no antes. Es por ello que el diseño en túneles está dado sólo en parte, previo a la construcción, porque durante ésta es posible que reacciones no previstas del ambiente geológico obliguen a ajustar o incluso modificar radicalmente el diseño previo.

Hay que tomar en consideración que, Diseño - Construcción - Geología, es una relación de interdependencia dinámica, que se mantiene viva, en evolución, durante la ejecución de una obra subterránea de un túnel. Esta relación persiste, especialmente la de los dos extremos de la terna, durante la operación de la obra.

II.1 TOPOGRAFIA.

El estudio topográfico requiere de planos fotogrametricos a una escala 1:2000 con curvas de nivel cada 2 metros y teniendo como apoyo la triangulación catastral del area metropolitana, si el trazo del tunel se localiza fuera de esta se emplean mosaicos fotogrametricos rectificados a escala 1: 2500 en toda la longitu del trazo geometrico del túnel.

Control de la geometría del túnel:

El procedimiento general que se sigue para llevar a cabo el control de la geometría de los túneles comprende las siguientes etapas.

Trabajos de superficie:

La localización del trazo queda definido para el uso para el que está destinado el túnel de proyecto. Tratándose de conducciones de agua las restricciones son mínimas. Si el túnel se ubica en la ciudad, se buscan los lugares adecuados para las lumbreras de excavación.

En el caso de túneles de ferrocarril, vehiculares y Metro las restricciones son mayores, ya que interviene la seguridad de los pasajeros.

Anteproyecto de trazo y perfil:

Trazo: Lo constituyen varias alternativas gráficas, realizadas sobre planimetría a escala 1:200 y en fotografías aéreas que sirven para conocer con más detalle la localización de las construcciones a lo largo del trazo, así como los posibles predios para la ubicación de lumbreras de acceso y zonas para las estaciones.

Para el metro el trazo preliminar permite conocer:

- a) Longitudes aproximadas de los tramos interestación y total de la línea para determinar el número de trenes, talleres y presupuesto en general.
 - b) Zonas conflictivas a estudiar con más detalle.
 - c) Factibilidad geométrica conociendo los radios de curvatura aproximados.
 - d) Obras inducidas por interferencia son instalaciones municipales. La presencia de obras hidráulicas, agua potable y drenaje, ferroviarias, eléctricas, petroleras etcétera, por la magnitud y cantidad constituye un factor importante en la selección de las instalaciones y obras de superficie
 - e) Afectaciones: La realización de una línea depende desde el principio de la factibilidad técnica y el costo de la misma, siendo factores importantes el de las afectaciones que se deben localizar, clasificar y evaluar.
- **Propiedades particulares:** Se debe cumplir con las normas de proyecto por lo que es necesaria, la afectación a propiedades particulares como son terrenos baldíos, casas habitación, edificios, talleres, fábricas, etcétera.

- **Monumentos coloniales:** Los monumentos coloniales cuyo valor histórico constituye un valor determinante para considerar un cambio o la anulación de una alternativa determinada del trazo.

Perfil: El proyecto de perfil, basado en los estudios preliminares del suelo, proporciona la información respecto a la elevación de la subrasante e intratos del túnel, las profundidades de las lumbreras, estaciones, y las interferencias con otras construcciones subterráneas.

Proyecto de perfil: La profundidad de los túneles se define por el "techo" mínimo para llevar a cabo un procedimiento constructivo seguro, según el estudio estratigráfico de la zona y la localización adecuada de lumbreras de acceso para excavación para el caso de los túneles del Metro, la ubicación de los accesos a las estaciones, se planea de tal manera que los usuarios no recorran grandes profundidades. La localización de las lumbreras debe hacerse buscando la menor altura con el fin de disminuir los tiempos de manto durante la excavación.

Con el proyecto definitivo de trazo se obtienen niveles a cada 20 metros para ser dibujado en papel milimétrico, indicando las restricciones que marque el perfil estratigráfico y aplicando las especificaciones correspondientes, se plantean las tangentes con sus pendientes. En casos especiales como el Metro, el perfil de subrasante debe tener las siguientes características:

- La subrasante en estación tendrá una pendiente nula, con el fin de evitar que un convoy estacionado tenga necesidad de aplicar frenos.
- La pendiente máxima en tramos interestación será de 6% debido a la capacidad ascendente del equipo rodante.
- En el tramo interestación, la pendiente longitudinal debe mantenerse con el mismo signo o cambiar una sola vez, con el fin de drenar el agua de filtraciones hacia el cárcamo de bombeo.

Proyecto de gálidos: Es el diseño geométrico de los espacios necesarios que se requieren para la libre circulación de un vehículo, considerando todas sus instalaciones. Para el caso de la sección de túnel, el proyecto de gálidos tanto horizontal como vertical, prácticamente queda definido al analizar las

diferentes secciones transversales, en las cuales se pretende alojar las instalaciones para tramos tangentes, zonas de curvas, estaciones, transmisiones, espuelas de comunicación, nichos de aparatos y de instalaciones electromecánicas, zonas de cola, fosa de visita, zonas de maniobras y bayonetas para cambio de entrevías.

Trazo de superficie: La localización del eje de trazo, lumbreras, estaciones, etcétera se plantea en la superficie por métodos tradicionales de poligonales cerradas de alta precisión.

Orientación de las poligonales: Determina la dirección de las tangentes que constituyen el eje de trazo, es una actividad que normalmente se realiza por medio de observaciones astronómicas, pero en algunos casos, es necesario que el rumbo determinado de la superficie, se traslade al interior del túnel con el mínimo error.

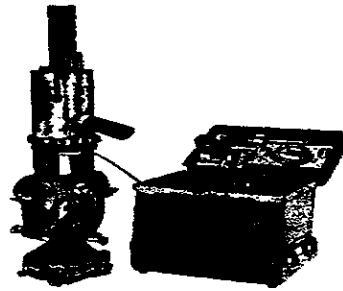
Perfil del eje de trazo: La nivelación del eje de trazo sobre el terreno natural, proporciona la información necesaria para elaborar el proyecto de perfil del túnel en toda su longitud. Estas actividades se realizan con una alta precisión.

Control de bancos de trabajo: El empleo de estos para la nivelación permite realizar un control altimétrico confiable, para lo cual se ubica en la superficie, un sistema de bancos de nivel denominados bancos de trabajo, los cuales se ligan por nivelaciones diferenciales periódicas a los bancos de precisión, conociendo así el comportamiento altimétrico de todo el sistema

Trabajo en el interior del túnel.

Bajas de trazo y nivel al túnel: Conocida la posición del eje de trazo en la superficie y construidas las lumbreras, el eje es bajado al piso de las mismas utilizando plomadas ópticas cuyas características y posibilidades de adaptación a los equipos topográficos permiten que esto se realice por observaciones directas. Del mismo modo, con el conocimiento del proyecto de perfil y contando con un sistema de bancos de nivel, se ubican en las zonas de lumbreras, los bancos de nivel interior, ambos datos: el trazo y el nivel, permiten definir la dirección de excavación que lleva el túnel en sus primeras etapas.

Orientación interior. Cuando la longitud del túnel excavado (aproximadamente 100 metros) permite la orientación, ésta se realiza utilizando el giroscopio GAK-1 (figura I.1) para dar a la línea bajada, el rumbo geográfico obtenido en la superficie.



(figura Y.1)

Pozos para control de trazo: Adicionalmente se proyecta una localización de pozos a lo largo de la obra, espaciados a cada 300 metros aproximadamente por los cuales es posible verificar por métodos ópticos el alineamiento horizontal del túnel.

Nivel: Se apoya en la aplicación del control alfilero y en la ubicación de referencia en el túnel que define el nivel de subrasante de proyecto, considerando éste como un plano de referencia en todas las secciones transversales.

Verificación de la sección excavada: Cuando el procedimiento constructivo para la excavación requiere del concreto lanzado o de marcos metálicos para su ademe, es necesario verificar la sección transversal excavada que permite asegurar que se tiene el espacio suficiente para el colado de la sección definitiva, y esta revisión se realiza mediante mediciones radiales o rectangulares a los puntos principales de la sección, apoyados en el eje del trazo y los niveles de subrasante ubicados en el túnel. Si la excavación se realiza utilizando el equipo conocido como **Escudo**, prácticamente no es necesario verificar su sección transversal, dado que el empleo de dovelas proporciona una superficie constante y sólo se requiere verificar su elevación mediante la nivelación de la clave de la plantilla.

II.2 GEOLOGIA.

La fase preliminar más importante en la construcción de un túnel, es una cuidadosa exploración de las condiciones geológicas de la formación, por las que el trazo proyectado del túnel atravesará; estas condiciones determinarán inicialmente la factibilidad del proyecto y dará las bases para el empleo de los diversos métodos constructivos. Existen varias etapas en el levantamiento geológico que se tienen que planear para el túnel.

La primera etapa está fundada en la información local, los conocimientos previos de la zona y las cartas geológicas existentes, esta información inicial fija las bases para el desarrollo de los estudios de factibilidad y para la planeación del túnel.

Los datos que debe contener son:

- Determinación de las condiciones y orígenes de las rocas por las que atraviesa el túnel.
- Recopilación de los datos hidrológicos e información sobre los posibles gases en las rocas y sus temperaturas.
- Determinación de las características y propiedades mecánicas de resistencia de las rocas, a lo largo de la línea propuesta del túnel.
- Determinación de la naturaleza geológica que puede amplificar o disminuir las presiones sobre el ademe de sitios específicos, como zonas de falla.

Se debe considerar que en la construcción del túnel no se tengan problemas de inestabilidad como atravesar juntas, contactos o fallas geológicas, ya que aparentemente no se conocían hasta efectuar la excavación del túnel y haberse cerrado o producido caídos de importancia en el mismo. Una revisión de la documentación existente, revela que en la mayoría de los casos estas fallas geológicas aparecen en los sondeos, y que se ha debido a una interpretación deficiente el hecho de no habérselas tratado anticipadamente, evitando en esta forma el problema.

La segunda es la exploración geológica, encaminada a sentar las bases para el diseño y construcción del túnel que debe cubrir fundamentalmente los siguientes puntos:

- Investigación somera de las rocas que afloran en la superficie.
- Determinación de la posición de las capas subterráneas y la calidad de las rocas en ellas.
- Condiciones de drenaje superficial.
- Posición, tipo y volumen de las aguas y los gases contenidos en la propia roca.
- Determinación de las propiedades y la resistencia a la manejabilidad de las rocas que se encuentren en el eje del túnel.

Información geológica requerida.

Estratificación: Se determina el espesor, características y origen de los estratos significativos del subsuelo; es importante definir el espesor de rellenos artificiales y su compacidad.

Discontinuidades: Debe investigarse con detalle la existencia de cavidades artificiales, túneles y galerías de antiguas minas que causan condiciones de inestabilidad así como las tobas afectadas por fracturamiento, generando superficies de falla y bloques inestables.

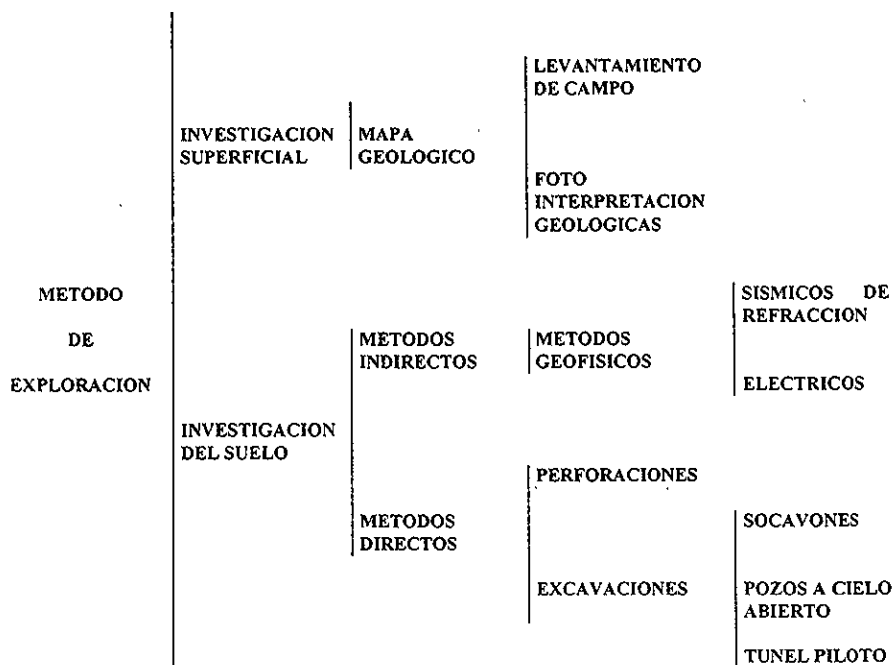
Geomorfología: La evolución geológica de cauces y barrancas ha formado diversas condiciones del subsuelo, encontrándose suelos arcillosos blandos hasta aluvión suelto, lahares y aún morrenas; el reconocimiento geológico debe advertir sobre estas condiciones estratigráficas.

Hidrología: Estudiar las condiciones de flujo superficial y subterráneo, comprobando la existencia de mantos freáticos.

Condiciones inestables: Identificar los sitios en los que pudieran desarrollarse condiciones de inestabilidad en corte y taludes. Este fenómeno

podría estar asociado a la pérdida de humedad en los cortes expuestos, así como a la disminución de resistencia al corte por humedecimiento de los suelos.

METODO DE EXPLORACION



Exploración geológica:

La exploración geológica previa a la construcción y diseño del túnel, debe prestar una esmerada atención a todos los rasgos geológicos (tanto los más evidentes, como los menos conspicuos y de más detalle), que puede influir en la velocidad de avance y en los costos de construcción, cualquiera que sea el método. La importancia de los estudios y reconocimientos que anteceden al diseño y la construcción del túnel, destaca la exploración geológica, encontrando factores condicionantes para la elección del trazo más conveniente y eludir en todo lo posible las zonas singulares del mal terreno y en especial los accidentes tectónicos, realizando estudios minuciosos y con una metodología de la exploración detallada:

- Investigación de carácter general previa a la planeación, la cual debe incluir la morfología, petrografía, estratigrafía y la hidrología que aparecen en los estudios previos a las cartas geológicas de carácter general.
- Determinación de las condiciones hidrológicas en el subsuelo que es de importancia fundamental en esta etapa de la investigación.
- Estudios hidrológicos que deben incluir el drenaje y las corrientes, como la localización de los afloramientos o manantiales, determinación del PH y las características químicas y mineralógicas de los minerales que contiene el agua superficial. Estos datos pueden contribuir a una información valiosa de la naturaleza de las rocas y de sus condiciones naturales.
- Estudio de los mapas geológicos en donde aparezcan las fallas, fracturas y deslizamientos que son de gran utilidad, ya que éstos proporcionan información sobre los sitios de estabilidad e inestabilidad en el túnel.
- Investigación detallada del subsuelo paralela a la obra, pero previa a la construcción, proporciona información sobre la resistencia física y las propiedades químicas de la roca; así como las condiciones de alteración, dureza e intemperismo. En esta etapa se señalan las características mecánicas, tales como la consistencia y el peso volumétrico que nos dará un índice de la dureza y estado de alteración de la roca. Asimismo, se determinarán los posibles contactos, fallas, adjuntas y todos los planos de posibles deslizamientos que puedan cruzarse al construir el túnel. Las condiciones hidrológicas en el subsuelo son de importancia en esta etapa de la investigación.

Estas investigaciones geológicas deben continuar durante la construcción, con el interés de corroborar los datos previamente establecidos y así mejorar el método de ataque y verificar las condiciones supuestas para el avance del túnel, en cadenamientos más altos aún por excavar. Durante la construcción se excavan túneles piloto o galerías en las que se hacen investigaciones sobre la naturaleza de las rocas, la cantidad de agua que fluye al túnel, realizando ocasionalmente estudios de la resistencia al corte y de los esfuerzos que la roca tenga.

Las formaciones de roca maciza que no se encuentran estratificadas, presentan menos problemas durante la excavación de túneles que aquellas formaciones estratificadas con muchas fallas o juntas.

La secuencia de trabajo en geotecnia para definir el ambiente geológico en que se va a desarrollar esta obra subterránea (túnel) se debe realizar de la siguiente manera:

- 1) Exploración suficiente para establecer cuando menos la naturaleza, la disposición y las propiedades de los diferentes estratos que interesan, en forma no necesariamente detallada.
- 2) Definición de las condiciones más probables y de las desviaciones, más desfavorables que se conciben respecto a esas condiciones.
- 3) Establecimiento del diseño, basándose en una hipótesis práctica de comportamiento previsto bajo las condiciones más probables.
- 4) Selección de las cantidades o parámetros que deben observar durante la construcción, y cálculo de sus valores previstos sobre la base de la hipótesis práctica.
- 5) Cálculo del valor de los mismos parámetros en las condiciones más desfavorables que permita suponer la información disponible del subsuelo.
- 6) Elección anticipada de la acción a seguir o de la modificación del diseño para cada desviación significativa previsible de los datos de las observaciones respecto aquellos propuestos a partir de la hipótesis práctica.
- 7) Medición de los parámetros que deben observarse y evaluación consiguiente de las condiciones reales
- 8) Modificación, en su caso, del diseño para adaptarlo a las condiciones reales.

- 9) Los resultados de la observación pueden también utilizarse más allá de los requerimientos inmediatos del proyecto, es decir, para perfeccionar el estado del conocimiento en el diseño y la construcción.

La exploración previa a la construcción debe ir encaminada a obtener información de aquellos aspectos geológicos que afectan las operaciones del tuneleo como son:

- 1) Establecer un marco geológico general del área, recopilando toda la información disponible: mapas, aerofotografías e información sobre experiencia previa de tuneleo en la zona.
- 2) Reconocimiento geológico general, lo que se llama comúnmente "caminar la geología".

Quedando establecido un rango probable de tipo de rocas, de estructuras (geológicas), de regímenes de agua subterránea, de grado de fracturación y de intemperización, de condiciones probables a nivel de túnel, así como una historia geológica tentativa.

Se tiene que desde los primeros estudios se identifican y evalúan los riesgos potenciales, los rasgos geológicos críticos que pueden causar retrasos o paros de la obra, problemas de seguridad o de estabilidad, requiriendo medidas especiales para continuar con el tuneleo. Se limitarán las zonas donde la información geológica es inadecuada o donde se carece de ella.

Elaborar un programa detallado de exploración, enfocado a delimitar la geología faltante, determinando los rasgos geológicos críticos y los riesgos que van a encontrarse a nivel del túnel, verificar las condiciones promedio que el túnel habrá de encontrar durante su construcción.

La exploración previa a la construcción debe ir encaminada a obtener información de aquellos aspectos geológicos que habrán de afectar la operación de tuneleo, se recomienda que el informe, previo a la construcción, de las condiciones a nivel de túnel, contengan los siguientes datos:

1) Introducción.

- a) Alcance propósito.
- b) Descripción del área y del proyecto.

2) Rasgos geológicos de importancia ingenieril.

- a) Marco geológico general, tipo de rocas, estructura y breve historia geológica.
- b) Descripción de la calidad de la masa rocosa (RQF y grado de fracturación).
- c) Grado de intemperización o alteración.
- d) Juntas o diaclasas, fracturas por cortantes, y zonas de cortante:
 - Sistema de diaclasas: orientación y características de las familias de diaclasas, foliación, planos de estratificación.
 - Orientación y características de las fallas y zonas de cortante y otras superficies de falla con caras pulimentadas por deslizamientos previos (Slickensided) o cubiertas por material descompuesto.
 - Localización de las principales fallas y zonas de cortante.
- e) Cubierta de roca, contornos de la roca basal y propiedades significativas de los suelos, si se encuentran condiciones de frentes mixtos (parte suelo y parte roca). Se tendrán que excavar lumbreras en estos materiales o si se prevé la consolidación y el asentamiento consiguiente de los suelos que se encuentren sobre el túnel
- f) Resumen de las zonas de baja calidad a lo largo del túnel.
- g) Propiedades significativas de la roca intacta:

- Resistencia a la compresión.
 - Dureza.
-
- Flujo plástico.
 - Tenacidad a desintegrarse.
 - Capacidad de expansión.
 - Propiedades del material de relleno en juntas y fracturas y el de otras zonas de suelo:
 - Resistencia a la compresión.
 - Dureza.
 - Flujo plástico.
 - Tenacidad a desintegrarse.
 - Capacidad de expansión.
 - Propiedades del material de relleno en juntas y fracturas y el de otras zonas de suelo.
 - Flujo plástico.
 - Expansibilidad.
 - Plasticidad granulometría.
 - Resistencia al corte residual.
- h) Estado de esfuerzos en sitios.
- i) Condiciones de agua subterránea.

j) Interpretación de resultados.

3. Historia de construcciones anteriores en el área del proyecto (casos , resumen de datos de sondeo y pruebas).

4. Condiciones del terreno al nivel del túnel:

a) Clasificación del terreno al nivel del túnel (calidad de roca, porcentajes esperados de diferentes tipos y calidades de terrenos)

b) Naturaleza y extensión de movimientos potenciales de roca y de sobre excavación para los trazos dados:

- Efectos de las diaclasas, las fallas y zonas de cortante y las zonas descompuestas.

- Efecto de los esfuerzos en sitio.

- Efectos del agua subterránea.

c) Infiltración de agua estimada.

- Máxima infiltración en el frente.

- Máxima infiltración a lo largo del túnel o por zonas definidas de terreno a nivel del túnel.

- Presión de agua.

d) Riesgos en el tuneleo. Resaltar los rasgos que pueden provocar colapso, realizando medidas de emergencia, cambios importantes en los métodos de excavación o en los sistemas de soporte, evitar el peligro de vidas y en propiedades, o interrumpir el ritmo del tuneleo (ejemplos gases, altas temperaturas, entradas de agua, zonas de comprimidos, zonas con esfuerzos residuales, valles enterrados, cavernas, etcétera).

5. Métodos de diseño y de construcción.

- a) Tipo de soporte inicial y amplitud de las cuñas y bloques de roca que deben soportarse, capacidad de carga requerida, orden y tiempo de instalación.
- b) Procedimiento de soportes especiales (excavación por etapas, pre-soporte).
- c) Método de excavación (requisitos de tronadas cuidadosas, posibilidad del empleo de máquinas tuneledoras).
- d) Diseño del revestimiento final (bloques de roca que se deben soportar, otras condiciones de carga, criterio de carga del diseño, capacidad de carga prevista del revestimiento, factores que puede deteriorarlo)

6. Instrumentación. Observaciones.

- a) Comportamiento que debe registrarse y observarse a lo largo del tiempo, incluidas las observaciones rutinarias suplementarias.
- b) Método de medición y registro, especificaciones, coordinación con construcción.
- c) Criterios para evaluar la información. Métodos para modificar el diseño y la construcción en base a los resultados de las observaciones.

El resultado final del programa de exploración previo a la construcción, es un resumen de las condiciones de la roca en el sitio e interpretación de éstas en términos de su significado en el diseño y la construcción del túnel, siendo fundamental para el proyectista y la constructora. Evitando con esto los problemas constructivos no previstos a partir de los datos geológicos disponibles, se debe tomar en consideración una completa comunicación entre el proyectista y las brigadas de exploración, el ingeniero y el geólogo, el encargado del diseño y el responsable de la construcción.

Para evitar la falta de comunicación entre las partes implicadas los datos de exploración deben presentarse en tal forma que describan con claridad las condiciones de terreno que se prevén al nivel y a lo largo del túnel, detallando las suposiciones que se han hecho en relación con la construcción, y resaltar el efecto de las condiciones diferentes de la roca, teniendo procedimiento de excavación y de soporte, diferente a otras.

La importancia es que debe existir comunicación con ingeniería geológica o geología del ingeniero, tomando como consideración que los rasgos geológicos detallados, especialmente los que tienen significado estructural (ingenieril) son objeto de estudio del ingeniero geólogo.

La exploración previa en suelos es para evitar pérdida de estabilidad propia del túnel, además que el mismo no cause movimientos alrededor de la excavación que provoque asentamientos en las vecindades de éste, ocasionando perjuicios a construcciones, instalaciones o propiedades. Para el caso de los túneles en roca puede ser fuente de daños a terceros el uso de explosivos que causen vibraciones inaceptables, consolidación o asentamiento de suelos.

II.3 SONDEOS.

El conocimiento de las características físicas y propiedades mecánicas e hidráulicas de las distintas formaciones por las que cruzará un túnel, son absolutamente necesarias. Para llevar al conocimiento de estas propiedades, es necesario implementar una investigación basada en sondeos de muestreo y pruebas que son de utilidad para:

- Precisar o corroborar los resultados de la geofísica o pruebas de permeabilidad, éstos se realizarán con perforaciones sin muestreo de las formaciones.
- Mediciones de los espesores de las formaciones y conocimiento preliminar de la dureza de las mismas. Estos sondeos serán perforaciones con muestreo alterado (únicamente se recupera el producto de la molienda de la broca).

- Sondeo para conocer las características físicas, la estructura de la roca o suelo y sus propiedades, se realizará extrayendo muestras inalteradas de las formaciones atravesadas.

Ensayes a efectuar:

Los sondeos permiten efectuar un cierto número de ensayos, sobre muestras obtenidas para:

- Ensayes para determinar la naturaleza de la roca o suelo.
- Analizar el grado de fisuración y naturaleza de las fisuras, estratificación y juntas en las formaciones.
- Para realizar pruebas de laboratorio (de mecánica de rocas o mecánica de suelos), análisis petrográfico y análisis químico.

Determinación de los perfiles estratigráficos:

- Mediciones “in situ” de los módulos.
- Mediciones “in situ” de la permeabilidad.
- Naturaleza de los sondeos.

Tipo de muestreadores:

Para cada tipo de formación existe una herramienta de muestreo adecuada, en cada caso deberá consultarse con un especialista para utilizar la herramienta apropiada; en forma general, puede decirse que el barril muestreador de doble tubo rígido es el más comúnmente usado para muestreo de rocas. El muestreador tipo “Dennison” es el que se emplea para formaciones medias con resistencia a la compresión simple mayores de 3 Kg/cm². En suelos blandos, fundamentalmente en arcillas, se utiliza el muestreador de tubo liso de pared delgada tipo “Shelby”.

Los sondeos están ligados siempre al sistema de referencias topográficas del lugar y se realizan de acuerdo con el conocimiento previo de las condiciones

geológicas, obtenido por los métodos indirectos y los levantamientos geológicos superficiales, atendiendo en especial los sitios que presenten anomalías. En la exploración de zonas estrechas y alargadas (presas, túneles, vías terrestres y canales), se efectúan sondeos a lo largo del eje longitudinalmente propuesto.

El número de sondeos dependerá de las características del terreno (uniforme o errático), de la magnitud de las cargas impuestas por las estructuras al terreno y de las características y funciones de las obras proyectadas (susceptibilidad a los asentamientos diferenciales).

Si en los estudios geológicos previos se supone que el subsuelo es uniforme, se separarán los sondeos de 100 a 150 metros para áreas de mediana extensión, localizando los iniciales en las esquinas y los siguientes hacia el centro. La distancia entre sondeos puede variar de 20 a 100 metros. Si de los estudios geológicos previstos o de los primeros resultados de sondeo, se deduce que el subsuelo presenta condiciones muy erráticas, las distancias entre sí se reducirán.

En el caso de túneles, la profundidad siempre debe alcanzar por lo menos el nivel de la plantilla del túnel. En el caso de topografías muy accidentadas en el que las diversas condiciones impidan la ejecución de perforación desde la superficie del terreno, se deben realizar perforaciones desde el frente de ataque del túnel con el fin de conocer las condiciones de las rocas que van a ser excavadas.

Otro factor que determina la profundidad de los sondeos es la permeabilidad de los materiales del subsuelo, en este caso se prolonga el sondeo hasta encontrar materiales de permeabilidad inferior a una unidad Lugeon.

El registro del sondeo junto con la información obtenida durante la propia perforación, nos proporciona una relación exacta y comprensiva de las condiciones geológicas encontradas. Los registros precisos requieren de cuidado y vigilancia por parte de los perforistas en la obtención de datos. Existiendo una relación estrecha entre el perforista y el geólogo, con una preparación especial de los técnicos

El geólogo realizará estudios preliminares de los núcleos a la brevedad posible, después de su recuperación, definiendo el tipo de roca de que se trate y las características del fracturamiento del material, lo que se enriquecerá con los estudios de laboratorio de la muestra; los resultados se referirán a las propiedades mecánicas de las rocas que se deben manejar con cuidado, dado que tales resultados pueden ser representativos del macizo rocoso por sus valores límites obtenidos en muestras sin discontinuidades.

Los tipos principales de sondeos que se usan en mecánica de suelos para fines de muestreo y conocimiento del subsuelo, en general son:

Sondeos verticales: Se perfora desde la superficie mostrando solamente a la profundidad del túnel o bien se extraen muestras en forma continua desde el nivel del brocal de sondeo.

Sondeos horizontales: Se emplean para el reconocimiento de túneles relativamente cortos o tramos de túnel. Su limitación principal consiste en la desviación de la trayectoria, sobre todo hacia abajo por el peso propio de las barras de perforación.

Este tipo de sondeo se realiza generalmente a corta distancia (30 metros máximo), se pueden realizar perforaciones horizontales de 200 metros de longitud con maquinaria especial.

Sondeos inclinados: En el caso de estratificación oblicua en rocas o suelos, los sondeos se pueden realizar perpendicularmente a los planos de estratificación, lo que permite recuperar la mayor parte de los materiales de relleno en las juntas. Es recomendable programar sondeos inclinados en el caso de encontrar formaciones, fracturamientos inclinados o juntas, lo que tiene por objeto, obtener un mejor porcentaje de recuperación.

Los sondeos horizontales y los inclinados presentan el problema de la desviación debido al peso propio de la herramienta y la inclinación de las capas con respecto a la dirección de los sondeos.

Sondeos integrales: La realización de este método, es con el objeto de recuperar los materiales que se encuentran rellenando las juntas, fracturas o

fallas de la roca, el cual permite a la vez determinar la inclinación del agrietamiento en las formaciones.

Los inconvenientes de los sondeos son:

- Proporcionan una información lineal y en general puntual, sobre la traza del túnel.
- En comparación con los estudios indirectos tienen un costo más importante en base a la información proporcionada.

Densidad de los sondeos: La densidad de los sondeos por efectuar, es un problema que depende fundamentalmente de la heterogeneidad de las formaciones y de la profundidad a que se encuentra el túnel, se muestra un espaciamiento preliminar en cuanto a los sondeos de exploración:

PROFUNDIDAD DEL TUNEL	ESPACIAMIENTO DE LOS SONDEOS DE EXPLORACION
227 m	304 - 760 m
91 - 227 m	152 - 302 m
91 m	30 - 152 m

Métodos geofísicos.

Son las técnicas basadas en la medición de ciertas propiedades físicas de los materiales que constituyen el subsuelo, empleando para ello equipos portátiles y de fácil operación que permiten conocer la estratigrafía y las características de los materiales y la posición del nivel freático

La utilización de los métodos geofísicos de exploración pueden, redundar en una economía, al reducir la magnitud de las exploraciones directas.

Los métodos geofísicos son empleados ampliamente en la construcción de túneles para determinar fundamentalmente el tipo y calidad de las formaciones por las que el túnel atravesará el método que con mayor frecuencia se emplea para este fin, es el geosísmico por refracción; normalmente se realiza con detectores (geófonos) que definen las velocidades como las que la onda sísmica viaja a través de las diferentes formaciones del

suelo; también se realizan estudios en sondeos, colocando los geófonos a diferentes profundidades y provocando la detonación en superficie. Señala con claridad el tipo de roca y su “competencia” en general, pero proporciona poca información sobre las fracturas y fisuras de la roca en sí. En las pruebas efectuadas por este método en perforaciones, es posible establecer correlaciones entre la velocidad en el campo y los valores obtenidos en el laboratorio de resistencia o de Rock Quality Designation (“R.Q.D.”) índice de cálida de la roca.

Sísmico: Se basa en medir las velocidades de propagación de las ondas elásticas en los diferentes medios del lugar, provocando artificialmente perturbación dinámica en un punto de suelo que dan origen a ondas longitudinales y transversales, que permiten deducir por el estudio de sus reflexiones y refracciones las profundidades, espesores de capas y calidad de los materiales.

