



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL  
DISEÑO DE TÚNELES EN ROCA”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A:  
DAVID LIZARDI JOHNSON

ASESOR: ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA



México

2005

m.340177



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.

Asociación de la Industria Eléctrica y Electrónica de la  
Unión y América en forma electrónica e impresa el  
control de la calidad profesional.

NOMBRE: Lizardi Johnson

David

FECHA: 29 Noviembre 2004

FIRMA: Lizardi Johnson

FFI 10/11/04



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCIÓN

DAVID LIZARDI JOHNSON  
Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento: me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor

TITULO:

"CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE TÚNELES EN ROCA"

ASESOR: Ing. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 11 de octubre de 2004.

LA DIRECTORA

ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



  
C p Secretaría Académica  
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil  
C p Asesor de Tesis

LTG/AIR/alm

## SEGUIMIENTO DE REGISTRO DE TESIS

FECHA	CVE.	DESCRIPCIÓN DEL TRÁMITE	AUTORIZACIÓN Y SELLO
10/11/2004	IMP	"CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE TÚNELES EN ROCA"	 <p style="text-align: center;">Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO</p>
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO
			Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS SECRETARIO ACADÉMICO

TRÁMITE	CLAVE
PRÓRROGA	PR.
CAM. TÍTULO	C. T.
CAM. ASESOR	C. A.
CAM. SEM.	C. S.
VIGENCIA	VIG.
IMPRESIÓN	IMP.

## AGRADECIMIENTOS:

### A DIOS:

*Por darme la oportunidad de vivir, de ponerme en éste camino, de darme la fuerza suficiente para llegar hasta el final del mismo y por enseñarme que los verdaderos siervos de dios no son aquellos que están preparados para lo mejor, sino para lo peor; además de que no hay nada más importante en la vida que el tener fe, pero que también a la fe hay que añadirle virtud; a la virtud, conocimiento; al conocimiento, dominio propio; al dominio propio, paciencia; a la paciencia, piedad; a la piedad, afecto fraternal; y al afecto fraternal, amor.*

### A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:

*Por que no me imagino lo que sería la vida si mi Universidad no me hubiera abierto las puertas, y darme la oportunidad de derrumbar las barreras de la ignorancia al abrirnos las puertas del conocimiento. A la ENEP Aragón que fue como mi segunda casa, por acogernos entre sus muros, mudos testigos del esfuerzo y sacrificio para culminar ésta etapa.*

### A MIS PADRES:

*Por que me han heredado el tesoro más valioso que pudiera dársele a un hijo, amor. Por que sin escatimar esfuerzo alguno sacrificaron gran parte de su vida en mi formación y educación; por que por ustedes me he convertido en una persona de provecho. Por que nunca les podré pagar todo lo que me dieron.*

### A MIS HERMANOS:

*Por darme todo el apoyo y la confianza que se necesita para salir adelante, por que gracias a ustedes pude lograr uno de mis más grandes objetivos en la vida. Por creer en mi y sobre todo por soportarme.*

### A MI FAMILIA:

*Solo tengo un infinito aprecio y eterno agradecimiento por los consejos que siempre me han brindado, por mostrarme el camino hacia DIOS y dejarme caminar solo hacia Él; por su ayuda en momentos de tribulación, por cuidarme y preocuparse. A todos mis sobrinos por darle alegría a mi vida.*

## A MIS PROFESORES:

*No existen las palabras suficientes para agradecer a todos mis Profesores por transmitirnos su experiencia y su acumulado conocimiento dentro y fuera de las aulas; por que predicaron con el ejemplo y nos compartieron su generoso tiempo en todo momento, en especial a mi asesor por todo el tiempo dedicado y por ayudarme en la culminación de éste proyecto.*

## A MIS AMIGOS:

*Por que siempre estuvieron ahí, en las buenas y en las malas, por todo el apoyo moral, por sus consejos, por sus regaños, por todas las vivencias compartidas, por ser quienes son sin mascarar, por ayudarme en todo momento durante mi estancia en la escuela y aún fuera de ella; por que no siendo compañeros necesariamente de la escuela siempre me apoyaron. Gracias por el día a día.*

## A VOLKÁN:

*Por que me enseñaron un mundo que era totalmente nuevo, desconocido y maravilloso para mi: la música. Por la paciencia, por darme la oportunidad de aprender; por que sin su apoyo, comprensión y confianza no hubiera podido realizar éste sueño.*



La Universidad Nacional encarna un logro esencial del México moderno. Desde sus orígenes, su fundador le dio la encomienda de cultivar "la ciencia que defiende a la patria". Efectivamente, cuando Justo Sierra exhorta a "nacionalizar la ciencia, mexicanizar el saber", reitera su convicción de que la naciente Universidad Nacional debía estar estrechamente vinculada a la sociedad. La Universidad fue concebida, pues, como una institución pública al servicio de la sociedad, como cimiento de la unidad nacional, más allá de los intereses de grupos y facciones, como faro potente para alumbrar el porvenir.

Hoy más que nunca el desarrollo y el progreso de las naciones se fundan en el conocimiento. Las diferencias ya no responden tanto al control de las materias primas, la infraestructura material o el capital financiero, sino a la capacidad de generar y utilizar el conocimiento y el nivel de preparación de su capital humano. Consecuentemente, la educación y, en particular la educación superior, se convierte en un factor estratégico, determinante para construir un país con mejores condiciones de bienestar y mayores posibilidades de progreso.

En éste siglo naciente, la UNAM renueva su compromiso de ser instrumento efectivo para el desarrollo del país, de apoyar a México para que sea competitivo en el ámbito internacional, condición necesaria para su viabilidad económica y, al mismo tiempo, de contribuir a la reducción de la brecha de la ignorancia y la pobreza que pone en riesgo la viabilidad social y política de la nación. Para ello, la institución requiere formar mujeres y hombres capaces de competir en un mundo en que privará la globalidad -con sus amenazas y oportunidades- y también comprometidos con quienes menos tienen.

Es por esto que ahora nosotros como egresados, que en el pasado nos formamos en las aulas de ésta Universidad, en sus bibliotecas y laboratorios; que disfrutamos sus campos deportivos e instalaciones recreativas, y que aquí encontramos los conocimientos, ideales y valores que nos han permitido ocupar un lugar en esta sociedad; debemos de colaborar con nuestra alma mater y unirnos al empeño de la UNAM de fortalecerse a niveles superiores de calidad. Debemos de valorar lo que hemos alcanzado en nuestra trayectoria académica y profesional, y reflexionar sobre el papel que en ella ha desempeñado la Universidad; en lo que cada uno hubiéramos sido sin la formación que adquirimos en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Nuestro compromiso como sociedad es invertir en la construcción de un mejor futuro para nuestra Universidad, que sin duda resulta esencial para asegurar un porvenir más próspero y justo para todos. Apelo al apoyo solidario a nuestra Universidad, la Universidad de los mexicanos y, en particular, para los alumnos que teniendo talento carecen de fortuna; por que debemos edificar una sociedad que privilegie el ser y el saber y no el tener; que valore el esfuerzo y el conocimiento y no la riqueza material. Hay que exhortar a todos los universitarios a que edifiquemos juntos la Universidad Nacional que forme a los hombres y mujeres que requiere el futuro; la Universidad que contribuya con sus investigaciones a encontrar respuestas a los graves problemas de nuestro tiempo; que participe con trabajo responsable en la construcción de un país en el que la pobreza sea superada y la injusticia cancelada; en el que la tolerancia sustituya a la sinrazón y la igualdad a la discriminación, en el que podamos ofrecer, independientemente de su condición económica y en condiciones de equidad, una educación de calidad a todos los mexicanos.

ÍNDICE

	Página
Capítulo I.- Introducción.....	3
Capítulo II.- Estudios Preliminares para Perforaciones de Túneles.....	12
2.1.- Métodos de Exploración.....	12
2.1.1.- Métodos Indirectos.....	13
2.1.2.- Métodos Directos.....	16
2.2.- Estudios Geológicos.....	22
2.3.- Estratigrafía y Litología.....	26
2.4.- Estratificación.....	26
Capítulo III.- Características Principales a Considerar en el Proyecto.....	32
3.1.- Propiedades de Suelos y Rocas.....	32
3.1.1.- Propiedades Principales de los Suelos.....	35
3.1.2.- Propiedades Principales de las Rocas.....	39
3.2.- Clasificación del Macizo Rcoso.....	43
3.3.- Índice de Calidad de la Roca (RQD).....	52
3.4.- La Forma de Describir el Macizo Rcoso.....	56
3.4.1.- Estado de Meteorización y Alteración.....	58
3.5.- Geotécnia Básica de Macizos Rcosos.....	60
3.6.- Clasificación Geomecánica.....	66
3.7.- Presiones Principales en el Túnel.....	72
Capítulo IV.- Procesos Constructivos de Túneles.....	78
4.1.- El Ciclo Básico de Excavación.....	79
4.2.- Excavación a Sección Completa y Media Sección.....	89
4.2.1.- Método de Ataque a Sección Completa.....	90
4.2.2.- Método de Ataque a Media Sección.....	93
4.3.- Soporte Temporal de la Excavación del Túnel.....	98
4.3.1.- Marcos.....	99
4.3.2.- Anclas.....	102
4.3.3.- Concreto Lanzado.....	114
4.3.3.1.- Procedimiento de Mezcla Seca.....	115
4.3.3.2.- Procedimiento de Mezcla Húmeda.....	119
4.3.3.3.- Funciones del Concreto Lanzado.....	124

	Página
Capítulo V.- Revestimiento Definitivo de los Túneles.....	138
5.1.- Revestimiento de Concreto.....	141
5.1.1.- Control de Calidad del Concreto para el Revestimiento de Túneles.....	142
5.2.- Revestimiento con Concreto Lanzado y Anclas.....	145
5.3.- Revestimiento con Prefabricados.....	148
5.4.- Revestimiento con Enladrillado y Mampostería.....	154
Capítulo VI.- Instrumentación.....	155
6.1.- Importancia de la Instrumentación.....	155
6.2.- Objetivo de la Instrumentación.....	156
6.3.- Aspectos Fundamentales de la Instrumentación.....	158
Capítulo VII.- Conclusiones.....	168
Anexo.....	175
Bibliografía.....	182

## I.- INTRODUCCIÓN.

En éste trabajo se explicarán los principios y consideraciones generales para el diseño de túneles en roca, para lo cual daremos una definición de éste término, pero la sola cuestión de lo que debe incluirse en la definición de un túnel representa un problema, ya que se tienen que considerar los siguientes aspectos: forma, función y método de construcción. Por su forma, es característicamente una cavidad subterránea, de gran longitud en relación con su sección transversal, y por su alineamiento, es más bien horizontal que vertical. Típicamente, la función del túnel es permitir el paso y transporte de personas y materiales por debajo del terreno. Se podría restringir el método de construcción, en una definición limitada, a una perforación con excavación y revestimientos hechos desde el interior. Una descripción formal de un túnel podría ser: un pasaje construido por debajo del terreno o del agua, de forma esencialmente cilíndrica y cuya alineación axial no difiera mucho de la horizontal, con dimensiones suficientes para permitir el paso de personas; excavado y revestido desde el interior o por otros medios.

Las estructuras subterráneas pueden clasificarse de diferentes maneras. De acuerdo con su uso se pueden contemplar las siguientes categorías:

□ Estructuras para minería.

Estas comprenden en primer lugar pasajes más o menos permanentes que sirven de redes del transporte mineral obtenido y otras, en las zonas de explotación, que cambian continuamente de acuerdo con las vetas; en estas últimas el sistema de soporte, cuando lo tienen es provisional.

Existe una diferencia básica entre las estructuras descritas antes y los túneles propiamente dichos; el propósito de la minería, es la explotación de los minerales, y las cavidades hechas son subproductos indeseables, ya que crean el problema adicional de un mantenimiento subsecuente, para prevenir el colapso del sistema entero; después de que se hayan agotado, los pasajes de acceso y otros espacios vacíos no tienen ya utilidad. 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, cuyo producto generalmente indeseable es el material excavado.

Otra diferencia que se debe establecer es que la organización para la construcción de un túnel es por lo común temporal; no existe una comunidad estable y no hay ninguna continuidad en la construcción. Se reúne un equipo de trabajadores, que cambia según se avance en las fases de la construcción y finalmente, se dispersa. Al alcanzar el objetivo se llega al fin; los trabajos para los túneles necesitan personas con un tipo diferente de capacidad. Por el contrario, en la minería, se establece una comunidad

permanente por todo el tiempo de vida de la mina, la que puede extenderse por varias generaciones.

La mayor parte de la tecnología es igual para los túneles y las minas, y se puede ganar mucho con el intercambio de información e ideas, pero las diferencias son importantes. Se dice que los intentos de emplear mineros del carbón en la década de los años treinta para la construcción del ferrocarril subterráneo de Londres en un terreno formado por arcilla London, no fueron satisfactorios debido a las tradiciones de las minas de carbón. En dichas minas se ponían puntales, pero se dejaba que el peso del terreno se apoyara sobre ellos, en tanto que la técnica de los túneles consistía en utilizar cuñas a fin de soportar inmediatamente el peso máximo posible, de manera que se disminuyera el asentamiento y la alteración a los estratos superiores.

Es necesario notar que para la construcción de un túnel debe establecerse previamente y seguir exactamente la geometría y, en particular, la línea entre uno y otro portal, mientras que en algunos tipos de minas se tiene que excavar toda el área del estrato dejando solamente el apoyo necesario para controlar el hundimiento, en otros, 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 esencial un levantamiento cuidadoso.

La diferencia se puede resumir paradójicamente es un trabajo permanente efectuado por una organización temporal y un trabajo efímero ejecutado por una comunidad permanente.

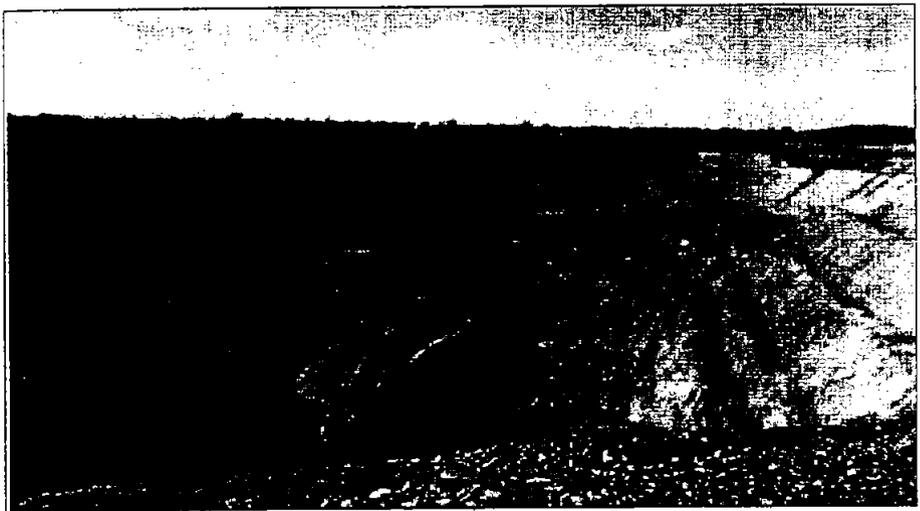


Figura 1.  
Estructura para Minería.

□ Estructuras subterráneas para transporte.

Comprende túneles y cavidades de diferentes dimensiones para el transporte de líquidos y equipo mecánico de transporte, bien sea para mover bienes o personas.

Las cavernas de variadas dimensiones se usan fundamentalmente para alojar equipo auxiliar o para transferir bienes o personas previamente seleccionadas.

Dentro de los túneles para alojar equipo mecánico de transporte se pueden contar los túneles carreteros, los ferroviarios y aquellos para el transporte colectivo en ciudades, en éste último caso las cavernas subterráneas colocadas en puntos específicos y conectadas con la superficie se utilizan como estaciones.

□ Estructuras subterráneas para protección o alojamiento de instalaciones.

Dentro de éstas estructuras se cuentan refugios para evitar que diferentes acciones externas, guerra o agentes naturales, atenten contra la seguridad de bienes o personas, los grandes espacios urbanos, y las casas de máquinas subterráneas. En general consisten en grandes cavidades con fines específicos que pueden conectarse al exterior o entre sí mediante túneles.

□ Estructuras subterráneas para almacenamiento.

Los primeros espacios subterráneos para fines comerciales se cree que fueron las cavas para vinos y quesos. En tiempos recientes han tenido gran auge los almacenamientos subterráneos de muy diversos productos. Este auge se ha presentado por dos razones principales:

- a) El aprovechar los espacios subterráneos deja libre para otros usos la superficie del terreno en ciudades y áreas industriales donde el valor de la tierra se ha incrementado mucho.
- b) Las condiciones propias de almacenamiento subterráneo en cuanto a seguridad, aislamiento térmico, resistencia intrínseca a presión, etc., le dan ventaja sobre los almacenamientos superficiales.

A final de cuentas y como combinación de lo anterior, el uso de almacenes subterráneos se traduce en una mayor economía.

Debe tenerse presente que para poder construir un almacén subterráneo se requiere disponer de una roca adecuada que permita ser excavada económicamente, según el propósito específico del almacenamiento.

Almacenamiento de líquidos, principalmente agua e hidrocarburos, son muy comunes, pero también lo son para los materiales radioactivos. También se almacenan materiales a granel, alimentos y granos, y en algunos casos se han colocado archivos en excavaciones subterráneas que reúnen características de baja humedad.

La construcción de túneles está ligada a la Mecánica de Rocas y a la Geología aplicada, raros son los túneles cuyo trazo discorra por completo sólo por suelos. Además, las rocas intensamente fracturadas o las más moderadamente rotas, pero con sus juntas y fracturas rellenas de suelo, presentan comportamientos que resultan imposibles de separar nítidamente de la Mecánica de Suelos.

El que haya o no un túnel en un determinado lugar es, ante todo, una cuestión topográfica, de que exista un obstáculo que al ser atravesado permite ahorrar longitud de trazo guardando los requerimientos adecuados de curvatura y pendiente. En los ferrocarriles, los costos de operación ligados al desarrollo del trazo y las exigencias de curvatura son sumamente importantes por lo cual los proyectistas lo adoptan como solución final frecuentemente; en cambio en las carreteras las exigencias de pendiente y curvatura son mucho más flexibles y las intensidades de tránsito permiten mayores desarrollos longitudinales, con tal de evitar costos.

El túnel es una estructura de construcción peligrosa e incierta, pese a los avances que sus técnicas han experimentado en los últimos años; por lo menos esa es la opinión de muchos hombres con experiencia en la construcción de vías de transporte. Mucho más que en otras estructuras de las vías terrestres, ocurren en los túneles situaciones no previstas por la exploración y los estudios previos, que hacen aparecer montos adicionales muy importantes de trabajo, tiempo y dinero que trastornan los programas de construcción y provocan dificultades sociales y políticas; naturalmente que estos riesgos serán tanto menores cuanto mayor sea el monto de exploración y estudios previos que se efectúen. Todo esto influye seguramente bastante en el hecho de que los constructores de carreteras de muchos países los eviten casi sistemáticamente.

Las técnicas actuales permiten afrontar la construcción de los túneles con el mismo ambiente general de seguridad y esperanza de éxito que se tenga en cualquier otra gran obra de ingeniería. La decisión de construcción de un túnel debe ser, en la gran mayoría de los casos, una cuestión económica y de disponibilidad de equipo, en la que la decisión resulte de la comparación usual entre los costos de construcción, de operación y mantenimiento. El túnel debe ser sistemáticamente tomado en cuenta dentro del conjunto de soluciones disponibles y construidos cuando resulte ser la solución más económica, segura y conveniente.

La excavación de túneles en roca depende considerablemente de tres elementos: máquinas perforadoras de rocas, brocas perforadoras y explosivos. La pólvora cedió su puesto a la nitroglicerina, mucho más poderosa, seguida prontamente por la dinamita y

la gelignita, las cuales son mucho más seguras de almacenar, manipular y usar, ha habido mejoras y refinamientos, pero sin cambio de escala ni nuevos principios.

Para la perforación en roca, el aire comprimido se convirtió en la fuerza motriz aceptada, a pesar de que durante algún tiempo se prefirió la fuerza hidráulica en Europa y nuevamente vuelve a tener aceptación. Se ha aplicado mucho ingenio al diseño de los compresores, desde los dispositivos de caída de agua del túnel de Frejus hasta las máquinas reciprocantes movidas por vapor y las modernas máquinas reciprocantes o rotatorias accionadas por la electricidad o motores diesel. El gran problema con las mismas brocas depende de su carácter autodestructor; con su martilleo, ellas mismas se hacen pedazos. El desgaste natural en las puntas se observó primeramente en las brocas desmontables que se habían fabricado con el acero más resistente posible, pero luego, a su vez, fue necesario mejorar las espigas a fin de que resistieran los mayores esfuerzos de fatiga, mientras que todo el mecanismo, sometido a los golpes del martillo, vibraciones, polvo, arenisca y agua, se tenía que mantener dentro de estrictos límites de peso de manera que fuese posible su manipulación por parte de los obreros para las perforaciones horizontales y hacia arriba. Los túneles alpinos, fueron la cuna de dichos avances, aprovechando con el tiempo cualquier mejora en la tecnología del acero. Uno de los grandes avances, en la década de los cincuenta, fue el desarrollo de la broca de carburo de tungsteno. Fue en Suecia, donde la abundante roca es muy antigua y muy dura, que se encontraron modos y medios para incorporar dicho material a las brocas de larga vida útil y se pusieron en uso.

A comienzos del siglo XX, ya habían ideadas y probadas, a costa de un duro trabajo, las técnicas básicas para la perforación de túneles, de manera que era posible construirlos en casi cualquier terreno si los contratistas estaban dispuestos a pagar el precio. Por consiguiente, el nuevo siglo contempló una continua expansión de la construcción de túneles en todo el mundo para servir a muchos y variados objetivos. Un sistema de construcción ampliamente adoptado en años recientes ha sido el del túnel sumergido para el cruce de los ríos; en este sistema se prefabrica el túnel en un dique seco, luego se hace flotar en el río y se hunde en una zanja ya excavada, en la que se conectan los tramos. Se han desarrollado muchos trabajos con este sistema en Holanda y en Estados Unidos. Se han desarrollado máquinas excavadoras que trabajan dentro del mismo túnel, y que se han combinado con escudos para construir poderosas máquinas excavadoras de túneles. El tratamiento del terreno mediante la inyección de una amplia variedad de lechadas químicas ha demostrado ser una valiosa técnica en terrenos difíciles, tanto para reducir su permeabilidad al agua como para mejorar su resistencia a la cohesión. El endurecimiento mediante frío, ya sea por la circulación de una salmuera o utilizando nitrógeno líquido, puede proporcionar también cohesión o impermeabilidad temporales. En las rocas, la preservación de la integridad de una masa rocosa por medio de anclas en la roca es un método que adquiere cada día mayor importancia. Las capas de concreto lanzado, inmediatamente después de que la roca queda expuesta, pueden impedir el progresivo desprendimiento de la misma.

Para túneles pequeños y túneles prefabricados grandes, el hincado de tuberías ha resultado ser un método muy útil. Se puede considerar como la excavación de un túnel con escudo, en la que el propio revestimiento del túnel constituye el escudo.

El arte de la construcción de túneles debe figurar en las vías terrestres en otro aspecto diferente del usual. Muchas veces el túnel es una solución muy apropiada para la construcción de alcantarillas, obras de drenaje y de desvío, y también en estos campos debe de ser tomado en consideración.

El primer requisito para tener un túnel satisfactorio es que pueda construirse en forma segura, de manera que permanezca cumpliendo sus funciones por sí mismo o con ayuda de un revestimiento. El segundo requerimiento será que la construcción no cause daños a estructuras vecinas, si las hubiere. Una tercera condición que debe cumplir es revelarse capaz de permanecer durante toda su vida de servicio cubierto de las influencias a que pueda quedar sujeto. La primera de esta será la presión de tierra, pero otros muchos accidentes o circunstancias pueden ser más importantes.