Método sísmico de refracción: Consiste en medir el tiempo requerido para que las ondas longitudinales viajen del punto en que se generan, a los detectores o geófonos colocados en línea que captan la señal de llegada y que a su vez, envían a un aparato registrador.

Equipo: Consta de tres partes: un generador de la onda, un conjunto de geófonos y el aparato registrador.

Generación de la onda: Se hace con un martillo pesado que golpea una placa asentada en la superficie que simultáneamente dispara un microinterruptor que está conectado al registrador. El martillo se usa para estudios de poca profundidad (10 metros). Para estudios a mayor profundidad, la onda se genera con la explosión de una pequeña carga de dinamita con detonado instantáneo, colocado en una perforación somera (menor de un metro); la detonación también es registrada simultáneamente mediante un microinterruptor.

Geófonos: Son dispositivos electromecánicos que captan las oscilaciones del suelo y las transforman en señales eléctricas. Los geófonos, comúnmente empleados registran sólo sensibilidad entre 5 y 100 cps (ciclos por segundo), son de construcción robusta y tienen una punta del eje vertical para hincarse en el suelo.

Aparato registrador: Es un oscilógrafo cuyos elementos sensibles son pequeños galvanómetros que vibran al recibir la señal de los geófonos. Los galvanómetros llevan adheridos espejos, en los que inciden rayos de una fuente luminosa fija y los refleja a papel fotosensible para registrar el arribo de las ondas tienen una escala de tiempo y un canal para captar el inicio de la prueba. Existen oscilógrafos que registran el arribo de las ondas en cinta magnética, pantalla luminosa o digitalmente.

Procedimiento de prueba: Los geófonos se hincan en el suelo a lo largo de una línea en uno de cuyos extremos se genera la onda. Los geófonos se colocan equidistantes entre sí, o bien más cercanos en el extremo donde se genera la onda, pero no a menos de dos metros y a distancias mayores en la parte más alejada, pero no a más de 20 metros.

En el caso de que se quiera investigar a grandes profundidades, puede haber más puntos de explosión sobre la misma línea pero alejados de los geófonos. En el caso de una disposición en el abanico para determinar las dimensiones y profundidad de la anomalía, se hace variar el radio y/o posición del punto de tiro. Estas irregularidades pueden corresponder a zonas de baja resistencia, tubificadas, muy sueltas o con cavernas.

Resistencia eléctrica:

Método eléctrico: Se basa en la interpretación del campo eléctrico creado por la circulación de una corriente eléctrica en el subsuelo natural o artificial; estableciendo una relación entre los parámetros físicos que intervienen en la propagación de la corriente y las características físicas de los materiales empleados para ello, aparatos receptores y transmisores, se utiliza para la localización de minerales, acuíferos y estructuras geológicas.

Método de resistividad: Consiste en la determinación de las resistividades aparentes de cada estrato, generando un campo eléctrico mediante el uso de un dispositivo cuadripolar que mide tanto la intensidad "I" creadora del campo como la caída de potencial "V" en dos puntos del campo, para visualizar en forma independiente o global la imagen de la estructura geológica del subsuelo.

Se han desarrollado diversos métodos, de estos el más simple es el de Wenner, que opera de dos maneras:

- **Sondeo eléctrico:** Estudia la estratigrafía según una vertical.
- **Rastro eléctrico:** Lo hace según una horizontal a cierta profundidad.

Combinando ambas técnicas se tiene una clara idea de las condiciones del sitio.

Interpretación:

- **Cualitativa;** Se lleva a cabo utilizando los valores de resistividad aparente a partir de los cuales se construyen diagramas de resistividad e isorresistividad aparentes, permitiendo conocer las variaciones aparentes bajo cada centro de estudio como de estructuras, no sólo horizontales sino también cuerpos subverticales tales como fallas, filones o diques y a profundidades mayores que no son registradas por otros métodos.
- **Cuantitativa:** Es efectuada comparando la resistividad aparente obtenida con resistividades definitivas por un corte eléctrico conocido. Esto nos da resultados y espesores reales del corte geoelectrico.
- La identificación de los posibles materiales se hace por correlación de los valores de resistividad de cada estrato, con valores obtenidos de estudios anteriores.

Método de caída de potencial:

- Consiste en determinar la relación de caída de potencial entre tres electrodos de potencial hincado a distancias iguales; colocados perpendicularmente a otros 32 electrodos de corriente que genera un campo eléctrico en el terreno y que permite en ciertos casos obtener mayor detalle que con el método de resistividad (caso de cuerpos verticales de espesor reducido como dique, fallas, etcétera); además, su aplicación es más simple dado que no requiere mediciones de la intensidad de la corriente.

Mediciones por otros métodos:

Existen otros métodos de medición usados en la determinación de las velocidades de onda, como es el ultrasónico que tiene las siguientes ventajas:

- Precisión en la medida de la velocidad de onda longitudinal para segmentos previamente medidos.
- Determinación y localización de condiciones especiales de la roca como fracturación y juntas o fallas.
- Determinación precisa de las zonas afectadas a lo largo de las paredes del túnel.

Las limitaciones del método son las siguientes:

- Requiere de perforaciones iniciales; cierta dificultad para la determinación de velocidades de onda transversales.
- Sistema de detección por pulsos electromagnéticos.

Sistema de medición empleando el radar:

En el caso de rocas relativamente secas se emplea el radar para explorar rocas calizas a 13 metros, minas de carbón a 75 metros y sal gema a 225 metros. El equipo es distinto al empleado para la localización de objetos y cuerpos en la atmósfera; sin embargo, el principio básico es el mismo. Un pulso de energía electromagnética se produce en un transmisor, una porción de esta energía se refleja en alguna irregularidad dentro del medio y esta onda reflejada se recibe en una antena. El receptor amplifica la señal y se produce en una pantalla de un tubo de rayos catódicos, o bien, en una cinta magnética graficando la señal recibida en función del tiempo.

Los resultados obtenidos al emplear este sistema, señalan lo siguiente:

- La investigación de anomalías con el radar, varía hasta 75 metros en calizas sanas.
- Muchas rocas duras son tan “transparentes” como las calizas para el radar; el granito y los gneiss tienen normalmente baja porosidad y por lo tanto baja conductividad eléctrica; estas rocas son las más difíciles de explorar por barrenos, sin embargo son fáciles de explorar con el radar.

- Para obtener una buena información, se aconseja emplear onda larga para el radar.
- Al emplear este método se investiga una amplia zona, sobre todo si la antena de recepción está colocada a 90° de abertura, en contraste con la exploración por otros medios como la perforación a lo largo de una línea.
- El radar puede detectar la forma, espesor y otras propiedades de fallas, grietas o juntas que con otros métodos geofísicos no es posible.
- El radar no es interferido por el ruido del equipo del túnel; sin embargo, por su poco rango de variación no es aconsejable su empleo en areniscas muy porosas y en pizarras.
- En rocas microfisuradas, la energía sísmica se ve afectada, no así la propagación de la energía del radar.

Finalmente, la exploración con el radar se hace rápidamente y se pueden utilizar las antenas colocadas en el frente de la excavación; si se presenta alguna obstrucción, se hace una nueva prueba colocando las antenas en otra posición y se complementa la información por barrenos de muestra u otros métodos que se juzguen necesarios.

Los estudios llevados a cabo utilizando sondeos, se justifican en los siguientes casos:

- a) Para la estabilidad de los taludes en los portales de entrada y salida de los túneles.
- b) Para el conocimiento de los suelos en un túnel a poca profundidad (generalmente del orden de 50 metros)
- c) Necesidad de confirmar la naturaleza de todas las formaciones por las que el túnel atravesará en terrenos con problemas especiales, tanto hidráulicos como de resistencia de los suelos.
- d) Reconocer con detalle una estructura completa de alguna formación.

Ventajas e inconvenientes de los sondeos:

1. En primer lugar, una de las ventajas de los sondeos, es establecer y confirmar los estudios preliminares de las formaciones hechas por métodos indirectos, como la geofísica.
2. En segundo lugar, poder efectuar todas las pruebas de laboratorio útiles para los estudios en un proyecto determinado; además los sondeos permiten instalar piezómetros que darán información precisa de las condiciones hidráulicas del material. Los sondeos permiten elaborar perfiles geológicos o de suelos a lo largo del eje de los túneles.

Los inconvenientes son los siguientes:

- 1) Proporcionan una información lineal y en general puntual, sobre la traza del túnel
- 2) En comparación con los estudios indirectos, tiene un costo más importante en base a la información proporcionada.

CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO REQUERIDO EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA OBRA SUBTERRANEA Y METODO DE EXPLORACION EMPLEADO

CARACTERISTICAS	MÉTODOS DIRECTOS Y SEMIDIRECTOS	MÉTODOS GEOFISICOS	COMENTARIOS
-LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA	-EXTRACCION DIRECTA -INSPECCION DEL NUCLEO	-SISMICO DE REFRACCION -DE RESISTIVIDAD -DE POTENCIAL ESPONTANEO O NATURAL -RADIOACTIVOS -MAGNETICOS	-EN EL INTERIOR DE LA PERFORACION Y DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO -EN EL INTERIOR DE LAS PERFORACIONES -DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO
-FRECUENCIA DE LAS DISCONTINUIDADES (NUMERO DE FAMILIAS ESPACIAMIENTOS)	-EXPLORACION DIRECTA DEL NUCLEO	-SISMICO DE REFRACCION -RESISTIVIDAD	-EN EL INTERIOR DE LA PERFORACION Y DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO
-ORIENTACION Y ABERTURA DE LAS DISCONTINUIDADES	EXPLORACION DIRECTA DE NUCLEOS INTEGRALES	-CALIPER LOG	-FISURAS FINA INSPECCIONES DE NUCLEOS INTEGRALES SEISVIEWER Y CALIPER -JUNTAS ABIERTAS TODOS LOS METODOS EXCEPTO LA INSPECCION DEL NUCLEO
-RUGOSIDAD Y ONDULACION DE FISURAS, FALLAS Y	-INSPECCION DEL NUCLEO XPLORACION	-NINGUNO	-LA FORMACION OBTENIDA EN ROCAS COMPETENTES ES CONFIABLE

**CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO REQUERIDO
EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA OBRA SUBTERRANEA
Y METODO DE EXPLORACION EMPLEADO**

CARACTERISTICAS	MÉTODOS DIRECTOS Y SEMIDIRECTOS	MÉTODOS GEOFISICOS	COMENTARIOS
PLANOS DE ESTRATIFICACION	DIRECTA		
-RELLENOS Y CONDICIONES DE LAS PAREDES DE FISURAS, JUNTAS FALLAS Y PLANOS DE ESTRATIFICACION	-EXAMEN MINEROLOGICO Y PETROGRAFICO DEL MACIZO ROCOSO TANTO EN NUCLEO COMO EN EXPLORACION DIRECTA	-RAYOS GAMA EN PERFORACIONES CONTENIDO DE ARCILLA, LUTITA.	-ES DIFICIL RECUPERAR MATERIAL MUY DEBIL DEBIDO AL LAVADO DE PERFORACION
-PERMEABILIDAD DE LA MASA	-PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE CAMPO FOTOGRAFIA Y TELEVISION EN EL INTERIOR DE LOS BARRENOS PARA DETECTAR ZONAS DE MUY ALTA PERMEABILIDAD	-LOS MISMOS QUE PARA FRECUENCIA Y ABERTURA DE DISCONTINUIDADES.	-LAS PRUEBAS DE PERMEABILIDAD APORTAN LA MEJOR INFORMACION -LOS OTROS METODOS INDICAN LA PRESENCIA DE ZONA DE MUY ALTA PERMEABILIDAD
-POROSIDAD Y DENSIDAD DE LA MASA	-PRUEBAS DE LABORATORIO EN NUCLEO	-SISMICO DE REFRACCION -RESISTIVIDAD -POTENCIA ESPONTANEO O NATURAL -RADIATIVO	-EN EL INTERIOR DE LAS PERFORACIONES Y DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO
-NIVELES PIEZOMETRICOS	-PIEZOMETROS	-POTENCIA ESPONTANEO O NATURAL -RESISTIVIDAD -RADIATIVOS	
-PESADOS DE ESFUERZOS INTERNOS	-RELAJACION DE ESFUERZOS -FRACTURAMIENTO HIDRAULICO	-NINGUNO	-SOLAMENTE EL FRACTURAMIENTO HIDRAULICO PUEDE AFECTAR A PROFUNDIDADES
-RESISTENCIA A LA COMPRESION Y A LA TENSION DE LA ROCA INTACTA	-PRUEBAS DE LABORATORIO NUCLEOS	-NINGUNO	-LAS PRUEBAS DE LABORATORIO DEBEN SER LA ESTANDAR
-COMPOSICION MINERALOGICA DE LA ROCA	-EXAMEN MINEROLOGICO Y PETROGRAFIA DE LOS NUCLEOS	-ALGUNOS SON APLICABLES PERO NO APORTAN MAS INFORMACION QUE EL EXAMEN DE LOS NUCLEOS	-
-COMPONENTES QUIMICOS DEL AGUA SUBTERRANEA -MODULOS DE ELASTICIDAD DE LA ROCA INTACTA Y DE LAS MASAS ROCOSAS	-MEDICION DE LA CONCENTRACION IONICA Y DE LA SALINIDAD -PRUEBAS DE CAMPO Y DE LABORATORIO	-VELOCIDAD DE ONDAS SISMICAS -PROCEDIMIENTOS ESTATICOS EN EL TERRENO Y EN PERFORACION	-LOS MODULOS DE ELASTICIDAD NO SON DE MUCHA IMPORTANCIA PERO SON UTILES
-TEMPERATURA DE LA ROCA		-SONDA TERMOMETRICA	
-PANORAMA CONJUNTO DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS DEL SITIO	-CORRELACION LITOLOGICA Y ESTRATIGRAFICA ENTRE LAS PERFORACIONES	-LOS METODOS GEOFISICOS UTILIZADOS EN SUPERFICIE Y LA CORRELACION DE LOS RESULTADOS DE LOS	

**CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO REQUERIDO
EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA OBRA SUBTERRANEA
Y METODO DE EXPLORACION EMPLEADO**

CARACTERISTICAS	METODOS DIRECTOS Y SEMIDIRECTOS	METODOS GEOFISICOS	COMENTARIOS
		MÉTODOS APLICADOS EN EL INTERIOR DE LAS PERFORACIONES	
- RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES	- PRUEBAS DE CAMPO Y DE LABORATORIO	- NINGUNO	

II.4 PETROLOGIA.

Con el auxilio de la petrología la información obtenida se analiza desde el punto de vista de la ingeniería, que en lugar de obtener la clasificación fundamental de la roca obtiene la clasificación geotécnica, que representa una invaluable ayuda en la selección del lugar para el emplazamiento de una obra de ingeniería, en este caso del túnel.

Es la rama de la geología encargada del estudio de las rocas, utiliza diferentes métodos para conocer y entender los procesos geológicos que intervienen en el origen de las mismas como son:

1. Geología de campo.
2. Físico-químicos.

Además tiene dos grandes divisiones que son:

1. Petrogénesis: que se ocupa del origen de las rocas.
2. Petrografía : que es la encargada de la parte puramente descriptiva.
 1. La **petrografía** se utiliza como auxiliar para la solución de problemas en donde la Litología es confusa o en donde se requirió delimitar zonas de alteración, también para estimar cualitativamente el comportamiento mecánico de las rocas (resistencia, deformabilidad y permeabilidad).
 2. El estudio **petrográfico** se debe de utilizar para la determinación del origen de las rocas y su clasificación, esto permitirá relacionar las propiedades

mecánicas de la roca (resistencia, deformabilidad y permeabilidad) con su origen y naturaleza (son las propiedades físicas y químicas de los minerales constitutivos y del conjunto, incluyendo las discontinuidades existentes) que es un antecedente para la relación entre el tipo de roca y su comportamiento mecánico.

Secuencia de estudio petrográfico. En el estudio petrográfico de roca, en el laboratorio se consideran cinco partes:

Cada una de estas partes mantiene una relación directa con los acontecimientos geológicos que intervienen en la génesis de la roca, las dos últimas partes son el resultado de las tres primeras.

1. **Datos de campo:** Son los datos del lugar donde se colectó la muestra en estudio, la información obtenida permite definir si la muestra pertenece a un contacto entre dos formaciones, a la periferia de un intrusivo, a una cuenca sedimentaria y son determinantes en cuanto al origen de la roca.
2. **Descripción macroscópica:** Se hace con base en un estudio megascópico de un ejemplar de mano, tomando en consideración el color, estructura (conjunto de rasgos morfológicos macroscópicos de la roca debido a discontinuidades o deformaciones), textura y los minerales observables ya sean a simple vista o con ayuda de la lupa y la navaja; otra característica importante es el grado de alteración y fracturamiento y la característica del relleno.
3. **Descripción microscópica:** Esta es la parte principal del estudio petrográfico que toma en cuenta la textura (se refiere a las relaciones entre los componentes mineralógicos de la roca, la relación involucra tamaño, forma y disposición de los minerales), los minerales primarios o esenciales, los accesorios y los de alteración (o secundarios), así como las características de la matriz o el cementante según sea el tipo de roca. Para reconocer los minerales constitutivos y las características de la matriz se utiliza el microscopio polarizante, en éste se pueden determinar los diferentes tipos de minerales que componen la roca, aprovechando las propiedades ópticas de los minerales.

La descripción de la textura a nivel megascópico estará un tanto restringida, sobre todo en rocas de grano muy fino (afaníticas), pero la descripción microscópica es importante y de mucha ayuda.

4. **Origen de la roca:** El conjunto de características tales, como contenido mineral, textura, estructura, etcétera con el apoyo de la relación de campo, reflejan el origen de la roca; si es de origen ígneo, independientemente de su contenido mineral, tendrá una textura característica que estará en función de tres componentes:
 - Grado de cristalinidad.
 - Tamaño.
 - Fábrica de los minerales.

Para rocas de origen sedimentario se tienen dos tipos principales de texturas: clásticas y no clásticas; las primeras son el resultado de los procesos morfológicos y las segundas, resultan de procesos químicos o bioquímicos.

Las rocas de origen metamórfico tienen dos tipos de texturas principales:

- **Foliadas:** Se debe a un metamorfismo de tipo regional (fusión de temperatura y presión).
 - **No foliadas:** Se producen durante el metamorfismo de contacto (fusión de la temperatura).
5. **Clasificación petrográfica:** Toda la información obtenida desde la relación de campo hasta el origen de la roca (incisos 1 al 4), se compara con un sistema de clasificación que puede ser base química o mineralógica, permitiendo determinar la clasificación petrográfica o fundamental es la base de su nomenclatura dentro de la geología de la roca.

II.5 IMPACTO AMBIENTAL:

Para evaluar el impacto de la obra es necesario discriminar los impactos relevantes de aquellos que no lo son. Debido a que aún no comienza la etapa de

construcción, se estiman las áreas de influencia y comportamiento de los impactos.

-La evaluación-análisis-prospectivo del proyecto de construcción del túnel, se toma el caso más desfavorable de impacto, lo que genera áreas de influencia mayores a las que se presentarán realmente.

La evaluación de impacto ambiental se hace considerando la construcción su posterior operación, utilizando la metodología de superposición de mapas, que consista en representar en un mapa base, la zona donde se implantará el proyecto, con sus asentamientos humanos y componentes del medio que se verán afectados.

Sobre este mapa base se sobreponen otros en los cuales se han presentado los campos de influencia de los impactos o los aspectos finales del proyecto al ser concluido al superponerse todos los mapas se encuentran los puntos críticos.

Etapa de construcción:

Se consideran los siguientes impactos:

Suelo: Cambios físicos, producidos por la ejecución del proyecto como son: movimientos de tierra trasplantes o corte de árboles, movimiento de maquinaria y los cambios relacionados con la conclusión de la obra, como cambios de la estética del lugar y beneficio de la población.

Ruido: Con la determinación del impacto por ruido se procede a considerar los valores obtenidos en la distancia máxima de dispersión por ruido generado por trascavos, Bolldoters, compresores y camiones de carga.

La generación de polvo se consideran los valores observados de distancia máxima de dispersión de polvos.

De acuerdo a los lineamientos de impacto ambiental en el caso de la construcción de túneles son pocas las consideraciones que se deben tomar en cuenta.

1. No se altera el equilibrio de los ecosistemas.

2. Se mantiene su integridad física y su capacidad productiva.
3. No desfavorece la erosión, degradación o modificación de sus características topográficas, con efectos ecológicos adversos.

Con esto no se excluye que dentro del proyecto de construcción no se realice el estudio de impacto ambiental.

III. CARACTERISTICAS GEOMETRICAS.

El aspecto importante para el proyecto y construcción del túnel, es su geometría. Para definirla requiere coordinación con todas la especialidades que intervienen y conjuntar las restricciones marcadas por cada una de ellas.

Las características técnicas de los túneles dependen del papel de la obra y del terreno en el que deben ejecutarse. Se debe considerar que las obras subterráneas son caras por lo tanto se reducirán al mínimo; una vez en servicio la obra, es difícil modificarla o ampliarla.

III.1 LOCALIZACION.

Trazo y perfil longitudinal: Son funciones esenciales de la topografía del terreno, pero dependen también de las condiciones de ejecución de las obras.

En los túneles rectilíneos su construcción es menos complicada que los curvos, refiriéndonos a la precisión del replanteo del eje en los de pequeña longitud no tiene tanta importancia. Para los túneles largos se excava por ambos extremos a la vez, adoptando el trazo en línea recta por ser el más económico y exacto en lo que se refiere a la coincidencia entre ambos ataques. Con relación al perfil longitudinal la solución no depende enteramente del proyectista, sino de la configuración del terreno y del papel que ha de desempeñar el túnel.

La construcción de túnel en pendiente no presenta dificultades particulares si se exceptúa la evacuación de las aguas subterráneas, si existen. Es preferible construir los túneles subiendo desde aguas abajo hacia aguas arriba, con una pendiente que permita la libre eliminación de las mismas hacia la boca del túnel por cunetas dispuestas a este fin. Esta pendiente hará menos difícil el empleo de las palas cargadoras lo que disminuirá el costoso transporte de escombros. La pendiente alcanzada para que el equipo trabaje es de 2.4 % evitando frenado importante del equipo (figura III.1).



Túnel de contrafuertes para vías férreas (transpirenaica).

figura III.1

Para el caso de ataque en descendente (contrapendiente) las aguas se concentran en el avance y es necesario evacuarlas por bombeo que es más costoso, además puede resultar catastrófico si se encuentran bolsas de agua subterráneas, corriéndose el riesgo de que la obra se sumerja. (figura III.2).

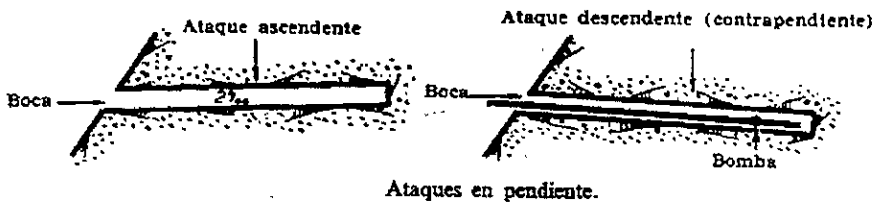


figura III.2

El ataque horizontal no presenta mayor inconveniente excepto el del bombeo para la evacuación de las aguas de filtración. Por ello, se debe atacar el túnel subiendo para que la eliminación de las aguas se realice normalmente, en caso de ser necesario se emplearán bombas en el avance del ataque en contrapendiente.

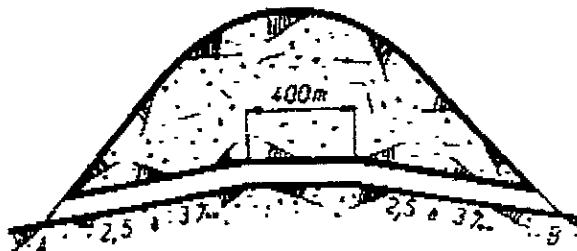
Cuando son previsibles bombeos en contrapendiente, se utilizan:

- Bombas alternativas de pistón de aire comprimido o eléctricas.

- Bombas centrífugas de simple o doble efecto, de aire comprimido o eléctricas, generalmente sumergidas y funcionando bajo el agua.

En caso de que el túnel sea largo hay que prever estaciones intermedias de bombeo en el frente de ataque las bombas deben ser de aire comprimido. En terrenos secos se ataca indiferentemente subiendo o bajando, en túneles de contrafuerte para carreteras y vías férreas se debe conservar una pendiente generalmente ascendente en el sentido del valle.

En túneles largos como los de cumbres, (figura III.3) es conveniente tener pendientes a los lados para poder trabajar por ambos ataques, evacuando las aguas por gravedad. Si las cabezas están sensiblemente al mismo nivel se adopta una pendiente y una contrapendiente de 2.5 a 3 mm que permite una buena evacuación de las aguas. En caso de que las dos bocas estén en distintos niveles, se prevén dos pendientes diferentes, en la boca más alta se toma la mínima de 2mm correspondiente a la fluencia crítica de las aguas, en la más baja se adopta una pendiente fuerte para equilibrar si es posible, la longitud de ambos tramos.



. Túnel de Cumbre.

figura III.3

En los túneles subfluviales el problema se plantea de forma diferente ya que es necesario ejecutar los túneles bajando. Las obras de filtración se evacúan durante la obra mediante bombeo, siendo imprescindible la evacuación del

agua cuando el túnel está en servicio, ésta se concentra en pozos de achique donde se evacúa generalmente por bombeo.

Galerías hidráulicas:

En los túneles carreteros y vías férreas no hay limitaciones de curvas y pendientes. Se utilizan trazados quebrados o curvos de tal forma que se aproximen a gargantas convenientemente elegidas en las que es posible establecer ventanas de ataque intermedio. El perfil longitudinal está constituido por secciones de inclinaciones variables que pueden llegar hasta la verticalidad (pozos), existiendo entre ambos extremos de una galería hidráulica diferencia de nivel de varios centenares de metros.

Perfil transversal:

Depende de la función de la obra, condiciona las dimensiones del gálibo libre interior que constituye su hueco, y de la naturaleza del terreno que determina el revestimiento necesario para proteger el vacío interior. Siempre se deben estudiar los diversos perfiles correspondientes a los terrenos de diferente naturaleza que pueden encontrarse durante la obra para adaptarse continuamente al terreno encontrado, de esta forma se tendrá el gasto mínimo compatible con la máxima seguridad.

Instalaciones superficiales:

En la etapa de planeación del proyecto del túnel, se tiene que considerar el área necesaria para las instalaciones de superficie así como la distribución adecuada, ésta se considera durante el periodo de localización de lumbreras de acceso al túnel, y tomando en cuenta el espacio que requiere lo siguiente:

Rezaga:

- Torre de manto.
- Lumbrera.
- Malacate
- Entrada y salida de camiones de rezaga.
- Talleres.
- Eléctrico.

- Mecánico.
- Soldadura.
- Plantas.
- Luz.
- Bombeo.
- Compresores.
- Concreto.

Administración:

- Almacén.
- Dormitorios.
- Oficinas.
- Comedor.

Lumbrera de acceso:

La superficie requerida en cada lumbrera será en función de las características de operación de la misma.

Constituye el punto de inicio del túnel y su distribución a lo largo del trazo depende de varios factores, como son:

- Programa de obra.
- Disponibilidad de área en la superficie.
- Posibilidad de afectación.
- Perfil del túnel.
- Perfil estratigráfico.
- Procedimiento de excavación.

El diámetro de cada lumbrera debe ser estudiado en función del procedimiento de excavación, del equipo que pasará a través de ella y de las instalaciones con que toda obra subterránea debe contar como son (figura III.4):

- Escalera de emergencia.
- Calesa de personal.
- Tubería de ventilación.
- Bote de rezaga.

- Tubería de aire comprimido.
- Tubería de cemento y agregados.
- Tubería de bombeo.
- Ductos eléctricos.

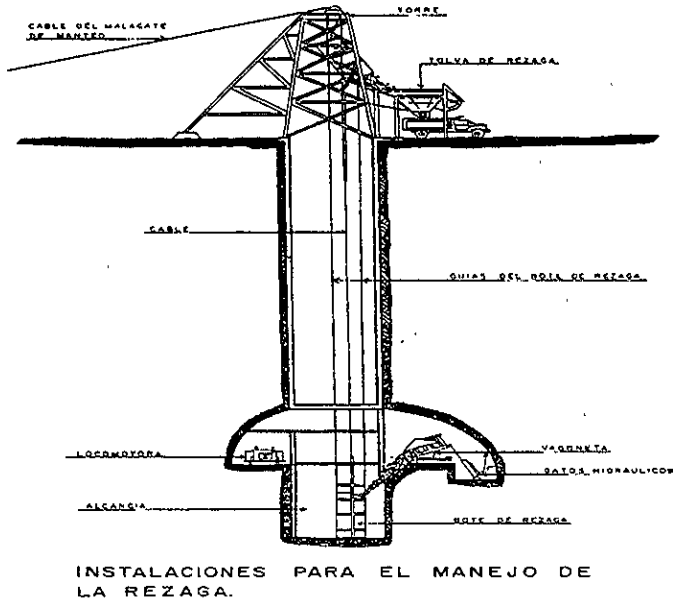


figura III.4

Zona de encapillado

Encapillado para maniobras.

Corresponde a la terminación de la lumbra de acceso y al inicio de la excavación del túnel. Su dimensionamiento debe considerar, además de todas las instalaciones que bajan por la lumbra, el espacio necesario para:

- Vías para las vagonetas de rezaga.
- Tolva para rezaga.
- Silos de cemento.

- Vías para acceso a tolvas de agregados.
- Tolvas para concreto durante el revestimiento.
- Carcamo y alcancía.

Tiene dimensiones mayores que el túnel normal ya que corresponde al lugar donde se realizan todas las maniobras para acceso o salida de la superficie al túnel o viceversa.

III.2 DIMENSIONES.

Sección de excavación:

La geometría de las secciones de túnel deben diseñarse con líneas cuyo lugar geométrico esté bien definido, formando arcos y evitando al máximo las inflexiones. Deben de considerarse varias alternativas, seleccionando la que ofrezca estabilidad y menor área de excavación.

El dimensionamiento de una sección de túnel, depende del uso que tendrá el mismo y puede servir para:

- Conducción de agua.
- Carretero.
- Vías de ferrocarril.
- Metro.
- Minas.

Secciones del túnel para conducción de agua:

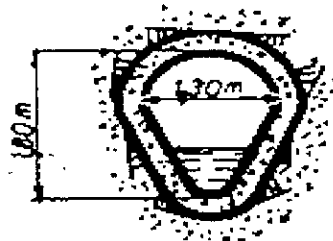
Se debe tomar en cuenta para diseñar la geometría:

- El gasto.
- El revestimiento primario y definitivo.
- El procedimiento de construcción.
- Las características del suelo.

Combinando estos factores se define la sección del túnel

Alcantarillas:

En las alcantarillas se tienen pequeñas pendientes y deben ser visibles, se adopta un perfil ovoidal con cuneta en la parte inferior para aumentar la velocidad del agua (figura III.5).



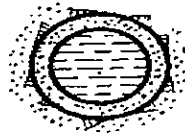
Alcantarilla.

figura III.5

La altura debe ser como mínimo de 1.80 metros con una anchura de 1.30 metros a la altura de los hombros, en general es suficiente un revestimiento de hormigón de 20 centímetros.

Acueductos y galerías hidráulicas:

Se adopta la forma circular que a igualdad de sección recta da el máximo caudal de agua, es la forma la que da una resistencia óptima a los empujes del terreno con el revestimiento más delgado (forma económica) (figura III.6).



Galería hidráulica.

figura III.6

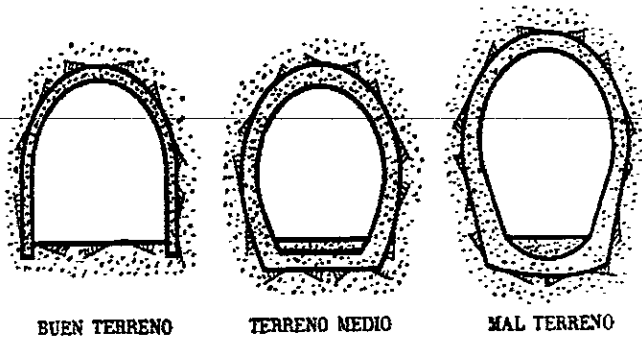


figura III.9

Secciones transversales de túneles para vías férreas:

En buen terreno (roca) se utilizan muros verticales y bóvedas de medio punto, en terrenos menos resistentes se utilizan secciones más aproximadas a la forma ovoidal, ensanchándolas, inclinando los muros y añadiendo una solera interior, en otros casos, se utiliza la bóveda dándole una forma ojival.

En la ciudad a causa de la falta de alturas, se rebajan las bóvedas aumentando el espesor para los túneles metropolitanos, en las estaciones se presenta respecto a su anchura una sección aún más rebajada.

Secciones para vías de ferrocarril:

Para el diseño de la geometría de las secciones de túnel para vías ferroviarias debe considerarse:

- Revestimiento primario y definitivo.
- Procedimiento de excavación.
- Características del suelo.
- Condiciones de gálibo horizontales y verticales.

Sección de los túneles del Metro:

El espesor del revestimiento depende de la naturaleza del terreno, para las bóvedas de roca compacta pero heladiza basta con un revestimiento delgado de mampostería de hormigón trasdosado paralelamente.

- Túnel de una vía: 35 - 50 centímetros.
- Túnel de dos vías: 50 - 70 centímetros.

Si se tiene caída de bloques o si se trabaja en terreno poco consistente, se aumenta el espesor:

- Túnel de una vía: 70 centímetros.
- Túnel de dos vías: 90 centímetros.

En caso de tener empujes se lleva en clave a un metro o incluso 1.50 metros, aumentando el espesor en arranque; la bóveda no se trasdosa paralelamente. Los muros laterales tienen un espesor que varía de 0.70 a 1.50 metros, según el terreno, en cuanto a la solera puede bastar un espesor menor (50 a 70 centímetros).

Secciones para vías del Metro:

En la geometría para la sección del túnel en el paso de trenes (Metro) se consideran como factores los siguientes (figura III.10).

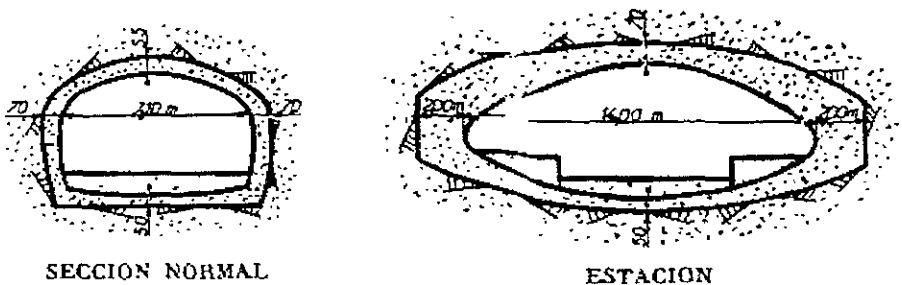


figura III.10

Dimensiones interiores:

a) Gálibo estático de los trenes y entrevía.

b) Gálibo dinámico de los trenes.

- Factores de movimiento.
- Desplazamiento hacia adentro de una curva.
- Desplazamiento hacia afuera de la curva.
- Sobre-elevación.

Banquetas para paso de hombre y espacio para señalización:

Para el paso de personal para realizar las actividades propias de mantenimiento a las instalaciones, se deben dejar banquetas o espacios de un mínimo de 0.60 metros para cada lado de la sección del túnel con una altura mínima de 1.80 metros para las señales restrictivas y semáforos, considerando para el gálibo de los trenes el espacio necesario con una distancia libre mínima de 0.30 metros.

Plataforma de vía:

En los túneles del Metro se ha considerado un espesor de 0.30 metros de balasto por debajo del lecho de los durmientes y en la losa de piso un parteaguas de 0.15 metros para drenaje transversal.

Gálibo estático de los trenes y entrevía:

- Los carros utilizados en el Metro tienen un ancho de 2.50 metros y alto de 3.60 metros.
- La distancia mínima entre carros es de 0.40 metros lo que define una entrevía mínima entre carros de 2.90 metros, pudiendo aplicarse de acuerdo a las necesidades.

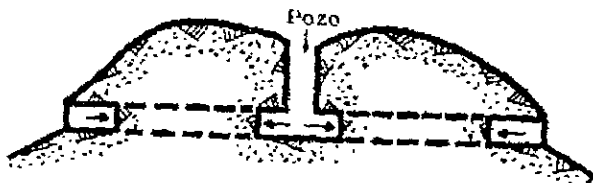
IV. EXCAVACION Y/O PERFORACION.

En el transcurso de la excavación de obras subterráneas se enfrenta con formaciones geológicas sumamente variadas que imponen el empleo de diferentes métodos de construcción y en ocasiones la aplicación de técnicas auxiliares que permiten modificar la permeabilidad o resistencia del subsuelo con el fin de hacerlo apto para su excavación.

IV.1 METODOS DE EXCAVACION.

La construcción de los túneles ordinarios plantea dos problemas principales: la perforación, es decir, la ejecución de la excavación, y la ejecución del revestimiento. Estos trabajos se efectúan avanzando a partir de un número restringido de bocas de ataque, los tajos de excavación y revestimiento se escalonan de atrás de cada frente de ataque, y la duración de realización de la obra depende del número de bocas de ataque que pueden utilizarse simultáneamente. Evidentemente, para ir de prisa conviene multiplicar los frentes de ataque, un túnel largo se ataca siempre por los dos extremos y, frecuentemente, no es posible atacarlo por más puntos.

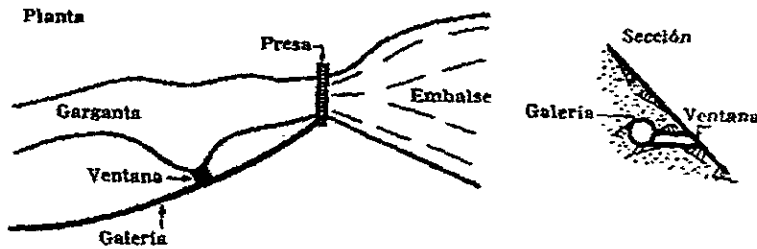
Si la altura del obstáculo sobre el túnel lo permite, pueden crearse ataques intermedios descendiendo por pozos hasta la plataforma del túnel, avanzando en galerías a uno y otro lado del fondo de estos pozos que se utilizan para la evacuación de los escombros (figura 1.IV). En obras de montaña este método se ha utilizado con pozos muy profundos (varios centenares de metros). El suplemento de gastos ocasionados por la construcción de los pozos es compensado a veces por la ventaja de una mayor rapidez de ejecución.



Túnel con cuatro frentes de ataque.

figura 1.IV

Por otro lado estos pozos pueden utilizarse después como pozos de ventilación, para la ejecución de túneles que sirven de galerías de conducción en las instalaciones hidroeléctricas, pueden crearse ataques intermedios mediante ventanas en puntos juiciosamente elegidos en los que el trazo de la galería se aproxima a gargantas naturales (figura 2.IV).



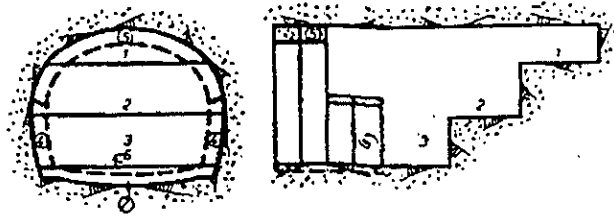
Galería con ventana de ataque.

figura 2.IV

Estos accesos horizontales al túnel se obturan y hormigonan una vez terminada la obra. A veces, se cierran estas ventanas mediante puertas impermeables que permiten la realización de visitas o de obras de conservación

Método de ataque a plena sección o método inglés: Los túneles de pequeña sección (menos de 15 m²) son los que se atacan a plena sección dentro de ciertos límites, también los túneles mas importantes pueden atacarse a sección plena para terreno extraído sin explosivos (arcillas, tierras compactas, areniscas, arenas y gravas aglomeradas) y naturalmente, en roca que exige el empleo de explosivos (roca dura e intacta). Se puede utilizar el ataque a plena sección realizando la excavación en toda la anchura del túnel, con varios escalones de ataque (figura 3.IV).

La excavación se efectúa por franjas horizontales comenzando por la parte superior, lo que presenta el inconveniente de que la vía de evacuación definitiva al nivel del piso inferior, exige varias actuaciones.

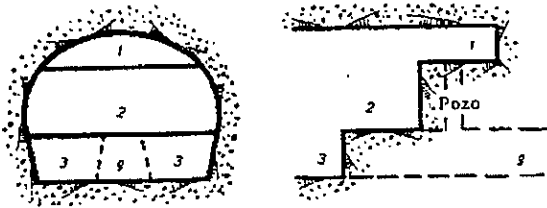


Ataque a plena sección con varios pisos

1. escalón superior; 2. escalón intermedio; 3. escalón inferior; 4. pilares; 5. bóveda; 6 y 7, solera (eventualmente)

figura 3.IV

Pueden evitarse éstas haciendo avanzar en el eje del túnel del escalón inferior por delante del escalón superior, una galería de base que sirve para la evacuación por pozo de los escombros producidos en los escalones superiores.



Ataque a plena sección. Variante con galería de base.

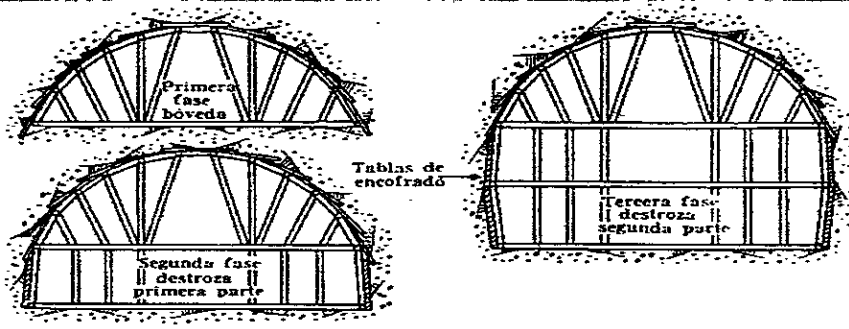
g. galería de base; 1, escalón superior; 2, escalón intermedio; 3, escalón inferior.

figura 4.IV

El ataque a plena sección presenta la ventaja de permitir las voladuras en una sección que da a los obreros más espacio que en las galerías estrechas características de otros métodos, éste es práctico en roca franca cuando no hay necesidad de revestir, si el terreno exige revestimiento, especialmente en terrenos extraídos sin explosivos (arcillas duras, tierras compactas, areniscas, arenas y gravas aglomeradas). En este caso el revestimiento se hace por etapas (figura 5.IV).

La coronación de la bóveda se reviste sobre puntales radiales (apuntalamiento en abanico). Estos puntales soportan elementos longitudinales tras los que se

hace deslizar las planchas de encofrado, apoyando los puntales en vigas transversales.



Apuntalamiento de un túnel a plena sección.

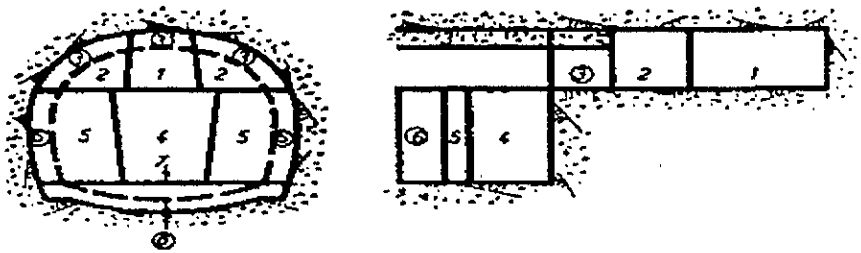
figura 5.IV

En el escalón inferior se colocan travesaños y se establece apuntalamiento entre éstos y los de la etapa de bóveda, continuando así en cada escalón. Esto exige un gran volumen de madera y trabajos de montaje delicado.

El revestimiento se ejecuta tras la excavación comenzando por los muros y terminando por la bóveda. Esta ejecución lógica del revestimiento es una de las ventajas del método, se puede ejecutar el revestimiento en su totalidad, muros y bóveda por anillos de 2 a 3 metros de longitud. No presenta ninguna dificultad en los terrenos resistentes que se mantienen sin revestimiento. Para este caso, se realiza a menudo con un encofrado metálico rodante con la forma del gálibo interior del revestimiento de hormigón que se desplaza a medida que se realiza el avance.

Método de la galería de clave o método belga:

Terreno bueno Consiste en ejecutar rápidamente la bóveda para proteger la obra por encima, terminando después el revestimiento por los muros (figura 6.IV).



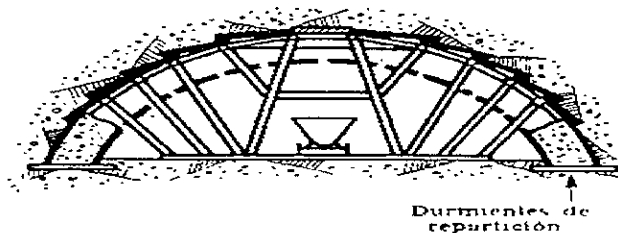
Método de la galería de coronación en buen terreno.

1. galería de coronación; 2. excavación de la bóveda; 3. bóveda; 4. destroza;
5. zona de los muros; 6. muros; 7 y 8 solera (eventualmente)

figura 6.IV

Se ataca el túnel en galería de avance de pequeña sección en el eje del túnel y en la parte superior. La anchura de esta galería varía de 2.50 a 3 metros, su altura de 2 a 4 metros y su sección de 5 a 12 m². Se construye esta galería a nivel de los arranques de la bóveda, ensanchando después a derecha e izquierda para dejar al descubierto la bóveda, estos ensanches se realizan con un rendimiento de excavación muy superior al de la galería de avance, pues se trabaja por los costados y no de frente. (figura 7.IV).

A medida que se avanza se apuntala la bóveda mediante puntales radiales que se apoyan sobre la destroza y al final de esa fase la obra tiene la forma de una excavación en semicírculo correspondiente a la parte superior del gálibo del túnel.



Entibación y construcción de la bóveda

figura 7.IV

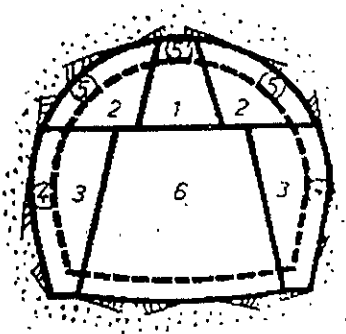
Después se construye la bóveda haciéndola descansar directamente sobre el terreno si es resistente o sobre tablonos longitudinales juntos que reparten las presiones si el terreno es menos bueno. También es posible utilizar apoyos de hormigón armado.

Cuando la bóveda ha endurecido, se quitan los encofrados y los puntales y la bóveda protege a la obra durante las operaciones siguientes:

- Se ataca la excavación de la parte inferior del túnel excavando en la destroza una cuneta central que se reviste si es necesario.
- Excavación en el emplazamiento de los muros del revestimiento partiendo de la cuneta hacia los costados, realizando excavaciones de pequeña longitud (4 a 6 metros) que se ejecutan alternativamente a derecha e izquierda .
- Ejecutar los muros subiendo bajo la bóveda ya construida. Operando de esta forma por elementos de pequeña longitud, no se compromete la seguridad de la bóveda, que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya construidos.
- Se termina por la construcción de la solera cuando es necesaria.

Este método, adecuado para terrenos resistentes, es seguro siempre y cuando la resistencia del terreno sea suficiente para que la bóveda no sufra asentamiento antes de que se le haya construido debajo los muros. Sin embargo presenta el inconveniente de exigir vías de evacuación de los escombros a diferentes niveles: la galería de avance que evacúa por la parte superior del túnel y los últimos tajos de excavación de la destroza al nivel de la solera al llegar a unirse las dos etapas, los escombros de la galería de clave deben hacerse bajar al piso inferior. En cambio, no exige más que entibación muy sencilla y de importancia relativamente pequeña.

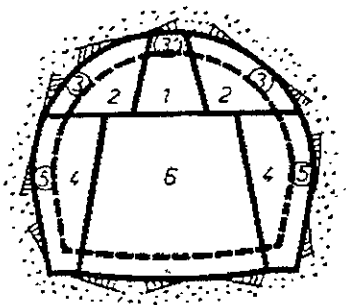
Caso de terreno mediocre o malo. Cuando el terreno es poco resistente y exige revestimiento de obra (arcillas blandas, tierra seca, arenas húmedas, grava aglomerada, grava, tierras vegetales), hay que modificar el método de excavación de la destroza y de construcción de los muros, ya que si no la bóveda sufrira asentamiento durante la ejecución de la cuneta y de la destroza. (figura 8.IV).



Método de la galería de clave en mal terreno (variante)
 1, galería de clave; 2, excavaciones de la bóveda; 3 y 3', excavación de los muros; 4, muros; 5 y 5', bóveda; 6, destrosa y solera (eventualmente)

figura 8.IV

Después de haber excavado bajo la bóveda y de haberla revestido como antes, se excava en zanja revestida el emplazamiento de los muros por elementos cortos ejecutados alternativamente a derecha e izquierda (figura 9.IV).

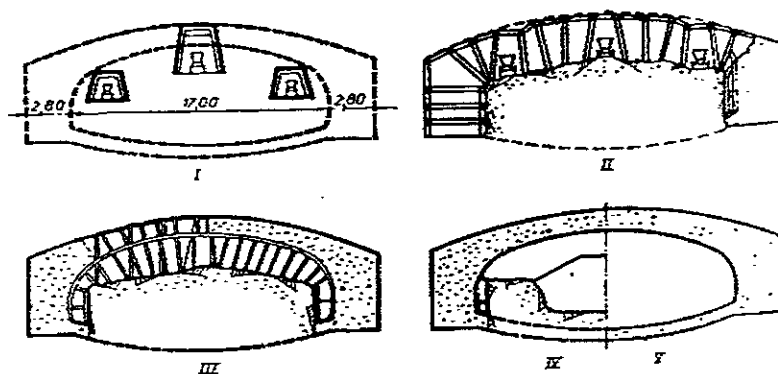


Método de la galería de clave en mal terreno
 1, galería de clave; 2, ensanches de la bóveda; 3 y 3', bóveda; 4, excavación de los muros; 5, muros; 6, destrosa y solera (eventualmente)

figura 9.IV

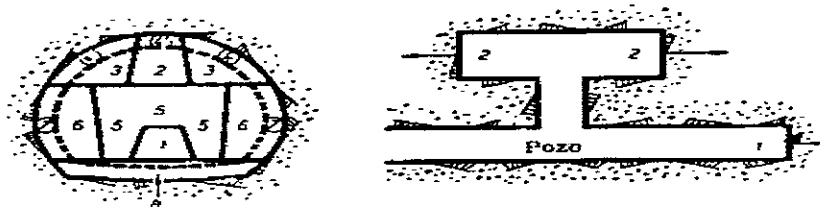
En estas excavaciones se construyen los muros bajo la bóveda primeramente, y después se quitan los puntales y se excava la destróza a plena sección, es posible ejecutar los muros en zanjas revestidas, se construye la bóveda y se excava la destróza a plena sección. Estos son onerosos como consecuencia de la necesidad de ejecutar zanjas revestidas.

Debe emplearse preferentemente el segundo método en los túneles de gran luz. El segundo, es el que se ha utilizado con tres galerías en clave (figura 10.IV).



Diferentes fases de perforación
figura 10.IV

Método de las dos galerías o método austriaco: El método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel. En ellas se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra (figura 11.IV).



Método de las dos galerías

1, galería de base; 2, galería de coronación de la bóveda; 3, excavación de la bóveda; 4 y 4', bóveda; 5 destroza; 6, excavación de los muros; 7, muros; 8, solera (eventualmente)

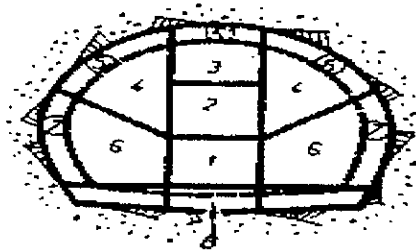
figura 11.IV

Cuando esta galería ha avanzado cierta longitud, se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando después una segunda galería por encima de la primera y trabajando hacia delante y hacia atrás (figura 11.IV).

Los escombros de la galería se envían por el pozo a la galería inferior que sirve para evacuar sin transbordo todos los escombros de los diferentes ataques. Por otro lado, es posible multiplicar los pozos y los ataques en la galería de coronación.

Una vez perforada la galería de clave, se continúa como en el método belga: a)excavación de la bóveda, b)construcción de bóveda, c) excavación de destróza, d)excavación de los muros y e)construcción del revestimiento de muros.

Puede evitarse la perforación de la segunda galería de clave mediante un corte de clave en dos fases de galería de base (figura 12.IV).



Galería de base con corte de clave Método de las dos galerías

1. galería de avance; 2 y 3, corte de clave; 4. excavación de riñones; 5 y 5', bóveda. 6. destróza; 7. muros; 8. solera (eventualmente)

figura 12.IV

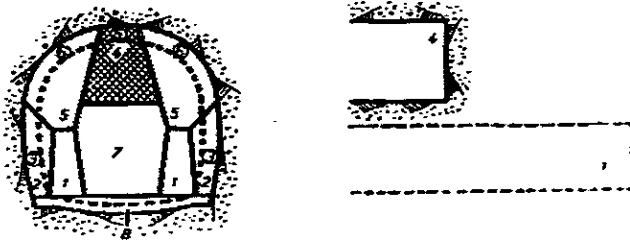
El método de la galería de base se presenta a la evacuación de los escombros sin desplazamiento de la vía y facilita la eliminación de las aguas de infiltración. Permite multiplicar los ataques de la galería de clave y de los tajos posteriores, lo que se traduce en una aceleración de la ejecución del túnel.

Método de tres galerías o método alemán: Este método se caracteriza por la conservación de la destróza la terminación de los muros y de la bóveda. La

destróza sirve de apoyo para todos los apuntalamientos y cimbras y evita el empleo de andamios de gran luz. Para que el método resulte interesante es necesario que la sección del túnel sea bastante grande, superior en principio a 50 m² (figura 13.IV).

Se atacan dos galerías de base, derecha o izquierda del túnel. Se ensancha después y se construyen los muros en terreno malo, apuntalados contra la destróza.

Método de las tres galerías



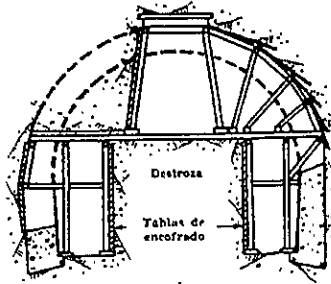
1. galería de base; 2. ensanche de los muros; 3. muros; 4. galería de clave; 5. excavación de la bóveda; 6 y 6. bóveda; 7. solera (eventualmente)

figura 13.IV

Más atrás se ataca una galería de coronación que se ensancha construyendo la bóveda haciéndola descansar sobre los muros ya construidos y sobre puntales apoyados en la destróza.

Cuando la bóveda ha endurecido pueden quitarse todos los puntales excavando la destróza. Después, se ejecuta la solera para completar el revestimiento por franjas de algunos metros de longitud para evitar excavar completamente la destróza antes de terminado el revestimiento (figura 14.IV).

La sección del túnel durante su construcción muestra que gracias a la destróza, la seguridad contra los empujes laterales del terreno queda asegurada, pero en cambio el costo del método que exige la perforación de tres galerías de avance.



Sección de un túnel atacado con tres galerías
 figura 14.IV

Excavación con escudo.

El escudo se puede dividir en tres partes:

1. La cachucha frontal que es el borde de corte del escudo, formada por una placa de acero con soldadura de carburo de tungsteno en su extremo y en forma de flecha. Tal como muestra el croquis de la figura 15.IV (detalle), esta parte es ligeramente de mayor diámetro que el resto del escudo, de tal manera que proporciona una disminución de la resistencia al deslizamiento entre el escudo y el terreno. Una segunda función de la cachucha es proporcionar a los trabajadores que excavan al frente, una protección contra pequeños caídos del terreno en el frente, y además proporcionar un cierto soporte al propio frente de excavación.
2. La parte intermedia se destina a alojar los elementos de empuje tanto las plataformas delanteras como los gatos para el avance del escudo también aloja el compartimiento de mando del sistema hidráulico que acciona el escudo, proporcionando un lugar para las maniobras de erección de las dovelas que forman el revestimiento provisional, y finalmente aloja las guías para dirigir el escudo mediante el sistema de rayo láser.

El faldón del escudo, es diseñado para la erección de las dovelas dentro de la coraza de metal. En esta forma, la única parte descubierta del terreno sin soporte es el frente de ataque, el cual ocasionalmente se tiene adomado con madera. En el caso de los escudos utilizados en la excavación del túnel, la longitud de este faldón es de 1.75 m aproximadamente.

En las figuras 15.IV y 16.IV, se muestran las dimensiones del escudo empleado en la construcción, así como las dimensiones y características de las dovelas que forman el ademe provisional del túnel en los tramos excavados con este método.

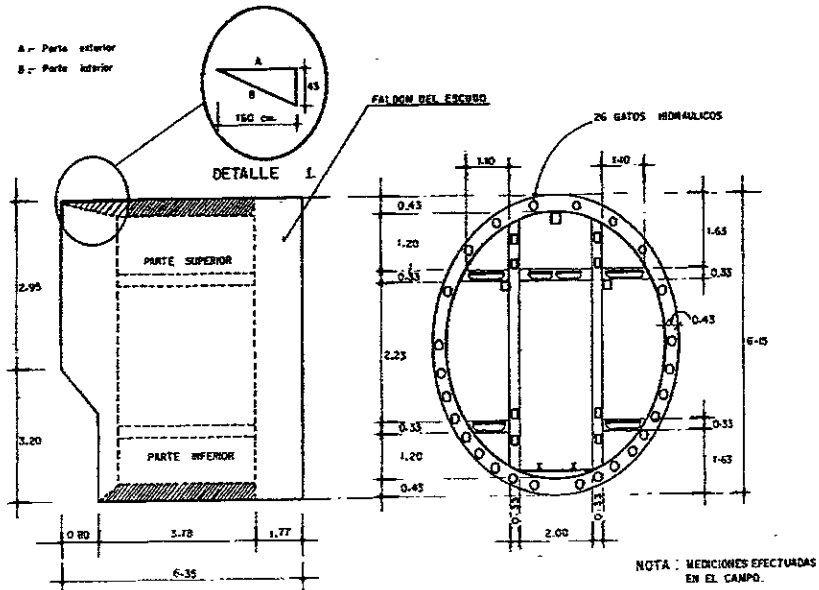


figura 15.IV

Proceso de excavación:

Durante el trabajo de excavación con escudo se efectúan las siguientes actividades:

1. Empuje de los gatos para el avance del escudo. Una vez rezagado el producto de la excavación y limpio el frente, se procede a empujar el escudo accionando los gatos hidráulicos, los cuales se apoyan en el anillo

de dovelas colocado en el propio faldón del escudo. El avance en cada ciclo es de 75 centímetros, con objeto de tener el espacio suficiente para la colocación de un anillo de dovelas; al mismo tiempo que se accionan los gatos de empuje, se retraen en los gatos frontales, manteniendo siempre una presión de los mismos contra el ademe de madera al frente de la excavación (figura 15.IV).

2. Bajar la mampara. Una vez avanzado el escudo, la mampara posterior se baja colocando un pequeño tramo de vía, con objeto de que la rezagadora penetre hasta el frente de la excavación por el interior del escudo; al mismo tiempo, se efectúa la inyección de gravilla entre las dovelas y el terreno; inmediatamente detrás del faldón del escudo. El objeto de la inyección de gravilla es lograr el contacto entre el terreno y la dovela, ya que generalmente queda un espacio dejado por el propio espesor de la camisa del escudo y por la ranura efectuada al frente de la excavación.
3. Excavar la ranura perimetral para el siguiente avance del escudo. Esta excavación se realiza por medio de pistolas neumáticas manuales. La excavación hacia el frente del escudo se realiza en forma de punta de flecha, de 75cm. de profundidad y 80cm. de ancho aproximadamente. El objeto de esta ranura es disminuir la resistencia del terreno a la penetración del escudo; esta excavación se efectúa en el perímetro del túnel.
4. Colocación de un anillo de dovelas que forma el revestimiento provisional de la excavación. Una vez colocado el anillo de dovelas, se procede a apretar la tornillería que une cada dovela (figura 16.IV); a la vez que se están apretando los tornillos se colocan unos puntales metálicos en el anillo que queda fuera del faldón del escudo, con objeto de impedir su deformación, ya que por peso propio de las dovelas tiende a disminuir el diámetro vertical y aumentar el diámetro horizontal.

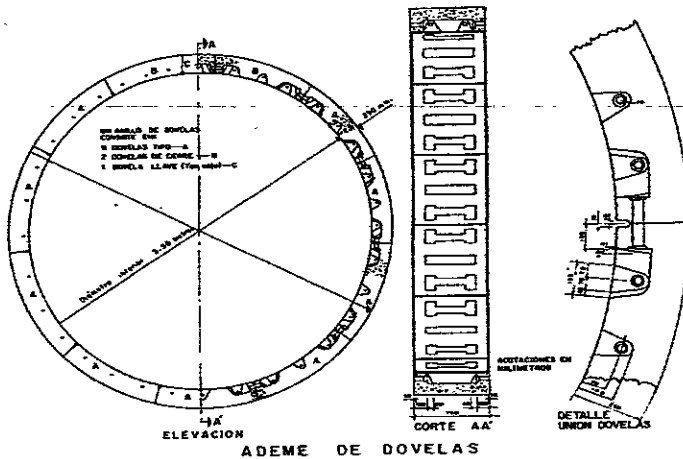


figura 16.IV

5. Excavación del frente. La excavación del frente del escudo se efectúa en tres partes, iniciando la excavación por la parte superior, mientras se baja la mampara; se continúa en el segundo y tercer tercio, al mismo tiempo que se inyecta la gravilla, se colocan los puntales y se ajustan los tornillos de las dovelas.
6. Ademe del frente con madera. Al terminar la excavación de cada una de las tres secciones del frente, éste se adema antes de proceder a la excavación de la sección inmediata inferior, troquelando el ademe de madera con los gatos frontales que el escudo lleva en su parte delantera. El banqueo y ademe de la sección superior se efectúa empleando la plataforma de trabajo que proporcionan los propios gatos y plataformas frontales (figura 15.IV).
7. Rezaga de la excavación. Una vez bajada la mampara, la rezagadora entra al frente del escudo y transporta el material hacia las vagonetas, las cuales son arrastradas con locomotora hasta la lumbrera; la rezaga se efectúa al mismo tiempo que se realiza la excavación y el ademado del tercio medio y del tercio inferior del frente (figura 22 IV).

8. Subir la mampara. Terminada la excavación y la rezaga, se sube la mampara iniciando un nuevo ciclo de trabajo, empujando el escudo hacia el frente apoyándolo en el último anillo de dovelas colocado.
9. Inyección entre dovelas y terrenos. Seis metros atrás del faldón del escudo, se procede a efectuar una inyección de contacto entre el revestimiento de dovelas y el terreno, a base de cemento, llenando el espacio que ocupa parcialmente la inyección de gravilla.
10. Abatimiento de los niveles piezométricos desde superficie. Para evitar problemas de arrastre de material hacia la excavación provocados por flujo de agua y presiones hidrostáticas, en ciertos sitios, se efectúa un abatimiento de los niveles piezométricos desde la superficie mediante pozos de bombeo.

En la figura 17.IV se muestra el ciclo de excavación programado el cual abarca un lapso promedio de 190 minutos por cada 75 cm de avance del escudo.

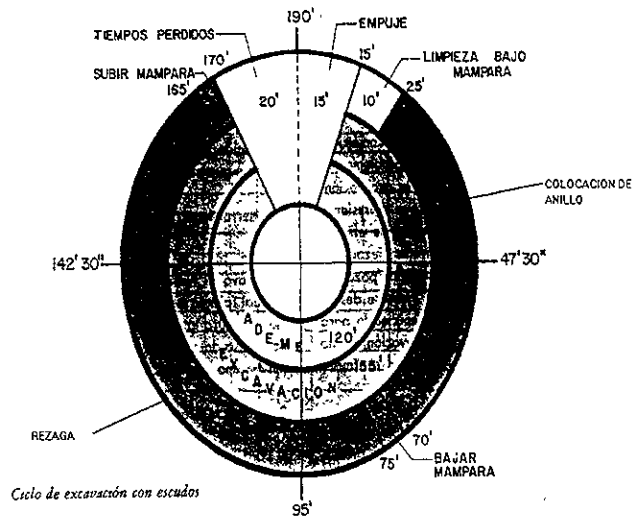


figura 17.IV

Equipo utilizado en excavación con escudo.