El análisis de las presiones de tierra sobre los recubrimientos de los túneles, se hace generalmente con una metodología que tiene su raíz en los estudios teóricos, pero modificados e influenciados por la intuición y experiencia.

Hay soluciones teóricas del problema que permiten calcular los esfuerzos y las deformaciones de los túneles en materiales idealizados, pero el proyectista debe adaptar los cálculos a materiales reales, cuyas propiedades no necesariamente son las mismas que las de los materiales ideales considerados, además, las propiedades del material real rara vez se conocen en forma segura y cambian mucho en distancias cortas. Como consecuencia, los conceptos presupuestos en las soluciones teóricas a menudo no son muy satisfactorios. Por lo anterior, será preciso continuar investigando el comportamiento de los túneles, para llegar a mejores métodos de análisis; es opinión general de los especialistas que la combinación de estudios teóricos y de conocimiento empírico, resultado de observación y mediciones de comportamiento de túneles reales será el camino más prometedor para llegar pronto a mejorar substancialmente los métodos de análisis de que hoy se dispone o para desarrollar otros nuevos y mejores.

Pero también hay que tomar en cuenta otros factores relacionados con la función de cada túnel:

- La localización para un túnel puede ser a través de una montaña o una cerro, estar sumergido o ser urbano.
- El terreno puede ser desde un limo blando hasta roca dura uniforme, lo que abarca un campo muy amplio en lo que respecta al comportamiento de una excavación: el agua puede representar una parte importante. Cualquier selección

que se haga del terreno implica cambios en la geometría, la forma estructural y el método de construcción.

- Las dimensiones geométricas son las del túnel terminado: ancho, altura y longitud, junto con los niveles, pendientes y curvas. Los límites especificados podrán ser muy reducidos u ofrecer un amplio campo de posibilidades.
- La forma estructural, podrá ser un círculo, herradura, rectángulo o cualquier otra forma que incorpore hierro colado, concreto colado in situ, concreto lanzado, etc., para soportar la carga impuesta. La naturaleza del terreno y el método constructivo influirán de un modo decisivo sobre la forma estructural.
- Los métodos de construcción varían desde la perforación por barrenos y explosivos, o por una máquina excavadora de túneles, con o sin un escudo, hasta el corte y relleno e diversas secuencias, e incluyendo los túneles prefabricados sumergidos. La selección del método está limitada no sólo por las condiciones del terreno, sino también por los recursos disponibles en su más amplio sentido.
- El equipamiento del túnel terminado incluye las calzadas o las vías de ferrocarril, iluminación, ventilación, acabados decorativos y funcionales, y sistemas de control.

Todas estas condiciones se deberán tener en cuenta totalmente en la planeación y diseño del proyecto. Generalmente, es poco satisfactorio e ineficaz agregar algo al proyecto o modificarlo en una etapa posterior, a menos que se haya previsto en la planeación original.

El diseño de túneles puede efectuarse de acuerdo con cualquiera de los tres enfoques siguientes:

➤ Analítico.

El enfoque analítico es el menos usado, no por las técnicas analíticas mismas, de las cuales destacan:

- Método de elemento finito.
- Soluciones matemáticas cerradas.
- Fotoelasticidad y otras técnicas de simulación.

sino por la dificultad, siempre presente, para alimentarlas con parámetros que representen realmente las condiciones del macizo.

Estas técnicas analíticas son muy útiles para determinar la influencia relativa de los diversos parámetros que intervienen y para comparar las diversas soluciones posibles.

➤ Observacional.

El enfoque observacional, cuyo exponente más destacado es el método austriaco de tuneleo, se basa en la observación del comportamiento del túnel según se construye, para modificar el sistema de soporte según se requiera.

Este enfoque se basa en la siguiente premisa: "un sistema de soporte flexible para un túnel, siempre es preferible a un soporte rígido."

En la práctica, lo anterior se logra mediante la colocación de anclas y concreto lanzado, para evitar un aflojamiento excesivo, a la vez que se permite la suficiente deformación como para que se desarrolle el efecto de arqueado y autosustentación de la roca, mediante la redistribución de esfuerzos.

El problema que se afronta con este método es la contratación de la obra, pues el proyecto varía a lo largo del periodo de construcción.

➤ Empírico.

El enfoque empírico se basa en la experiencia adquirida en obras similares. Para un manejo más eficiente se requiere de un sistema de clasificación, basándose en el cual se podrá extrapolar la experiencia y aplicarla mediante un juicio sano al nuevo caso.

De esta manera, los sistemas de clasificación de los macizos rocosos constituyen la espina dorsal del enfoque empírico y han sido ampliamente usados en todo el mundo. El sistema de clasificación de rocas más usado hoy en día, es el de Terzaghi.

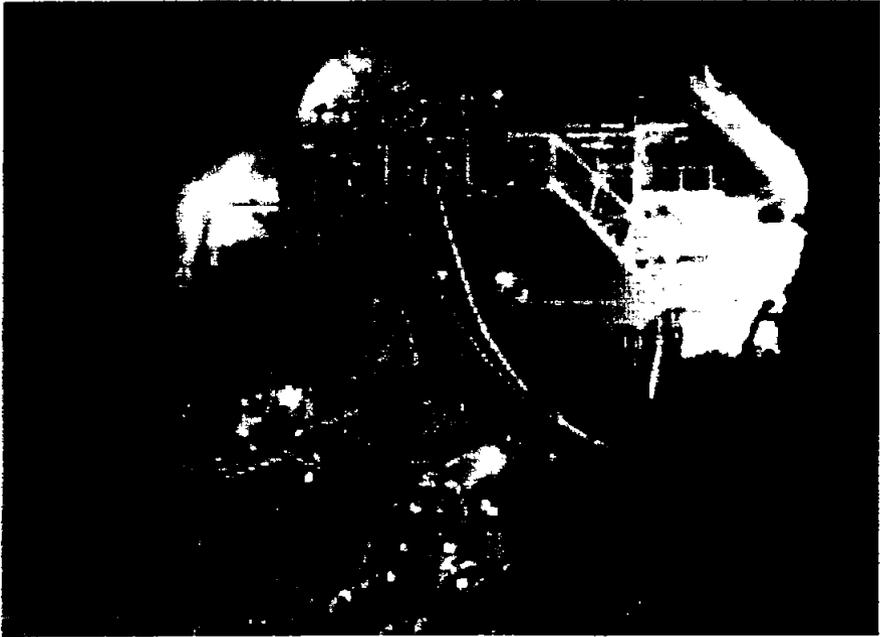


Figura 2.  
Ejemplo de un Túnel en Sudáfrica.

## II.- ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA PERFORACIÓN DE TÚNELES.

Antes de que un túnel se pueda planear en líneas generales y diseñar en detalle, se deberá reunir información sobre los aspectos físicos del proyecto, además de los estudios económicos, los cuales tienen una relación directa. La necesidad de una detallada y extensa investigación es probablemente mayor que para la mayoría de los otros tipos de construcción. La construcción de un túnel es necesariamente costosa, pero constituye una falsa economía ahorrar en la información requerida para poder hacer la mejor selección de la línea, nivel y métodos.

El estudio fotogramétrico es el primero en realizarse ya que de esta manera nos podemos dar cuenta de la necesidad de construir túneles a consecuencia de la alteración del terreno, tanto por la rapidez como por la exactitud en el registro de los detalles. Es bien sabido que el campo puede revelar a veces la presencia inesperada de obras antiguas; una vez restituidos los datos en gabinete, se fijarán los puntos sobre el terreno por una brigada de localización y se realizará el levantamiento topográfico preciso de la zona del túnel: planta con curvas de nivel, y perfil a lo largo de la línea y fijando en este levantamiento, la ubicación de ríos, carreteras, arroyos y cualquier condición externa que pueda influir para la excavación del túnel.

### 2.1.- Métodos de Exploración.

Son distintos los métodos o técnicas exploratorias que nos permiten llegar al conocimiento preciso del sitio donde se realizará la obra y consecuentemente dar respuesta a las interrogantes planteadas anteriormente. Puesto que la mayor parte de estas técnicas son de aplicación relativamente costosa, el geólogo o geotecnista deben primero hacer la selección adecuada de la técnica que se debe aplicar y enseguida sacar el máximo de información que ésta proporcione. Lo anterior requiere:

- Que no se pierdan de vista las interrogantes anteriores, lo que significa objetivos particularmente claros.
- Que el programa exploratorio que se establezca sea el adecuado.
- Que el método que se utilice sea correctamente ejecutado, lo que implica supervisión por parte del geotecnista.
- Que el geólogo o geotecnista se esfuercen por sacar el mejor partido de los resultados obtenidos.

En una forma muy simplista los métodos de exploración se dividen en dos grupos o categorías principales: Métodos Indirectos y Métodos Directos.

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

Los primeros son aquellos que se basan en la información obtenida de fotografías aéreas verticales de contacto o en la medida de una propiedad física (mecánica, eléctrica, etc.), del terreno observable o no, y son un antecedente o complemento de los segundos.

Los métodos directos a su vez son aquellos que permiten la observación ocular del terreno sea en la superficie o bien a profundidad ya sea por levantamientos geológicos o por muestras colectadas en perforaciones, pozos o en socavones.

### 2.1.1.- Métodos Indirectos.

#### □ Fotointerpretación.

Es un procedimiento utilizado para fines exploratorios tomando como base la interpretación de fotografías aéreas preferentemente verticales, considerando por una parte características relativas a coloración, tonalidad y textura de las fotografías y por otra parte características correspondientes a rasgos topográficos y morfológicos.

Las escalas de las fotografías que se emplean en la fotointerpretación varían para trabajos de detalle de 1:2000 a 1:5000 y para reconocimiento de 1:25000 a 1:50000.

#### □ Geofísica.

Los métodos geofísicos constituyen un procedimiento exploratorio que en los últimos años ha cobrado gran importancia en la geotecnia por lo exitoso de sus resultados y podría decirse que no hay obra civil, sobre todo si ésta es grande, que no incluya en su programa de investigación la aplicación de métodos sísmológicos y eléctricos que son por otra parte métodos relativamente económicos y de aplicación rápida, naturalmente exigen el concurso de un especialista en geofísica.

#### ✓ Método Sísmológico.

Este método se basa en medir las velocidades de propagación de las ondas elásticas en los diferentes medios del lugar, provocando artificialmente perturbaciones dinámicas en un punto del 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.

En geotecnia el método sísmico utilizado es el de refracción, que 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 la envía a un aparato registrador.

CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

El sismógrafo, llamado así al equipo utilizado en éste método, consta de tres partes básicas: el mecanismo generador de la onda, el conjunto de geófonos y el aparato registrador.

En la tabla 1, mostrada a continuación, se pueden observar velocidades de propagación para distintos materiales:

Tabla 1.  
Velocidades de Propagación para Distintos Materiales.

MATERIAL	VELOCIDAD, EN M/SEG
Suelo	170 - 500
Arcilla	1000 - 2800
Arcilla arenosa	975 - 1100
Arcilla arenosa cementada	1165 - 1280
Limo	760
Arena seca	300
Arena húmeda	610 - 1830
Aluvión	550 - 1000
Aluvión (terciario)	800 - 1500
Aluvión profundo	1100 - 2360
Depósito glaciár	490 - 1700
Dunas	500
Loess	375 - 400
Lutita	1800 - 3800
Arenisca	2400 - 4000
Marga	3000 - 4700
Creta	1830 - 3970
Caliza	3000 - 5700
Dolomía	5000 - 6200
Evaporitas	3500 - 5500
Granito	4000 - 5600
Gneis	5100 - 7500
Esquisto o pizarra	2290 - 4700
Rocas ígneas del basamento	5500 - 6600
Agua (dependiendo de la temperatura y contenido de sales)	1430- 1680

✓ Métodos Eléctricos.

Este método 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 empleando para ello aparatos receptores y transmisores. Se pueden aplicar para la localización de acuíferos y estructuras geológicas.

El método eléctrico 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.

La resistividad de un material se define como la resistividad de Ohms entre las caras de un cubo unitario de material. La unidad utilizada es el ohm - metro.

Para la exploración geoelectrica se han desarrollado diversos métodos, de estos el más simple es el de Wenner, que opera de dos maneras: sondeo eléctrico que estudia la estratigrafía según una vertical y rastreo eléctrico que lo hace según una horizontal a cierta profundidad. Combinando ambas técnicas se puede tener una clara idea de las condiciones del sitio.

El equipo consiste de una fuente de poder, un voltímetro, un amperímetro, cuatro electrodos y cables conductores.

En la tabla 2, se dan algunos valores usuales de suelos y rocas:

Tabla 2.  
Valores Usuales de Suelos y Rocas.

MATERIAL	Resistividad (ohm-m)
Arcillas	3 - 30
Margas	10 - 100
Lutitas	30 - 300
Arenas y Gravas	100 - 1000
Calizas	300 - 3000
Arenisca	70 - 7000
Rocas intrusivas	1000 - 10000

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

### ✓ Método Gravimétrico.

La gravimetría es la medida de la aceleración de la gravedad que como se sabe no es constante en toda la superficie del planeta. Para cada punto existe un valor que depende de la latitud y de la altitud. La diferencia entre éste valor y el valor medido recibe el nombre de anomalía de Bouguer. Esta se valora en general en fracciones de miligal (el gal corresponde a una aceleración de  $1\text{cm}/\text{seg}^2$ ).

El equipo que se utiliza para este trabajo y que debe ser extremadamente sensible se denomina Gravímetro.

La anomalía de Bouguer se debe a una repartición no homogénea de las masas en la vertical del punto de medida. Este puede explicarse por la presencia en profundidad de una masa densa o bien de una deficiencia de masa, caso en el cual puede corresponder a una cavidad.

### 2.1.2.- Métodos Directos.

Son estos como ya se dijo los que permiten la observación ocular y en su caso la obtención de muestras como son: el reconocimiento preliminar, el levantamiento geológico en la superficie del terreno, las perforaciones, los socavones, trincheras y pozos a cielo abierto.

#### □ Reconocimiento preliminar.

Por reconocimiento preliminar se entiende la visita o inspección al sitio objeto de un estudio geológico que procede a cualquier tipo de investigación en el terreno que amerita desembolsos o erogaciones importantes.

Es de todos puntos de vista recomendable este tipo de reconocimiento, complementado con un estudio fotogeológico y con una buena recopilación de datos geológicos del sitio o de predios, o zonas cercanas a la obra proyectada, ya que además de proporcionar información acerca de la accesibilidad, recursos humanos y materiales del lugar permite conocer el ambiente geológico del área sobre la cual se va a trabajar, información que se considera necesaria para orientar mejor los estudios futuros.

Puede ser a tal grado importante el reconocimiento preliminar que de su sola realización se elimine todo proyecto de construcción en un lugar previamente seleccionado en el que no se tuvieron en cuenta las consideraciones geológicas.

#### □ Levantamientos geológicos detallados.

Estos levantamientos son aquellos que tienen por objeto la determinación precisa de las unidades litológicas presentes de un área en estudio, su grado de alteración y

alterabilidad, sus contactos geológicos, posición (rumbo y echado), y los accidentes estructurales o discontinuidades que las afecten: fallas, fracturas y juntas, intensidad de plegamientos, etc. Por otra parte tratándose de morfología accidentada las observaciones durante los levantamientos deben ser también orientadas al conocimiento del equilibrio de los taludes (fenómenos de geodinámica externa).

Este tipo de levantamiento, teniendo en cuenta la magnitud y características de la obra por construir, tienen un rango de escalas que pueden variar de 1:100 a 1:5000 tratándose de obras grandes, aunque las escalas más usuales son aquellas de 1:500 y 1:1000.

Debe tenerse muy en cuenta que una buena toma de muestras y fotografías durante el levantamiento puede contribuir, ya que se tiene la información del estudio de las muestras en el laboratorio y que se ha hecho un examen cuidadoso de las fotografías, a dilucidar algunos aspectos que aparecieron confusos durante el levantamiento.

□ Tajos y pozos a cielo abierto.

Estos procedimientos de exploración, a un costo muy limitado, son excepcionalmente ventajosos para conocer el espesor y naturaleza de un material de relleno (suelo, depósito aluvial, etc.), las características de la roca subyacente y su grado de alteración, fracturas, fallas y contactos.

Se recomienda su ejecución cuando es deseable obtener un mayor cúmulo de datos en un levantamiento geológico.

Para su integración en el plano geológico y para la elaboración de perfiles, estas obras de exploración deben estar ligadas al plano topográfico o fotogramétrico del lugar y ser levantadas con brújula y cinta a lo largo de todo su desarrollo en las paredes y piso. El levantamiento deberá hacerse con el grado de detalle que permita obtener el perfil geológico exacto y los accidentes estructurales existentes. Por otra parte si el estudio lo requiere se obtendrán muestras cúbicas o de otro tipo para ser estudiadas en el laboratorio.

□ Socavones y pozos interiores.

Este tipo de obras, aunque de costo elevado comparado con los tajos y pozos a cielo abierto e inclusive con las perforaciones, permiten la observación directa de los materiales y otros accidentes a profundidades a veces suficientemente alejadas de la superficie. Proporcionan valiosa información no sólo sobre sus características de resistencia y permeabilidad sino también acerca del comportamiento de la roca al tumbe, distribución y número de barrenos, etc. Por otra parte son sitios adecuados para efectuar algunas pruebas de campo módulo de elasticidad, resistencia y permeabilidad).

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

Son sin duda de las exploraciones más recomendables en el caso de túneles y casas o máquinas, o en general de obras subterráneas.

Son obras cuya estaca o machote de entrada deben estar también ligados al plano topográfico del lugar, no sólo para vaciar la información que se pueda obtener para el plano geológico correspondiente, sino también para tener un punto de amarre para la elaboración de perfiles.

El levantamiento se hace a partir de los machotes o referencias que para el efecto se hayan colocado, tomando datos de las tablas, piso y techo de la obra, en lo referente a accidentes estructurales, contactos y distintas unidades lito-estratigráficas.

De los accidentes estructurales como fracturas, fallas y planos de estratificación deberán tomarse, además de su rumbo y echado las características de la zona de falla o fractura y naturaleza del material de relleno si es que existe; de los contactos, si son congelados (caso de algunos intrusivos), transicionales o discordantes. Si existe duda respecto a la identificación petrográfica de las unidades litológicas atravesadas, se tomarán muestras (refiriéndolas al levantamiento), para ser enviadas al laboratorio. Estas muestras deberán colectarse tanto de aquellos materiales que tengan aspecto de roca sana como de roca alterada.

Es conveniente observar, durante el levantamiento, misma recomendación que se hace para los tajos y pozos a cielo abierto, la evolución de las rocas, después de excavadas a la acción de la intemperie, es decir el grado de alterabilidad que presenten en lapsos de tiempo relativamente cortos.

### □ Perforaciones.

En las perforaciones deben distinguirse dos tipos, aquellas para la obtención de muestras de roca, y las que se ejecutan para hacer un muestreo de suelos.

Salvo casos excepcionales en que se presenten cuerpos de calcedonia o rocas de naturaleza similar donde para atravesarlas es recomendable utilizar martillo neumático, el muestreo en roca debe efectuarse siempre a rotación con brocas con corona de diamante o con chispas de carburo de tungsteno.

Son de valor reducido los sondeos en roca que provocan desgaste, por abrasión, de los extremos de los tramos de muestra. El porcentaje de muestras así recuperadas disminuye y la información obtenida puede resultar errónea. Es conveniente modificar en tal caso, el tipo de muestreador.

Los factores que influyen en la calidad del muestreo de rocas son de dos clases unos ligados directamente al equipo de perforación y personal de operación, y otros

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

inherentes a las características de los materiales. Entre los primeros se pueden mencionar:

- El tipo de muestreador: de barril sencillo, doble rígido o doble giratorio. Los barriles del tipo sencillo o doble rígido inducen en la muestra esfuerzos de torsión; además con el muestreador de barril sencillo la circulación del agua de perforación ocasiona un desgaste lateral de la muestra. El barril, doble giratorio, es el más eficiente, pues evita estos dos inconvenientes.
- El tipo de broca: de diamante o chispas de carburo de tungsteno, el número de vías de agua, el número de piedras por kilate, etc.
- El estado del opresor y porta opresor.
- El gasto de presión del agua o lodo de perforación.
- La velocidad de rotación de la broca.
- La presión que actúa sobre la broca.
- El anclaje de la máquina de perforación que en caso de ser deficiente influye en las vibraciones de las barras de perforación.
- La extracción de la muestra del barril y sobre todo,
- Los conocimientos y responsabilidad del personal de operación el cual debe tener suficiente experiencia.

Entre las características de los materiales están:

- El grado de fracturamiento y falla. A mayor fracturamiento más posibilidades de que la recuperación sea deficiente por el bloqueo frecuente que se presenta con el consecuente molido de la muestra.
- El grado de alteración. A mayor alteración más posibilidad de que el agua de circulación deslave e inclusive en algunos casos destruya la muestra.
- La finura o espesor de los estratos o capas así como aquellos que presentan estructura fluidal y su posición con respecto a la dirección del barreno.

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

Los factores que influyen en la calidad del muestreo en suelos son:

- El procedimiento de hincado: a presión, a relación o percusión.
- El tipo de muestreador: de pared gruesa (para sondeos alterados de tubo liso), o de pared delgada (para sondeos inalterados tipo Shelby o Denisson).
- El gasto de presión del agua o lodo de perforación.
- La velocidad de avance.
- La carga que actúa sobre las barras de perforación.
- La forma de separar la base de la muestra, ya introducida en el barril, del terreno circundante.
- El procedimiento de estabilización de las paredes del sondeo; lodo o ademe.

Diámetros, distribución y profundidad.

En general los diámetros más recomendables en las perforaciones son el de 2 1/8" (NX), y el de 1 5/8" (BX), particularmente el primero por permitir obtener muestras en las que se facilita no sólo el examen megascópico, respecto de las características petrográficas y estructurales, sino que también la realización de pruebas en el laboratorio, pudiendo quedar inclusive testigos para pruebas o estudios adicionales.

No es posible establecer reglas precisas respecto al número, distribución y profundidad que en general deberán tener las perforaciones ya que no sólo la magnitud de las cargas impuestas por las estructuras al terreno y las características y funciones de la estructura proyectada, sino sobre todo las condiciones geológicas del lugar son las que gobiernan estos tres factores.

En el caso de túneles, el levantamiento geológico y algún método indirecto (geofísico desde luego), determinarán el número de perforaciones a lo largo del eje longitudinal que haya sido seleccionado y la profundidad siempre deberá alcanzar la plantilla del túnel. Cabe subrayar que en casos de topografía muy accidentada en que un cúmulo de condiciones impidan o hagan impracticable la ejecución de una perforación, es muy aconsejable que en caso de que se construya la obra, y si se presumen accidentes geológicos de consideración, se realicen perforaciones en el frente de ataque del túnel a fin de conocer de antemano con precisión las condiciones de las rocas que van a ser excavadas, inclusive pudiera ser necesario que estas perforaciones se hicieran en abanico.

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

Para elaborar mejor un perfil geotécnico, no está por demás hacer resaltar la importancia que tiene exigir al perforista que observe durante la perforación, algunos aspectos que hablan elocuentemente de las condiciones en que se encuentran los materiales a profundidad, observaciones que deberán ser anotadas con el mayor detalle en su diario de perforación. Unos aspectos relacionados con el agua utilizada en la perforación y otros con avances variaciones en la velocidad de perforación y por ciento de recuperación.

Respecto del agua de perforación, se pueden presentar aumentos (artesianismo), pérdidas parciales o totales de la misma que indican la presencia de terrenos permeables. Será entonces oportuno, si se desea cuantificar la permeabilidad, ejecutar las pruebas correspondientes (pruebas Lugeon o Lefranc por ejemplo). La claridad, color y turbidez del agua de retorno son características que indican si se está perforando roca más o menos sana, zona de falla o fracturas con relleno arcilloso y óxidos de fierro de horizontes de la misma naturaleza. Cuando el agua aparece muy turbia resulta particularmente importante recolectarla para estudiar el recorte que trae en suspensión. El perforista por consiguiente deberá anotar la profundidad donde se observó la variación para más tarde el técnico responsable del proyecto, poder encontrar alguna explicación al estudiar el núcleo extraído.