1. Herramienta para excavación del frente:

Se excava el frente del escudo con herramienta manual (pistola neumática), abriendo en esta forma la ranura lateral para que penetre la coraza del escudo; posteriormente se excava el corazón del terreno con ayuda de la misma herramienta.

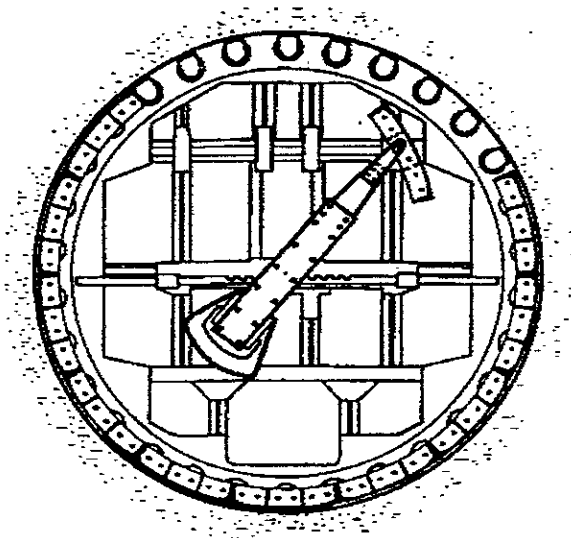
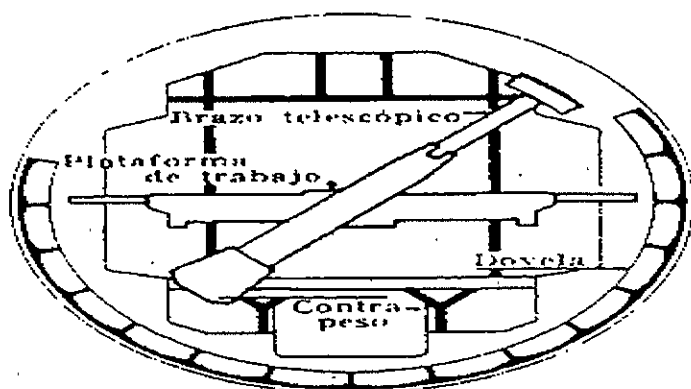


figura 18.IV

2. Brazo erector:

Para la colocación de las dovelas, el escudo cuenta con un brazo erector accionado hidráulicamente (figura 18.IV), el cual gira en ambas direcciones y además puede desplazarse del orden de 75 cm sobre el eje del túnel, acercándose o alejándose del escudo; en su extremo, este brazo tiene un mecanismo para agarrar las dovelas y colocarlas en su posición correcta. En la (figura 19.IV) se muestra esquemáticamente el movimiento de este brazo erector.

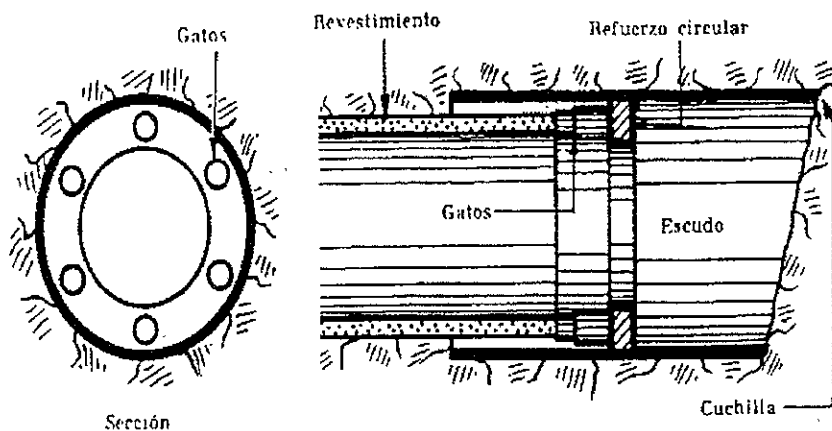


MÁQUINA PARA COLOCAR DOVELAS
(VISTA FRONTAL)

figura 19.IV

3. Gatos de empuje:

Localizados en el faldón del escudo, son los que proporcionan el movimiento del mismo, apoyándose sobre el último anillo de dovelas, tienen una carrera de 75 cm y son en total 25, distribuidos (figura 20.IV).



Trabajo con escudo.

figura 20.IV

4. Gatos frontales:

Se emplean para sostener el ademe de madera, en tanto se coloca el revestimiento de dovelas y el escudo avanza (figura 20 IV).

5. Plataformas en el frente:

Además de contribuir a sostener el ademe del frente, proporciona áreas de trabajo para la excavación del mismo, y para la colocación del ademe de madera.

Los problemas planteados durante la excavación de los escudos, fundamentalmente pueden dividirse en dos tipos:

1. Los problemas ocasionados por el tipo de material en el frente de la excavación:

La presencia de estratos de arenas por lo general dan lugar a pequeñas filtraciones a pesar del abatimiento desde superficie; en algunas zonas se encuentran presiones hidrostáticas en mantos de arena, lo que provoca arrastre de material hacia el frente de excavación; en estos sitios se resuelve el problema colocando un ademe cerrado de madera calafateado al frente del escudo.

Cuando el frente presenta lentes de resistencia diferentes, el escudo se desvía hacia la zona de menor resistencia. El problema se soluciona con la ayuda de aletas colocadas en la parte delantera del escudo, disminuyendo la resistencia en el frente del escudo mediante la excavación de la ranura de ataque y accionando un mayor número de gatos de empuje en la zona de mayor resistencia del terreno.

2. Problemas causados por el revestimiento provisional de dovelas:

En algunas zonas se presentan fallas a comprensión en las dovelas, ocasionadas por el empuje necesario para hacer avanzar el escudo. Generalmente la falla ocurre en las esquinas de las dovelas, que se agrietan y llegan a desprenderse en algunos casos, por otro lado, el recubrimiento en la orilla se desprende dejando expuesto el acero de refuerzo; la falla ocurre

generalmente en el contacto entre el primero y segundo anillo de dovelas, detrás del faldón del escudo. El problema se reduce notablemente colocando láminas de madera delgada en el contacto entre dovelas.

En algunas zonas el túnel se deforma una vez que el escudo ha pasado. Tal deformación ocurre al momento de estar inyectando la lechada de cemento para garantizar el contacto entre terreno y dovelas, la causa de estas deformaciones es un aumento de presión en la inyección. El problema queda solucionado mediante un control muy riguroso de la presión y volúmenes de inyección en todos los tramos.

Excavación con aire comprimido.

Descripción del sistema de excavación:

El aire comprimido como una herramienta para la excavación de túneles data desde 1830 en el que Thomas Cochrane construyó lumbreras y túneles bajo el nivel freático, estabilizando las paredes por medio de aire comprimido. A partir de esa fecha se han excavado numerosos túneles utilizando esta herramienta y la combinación de aire comprimido y escudo.

La excavación con el aire comprimido, se efectúa un número considerable de pruebas, tanto para el comportamiento del material del frente del escudo, como para el comportamiento fisiológico de los trabajadores y técnicos. El empleo de aire comprimido, consiste fundamentalmente en lo siguiente:

Se coloca una mampara o un tapón en una sección del túnel mediante una placa de acero, de tal forma que no exista comunicación de un lado hacia el otro, sellando además el terreno con inyecciones para garantizar el aislamiento.

En un lado del tapón, (al lado de la lumbrera) el aire tiene la presión atmosférica; del otro lado, se empieza a inyectar aire, así, la sección del túnel entre el frente de excavación y el tapón queda sujeta a una presión de aire superior a la atmosférica. (figura 21.IV).

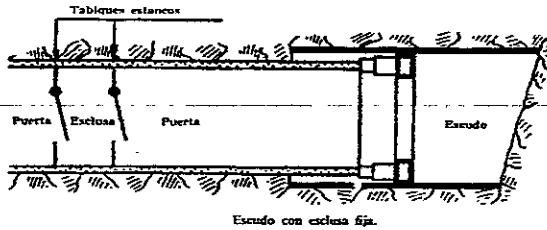


figura 21.IV

La entrada y salida tanto del personal como de materiales a esta cámara de trabajo presurizada se hace por medio de esclusas que consisten en cilindros de metal que cruzan la mampara con puertas selladas de entrada y salida, cuando se circula del lado de presión atmosférica al lado presurizado, se cierran ambas puertas y poco a poco se va inyectando aire a presión, hasta que la presión en la esclusa se iguala con la de la cámara de trabajo, en esas condiciones se abre la puerta del lado presurizado y el personal puede pasar a la cámara de trabajo. Cuando se transita en sentido contrario, se procede a la inversa.

Con la rezaga (material producto de la excavación) se efectúa la misma operación; sin embargo, la velocidad con la que se elimina o alza la presión en la rezaga, es mucho mayor. Para el personal es necesario tomar tiempo apropiados de compresión y descompresión, en base a tablas preestablecidas en función de la magnitud de la presión ya que una descompresión súbita puede causar daños (figura 22.IV).

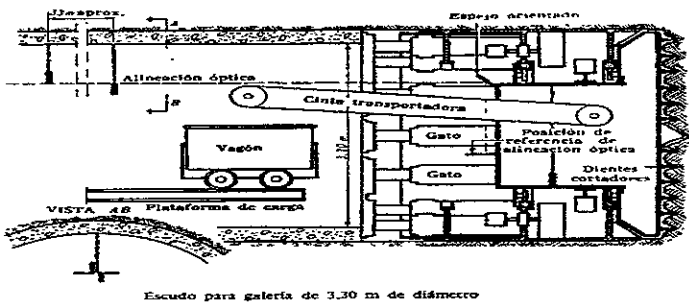


figura 22.IV

Durante la permanencia del personal en el aire comprimido se disuelve más aire en la sangre y en los tejidos que bajo presión atmosférica; por lo que al terminar la jornada de trabajo, el personal debe ser descomprimido lentamente, evitando que se formen burbujas en la sangre.

Todo el personal que trabaja bajo el aire comprimido es mantenido bajo un riguroso control médico, asimismo, la admisión de personal se realiza mediante una selección muy estricto, a base de exámenes radiológicos y clínicos para comprobar la salud de los trabajadores y su condición física. Fundamentalmente se revisan oídos, pulmones y los senos paranasales exigiendo un perfecto estado de salud en los candidatos.

El objeto de formar una cámara presurizada es, principalmente, estabilizar el frente de la excavación. Para el caso de las arenas saturadas. el flujo del aire comprimido del frente de la excavación hacia el terreno, provoca tensiones capilares que evitan que la arena y el agua fluyan hacia el interior del túnel; en el caso de arcillas de baja resistencia se tiene una presión que contrarresta la presión del terreno, evitando así que la arcilla falle por extrusión y penetre hacia el túnel.

Además del equipo suministrado para la excavación con escudo se adicional en el aire comprimido, se emplea el siguiente equipo.

1. Para suministrar aire comprimido a baja presión y tuberías para llevar a la cámara de trabajo. Se tienen en la obra cuatro compresores con potencia de 250 HP y capacidad de 2.200/p.c.m. cada uno; el aire se inyecta al túnel mediante dos tuberías de 10" de diámetro, la salida de una de ellas se coloca a 10 metros de la esclusa de personal; la otra, se mantiene a 30m. proximadamente; esta última línea crece a medida que el túnel avanza, para regular la presión se cuenta con una válvula automática que se calibra para mantener la presión con variación del orden de 0.05 kg/cm^2 .
2. De aire comprimido a alta presión, el equipo y tubería para aire comprimido a alta presión que se utiliza en las bombas neumáticas, las rompedoras, el equipo de inyección, la rezagadora y el equipo de inyección de gravilla, es el equipo estándar de excavación empleado en todos los frentes de excavación con escudo.

3. Tubería para suministro de agua. Se utiliza en las herramientas de perforación y limpieza.
4. De energía eléctrica. En todo el túnel se mantiene el alumbrado y la energía necesaria para hacer funcionar el láser y otros equipos eléctricos, tales como el de inyección y el sistema de comunicaciones entre la zona presurizada y la zona de control en la superficie. Para mantener funcionando el equipo de compresores de aire a baja presión en el caso de un paro de energía eléctrica, se tienen generadores .
5. Dispositivos de seguridad para emplearse en el aire comprimido.
6. Para limpieza del aire suministrado a baja presión. Está compuesto de separadores de aceite y enfriadores. Con esto se trata de evitar la contaminación del aire en el túnel, empleando equipos neumáticos y eléctricos exclusivamente, tanto para la excavación como para la rezaga y el bombeo.

Consumo de aire: Este se consume dentro del túnel fundamentalmente por las siguiente causas:

1. **Ventilación.** Se realiza mediante una tubería de 6" de diámetro, colocada en la clave del túnel, un extremo de esta tubería está localizada a 30 metros del frente en la clave del túnel, de tal forma que el aire viciado sale por esta tubería al exterior por la diferencia de presiones entre la cámara presurizada y el exterior, válvulas de globo a determinada distancia (cada 250 metros), para darle una ventilación más completa al túnel.
2. **Esclusas.** Las cámaras donde se alojan las esclusas de personal y rezaga, también consumen aire, ya que cada vez que la esclusa de personal o de rezaga se abre, el aire a presión sale de la misma (figuras 23.IV y 24.IV).

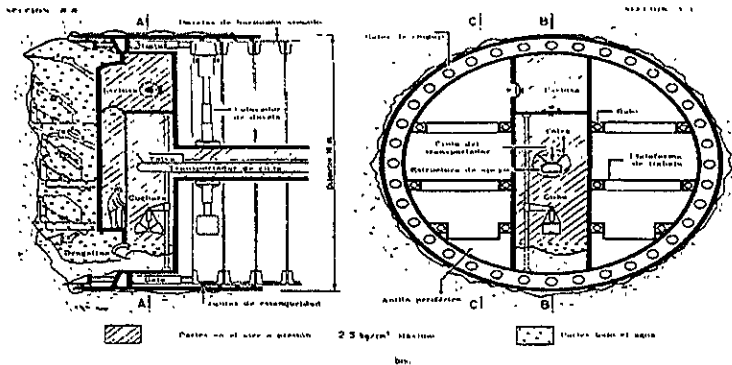


figura 23.IV

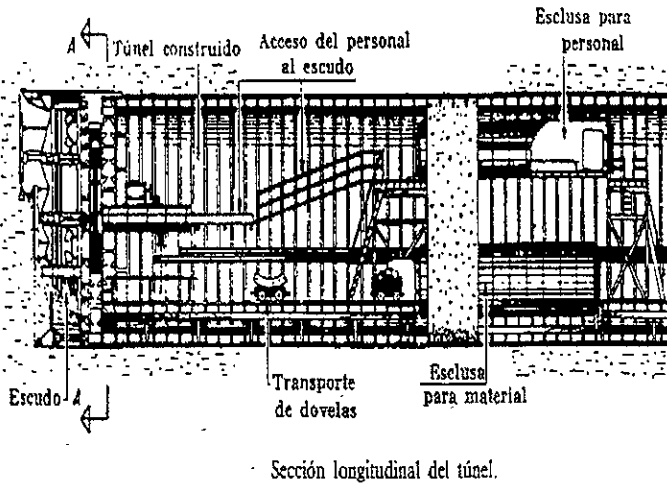


figura 24.IV

3. **Permeabilidad del terreno.** El terreno y los pozos de bombeo, consumen aire al penetrar éste a través de los mantos del suelo. En algunas de las perforaciones para los pozos de bombeo, se puede apreciar el aire saliendo por la tubería.
4. **Excavación.** Al efectuar la excavación diariamente, el túnel se hace más largo, y por lo tanto, la cámara presurizada aumenta su volumen; este

incremento en el volumen trae consigo un consumo de aire para mantener la presión constante de la cámara de trabajo.

Lumbreras excavadas en suelos:

Por las características de resistencia encontradas en los sondeos de muestreo efectuados previamente a la construcción de las lumbreras, el problema fundamental de la construcción es la falla de fondo. Para este caso se emplea muros colados in-situ y de métodos de flotación.

Construcción por flotación de lumbrera:

Se inicia con la excavación de un brocal perimetral, (figura 25.IV A) en el cual se realizan perforaciones secantes además con bentonita; una vez completo el anillo perimetral con estas perforaciones llenas de bentonita, se procede a excavar el núcleo de la lumbrera, mediante una draga con cucharón de almeja que va extrayendo la arcilla (figura 25.IV B), al mismo tiempo la excavación se va llenando con lodos bentoníticos para evitar una falla del fondo a medida que la lumbrera se profundiza, se aumenta la densidad de lodo de bentonita para lograr un equilibrio entre las presiones de las paredes de la lumbrera y la presión del lodo.

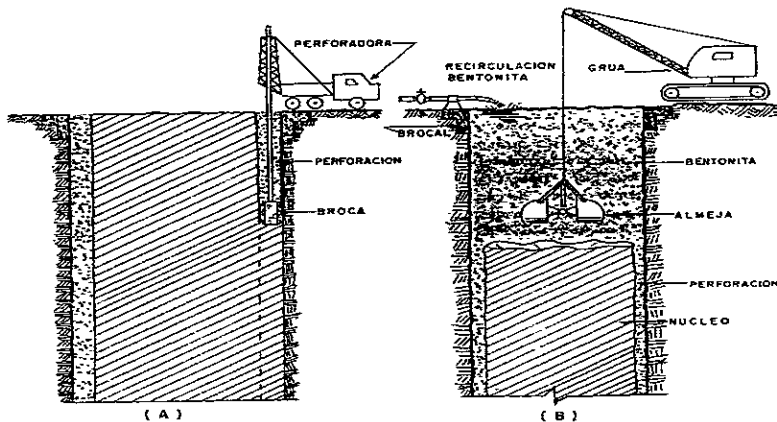


figura 25.IV A Y B

Las paredes de la lumbrera son previamente excavadas con una máquina de rotación para limitar el pozo de la misma. Una vez excavada la lumbrera, se

procede a colar en la superficie una parte de los muros laterales y la losa de piso de la lumbrera, que son ligeramente menores en diámetro que la excavación; el fondo de la lumbrera así colada se va bajando y se van colocando segmentos de muros a medida que ésta va bajando en la excavación, flotando dentro de los lodos bentoníticos

Llega un momento en que la flotación de la lumbrera es tal que impide que ésta baje; en ese momento se empieza a llenar la lumbrera en el interior (figura 26.IV c), con agua para darle mayor peso y provocar que baje; el control de la verticalidad se efectúa mediante gatos hidráulicos. Se continúa bajando la estructura de concreto hasta asentarla en el fondo; en este momento se termina la construcción (figura 25.IVd), llenando el espacio entre concreto y suelo con inyecciones de cemento.

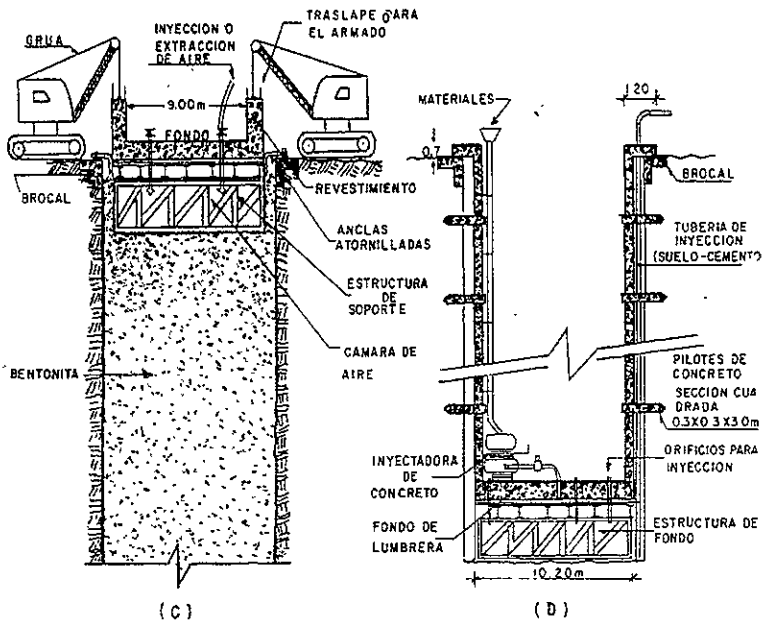
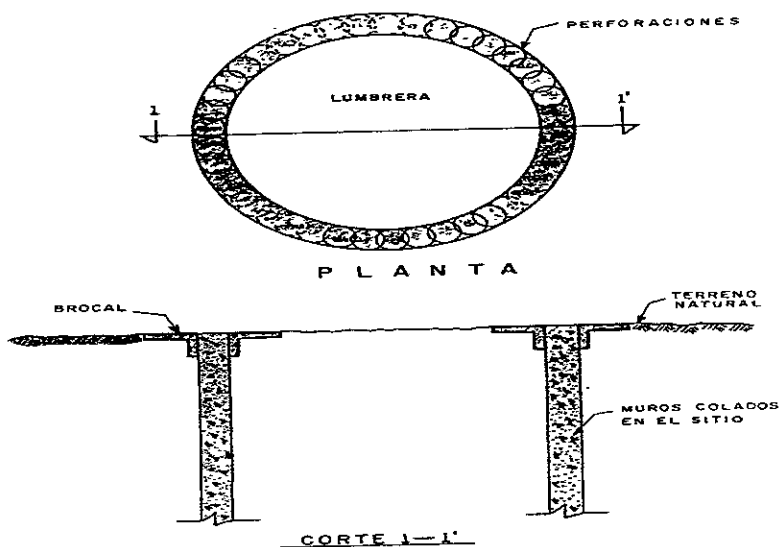


figura 25.IV c y d

Procedimiento de construcción de lumbreras mediante muros colados in situ:

Se procede al colado de los brocales de la lumbrera en la superficie, (figura 27.IV) los cuales coinciden con los muros de ademe de la propia lumbrera; a partir de estos brocales como guía se realizan cuatro perforaciones para limitar los tableros de los muros. Una vez efectuadas las perforaciones extremas, se procede a excavar un cuadrante de los muros de la lumbrera mediante una draga equipada con almeja guiada; se realiza hasta 2 ó 3 metros más abajo de la profundidad de excavación para permitir que el azolve se deposite en el fondo y el concreto llene el espacio excavado para los muros hasta el fondo de la lumbrera .



EXCAVACION DE LUMBRERAS CON PERFORACIONES SECANTE

figura 27.IV

Los muros son perfectamente circulares, se forma un prisma de 16 lados iguales; al mismo tiempo que se va excavando cada uno de estos lados se va

llenando con lodos bentoníticos para estabilizar la perforación y evitar el cierre de la misma por fallas de las paredes de arcilla; una vez llegada a la profundidad deseada se hace una limpieza general del muro, se introduce la parrilla que forma el armado o refuerzo del concreto y se cuela el cuadrante (figura 28.IV).

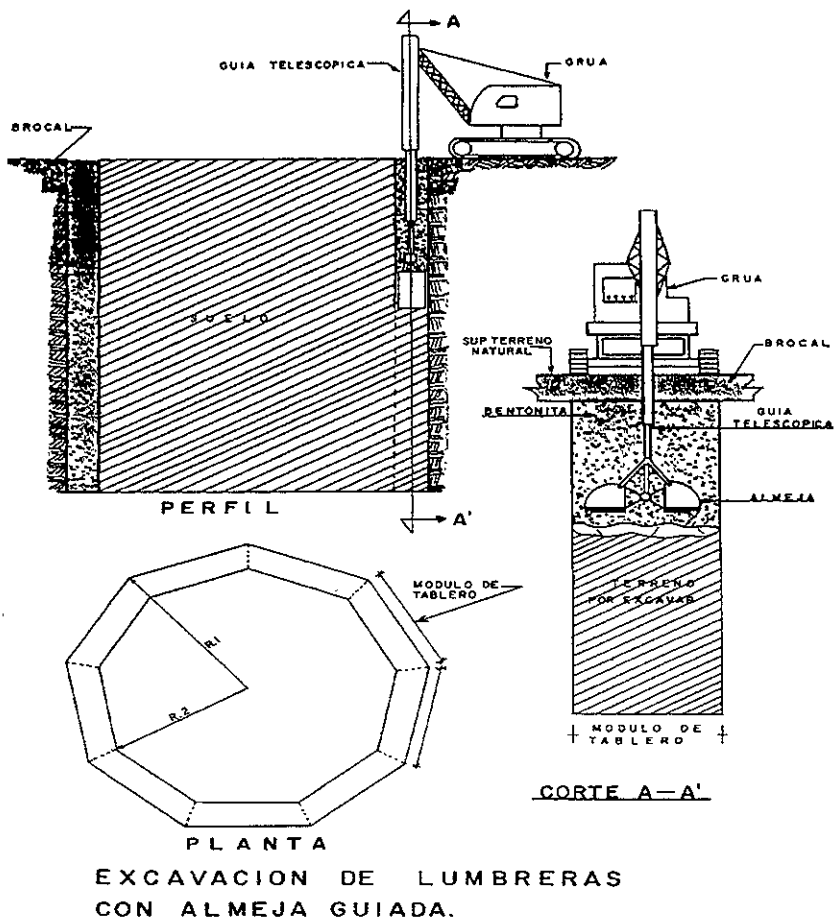


figura 28.IV

En los extremos de cada cuadrante, previamente al colado se introducen unos tubos que limitan el cuadrante, los cuales se van extrayendo a medida que el concreto endurece para que en esta forma quede una media caña al extremo del muro. Se procede en idéntica forma en los tres cuadrantes restantes hasta completar la lumbrera; en las juntas de colado se dejan unos tubos de inyección para garantizar un sello perfecto entre los cuadrantes de la lumbrera, a continuación se excava el corazón de la lumbrera entre los muros de ademe; una vez llegado al piso de la lumbrera se cuela el fondo de ésta y si es necesario se da un recubrimiento adicional de concreto para garantizar su verticalidad y estabilidad.

Lumbreras excavadas en roca:

La excavación de lumbreras en roca de acuerdo con el método empleado, se divide en dos tipos:

1. Lumbreras excavadas en tobas sin el uso de explosivos.

En los materiales que se pueden clasificar como rocas “blandas” en las cuales las máquinas de excavación como trascavos, dragas y brazos excavadores penetran, el procedimiento de excavación empleado se realiza de acuerdo a las siguientes actividades.

- 1) Previamente al inicio de la excavación del núcleo de la lumbrera, se cuela un brocal hasta 1.5 metros de profundidad.
- 2) Excavación del núcleo de la lumbrera, mediante pistola neumática rezagando el material con el empleo de una grúa desde la superficie.
- 3) Excavación con máquina hasta cierta profundidad (30 metros). En este trabajo se emplea retroexcavadora , brazos excavadores de descarga lateral. A partir de esta profundidad, se instala la torre para el manteo (elevación) del material en la lumbrera, incluyendo las tolvas, las guías de cables para el bote de manteo, el malacate fijo y el sistema de descarga de los botes a los camiones en la propia torre.

- 4) Además de las paredes de la lumbrera, mediante marcos metálicos circulares con retaque de madera o bien concreto lanzado en 15 cm de espesor.
- 5) Una vez que las lumbreras avanzan en la excavación, es necesario por lo general instalar equipos de bombeo y traspaleo verticales para mantener la excavación en seco.

2. Lumbreras excavadas en rocas con el uso de explosivos.

Previo al inicio de la excavación del núcleo de la lumbrera se excava y cuellan brocales de concreto de 1.20 metros de profundidad en promedio, a continuación se efectúa la barrenación del fondo de la lumbrera con avances entre 0.80 y 3 metros.

Previo a la voladura en el fondo, sale el personal y se saca el equipo de excavación y rezaga a la superficie; una vez efectuada la voladura se procede a colocar el ademe de la lumbrera base de marcos metálicos o concreto lanzado. El equipo de rezaga que se emplea generalmente es del mismo tipo del utilizado en las lumbreras excavadas en tobas.

En algunas lumbreras es necesario efectuar tratamiento de inyección para estabilizar el terreno o impermeabilizarlo y poder excavar, o en algún caso ademar con concreto lanzado en algunas zonas, reforzando con malla electroforjada. En la mayoría de las lumbreras una vez llevada la excavación a la profundidad de la clave del túnel, se arma un marco de acero que sirve para apoyar las instalaciones de manteo. A ambos lados de la lumbrera, el túnel se construye con una sección de encapillado, la cual es más ancha que la sección normal del túnel; (ancho del túnel en la base = 6.5 metros ; ancho en la sección de encapillado = 11 metros) con igual altura que el túnel (8 metros). Esta sección de encapillado normalmente aloja cambios de vía casetas para señalización, comunicación a la superficie, equipo de manteo y sus guías, tolvas para agregados del concreto lanzado y piso del elevador para el personal. En los tramos en donde se coloca el revestimiento definitivo al mismo tiempo que se efectúa la excavación, se aloja en la zona de encapillado el tanque amortiguador para la calidad del concreto y las tolvas para la recepción de concreto.

**ESTA TESIS NO DEBE
QUEDAR EN LA BIBLIOTECA**

A partir del piso del túnel se excava la lumbrera para alojar la llamada alcancía, en donde se descarga la rezaga del túnel en unas tolvas que a su vez descargan a los botes elevadores o skips. La instalación de manto de la rezaga en las lumbreras.

Excavación a media sección:

Cuando por las características del terreno es posible un desprendimiento se efectúa la excavación a media sección, abriendo inicialmente la mitad superior del túnel haciendo un banco de material y colocando el ademe provisional de marcos metálicos en esta sección; posteriormente, unos metros atrás (del orden de 10 metros), se excava la mitad inferior del túnel por el mismo procedimiento señalado en el inciso anterior. Una vez colocados los marcos superiores, se excava o se banquea el material de la sección superior y al mismo tiempo se truena y se rezaga una parte de la sección inferior. La rastra además de servir de apoyo a los marcos en la media sección superior de la excavación, se utiliza como una trabe para soportarlos al momento de excavar la media sección inferior; esta trabe queda apoyada en el terreno de la media sección superior y en el otro extremo en los últimos marcos completos del túnel. En algunas zonas, cuando el material carga sobre los marcos de la media sección superior, se unen éstos mediante un perfil longitudinal y perfiles de canal en diagonal, formando una armadura capaz de soportar la carga que transmiten los marcos de la media sección superior.

El procedimiento de excavación en estas zonas es prácticamente el mismo que el descrito para la excavación a sección completa; es decir, primero se barrena el frente de la media sección superior, se hace la voladura alejando el equipo de excavación y rezaga, y se retira todo el material de la voladura, a continuación se excava la media sección inferior rezagando el material y colocando el ademe provisional consistente principalmente en marcos metálicos y retaque de madera en algunos tramos del túnel se construye una rampa para subir el cargador a rezagar. Cuando el banco o sección superior es más corto, se truena al mismo tiempo la sección superior y la media sección inferior, esto se realiza en aquellos casos en que no se cuenta con plataforma de barrenación, y desde el piso de sección superior se barrena ésta, en el frente, se instala una banda transportadora en la media sección superior que mueve el material del frente a la media

sección inferior, en donde la pala Jumbo de motor eléctrico se encarga de colocarlo en las vagonetas para su transporte al exterior.

En el caso de las arcillas encontradas no se usan explosivos sino únicamente herramienta manual para excavar el frente, en este caso se abre una ranura de aproximadamente 1 metro de profundidad siguiendo el contorno del marco circular, en esta ranura se coloca un marco en la media sección superior y se excava el resto de la media sección con herramienta manual, consistente en rompedoras neumáticas principalmente; la media sección inferior se excava en la misma forma con herramienta neumática abriendo tramos de 1 metros y colocando las patas de los marcos. En el piso en todo este tramo, se colocan tornapuntas para cerrar el marco y darle un apoyo más efectivo al mismo, posteriormente se recubre el túnel con concreto lanzado, colando en el piso un firme de concreto simple y recubriendo el dren con concreto.

En el caso de los depósitos atravesados en el frente se utiliza el procedimiento de la ranura y media sección, en el que se emplean las llamadas coyoterías, que consisten en una excavación circular de 80 centímetros de diámetro, con una profundidad hacia el terreno de 1.5 metros. El objeto de estas excavaciones es colocar las rastras de apoyo a los marcos en la media sección superior, la herramienta empleada son las pistolas neumáticas.

En esta zona se utilizan marcos circulares con ademe o retaque de madera y la excavación se hace a mano aun en la parte inferior, cargando únicamente las vagonetas con la pala Jumbo mencionada anteriormente. La vía queda en esta forma al centro del túnel, de modo que la pala debe girar 180° para la carga de las vagonetas.

IV.2 TIPO DE TERRENO.

Según la naturaleza del terreno, puede atacarse la perforación con una sección superficial más o menos grande, en ciertos macizos rocosos puede atacarse a plena sección incluso en el caso de las bóvedas de gran luz (20 metros y más) de las centrales hidroeléctricas subterráneas; en los terrenos sin cohesión (arenas secas, gravas) será necesario, por el contrario, limitarse a una galería elemental de 4 a 5m² para poder avanzar con una entibación adecuada, si se

trata de arenas finas saturadas de agua a presión (arenas fluidas), de lodos, arcillas o terrenos en los que se presentan importantes afloraciones de agua será necesario incluso recurrir a procedimientos especiales como el escudo de aire comprimido o las inyecciones de avance si el terreno contiene anhidrita, en ciertos casos los empujes pueden ser considerables cuando este material está saturado de agua, debiendo utilizar, durante la construcción, una robusta entibación metálica, previendo el refuerzo de los revestimientos.

La identificación de las clases de rocas y la evaluación de sus características mecánicas y geológicas como un material estructural, en el cual se va a construir una excavación subterránea se debe hacer una clasificación del tipo de roca encontrada como por ejemplo.

1. **Roca dura e intacta:** No contiene fisuras ni juntas, por lo tanto si se fragmenta, esto acontece a través de la roca sana. Sin embargo, si el procedimiento de excavación mediante explosivos ocasiona daños en la roca puede aparecer el fenómeno de exfoliación del techo después de un intervalo de varias horas y aún de días después de la tronada, el fenómeno del desprendimiento violento de losas de techo y paredes también puede ocurrir en este tipo de terreno.
2. **Roca estratificada:** Está constituida por estratos individuales que tienen muy pequeña o ninguna resistencia a la tensión o al corte en sus fronteras de estratificación. El fenómeno de exfoliación es común en este tipo de roca.
3. **Roca fragmentada y fisurada:** Está constituida de fragmentos de roca químicamente intactos o casi intactos que están separados uno de otro y con una interconexión imperfecta. En este tipo de roca, se requiere algún tipo de soporte en las paredes laterales.
4. **Roca fragmentada:** químicamente intacta tiene el comportamiento de un material granular (arena, grava, boleos).
5. **Roca moderadamente fisurada:** Contiene juntas y pequeñas fisuras pero los bloques que se forman están tan íntimamente interconectados que las paredes verticales en excavaciones en este tipo de roca, no requieren soporte lateral para permanecer estables.

6. Roca que se extruye bajo carga: Se deforma lentamente hacia el interior del túnel sin cambio perceptible del volumen. En este tipo de roca está involucrada la presencia de partículas minerales de arcilla o micáceas de baja expansividad.

7. Rocas expansivas: Muestran una deformación importante hacia el túnel. Toda roca expansiva contiene un alto porcentaje de minerales de arcilla de alta expansividad como la montmorilonita.

Excavación y consolidación de suelos y rocas en lumbreras y túneles:

En el transcurso de la excavación de obras subterráneas el ingeniero se enfrenta con formaciones geológicas sumamente variadas que imponen el empleo de diferentes métodos de construcción y en ocasiones la aplicación de técnicas auxiliares que le permiten modificar la permeabilidad o resistencia del subsuelo con el fin de hacerlo apto para la excavación.

Tipo de tratamiento y de impermeabilización o consolidación de suelos y rocas por medio de inyección a presión de distintos productos:

Se dice que realizamos un tratamiento de impermeabilización cuando las inyecciones tienen por objeto obturar las fisuras de una roca a fin de disminuir la afluencia de agua hacia el túnel o lumbrera, según el caso, y se realiza principalmente cuando las aportaciones de agua son de tal importancia que las operaciones del ciclo de excavación (barrenación, carga, exploración y rezaga) o bien no pueden realizarse o se ejecutan con rendimientos incosteables.

Este tipo de tratamiento también se efectúa cuando las instalaciones de bombeo para evacuar el agua de filtración son insuficientes requiriéndose en tal caso de un tratamiento que si bien no elimine totalmente la aportación de agua, mantenga ésta dentro de límites aceptables compatibles con la capacidad de bombeo para evitar inundaciones del túnel.

Los tratamientos de consolidación se realizan cuando la resistencia al corte de los materiales por excavar es tan baja que es necesario incrementar por aglutinación de la masa con algún producto de inyección o bien precomprimido para impartirle la resistencia necesaria para que pueda ser

excavado. Los tratamientos de impermeabilización se aplican fundamentalmente en zonas rocosas de alta permeabilidad y los de consolidación principalmente en rocas alteradas o muy tectonizadas, en rocas compactadas de origen aluvial en contactos suelos roca y en suelos. La impermeabilización de una roca o la consolidación de un suelo puede realizarse efectivamente mediante la inyección de mezcla de agua-cemento-arcilla o productos químicos, dependiendo su selección por inyectar.

El fin que se persigue es desplazar el agua de las fisuras de la roca en el caso de la impermeabilización o bien aglutinar y crear paneles de materiales inyectado en el terreno para recomprimir la masa inestable en el caso de los tratamientos de consolidación. Los tratamientos descritos, deben entenderse como métodos auxiliares en la excavación, que es usual en obras como túneles, lumbreras y tuberías de presión, efectuar al término del recubrimiento de concreto o metálico una inyección de contacto que sirve para rellenar el espacio libre entre terreno y recubrimiento la cual servirá para garantizar el firme asiento del suelo y evitar en esta forma cavitación durante el funcionamiento hidráulico del mismo. Para efectuar las inyecciones se debe contar con una serie de barrenos que permitan la penetración de la mezcla al terreno por tratar

Las condiciones del terreno y los resultados de los sondeos de exploración, usualmente permiten definir las dimensiones del volumen de roca o suelo por tratar. Los barrenos del tratamiento se alojarán en grupos denominados "aureolas" que en el caso de túneles y lumbreras son planas o cónicas. Es decir, los barrenos se espacian convencionalmente sobre generatrices de conos con origen en la máquina perforadora o sobre planos con diferentes inclinaciones respecto al plano horizontal. El espaciamiento entre aureolas y barrenos de una aureola, está en función del radio de acción de la mezcla del terreno, pudiendo decirse que uno puede lograr el grado de impermeabilización o consolidación que se requiere, disminuyendo el espaciamiento entre barrenos. El objetivo es lograr impermeabilización o consolidación en el mínimo tiempo y al menor costo, es necesario buscar para cada caso, el espacio óptimo que nos permita tratar el mayor volumen con el menor número de barrenos.

Como una primera aproximación puede considerarse en rocas un espaciamiento de 4.00 metros y para el caso de suelos de 2.00 metros, tanto

entre aureolas como entre barrenos. El mencionado espaciamiento deberá entenderse entre juntas de aureolas y de barrenos. Posteriormente en el curso de los trabajos y mediante la interpretación de los resultados que se van teniendo, se verá la necesidad de realizar perforaciones en zonas de consumos mayor de los esperados con el fin de mejorar nuestros tratamientos.

Simultáneamente a la determinación de los metros de perforación requeridos se hará un cálculo del volumen de mezclas por inyectar, el cual estará en función de la porosidad del material. Para el caso de rocas puede suponerse de 3 a 5% de porosidad y para el suelo de 20 a 30% dependiendo de la graduación y compacidad del mismo.

Otro aspecto fundamental que interviene en el proyecto de un tratamiento es la especificación de las mezclas, presiones y los métodos que habrán de seguirse para llevar a cabo la mezclas de inyección. Actualmente, se tiene una gran variedad de mezclas de inyección que van desde muy viscosas, hasta fluidas, dependiendo de la selección, principalmente de la abertura de las grietas en el caso de rocas y de la distribución granulométrica cuando se trata con suelos. Como regla general para la inyección de rocas y de aluvión gruesos se debe emplear morteros agua-cemento, arcilla, adicionando a veces arena fina o limo y para suelos se harán fases sucesivas de distintas mezclas de inyección, empleando cada vez lechadas más penetrantes con el fin de obtener en primer lugar los vacíos más importantes y posteriormente los más finos.

Una vez determinada la mezcla de inyección se calcula la cantidad de material por emplear y se efectúan pruebas de laboratorio para conocer: resistencia en compresión, porcentaje de agua libre, viscosidad y tiempo de fraguado de la mezcla seleccionada a fin de controlar estas características durante el desarrollo de los trabajos.

Control de perforaciones: Teniendo en cuenta que el proyecto de un tratamiento se basa generalmente en las apreciaciones que se efectúan de unos cuantos barrenos de exploración, se puede llegar a la conclusión que una buena parte del éxito del tratamiento dependerá de las observaciones que se realicen durante la ejecución de los barrenos de inyección. Aún cuando en estas perforaciones no se realizan muestreos, se pueden observar muestras lavadas y con ellas revisar y modificar en su caso el corte geológico original, anotando las profundidades en que registran cambios de color, pérdidas de

fluido de perforación y caídos. También deberán registrarse los gastos de agua que aportan los barrenos en zonas permeables, a fin de ubicar perfectamente aquellos sitios que requieren más inyección o lechadas de fraguado rápido para evitar que sean lavadas.

En tratamientos de consolidación y en barrenos de control debe registrarse en forma sistemática la velocidad de perforación (ml./min.) como una medida indirecta para apreciar la compactación del terreno.

Finalmente en barrenos de más de 50 metros de longitud deberán medirse las posibles desviaciones con el objeto de saber si la inyección interesará precisamente las zonas deseadas.

Método de inyección:

La secuencia en que se toman los barrenos y la forma en que éstos se inyectan define los métodos de inyección.

Usualmente se recomienda numerar progresivamente aureolas y barrenos para después dividirlos en primarios y secundarios. Esto quiere decir que primero se inyectarán los barrenos nones de las aureolas nones, después todos los barrenos pares de aureolas pares, enseguida los barrenos pares de aureolas nones y finalmente barrenos nones de aureolas pares. A este método se le denomina inyección por etapas y tiene la ventaja que permite conocer en forma objetiva la forma en que se van mejorando las características de impermeabilidad o resistencia a medida que avanza el tratamiento.

La inyección propiamente dicha se puede hacer desde boquilla en una o en varias fases o progresiones descendentes, o desde tubo de inyección en progresiones ascendentes.

Finalmente es conveniente añadir que en el tratamiento de zonas muy permeables, sólo se deberán abrir los barrenos que sea posible inyectar de inmediato, pues los aportes no controlados de agua hacia la excavación pueden provocar problemas sumamente graves.

La inyección desde boquilla en una fase exclusiva para el tratamiento de barrenos cortos (longitud menor de 5.00 m), se logra acoplado la manguera de descarga de la bomba a la boquilla.

Para la inyección a profundidades superiores de 5.00 metros en rocas sin problemas de estabilidad (en las cuales, después de abrir un barreno no se cierran las paredes del mismo), se acostumbra seccionar la longitud total del barreno en varias progresiones de 3.00 a 5.00 metro, de longitud, para lo cual después de haber inyectado la primera progresión, se permite un tiempo de fraguado suficiente, luego se perfora la lechada y enseguida se continúa con un segundo tramo de perforación que al ser inyectado se denomina segunda progresión y así, sucesivamente hasta alcanzar la longitud del proyecto del barreno en cuestión.

Para la inyección de perforaciones de suelos inestables, es preferible instalar un tubo de inyección usualmente de fierro negro con espesor de 4.0 de 2", el cual hace las veces de ademe del barreno protegiéndolo contra derrumbes y que permite la inyección del mismo tantas veces como se quiere con distintos tipos de mezclas, pues en toda su longitud se han dejado perforaciones igualmente espaciadas, protegidas con bandas de hule que actúan como válvulas, permitiendo el escape de lechada hacia el terreno por inyectar e impidiendo el regreso de la misma al finalizar la inyección de cada tramo.

La secuencia de perforación es la siguiente:

1. Perforación del barreno en su longitud total de proyecto empleando lodo de bentonita para estabilizar las paredes e instalación del tubo de inyección.
2. Fijación del tubo de inyección al terreno por medio de una vaina semiplástica inyectada. Después de que ha fraguado la vaina, el tubo ha quedado fijo al terreno y estamos en condiciones de iniciar el tratamiento propiamente dicho.
3. La composición de la mezcla de vaina debe dar por resultado una lechada que después de fraguada puede romperse al aplicar presiones del orden de 20 a 30 Kg./cm², perforación por dentro del tubo de inyección para eliminar los rasgos de lechada de vaina, introducción de la línea de

inyección hasta el fondo del barreno acoplado en su extremo un obturador doble que permita hallar tramos de inyección; al subirlo a lo largo del tubo de inyección se conoce con el nombre de progresión. En el curso de inyección se levanta la tubería después de haber inyectado en cada tramo la cantidad correspondiente, una vez que se ha alcanzado la presión de proyecto.

Las principales ventajas de este procedimiento son las siguientes:

1. Se puede inyectar varias veces un tramo con distintos productos para lo cual bastará lavar o reperforar por dentro del tubo de inyección, siendo esta labor por demás sencilla.
2. Debido al espaciamiento reducido entre progresiones es muy fácil ubicar zonas débiles que requieran fases adicionales, logrando tratamiento bastante homogéneo.

Para los casos más generales de consolidaciones de suelos, cada terreno se inyecta con éste método en cuatro fases distintas que son: vaina, arcilla-cemento, gel de silicato de sodio-acetato de etilo y cemento (mezcla inestable).

A fin de consolidar una formación, usualmente se requiere dos o tres fases de inyección con mezclas estables de cemento arcilla, inyectando en cada una de ellas la cantidad calculada o una porción de las mismas, en caso de alcanzar antes la presión de proyecto, cuando existen zonas arenosas arenolimosas se procede en una tercera fase a aglutinar la masa por impregnación con gel de silicato de sodio acetado de etilo para terminar con una fase de mezcla inestable que tiene por objeto producir un bloque de la masa, formándose panales confinantes que tienden a aumentar el grado de consolidación del terreno tratado.

Ejecución de las perforaciones:

Dependiendo principalmente del material y las características del barreno tales como diámetro inclinación, profundidad, y ubicación ya en túneles o en superficies, es factible seleccionar de una gran variedad de equipos, el más adecuado para un problema establecido.

1. Para la perforación de rocas sanas con o sin fracturas se prefieren perforadas a percusión por dar mejor rendimiento que las de rotación de capacidad similar.
2. Cuando se requiere pasar a través de cualquier obstáculo como acero de refuerzo, madera, etc., serán necesarios el uso de perforadoras a rotación con cabezal hidráulico las cuales también se emplean ventajosamente en la perforación de rocas blandas o suelos.
3. Cuando se necesitan gran movilidad y la perforación se realiza en suelos o rocas poco compactas las máquinas montadas sobre orugas, son muy eficientes disminuyendo sus rendimientos, con la inclinación de los barrenos y desde luego si el trabajo es interior (túnel) tal rendimiento es aún menor.
4. Para barrenos verticales desde la superficie y con longitudes superiores a 100 metros las perforadoras Drill Master de Ingersol-Rand son muy efectivas tanto en terrenos poco compactos como en rocas duras.
5. La perforación de mezclas de cemento, usualmente se realizan con las mismas máquinas con las cuales se ejecuta la perforación, obteniéndose siempre buenos rendimientos debido a que la lechada de cemento no llega a adquirir gran dureza.

Aparte de las barras y brocas de perforación que para el caso de cada máquina se puede decir que requieren equipo particular, en suelos y rocas blandas se debe preferir el empleo de brocas tricónicas, en rocas duras y trabajando a percusión se utilizan brocas de insertes de tungsteno tipo cruz, en tanto que el uso de brocas de diamante deberá limitarse en lo posible, por ser muy costosa esta herramienta.

Para eliminar el corte producido por la broca se emplea aire o agua en rocas compactas y lechadas de bentonita en rocas blandas, suelos o contactos suelo-roca, requiriéndose en tales casos bombas que usualmente son de gusano para que pueda manejarse el lado de perforación.

Control de perforaciones: Teniendo en cuenta que el proyecto de un tratamiento se basa generalmente en las apreciaciones que se efectúan de unos

cuantos barrenos de exploración, se puede llegar a la conclusión que una buena parte del éxito del tratamiento dependerá de las observaciones que se realicen durante la ejecución de los barrenos de inyección. Aún cuando en estas perforaciones no se realizan muestreos, se pueden observar muestras lavadas y con ellas revisar y modificar en su caso el corte geológico original, anotando las profundidades en que registran cambios de color, pérdidas de fluido de perforación y caídos. También deberán registrarse los gastos de agua que aportan los barrenos en zonas permeables, a fin de ubicar perfectamente aquellos sitios que requieren más inyección o lechadas de fraguado rápido para evitar que sean lavadas.

En tratamientos de consolidación y en barrenos de control debe registrarse en forma sistemática la velocidad de perforación (ml./min.) como una medida indirecta para apreciar la compactación del terreno.

Finalmente en barrenos de más de 50 metros de longitud deberán medirse las posibles desviaciones con el objeto de saber si la inyección interesará precisamente las zonas deseadas.

Ejecución de la inyección: Se da el nombre de inyección a las operaciones de forzar a través de un barreno los productos líquidos apropiados, denominados mezclas para conseguir la impermeabilización o consolidación de una roca o de un depósito de suelo según el caso y para lo cual se requieren: equipos de mezclado para la preparación de la mezcla, bombas para impulsarlas y tuberías y mecanismos como boquillas, tubos de inyección y obturadores para colocarla en el sitio preciso.

Presión de inyección:

La presión de inyección es una variable importante que se fija en función de la carga hidrostática que hay que vencer, las pérdidas de carga que se tienen en la misma inyección y el grado de impermeabilización o consolidación deseado. Usualmente la presión varía en este tipo de obras entre 30 y 50 Kg./cm.² cuando se inyecta lechada de cemento o cemento-arcilla y de 10 a 15 Kg./cm.² cuando se inyectan productos químicos, ya que al emplear estos materiales se busca la impregnación con ellos del suelo por tratar, evitando en lo posible el rompimiento del material en bloques (bloqueo).

Equipo de mezclado: Dependiendo de las mezclas por inyectar y los volúmenes esperados; la preparación de la mezcla puede hacerse en agitadores de distintos tipos, siendo los principales :

a) **Vertical:** Son recipientes cilíndricos de 1,5 m³ de capacidad que tienen una flecha con aspas accionadas con un motor eléctrico que permite preparar grandes volúmenes en poco tiempo.

AC-2: Son dos cubetas de 80 litros de capacidad dentro de las cuales actúan en cada una de ellas una turbina accionada por un mismo motor. Las cubetas están comunicadas entre sí y es posible pasar la lechada de una a otra indistintamente. En el proceso de inyección mientras una cubeta prepara, la otra reagita la mezcla y sirve de tanque de almacenamiento pues su descarga está conectada a la succión de la bomba.

b) **Robin:** Es una flecha con paletas adaptadas a un motor. Sirve para mantener en agitación la lechada que está en tanques de almacenamiento. Su potencia varía de acuerdo con la cantidad de mezcla que se quiera mantener en suspensión.

c) **Dosificador-eléctrico automático:** Es muy útil en la preparación de mezclas de productos químicos debido a que una vez fijado el proporcionamiento requerido los ingredientes que intervienen en la mezcla se surten automáticamente y su volumen es controlado con electrónivel.

Equipos de bombeo: Las bombas más adecuadas para la mezcla de inyección en el caso de bajas presiones son las de gusano, accionadas con motor eléctrico o de combustión interna según convenga. Para presiones medianas y altas las bombas neumáticas de embolo marca: Gardner Denver, Cosma y Peroni.

Con este equipo se impulsan las mezclas preparadas en la central de inyección para colocarlas en los barrenos, haciendo uso de equipo auxiliar como son tuberías, mangueras y obturadores. Debe distinguirse entre bombas de baja, mediana y alta presión fijando como límites de cada una de ellas las presiones de 10, 15 y arriba de 25 Kg/cm².

Control de inyección: Durante la realización de los trabajos es necesario tener la seguridad de que las mezclas de inyección son las especificadas para lo cual se preparan muestras en las cuales se determina la viscosidad Narch, el porcentaje de agua libre y el tiempo de fraguado, comparándose los valores de laboratorio obtenidos al inicio de cada obra.

Los datos anteriores que en el caso de inyección de mezclas de cemento se efectúan diariamente, en el caso de inyección de productos químicos deben verificarse a cada hora, sobre todo cuando llegan a la obra una remesa nueva de producto.

El chequeo se complementa con una observación permanente del estado mecánico de los equipos, la exactitud de las medidas de agua y otros productos líquidos, el vaciado efectivo de los sacos de cemento y el funcionamiento adecuado de los manómetros que controlan la presión de inyección.

Análisis de resultados: Partiendo de la base de volúmenes y presiones de inyección establecidos en el proyecto, se interpretará diariamente la evolución de la inyección, en virtud de que se pueden presentar las siguientes alternativas:

- 1) El tramo inyectado toma el volumen y alcanza la presión de proyecto.
- 2) El tramo inyectado toma menos volumen programado y alcanza la presión de proyecto.

Suponiendo que las condiciones de fracturación y los volúmenes calculados fueran correctos, las situaciones 2 y 3 son normales y será necesario investigar su causa, procediendo de la siguiente manera:

- 3) Suponer que las mezclas programadas inicialmente eran muy gruesas y no penetraban suficientemente en las fracturas.
- 4) Suponer que la mezcla programada inicialmente era muy fluida y se iba muy lejos.

Para determinar la mezcla adecuada se procede por ensayos programados, mezcla de más o menos fluidez y cambiando de relación a intervalos fijos para lo cual se establecen programas de inyectado, que permiten especificar número y orden de los barrenos por inyectar, las profundidades de las progresiones, cambios de relación dependiendo de los consumos y presiones de sello.

Con el objeto de manejar en forma ordenada toda la información que se genera en el desarrollo del trabajo, es necesario llevar por cada barreno una hoja en la que se anotan los datos de perforación, geología simplificada, fechas, consumos y presiones de inyección de: vaina de arcilla-cemento gel, etcetera.

Un resumen de estas informaciones se pasará diariamente a los planos de avance, los cuales permiten visualizar en forma objetiva todas las eventualidades del desarrollo del tratamiento.

Los planos del avance pueden ser de dos tipos:

Aquellos en que el tratamiento se realiza por medio de la inyección de aureolas de 6 a 10 barrenos cada una y aquellos en gran cantidad de barrenos distribuidos en una área grande.

- En el primer caso se lleva un plano por cada aureola y gráficamente se dibujan consumibles presiones y fechas de inyección de cada barreno.
- En el segundo caso se llevan planos por línea de barrenos anotando los datos.

En ocasiones en el curso de la interpretación, se pueden descubrir zonas de consumo mayor a lo esperado cuya explicación generalmente puede encontrarse en variaciones geológicas locales de determinación relativamente fácil, a partir de la información recabada en la perforación. También puede haber zonas en que existen dudas tanto geológicas como de inyección, en las que será necesario realizar barrenos adicionales de control que nos permiten valuar la calidad del tratamiento.

Además de las observaciones anteriores que pueden llamarse de rutina es necesario realizar reconocimientos periódicos de la zona, estudiar la evolución de los gastos en los barrenos y en el frente de ataque, por medio de vertedores convencionales dispuestos, y recordando que mientras más información se recabe será más fácil ir modificando el tratamiento de acuerdo a las condiciones reales para lograr un trabajo técnicamente bien ejecutado.

IV.3 BOMBEO.

El volumen de agua que entra a un túnel en roca puede variar desde, no más que la cantidad generada por el riego con manguera para aplacar el polvo hasta los volúmenes encontrados en los túneles subacuáticos que se acerca mucho a los de una inundación catastrófica, en los túneles de montaña se podrá encontrar manantiales de agua muy caliente y chorros de agua a alta presión es prudente considerar de antemano las contingencias; es preciso prestar especial atención a la seguridad de los hombres que trabajan debajo de la tierra. La inundación no es instantánea, se pueden idear vías y métodos de salida prácticos.

Cuando las entradas de agua son normales los riesgos de socavación en roca serán mucho menores que en los túneles en terrenos blandos; aunque los rellenos blandos y la roca pulverizada pueden ser arrastrados en una zona de falla, se puede encontrar un lecho de arenisca poco o nada cementada en donde serán adecuadas las técnicas para terrenos blandos.

Si el túnel que se excava tiene pendiente positiva el agua que entra se puede drenar generalmente por gravedad hasta que salga por el portal, presentando pocos problemas. Con una pendiente negativa como es lo obligado en un túnel subacuático toda el agua drenará por gravedad hacia el frente, por lo que son necesarios cárcamos colectores y de bombeo. Se instalarán tuberías maestras de bombeo para conducir el agua a un cárcamo colector principal que esté situado cerca del portal o hasta un tiro de laboreo, de donde habrá que bombear el agua hasta la superficie para proceder a su descarga.

La selección de las bombas estará regida en lo que respecta al tamaño y al número por la entrada supuesta de agua, preferiblemente con un amplio margen por contingencias además de los requerimientos de reparación y mantenimiento para cubrir las entradas inusitadas. El tipo dependerá en parte del contenido de sólidos del agua y de la presión de trabajo. Se requerirán

pequeñas bombas fácilmente transportables en el frente y en otras áreas de trabajo con otras mayores instalaciones en la parte posterior. La acción abrasiva y corrosiva de los sólidos y el contenido salino pueden ocasionar un severo desgaste de los impulsores y los cojines.

La alta permeabilidad presenta fuertes aportaciones de agua al momento de efectuar la excavación, inmediatamente atrás del ademado del túnel se canaliza el agua por drenes hasta la lumbrera cuando se excava aguas arriba, o bien se conduce hacia cárcamos y tuberías para traspaleo bombeando horizontalmente por el interior del túnel, cuando se excava hacia aguas abajo en ambos casos, al llegar el agua a la lumbrera o a la galería de bombeo, se eleva hasta la superficie por bombeo vertical.

Abatimiento del nivel piezométrico:

Para proseguir con la excavación, es necesario abatir las presiones hidrostáticas en los depósitos arenosos que atravesará el túnel. Para lograr este abatimiento, se procede a la construcción de pozos profundos. Localizados a ambos lados del túnel en forma alternada y a una distancia de 10 metros del eje, con una separación de 15 metros entre sí en la zona más permeable; y a cada 30 metros al disminuir la permeabilidad.

Estos pozos son perforados con un diámetro de 30" a una profundidad de 140 y 70 metros respectivamente; esta profundidad puede variar debido a la cantidad de azolve que se registra en cada pozo.

IV.4 ESCOMBRO.

La extracción del material del túnel se realiza por la lumbrera, (figura IV. 1) para el equipo de manto, los botes elevadores o skips se tienen con una capacidad de aproximadamente $5m^3$, los malacates se accionan de tal forma que cuando un bote lleno, sube el otro baja vacío al mismo tiempo, mientras uno vacía a descargar en lo alto de la torre en la superficie de la lumbrera, el otro entra en la alcancia de la propia lumbrera para recibir la carga de las vagonetas. En algunos casos no se cuenta con doble tambor, se utiliza un contrapeso que se emplea para bajar material y en algunas cosas personales, los malacates están equipados con switch de seguridad que corta la corriente en el caso de exceder una velocidad límite.

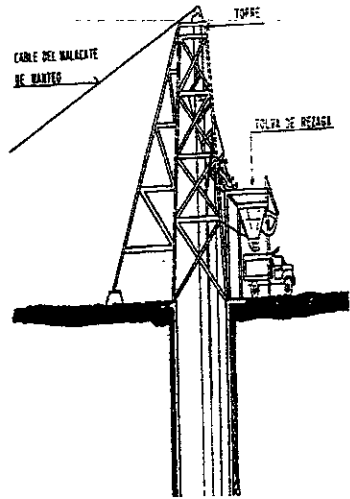


figura IV. 1

En caso de subir los botes o skips llenos bajando el otro bote vacío, se utiliza el propio motor del malacate, en tanto que cuando se tienen que bajar materiales, principalmente marcos de acero y el bote de subida está vacío se utiliza el freno. (figura IV. 2).

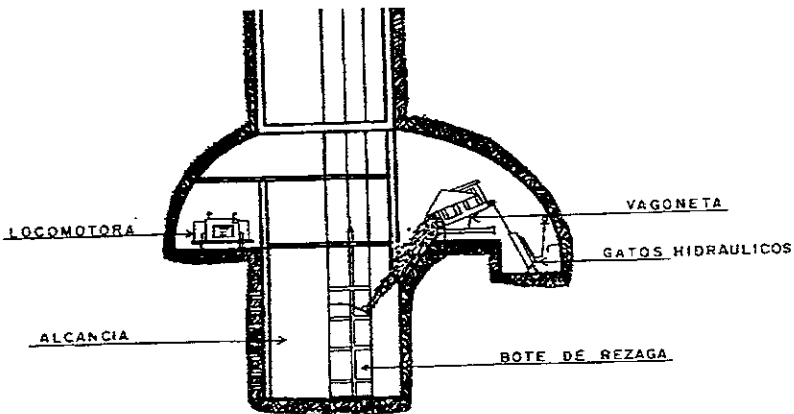


figura IV. 2

La rezaga se extrae del túnel fundamentalmente en tres operaciones:

1. Carga del material en el frente posterior a la excavación o voladura.

La carga del material en el frente de excavación se efectúa por cargadores con cucharón de descarga lateral, de una capacidad de 3m³ aproximadamente. La vía se coloca del lado izquierdo del túnel de tal forma que el cargador circula en la parte derecha del mismo, se carga el material en el frente y con un recorrido de aproximadamente 60 metros, descargando en los seis u ocho carros de un tren de rezaga, cada carro tiene una capacidad del orden de 5 metros. A una distancia más o menos de 150 metros atrás del frente de excavación, se lleva un cambio "california" en el cual se reemplazan los carros llenos por vacíos, para mantener en el frente un tren completo de carros; una vez llenos se transportan a la lumbrera.

2. Transporte del material del frente a la lumbrera.

Una vez cargados los carros o vagonetas, una locomotora los lleva hasta la lumbrera por una vía dentro del túnel. Llegando a la lumbrera, los carros descargan mediante un sistema hidráulico de descarga automática, y el material cae en unas tolvas receptoras, las cuales a su vez dejan el material automáticamente en el equipo de manto o skips; para ello, las lumbreras se prolongan más abajo del piso del túnel formando las llamadas alcancías de lumbrera. En algunas lumbreras se tienen dos skips o botes de manto, y en otras únicamente uno. Las locomotoras empleadas son de una capacidad de 10 a 15 toneladas; para el equipo de manto, los botes elevadores o skips se seleccionan para una capacidad de aproximadamente 5 metros.

3. Manto o elevación del material del fondo de la lumbrera a la superficie.

Los malacates que tienen doble tambor, se accionan de tal forma que cuando un bote sube lleno el otro baja vacío al mismo tiempo, mientras uno sube o descarga en lo alto de la torre en la superficie de la lumbrera el otro entra en la alcancía de la propia lumbrera para recibir la carga de las vagonetas. En los casos en donde el malacate no se tiene con doble tambor se utiliza un contrapeso que normalmente se emplea para bajar materiales y a veces personal, los malacates normalmente está equipados con switch de seguridad que corta la corriente al exceder una velocidad límite prefijada.

A la entrada del material en las tolvas de la alcancía de la lumbrera, y de las tolvas en la superficie, se encuentran rejillas para impedir el paso de pedras mayores de 20 cm, las cuales se eliminan y se rompen hasta producir un material con pedras menores de 20cm de dimensión. En el caso de subir los botes o skips llenos bajando el otro bote vacío, se utiliza el propio motor del malacate.

Las máquinas de tracción, tanto las locomotoras de vapor como los locotractores con motor de explosión deben descartarse en los túneles por razones de higiene, y normalmente se utiliza aire comprimido o a los locotractores eléctricos, con una ventilación conveniente, se pueden utilizar locotractores o camiones diesel.

Resagado

Carga de los escombros en galería de roca:

Después de la explosión los escombros recubren el suelo de la galería en una distancia de 30 ó 40 metros con los taponos ordinarios, el montón es más elevado hacia el frente de ataque con el tapón canadiense o perforado mecánicamente. Para la eliminación se utilizan traíllas, palas cargadoras y, a veces, en grandes secciones palas ordinarias (figura IV.3).