Con relación a los avances, variaciones en la velocidad de perforación y por ciento de recuperación son datos éstos que proporcionan valiosa información sobre la naturaleza de los materiales. En una ortocuarcita, arenisca cuarcífera o nódulos de pedernal, por ejemplo, serán extremadamente lentos los avances, mientras que en una marga, toba o alguna otra roca no cuarcífera ni silicificada serán por el contrario rápidos. Por otra parte frecuentes bloqueos en un barril y variaciones en la velocidad de perforación pueden ser indicativos de terrenos fracturados. Igualmente un bajo por ciento de recuperación puede ser indicador de intenso fracturamiento o bien de materiales de naturaleza arenosa, arcillosa, o arcillo-arenosos no consolidados o pobremente cementados.

Con base en el fracturamiento, grado de debilidad o alteración del macizo rocoso, D.U. Deere ha establecido el índice de calidad de las rocas o RQD (Rock Quality Designation). Para esto se suman los fragmentos de núcleo en estado sano y compacto con longitud mayor o igual a 10 cm y los divide entre la longitud total perforada, obteniendo un valor que se representa en %, el se estudiará a fondo en el apartado 3.3.

Para usar estos datos hay que tener cierto criterio cuando se trata de rocas sedimentarias o metamórficas estratificadas o foliadas.

El conjunto de perfiles geotécnicos, integrados en una sección topográfica dada, junto con el levantamiento geológico de detalle, nos llevarán a obtener un perfil geológico del túnel en proyecto. Esto permitirá determinar si hay necesidad de efectuar perforaciones adicionales o bien si las realizadas son suficientes. Si en un área para

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

excavar se encuentran puntos dudosos, se deben esclarecer éstos sin escatimar dinero en la exploración.

En adición a lo anterior señalan Antoine y Fabre (1980, Pág. 96), que debido al precio tan elevado de las perforaciones con obtención de núcleos se ha buscado cada vez más realizar sondeos o perforaciones que llaman ellos destructivos (con tricónica o percusión), de donde se pueda obtener información geotécnica que permita darse una idea clara del perfil de los terrenos perforados. Dicen ellos que se han propuesto diversos sistemas de registro de lo que llaman los parámetros de la perforación adaptables a los equipos clásicos de perforación o de percusión en terrenos pulverulentos o coherentes. Los registradores, montados sobre la parte superior del cabezal permiten obtener los siguientes datos:

- El avance instantáneo del cabezal y consecuentemente de la broca.
- La presión del fluido de perforación.
- La presión de empuje sobre la barrena.
- El par aplicado si el equipo es de rotación.
- Las vibraciones reflejadas en la sarta de tubos que son característicos de la dureza de la formación atravesada, si el equipo es de percusión.

El análisis comparativo de los registros indica los cambios de la naturaleza litológica con una precisión comparable y a veces superior a la de una perforación con muestreo. Un complemento de estas perforaciones llamadas destructivas son los registros eléctricos, los registros sónicos, los radioactivos y los térmicos.

### **2.2.- Estudios Geológicos.**

Los estudios geológicos constituyen la segunda etapa en el procedimiento para la localización más conveniente de un túnel, pues el éxito de una obra de Ingeniería Civil depende de la medida en que esta se adapte a las condiciones geológicas del lugar en que se construye.

Las investigaciones geológicas deberán llevarse a cabo con la mayor amplitud y precisión posible para una adecuada determinación de las condiciones, reales del macizo rocoso, el cual nos determinará las formas para llevar a cabo una excavación subterránea, o bien en caso de encontrar mantos de roca con problemas de inestabilidad podemos determinar el proceso constructivo de la perforación del túnel.

Los estudios generales o regionales están fundados en la información local, las cartas geológicas disponibles y los antecedentes regionales. La información

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

proporcionada a este nivel enunciará los aspectos de las formaciones desde el punto de vista de edad, tipos de roca, etc., y apoyada aquella en fotogeología de la zona, enfatizará en las características que determinen el comportamiento mecánico, tales como fallas, sistemas de fracturamiento principal, etc.

Los estudios geológicos de precisión sobre el terreno donde la obra pretende construirse no deberá escatimarse ni en costo, ni en tiempo para el desarrollo de los estudios, de no ser así esta repercutirá económicamente en la construcción del túnel. El levantamiento geológico, si las condiciones del terreno no lo impiden, permitirá establecer la presencia, posición y magnitud de fallas, y el grado de fracturamiento.

En general los aspectos y características de primordial importancia en esta etapa, que influirán determinadamente en el comportamiento de la excavación son:

- Tipo y calidad de las rocas.
- Sistemas de juntas y fisuras en el macizo rocoso, determinándose para cada sistema.
- Abertura y rugosidad de las fisuras.
- Grado de alteración en los sistemas de juntas o fracturas y espesor de la zona alterada, puesto que de ello depende la resistencia al esfuerzo cortante y los desplazamientos asociados en el macizo rocoso.
- Magnitud de las presiones hidráulicas y cuantificación del volumen de agua que habrá de extraerse.

Por lo general, un estudio geológico previo a la construcción y diseño de un túnel se efectúa en tres etapas:

### ➤ Estudios Preliminares.

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

### ➤ Estudios de Detalle.

La segunda etapa es la más completa, puesto que ésta enfocada a determinar la factibilidad de trazo en particular. En esta fase se consideran las diversas alternativas

## CAPÍTULO II ESTUDIOS PRELIMINARES PARA PERFORACIONES DE TÚNELES

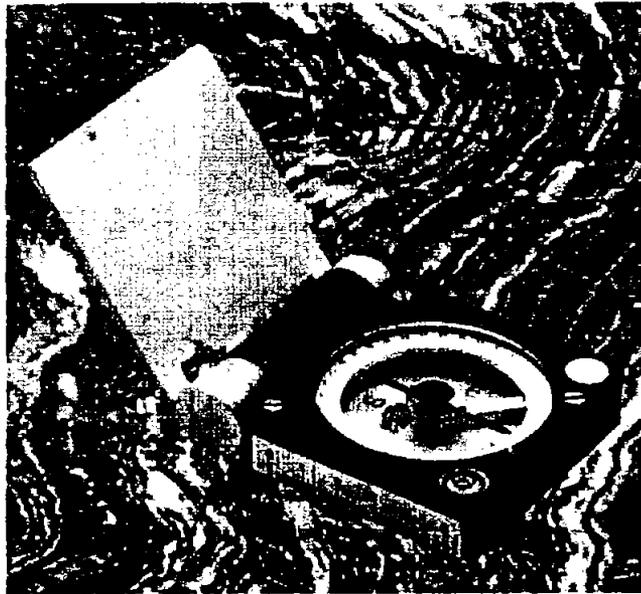
del trazo del túnel, basándose en la comparación de las condiciones geológicas y geotécnicas obtenidas con la exploración dentro de la ubicación general de la ruta.

### ➤ Estudios Especiales.

Comprende investigaciones adicionales, especiales o más detalladas, una vez que se ha elegido el trazo definitivo del túnel, cuyos datos habrán de ayudar al diseño final, a la estimación del costo del túnel y a la previsión de futuros problemas geológicos.

Durante la construcción y operación del túnel se deben continuar los estudios geológicos, con la finalidad de verificar los estudios anteriores, de prever problemas futuros y de auxiliar a un mejor diseño y revestimiento.

Algunos aparatos que se utilizan son:



Coda - Brújula de estratos geológicos.



Gekom - Brújula de estratos pequeños.



Tectronic 4000 - Colector de datos geológicos

Figura 3.

Brújulas geológicas hechas por F.W. Breihapt &  
Sohn, P.O. Box 10 05 69, D-3500  
Kassel. W. Alemania.

### **2.3.- Estratigrafía y Litología.**

En este estudio se refiere al tipo de roca que se va a trabajar, sea ígnea, sedimentaria o metamórfica, al grado de sanidad, alteración o alterabilidad que presente; determinadas estas por estudios de laboratorio (petrográficos, de evolución de la roca o de intemperismo acelerado), o por simple observación de campo.

Al hablar de la litología de una roca se hace referencia a su minerología, textura y su medio ambiente de depósito, así como a algún nombre o término descriptivo de un sistema de clasificación reconocido.

La estratigrafía permite establecer una relación entre las distintas unidades litológicas o formaciones presentes y así conocer el origen, espesor, distribución y posición cronológica en la secuencia de las diversas unidades.

Los términos litológicos son útiles en la geotécnica de túneles, ya que su empleo es una relación entre la textura, fábrica y anisotropía estructural de las rocas de un determinado origen. Por ejemplo, una roca ígnea tiene una estructura densa con muy pequeñas diferencias en sus propiedades mecánicas, mientras que algunas rocas sedimentarias y metamórficas muestran una anisotropía considerable.

Otra ventaja del nombre geológico, es la asociación que puede hacerse entre ciertos tipos de roca y otras características "in situ" que pueden presentarse. Por ejemplo, la presencia de caliza o yeso inclina a buscar fenómenos de disolución; el basalto indica la posible presencia de diaclasas.

Sin embargo, en ocasiones el nombre geológico es insuficiente si no se completa con otras características físicas como es una clasificación de tipo mecánico.

El conocimiento de la estratigrafía y de la litología es de suma importancia para saber, entre otras cosas, que tipos de rocas se encontrarán dentro del túnel, que problemas pueden causar durante la construcción y con que confiabilidad se pueden proyectar los datos de superficie.

### **2.4.- Estratificación.**

La posición relativa del futuro túnel con respecto a los planos de la estratificación, principalmente en terrenos sedimentarios, es importante desde varios puntos de vista:

La presión total sobre el revestimiento de un túnel y la forma como se distribuye a lo largo de él, dependiendo en primer lugar, de la estratificación de la roca, los cuadros de la figura 4 muestran la influencia de esta discontinuidad:

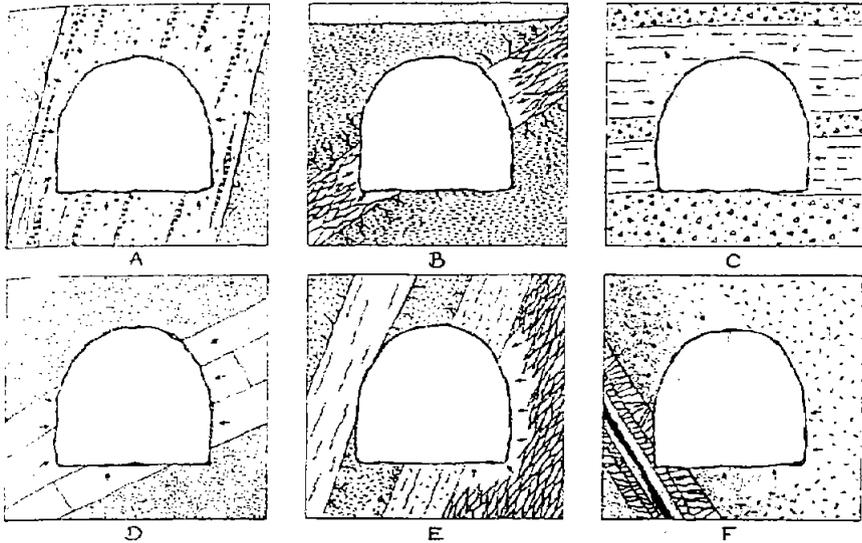


Figura 4.

Influencia de la estratificación en el revestimiento de un túnel

Existen dos posiciones extremas de la dirección de túneles en relación con la orientación de la estratificación; y, entre ellas, hay numerosas posiciones intermedias:

1.- Túneles en dirección.

Su eje longitudinal coincide con la dirección de los estratos (figura 5 a), lo cual es aconsejable si la formación atravesada presenta buenas características.

2.- Túneles atravesando estratos.

El túnel es llevado perpendicular u oblicuo a la dirección de las capas (figura 5 b), lo cual origina el irse encontrando varios tipos de rocas con diferentes propiedades e inclinaciones, esto puede ocasionar problemas de estabilidad o permeabilidad.

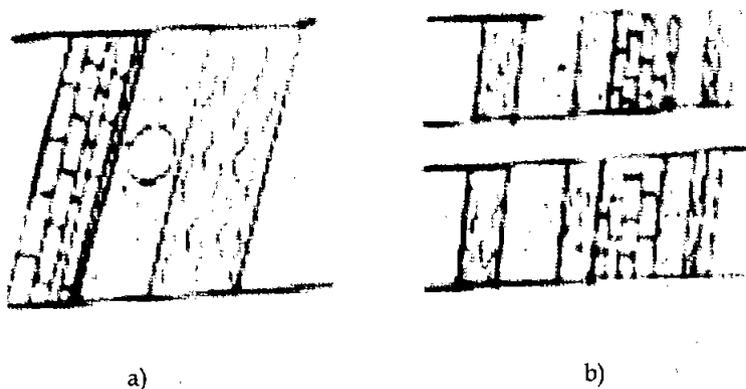


Figura 5.

Posiciones extremas de la dirección del túnel en relación a la orientación de la estratificación.

La inclinación de los estratos con respecto al túnel es también de importancia, por lo siguiente:

- Si los estratos son verticales, y se construye un túnel perpendicular al rumbo, cada estrato puede actuar como una viga dando mayor estabilidad (figura 6 A), con la desventaja de que pueda filtrarse mucha agua de la superficie o por su posición la efectividad de los explosivos es menor.
- En el caso de que el túnel sea paralelo al rumbo de los estratos verticales (figura 6 B), la masa de roca del túnel se sostiene por la fricción a lo largo de los planos. En estos casos el límite superior de caídas de roca, de acuerdo con Terzaghi (1940), no se extiende una distancia mayor de 0.25 veces el ancho del túnel.
- Si la estratificación es inclinada pueden presentarse problemas de inestabilidad, más aún si se encuentran rocas alteradas, falladas, fisuradas o intercalaciones de rocas competentes e incompetentes con bajo ángulo de fricción (yesos, sal, lutitas carbonosas, etc.), o bien si existen esfuerzos verticales u horizontales naturales del macizo o por esfuerzos tectónicos.

En este caso hay que seleccionar correctamente el sentido de ataque del túnel para estabilizar lo mejor posible el frente (ver figura 7).

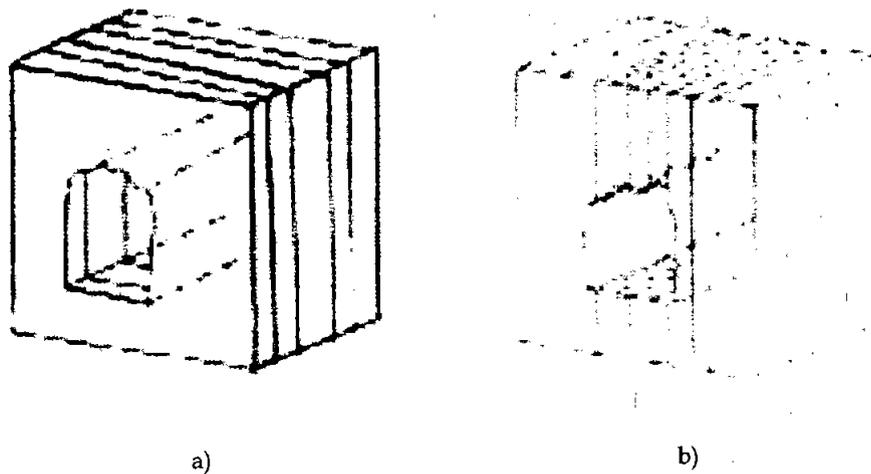


Figura 6.

Inclinación de los estratos con respecto al túnel.

- a) Túnel perpendicular al rumbo de capas verticales.
- b) Túnel paralelo al rumbo de capas verticales.

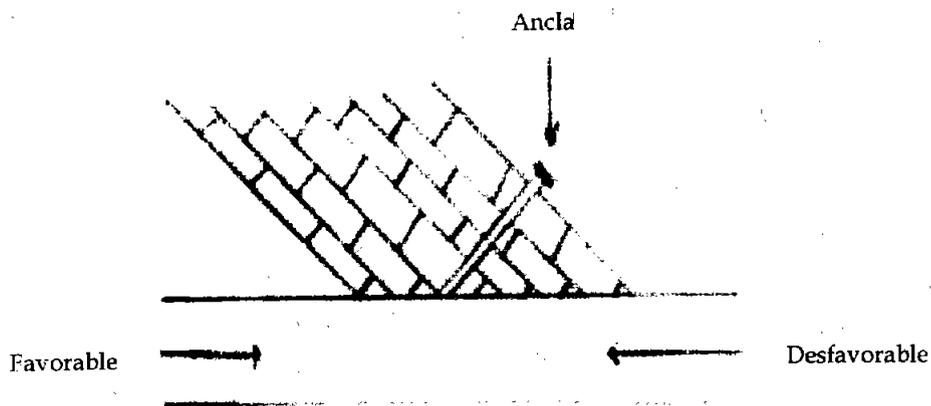


Figura 7.

Túnel atravesando capas inclinadas.

- En el caso de rocas horizontales la estabilidad del túnel es función del espesor de las capas, el fracturamiento y la resistencia a la tracción de la roca y de su variación con el contenido de agua; ya que una acumulación fuerte de agua en el techo aumenta la carga.

La situación estructural de las capas es significativa, ya que si se construye un túnel en un anticlinal existirá mayor estabilidad, puesto que la presión vertical sobre el techo es menor que un sinclinal.

Además, si la formación rocosa es permeable, en los anticlinales el agua escurrirá por los flancos, mientras que en los sinclinales fluirá hacia el túnel (ver figura 8).

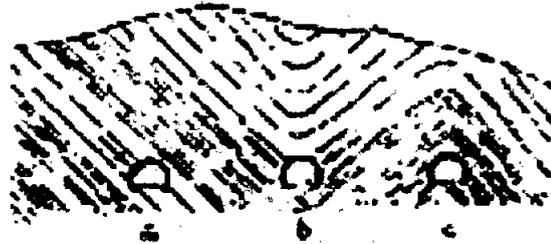


Figura 8.

Diversas posiciones de un túnel con respecto a la entrada de agua a la excavación.

Sin embargo, es necesario tomar en cuenta, que en los anticlinales, los estratos superiores están más doblados y fisurados que los inferiores, por lo que es aconsejable tratar de situar el túnel a una profundidad tal que la fisuración no tenga consecuencias o bien en los flancos de la estructura (ver figura 9).

En cuanto a la tendencia al deslizamiento de bloques al interior de la excavación, los tramos desfavorables son las entradas de los anticlinales y los desfavorables las zonas centrales de los mismos. En sinclinales son a la inversa.

En los túneles cercanos a las laderas escarpadas una estratificación desfavorable puede poner en peligro la estabilidad de un túnel entero (ver figura 10).

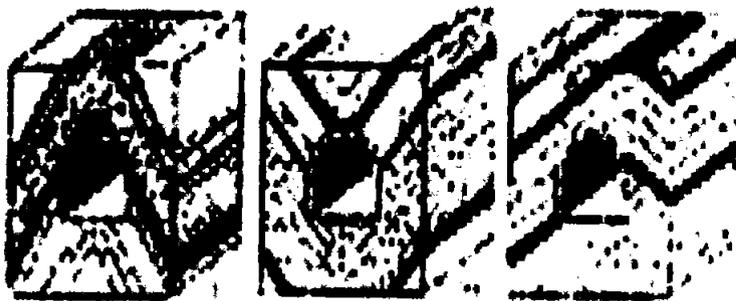


Figura 9.  
Túneles situados en anticlinales y sinclinales.



Figura 10.  
Túneles próximos a laderas escarpadas.

## CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

### III.- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO.

Con frecuencia, es importante en las zonas mineras e industriales que se conozcan los antecedentes del lugar. Se han abandonado con frecuencia las explotaciones mineras sin haber incorporado los detalles a los mapas, pero a veces existen registros en diversos archivos o en las escrituras relativas a la compra del terreno, de donde se podrá determinar o cuando menos sospechar la existencia de pozos abandonados. A menudo se encuentran con que las canteras han sido rellenadas después de haberlas agotado; y es en un lugar como éste donde se encuentra que un túnel que se suponía excavado en roca se halla inesperadamente con un relleno blando. Los pozos constituyen también un riesgo, especialmente en algunas zonas urbanas que están sobre acuíferos confiables. Aun una perforación anterior puede ser causa de problemas si no está adecuadamente sellada, ya que puede proporcionar un paso para el agua o para la salida de aire comprimido, y para esto nos tenemos que apoyar en los estudios preliminares.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, los levantamientos geológicos y los estudios geotécnicos son fundamentales en el proyecto, diseño y construcción. La estratigrafía, petrología y tectónica son importantes, pero los detalles de las estructuras y las variaciones son más necesarios en el caso de los túneles que los amplios estudios geológicos. Los estudios de mecánica de suelos y de rocas se apoyan en la geología básica para lograr los pronósticos del comportamiento mecánico del suelo durante la excavación y su interacción con el ademe temporal y permanente, por lo cual se describirán a las propiedades relevantes de los suelos, y sobre todo, de las rocas, así como los métodos de muestreo en las mismas, para que así con toda la información recabada desde los estudios preliminares, y con la descripción y clasificación del macizo rocoso podamos elegir el proceso constructivo, en túneles, más adecuado.

#### 3.1.- Propiedades de Suelos y Rocas.

La acción de la gravedad en combinación con las fuerzas tectónicas presentes en la corteza terrestre, da lugar a las distribuciones originales de esfuerzos existentes en todo punto del planeta.

Generalmente los esfuerzos verticales en un punto dado son función del peso propio del material superpuesto; mientras que los esfuerzos horizontales, dependen de otros factores entre los que se incluyen la tectónica del lugar, las propiedades del medio y por supuesto el peso propio del material.

La excavación de una oquedad en el subsuelo provoca alteraciones importantes de la distribución original de esfuerzos en el medio, concentrándolos en la vecindad del agujero al tiempo que desconfinan al terreno natural. Si la resistencia del material a pesar del desconfinamiento, es mayor que los nuevos esfuerzos provocados por la redistribución, entonces la oquedad será estable, de lo contrario es necesario reforzarla.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

para permanecer abierta. Por otro lado, la despresurización del agua en el subsuelo atrae flujo hacia la excavación lo cual en si ya es una molestia, que puede agravarse por deterioro en sí del material o bien arrastre del mismo.

Una clasificación empírica presenta básicamente diez categorías para la clasificación del material excavado, ordenadas a la mayor posibilidad de dificultades que pueden surgir al excavar un túnel.

#### 1.- Duro.

En este tipo de material, la frente del túnel puede avanzar sin requerir soporte alguno en la clave o en las paredes.

Rocas sanas, prácticamente sin fracturas suelos calcáreos arcillosos duros, gravas y arenas cementadas pueden caer dentro de esta primer categoría.

#### 2.- Firme.

La frente del túnel puede avanzar sin soporte temporal en la clave, el soporte final puede colocarse antes de que el material empiece a moverse.

Rocas sanas poco fracturadas, loess arriba del nivel freático, arcillas calcáreas de baja plasticidad.

#### 3.- Graneo Lento.

Empiezan a caer del techo y paredes, terrones y hojuelas de material, algún tiempo después, que el material ha sido excavado.

Rocas poco alteradas fracturadas, suelos residuales arenas con cementante arcilloso, arriba del nivel freático.

#### 4.- Graneo Rápido.

El proceso de desprendimiento de terrones y hojuelas se inicia en pocos minutos después que el material ha sido excavado.

Suelos residuales o en arena con cementante de arcilla bajo el nivel freático.

#### 5.- Extrusión Lenta.

El terreno avanza lentamente hacia el túnel, pero existe un notablemente incremento de volumen en el material vecino a la frontera excavada asociada a la presencia de agua.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Rocas alteradas, arcillas blandas o medianamente blandas.

#### 6.- Expansivo.

Aquí también el terreno avanza lentamente hacia el túnel, pero existe un notable incremento de volumen en el material vecino a la frontera excavada asociado a la presencia de agua.

Rocas sedimentarias conteniendo capas de anhidrita, arcillas fuertemente preconsolidadas con índice plástico mayor de 30%.