Tapón ordinario

tapón canadiense

Escombros

figura IV.3

1. **Trailla:** Es una cuba rescatador accionada por un cabrestante con tres tambores y tres cables, uno de tracción y dos de retorno, que pasan sobre poleas unidas a cuñas fijas en el frente de ataque (figura IV.4).

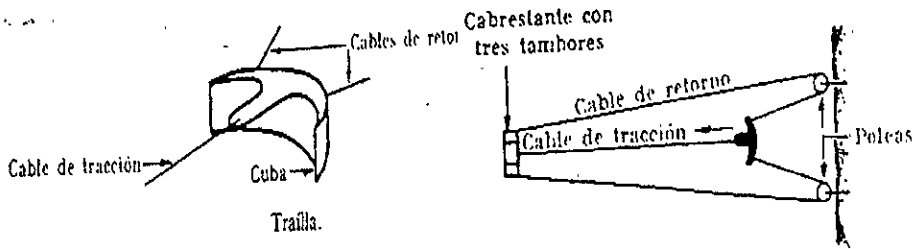


figura IV.4

Con los cables de retorno se pone en posición la cuba sobre los escombros accionándose después el cable de tracción. La cuba empuja a los escombros haciéndoles subir por una rampa que constituye el punto de carga y vertiéndose en una vagoneta (figura IV.5).

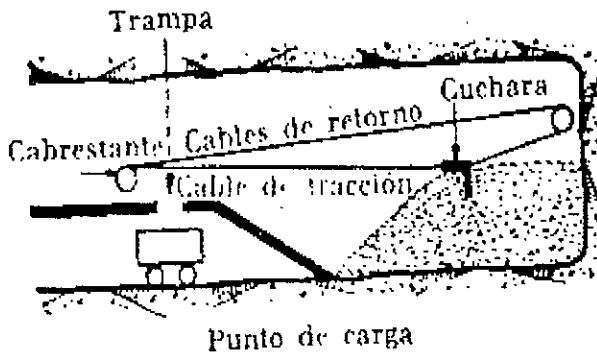


figura IV.5

El punto de carga móvil sobre carriles puede desplazarse a medida que avanza el trabajo o retirarse la voladura. Se utilizan traillas de potencia muy variable, comprendido entre 5 y 125v CV, con una trailla de 125 CV puede alcanzarse en ciertos casos hasta 500 t por turno de trabajo

Palas Cargadoras: (figura IV.6). Es una máquina de dimensiones reducidas en anchura y altura que carga los escombros ante sí, descargándolos por detrás en las vagonetas en un movimiento basculante, la pala no tiene movimiento de rotación lateral que sería imposible dada la estrechez de las galerías, puede orientarse a derecha e izquierda para servir mejor el frente de los escombros.

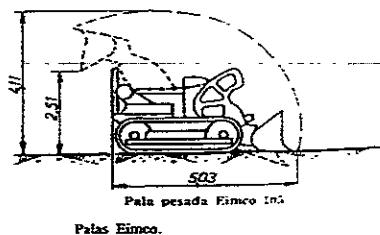


figura IV.6

Las palas pueden ser de accionamiento eléctrico o por aire comprimido, se desplazan sobre carriles (vías de 60 a 100 cm) o sobre orugas, en el caso de las palas que se desplazan sobre carriles los engancha en la parte frontal del primer tren de vagones que se hace avanzar hacia el frente de ataque después del final de la ventilación y se las retira en el último tren (figura IV.7).

Se utilizan palas ligeras de carga directa y palas pesadas en las que el cucharón vierte los escombros sobre un transportador, lo que permite la carga de vagones de gran capacidad. Las palas ligeras permiten el trabajo en túnel de menos de 15m² y en tuneles mayores se emplean palas pesadas.

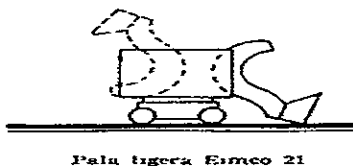


figura IV.7

Las palas ligeras o pesadas pueden ser eléctricas o de aire comprimido, la carga es un cangilón que bascula hacia atrás.

Las palas en modelos pequeños son eléctricas y la carga la realiza con un cangilón basculante en los modelos grandes, el cangilón está seguido por un vertedero que se levanta con él para alimentar el transportador (figura IV.8).

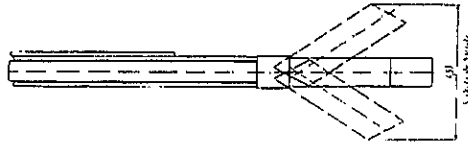
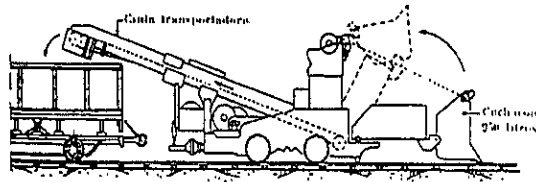
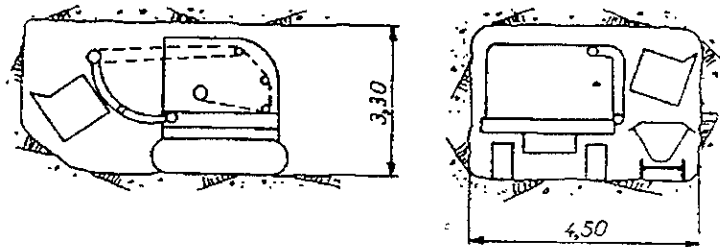


figura IV.8

3. **Palas:** En los túneles pueden utilizarse las palas ordinarias dependiendo esta posibilidad únicamente del gálibo. Las palas especiales para túneles con gálibo muy bajo permite el trabajo en galerías de 4.50 metros de anchura por 3.0 metros de altura (figura IV.9).



Pala para túnel.

figura IV.9

Las palas ordinarias son eléctricas en algunos casos con motor diesel en el caso de galerías de gran sección bien ventiladas, o con dispositivos especiales de depuración.

4. **Cargador Joy:** Empleado en las minas de hierro, son adecuados para materiales muy divididos en rocas blandas, se utiliza en galerías de pequeña altura, se desplaza sobre orugas. Comprende dos brazos

rotativos (patas de alimentación) que en un movimiento continuo reúnen los materiales dirigiéndolos a un transportador de cinta con listones cuya parte posterior puede elevarse en ángulo de 45° para facilitar la adaptación a galerías no rectilíneas (figura IV.10).

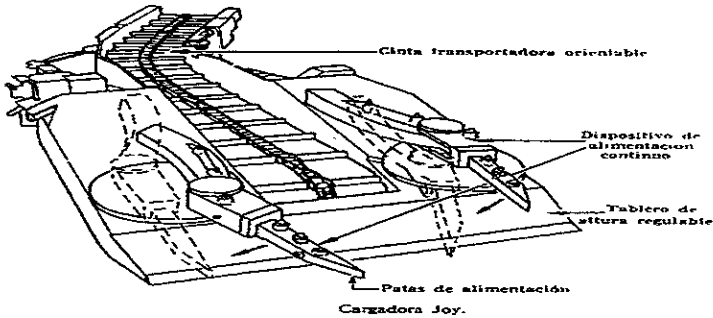


figura IV.10

5. **Transporte por vía de 60:** La capacidad de los vagones es de 1 a 2 m³ para las secciones inferior a 15m³, y del orden de 2 ó 3m³ si se emplea vía de 60 para secciones mayores, los vagones sobre vía de 60 pueden ser: vagones basculantes a mano (tipo "decauville"), cuyo defecto es el excesivo tamaño, berlinas metálicas de forma cuadrada con vuelco automático, este tipo de berlina resulta bastante caro, pero el vaciado es rápido y pueden utilizarse berlinas vaciadas en un vaciador de vagones (figura IV.11).

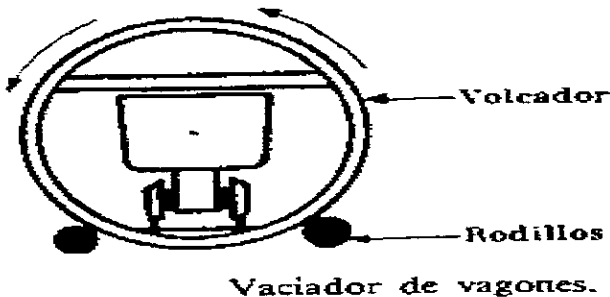


figura IV.11

Este se compone de un cilindro de estructura metálica que puede girar sobre rodillos adecuados y en el que se mete la vagoneta que se invierte y vacía, volviendo después el aparato a su posición inicial, este dispositivo es lento ya que las berlinas deben invertirse una tras otra.

6. **Transporte por vía métrica o normal:** Se utilizan vagones de capacidad mucho mayor y salvo en la forma que a veces debe adaptarse al perfil de las galerías, a menudo las soluciones de vuelco automático se adaptan más a la robustez requerida por el material, utilizando también los gatos de vuelco con vagones de 8m^3 de capacidad. (figura IV.12).

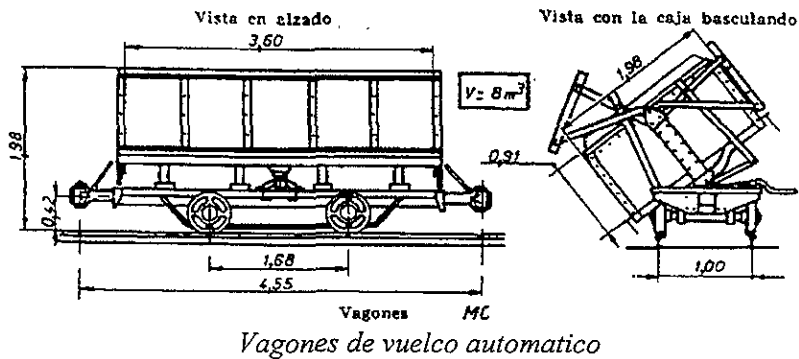


figura IV.12

7. **Cambio de trenes:** El problema más importante es el de cambio de los trenes vacíos y de los llenos tras el aparato de carga, pues las galerías son generalmente demasiado estrechas para poder instalar una vía doble en la parte revestida, la finalidad es permitir una sustitución rápida de los vagones vacíos por los llenos, de tal forma que la pala trabaje sin detención.

Cambio de vías californiana, conjunto simétrico de traviesa y carriles unidos que se coloca sobre la vía central, a lo largo de la que puede desplazarse mediante rodillos (figura IV.13).

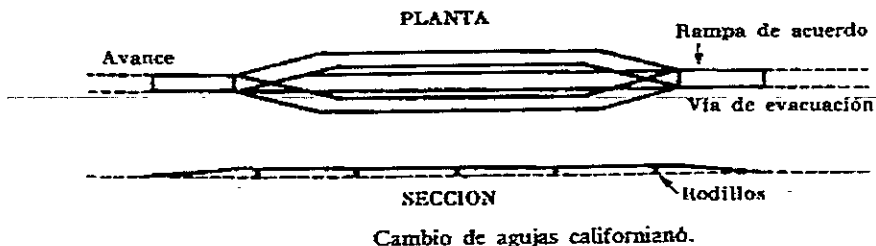


figura IV.13

La pala o un tractor especial lo desplaza periódicamente hacia el frente, retirandolo hacia atrás durante las voladuras y volviendo a colocar en posición durante la carga de los materiales, el tren vacío está sobre una de las vías y el lleno sobre las otras, los vagones vacíos pasan a la parte delantera, se cargan y se envían hacia atrás después por la otra vía. Las agujas son automáticas y en los extremos hay pequeñas rampas móviles para evacuar hacia atrás un vagón cuya carga acaba de terminarse, es posible también desenganchar el vagón vacío que está tras él con un "cherry picker" (figura IV.14).

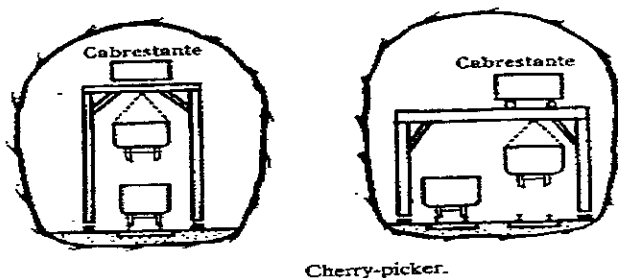
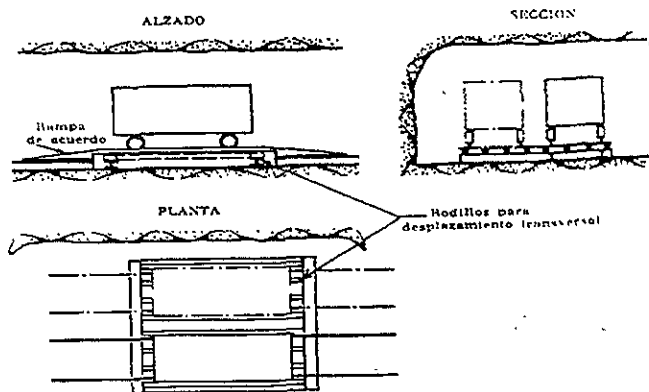


figura IV.14

Es una estructura aporcada situada sobre las vías y con un cabrestante de aire comprimido, se levanta el vagón vacío para pasar el vagón lleno dejándolo de nuevo sobre la vía, continuando con la etapa de carga este

dispositivo puede utilizarse también para atender el tajo de carga con una doble vía, realizando el cambio de las vagonetas vacías y llenas mediante el “cherry picker”.

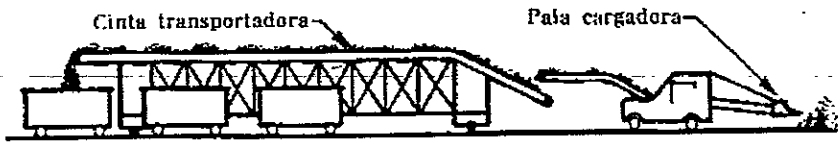
En lugar de elevar el vagón es posible si se tiene espacio suficiente (gálibo del túnel), desplazarlo a un lado mediante un puente transversal; otro método puede ser el “dixon” para cargar trenes enteros sin desenganchar los vagones (figura IV. 15).



Puente transversal para vagones

figura IV. 15

La cinta transportadora de la pala vierte los escombros sobre una segunda cinta transportadora soportada por una estructura montada sobre ruedas, los vagones del tren que serán llenados pasan bajo la estructura cargándose de forma continua (figura IV.16).

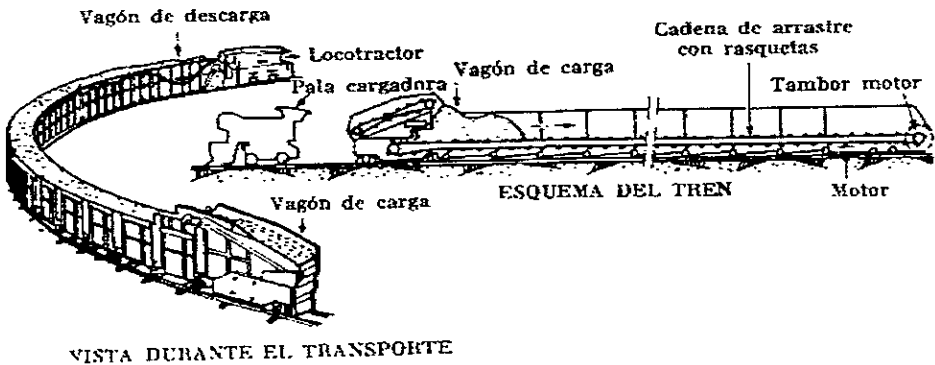


Dixon.

fig

ura IV.16

8. **Otros procedimientos para vías férreas:** Es una serie de vagones unidos de vía de 60, por el fondo de los cuales circula una cadena con rasquetas cuyo órgano motor se encuentra en uno de los extremos del tren (vagón de descarga) (figura IV. 17).



VISTA DURANTE EL TRANSPORTE

Tren transportador acumulador Smag.

figura IV. 17

La carga se realiza en el otro extremo en un vagón de carga equipado con un pequeño transportador, los materiales vertidos por la pala en el vagón de carga avanza hacia el otro extremo por efecto de la cadena de rasquetas (figura IV. 18), la capacidad de carga es de $3.5m^3$ y puede conseguirse en 90 minutos aproximadamente. Se utiliza un tren de este tipo en la perforación de la galería.

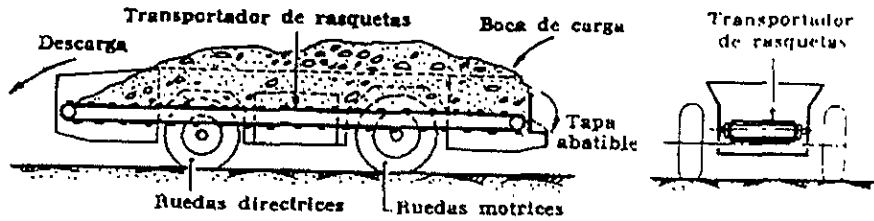
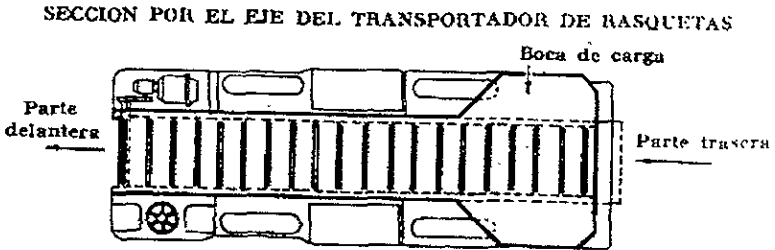


figura IV. 18

El tren cargado se engancha a un locotractor eléctrico o de aire comprimido que le hace desplazarse a una velocidad de 7 a 10 Km/hora, la descarga se realiza por vagón de carga en 25 minutos aproximadamente; para la carga y descarga, el tren debe encontrarse en alineación recta, durante el transporte puede tomar curvas de 25mm de radio, el tren transportador puede utilizarse en secciones circulares de 2.50 y su anchura de 2.00 metros, el material abrasivo desgasta rápidamente la cadena de rasquetas; otra manera empleada es remolcadores sobre vía normal compuesta de tres vagones unidos de 38 m³ cada uno, con una carga total de 114m³, los escombros son vertidos por la pala en una tolva en uno de los extremos del tren y movidos por una hoja de trilla, accionada por un motor eléctrico de 100 CV, montada sobre carriles a mitad de la altura de los vagones, extendiendo los escombros a lo largo del tren a razón de 4m³ por pasada. (figura IV. 19).



VISTA EN PLANTA

Esquema de una carretilla lanzadera.

figura IV. 19

9. **Transporte mediante máquinas sobre neumático:** Se tiene el "dumper" 7.50 metros L para pequeñas secciones, a los grandes camiones empleados en las excavaciones al aire libre para secciones importantes, en secciones (30 a 50m²) el dumper de 5m³ aproximadamente

IV.5 Equipo de Excavacion y/o Perforacion.

Topo mecánico. Cuando el material por atacar consiste en una roca competente y buena capacidad para autosoportar, son usadas máquinas perforadoras de agarre lateral. Las paredes de la excavación deben tener la capacidad de carga necesaria para soportar el empuje de los gatos de agarre que permiten el empuje longitudinal sobre la cabeza giratoria de la perforadora. La rezaga está constituida por lascas y dependiendo del tipo de rocas de un gran porcentaje de finos. Los cortadores perimetrales están protegidos por unos rapadores que son colocados delante de ellos e impiden una acumulación de material suelto, principalmente en el piso del túnel. La cabeza tiene unos cangilones que recogen la rezaga y la depositan en una banda transportadora, que se encuentra en la parte superior del topo que la conduce hasta la zona de carga a los vagones o camiones, detrás del topo (figura IV.20).

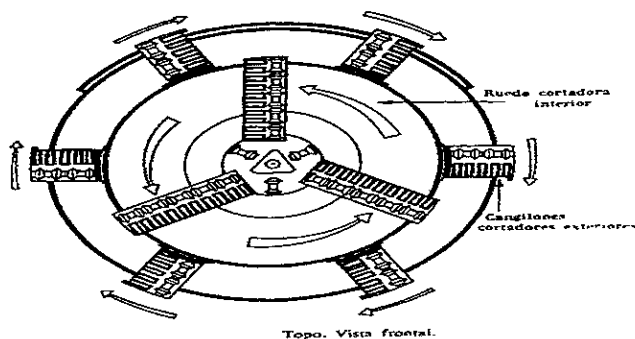


figura IV. 20

El topo está provisto en su parte superior de una banda transportadora de rezaga que es cargada por medio de los cangilones de la cabeza y descarga en la tolva donde arranca otra banda transportadora que puede aproximadamente ser de 100 metros de longitud, colocada sobre una estructura metálica

formada por marcos transversales unidos entre sí. El alineamiento de la máquina se debe llevar por medio de un rayo láser y es necesario tener operadores cuidadosos ya que al salir de línea la máquina hay que describir curvas grandes para no trastornar la operación de la banda transportadora larga. El topo tiene tendencia a desviarse hacia un lado preferente, dependiendo del sentido de la rotación de la cabeza (figura IV.21).

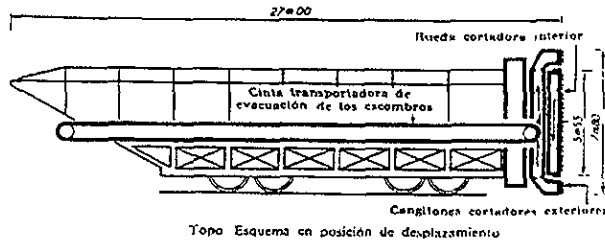


figura IV. 21

En el caso de presentar alguna falla en el terreno pueden colocarse anillos circulares, en muchas ocasiones es necesario poner solamente parte del anillo anclando sus extremos en la roca sana. En terrenos fracturados que producen piedras grandes, mayores por ejemplo de 25 cm., éstas pueden atorarse rompiendo los cangilones o bien la tolva de la banda transportadora del topo, para minimizar los daños al sistema de rezaga es conveniente instalar una rejilla protectora que gire con la cabeza y que permita el paso de diferentes tamaños de roca que pueda asimilar el sistema de rezaga. Los cortadores sobresalen de esa rejilla más o menos 3 cm. Es conveniente que el sistema de rezaga pueda aceptar el mayor tamaño posible de roca. En terrenos muy fracturados se ha ensayado una combinación de Escudo y Topo, con buenos resultados.

Perforadora:

Plataforma rodante o jumbo (Equipo de barrenación) (figura IV. 22) de gran velocidad que permite la ejecución de un tapón circular de 200 a 300 mm con gran precisión, los barrenos normales previstos de martillos (figura IV. 22).

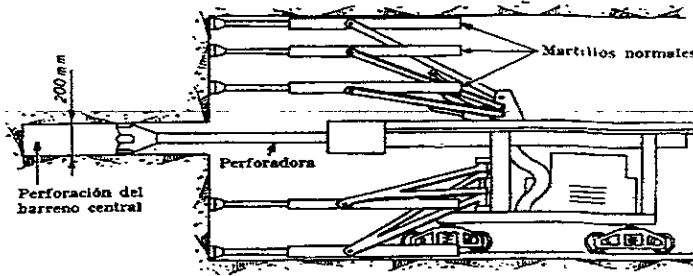


figura IV. 22

Escudo. Se usa comúnmente en suelos blandos con poca cohesión tiene una cabeza giratoria con elementos de corte reemplazables que efectúan el arranque del material, la cabeza es empujada por medio de gatos hidráulicos hasta el frente y el cuerpo de la máquina se encuentra protegido por un cilindro metálico que se desliza contra las paredes de la excavación a medida que ésta se realiza, es necesario en algunos casos el ir soportando el túnel a medida que la perforación progresa. La forma más usual de soporte provisional o ademe es por medio de dovelas generalmente de concreto, que van siendo colocadas formando anillos sucesivos a muy poca distancia de la parte posterior del cilindro metálico de protección, los gatos de empuje longitudinal se apoyan en dichos anillos (figura IV 23).

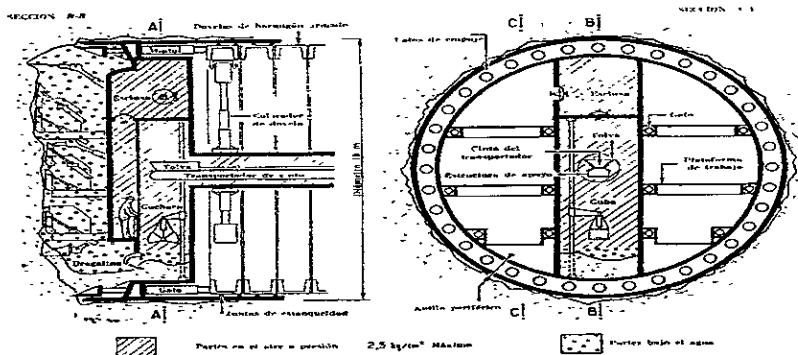


figura IV.23

Túnel de autopista aplicando el principio simple de la excavación por escudo que consta de una pieza anular afilada de acero, formando el escudo acoplado a un tubo de acero cilíndrico, aplicado frontalmente contra el terreno por medio de gatos estos se apoyan sobre el último anillo formado por los segmentos de concreto armado ya montados (figura IV.24).

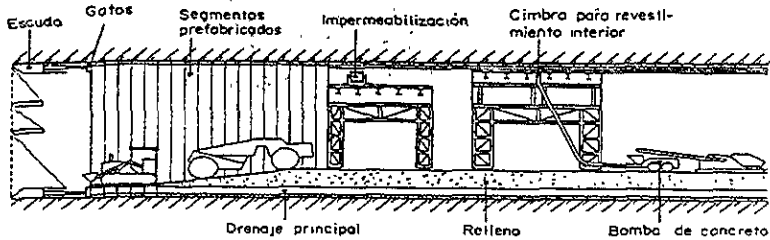


figura IV.24

Máquina fresadora:

Existen varios tipos de máquinas que se emplean para un avance de la excavación de túneles y galerías a sección completa, dos de los tipos usados son: máquina con cinceles rodantes montados en la cabeza y con cabezal portacuchillas, la primera es operada con una barreta que gira sobre la roca ejerciendo a través de los cinceles rodantes, según el tipo de roca se puede elegir entre tres clases de cinceles: de botones, dentados o de platillo (figura IV.25 y 26).

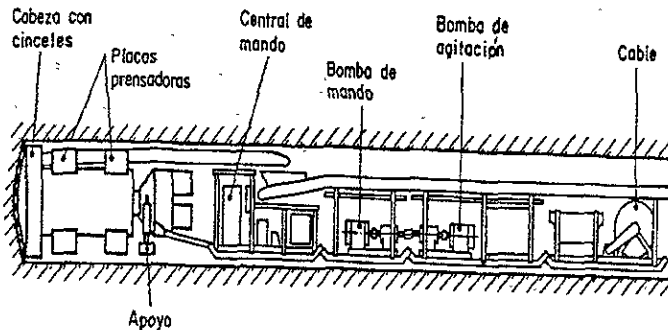


figura IV.25

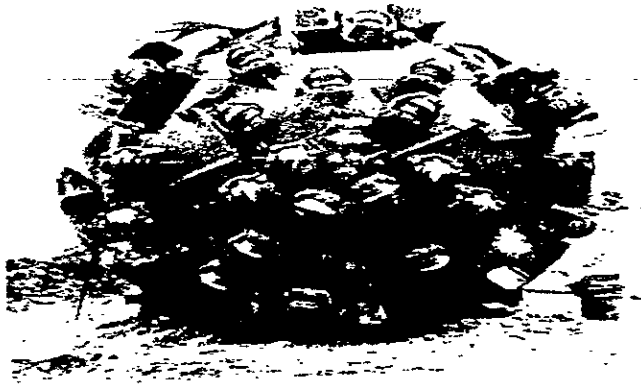


figura IV.26

Las máquinas con cabezales portacuchillas cortan la roca mediante cinces fresadores montados alrededor de discos rotatorios, el sistema con cinces rodantes la fuerza principal actúa en el sentido del avance, en el sistema de cabezales portacuchillas las cargas principales son en el sentido de la rotación (figura IV 27).

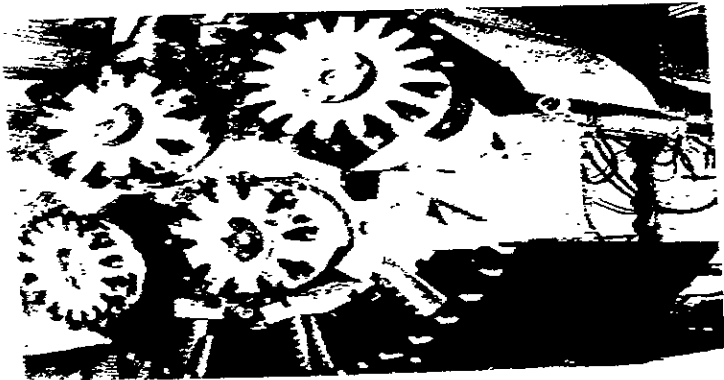


figura IV 27.

Máquina ensanchadora: El procedimiento con perforación previa de un túnel piloto tiene la ventaja del conocimiento anticipado de las condiciones de

la roca que va a ser excavada y la aspiración hacia adelante del polvo por las ensanchadoras (figura IV 28 y 29).

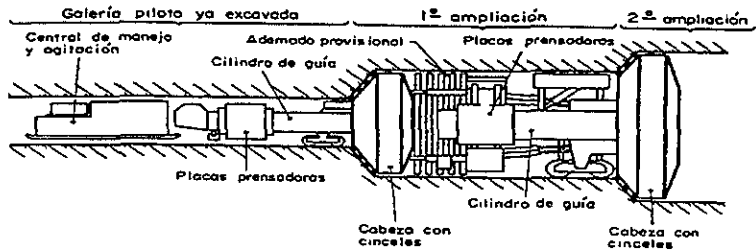


figura IV 28.

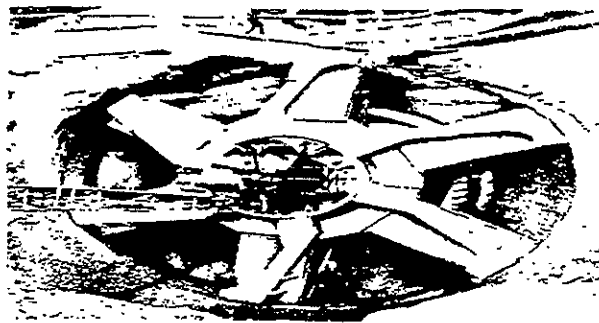


figura IV.29

IV.6 VENTILACION.

El propósito de la ventilación en túneles es mantener el aire en el frente de trabajo libre de contaminación como las emanaciones de los explosivos, el polvo, el excesivo calor.

Se lleva a cabo haciendo circular aire desde el portal hasta el área de trabajo a través de conductos a los que se acoplan uno o más abanicos eléctricos. Cuando el aire se mueve en el conducto de ventilación de afuera hacia el frente de trabajo se llama "método de ventilación de entrada" y cuando se mueve en dirección contraria "método de ventilación de salida". También se

puede utilizar el sistema combinando los dos métodos, es decir, con una tubería de entrada y otra de salida.

La selección del método de ventilación apropiado depende principalmente del flujo de aire requerido (en unidades de volumen por unidad de tiempo) y de la distancia del frente de trabajo al portal.

El diseño del sistema de ventilación depende también de las causas de la contaminación del aire. Las causas de contaminación más importantes son las emanaciones producto de la desintegración de los explosivos que son principalmente el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno la nube de polvo que se produce por la explosión y que se genera continuamente durante las etapas de perforación y rezagado; los gases expulsados por las máquinas que consumen diesel y gasolina; y el calor de la explosión y los motores que no debe de elevar la temperatura del área de trabajo encima de 30° a 35° centígrados.

La ventilación se impone en todas las obras de construcción de túneles siendo necesario un volumen de aire fresco del orden de 3 m³ /minuto por cada hombre trabajando en los túneles que se utilizan en motores diesel o de explosión, especialmente para el transporte de los escombros o explosivos. Para el caso de perforación de galerías en roca, exige un volumen suplementario de aire.

Gases de escape:

En lo que se refiere a los gases de escape de los motores diesel o de explosión, éstos pueden ser peligrosos cuando se supera cierto contenido de óxido de carbono y molestos por la presencia de hidrocarburos no quemados, aldehídos y gas carbónico.