#### 7.- Corrida Cohesiva.

Después de un breve período de graneo, el material corre colina abajo como si fuese azúcar granulada hasta que el talud se estabiliza en la relación 2:1 aproximadamente (dos horizontal por uno vertical).

Suelos arenosos francos con cierta humedad intergranular.

#### 8.- Corrida.

La remoción del soporte lateral o confinamiento en cualquier superficie con inclinación más escarpada que 2:1, provoca un corrimiento del material similar al ocurrido en un reloj de arena, hasta que se estabiliza en un talud 2:1 o similar.

Esto ocurre en arenas limpias secas, medias a gruesas, arriba del nivel freático.

#### 9.- Extrusión Rápida.

El terreno avanza rápidamente hacia el hueco excavado en forma de flujo plástico donde fragmentos del material conservan su consistencia original.

Arcillas y limos con alto índice de plasticidad.

#### 10.- Fluyente.

El terreno se mueve como un líquido viscoso pudiendo invadir todo el hueco excavado incluyendo paredes y techo del túnel llegando a salir hasta los portales en algunos casos.

Esto ocurre en suelos granulares bajo el nivel freático, con diámetro efectivo mayor de 0.005 mm.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Es interesante observar que los materiales encastillados como duro o firme, soportan claramente las concentraciones de esfuerzo provocadas por la excavación sin menoscabo de su resistencia interna a pesar del desconfinamiento. Es de esperarse que su componente cohesivo (cementación), sea altamente importante.

En los materiales descritos con el calificativo graneado lento o rápido, las concentraciones de esfuerzo pueden mermar de alguna manera la capa resistente del material el cual poco a poco se rompe y traslada su responsabilidad al medio vecino a la vez que extiende el proceso de desconfinamiento.

En algunos materiales, el intemperismo que acompaña a la excavación del túnel puede ser la causa del graneado, que poco a poco degrada al suelo vecino, a la oquedad, desactivándolo de su función de soporte, en proceso progresivo.

Los materiales clasificados como extrusión lenta o rápida, son incapaces de soportar los nuevos esfuerzos impuestos por la oquedad pero en vez de romperse bruscamente y salirse del sistema soportante, se plastifican progresivamente alrededor del hueco, conservando una parte de su responsabilidad, aunque con un notable incremento en las deformaciones.

La rapidez con la que se provoca la plastificación depende del nivel de esfuerzos con relación a la resistencia del material y condiciona el que la extrusión sea lenta o rápida.

En los materiales expansivos, existe una acción directa del agua sobre la estructura interna del material, que al haber perdido su confinamiento aumenta de volumen y pierde algo de su resistencia.

Los suelos de corrida, pierden por completo su resistencia al desconfinarse, cediendo libremente a las fuerzas gravitatorias hasta alcanzar su estabilización.

Finalmente en los suelos fluyentes, la acción desconfinante, sumada al flujo del agua despertado por la excavación, provocan una compleja movilización del suelo afectado que busca su nuevo estado de equilibrio.

#### **3.1.1.- Propiedades Principales de los Suelos.**

La diferencia entre suelo y roca encuentra más indefiniciones en los tratados sobre la especialidad que lo que la lógica de la práctica ingenieril permite establecer.

En forma simplista definiremos como suelo todo material que sea eficientemente excavable con pico y pala.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Los suelos se dividen en dos grupos:

- a) Residuales, procedentes de la intemperización de rocas, en el mismo sitio.
- b) Transportados, formados por la sedimentación progresiva de partículas procedentes de otros suelos o del desgaste de rocas.

En los suelos residuales, se presenta una secuencia ordenada desde la superficie hacia la profundidad, donde los materiales varían desde suelos francos, a roca sana pasando por condiciones intermedias de suelos con fragmentos de roca y roca parcialmente intemperizada.

La profundidad y el tipo de los suelos residuales, dependen de las condiciones climatológicas prevaletientes durante su formación, pudiendo provocarse suelos residuales predominantemente arcillosos en ambientes cálidos, húmedos o granulares en ambientes fríos secos.

Los suelos transportados pueden ser:

- Coluviales.
- Aluviales.
- Eólicos.
- Glaciares.

Según se hayan transportado y depositado al pie de laderas, acarreados por agua, por viento o por glaciares respectivamente.

Una clasificación común de campo podría ser:

- Arena y grava.

Agregados sin cohesión, formados por fragmentos redondeados, subredondeados, subangulares o angulares, procedentes de rocas poco alteradas.

- Tepetate.

Tierra endurecida, con extraordinaria resistencia a la penetración de las herramientas de perforación. También posee gran cohesión entre sus partículas.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

#### □ Limo inorgánico.

También llamado harina de roca, es esencialmente un suelo de grano fino formado por partículas equidimensionales, que se comportan como poco plásticas cuando actúan en conjunto. Cuando las partículas son similares a hojuelas, con dos dimensiones mayores que la tercera, aumenta la plasticidad del conjunto de partículas.

#### □ Arcilla.

Derivada de la descomposición de los minerales de las rocas, provoca los comportamientos más indeseables del subsuelo, haciéndolo potencialmente expansivo si está seco y preconsolidado, o bien compresible si se ha sedimentado en un medio acuático. La permeabilidad en la arcilla es en general baja.

#### □ Turba.

De origen francamente orgánico, tiene componentes fibrosos de origen vegetal y es sumamente inestable y compresible.

#### □ Toba.

Es un agregado de fragmentos minerales o rocas, arrojadas por erupciones volcánicas y depositado por acción del agua o del viento.

#### □ Loess.

Sedimento uniforme y colusivo de origen eólico, su tamaño medio de partículas oscila entre 0.01 y 0.05 mm, y su cohesión es debida a la presencia de carbonato de calcio.

#### □ Margas.

Arcillas calcáreas duras a muy duras.

#### □ Caliche.

Capas de suelo cementado por algún carbonato.

#### □ Arcillas bentoníticas.

Formadas por la alteración química de las cenizas volcánicas.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

De acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos existen:

- Gravas.
- Arenas.
- Limos.
- Arcillas.
- Suelos orgánicos.

Un análisis de las partículas que forman a las gravas y las arenas permite ver si son bien graduadas o uniformes.

Por su parte la determinación de los límites de consistencia en los limos, arcillas y suelos orgánicos permite conocer si son de alta o baja plasticidad.

Generalmente los ensayos de laboratorio que se practican en las muestras inalteradas extraídas del subsuelo buscan conocer:

- Resistencia.
- Compresibilidad.
- Permeabilidad.

Por lo antes mencionado, la resistencia de los suelos resulta de fundamental importancia para anticipar su comportamiento al ser excavados y de ahí seleccionar su proceso constructivo.

También es necesario determinar el efecto del confinamiento en la resistencia del suelo, así como, la resistencia no confinada del mismo. El comportamiento elasto-plástico del material a diferentes niveles de esfuerzos es también fundamental para el análisis del proceso de talleo.

Los efectos del tiempo, agua libre e intemperismo, son aspectos que también deben investigarse en el material por excavar.

La compresibilidad de los materiales puede afectar el comportamiento del medio vecino, si el túnel actúa como dren produciendo consolidación y asentamientos en superficie.

## CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

La permeabilidad del medio permitirá anticipar la cantidad de agua que es necesario manejar desde el interior del túnel (si es que no provoca inestabilidad de lo excavado), o bien extraer previamente mediante un adecuado sistema de abatimiento o expulsarla del área de trabajo mediante aire comprimido.

Por supuesto que el conocimiento individual de las propiedades del suelo debe integrarse al plano estratigráfico del conjunto de materiales que serán afectados por el proceso de tuneo para su mejor interpretación y evaluación de comportamiento.

### 3.1.2.- Propiedades Principales de las Rocas.

Se acostumbra clasificar a las rocas, según su origen en:

#### ► Rocas Ígneas.

Las rocas ígneas se forman del magma existente en el interior de la tierra y son intrusivas cuando se forman a gran profundidad o extrusivas cuando se forman en el exterior de la corteza por derrames volcánicos.

Las rocas ígneas intrusivas, al enfriarse lentamente dan lugar al crecimiento de cristales grandes. Son clásicas de este grupo:

##### □ Granito.

Roca de textura granular, sus componentes más abundantes son el cuarzo y feldespato, conteniendo además la biotita o la hornblenda o ambas de color oscuro; la mayoría de los granitos son de color claro. La granodiorita se distingue del granito por las estrias finas. Levantamientos geológicos muestran que el granito y la granodiorita se encuentran en grandes cantidades en la corteza terrestre.

##### □ Diorita.

Roca granular compuesta de plagioclasas y cantidades menores de minerales ferromagnesianos. De éstos los más comunes son la hornblenda, la biotita y la piroxena. En general las masas de diorita son de menor tamaño que las de granito o de granodiorita.

##### □ Gabro.

Roca granular compuesta principalmente de plagioclasa, piroxena y generalmente de otros minerales ferromagnesianos que predominan sobre la plagioclasa, la roca es de color oscuro. Está distribuido en pequeñas y en grandes masas. Es común en diques y láminas intrusivas delgadas de grano relativamente fino.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Las rocas ígneas extrusivas se enfrían rápidamente provocando que los cristales sean pequeños, y son comunes:

□ Riolita.

Tiene una pasta fundamental afanítica de fenocristales de cuarzo o feldespatos de potasio (ortoclasa). Su color varía ampliamente, es generalmente blanco o amarillo claro, gris o rojo. Su estructura es en forma de capas alineadas, formadas cuando el magma fluía pastoso, antes de solidificarse.

□ Andesita.

Es una roca afanítica y frecuentemente porfírica, que se parece a la dacita pero no contiene cuarzo. La mayoría de las andesitas presentan una estructura bandeada, no tan notable como las riolitas, su color varía del blanco al negro, pero en su mayoría son gris oscuro o gris verdoso. La andesita es abundante en corrientes de lava y en la brecha volcánica.

□ Basalto.

Roca afanítica de color gris a negro, en su mayoría son porfíricos, pero algunos contienen fenocristales de plagioclasa y olivino. Es la lava más abundante en el mundo, esparcida en grandes mesetas que cubren miles de kilómetros cuadrados.

□ Toba volcánica.

Rocas piroclásticas de grano fino compuesta de fragmentos menores de 5 mm de diámetro, en su mayor parte de fenocristales y lava solidificada. Generalmente son rocas poco resistentes, si bien con suficiente consolidación, pueden soportar cualquier cimentación o corte con talud vertical.

□ Brecha volcánica.

Rocas piroclásticas compuesta de fragmentos de lava, las partículas de vidrio y la escoria (tezonite); ésta última puede formar grandes bloques angulares, bombas estriadas de 2 a 5 cm, con forma de lágrima.

□ Obsidiana.

Vidrio natural formado principalmente por magma de composición riolítica, dacítica o andesítica. Es lustrosa y se rompe con superficie conchoidal. La mayoría son negras por contener magnetita y materiales ferromagnesianos, pero puede ser roja o gris por la oxidación del hierro. Se le encuentra a lo largo de las orillas de las intrusiones y raras veces forman pequeñas masas intrusivas.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

### ► Rocas Sedimentarias.

Se forman bajo el agua, en mares y lagos y en depósitos de arena y polvo transportado por el viento. Estos sedimentos tienen cantidades variables de dos componentes:

- 1.- El producto de la erosión transportada al mar por ríos; se compone principalmente de cuarzo, arcilla, mica y fragmentos de roca.
- 2.- Minerales precipitados a partir de soluciones en el agua, primordialmente carbonato de calcio y magnesio, sulfato y óxidos e hidróxidos de hierro y sílice en forma de cuarzo.

Formándose estratos prácticamente horizontales que posteriormente por la acción de fuerzas tectónicas son plegados y deformados dando lugar también a fallas. Este tipo de rocas forma casi el 75 % de la superficie de la tierra. Son típicas en esta clasificación:

#### □ Conglomerado.

Es grava cementada. La grava es un depósito sin consolidar compuesto en su mayoría por fragmentos arrastrados por los ríos, los cuales pueden ser de cualquier roca o mineral y cualquier tamaño. La mayoría de los conglomerados tienen arena y finos que rellenan los espacios entre gravas. Algunos conglomerados de playa han sido lavados conteniendo poca arena.

#### □ Arenisca.

Es arena cementada. La arena se acumula en diferentes medios. Algunas depositadas por los ríos, otras por los vientos formando médanos, otras extendidas por las olas y corrientes a lo largo de playas o aguas poco profundas en la plataforma continental, y otras por las corrientes submarinas hasta el fondo del mar. Hay tres variedades: de cuarzo, arkosa y grauvaca.

#### □ Caliza.

Está compuesta por carbonato de calcio con impurezas como arcilla, limo, materia orgánica, etc. Las de origen orgánico son comunes y se presentan en gran variedad, a causa de las muchas clases de restos de que están formadas. Entre las más comunes están: caliza coralígena, caliza de algas, caliza de foraminíferos, caliza coquina y caliza creta.

### ► Rocas Metamórficas.

Son rocas que han sido afectadas por el calor y la presión, después de haber sido originalmente rocas ígneas o sedimentarias, inclusive las mismas rocas metamórficas.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Cuando solo la presión ha sido el agente metamórfico, el proceso recibe el nombre de metamorfismo dinámico. Este proceso da origen a la roca llamada pizarra.

El metamorfismo térmico se produce por el calentamiento de la roca cercana a una intrusión ígnea que ha penetrado en la roca formada con anterioridad.

El metamorfismo dinamotermal, conocido como metamorfismo regional. Se debe a las altas temperaturas y presiones que actúan sobre la roca madre. Los minerales con frecuencia tienen forma plana o alargada, de tal manera que se acomodan fácilmente para ocupar menos espacio. Las rocas formadas de esta manera se llamarán gneis o esquistos. Son típicas de ésta clasificación:

#### □ Cuarzita.

Roca muy dura constituida principalmente de cuarzos entrelazados, difiere de otras areniscas porque se rompe a través de los granos y no alrededor de ellos. Su color varía desde el blanco hasta el negro, predominando las de color claro. La cuarzita se forma por el metamorfismo de la arenisca de cuarzo. Es una roca ampliamente esparcida.

#### □ Mármol.

Roca granoblástica de grano fino o grueso, compuesta principalmente de calcita o dolomita, o de ambas. Varios mármoles presentan alteración bandeada de porciones claras y oscuras. El mármol está formado por el metamorfismo de la caliza y dolomita comúnmente contiene silicatos magnésiferos, como piroxena, serpentina y anfíbola.

#### □ Gneis.

Roca de grano grueso de textura gneística, con leques o capas distintas de diferentes materiales, es de composición mineral variable, el feldespato es especialmente abundante, siendo comunes el cuarzo, la anfíbola, el granate y la mica. Es una de las rocas metamórficas más abundantes. Puede derivarse de rocas como el granito, granodiorita, lutita, etc.

En general las propiedades intrínsecas de la roca tales como su resistencia al corte o permeabilidad tienen menor importancia que las propiedades del conjunto. A este respecto, el grado e intensidad del fracturamiento, así como, la orientación de los sistemas de fracturas son notablemente más importantes en el comportamiento del futuro túnel.

De igual manera, la permeabilidad del macizo rocoso, a través de fracturas, fallas, huecos de disolución, etc. Influyen de una manera decisiva sobre la obra subterránea, más que la permeabilidad individual de la roca.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Las fallas existentes, su actividad relativa y el material que contienen son fundamentales para el estudio del proceso de tajeo.

Una forma empírica de tomar en cuenta el grado de fracturamiento de la roca es a través del registro pesado del porcentaje de recuperación del muestreo, RQD (del cual hablaremos detalladamente más adelante).

No obstante lo anterior, cuando la roca está fuertemente metamorfoseada por presión, la resistencia al corte del material dependerá de la orientación de los esfuerzos, debiendo en estos casos conocerse con detalle la relación entre la resistencia y orientación del plano de corte.

Los planos de estratificación de las rocas sedimentarias constituyen en sí zonas débiles que deben conocerse con mucho detalle para seleccionar la forma de la selección transversal del túnel y si conviene reforzar con sistemas de anclaje los estratos de roca para evitar su caída al tajeo.

Los contactos entre las diferentes formaciones rocosas constituyen también puntos singulares de inestabilidad que deben detectarse con suficiente precisión para definir su particular solución estabilizadora.

Al obtener el conjunto de datos del macizo rocoso, procedentes de pruebas realizadas en su mayor parte en el campo, se debe integrar el plano geológico base, que incluya existencia de fallas, contactos entre formaciones y permeabilidades del sistema de fracturas. Así mismo debe mostrar la ubicación de diques, lacolitos, mantos, etc., procedentes de las rocas intrusivas y las orientaciones de los sistemas de fracturas derivados de su enfriamiento.

Si las rocas son sedimentarias y han sufrido plegamientos intensos, éstos deben conocerse con la mayor fidelidad.

En resumen, cuando los túneles se construyen en rocas, es importante conocer el mayor detalle posible del macizo rocoso y no solo las propiedades individuales de los fragmentos de roca.

#### **3.2.- Clasificación del Macizo Rcoso.**

En el estado actual de conocimientos, la tecnología de túneles puede resumirse en las palabras siguientes:

"La predicción del sistema de soporte requerido para túneles, se ha basado por muchos años en la observación, la experiencia y el juicio personal de aquellos involucrados en la construcción de túneles. A pesar de la aún poco probable introducción de técnicas geomecánicas para la exploración de sitios, la predicción de los

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

requerimientos de soporte en el futuro requerirá del mismo enfoque" (Wickham, Tiedemann y Skinner.).

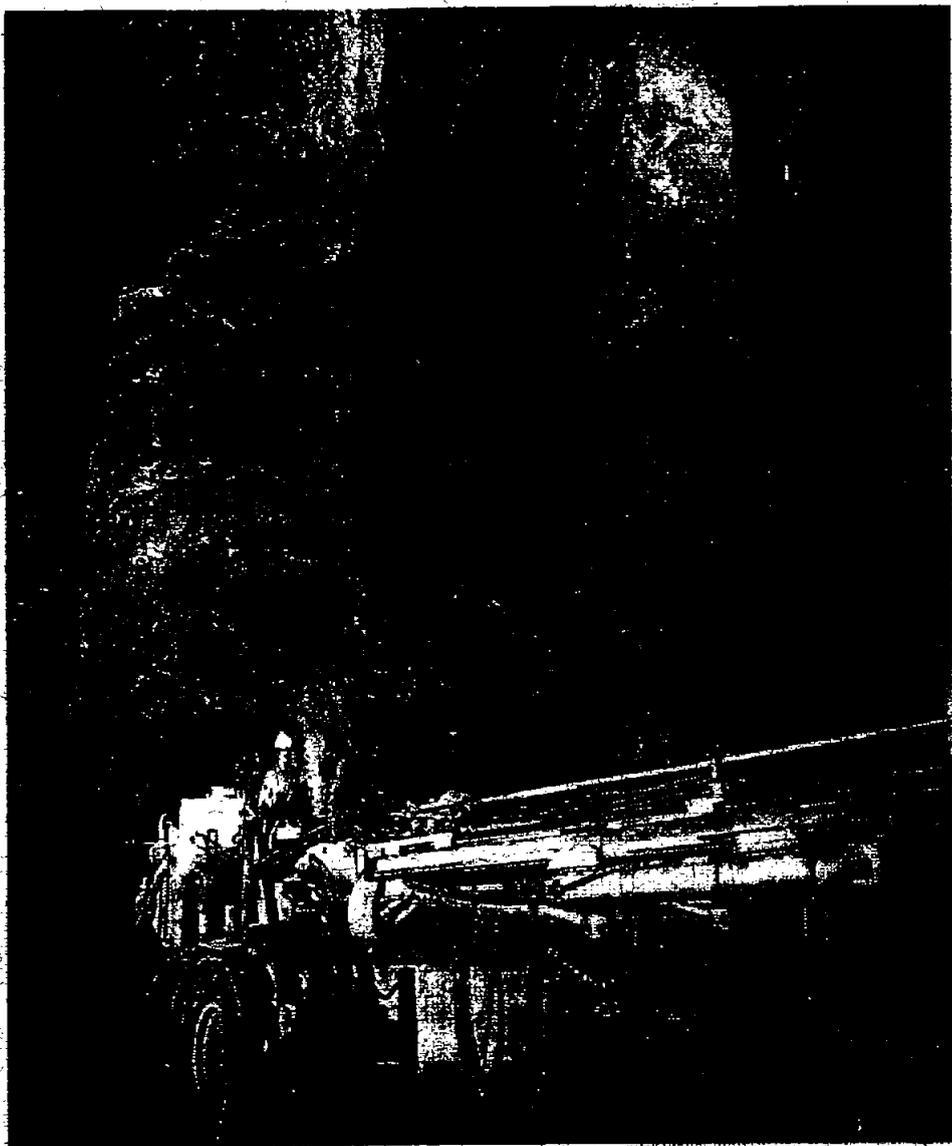
Por lo tanto, un sistema de clasificación de macizos rocosos, que permita combinar los hechos observados, la experiencia y el criterio ingenieril, para proveer una valoración cuantitativa de las condiciones de la roca, se constituirá en la espina dorsal para la predicción del sistema de soporte.

Los propósitos de un sistema de clasificación de rocas son:

- Dividir el macizo rocoso en grupos de comportamiento similar.
- Proporcionar las bases para la comprensión de las características de cada grupo.
- Facilitar la planeación y el diseño de las excavaciones en roca, suministrando la información cuantitativa que se requiere para la solución de los problemas ingenieriles.
- Establecer una base común para la comunicación efectiva entre todas las personas involucradas en el proyecto y construcción de un túnel.

Los propósitos atrás descritos podrán alcanzarse si el sistema de clasificación posee los siguientes atributos:

- Simple, fácil de recordar y entender.
- Claro en cada uno de sus términos, con una terminología ampliamente aceptada.
- Que incluya únicamente las propiedades de los macizos rocosos más significativas.
- Basado en parámetros que se puedan medir, que puedan ser determinados mediante pruebas apropiadas, rápida y económicamente en el campo.
- Basado en un sistema de calificación que pueda pesar la importancia relativa de los parámetros de clasificación.
- Que sea funcional mediante el suministro de información cuantitativa para el diseño de soporte del túnel.



**Figura 11.**  
**Ejemplo de un Macizo Rocoso.**

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- Que sea lo suficientemente general como para que un macizo rocoso posea la misma clasificación, independientemente de que vaya a ser usada para un túnel, un talud o una cimentación.

Los sistemas de clasificación de rocas más conocidos son:

- Terzaghi (1946).
- Lauffer (1958).
- Deere (1964).
- Wickham, Tiedemann y Skinner (1972).
- Bieniawski (1973).
- Barton, Lien y Lunde (1974).

El sistema de "Carga de Roca", propuesto por Terzaghi ha probado ser muy útil en la construcción de túneles con marcos de acero.

El sistema de clasificación de Lauffer representó un gran adelanto en el arte del túneleo, al introducir el concepto de tiempo de sustentación para el claro activo en un túnel, concepto fundamental para determinar el tipo y densidad de soporte requerido.

Deere introdujo el concepto Índice de Calidad de la Roca (RQD), que es un método simple y práctico para describir la calidad de los corazones de roca obtenidos de perforaciones.

Wickham, et. al. fue primero en proporcionar un método de calificación para dar peso relativo a los diversos parámetros de clasificación.

La Clasificación Geomecánica, propuesta por Bieniawski y el Sistema Q, propuesto por Barton, Lien y Lunde, proporcionan información cuantitativa para seleccionar sistemas de soporte modernos, tales como concreto lanzado y anclas.

El sistema Q, fue desarrollado para túneles, al igual que la Clasificación Geomecánica, aunque esta última ha sido aplicada a taludes de roca y cimentaciones, a la determinación de la arabilidad de los terrenos y a problemas de minas.

Los sistemas de clasificación descritos dan lineamientos para la selección del soporte primario (o soporte temporal). Este siempre se coloca muy próximo al frente de avance y generalmente lo componen anclas, concreto lanzado y marcos de acero.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

La función del soporte primario es mantener abierta la excavación hasta que pueda colocarse el soporte definitivo, generalmente integrado por un recubrimiento grueso de concreto hidráulico.