Los motores de gasolina pueden dar en el escape gases que contienen un 3% de óxido de carbono en plena potencia y de un 7 a un 8% en marcha lenta.

Los motores diesel pueden contener el 0.2% de este gas a plena potencia y del 1 al 2% con mal funcionamiento.

Si un motor de 50 CV da un caudal de gases de escape del orden de $3\text{m}^3/\text{minuto}$, pueden presentarse rápidamente contenidos importantes de este gas en los túneles largos y de pequeña sección.

Generalmente, se admite que el contenido de CO tolerable en el aire ambiente para una jornada de trabajo de ocho horas es del orden del $1/10000$ en volumen. Los hidrocarburos no quemados son más molestos que peligrosos, es desagradable respirarlos. Algunos higienistas afirman que pueden producir el cáncer de pulmón.

Los aldehídos dan con el anhídrido sulfuroso el olor característico de los gases de escape. Con su concentración habitual no son peligrosos pero, sin embargo, ejercen una acción irritante sobre los ojos y las vías respiratorias. El gas carbónico (CO_2) no constituye propiamente un producto tóxico, pero su presencia resulta perjudicial cuando reduce anormalmente la cantidad de oxígeno respirable.

De todo esto resulta la necesidad de la ventilación para obtener una dilución conveniente de estos gases. Puede estimarse muy groseramente, que son necesarios $5\text{ m}^3/\text{minuto}$ de aire por CV. Sin embargo, puede reducirse esta cifra mediante el empleo de depuradores de los gases de escape. Los más eficaces parecen ser los depuradores de oxidación catalítica que eliminan los productos no quemados dando gas carbónico y agua.

Gases resultantes de las voladuras:

La explosión de 1Kg de dinamita produce aproximadamente 1m^3 de gas con el 5% de óxido de carbono, o sea, 50 litros de este gas. Para rebajar el $1/10\ 000$ el contenido de este gas en el aire ambiente en cabeza de túnel, debería procederse a la adición de 500 m^3 , lo que conduciría a ventiladores desproporcionados respecto a los que son necesarios para la ventilación normal.

La práctica demuestra que, limitándose a hacer circular después de cada explosión un volumen de aire equivalente al de 300 m^3 de galería, se rechaza el tapón gases a un centenar de metros tras al frente de ataque los obreros pueden atravesarlo rápidamente sin peligro llegando al frente de ataque en el

que el aire es puro. Esta ventilación es compatible con la potencia de los aparatos de ventilación normales trabajando de 15 a 30 minutos.

Esta ventilación es precedida por una aspiración destinada a desplazar el tapón de gas. Esta aspiración previa puede obtenerse mediante ventiladores reversibles o invirtiendo el circuito de aire, según el esquema de la figura IV 30, con un ventilador ordinario

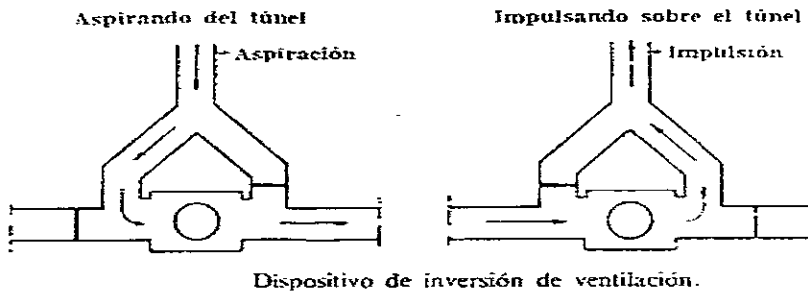
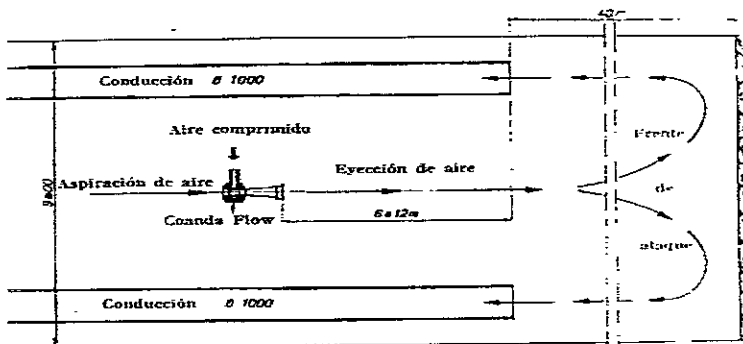


figura IV 30.

Los ventiladores están instalados al aire libre, el que se hace circular por conducciones de chapa de diámetro que varía de 30 a 100 cm (figura IV 31).



Evacuación de los humos después de la voladura.

figura IV.31

La ventilación se puede realizar por tres procesos:

1. Inyección del aire fresco al frente del túnel durante las operaciones de excavación, barrenación y rezaga, extracción del aire durante las operaciones de carga y voladura; esto es posible invirtiendo el sentido de los ventiladores.
2. Extracción durante todo el tiempo, desde el interior del túnel hacia la superficie.
3. Inyección de aire desde la superficie hasta el frente de excavación durante todo el tiempo

La capacidad de los ventiladores (figura IV 32).empleados en el túnel puede ser de 38 000 pies cúbicos /minuto, la elección de la capacidad del equipo de ventilación se realiza en base a los siguientes factores:

- a) El gasto de ventilación necesario para eliminar el humo y los gases producidos por los explosivos.
- b) La cantidad de aire necesario para eliminar los gases producto de la combustión del diesel en los equipos.
- c) El gasto normal del personal trabajando en el frente de la excavación.
- d) Condiciones geológicas y dimensiones del túnel.

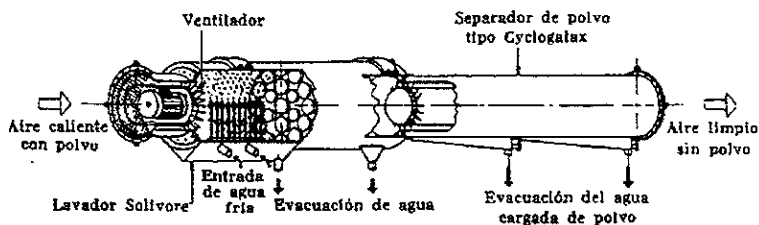


figura IV.32

Los ventiladores normalmente se colocan a 500 metros de distancia entre sí funcionando correctamente con una ventilación adecuada en todos los frentes

de excavación. La cantidad de oxígeno en una atmósfera cuando es menor del 20% puede causar dolores de cabeza y desarrollar cansancio; menos del 17% puede causar períodos de inconsciencia, el máximo contenido de gas carbónico tolerable es del orden de 0.9% en el aire.

El volumen de aire requerido para compensar el tipo de operación y para las condiciones geológicas se evalúa siempre en una base individual, considerando la intensidad de los movimientos, la frecuencia de las explosiones, el tipo y cantidad de gas natural contenido en el suelo, los lubricantes en el equipo mecánico contribuyendo junto con los gases que exhalan los equipos a altas temperaturas a incrementar el gas carbónico, a pesar de que el equipo empleado sea diesel.

Los factores que contribuyen a pérdidas en la carga de la ventilación y por lo tanto, a disminuir la velocidad y el suministro del aire son: La fricción, la resistencia entre los tubos y los codos o válvulas en la tubería de ventilación, la tubería empleada en el túnel para la ventilación es de 0.91 metros de diámetro, en el caso de emplear cargadores no neumáticos, sino diesel, reduciendo la distancia entre ventiladores a 350 metros, en ocasiones es necesario la instalación de ventiladores en serie, provocando el fenómeno de turbulencia, bajando la eficiencia del sistema de ventilación.

V.- REVESTIMIENTO.

El espesor promedio del revestimiento de concreto es de 45 cm. en los tramos excavados en roca, y de 25 cm en los tramos excavados con escudo y ademados con dovelas. Para el colado se utilizan varias plataformas de colado, las cuales se mueven a la misma velocidad del colado sobre una vía central colocada ex profeso en el túnel; todo el concreto es colocado por bombeo a baja presión, fabricado en superficie en plantas con capacidad de 90 metros/hora.

El revestimiento del túnel se diseña para cumplir con los siguientes objetivos al menor costo:

- Soportar las presiones ejercidas por el suelo circundante a la cavidad, manteniendo un margen de seguridad aceptable tanto en el suelo como en el material de revestimiento.
- Reducir al mínimo los asentamientos en la superficie.

Dependiendo de su función se pueden distinguir dos tipos de revestimiento según su función.

- A) Primario, se utiliza para proveer un apoyo temporal que garantice la estabilidad del túnel durante su construcción y mantenga los asentamientos superficiales dentro de los límites tolerables.
- B) Secundario, proporciona la geometría final del túnel y asegura un comportamiento adecuado a largo plazo.

Sin embargo es frecuente el uso de un revestimiento único que desempeña las funciones, al quedar instalado definitivamente durante la etapa de excavación.

El procedimiento constructivo en términos generales, consiste en lo siguiente:

- a) Preparación de los tramos por colar.
- b) Colado de la plantilla y colocación de la vía central.

c) Colocación de la cimbra.

d) Transporte del concreto desde la superficie hasta la cimbra.

e) Colocación y acabado del concreto.

Preparación de los tramos por colar:

El primer paso para construir el revestimiento definitivo de los túneles, consiste en llevar a cabo un levantamiento topográfico preciso de las secciones transversales del túnel.

Para definir la posición de la cimbra se toma como base el levantamiento topográfico de los gálibos del túnel "levantamiento en planta", en esta forma, se hace una primera alternativa de la posición de la cimbra en el túnel.

Además del estudio mencionado, se lleva a cabo otra de las pendientes hidráulicas en algunos tramos en donde por las características del terreno y las dificultades durante la excavación, el túnel no se excava en los niveles señalados por el proyecto.

En estas zonas se efectúan "peines" de piso para mantener la pendiente hidráulica constante; para este estudio se toma como base el levantamiento topográfico del túnel en clave y piso. Al iniciarse los levantamientos topográficos, cada sección transversal del túnel se levanta mediante el empleo de un disco graduado a 360° cuyo centro se localiza en el eje del túnel, dada la poca precisión que se tiene, se utiliza un seccionamiento con láser.

Se traza un eje orientado debidamente referenciado que pueda ser restituido cuantas veces sea necesario. En base a este eje orientado se trazan ejes paralelos que sirven de base para la colocación del equipo láser; el trazo de los ejes paralelos es necesario dada la diversidad de posiciones que en túnel tienen los tubos de ventilación, las vías, los drenes, fósas de mantenimiento, etc.

Una vez definida la posición del eje de la cimbra, se procede a mover los marcos estrictamente indispensables para que la cimbra se colocara en el túnel dando los espesores del revestimiento marcados en el diseño estructural. Se retiran todos los elementos y materiales sueltos que pudieran contaminar el concreto durante el proceso de colado tales como rezaga, madera suelta, separadores de marcos, demolición de concretos primarios, etcétera.

Al mismo tiempo de efectuar estas maniobras se quitan las tuberías de alimentación de aire comprimido a alta presión, de agua, cables eléctricos y la tubería de ventilación que en esta etapa de la construcción del túnel se hace innecesaria al estar conectados los tramos entre lumbreras, debido al “tiro” que proporcionan las mismas. Se construyen los drenes que sirven para mantener en seco el túnel durante el proceso de colado en las zonas de lluvia abundante dentro del túnel.

La cimbra en la mayoría de los casos está apoyada directamente sobre el piso del túnel, razón por la cual se tiene la necesidad de colar una plantilla de concreto simple de 10 cm de espesor en promedio que funciona también como pista de rodamiento para el tren de colado. Para el movimiento de los trenes de concreto y del tren de colado, se utiliza vía de tipo convencional con espuelas, en algunos sitios previamente asignados. Para alcanzar las velocidades de colado que exige el programa de construcción, se requieren varios trenes para operar simultáneamente en el sistema de colado de cada tramo; por lo anterior, el control se realiza mediante las órdenes de un despachador central en cada tramo. Conforme se está colocando el concreto las vías existentes se retiran cuando invaden los espesores del revestimiento; en algunos casos los durmientes se dejan en las laterales del túnel; sin embargo cuando no hay, es necesario sacarlos del túnel.

Colado de plantilla y colocación de la vía central:

El colado de la plantilla del túnel reúne ciertas características como son:

1. Limpieza del túnel. Se debe colar la plantilla y canalizar toda el agua hacia el dren, la sección del túnel se barrerá y se quitará toda la tierra y el material suelto, el túnel debe quedar completamente limpio para recibir el concreto.

2. El peso de la cimbra se carga directamente sobre la plantilla en algunos tipos de terreno se tiene la necesidad de construir esta plantilla por la garga de la cimbra.
3. El colado de la plantilla a la elevación correcta permite la colocación rápida y continua de la cimbra, facilitando el colado y produciendo mayores avances en el revestimiento.
4. La colocación y el arreglo de la vía sobre la plantilla facilita la alineación correcta, logrando aumentar la velocidad en el tránsito de los convoyes de concreto.

La vía se diseña de acuerdo con los siguientes factores:

1. **Capacidad de los vagones agitadores.** Cada uno transporta 4 m³ de concreto aproximadamente.
2. **Número de vagones en el tren.** Normalmente se utilizan tres vagones por tren.
3. **Número de trenes en el sistema.** El número de trenes circulando para transporte de concreto hasta la cimbra es muy variable y depende fundamentalmente de la capacidad de la cimbra y de la distancia a la que ésta se encuentra de la lumbrera por la que baja el concreto.

Concreto para revestimiento.

1. **Características del concreto.** El concreto que se emplea para el revestimiento de túneles tiene los mismos ingredientes que un concreto convencional; sin embargo, por sus condiciones de colocación requiere un control mucho más estricto. La mezcla de concreto deberá ser plástica y homogénea, poco segregable y por lo general de revenimiento alto.

En un buen número de casos se requiere de cemento tipo V (resistencia a los sulfatos) debido a los revenimientos más bien altos, y a las proporciones de agregado fino y grueso (por lo regular altos contenidos de arena para facilitar el bombeo), la mezcla puede requerir aumentos en la cantidad de cemento. El uso de consumos elevados de cemento como solución a los

problemas de bombeo es antieconómico e inadecuado, por lo tanto es aconsejable corregir las deficiencias en los agregados especialmente en la arena.

Uno de los problemas más importantes que es necesario tener en cuenta en el concreto para revestimiento de túneles, es la pérdida de revenimiento provocado por el sistema de transportes empleados.

Los aditivos más usados son los siguientes:

Cualquier aditivo que aumente la manejabilidad del concreto facilitará y mejorará las condiciones del bombeo, el aditivo que se emplee debe proporcionar mejor lubricación y reducir la segregación y el sangrado.

- Reductores de agua.
- Incluidores de aire.
- Plasticantes
- Aditivos minerales finamente molidos (puzolanas).

2. Fabricación de concreto:

- a) **Planta de concreto.** Deberá localizarse en una zona de fácil acceso para permitir el suministro de los ingredientes del concreto; además es necesario que cuente con patios adecuados para almacenamiento de agregados y silos para almacenar cemento, previendo una posible deficiencia en el suministro. Por otra parte, debe quedar lo más cerca posible del sitio por donde se va a introducir el concreto al túnel para evitar largos acarreos que propician las pérdidas de revenimiento y la segregación del concreto.
- b) **Laboratorio.** Debido a que el concreto que se emplea en el revestimiento de túneles de características especiales con alto revenimiento y gran plasticidad, es conveniente que en la zona de la planta exista un laboratorio, que permita controlar la producción del

concreto, haciendo los ajustes necesarios a los proporcionamientos por variaciones en contaminación y humedad de los agregados, así como controlando las características de los mismos. El laboratorio deberá contar con el equipo necesario para determinar las características del concreto en estado fresco tales como revenimiento contenido de aire, peso volumétrico, tiempo de fraguado y con el equipo para la obtención de especímenes para la determinación de la resistencia a compresión del concreto y para hacer las modificaciones que requiere el proporcionamiento.

c) **Dosificación.** Las dosificaciones de los ingredientes debe hacerse en peso, a excepción de algunos aditivos que deben dosificarse en volumen. Es recomendable, con objeto de evitar segregación en el agregado grueso, que éste se dosifique en fracciones de diferentes tamaños. Las tolerancias en los pesos son los siguientes:

1. Cemento 1%
2. Agua 1%
3. Agregados 2%
4. Aditivos 3%

a) **Mezclado.** Este aspecto es de gran importancia en el concreto empleado en revestimiento de túneles, pues debido especialmente a los sistemas empleados en el transporte y colocación la mezcla deberá ser uniforme y cohesiva para evitar segregación y pérdidas de trabajabilidad. En muchas ocasiones es necesario un remolcado en el sitio de la colocación.}

V.1 MÉTODO.

Colocación del concreto: La selección del método de colocación para el revestimiento de túneles depende principalmente del avance de la excavación, problemas de la estabilidad de la excavación, volúmenes por colar, uso que vaya a tener el túnel y de la sección del mismo.

Existen tres sistemas de colocación de concreto para el revestimiento de túneles:

- a) Sistema convencional.
- b) Sistema Bernold.
- c) Concreto lanzado.

Sistema convencional: Consiste en el colado del concreto por medio de cimbras. en este método que es el más empleado, la colocación del concreto se puede efectuar con diferentes tipos de equipo siendo los procedimientos más usados los siguientes:

Colocación de concreto por medio de bombas: Desde 1950 se ha producido un notable adelanto e innovaciones en el campo del bombeo de concreto, incluyendo nuevas y más perfeccionadas bombas así como la introducción de mangueras de metal flexible o material plástico. La colocación de concreto por bombeo ha sido una de las prácticas más rápidamente extendidas en la construcción y en especial en el revestimiento de túneles, donde el espacio para el equipo de construcción es muy reducido. Dependiendo del equipo seleccionado el rendimiento del bombeo puede variar de 8 a 70 m³ por hora. El alcance efectivo varía de 20 a 30 metros horizontalmente o de 30 a 90 verticalmente.

Existen dos sistemas de colocación muy empleados en el revestimiento de túneles: las bombas de pistón que se componen básicamente de una tolva de recepción para el concreto mezclado, una válvula de entrada, otra de salida, un pistón y un cilindro. Tienen dos pistones que empujan el concreto alternativamente lo que permite un flujo más continuo. Otro tipo, son los sistemas neumáticos conocidos como “cañón”; el concreto se coloca en un

recipiente de presión, el cual se cierra herméticamente, después se introduce aire comprimido por la parte superior lo que empuja el concreto a través de una tubería en la parte inferior del recipiente.

Consideraciones para el empleo de bomba o cañón.

- 1) El costo inicial del cañón es menor que el de la bomba.
- 2) El mantenimiento del cañón es menor en igualdad de condiciones de uso.
- 3) La bomba es un equipo más versátil que el cañón, es decir, puede utilizarse en mayor número de aplicaciones y combinaciones.

Existen algunos equipos de bombeo que permiten el manejo de concreto de bajo revestimiento (hasta 5cms.), lo cual permite la utilización de una gama mayor de características de trabajabilidad, es decir aceptan mayor variación que las aceptables en los cañones usuales.

- 4) El sistema de bombeo de concreto requiere el uso de aire comprimido para el “cañón” de la clave de revestimientos circulares.
- 5) Las bombas poseen normalmente un sistema de remezclado que permite restituir algo de la homogeneidad perdida eventualmente durante el transporte y manejo del concreto fresco.

Para elegir la capacidad y número de bombas o cañones que se requieren para el trabajo determinado, es conveniente tomar en cuenta los siguientes factores:

- Avance diario promedio.
- Volumen de concreto.
- Promedio diario.
- Horas efectivas de trabajo diario.

Colocación de concreto por medio de bandas transportadoras:

Es un sistema que permite mover grandes volúmenes de concreto. Se emplea principalmente, para distancias cortas. El uso de este tipo de equipo se ha generalizado en la construcción, debido al poco espacio que se requiere y a su versatilidad. Es de gran utilidad en el revestimiento de túneles cuando éste se lleva a cabo por secciones, se obtienen mejores resultados al colocar la cubeta empleando estas bandas que cuando se emplean bombas, ya que al operar con las bandas, se logra una mejor distribución del concreto, con lo que se evita la necesidad de traspaleo y se disminuye la segregación, además de que es posible usar revenimientos más bajos que permiten un mejor acomodo del concreto con el empleo de cerchas. Para este tipo de trabajo, es conveniente el empleo de bandas con desplazamiento lateral en los extremos, dotadas de tolvas con “trompas de elefante” que permiten depositar el concreto a poca distancia del sitio de la colocación.

Existen tres tipos de bandas transportadoras:

- 1) **Transportador portátil:** Para distancias cortas y volúmenes pequeños, generalmente montadas sobre un trailer que lleva fácilmente la armadura en donde se colocan los transportadores de banda.
- 2) **Tipo alimentador:** Generalmente horizontal aunque puede tener pequeñas pendientes, su uso principal es como complemento del equipo de transportación con una capacidad del orden de 100 m³/hr.
- 3) **Banda de descarga lateral:** Semejante al alimentador pero equipado con un dispositivo que permite hacer la descarga hacia los lados y también moverse tanto para atrás como para adelante para poder distribuir mejor el concreto el equipo es adecuado para la colocación de concreto en la cubeta de túnel para lograr distancias mayores.

Colado continuo:

Este tipo de colado se realiza empleando bombas o cañones, debido a los grandes volúmenes que por lo general se requieren. Para la operación continua de revestimiento es conveniente contar con una plataforma de colado cuyas funciones fundamentales son las siguientes:

- a) Eliminar los movimientos no coordinados de diferentes equipos.
- b) Eliminar el congestionamiento del equipo en el frente de colado.
- c) Eliminar la necesidad de transportar individualmente diferentes piezas del equipo.
- d) Proporcionar un mejor control de las operaciones en el frente.
- e) Promover un centro de servicio para el mantenimiento del frente, eliminando la pérdida de continuidad durante la operación de colado.
- f) Integrar las torres de arrastre con las bombas y el equipo de mantenimiento.
- g) Proveer la estructura de soporte de las tuberías.
- h) Actuar como estación de almacenamiento con doble vía para los trenes de concreto, permitiendo la carga continua a las bombas.
- i) Actuar como base móvil para los servicios eléctricos requeridos así como para los servicios neumáticos, tales como compresores, mangueras, etcétera.

Colocación del concreto. Al salir del cañón o bombas sigue a través de una tubería que sube hasta la parte superior del frente de colado. Los tramos que constituyen la parte horizontal inferior y la inclinada se unirán por medio de bridas rápidas para que en caso de taparse inmediatamente se desacople y limpie. La parte superior horizontal de la tubería debe estar compuesta por una sola pieza, lo que se obtiene soldando los trazos que la componen, esta parte debe correrse apoyándose a estructuras pendientes de la clave de los marcos metálicos en caso de existir. Cuando se emplean cañones, en el codo superior se debe colocar una válvula para regular el aire comprimido que será necesario para ayudar a descargar la tubería horizontal superior.

El concreto al ser depositado en la parte superior del frente del colado, se desliza por paredes hasta el piso del túnel formándose un talud siguiendo su ángulo de reposo. El concreto llena los huecos existentes entre las paredes de

la cimbra y el túnel; generalmente es necesario el vibrador por inmersión, lo que se debe hacer por medio de vibradores neumáticos o eléctricos. En otras ocasiones se usan además o únicamente vibradores de pared, principalmente en la parte inferior donde es difícil introducir los vibradores de inmersión. Es recomendable que los vibradores tanto de inmersión como de pared, sean de funcionamiento neumático.

Colado discontinuo en sección completa. Este procedimiento es similar al anterior siendo la diferencia básica el hecho de que la cimbra empleada es de tipo estacionario, por lo que los avances son más lentos que en caso del colado continuo. El equipo de colocación y el procedimiento empleado pueden ser los mismos que en el colado continuo. En este caso, debido a que no es necesario que el equipo de colocación se esté moviendo en forma constante, puede simplificarse la plataforma de colado. Es un procedimiento que requiere menor inversión que en el caso del colado continuo, el ritmo de colado es más lento.

Los procedimientos de colado de sección completa: Se emplean principalmente en obras en las que se ha terminado previamente la etapa de excavación y no es necesario el paso de vehículos a través de la zona de colado.

Colado de etapas: Este procedimiento se realiza colando el revestimiento en secciones o etapas; el tipo de seccionamiento más empleado es el de dividir el revestimiento en una zona inferior o cubeta, los muros o guarniciones y una clave o corona de la parte inferior o cubeta para lo cual y por lo general no es necesario el empleo de cimbras, el equipo más recomendado es el de las bandas transportadoras que permiten usar concreto con revenimientos inferiores al empleado en las bombas y además lograr mejor distribución del concreto disminuyendo la segregación.

En los casos en los que la cubeta se cuele después de los muros y la corona lo que no es muy recomendable, no es necesario el empleo de cimbras, sigue siendo recomendable el uso de bandas; sin embargo, debido a que por lo general ya se encuentra en el túnel el equipo de bombeo, éste colocado se realiza con bomba, sin ser la más adecuada. Para el colado de los muros y la clave, es conveniente emplear bombas o cañones. Este procedimiento de colado en secciones, se usa principalmente en aquellas obras en las cuales el

colado va a pocos metros del frente, o cuando es necesario ir revistiendo conforme se va avanzando en excavación.

Método Bernold: Se emplea únicamente en aquellos casos en los que debido a la inestabilidad del terreno, es necesario utilizar de un gran número de anclas. Emplea el carro del soporte temporal como acero de refuerzo, eliminando la necesidad de anclas y consiste en que inmediatamente después de la excavación se cuela un cascarón delgado de concreto armado. Lo novedoso de este método es que se trata de concreto bombeado, colocado detrás de placas de acero de forma especial las cuales sirven al mismo tiempo como parte del cascarón y como armado. El razonamiento básico para el desarrollo de este sistema fue hecho en primer lugar para el ahorro de perfiles de acero antieconómico y del sistema de anclaje. Una bóveda de concreto hecha con placas Bernold, es capaz de tomar presiones de roca en un orden de magnitudes de 100 - 200 ton/m².

En el frente de excavación se distinguen tres diferentes fases:

- a) El terreno que será removido en el siguiente avance.
- b) En espacio de cerca de 1.00 a 1.30 metros. en el cual con ayuda de arcos de montaje provisionales y de las placas especiales perforadas, se colocará el cascarón de concreto.
- c) La bóveda completamente colada, que en la zona del frente de ataque está apoyada complementariamente con los arcos de montaje.

Concreto lanzado:

El concreto lanzado puede definirse como mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie. La fuerza del chorro que produce un impacto sobre la superficie, compacta el material. normalmente el material fresco colocado tiene un revenimiento cero y puede sostenerse por si mismo sin escurrirse. El concreto lanzado también puede colocarse hacia arriba, en una sola operación en plafones, en espesores hasta de 50 mm.

Empleado principalmente como soporte temporal en excavación sobre terrenos inestables debido a la poca uniformidad en los espesores y a la rugosidad en la superficie, no es muy empleado como revestimiento definitivo. Se trata de concreto conducido a través de mangueras y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre la superficie por recubrir. La fuerza del impacto del chorro sobre la superficie, compacta el material y generalmente se emplea una mezcla relativamente seca con aditivos acelerantes de gran rapidez, gracias a lo cual el material es capaz de sostenerse por sí mismo sin desprenderse o deslizarse, aun en aplicaciones verticales o hacia arriba.

Para la colocación de este tipo de concreto existen dos métodos.

- Proceso de mezcla seca.
- Proceso de mezcla húmeda.

Proceso de mezcla seca: Es el más empleado en donde una mezcla de cemento y agregados (fino y grueso) con poca humedad, se transporta por una tubería o manguera hasta una boquilla de salida, donde se añade el resto del agua.

El proceso se escribe a continuación:

1. El cemento y los agregados húmedos se juntan en una mezcladora o en gusano. (figura V.2.)
2. La mezcla cemento-agregado se introduce en un alimentador mecánico especial, a la manguera alimentadora por una rueda de alimentación o distribuidor.
3. El material es transportado por aire comprimido a través de la manguera a una boquilla especial; ésta tiene fijo en el interior un tubo múltiple perforado por el que el agua se introduce bajo presión y se mezcla íntimamente con los otros ingredientes.
4. Los materiales ya mezclados con el agua, son lanzados por la boquilla a alta velocidad sobre la superficie que está tratando.

Proceso de mezcla húmeda: Se mezclan todos los ingredientes incluyendo el agua antes que entre en la tubería y manguera. Consiste en lo siguiente:

- 1) Todos los ingredientes incluyendo el agua se homogeneizan en una mezcladora convencional.
- 2) El concreto se introduce en la cámara del equipo alimentador.
- 3) La mezcla pasa a la manguera alimentadora y es conducida por aire comprimido a una boquilla.
- 4) Se inyecta adicionalmente a la boquilla para incrementar la velocidad y mejorar la trayectoria del carro.
- 5) El concreto es lanzado como chorro a alta velocidad desde la boquilla sobre la superficie.

Las propiedades físicas del concreto lanzado bien colocado en sitio son comparables a las de concreto convencional. El tamaño máximo permitido en el agregado es de 3/4. Todas las partículas de tamaños mayores deben eliminarse, ya que pueden ser una causa de obturación.

Prácticamente no es posible hablar de diseñar el concreto lanzado debido al número de factores que intervienen y a la gran variedad de los mismos. Las condiciones fundamentales que rigen el éxito o fracaso del concreto lanzado son: La aplicación inmediata, adquisición temprana de resistencia y la flexibilidad suficiente que permita una eficiente interacción terreno - soporte. Si el concreto lanzado cumple con esas condiciones y además, se adapta su aplicación a los requisitos de la construcción puede suplir con éxito otros tipos de soporte de mayor costo y difícil colocación; en consecuencia, acelerar el avance de la excavación y abaratar los costos.

A pesar de que el concreto lanzado se considera como un tipo de soporte en obras subterráneas, su función principal es mantener la estabilidad de la excavación hasta que se desarrolle en la masa rocosa una distribución de esfuerzos que quede bajo el valor de la resistencia de la propia masa rocosa. Debido a la flexibilidad del concreto lanzado la presión que finalmente recibe

del terreno no es en mucho, comparable a la que se ejerce en la interacción roca - soporte en los otros sistemas de soporte más rígidos.

Funcionamiento: Es importante señalar que la diferencia principal entre marcos de acero, anclaje, concreto lanzado y otros sistemas de soporte, es la distinta deformabilidad que ofrece la interacción roca - soporte en cada sistema de soporte. Esta deformabilidad depende a su vez de los procedimientos de construcción y del comportamiento estructural de cada sistema.

Los marcos de acero que son instalados de cuatro a diez horas después de la tronada y proporcionan una resistencia puntual contra las deformaciones de las paredes del túnel pueden tener una interacción con la masa rocosa, diferente a la de una cubierta de concreto lanzado que se aplica veinte minutos después de la tronada y constituye un soporte más o menos continuo en las paredes del túnel.

Normas de diseño: No existen procedimientos de diseño rigurosos que tomen en cuenta las diferentes condiciones de calidad de la roca y los métodos de construcción. La información al respecto, muestra por la experiencia que se tiene que sólo elaborar normas de diseño en forma de recetas. Sin embargo, estas normas no son confiables ya que se basan en la experiencia de obras en condiciones geológicas particulares y son recetas, por lo general, tan simples que no consideran el tamaño de la excavación ni otros factores que rigen el comportamiento de la masa rocosa en la que se va a construir. Las normas de diseño propuestas se basan en la clasificación de la masa rocosa a partir del índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation "RQD").

Funciones del concreto lanzado:

1. Sellar la superficie rocosa deteniendo el flujo de agua y evitando así el arrastre de partículas y tubificación del relleno de las discontinuidades, servir de unión entre los bloques al penetrar en juntas y fisuras; e impedir los desprendimientos que aparecen al resecarse la superficie expuesta.
2. Mantener la propia resistencia de la roca evitando movimientos superficiales y locales de los bloques pequeños, propiciando así una

distribución de esfuerzos y arqueo a través de los mismos bloques, detenidos por una capa delgada de concreto lanzado.

3. Soportar bloques sueltos importantes, proporcionando la fuerza resistente suficiente en la unión o traza superficial en las paredes de la obra de los planos que limitan el bloque que tiende a caer.
4. Soportar las fuerzas de interacción terreno - soporte estabilizando los movimientos hacia el interior de la excavación funcionando como arco o anillo resistente.

El concreto lanzado parece no combinarse adecuadamente con la excavación por medio de topo. Las razones principales son: la sensibilidad de la maquinaria al polvo y al material de rebote; y al problema del suministro y transporte del concreto lanzado para seguir de cerca el rápido avance de la máquina excavadora.

El concreto lanzado es particularmente adecuado en túneles excavados por medio de explosivos. Su colocación inmediata evita que progrese el aflojamiento del material del techo y las paredes debido a la acción de los explosivos. Además la etapa de barrenación después de la aplicación del concreto lanzado, permite que adquiera mayor resistencia antes de la tronada siguiente.

El espesor de concreto lanzado necesario para mantener estable una excavación cuando hay aflojamiento de bloques en el techo y en las paredes, depende de la calidad de la masa rocosa, es decir, de la naturaleza de las discontinuidades que son la causa de que el material se suelte. Los aspectos más importantes de las discontinuidades son su orientación, espaciamiento, abertura, rugosidad y relleno.

El empleo del concreto lanzado, independientemente de otros sistemas de soporte es insuficiente en la mayoría de las grandes obras subterráneas. El uso combinado de concreto lanzado con otros sistemas de soporte, colocado cerca del frente en masas rocosas que dan lugar a bloques sueltos tiene la ventaja de reducir el aflojamiento de bloques desde un principio y dar como resultado que los marcos metálicos requeridos como soporte definitivo puedan ser más livianos.

Mezclado y aplicación: La calidad de una mezcla para concreto lanzado depende de la relación agua-cemento, el tamaño y graduación de los agregados, el tipo de cemento, los aditivos y la aplicación adecuada.

Son dos los procedimientos recomendados de preparación y aplicación de la mezcla:

Uno, consiste en mezclar las cantidades predeterminadas de agua, cemento y agregados en un recipiente para luego lanzarlos en chorro a la pared de la roca. Los aditivos acelerantes deben añadirse en la boquilla, es decir, a la salida del chorro. Estos aditivos pueden estar tanto en forma líquida como en polvo.

El otro, es mezclar en seco o algo húmedos los agregados y el cemento y mandarlos mediante aire a presión a una manguera y a una boquilla de salida donde se le agrega el agua necesaria y los aditivos.

El primer procedimiento se utiliza principalmente en túneles secos y el segundo en túneles de paredes húmedas y aún con filtraciones.

El éxito de la preparación y aplicación de la mezcla seca depende de los factores siguientes:

- Granulometría adecuada en los agregados.
- La humedad de la mezcla antes de llegar a la boquilla debe estar entre el 2 y el 5 %. Una humedad menor agravaría el problema del polvo y una mayor taponaría las mangueras.
- Adecuado proporcionamiento agua-cemento. Esta operación es realizada en la boquilla por una persona muy bien entrenada.

Características del rebote que dependen tanto de los tres factores antes mencionados como de los siguientes:

- 1) El ángulo de lanzamiento debe ser normal a la superficie tratada.
- 2) La boquilla debe mantenerse de 1.0 a 1.2 metros de la superficie tratada.

- 3) Las presiones del agua y del aire deben ser constantes y de 5.0 y 5.7 kg/cm², respectivamente.
- 4) La alimentación del aditivo acelerante debe ser constante y fácil de ser variada en el momento que se requiera (si la superficie rocosa está húmeda, deberá ser mayor la cantidad necesaria de aditivo).

Mantenimiento del equipo: El manejo de la mezcla seca obliga a mantener limpio el equipo con mayor rigor que las operaciones con el concreto normal. La mezcla seca tiende a acumularse en las aspas de las mezcladoras. Tanto las boquillas como los alimentadores deben limpiarse inmediatamente al terminar el día, previéndose un periodo de limpieza en el programa diario.

Empleo de equipo especial para evitar quemaduras: Los aditivos acelerantes son alcalinos y todos pueden causar quemaduras, especialmente cuando el ambiente es húmedo.

Supervisión y operación de alta calidad: El personal de supervisión debe ser altamente calificado. Las cuadrillas de operación serán entrenadas adecuadamente.

La operación con la mezcla húmeda tiene sobre la operación con la mezcla seca las ventajas siguientes:

- 1) Se evita el problema del polvo.
- 2) La acumulación de material en las aspas de las mezcladoras es menor.
- 3) La relación agua-cemento se controla en la mezcladora y su supervisión es más efectiva.
- 4) Es posible reducir la contaminación del aire de los acelerantes.
- 5) El volumen producido puede incrementarse en forma notable.

Características de las mezclas: La calidad de la mezcla para concreto lanzado es en función del tamaño y granulometría de sus agregados calidad

del cemento y los aditivos; relación agua-cemento, grado de compactación y de la adecuada hidratación cuando se trata de la mezcla seca.

Para que un agregado produzca un concreto lanzado de compactación óptima, máxima resistencia, impermeabilidad y rebote mínimo debe cumplir con las normas American Society for Testing and Materiales (ASTM) y su granulometría debe estar de acuerdo con las curvas de la figura V.1. El martilleo que producen las partículas del agregado grueso sobre la capa de concreto previamente aplicada, contribuye a obtener la compactación deseada. Las arenas deben constituir menos del 60 % de la mezcla de agregados.

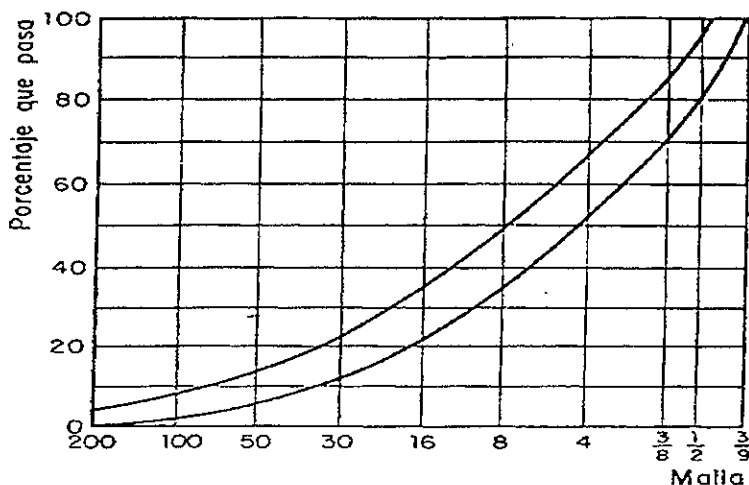


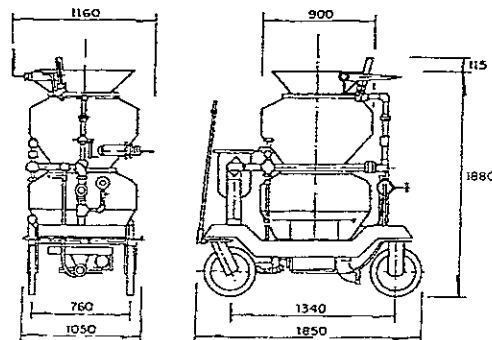
figura V.1.

Los requisitos de resistencia a la compresión dependen principalmente del contenido de cemento. Sin embargo, este en exceso puede dar lugar a contracciones y agrietamiento perjudicial. El contenido de cemento después de la aplicación es, generalmente, mayor que la dosificación de la mezcla producida debido a que el material de rebote está constituido de agregado en una mayor proporción.

El agua debe estar libre de impurezas y debe cumplir con los requisitos de elaboración del concreto común.

Los aditivos acelerantes del fraguado hacen posible la aplicación del concreto lanzado en superficies húmedas y aun sobre filtraciones que, en ocasiones, pueden taponarse. Sin embargo, su empleo debe controlarse ya que reducen la resistencia final del concreto. Cuando se emplean aditivos del 2 al 6 % del peso, la reducción de la resistencia no debe ser mayor de 20 por ciento. Los valores de la resistencia a la compresión simple a los 28 días deben estar comprendidos entre 150 y 300 kg/cm², que para fines estructurales son suficientes.

1. Son dos, los tipos de máquinas lanzadoras para la mezcla seca: La de doble cámara de presión con válvulas de campana intermedia de acción neumática (figura V.2.). La mezcla seca se introduce en la cámara superior, se cierra ésta y se levanta la presión que abre la válvula de campana intermedia y deja pasar la mezcla a la cámara inferior; en ésta se levanta a su vez la presión que cierra la válvula intermedia y la mezcla va alimentándose bajo presión a la tubería de descarga, mediante una rueda de cavidades. Mientras se efectúa la operación de descarga se está alimentando mezcla seca a la cámara superior para empezar un nuevo ciclo. Un buen operador puede lograr con la ayuda de las dos cámaras, una descarga prácticamente continua. Requiere entonces una estricta atención del operador que debe desenvolverse con destreza. Son cualidades de este tipo de máquinas su robustez y el poco número de piezas delicadas o móviles que se desgastan o requieren frecuente mantenimiento



Anotaciones, en mm

figura V.2.

2. **El tipo revólver (figura V.3).** La mezcla seca se alimenta continuamente a la tolva que corona la parte superior de la máquina, de ahí cae al cilindro rotatorio tipo revólver que consta de nueve o más compartimentos cilíndricos, donde se deposita la mezcla. Cada carga de mezcla en cada compartimento cae a través de una escotadura y al pasar sobre el cuello de salida una corriente de aire a presión la impulsa hacia las mangueras. Este tipo de máquinas no requiere una atención tan continua del operador; además, pueden manejar agregado grueso más fácilmente que las del otro tipo. Tiene, por otra parte, más piezas de desgaste y suele producir más polvo.

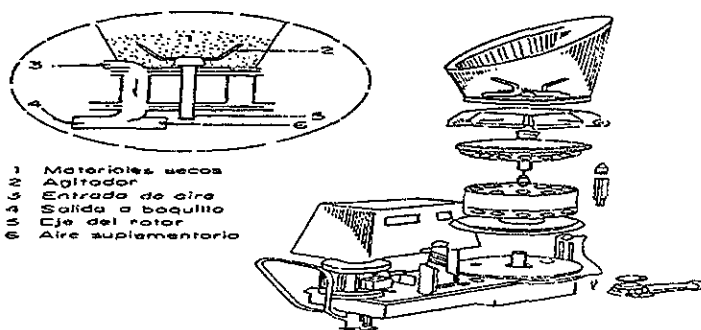


figura V.3

“Las primeras (figura V.2.) tienen motor neumático, las segundas (figura V.3) pueden venir con motor neumático o con motor eléctrico; por lo general el rendimiento es mayor con el motor neumático aunque el consumo de aire es considerable. Las del primer tipo consumen 600 pies³/min. en tanto que algunos tipos de las segundas, de muy altas revoluciones, consume cerca de 900 pies³/min.”

“Los rendimientos varían entre 6 y 9 m³/h. La distancia de envío varía mucho en cada marca y tipo pero puede llegar a 275 metros horizontales y 92 metros verticales. Para grandes distancias conviene usar en los tramos intermedios, tuberías de acero, en lugar de mangueras para reducir la fricción. También, pueden conectarse en serie dos máquinas para ganar distancia”.

Mediciones de control:

Uno de los métodos de control del concreto lanzado consiste en tomar muestras durante la aplicación y efectuar con ellas, pruebas de compresión simple a diferentes tiempos, por ejemplo, 8 horas y 28 días.

El muestreo puede realizarse por medio de moldes de madera fijos sobre las paredes para recoger el concreto que se acumula allí durante la aplicación y después labrar las muestras necesarias. También puede realizarse el muestreo mediante los barriles muestreadores convencionales. Este último procedimiento tiene el inconveniente de que al muestrear concreto lanzado de menos de 16 horas se desprenden fácilmente partículas de roca que giran en el interior del barril muestreador, dañando seriamente la muestra.

Otro método de control del comportamiento del concreto lanzado, es el de la instrumentación que básicamente consiste en la instalación de extensómetros para detectar los movimientos del terreno y de extensómetros, celdas extensométricas (strain gages) y cuerdas vibrantes, para la medición del movimiento y deformaciones en el revestimiento de concreto lanzado.

Como método de control, la instrumentación descrita ayuda a detectar con anticipación, movimientos y deformaciones que si progresaran pondrían en peligro la estabilidad de la obra. Cuando se detecta en una zona instrumentada una tendencia en los movimientos y deformaciones, aunque de valores muy pequeños, deben efectuarse las lecturas con mayor frecuencia para determinar el empleo de soportes adicionales y verificar posteriormente el efecto de estas medidas correctivas.

Debe tenerse presente que el comportamiento del revestimiento de concreto lanzado es un indicador del comportamiento del macizo rocoso y que las tendencias peligrosas se detectan generalmente durante el avance del frente del túnel a una distancia igual a un diámetro de la sección instrumentada y también durante los eventos de construcción como el banqueo, la construcción de otras etapas en la misma sección o la excavación de obras en la cercanía de la sección instrumentada.

En vista de que las mediciones son muy pequeñas (en ocasiones son del orden de la precisión de los instrumentos) deben instalarse y medirse instrumentos

embebidos en paneles testigos para poder descartar el efecto de las contracciones químicas y térmicas del concreto lanzado.

Dependiendo de las condiciones del terreno sera su aplicacion del concreto lanzado las cuales de enumeran a continuación

CONDICIONES DEL TERRENO	APLICACION DE CONCRETO LANZADO
1. Terreno bueno: Donde los problemas de soporte son mínimos pero por alguna razón no se acepta el túnel sin ninguna cubierta que lo proteja superficialmente RQD > 75%.	5 cm. de concreto lanzado en la clave por encima de la línea de los hombros.
2. Terreno bueno: Donde la roca presenta juntas o está fracturada y la clave definitivamente requiere un soporte, pero sus paredes son estables. El terreno permite una buena adherencia de concreto lanzado al perímetro de excavación de 50 a 70 %.	± 7.5 cm. de concreto lanzado en la clave.
3. Terreno malo: Donde las paredes del túnel tienden a cerrarse un poco o donde una buena unión del concreto lanzado a la roca no puede lograrse RQD común entre 25 y 50 %.	De 7.5 a 10 cm. de concreto lanzado en la clave ± 7.5 cm. de concreto lanzado sobre las paredes llevado hasta la base cuando el túnel tiene forma de herradura. En túneles circulares, la cubierta requerida por las paredes dependerá de la calidad en la adherencia entre el concreto lanzado y la roca. Si la adherencia es de regular calidad, deberá cubrirse un poco más de 270° de concreto lanzado. Si la adherencia es muy mala, se necesitará cubrir los 360° completos del túnel.
Terreno muy malo: Si los problemas de soporte son en realidad cargas importantes, se tratará igual que el terreno malo pero se añade otra pulgada de concreto lanzado, esto es de 10 a 12.5 cm en la clave y 10 cm en las paredes. Si el terreno contiene un porcentaje significativo de minerales arcillosos como relleno de juntas y si es además muy fracturado y está a una importante profundidad bajo la superficie, de tal manera que los esfuerzos generados son altos es necesario el soporte para contrarrestar el efecto de esfuerzos altos o la combinación de éstos y el aflojamiento de bloques.	

V.1 EQUIPO DE REVESTIMIENTO.

Transporte del concreto al sitio de colocación:, existe un gran número de sistemas para el transporte del concreto desde el sitio de su elaboración hasta el colocación; la elección de cualquiera de ellos, depende de los siguientes factores:

- a) Distancias de acarreo:
 - En superficie.
 - Dentro del túnel.
 - Verticalmente por lumbreras o pozos.
- b) Dimensiones del túnel.
- c) Volumen por transportar.

Los sistemas de transporte más empleados son los siguientes:

- a) **Bogues:** Este es uno de los sistemas de menos capacidad cuando el acceso al sitio de colocación se encuentra al mismo nivel que el sitio donde se elabora el concreto. En ocasiones cuando el concreto es introducido al túnel por lumbreras o pozos, estos bogues se emplean para el transporte dentro del túnel de la zona de recepción al sitio de colocación. Los bogues pueden ser manuales o motorizados.
- b) **Camiones de volteo:** Este método es empleado en los túneles de sección grande que permiten el acceso y las maniobras de vehículos motorizados y en los que el acceso se encuentra prácticamente al mismo nivel que la planta productora de concreto. Es un sistema poco recomendable debido a que por los altos revenimientos del concreto que se emplea, se propicia la segregación y el sangrado del concreto, lo que ocasiona pérdidas de revenimiento y manejabilidad siendo necesario en la mayoría de los casos, contar con una unidad remezcladora de concreto antes de proceder a su colocación.
- c) **Camiones revolvedores:** Este tipo de unidades al igual que los de volteo, operan en túneles de gran sección y en los cuales el acceso es a

nivel de un portal: Como ventaja sobre los de volteo que por estar agitando el concreto durante su transporte, evitan la segregación y la necesidad de la unidad de remezclado.

- d) **Vagonetas:** Este sistema se emplea en obras grandes en las cuales se utilizan sistemas convencionales de vías con espuelas y tránsito en ambas direcciones, permite mover grandes volúmenes, se puede variar la capacidad de los vagones y el número de ellos en el tren. Este tipo de transporte es útil tanto en los casos en que el acceso al sitio de colado es a nivel del túnel a través de un portal que permite el llenado de las vagonetas directamente de la planta donde se produce el concreto como en los casos en los que sólo se requiere mover horizontalmente el concreto de un pozo al sitio de descarga dentro del túnel.
- e) **Trenes de carros agitadores:** Estos carros trabajan sobre un sistema de vías con espuela al igual que los trenes de vagoneta, son accionados por medio de motores neumáticos y su diseño les permite trabajar en forma separada o acoplados; van montados sobre dos juegos de cuatro ruedas de acero embaladas y tienen capacidad de aproximadamente 4.5 m³ cada uno. Se emplean normalmente trenes de cuatro ó cinco carros movidos por una locomotora. La parte principal, la forma el cilindro donde se aloja el concreto para ser transportado al frente de colado. En el interior del cilindro y soldada a las paredes, se encuentra una espiral de lámina que lo recorre longitudinalmente y que sirve como medio de descarga al girar en sentido contrario a las manecillas de un reloj, al ser operado en el otro sentido, funciona como agitador.

En los extremos del cilindro hay dos pistas circulares que van soldadas a la periferia, éstas son soportadas por dos juegos de rodillos embalados y fijos a la estructura de soporte sobre los cuales gira el cilindro.

Cada uno de los carros cuenta con dos puertas de llenado instaladas a lo largo del cilindro de operación manual. Además, en el cilindro de descarga hay otras dos puertas o aberturas, diametralmente opuestas, que están fijadas por medio de tornillos, su objetivo principal es el de permitir acceso para la limpieza.

Los carros son el medio de transporte para el concreto y además, funciona como agitador cuando es necesario.

Normalmente el concreto almacenado en tolvas, vierte de una descarga flexible hasta las puertas de llenado. El carro debe ser llenado hasta unos 15 cms. por debajo del nivel de las puertas, terminada esta operación, se cierran las puertas y se lavan los derrames producidos; en seguida se vuelve a repetir el ciclo. En la estación de descarga, cada uno de los carros se vacía independientemente de los demás a una tolva, de donde pasará a una banda transportadora que conduce el concreto a la tolva del cañón o bomba en su caso. El sistema de carros agitadores permite mover grandes volúmenes así como remezclar el concreto, con lo cual se evita la segregación. Se usa básicamente para movimientos horizontales del concreto dentro del túnel.

- f) **Bandas transportadoras:** Este sistema permite mover grandes volúmenes de concreto. Se emplea principalmente como sistema complementario, para transportar el concreto del sitio de descarga de camiones, bogues o carros agitadores a la tolva de la bomba o sistema de colocación, se emplea además para mover el concreto de la planta de elaboración a las unidades de transporte, se emplea generalmente en distancias relativamente cortas (hasta 30 ó 50 metros) y permite transportar el concreto horizontalmente o hacia arriba con un ángulo de 20° (aproximadamente).

Es el método más empleado en túneles para transportar y colocar el concreto, las bombas permiten mover volúmenes hasta de 80m³/hr. a distancias hasta de 600 metros horizontales y hasta 150 metros verticales (hacia arriba). El empleo de bombas para el transporte de concreto para revestimiento de túneles, presenta dificultades pues por lo general el concreto se bombea desde la superficie hacia el túnel que está en la parte inferior, (es un bombeo hacia abajo).

El bombeo hacia abajo presenta mayor dificultad que el bombeo hacia arriba, pues el concreto al caer por el tubo forma vacíos que bloquean la tubería y en algunas ocasiones sumados a la presión del bombeo, producen la destrucción repentina de la tubería. Con objeto de evitar este tipo de problemas es aconsejable instalar una válvula en la mitad de

la curva más alta y en muchos casos es necesario, además hacer pequeñas perforaciones a lo largo de la tubería vertical para facilitar el escape del aire. Cuando se emplea el bombeo como medio de transporte del concreto en este tipo de obras, por lo general se realiza en tres direcciones: primero una distancia pequeña horizontal en superficie, después la caída vertical (hacia abajo hasta llegar al nivel del túnel y por último horizontalmente dentro del túnel, hasta la colocación. El sistema de bombeo es por lo general más empleado como medio de colocación que de transporte.

- g) **Cubos:** Un sistema económico en obras pequeñas, para transportar el concreto desde la superficie hacia el túnel que se encuentra a un nivel inferior, es el empleo de cubos con compuerta en la parte inferior, movido por medio de malacates. Este sistema efectúa el transporte del concreto sin producir segregación se descargan en tolva, desde las cuales se mueve el concreto por medio de otro sistema hasta el sitio de colocación.
- h) **Tubo de caída libre:** Una vez que el concreto ha sido elaborado en una planta instalada cerca de la lumbrera o pozo, es conducido hasta una tolva, en donde se inicia una tubería de 6" a 8" de diámetro que conduce verticalmente el concreto por la lumbrera desde la superficie hasta el nivel del túnel. Al final de la tubería se instala un recipiente especial, llamado tanque amortiguador el cual recibe el concreto a través de un codo de salida colocado a 2/3 de la altura, lo descarga a una tolva desde donde se alimenta el sistema de transporte dentro del túnel. Para el empleo de este método es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:
- El tubo vertical debe estar a plomo y bien asegurado a la pared del pozo, ya que pequeñas variaciones del eje vertical producen desgaste rápido de la tubería.
 - Los segmentos en los extremos que se suelden deben estar colocados de tal manera que formen juntas circulares dentro del tubo, sin rugosidad ni salientes.

- Aunque la longitud de la tubería vertical puede ser ilimitada, es conveniente a veces el empleo de revolventoras conectadas a la tolva. Es necesario limpiar constantemente la tubería y el tanque amortiguador, evitando que el concreto sedimentado se endurezca.

Las principales características del tanque amortiguador son las siguientes:

- a) Está acondicionado con placas intercambiables en las paredes interiores para evitar que se deterioren las paredes del tambor.
- b) En la parte inferior del tanque existe una compuerta de guillotina, cuya función es permitir la salida con concreto que se sedimenta en la parte inferior, antes de que éste se endurezca.
- c) La descarga del tanque se encuentra localizada a las dos terceras partes de su altura, y cuenta con un colchón de concreto que sirve para amortiguar en parte la caída de éste.
- d) El tanque se encuentra soportado por 4 resortes, con los que se toma la energía producida por la caída del concreto.
- e) En el fondo del tanque en dirección axial con la tubería se dispone de una “aguja” metálica para romper el chorro y ayudar a que se produzca la ebullición del concreto.

Cimbra y su funcionamiento:

La selección del método de colado, y por consiguiente el tipo de cimbra , se basa en los abances de la excavación existen varios tipos de cimbra como son:

- a) Cimbra seccionada. La cimbra seccionada, se empela principalmente en aquellos casos en los que es necesario colar y excavar simultaneamente. Generalmente se lleva en tres etapas.
 - a) Guarnición.
 - b) Clave.
 - c) Cubeta.

- b) **Cimbra de sección completa.** No permite el tráfico a través de ella y se emplea en túneles en los que ya se ha terminado la excavación. Esta cimbra se clasifica en:

Cimbra convencional: Se utiliza en túneles relativamente cortos en los cuales el avance en colocación de es lento.

Cimbra telescópica: Los colados se efectúan en forma continua, con un avance promedio de 60m.

Para el colado del revestimiento de los túneles se emplean fundamentalmente los siguientes tipos de cimbra:

1. **Cimbra de madera.** Las características geométricas especiales en la unión de los túneles obliga el empleo de cimbra de madera construida en la superficie que se debe bajar al túnel en secciones de 5 m de longitud, se debe usar también cimbra de madera en algunas puertas de galerías de bombeo.
2. **Cimbra metálica seccional.** El programa de construcción general de la obra obliga en algunos tramos a establecer procedimientos constructivos que permitan excavar el túnel al mismo tiempo que se va revistiendo. El diseño de esta cimbra se realiza permitiendo que las locomotoras y trenes de rezago puedan pasar en forma continua hacia el frente de la excavación durante el colado. Por este motivo, la cimbra se divide en tres partes, dos segmentos circulares denominados *guarnición* en los laterales y un sector circular en la clave. El procedimiento de construcción sigue la siguiente secuela: primero colar las dos guarniciones laterales en las paredes del túnel, segundo colar la clave y tercero, colar la cubeta sin contracimbra dando la forma mediante cerchas de madera y regla; este colado se efectuará generalmente en domingos o en los días que la excavación se pare, ya que es la única actividad en los colados que interrumpe el paso de los trenes. El avance máximo que se logra en un día de colado es de 9.9 metros lineales de cubeta.

Las guarniciones y la clave se diseñan en longitudes múltiples de 4.88, las juntas de colado se harán radiales para transmitir los esfuerzos de compresión para lo que fue diseñado el revestimiento.

3. **Cimbra Metálica monolítica.** Se diseña para una longitud de 13.73 metros, dejando la sección final del túnel circular de 5 metros de diámetro. El avance en este tipo de colado es de un módulo diario (13.73 metros/día).

4. **Cimbra Telescópica o autotransportable.** Se emplea en la mayor parte del revestimiento, está formada por módulos de 7.32 metros cada uno consta de cinco partes de las cuales dos constituyen la cubeta y están unidas por una articulación, las tres restantes están unidas por dos articulaciones laterales y forman la clave. Las articulaciones al momento de terminar el colado, sirven para doblar la cimbra y poderla transportar mediante un tren formado con dos armaduras metálicas verticales, unidas rígidamente entre sí.

Para levantar la sección inferior de la cimbra (cubeta) se utiliza un polipasto colocado ex profeso en el carro de transporte, una vez izada la cimbra de la cubeta el carro de transporte corre sobre ruedas metálicas que se deslizan sobre una vía fija en la sección inferior de la cimbra colocada y fija en la posición para colado lo que permite llevar el tramo de cubeta de un extremo al otro de la cimbra. La cimbra completa tiene una longitud de 65.88 metros formada por nueve módulos de 7.32 metros de longitud cada uno, se deben acoplar uno a continuación del otro de tal forma que el módulo extremo en donde se está colocando el concreto, se transporte en una longitud de 65.88 metros hasta quedar colocada en el extremo de la cimbra en donde no se ha colocado el concreto.

El transporte y colocación de las tres secciones que forman la parte superior de la cimbra (clave) se lleva a cabo en la misma forma, o sea, se dobla el módulo en el extremo de la cimbra donde ya se ha colado, doblado el módulo se transporta hasta el extremo de la cimbra en donde se ha colocado concreto, se desdobla en este sitio, se coloca en su posición y así, sucesivamente. Mediante este proceso se puede lograr un colado continuo del revestimiento, sin tener juntas frías en el colado, salvo por interrupciones ocasionadas por fallas en las plantas de producción o en el equipo de transporte.

Al extremo de la cimbra se debe de tener una plataforma con una longitud de 1.40 metros y un ancho de 4.5 metros; ésta se desplazará en ruedas metálicas sobre la vía central y además ruedas de hule que circularán sobre la plantilla de concreto. Los vagones mezcladores de concreto deben de subir por una

rampa que es parte de la plataforma, se accionarán motores de aire comprimido que hagan girar los vagones revolvedores de concreto; se descarga cada uno de los ellos a una banda transportadora que conduce el concreto hasta las tolvas de recepción antes de entrar a las bombas o "cañones", de ahí el concreto pasa directamente a la cimbra telescópica. Además de estas instalaciones en la plataforma móvil, alojará la estructura para taller mecánico, instalaciones eléctricas, suministro de agua, casetas de teléfono para comunicación y control del tránsito de trenes, compresores de aire y tolvas de rezaga.

El funcionamiento del sistema de la cimbra es el siguiente:

La cimbra debe quedar apoyada en la plantilla del concreto sobre pernos metálicos, mientras que en los laterales y la clave se troquelean contra el retaque de madera entre marcos o contra el concreto lanzado; en los casos donde se presentan sobre-excavaciones de importancia, se utilizan troqueles de madera que se retiran en cuanto se llena la forma de concreto.

Cada sección de la cimbra se une por medio de tornillos colocados uniformemente en el perímetro, las dos partes que forman la cubeta deben de quedar fijas mediante elementos metálicos horizontales, estarán sujetos en posición correcta mediante pasadores. El carro para transportar la cimbra, contará con gatos hidráulicos que sirvan para colocar en la posición deseada cada una de las secciones de la cimbra. Para el descimbrado se especifica un lapso mínimo de ocho horas con objeto de que el concreto adquiera su fraguado inicial. Una vez endurecido el concreto se desatornillarán las secciones superior e inferior de la cimbra, se quitarán los troqueles metálicos y mediante los gatos hidráulicos aflojará la forma doblándola y transportando como se ha mencionado. Previo a la colocación de los módulos, se hace una limpieza de los mismos para evitar que el concreto fresco quede adherido a la cimbra metálica.

CONCLUSIONES

- Causa el mínimo de molestias en la superficie en su construcción.
- El proyecto de un túnel requiere un conocimiento lo más detallado posible del terreno a atravesar.
- El conocimiento del terreno no consiste en la búsqueda de parámetros geotécnicos, ni en ensayos de laboratorio, ni en índice de calidad de la roca, sino en la definición de la naturaleza del terreno, de la geometría de las discontinuidades y de las condiciones del nivel freático.
- Las galerías de reconocimiento o de avance en toda la longitud del terreno son muy convenientes, especialmente en túneles profundos.
- El proyecto del túnel no puede desligarse de los problemas y procedimientos de su construcción.
- Es preciso proyectar el trazo de forma que las coberturas mínimas de terreno sean suficientes para evitar dislocaciones y hundimientos del terreno
- Trabajo multidisciplinario para evitar problemas constructivos.
- Buena planeación involucra establecimiento de objetivos, estrategias, recursos, políticas, procedimientos y programas, considerando una buena planeación del diseño y construcción del túnel se puede decir que tenemos un gran avance de la obra.
- Asegurar la transportación a través de ciertos obstáculos, éstos pueden ser: montañas, ríos y áreas urbanas densamente pobladas.
- Condiciones geológicas, son de los factores más importantes que determinan el costo y tiempo de ejecución de la obra y por consiguiente es esencial pronosticarlo.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ Blyth F.G.H. y M.H. de Freitas, Geología para Ingenieros, Editorial CECSA, tercera reimpresión 1997.
- ✓ Comisión Federal de Electricidad, Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotécnia, B.37, Procedimientos de Escavación.
- ✓ Comisión Federal de Electricidad, Manual de Diseño de Obras Civiles, geotécnia, B,3.2, Obras Subterráneas.
- ✓ U.N.A.M. Facultad de Ingeniería, Tratado de Construcción Procedimientos de Construcción Pesada, 1980. Ing. Rafael aburto Valdes
- ✓ COVITUR, Manual de Diseño Geotécnico, Volumen 2, 3 Diseño del Metro en túnel, 1988.
- ✓ COVITUR, Manual de Diseño Geotécnico, Volumen 1, Estudios Geotécnicos, 2 Diseño de Metro en Cajón 1987.
- ✓ U.N.A.M. Facultad de Ingeniería, Legislación en Materia de Impacto Ambiental, 1991.
- ✓ División de Educación Continua Facultad de Ingeniería U.N.A.M., Diseño y Construcción de Túneles, Septiembre 1985.
- ✓ Cimentaciones y Túneles P. Galabru Editorial Reverte
- ✓ Túneles Planeación y Construcción Volumen 1 Editorial Linusa 1988
- ✓ Túneles Planeación y Construcción Volumen 2 Editorial Linusa 1988