Debe recordarse que probablemente el soporte primario sea capaz de resistir todas las acciones actuantes en el túnel y, puesto que los materiales con los que actualmente se construye no se deterioran, para túneles carreteros y ferroviarios un revestimiento de concreto puede no servir más que como cosmético, para satisfacer la necesidad psicológica de seguridad de los usuarios.

#### ➤ Método de la carga de roca de Terzaghi.

El mérito de Terzaghi estriba en haber propuesto, un método de estimación de cargas en túneles soportados por marcos de acero; el método más usado durante los últimos años; sin embargo, este método ya no es tan adecuado para sistemas modernos de soporte, como anclas y concreto lanzado.

También, se considera actualmente que el método de Terzaghi es demasiado general como para permitir una evaluación objetiva de la calidad de la roca y que no provee información cuantitativa acerca de las propiedades de las masas rocosas.

#### ➤ Clasificación de Lauffer.

La clasificación propuesta por Lauffer en 1958 está basada en un trabajo de Stini referente a la geología de túneles (Stini, 1950). A Stini se le reconoce como el padre de la Escuela Austriaca de Tuneleo y Mecánica de Rocas.

Stini enfatizó la importancia de las discontinuidades en los macizos rocosos y propuso que el tiempo de sustentación para cualquier claro libre activo, en relación de las diversas categorías de los macizos de roca.

El claro libre activo es el ancho del túnel o la distancia entre el frente y el ademe, si éste es menor. El tiempo de sustentación es el lapso durante el cual un túnel se sostendrá sin ademe a partir del momento de la excavación.

Varios factores afectan al tiempo de sustentación, siendo los principales:

- Orientación del eje del túnel respecto a la estratificación o a la dirección de la familia principal de discontinuidades.
- Geometría de la Sección Transversal.
- Método de Excavación.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

#### □ Método de Soporte.

Este sistema de clasificación ya no se utiliza, pues ha sido modificado por varios ingenieros austriacos, como Rabcewicz, Gosler y Pacher (Pacher, Rabcewicz y Gosler, 1974).

#### ► Índice de calidad de la roca (RQD), de Deere.

Una de las desventajas serias de los dos métodos mencionados anteriormente es la dificultad para clasificar un cierto macizo rocoso, así como la sensibilidad de los resultados obtenidos, respecto a dicha clasificación.

□ No toma en cuenta la abertura de las discontinuidades.

□ No considera la geometría y rugosidad de las discontinuidades.

Por lo anterior, no se considera que el RQD sea suficiente por sí mismo para describir un macizo rocoso, el cual se explicará a detalle más adelante.

#### ► Calificación de la estructura rocosa (RSR Rock Structure Rating).

Fue desarrollada por Wickham, Tiedemann y Skinner. Es un método cuantitativo para calificar un macizo rocoso y para seleccionar el sistema de soporte.

Los avances que introdujo:

□ Método cuantitativo y no cualitativo, como el de Terzaghi.

□ Sistema de calificación de macizos, basado en varios parámetros, no en uno sólo, como el del RQD.

□ Sistema completo con información de entrada y de salida, no del tipo del sistema de Lauffer, que se apoya en la experiencia personal para seleccionar el tipo de roca y únicamente define el claro libre activo y el tiempo de sustentación.

Características del sistema:

Considera dos grandes grupos de factores relevantes:

Factores Geológicos:

- Tipo de roca.
- Patrón de discontinuidades.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- Orientación de discontinuidades.
- Tipo de discontinuidades.
- Fallas mayores, planos de cortante y pliegues.
- Propiedades de la roca intacta.
- Intemperismo o alteración.

#### Factores Constructivos:

- Tamaño del túnel.
- Dirección de excavación.
- Método de excavación.

Todos estos factores se agrupan en tres parámetros:

#### ✓ Parámetro A.

Apreciación general de la estructura del macizo; se basa en:

- Tipo de roca según su origen.
  - Ígnea.
  - Metamórfica.
  - Sedimentaria.
- Dureza de la roca.
  - Dura.
  - Mediana.
  - Blanda.
  - Alterada.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

### Estructura geológica

- Masiva.
- Ligeramente fallada o plegada.
- Moderadamente fallada o plegada.
- Intensamente fallada o plegada.

### ✓ Parámetro B.

Efecto del patrón de discontinuidades con respecto a la dirección de excavación del túnel, basado en:

- Espaciamiento de discontinuidades.
- Orientación de discontinuidades (Rumbo y echado).
- Sentido de excavación del túnel.

### ✓ Parámetro C.

Efecto del flujo de agua hacia el túnel, basado en:

- Calidad global del macizo rocoso, expresada por la combinación de los parámetros A y B.
- Características de las discontinuidades.
  - Buenas.
  - Regulares.
  - Malas.
- Gasto de infiltración esperada. En galones, por minuto, por pie de túnel.

El valor RSR se obtiene para cualquier sección de túnel, como la suma de los valores numéricos de los parámetros A, B y C.

$$RSR = A + B + C$$

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

El RSR representa la calidad del macizo rocoso en relación con sus requerimientos de soporte, independientemente del tamaño del túnel.

Para poder correlacionar los valores de RSR con los sistemas de soporte instalados, para posteriormente poder, sobre la base de aquél, predecir éste, se introdujo el concepto de Relación de Soporte (RR).

Puesto que la información disponible se refería en un 90 % a túneles soportados por marcos de acero, se seleccionó el RR como el porcentaje del soporte teórico (tamaño de marcos y su espaciamiento), que requeriría para un túnel geoméricamente igual, pero excavado en arena suelta.

### ➤ La clasificación geomecánica o RMR (Rock Mass Rating).

Fue desarrollada especialmente para la ingeniería de rocas, y utiliza 6 parámetros:

1. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
2. RQD.
3. Espaciamiento de discontinuidades.
4. Orientación de discontinuidades.
5. Características de discontinuidades.
6. Condiciones hidráulicas.

Este tipo de clasificación se explicará más a detalle en el apartado 3.6 del presente trabajo.

### ➤ Sistema Q (Barton, Lien, Lunde).

Fue desarrollado en el Instituto Noruego de Geotécnica y representa una contribución significativa por las razones siguientes:

- a) Se basa en el análisis de alrededor de 200 túneles en Escandinavia.
- b) Es un sistema cuantitativo.
- c) Es un sistema ingenieril que permite el diseño de soportes de túneles.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Utiliza seis parámetros independientes que son:

- RQD.
- Número de familias de diaclasas (Jn).
- Rugosidad de la familia de diaclasas más desfavorable (Jr).
- Grado de alteración o relleno de las diaclasas más desfavorables (Ja).
- Flujo de agua hacia el túnel (Jw).
- Estado de esfuerzos existente en la vecindad del túnel (Stress Reduction Number SRN).

No toma en cuenta la orientación de las discontinuidades y para la selección del soporte sólo considera anclas y concreto lanzado.

### 3.3.- Índice de Calidad de la Roca (RQD).

Las especificaciones para la determinación del valor de RQD en la obra, resultan necesarios la obtención de información para zonificar las formaciones en el interior del túnel durante sus avances, con el fin de tener un reconocimiento de los tramos que pueden presentar problemas de estabilidad, debido a la calidad de la roca. A fin de recabar esta información se puede considerar el túnel, como un enorme sondeo exploratorio que nos muestra claramente las características del maciza rocoso en cada etapa de excavación, con la cual se pueden tomar las medidas necesarias.

El índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation RQD), se basa en la recuperación modificada de testigos, la cual depende indirectamente en el número de fracturas y en el grado de debilitamiento o alteración del macizo rocoso.

El valor de RQD, se define como la relación entre la suma de las longitudes de aquellos tramos de testigos de longitudes mayor, o igual a 10 cm en estado sano y compacto (despreciando las fracturas provocados por el muestreo mismo), y la longitud total del testigo, así podemos llegar a la expresión:

RQD en porcentaje es igual a la suma de tramos mayores de 10 cm de un testigo entre la longitud total del testigo en m.

Existe una correlación entre los valores de RQD y la calidad general del macizo rocoso, pudiéndose de esta forma zonificar el túnel de acuerdo a los índices de calidad de la roca de las formaciones que atraviesa.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Esta correlación se presenta en la Tabla 3.

El método de obtención del RQD, en el interior del Túnel, según explicamos el RQD, se determina a partir de la obtención de testigos de la roca en sondeos exploratorios, considerando al túnel como un enorme sondeo, de donde no se obtienen testigos pero presentan las formaciones de roca conforme avanza su excavación. Será necesaria establecer criterios para la obtención del RQD en estas condiciones.

Tabla 3.

RELACIÓN ENTRE EL RQD Y LA CALIDAD DE LA ROCA.	
Índice de calidad (RQD %)	Calidad
0 - 25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Después de haber sido clasificada la formación en el frente o en una de las paredes del túnel, se definen los sistemas o familias de planos de fracturamiento considerando como sistema principal al que posea la menor separación entre juntas.

A lo largo de una línea recta normal a los planos que forman el sistema de fracturamiento principal, se mide una longitud  $L$ , en metros y a lo largo de esta línea se miden en cm las separaciones entre los planos mayores o iguales a 10 cm de longitud, los cuales se suman obteniendo la sumatoria del denominador de la ecuación correspondiente a la determinación del RQD %.

Obteniendo el valor de RQD en el frente de la excavación y en ambas paredes del túnel es posible determinar el valor promedio del índice de calidad de la roca y de esta manera haciendo uso de la Tabla 3 se puede considerar la calidad de la roca en determinado avance del túnel, y a su vez, saber que tipo de ademe será utilizado temporalmente para mantener las paredes de la excavación.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

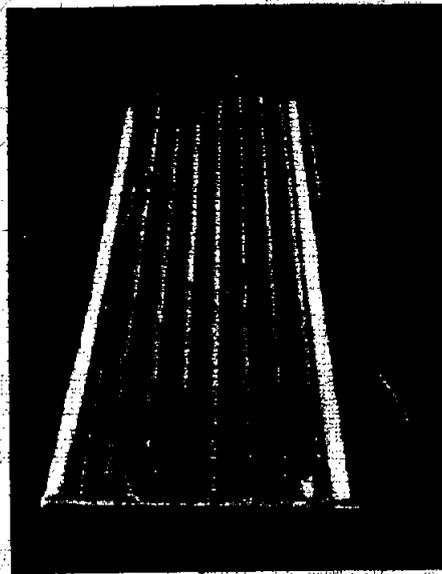


Figura 12.  
Excelente calidad de roca con muy pequeñas discontinuidades  
de un macizo de el río Grande en Argentina.

Ejemplo:

En la Figura 13 se muestra un ejemplo correspondiente a un sondeo de 150 cm la línea A-B cuya longitud es de 2 m es normal al trazo del sistema principal y las separaciones entre los planos de fracturamiento que componen este sistema y son: 6, 40, 90, 46, 8 y 10 cm, aplicando la expresión, se obtiene el valor del RQD:

$$RQD\% = \frac{40 + 90 + 46 + 10}{2} = \frac{186}{2} = 93\%$$

En este caso la recuperación total de testigo recuperado es del 85% con la modificación, se tienen en cuenta sólo 87 cm, por lo que el RQD resulta del 58% (ver figura 14). Puede afirmarse que el RQD, es en general un índice más sensible y más consistente de la calidad de una roca que el porcentaje de recuperación.

Si existe la seguridad de que el testigo se ha roto durante su manejo o bien por el proceso de perforación (se aprecian superficies de fracturas recientes y regulares en el lugar de las diaclasas naturales), es válido unir los trozos partidos y considerarlos como pieza única, siempre que alcancen la longitud mínima requerida de 10 cm.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Es necesario aplicar un cierto criterio en el caso de las rocas sedimentarias o de las rocas metamórficas estratificadas; en estos casos el método no es tan confiable como en el caso de las rocas ígneas, de las calizas con estratificación gruesa y de las areniscas.

Existe el método indirecto (Palmström 1974), y este método de obtención del índice de calidad de la roca (RQD), está basado en el número total de platos de fracturamiento o de juntas por unidad de volumen de la masa de la roca ( $J_v$ ). Se ha observado que por medio de una relación es posible convertir  $J_v$  a RQD, siempre y cuando la masa se encuentre libre de arcilla.

$$RQD\% = 115 - 3.3J_v$$

Considerando  $RQD = 100\%$  cuando  $J_v = 4.5$ .

En donde:

$J_v$  = Número total de juntas /  $m^3$ .

Las limitaciones que presenta son:

- El valor de RQD obtenido según los métodos anteriores puede estar afectado por el fracturamiento provocado en la periferia del túnel por los explosivos.
- El índice de calidad de la roca RQD, no es suficiente para describir completamente una formación, y por lo tanto calificar cualitativamente su comportamiento, por lo cual es necesario el empleo de un criterio complementario para descubrir en forma más adecuada la formación en cuestión.

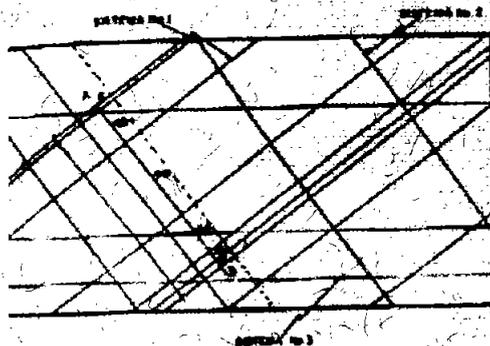


Figura 13.

Ejemplo de un sondeo.

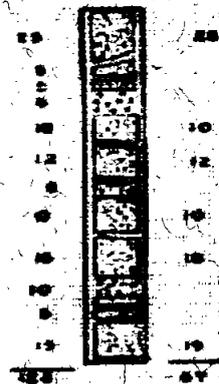


Figura 14.  
Resultado de RQD.

### 3.4.- La Forma de Describir el Macizo Rocoso.

Es posible entender ¿qué es un macizo rocoso?, y se debe considerar que él está involucrado en la distribución de los distintos tipos de litología, las propiedades de las discontinuidades y las condiciones de meteorización y alteración de los diferentes tipos de roca que forman la masa rocosa. De lo anterior, se puede establecer que la unidad litológica o en ocasiones la formación o formaciones geológicas representan en sí el macizo rocoso. Este apartado, está basado en los métodos elaborados por el Comité para la normalización de pruebas de campo y Laboratorio de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.

El primer término que el mismo Comité sugiere es el de "discontinuidad", es decir, el que da lugar a las características generales de los planos de debilidad de la masa rocosa, en los cuales la resistencia a la tensión y al esfuerzo cortante es baja e incluso nula. Dentro de estos planos de debilidad o discontinuidades (estructuras geológicas), quedan comprendidos los planos de estratificación, juntas, fallas, fracturas, contactos litológicos, discordancias, esquistocidad, etc. Por lo tanto se deduce que el comportamiento mecánico de un macizo rocoso está en función principalmente de las discontinuidades que contiene.

## CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Tabla 4.

### ÍNDICE DEL MACIZO DE ROCA

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
<p><b>1. Discontinuidades.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo.</li> <li>• Número de familias de discontinuidad.</li> <li>• Orientación preferencial.</li> <li>• Espaciamiento.</li> <li>• Persistencia (continuidad).</li> <li>• Rugosidad.</li> <li>• Resistencia de las paredes.</li> <li>• Abertura.</li> <li>• Relleno.</li> <li>• Filtraciones.</li> <li>• Tamaño de bloques.</li> </ul>	<p><b>3. Permeabilidad.</b></p> <p><b>4. Velocidad Sísmica.</b></p> <p><b>5. Resistencia al corte.</b></p>	<p><b>6. Módulo de deformabilidad.</b></p> <p><b>7. Permeabilidad (secundaria).</b></p> <p><b>8. Velocidad sísmica.</b></p> <p><b>9. Resistencia al corte.</b></p>
<p><b>2. Estado de meteorización y alteración.</b></p>		

Los índices del grupo 1 corresponden a propiedades que son de tipo descriptivo a semi-cuantitativo; los del grupo 2 consisten de índices que pueden determinarse mediante ensayos de clasificaciones relativamente sencillas, y los del grupo 3, corresponden a índices para el proyecto, normalmente solo determinables mediante ensayos complejos.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

A continuación se presenta en forma resumida en primer lugar la Descripción Geotécnica Básica de Macizos Rocosos, y posteriormente realizar una descripción de cada una de los parámetros que intervienen, en el grupo 1, así como su utilidad, y el procedimiento de obtención y en ocasiones la presentación de resultados.

#### 3.4.1.- Estado de Meteorización y Alteración.

##### Meteorización.

El intemperismo es conocido también como meteorización y se entiende como un conjunto de modificaciones causadas a las rocas por los agentes atmosféricos. Este tipo de modificación generalmente disminuye las propiedades mecánicas de la roca como puede ser la resistencia al esfuerzo cortante. Los efectos se pueden clasificar en desintegración mecánica y descomposición química.

Cabe considerar que durante un muestreo se deberá identificar las zonas de deterioro por intemperismo y dirigir el muestreo no sólo en roca sana, sino también en la intemperizada ya que generalmente el macizo rocoso falla en estas zonas. Estudiando la roca sana como la intemperizada se podrá tener un criterio de comparación entre ambos materiales del macizo rocoso.

Es común suponer que la meteorización afecta la parte superficial del terreno; sin embargo, en ocasiones el agua y oxígeno atmosférico penetran a través de las discontinuidades y alteran las rocas a profundidad. Las primeras etapas de la meteorización química producen la decoloración de la roca matriz. Para la descripción del estado de intemperismo, se sugiere la Tabla 5.

##### Alteración.

Es necesario considerar que así como el intemperismo produce el deterioro de las rocas, esta también puede ser ocasionada por procesos en los que no intervienen los agentes atmosféricos.

Esta alteración puede producir cambios en la composición química o mineralógica de una roca, ocasionada por la acción de los fluidos hidrotermales, disminuyendo o aumentando su resistencia. Algunas de estas alteraciones son por argilitización, propilitización, sericitización y silicificación.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Tabla 5.

Alteración por Meteorización o Intemperismo (ISRM; 1981).

Grado.	Término.	Descripción.
I	Fresca.	No hay señas visibles de meteorización en la esencia de la roca, ligera decoloración siendo mayor en las superficies de las discontinuidades.
II	Ligeramente meteorizada.	Decoloración en la esencia de la roca y en las superficies de discontinuidad. La roca puede estar algo debilitada externamente.
III	Meteorización moderada.	Menos de la mitad de la roca está alterada o desintegrada a suelo. Roca fresca o decolorada puede estar presente como estructura o núcleo continuo.
IV	Altamente Meteorizada.	Más de la mitad de la esencia de la roca está alterada y/o desintegrada a suelo. Roca decolorada o fresca sólo está presente como núcleo discontinuo.
V	Meteorización completa.	Toda la roca está alterada y/o desintegrada a suelo; sin embargo, la estructura de la masa original aún se conserva.
VI	Suelo.	Toda la roca está convertida en suelo. La estructura de la masa y su arreglo (fábrica), están destruidas. Tiene un gran cambio de volumen pero el suelo no ha sido significativamente transportado.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

### **3.5.- Descripción Geotécnica Básica de Macizos Rocosos.**

La descripción geotécnica básica, fue surgida por la ISRM en 1960 que intenta reunir los requerimientos siguientes:

- a) Proporcionar un lenguaje que le facilite al observador transmitir su impresión general del macizo rocoso particularmente considerando prever el comportamiento mecánico.
- b) Obtener en lo posible datos cuantitativos.
- c) Utilizar mediciones simples en vez de solo observaciones.

Las características esenciales del comportamiento del macizo rocoso que deben tomarse son las siguientes:

- El nombre de la roca, con una descripción geológica simplificada.
- Dos características estructurales del macizo rocoso; es decir, espesor de las capas de fracturas.
- Dos características mecánicas; la resistencia a la compresión simple de la roca intacta y el ángulo de fricción de las fracturas.

Cuando se aplica la Descripción Geotécnica Básica se debe dividir el macizo rocoso en zonas que son unidades geotécnicas, cuyas características pueden ser consideradas uniformes con respecto a los requerimientos del proyecto; sin embargo, las características relevantes pueden desplegar una variación considerable dentro de la unidad geotécnica.

Una zona puede incluir volúmenes de macizos rocosos no continuos, tales como inter estratificaciones de capas sedimentarias o formaciones volcánicas con las mismas características geotécnicas. Un zoneamiento preliminar puede basarse en los datos geológicos generales; diferenciación litológica, grado de alteración, características de fracturas, etc.

La terminología para definir las características esenciales se describe brevemente a continuación:

#### ➤ Nombre de la Roca:

Deben estar de acuerdo a la clasificación genética y deberán considerarse los aspectos siguientes:

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- Estructura geológica del macizo rocoso (pliegues, fallas etc.).
- Fracturamiento del macizo rocoso (sistema de fracturas y sus características).
- Color, textura y composición mineral de la roca intacta.
- Grado de alteración o meteorización.

➤ **Espesor de las Capas:**

En una zona donde un macizo rocoso esta formado por capas, el espesor de las capas es el valor medio de la zona considerada. El término capa se utiliza aquí en su sentido más amplio y, puede ser aplicado a formaciones ígneas, sedimentarias o metamórficas.

El espesor de las capas, en una zona se indica con cinco intervalos de L1 a L5 (ver Tabla 6), a las zonas que no tienen capas se les asigna el símbolo LO.

Si solo se muestran tres intervalos, se utilizan los símbolos L1, L2, L3, L4, L5 con su descripción correspondiente de la Tabla 6.

Tabla 6.

ESPESOR DE LAS CAPAS.		
Intervalos, (cm).	Símbolos, BGD.	Términos Descriptivos.
Mayor a 200	L 1	Muy Grande
	L-1, 2	Grande
60 - 200	L 2	Grande
20 - 60	L 3	Moderado / Moderado
6 - 20	L 4	Pequeño
	L 4, 5	Pequeño
Menor a 6	L 5	Muy Pequeño

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

### ➤ Intercepción de Fracturas:

Se define como la distancia media entre fracturas sucesivas medidas a lo largo de una línea recta. Cuando la intercepción de fractura cambia de dirección, el valor adoptado en las descripciones será correspondiente al de la dirección a lo largo de la cual se intercepte el valor medio más pequeño.

Los intervalos están representados por símbolos F1 a F5 y/o usando un sistema simplificado de tres clases: F1, F2, F3 F4, F5; en el caso de que no existan fracturas se describe por el símbolo FO Tabla 7.

Tabla 7.

INTERCEPCIÓN DE FRACTURAS.		
Mayor a 200	F 1	Muy Amplio
	F 1, F 2	Amplio
60 - 200	F 2	Amplio
20 - 60	F 3	Moderado / Moderado
6 - 20	F 4	Cerrado
	F 4, F 5	Cerrado
Menor a 6	F 5	Muy Cerrado

ISRM (1980).

### ➤ Resistencia a la Compresión Simple:

Se refiere al valor medio de la resistencia de muestra de roca, tomadas en puntos de las zonas fuera de fracturas y otras discontinuidades, donde la roca puede estar más alterada.

Cuando la roca intacta es marcada anisotrópica en su resistencia, el valor considerado para la descripción deberá corresponder a la dirección, a lo largo de la cual el valor medio de la resistencia sea el más pequeño. Sin embargo, en tales casos es importante anotar la resistencia a la compresión simple en otras direcciones.

### ➤ Ángulo de Fricción de Fracturas:

Está definido como la pendiente de la tangente en el punto de la envolvente donde el esfuerzo normal es de un Mega Pascal. Esta es una definición arbitraria solo para propósito de clasificación, de manera que el valor no tiene por que ser, igual al que se use en el diseño del proyecto.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

La obtención del ángulo puede resultar de las pruebas de laboratorio o de una estimación auxiliada de las observaciones de campo, tales como la rugosidad de las superficies de las fracturas, la naturaleza y espesor de los materiales de relleno, etc. el valor del ángulo de fricción de fractura en una zona es el valor medio de los resultados obtenidos en la Tabla 8.

Cuando ocurran sistemas de fractura que difieren en su resistencia al esfuerzo cortante, el ángulo de fricción adoptado corresponderá al sistema que presenta el valor medio más pequeño, a menos que se garanticen otras circunstancias específicas.

Tabla 8.

ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS FRACTURAS		
Intervalos, (grados).	Símbolos, (DGB).	Términos Descriptivos.
Mayor a 45	A 1	Muy Alto
	A 1, A 2	Alto
35 - 45	A 2	Alto
25 - 35	A 3	Moderado
15 - 25	A 4	Bajo
	A 4, A 5	Bajo
Menor 15	A 5	Muy Bajo

ISRM (1980).

#### ► Discontinuidades:

Las discontinuidades son estructuras geológicas que pueden tener una variedad de orígenes y formas. Sin embargo, tienden a agruparse en dos tipos básicos: las que se presentan individualmente en el macizo rocoso; como por ejemplo una falla, o las que forman paquetes o familias que afectan al macizo rocoso de una forma, como en el caso de los estratos, las juntas que están íntimamente relacionadas con el origen y evolución del macizo rocoso.

Teniendo en cuenta estas discontinuidades, su número, sus características de forma, grado de alteración de la roca y relleno de la discontinuidad, presencia o ausencia de agua en la discontinuidad misma, zonas de debilidad o presencia de esfuerzos, el profesor Barton en 1974 estableció lo que llamó calidad de macizo rocoso, y que lo designó como Q, haciendo intervenir distintos parámetros.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SFR} \right)$$

El conocimiento detallado de las discontinuidades o accidentes estructurales es lo que permitirá precisar en gran parte, cual será la sobre excavación el comportamiento del macizo rocoso a fin de seleccionar el soporte y anclaje adecuados.

La presencia de fracturas o diaclasas, cualquiera que sea su origen y roca que afecte, puede causar serios problemas de estabilidad, ya que comúnmente se presentan asociadas en uno o varios sistemas con diversas direcciones e inclinaciones, los cuales definen bloques inestables.

En el caso de rocas estratificadas horizontales, el fracturamiento es importante, ya que si el espesor de la capa es grande y tiene pocas fracturas el estrato actúa como viga proporcionando estabilidad (ver figura 15).

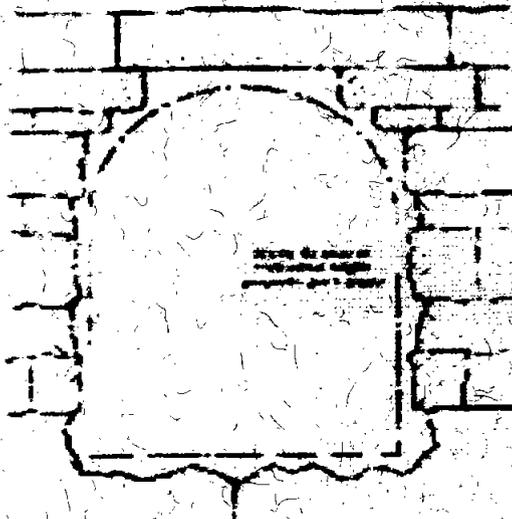


Figura 15.

Las rocas estratificadas horizontales cuando son de espesor grande son estables.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Sin embargo, las rocas con estratos delgados y fracturas tienden a dejar una zona inestable en el techo de aproximadamente 0.5 el ancho del túnel (ver figura 16).

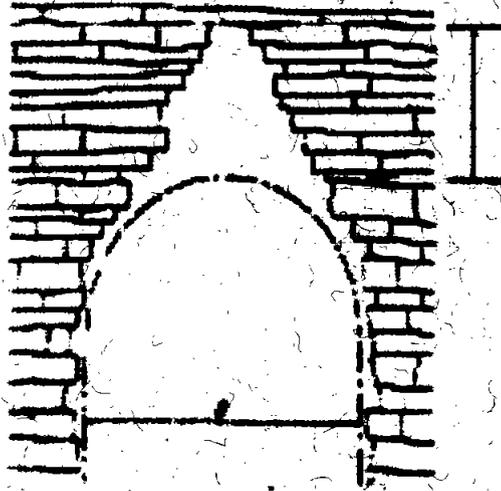


Figura 16.

Las rocas con estratificación delgada y en posición horizontal o inclinada, que estén afectadas por fracturas dan lugar a desprendimientos en el techo.

La presencia de fallas puede ocasionar múltiples problemas durante la construcción.

- Las fallas deben detectarse perfectamente; conocer su posición respecto al túnel y dónde están los bloques desplazados para planear el sentido de ataque y la forma de estabilizar las paredes.
- Es importante determinar si la falla es inactiva o activa, ya que si este es el caso, poco podrá hacerse para proteger la construcción; ya que el túnel estaría sometido, repentinamente, a fuertes esfuerzos cortantes, que inclusive podrían ocasionar corrimientos.
- Si por necesidades de proyecto hay que atravesar una falla, es conveniente hacerlo, lo más perpendicular que sea posible, para así acortar la zona de problemas. Si es necesario seguir el trazo del túnel paralelo a la falla, también es recomendable que se aleje lo más posible de ellas.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- Las fallas grandes están asociadas, por lo general, con fallas menores y con fracturas. La zona de dislocación puede ser de muchos metros. Los problemas tienden a incrementarse con el ancho de la zona de falla.
- En ocasiones, las zonas de falla están formadas por materiales alterados en el túnel y que puede confundirse con arena. Si el relleno está formado por materiales expansivos, se producirán presiones sobre los revestimientos.

### 3.6.- Clasificación Geomecánica.

Dada la gran cantidad de parámetros que caracterizan el comportamiento de una masa rocosa frente a una obra de ingeniería civil, es muy difícil establecer unos modelos con la precisión deseada y dimensionar el sostenimiento de las estructuras excavadas en roca. Por ello en los últimos años, se realizan pruebas de las rocas "in situ", simples y de la consideración del estado geomecánico del macizo.

Esto ha dado lugar a la creación de las clasificaciones geomecánicas que, en cada caso particular se traducen en un índice, que requiere reflejar las condiciones en las que debe acometerse el sostenimiento de una estructura en roca.

No existe ninguna clasificación universal que se adopte bien a definir los tipos de terreno, esto se debe principalmente a que el génesis, la composición e historia geológica de las rocas es diversa. Por otra parte, los autores de las clasificaciones existentes, las han realizada de su propia experiencia. Por ello, la utilidad será mayor en zonas geológicamente parecidas a las que han servido de base para la preparación.

Las clasificaciones geomecánicas son sistemas empíricos en los que se integran distintos factores geológicos y propiedades mecánicas que evalúan el comportamiento de un macizo rocoso con fines de excavación. Mediante descripciones cualitativas y semicuantitativas, y una formulación paramétrica de índices de calidad. Se llegan a establecer ciertas categorías que describen un comportamiento al que se le puede asociar determinadas propiedades e incluso correlacionar, con parámetros de diseño y elementos de sostenimiento, de acuerdo siempre con criterios empíricos.

Los principios generales son:

- Se basan en relaciones empíricas observaciones, experiencias.
- Utilizan parámetros de sencilla identificación.
- Son fáciles y rápidas de aplicar.
- Se han desarrollado principalmente a partir de la década de los 70's y han adquirido una gran difusión.

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- Han sido ampliamente constatadas y su utilidad, así como su fiabilidad es indiscutible, aunque para su empleo deben tenerse en cuenta sus limitaciones.
- La mayoría de ellas han sido concebidas para describir cuantitativamente los macizos rocosos y no como procedimientos de diseño. Sin embargo, las clasificaciones más recientes se consideran como métodos empíricos de diseño.

Fue desarrollada especialmente para la ingeniería de rocas, y utilizan 6 parámetros:

1. Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
2. RQD.
3. Espaciamiento de discontinuidades.
4. Orientación de discontinuidades.
5. Características de discontinuidades.
6. Condiciones hidráulicas.

El valor RMR se obtiene de la tabla 9:

Tabla 9.

A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SU IMPORTANCIA.						
PARÁMETRO.		RANGO DE VALORES.				
1.- Resistencia del material rocoso.	Índice de resistencia en el punto de aplicación de la carga.	> 8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para este rango tan bajo, se prefiere una prueba de compresión axial.
	Resistencia a la compresión axial.	> 200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 Mpa	10-25 Mpa 3-10 Mpa 1-3 Mpa
	Clasificación.	15	12	7	4	2 1 0

**CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO**

2.-	Calidad del núcleo de perforación según RQD.	90-100%	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %
	Clasificación.	20	17	13	8	3
3.-	Espaciament o de puntos.	> 3 m	1-3 m	0.3-1 m	50-300 mm	< 50 mm
	Clasificación.	30	25	20	10	5
4.-	Condición de las juntas.	Superficiales muy ásperas. No son continuas. No están separadas. Roca de respaldo muy agrietada.	Superficies ligeramente ásperas. Separación < 1 mm. Roca de respaldo muy agrietada.	Superficies ligeramente ásperas. Separación < 1 mm. Roca de respaldo ligeramente agrietada.	Superficies con planos de deslizamiento o salbanda < 5 mm de grueso, o grietas abiertas de 1 a 5 mm. Grietas continuas.	Ligera salbanda < a 5 mm de grueso o grietas abiertas más de 5 mm. Grietas continuas.
	Clasificación.	25	20	12	6	0
5.- Flujo de agua.	a) infiltración por cada 10 m de longitud de túnel.		Ninguna	< 25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
	b) Relación.	Presión E del agua en la fisura / esfuerzo principal mayor.	0	0.0-0.2	0.2-0.5	> 0.5
	c) Condiciones generales.		Completa mente seca.	Humedad solamente (agua intrínseca).	Agua a una presión moderada.	Problemas severos de agua.
	Valor.		10	7	4	0
<b>B. AJUSTE DE LA CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA ORIENTACIÓN DE LAS GRIETAS.</b>						
Orientación del rumbo y echado de las grietas.		Muy Favorable.	Favorable.	Regular.	Desfavorable.	Muy Desfavorable.
Túneles.		0	-2	-5	-10	-12
Clasificación de cimentaciones.		0	-2	-7	-15	-25
Taludes.		0	-5	-25	-50	-60

**CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO**

C. DIFERENTES CLASES DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADOS BASÁNDOSE EN LAS CLASIFICACIONES TOTALES.					
Clasificación.	100-81	80-61	60-41	40-21	20
Clase Núm.	I	II	III	IV	V
Descripción.	Muy buena roca.	Buena roca.	Roca regular.	Roca pobre.	Roca muy pobre.
D. SIGNIFICADO QUE TIENEN LAS DIFERENTES CLASES DE MACIZOS ROCOSOS.					
Clase Núm.	I	II	III	IV	V
Tiempo promedio en que soporta por sí sola.	10 años.	6 meses.	1 semana.	5 horas.	10 minutos.
	Para claros de 5 m.	Para claros de 4 m.	Para claros de 3 m.	Para claros de 1.5 m.	Para claros de menos de 0.5 m.
Cohesión del macizo rocoso.	> 300 KPa	200-300 KPa	150-200 KPa	100-150 KPa	< 100 KPa
Ángulo de fricción interna del macizo rocoso.	> 45°	40°-45°	35°-40°	30°-35°	<30°
Salbanda: material suave que se encuentra en las diaclasas (zona de falla).					

También en este caso representa la calidad del macizo rocoso con relación a su necesidad de soporte, independientemente del tipo de obra, de sus dimensiones, así como del procedimiento constructivo.

El método de operación es:

- a) Se divide el túnel en regiones.
- b) Se determina el valor de cada uno de los seis parámetros mediante observaciones y mediciones de campo, para cada una de las regiones. El método proporciona una descripción detallada para la calificación de cada parámetro.
- c) Se asigna una calificación para cada uno de los primeros cinco parámetros y se obtiene la suma para obtener la calificación básica del macizo en cada región, auxiliándose de la tabla 9, sección A.
- d) Se toma en cuenta la influencia del rumbo y echado de las discontinuidades ajustando la calificación básica del macizo, auxiliándose de la tabla 9, sección B, donde se da un tratamiento diferente según se trate

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

de un túnel, una cimentación o un talud. La calificación, según la orientación, es cualitativa y se define con el auxilio de una tabla.

- e) Finalmente, se obtiene la Clasificación del Macizo Rocoso (RMR), en cualquiera de los cinco grupos, de acuerdo con la tabla 9, sección C.
- f) La Sección D de la propia Tabla muestra el significado físico de cada una de las cinco clases de macizo rocoso.

Información de salida.

Para el caso de túneles, el Sistema de Clasificación Geomecánica proporciona el tiempo de sustentación, de acuerdo con la Figura 17.

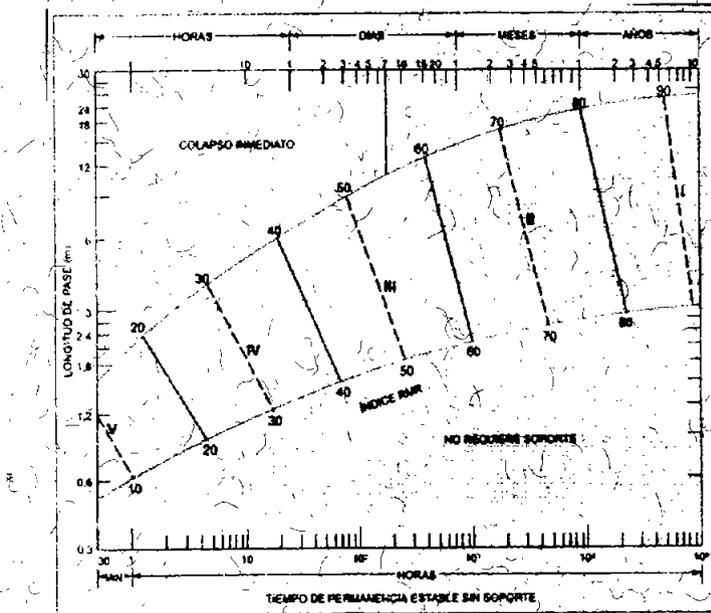


Figura 17.

Clasificación Geomecánica: Relación entre el tiempo en que se sostiene por sí sola la estructura y el claro no soportado.

Si se requiere un tiempo de sustentación mayor, puede alcanzarse este mediante la colocación de un sistema de soporte, de acuerdo con la Tabla 10.

**CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO**

Tabla 10.

CLASE DE MACIZO ROCOSO.	EXCAVACIÓN.	SOPORTE.		
		Anclaje* (longitud: 1/3 a 1/2 del túnel).	Concreto Lanzado.	Marcos de Acero.
Muy buena roca I RMR: 81-100	Frente completo avance de 10 pies.	Generalmente no requiere soporte excepto el colocar ocasionalmente anclas.		
Buena roca II RMR: 61-80	Frente completo. Avance de 3 a 5 pies. Soporte completo a 60 pies del frente.	Anclajes locales en techo de 10 pies de long., espaciados 8 pies, con una malla de alambre que se coloca ocasionalmente.	2 pulg. En el techo donde se requiera.	Ninguno.
Roca regular III RMR: 41-60	Galería de avance y banqueo. Avance de 5 a 10 pies en el frente. Comenzar sustentación después de cada voladura. Soporte completo a 20 pies del frente.	Uso sistemático de anclaje de 12 pies de long., espacios de 5 a 6 pies en el techo y las paredes con malla de alambre en la bóveda.	2 a 4 pulgadas en el techo y 1 pulg. en las paredes.	Ninguno.
Roca pobre IV RMR: 21-40	Galería de avance y blanqueo. Avance de 3 a 5 pies en el frente. Instalar soporte al ir haciendo la excavación.	Uso sistemático de anclaje de 12 a 15 pies de longitud, espaciados de 3 a 5 pies en el techo y las paredes con una malla de alambre.	4 a 6 pulgadas en el techo y 4 pulg. en las paredes.	Marcos ligeros a medianos espaciados 5 pies donde se requieran.
Roca muy pobre V RMR: 20	Varios frentes, avance de 1.5 a 3 pies en el frente instalar soporte al ir haciendo la excavación. Concreto lanzado tan pronto como se pueda después de realizar la tronada.	Uso sistemático de anclaje de 15 a 20 pies de long., espaciados de 3 a 5 pies en el techo y en las paredes con malla de alambre. Plantilla de anclaje.	6 a 8 pulg. en el techo, 6 pulg. en las paredes y 2 pulg. en el frente.	Marcos medianos a pesados, espaciados 2 pies y 6 pulg. con revestimiento metálico y utilizando puntales y listones de avance en el frente, si es necesario. Plantilla de cierre.

\*La longitud de las anclas que aquí se especifican es aplicable a túneles de 30 pies de ancho.

## CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

En la formulación de esta tabla, se ha tomado en cuenta:

- Ancho del túnel.
- Método de Construcción.

El sistema de soporte propuesto puede considerarse como definitivo, por lo que no se requerirá ningún revestimiento adicional de concreto. Sin embargo, se recomienda observar el comportamiento del túnel para asegurarse de su estabilización.

### 3.7.- Presiones Principales en el Túnel.

Cuando se excava un túnel se produce una región de esfuerzos cambiantes, en la que generalmente se incrementan las presiones verticales y que se localiza en el frente de la excavación, desplazándose con ella. En el frente, los estados de esfuerzos son netamente tridimensionales, pero tienden a transformarse en bidimensionales a medida que las zonas en que se producen van quedando más atrás y el avance de la obra continúa. Los cambios de estados de esfuerzos que produce la excavación no pueden ocurrir sin deformación en el medio; cuando hay revestimientos, éstos se deforman también.

La construcción del túnel no sólo cambia los esfuerzos en el interior del medio, sino que muchas veces también cambian el propio medio; el empleo de los explosivos suele reducir la resistencia de las rocas y suelos duros en torno a la galería, y otros métodos de excavación tales como escudos, producen remoldeo en los suelos vecinos. Solamente en túneles que puedan excavarse en forma manual y en los que se requiera ningún tipo de ademe podrá pensarse que la perturbación en los materiales de la galería sea realmente pequeña.

En la naturaleza, las rocas están sujetas a su propio peso y al peso de las masas subyacentes; como consecuencia, en su interior se desarrollan esfuerzos y deformaciones que se producen entre las partículas individuales constituyentes. Mientras la roca o un suelo duro estén confinados, no podrán producirse los desplazamientos interparticulares necesarios para que se desarrollen los estados de deformación correspondientes a los esfuerzos actuantes, por lo que éstos se acumulan o almacenan en el material, pudiendo llegar a valores muy altos, muy por encima de los límites de fluencia.

La determinación de estas presiones en un caso dado es uno de los problemas más difíciles a que pueda enfrentarse un ingeniero geotécnico. Las dificultades provienen, no sólo de lo difícil que pueda ser establecer las condiciones primarias u originales de los esfuerzos en la masa virgen, sino también del hecho de que el estado de esfuerzos se modifica alrededor de la excavación, una vez practicada ésta y; estas modificaciones dependen de muchos factores difíciles de evaluar, tales como la

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

naturaleza y resistencia del suelo o roca, del tamaño del orificio practicado, del método como se produjo, de la forma y rigidez de los elementos de soporte que se empleen y del tiempo que se haya dejado la excavación sin sostén, antes de ponerlo.

La historia de esfuerzos residuales de una masa rocosa o de un suelo firme queda de un modo u otro reflejada en todo el conjunto de grietas, fisuras u otros accidentes que existan, pero suele resultar extraordinariamente difícil establecer cuáles de esos esfuerzos actúan aún y juegan un papel.

La experiencia actual parece probar que en las rocas los estados de esfuerzos no se establecen en la forma diferenciada entre esfuerzos horizontales y verticales que es común aceptar en los suelos; hay indicaciones importantes en el sentido de la existencia de estados iniciales hidrostáticos, antes que orientados y a éstos se sobreponen los esfuerzos tectónicos, muchas veces actuando en sentido opuesto al campo gravitacional. Las juntas de las rocas, con sus orientaciones en cualquier dirección parecen comprobar que la dirección vertical no es en las rocas, ni con mucho, tan privilegiada como suele considerársela en los suelos.

A partir de los trabajos de Terzaghi se ha hecho costumbre expresar las presiones secundarias de roca o suelo firme, es decir, aquellas que se ejercen sobre los ademes después de excavar el túnel, como el peso de una masa de una cierta altura sobre el túnel; se considera que ésta es la masa que se caería en primera instancia si no se colocara ningún ademe. Las deformaciones del sistema de soporte producen arqueamiento posterior de la masa sobre el techo y alivio de la presión.

El propio Terzaghi distingue el caso de las presiones ejercidas por los suelos plásticos blandos, en las que la deformación posterior del ademe no produce alivio. Estas presiones no dependen mucho en magnitud del momento de la instalación del ademe o de las características de éste, si bien la distribución de la presión sí se ve afectada por estos conceptos. La presión de rocas y suelos firmes, en cambio, sí se ve afectada por el momento en que se coloque el ademe, por que las deformaciones que siguen a la excavación varían mucho con el tiempo.

Las razones para que se desarrollen las presiones sobre los ademes son las siguientes:

- Aflojamiento de las masas de roca.
- El peso de masas subyacentes.
- Las fuerzas tectónicas.
- Expansión del material en que se excava el túnel.

### CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Estos mecanismos conducen a la aparición de tres tipos de presiones sobre los techos de los túneles:

- Presión de roca.
- Presión real de montaña.
- Presión por expansión.

Estos tipos de presiones pueden presentarse individualmente o en conjunto. El tipo de presión que se desarrolla en un caso dado depende mucho de la naturaleza del material sobre y alrededor del túnel.

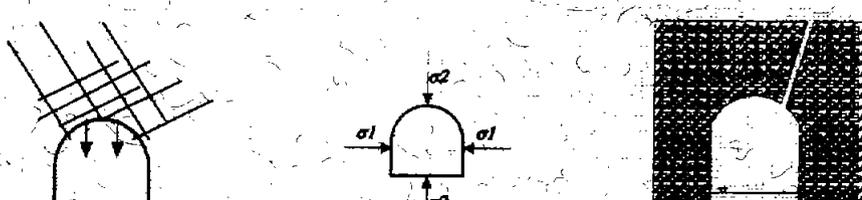


Figura 18.  
Algunas condiciones de inestabilidad producidas por las diferentes presiones en la roca.

#### ► Presión de Roca.

La presión de roca adquiere tres formas conceptuales de acuerdo al mecanismo utilizado, que son los siguientes: la debida al peso de la masa de roca (presión de aflojamiento); la debida a los esfuerzos existentes en el medio (presión real de montaña); y la debida a la expansión de ciertos tipos de roca o suelos.

Presión de roca debido al aflojamiento.

Esta puede ser entendida como el peso de una masa en la clave del túnel; esta masa si se dejara sin soporte, caería gradualmente dentro del túnel. En la práctica se considera que mientras más rápida se coloque el revestimiento menor será esta presión, ya que la zona afectada por desprendimiento será también menor.

## CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Las razones por las que ocurre el aflojamiento de roca son muy diversas, siendo las principales:

- El empleo de explosivos durante la excavación.
- Esfuerzos de tensión que se originan por efecto de la flexión en la clave del túnel.

Esta clase de presión puede ocurrir independientemente de la profundidad a que se encuentre la excavación y en ocasiones puede ser también independiente de la calidad de la roca; es decir, este mecanismo puede ocurrir prácticamente en cualquier tipo de roca y bajo cualquier condición. Para valorar numéricamente este tipo de presión será necesario determinar el volumen de roca que gravita sobre el revestimiento o el soporte del túnel.

### ► Presión Real de Montaña.

La presión de la montaña se origina por el efecto del estado de esfuerzos, se debe a alguno o a una combinación de dos factores.

- Una resistencia insuficiente de la roca en relación con los esfuerzos que actúan en la periferia de una cavidad.
- El estado inicial de esfuerzos del macizo rocoso.

Lo anterior puede comprenderse de la forma siguiente:

Los elementos de roca que se encuentran adyacentes a la cavidad, antes de la excavación se encuentran en equilibrio y como consecuencia ocurren deformaciones y cambios en el estado de esfuerzos original de esos elementos.

Si las propiedades de resistencia de la roca son suficientes, el equilibrio se mantiene; por el contrario si éstas son insuficientes para resistir el nuevo estado de esfuerzos generados entonces habrá una redistribución de esfuerzos que provocará nuevas deformaciones; este proceso se repetirá sucesivamente hasta que se alcance el equilibrio.

Se puede llegar a la conclusión de que mientras más tiempo tarda en colocarse un revestimiento más grande será la zona adyacente con esfuerzos redistribuidos, congruentes con la resistencia de la roca que tenga que soportar el revestimiento.

De acuerdo con lo anterior convendría que el revestimiento de un túnel se retrasara tanto como fuera posible, de esta forma inducirá menos presiones en el revestimiento y por lo tanto, reducirá sus dimensiones, sin embargo no deben perderse de vista tres aspectos:

### CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

- a) La alteración de la roca por efecto de la meteorización.
- b) Las deformaciones, para que se alcance el equilibrio, que pueden ser excesivas.
- c) A medida que pasa el tiempo el mecanismo de aflojamiento tiene importancia.

Los aspectos a y c pueden carecer de importancia dentro del túnel, y el factor b puede ocasionar deformaciones inadmisibles por las tolerancias geométricas o inconvenientes para la operación del túnel.

Puede concluirse que la concurrencia de presión real de montaña está regida básicamente por las características de resistencia de la roca, combinadas por la profundidad de la excavación, y en forma determinante por los esfuerzos tectónicos presentes en el macizo rocoso.

#### ➤ Presión por Expansión.

La presión por expansión ocurre en suelos arcillosos y en rocas blandas o rocas que tengan fisuras rellenas de arcilla. La relajación de esfuerzos que ocurre en las cercanías de una excavación propicia cambios de volumen en las rocas y en los suelos. Tales cambios de volumen pueden ser suficientemente grandes como para generar presiones de roca, inclusive mayores que la presión geostática, es decir, la presión vertical debida al peso propio de la cobertura de la roca.

En estas circunstancias es conveniente permitir que los cambios de volumen ocurran antes de la colocación del revestimiento definitivo.

#### Diseño.

Se presenta el análisis de esfuerzos en el revestimiento de túneles y se hace un repaso de los métodos que se usan para resolver el problema.

La determinación de esfuerzos y deformaciones en el revestimiento de un túnel es un problema bastante complicado debido entre otras cosas a:

- El desconocimiento de la magnitud y de la distribución de presiones del suelo o roca.
- La incertidumbre de las propiedades mecánicas del terreno y del comportamiento del revestimiento.
- Algunas condiciones temporales no previstas.

### CAPÍTULO III- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

Por lo anterior, resulta aconsejable utilizar para el diseño factores de seguridad mayores que para otro tipo de estructuras, así como, definir con más detenimiento la combinación de cargas más desfavorables.

Debe tomarse en cuenta, además, que los esfuerzos máximos no se presentan necesariamente en la condición final sino que pueden ocurrir durante la construcción o poco tiempo después de haber terminado.

#### IV.- PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES.

En cualquier consideración sistemática de los túneles y de los métodos apropiados de construcción, la función del túnel terminado tiene una importancia fundamental. Las funciones de los túneles y, por consiguiente, dimensiones, forma y revestimiento son diversos. En el proyecto y la construcción, los factores importantes que se deben analizar en relación con la función abarcan: localización, suelo, dimensiones y geometría, la forma estructural, el método de construcción y el equipo permanente.

Al excavar para abrir un hueco en el interior de la tierra se desconfinan y se descomprime el terreno inmediato a él. Se altera entonces el aparente equilibrio de esfuerzos hasta entonces reinante en la zona afectada por la excavación. La masa que constituye el terreno se ve solicitada por el diferencial de esfuerzos y presiones entre el interior de la misma y el hueco, y tiende a desplazarse hacia éste.

La excavación forma en el terreno una frontera que permanece libre y sin restricciones a los desplazamientos, por el tiempo que tarda en colocarse la estructura de ademe y en el espacio limitado por la frente de excavación y el ademe anterior colocado. Espacio abierto y tiempo en que permanece abierto son dos factores que influyen en los desplazamientos. En el interior de la masa, el terreno no puede desplazarse libremente y se establece un campo de esfuerzos y deformaciones complejo en el que hay zonas que se liberan o alivian de presiones a costa de otras que se sobrecargan; a este mecanismo de distribución de esfuerzos se le llama arqueo, por asemejarse al trabajo estructural del arco y en particular al fenómeno que se observa en masas granulares confinadas, y que son descargadas por el fondo.

Por lo que se refiere al soporte de excavaciones subterráneas, es, que las reacciones del terreno ante la presencia de la excavación pueden estructurarse como mecanismos cuya función va a ser la de oponerse al desequilibrio provocado por la descarga. Mecanismos de este tipo resultan en la reorganización de arreglos y contactos entre partículas y en la rehabilitación y el refuerzo de interacciones intergranulares que en suma constituyen una autoprotección del terreno, una verdadera resistencia interna. Esta resistencia, como puede ser sobrada en unos casos, en otros no alcanza a ser suficiente.

Es un hecho que cavernas naturales y artificiales han permanecido abiertas por tiempo indefinido y sin soporte auxiliar ninguno en macizos de roca sana, en los que la cementación natural entre partículas y la resistencia mecánica de las mismas soportan los esfuerzos impuestos por la excavación y su deformación, se puede decir que quedan dentro del rango elástico o de proporcionalidad lineal con los esfuerzos. En otros terrenos, en cambio, la concentración de esfuerzos al hacer una excavación subterránea supera los límites del comportamiento elástico y queda sometida a prueba la capacidad de la estructura del terreno para resistir y redistribuir los esfuerzos excesivos; zonas de

la misma se plastifican y sufren grandes deformaciones, o viceversa, en tanto que otras, más rígidas o más sólidas, aceptan concentraciones de esfuerzos extraordinarias sin grandes deformaciones. La cohesión o interacción físico-química de partículas y la resistencia mecánica de las sustancias de estas mismas, han de constituir cadenas estructurales, en acomodados como en los originales, o en otros acomodados, más eficientes, a que los mismos desplazamientos han dado lugar. Se crean así anillos, bandas o zonas, alrededor de la excavación, en los que por deformaciones se alivian los excesos de esfuerzos para ser transferidos más hacia el interior de la masa, donde el mayor confinamiento permite absorberlos con poca deformación y amplia capacidad mecánica de la estructura intergranular. Esto puede llevar a una estabilidad relativa, pero a costa de importantes deformaciones en los límites de la excavación y en su entorno, o en casos extremos, resultar en la desintegración progresiva del terreno alrededor de la excavación y en su eventual colapso al no encontrar, el mecanismo de distribución de esfuerzos, zona sólida o estable donde formar el arco e interrumpir su avance. En ambas circunstancias se hace indispensable auxiliar al terreno con un soporte que le provea la resistencia complementaria que necesita para alcanzar, antes de que suceda lo antes dicho, el nuevo equilibrio.

El procedimiento constructivo debe diseñarse y establecerse para que exista congruencia entre las condiciones que impone el terreno, las actividades de excavación o avance y las actividades de ademe. Un terreno sano y duro exige, para dar eficiencia, mayor mecanización en el procedimiento constructivo que en un terreno alterado y blando. En este último las actividades de ademe consumirán la mayor parte del tiempo del ciclo del tajeo, en tanto que en el primero serán las de excavación. La eficiencia residirá en procurar el mayor balance y la menor interferencia de tiempos posible entre las diferentes actividades en cada caso.

#### 4.1.- El Ciclo Básico de Excavación.

El excavar un túnel por el método de barrenación y voladura es un proceso cíclico con diferentes etapas de construcción, las cuales se suceden unas a otras siguiendo un orden repetitivo. Un ciclo completo de excavación produce un determinado avance dependiendo principalmente de la longitud del barreno y carga del mismo; para determinar un ciclo de trabajo es necesario conocer perfectamente todas y cada una de las actividades, las cuales constan de:

- Trazo y acercamiento del equipo.
- Barrenación.
- Carga de explosivos.
- Ventilación.

- Amacice de clave y laterales.
- Rezagado (carga del producto de la voladura y su transporte).
- Colocación e instalación dentro del túnel.

Adicionalmente a las actividades anteriores se pueden, requerir otras etapas (dependiendo de las condiciones de la formación geológica), como son:

- Anclaje con pernos.
- Revestimiento del túnel a base de concreto lanzado.
- Instalación de marcos metálicos para soporte del macizo rocoso.
- Inyección para el sellado de fugas.
- Barrenación de exploración.

En formaciones de muy buena roca será suficiente con el ciclo básico de excavación. Sin embargo, a medida que la calidad de la roca se empeore, mayores actividades para el sistema de soporte temporal del túnel tendrán que llevarse a cabo.

Para estimar correctamente el programa de ejecución del túnel, es de vital importancia el conocer las condiciones geológicas del terreno, que tendrá que atravesar a fin de poder prever las posibles actividades que deberán considerarse en cada ciclo de trabajo, el cual podrá determinar el rendimiento en cada jornada.

Para ilustrar lo antes escrito, daré el siguiente ejemplo: podrán necesitarse más metros lineales de barrenación para la instalación de anclas, a fin de poder contrarrestar las presiones del macizo rocoso y hacerlo que trabaje como un conjunto. El ciclo de trabajo puede convertirse en "muy lento" si se requieren colocar marcos metálicos y madera de retaque, o bien, una gruesa capa de concreto lanzado, antes de poder iniciar la siguiente actividad de barrenación. Sin embargo, la mayoría de los casos es posible hacer el trabajo de ademado, algunos avances atrás del frente.

Varios trabajos adicionales de mantenimiento logístico son también esenciales.

En la excavación de túneles: Colocación de líneas de tuberías para abastecimiento de aire a presión para agua de barrenación para bombeo del drenaje y para la ventilación, así como, también la instalación de cables de energía eléctrica y teléfonos.

Todo esto tendrá que instalarse al mismo ritmo del avance que marque la excavación. El mantener el piso en su correcto nivel y la superficie transitable, el corregir

galerías de bombeo y equipararlas, nichos para transformadores de alta y baja tensión etc., son en términos generales, actividades que no deben interferir en el ciclo básico, pero si no se tiene especial cuidado en su realización oportuna puede llegar a afectar importantemente el éxito de las operaciones.

A medida que un túnel es de mayor longitud, el número de eventos en que se transporta la rezaga, los materiales y el equipo también se incrementa.

La ventilación y el manejo del agua requieren de líneas de mayores diámetros y mayores cantidades de energía. Esto se traduce en reducción de la velocidad de excavación y el incremento en el costo unitario.

Por ello cuando sea posible, deberá considerarse un método de frentes alternas, esto significa trabajar en dos o más frentes con el mismo equipo desde un portal.

Como ya se menciona dependiendo de la calidad de la roca será el procedimiento constructivo a seguir, por lo cual se mencionan a continuación ejemplos específicos para los estados más comunes en que podemos encontrar la roca:

➤ Lumbreras en Roca.

Procedimiento Constructivo:

□ Barrenación.

Esta labor se realiza con máquinas perforadoras de piso o bien con un Jumbo de barrenación especial para tiros. Para ejecutar la barrenación es necesario elaborar una plantilla llamada: plantilla de barrenación, y es la que nos rige el sistema de perforación, ya que puede ser a sección completa o bien a una parte de la sección para aprovechar el desnivel que resulte como banqueo.

□ Carga y Tronada.

Una vez terminada la barrenación se procede a la carga del material explosivo en la cual tanto el número de barrenos como la cantidad del material explosivo esta en función con la dureza de la roca; cuando se termina de cargar se truena.

□ Ventilación.

Consiste en hacer circular gran cantidad de aire para desplazar el aire que ya esté contaminado.

□ Rezagado.

Una vez desalojado el aire contaminado se continúa con el rezagado que consiste en la extracción del material a excavarse aflojado con explosivos. Para extraer este material es necesario cargarlo a un bote por medio de un equipo que puede ser desde un cargador frontal hasta una retroexcavadora sin bandas (fija), o bien una almeja. Para transportar el bote a la superficie se utiliza un malacate que jala el bote por medio de un cable hasta una estructura llamada horca que sirve de apoyo a las poleas para el cable y para el vaciado del bote. A lo largo de la lumbrera se colocan guías que pueden ser rígidas o de cable

□ Amacize.

Consiste en quitar cualquier parte del terreno que está flojo para poder trabajar con la mayor seguridad.

□ Bombeo.

En la mayoría de las lumbreras se encuentra agua y ésta es controlada por medio del bombeo del fondo a una pileta portátil con bombas sumergibles donde se colocan bombas de pozo profundo que extraen el agua superficial.

□ Ademe.

Se utiliza para soportar el material que pueda caerse. Pueden utilizarse marcos, concreto lanzado, anclas, o bien una combinación entre éstas.



Figure 19.  
Ejemplo de túneles que requieren Bombeo.

➤ Túneles en Roca Blanda.

Procedimiento Constructivo.

□ Barrenación.

Se realiza por medio de perforadora de pierna neumáticas alimentadas por un compresor. Esta barrenación se ejecuta en media sección superior para obtener un banco que ayudará a tener un rezagado semicontinuo, en la otra media sección inferior se barrena únicamente lo necesario para aflojar el material.

□ Carga y Tronada.

Para tronar la barrenación realizada se retacan los barrenos con material explosivo, la cantidad necesaria depende de la dureza del material.

□ Ventilación.

Consiste en inyectar en el frente gran cantidad de aire a baja presión para desalojar el aire contaminado por aire limpio, esta labor se efectúa con un ventilador axial y tubería de diámetro mayor que conduce el aire nuevo hasta el frente.

□ Rezagado.

Existen varios métodos de extracción de rezaga, dependiendo del tamaño de la sección y la longitud del túnel para seleccionar el adecuado:

- a) Túneles cortos y de sección pequeña se recomienda el uso de Scooptram.
- b) Túneles largos de sección pequeña, se recomiendan el uso de Scooptram y camiones de bajo peralte, o bien rezagado con vía.
- c) Túneles de sección amplia se recomiendan el uso de Scooptram o un cargador frontal y camiones de volteo.

□ Amacize.

Consiste en quitar todo el material suelto para trabajar con mayor seguridad.

□ Bombeo.

Cuando existe agua en el túnel y la pendiente es negativa, esta agua se extrae por bombeo, si la pendiente es positiva se hace una acequia para drenar el túnel.

- Ademe.

Es un soporte provisional del material que puede provocar un caído. Existen varios tipos de Ademe con retaque de madera, concreto lanzado, anclas, o una combinación de éstos.

- Revestimiento.

Dependiendo del tipo para el cual fue construido el túnel se le dará el acabado final, si éste sirve para la conducción de agua se revestirá de concreto. El sistema de revestido esta en función del tipo de sección del túnel, el cual se puede colocar en una sola etapa o en varias.

➤ Túneles en Roca Sana.

Proceso de Construcción.

- Barrenación.

Se realiza por medio de perforadoras de pierna neumáticas alimentadas por un compresor o bien con un jumbo de barrenación hidráulico. Para ejecutar la barrenación es necesaria una plantilla de barrenación para distribuir los barrenos necesarios a realizar dependiendo del tamaño de la sección se puede barrenar a media sección o a sección completa.

- Carga y Tronada.

Para tronar la barrenación realizada se retacan los barrenos con material explosivo, la cantidad necesaria dependiendo de la dureza del material.

- Ventilación.

Consiste en inyectar a la frente gran cantidad de aire a baja presión para desalojar el aire contaminado por aire limpio, esta labor se efectúa con un ventilador axial y tubería de diámetro mayor que conduce el aire nuevo hasta el frente.

- Rezagado.

Existen varios métodos de extracción de rezaga dependiendo del tamaño de la selección y la longitud del túnel para seleccionar el adecuado:



Figura 20.  
Ejemplo de una voladura incompleta.

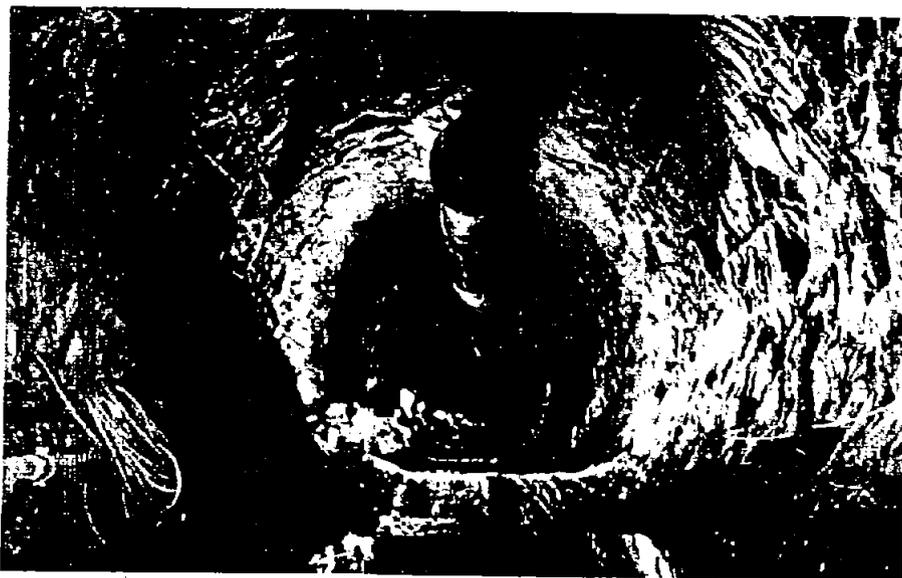


Figura 21.  
Ejemplo de una buena voladura.

- a) Túneles cortos y de sección pequeña, se recomienda el uso del Scooptram.
- b) Túneles largos y de sección pequeña se recomienda el uso de Scooptram y camiones de bajo peralte o bien rezagado en la vía.
- c) Túneles de sección amplia, se recomiendan el uso de Scooptram o un cargador frontal y camiones de volteo.

- Amacize.

Consiste en quitar todo el material suelto para trabajar con mayor seguridad.

- Bombeo.

Cuando existe agua en el túnel y la pendiente es negativa, esta agua se extrae por bombeo, si la pendiente es positiva se hace una acequia para drenar el túnel.

- Ademe.

Es un soporte provisional del material que puede provocar un caído, y pueden ser de varios tipos: Ademe con retaque de madera, concreto lanzado, anclas, o una combinación de éstos.

- Revestimiento.

Dependiendo del fin para el cual fue construido el túnel se le dará el acabado final, si éste sirve para la conducción de agua se revestirá de concreto. El sistema de revestido está en función del tipo de sección del túnel, el cual se puede colar en una sola etapa o varias.

### > Túneles Inclinados.

#### Procedimiento Coestructivo.

- Barrenación.

Se realiza por medio de perforadoras de pierna neumáticas alimentadas por un compresor o bien con un jumbo de barrenación hidráulico. Para ejecutar la barrenación es necesaria una plantilla de barrenación para distribuir los barrenos necesarios a realizar dependiendo del tamaño de la sección se puede barrenar a media sección o a sección completa.

□ Carga y Tronada.

Para tronar la barrenación realizada se retacan los barrenos con material explosivo, la cantidad necesaria dependiendo de la dureza del material.

□ Ventilación.

Consiste en inyectar a la frente gran cantidad de aire a baja presión para desalojar el aire contaminado por aire limpio, esta labor se efectúa con un ventilador axial y tubería de diámetro mayor que conduce el aire nuevo hasta el frente.

□ Rezagado.

Existen varios métodos de extracción de rezaga dependiendo del tamaño de la selección y la longitud del túnel para seleccionar el adecuado:

- a) Túneles de baja pendiente y sección pequeña, se recomiendan el uso de Scooptram y de camiones de bajo peralte.
- b) Túneles de baja pendiente y sección amplia, se recomiendan el uso de Scooptram o cargador frontal y camiones de volteo.
- c) Túneles de pendiente mayor, se recomiendan el uso de rezagadora con descarga lateral y extracción con vagonetas sobre vía jaladas por un malacate.

□ Amacize.

Consiste en quitar todo el material suelto para trabajar con mayor seguridad.

□ Bombeo.

Cuando existe agua en el túnel, esta agua se extrae por bombeo.

□ Ademe.

Es un soporte provisional del material que puede provocar un caído, y pueden ser de varios tipos: Ademe con retaque de madera, concreto lanzado, anclas, o una combinación de éstos.

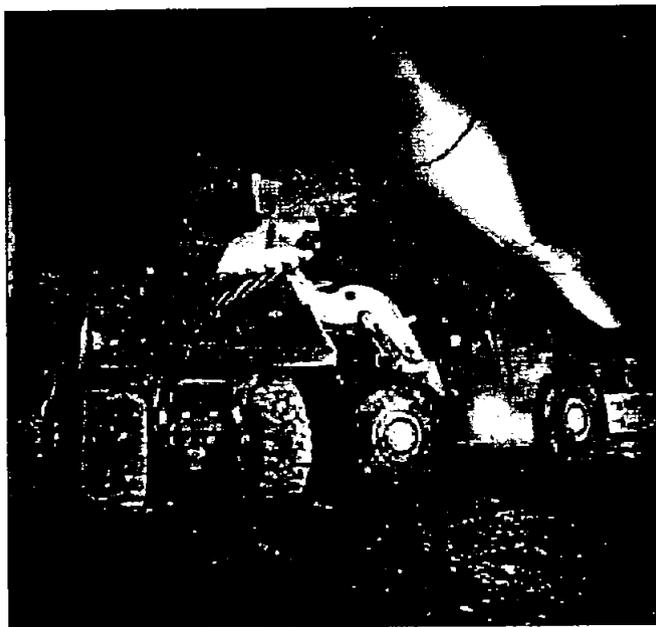


Figura 22  
Rezagado para túneles de baja pendiente  
y sección amplia.

□ Revestimiento.

Dependiendo del fin para el cual fue construido el túnel se le dará el acabado final, si éste sirve para la conducción de agua se revestirá de concreto. El sistema de revestido está en función del tipo de sección del túnel, el cual se puede colar en una sola etapa o varias.

Como se ha visto en estos distintos procesos constructivos se puede apreciar que dependiendo del estado de la roca se ataca la perforación para barrenar a media sección o a sección completa, por lo cual se estudiarán a continuación más a detalle.



Figura 23.  
Túnel inclinado.

#### 4.2.- Excavación a Sección Completa y Media Sección.

Para dar una idea del tipo de terreno en la excavación de un túnel la clasificaremos en 5 categorías diferentes, que son las siguientes:

➤ Primera Categoría.

Las rocas que exigen el empleo de explosivos, se encuentran comprendidas desde la roca dura e intacta, que permite el ataque a gran sección sin ademe, a la roca inestable, que sí lo necesita.

➤ Segunda Categoría.

Buen terreno extraído sin explosivos, permite la ejecución de uno a tres metros de galerías de sección adecuada sin entibación: Arcillas duras, tierras compactas, las areniscas y gravas aglomeradas, etc.

➤ Tercera Categoría.

Terreno mediocre o malo, en este terreno el techo de una sección adecuada puede mantenerse algunos minutos, y los laterales, así como, en el frente, una hora aproximadamente, ejemplos de esta categoría son: arcillas consistentes, la tierra seca, la arena, las gravas aglomeradas y ciertas rocas que presentan dislocamientos.

➤ Cuarta Categoría.

Mal terreno, el techo de una galería de sección adecuada debe apuntalarse a medida que se avanza, los laterales duran algunos minutos: Arcillas blandas o que se expanden al aire, las arenas húmedas, gravas o tierras vegetales sin gran cohesión, así como, la roca descompuesta.

➤ Quinta Categoría.

Terrenos sueltos, arenas o gravas secas, etc., en las que no se puede progresar más que al abrigo de blindaje continuo tanto en techo, laterales y frente.

Con la clasificación anterior se tiene una idea general de los rangos de los diferentes tipos de suelos a perforar por los métodos convencionales de ataque.

#### 4.2.1.- Método de Ataque a Sección Completa.

Como su nombre lo indica consiste en ir perforando todo el frente a cara del túnel, por la que se deben considerar pequeñas secciones (15 m<sup>2</sup>), en suelos de la primera, segunda y tercera categorías o grandes secciones en roca sana o maciza.

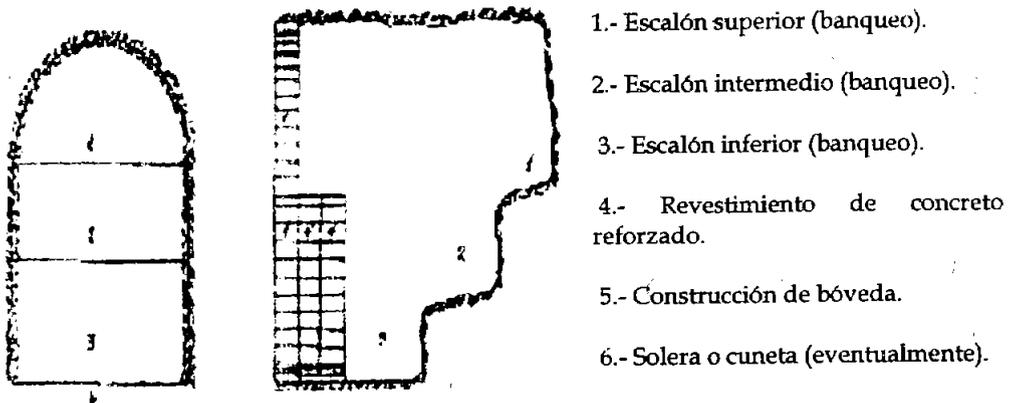
En el caso de suelos firmes se procede a escalonar el ataque, la excavación se efectúa en franjas horizontales comenzando por la parte superior, dependiendo de la resistencia del terreno para soportarse así mismo, además se basándose en marcos metálicos o ademes de madera.

En el primer caso se colocan las rastras metálicas como apoyo de la parte superior de los marcos, los cuales están ligados con soldaduras basado en tornillos. Las rastras tienen la finalidad de distribuir las cargas a las patas o vigas metálicas verticales, además se hace un retoque de madera entre cada marco, con la finalidad de distribuir las cargas sobre el marco, siendo esto más tupido en la bóveda del túnel para que el terreno realmente se apoye sobre dichos marcos. En algunos casos muy especiales donde el suelo o la roca aparente no tienen buena estabilidad se contemplará otro procedimiento, tal es el caso de utilizar concreto, sin embargo, cuando no se cuente con el equipo necesario para realizar esta actividad reducirá el espacio entre marcos acortando la distancia para la transmisión de cargas a ellos.

En el caso del ademe de madera, la coronación de la bóveda se reviste sobre puntales radiales (apuntalamiento en abanico). Estos puntales se apoyan en vigas transversales. En el escalón inferior se colocan travesaños y se establece apuntalamiento entre éstas y los de la etapa de la bóveda continuando así en cada escalón.

Ya es poco usual el uso de marcos de madera, debido a lo incosteable por el volumen de madera y a los trabajos del montaje que son sumamente delicados.

En muchos casos al utilizar este método el revestimiento definitivo se va realizando atrás de la excavación como se aprecia en la figura 24. En los túneles revestidos de madera el problema es más delicado y se trata como en los túneles a sección completa, este método también se le conoce como método "Ingles", las variaciones de este procedimiento las podemos ver en la figura 25.



- 1.- Escalón superior (banqueo).
- 2.- Escalón intermedio (banqueo).
- 3.- Escalón inferior (banqueo).
- 4.- Revestimiento de concreto reforzado.
- 5.- Construcción de bóveda.
- 6.- Solera o cuneta (eventualmente).

Figura 24.  
Método de ataque a sección completa o método ingles.

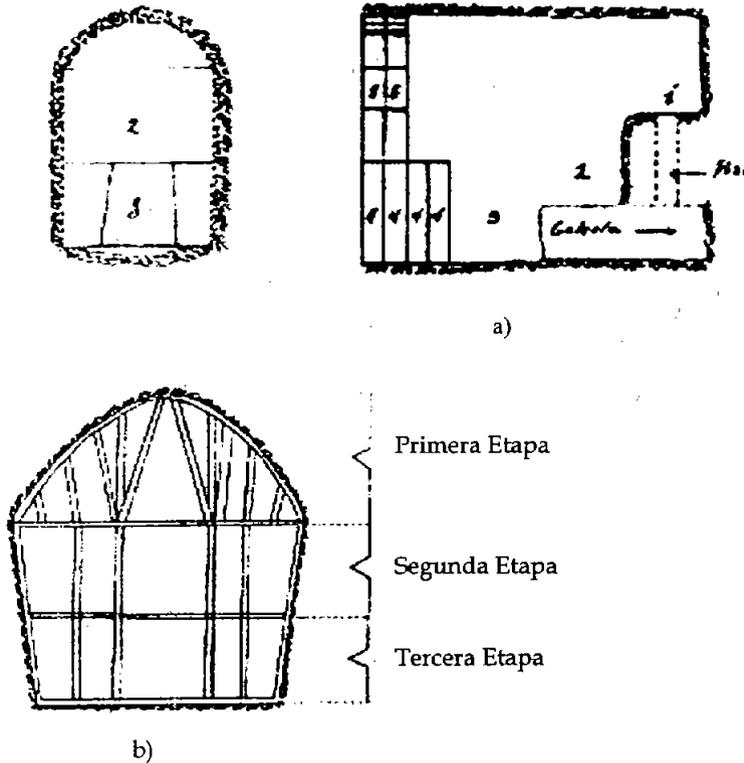


Figura 25.

- a) Sección completa con la variante de galería de avance.
- b) Etapa del ademe de madera.

Las tuneladoras o topos de ataque a sección completa son aquellas máquinas de excavación de túneles cuyo trabajo se efectúa por ataque simultáneo de toda la cara del frente, un poco a la manera en que un topo abre su galería, motivo por el cual frecuentemente se da a estas máquinas el apelativo de "Topos".

Como todas las máquinas que operan en subterráneo, la aptitud de las tuneladoras de ataque a sección completa al trabajo a realizar, dependen de numerosos factores los más importantes de los cuales son los parámetros del terreno: resistencia, composición granulométrica, abrasividad y propiedades físicas. De ahí el gran número y diversidad de máquinas existentes.

Un primer intento de clasificación de estas máquinas ha de considerar el tipo de sección en la que operan: sección circular o sección rectangular.

Las tuneladoras de sección circular disponen de una cabeza rotativa equipada de elementos cortantes (dientes, moletas, discos, fresas, etc.), que atacan el frente de manera continua. La cabeza recibe dos tipos de movimientos: uno circular de corte y otro lineal de avance. Este último es procurado por unos gatos hidráulicos que avanzan la cabeza respecto al cuerpo firmemente bloqueado en la sección mediante otros gatos. Algún modelo en lugar de elementos cortantes sin movimiento propio monta un tren hepicioidal de fresas con movimiento rotativo independiente de la cabeza. Cuando los gatos de avance de la cabeza han finalizado su carrera, se retractan, se desbloquea el cuerpo de la tuneladora y se avanza el conjunto un paso equivalente a la carrera anterior, con lo que la máquina vuelve a estar en posición de corte.

Las tuneladoras de sección rectangular montan dos o más cabezas rotativas con los útiles de corte repartidos en brazos. Como de no portar más que las cabezas rotativas la sección resultante sería una serie de círculos secantes, estas máquinas disponen también de un dispositivo de escuadrado consistente por lo general en una cadena o un tambor cortantes. Contrariamente a las tuneladoras de sección circular, estas máquinas van montadas sobre un tren de rodaje de orugas.

#### 4.2.2.- Método de Ataque a Media Sección.

##### ➤ Caso del terreno bueno (Segunda categoría).

La categoría primordial de este método, es ejecutar primeramente la excavación de la parte superior para proteger el túnel por la bóveda basándose en las características del subsuelo excavado, en diferentes casos se inicia el revestimiento por los muros y se ataca el túnel en galería de avance de pequeña sección en el eje y en la parte superior, las secciones deben ser entre 5 y 12 m<sup>2</sup> (2.5 y 3 m de ancho, así como, alturas entre 2 y 4 m).

Se construye esta galería en los arranques de la bóveda, ensanchándose así a la derecha o izquierda, para dejar al descubrimiento la bóveda. Los ensanches se realizan con un rendimiento mayor debido a que se ataca lateralmente a medida que se avanza se apuntala la bóveda con puntales radiales, los cuales están ya dos sobre el núcleo inferior, posteriormente se construye la bóveda haciéndola descansar directamente sobre el terreno, si es resistente o sobre tablonces longitudinales juntos que reparten las presiones.

Cuando el concreto ha alcanzado su fraguado inicial se quitan las cimbras metálicas y los puntales, por lo que la bóveda protegerá la obra durante las siguientes etapas de excavación.

Entonces se ataca la parte inferior del túnel excavando en el núcleo de una cuneta central que se reviste si es necesario. Después se realiza la 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).

Después se ejecutan los muros subiendo bajo la bóveda ya construida, operando de esa forma por elementos de pequeña longitud, no se compromete la seguridad de la bóveda que descansa siempre sobre el núcleo inferior no excavando sobre los pilares ya construidos. Cuando es necesario se constituye la losa de fondo, solera a cuneta.

Este método es adecuado para terrenos resistentes, es seguro por ser suficiente resistente en la bóveda y este no sufra asentamientos antes de que se hayan construido los muros debajo. Presenta el inconveniente de exigir vías de excavación de los escombros a diferentes niveles, y la ventaja es que el ademado es muy sencillo como la muestran las Figuras 26 y 27.

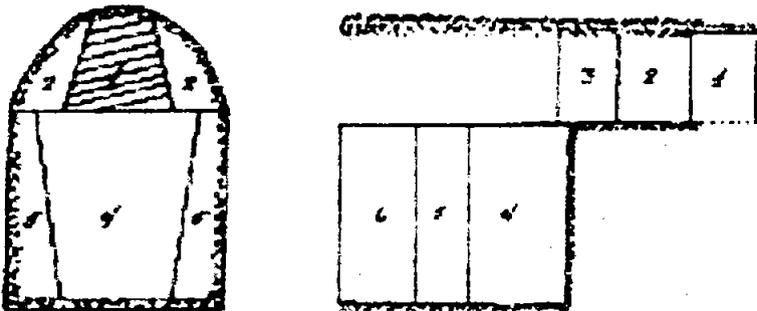


Figura 26.

Método de ataque a media sección o método belga.

- 1.- Excavación en la galería de coronación.
- 2.- Excavación de los laterales de la bóveda.
- 3.- Revestimiento de concreto en la bóveda.
- 4.- Excavación del núcleo.
- 5.- Excavación y ademe de las zonas laterales inferiores.
- 6.- Revestimiento de concreto en muros.
- 7.- Eventualmente losa inferior.

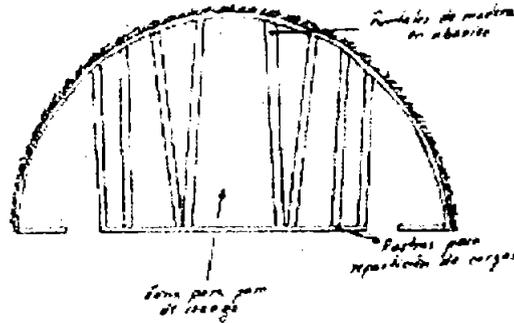


Figura 27.  
Ademe de madera en forma de abanico (radial).

➤ Caso del Terreno Malo (tercera categoría).

Cuando el terreno es malo exige revestimientos después de la excavación, por la que se tiene que modificar el método de excavación del núcleo del túnel y la construcción de los muros, ya que si no la bóveda de concreto sufrirá asentamientos durante la excavación de la cuneta y el núcleo.

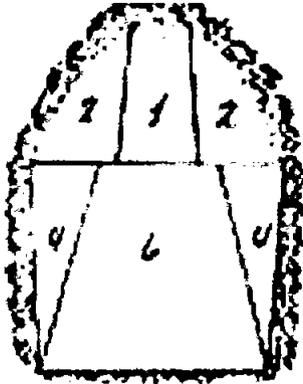
Después de haber excavado bajo la bóveda y de haberla revestido como antes, se excava en zanjas revestidas, el emplazamiento de los muros por elementos cortos ejecutados alternativamente a derecha e izquierda.

En estas excavaciones se construyen los muros bajo la bóveda primeramente, y después se quitan los puntales y se excava todo el núcleo faltante.

También es posible ejecutar los muros antes que la bóveda para la que se excava y apuntala ésta, construyendo después los muros en zanjas revestidas. Después se construye la bóveda y se excava el núcleo.

Este método es muy pesado como consecuencia de la necesidad de ejecutar zanjas revestidas, debe emplearse preferentemente el segundo método en los túneles de gran sección transversal (Figuras 28 y 29).

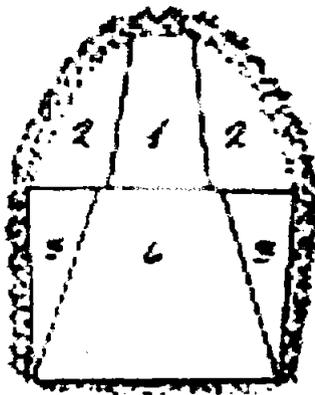
Hay también máquinas para los túneles de media sección, las cuales realizan su trabajo en el frente de manera secuencial y no global como los topes. De acuerdo con el procedimiento de ataque han de distinguirse dos tipos excavación: ataque por corte y ataque por impacto.



- 1.- Excavación de la galería de clave.
- 2.- Excavación de los laterales de la bóveda.
- 3.- Construcción de la bóveda.
- 4.- Excavación de laterales inferiores.
- 5.- Construcción de muros.
- 6.- Excavación del núcleo.
- 7.- Construcción de la losa inferior.

Figura 28.

Primera alternativa del método belga en el caso de terreno malo.



- 1.- Excavación de la galería clave.
- 2.- Excavación de los laterales de la bóveda.
- 3.- Excavación de los laterales inferiores.
- 4.- Construcción de los muros.
- 5.- Construcción de la bóveda de concreto.
- 6.- Excavación del núcleo.
- 7.- Construcción de la losa inferior.

Figura 29.

Segunda alternativa del método belga en caso de terreno malo.

Las máquinas de ataque por corte disponen por lo general de una cabeza provista de picas, cuya dimensión es pequeña en relación con la sección del frente. Esta cabeza está situada en el extremo de un brazo orientable que realiza el barrido selectivo a través de toda la superficie del frente, por lo cual el tamaño y forma de la sección abierta es muy versátil. Tanto la fuerza de empuje de las picas como la producción de material arrancado es inferior a la de las máquinas de ataque global. El dispositivo de arranque puede ser de distintos tipos: cabeza dentada cuyo eje de giro es paralelo al frente

(tambor); cabeza dentada cuyo eje de giro es normal al frente; fresa con eje de giro normal al frente; hélice dentada como eje de giro paralelo al frente; rosario de cadenas dentadas.

Las máquinas de ataque selectivo por impacto llevan montado un martillo neumático en el extremo del brazo de barrido, y el arranque del material se produce por el golpeteo del útil.

Este tipo de máquinas van montadas generalmente sobre un tren de orugas que les permite una gran facilidad de desplazamiento.

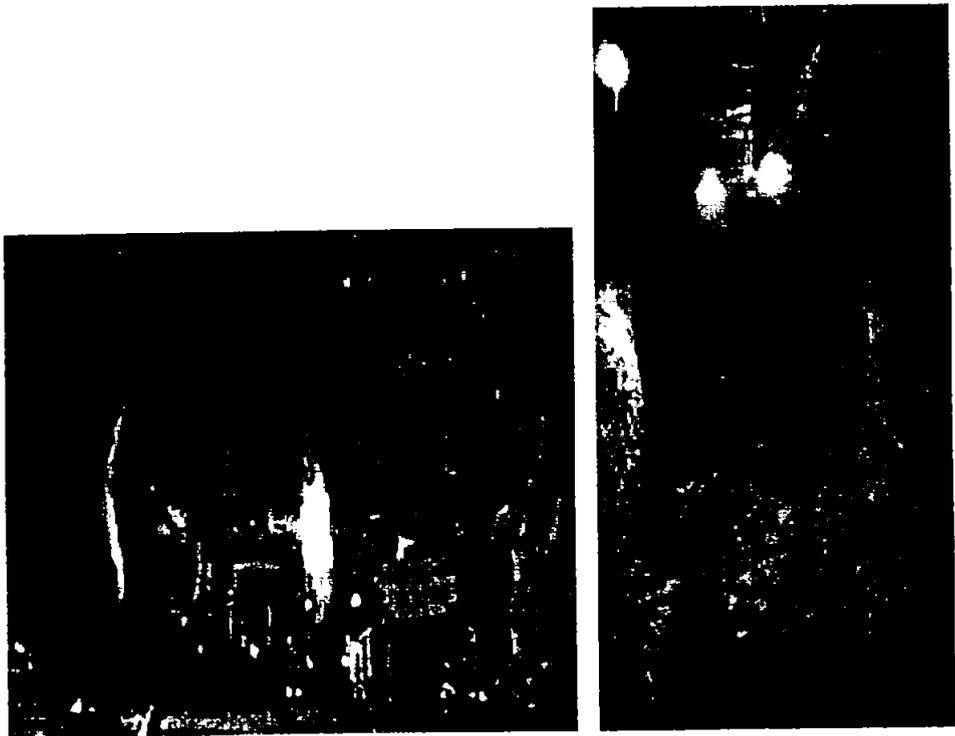


Figura 30 y 31.  
Maquinaria de excavación.

#### 4.3.- Soporte Temporal de la Excavación del Túnel.

El soporte de una excavación subterránea es un sistema compuesto (estructura de ademe-terreno), en el que ambos elementos participan en la estabilidad. Las solicitaciones a las que va a estar sujeto dependen de las condiciones o parámetros siguientes:

- El estado de equilibrio natural de terreno (estado inicial).
- Las características geométricas y mecánicas de la estructura de ademe (marcos, concreto y anclas), y de la calidad de su contacto con el terreno, es decir, de su interacción con éste (fricción límite, compresión y la falta de resistencia a la tensión).
- Las técnicas de construcción de la obra, las diferentes etapas de ejecución (en particular los tiempos transcurridos entre la excavación y la instalación del ademe).
- La evolución con el tiempo de la transferencia o redistribución de esfuerzos, resultado de la interacción del ademe con el terreno y de las interacciones de la estructura misma de la masa de éste.

En el concepto de sistemas de soporte van implícitas condiciones de oportunidad y de eficiencia.

- Oportunidad.

La oportunidad hace alusión al parámetro tiempo. Hay un tiempo, que se acostumbra llamar tiempo puente, en el que el terreno recién excavado permanece estable, sin ademe; el valor de este tiempo varía según el terreno y se juzga que su límite se establece al momento en que empiezan manifestaciones de deformación excesiva, deterioro aparente o desprendimientos de pedazos o bloques de terreno.

Está por otra parte el tiempo de colocación o instalación de la estructura del ademe, que depende de las características de las piezas o elementos que constituyen la estructura en sí, y de los recursos con que se cuenta en la obra (humanos y mecánicos), para el suministro, manejo y colocación de las mismas.

Ambos tiempos antes referidos deben de ser compatibles, es decir, el tiempo de la colocación debe ser menor que el tiempo puente. Si se requiere mantener las deformaciones en un mínimo se busca la aplicación inmediata del ademe.

- Eficiencia.

La eficiencia está relacionada con el avance, el cual viene definido por las condiciones del terreno y por el procedimiento constructivo. Al avanzar con la excavación se descubre un determinado espacio que debe mantenerse estable. A menor tiempo puente, menor debe ser el espacio abierto y más pronta la colocación del ademe, el cual, además, deberá ser más abundante. El espacio reducido dificulta las maniobras y provoca la interferencia de actividades, los tiempos correspondientes a cada una de ellas se acumulan y la eficiencia baja. Terrenos mejores permiten avances mayores; al contar con mayor tiempo puente el ademe puede alejarse de la frente de excavación e interferir así menos con las actividades de ésta, además su densidad disminuye; a mayor espacio mayor desahogo de actividades y la eficiencia crece por consiguiente.

#### 4.3.1.- Marcos.

Se Puede decir que el ademe, en una excavación subterránea, es la estructura que debe colocarse para proteger la excavación inmediata después de la tronada, llevándose o no este soporte lo más cercano posible en el frente de la excavación; debe planearse para trabajar temporalmente hasta en tanto no sea colocado el revestimiento definitivo, debe también diseñarse con una estimación de cargas que depende de las características de la roca que imperan en la velocidad de la galería y de las dimensiones de la sección. Dentro de las estructuras de carácter temporal, destacan por su facilidad de colocación los marcos que pueden ser metálicos o de madera; la elección en caso de duda depende del punto de vista económico básicamente, sabiéndose de antemano que las secciones medianas a grandes se conviene utilizar el marco de acero como se aprecia en la Figura 32.

Las ventajas principales del marco metálico sobre el marco de madera son las siguientes:

- Más ligero.
- Colocación rápida.
- Mayor economía.
- Menor sección de excavación.
- Requiere menor volumen de concreto.
- Refuerza la sección de concreto.
- Ocupa menor espacio en el túnel.

Para secciones pequeñas puede en algunos casos ser más económica la protección con marcos de madera. Los marcos de madera deben de quedar fuera de la sección teórica de revestimiento, ya que sus características de resistencia y duración son más desfavorables, en cambio el marco de acero debe quedar integrado a la sección teórica de revestimiento definitivo, esto queda previsto al diseñar el espesor de concreto preservando así marcos metálicos contra corrosión y aumenta con esta combinación el factor de seguridad en la protección definitiva del túnel.

Otra ventaja del marco metálico es que requiere menos cantidad de personal para su colocación dentro del túnel; en cambio el marco de madera se coloca con personal especializado que cada vez es más difícil de conseguir; el marco metálico se coloca, casi armado, con mucha rapidez y requiere de personal especializado, pero su enseñanza es más rápida y fácil.

Hay que también tener en cuenta, entre otros aspectos que se adapta con dificultad a cambios de geometría o a secciones de formas variables, además consume un cierto espesor de la sección recta no despreciable. Su refuerzo o su reestructuración en zonas que se vean sobre esforzadas, resulta muy laborioso y con frecuencia se realiza a partir de sobreexcavar o reponer piezas para no invadir la sección útil, con los riesgos consiguientes de estabilidad local.

Los marcos deben de colocarse en línea y nivelados de acuerdo al proyecto, al terminar la limpieza de rezagar antes de iniciar la barrenación siguiente; el espacio entre la pared interior del marco y el terreno natural se retaca con madera formando con ello zonas continuas que transmiten las cargas al marco y que son fijados firmemente con cuñas de madera.

Los segmentos de los marcos de madera se ligan entre sí con clavos, así como con separadores; en el caso de los marcos metálicos se ligan con tornillos y soldadura.

Las partes de los marcos deben de colocarse con un "escantillón" para garantizar la separación transversal, que tenga una marca o "punto" al centro del mismo, para que ligado provisionalmente a las patas del llamado en su parte inferior se mueva a uno y a otro lado, de acuerdo a las indicaciones del topógrafo para que el punto quede en coincidencia con lo visual del tránsito que dará el alineamiento por el eje del túnel.

La parte superior de los postes se alinearán en la misma forma que la inferior. Una vez nivelados y centrados los postes del marco, se ligan al marco anterior con sus respectivos tensores y separadores. Para que un marco metálico trabaje, es necesario que este sea vertical en el sentido longitudinal, la cual se puede comprobar con un nivel de albañil, después de instalado el marco vertical, se procede al montaje de los arcos con la ayuda de un malacate auxiliándose en caso necesario con la plataforma de barrenación.

El topógrafo con el tránsito dirige la maniobra centrando el arco, dirigiendo su visual a la unión de las piezas.

Verificada la posición correcta se procede de inmediato al retaque de madera, que consiste en el aseguramiento (castigo), del marco.

El castigo del marco consiste en la transmisión de cargas a través de los bloques de madera entre el patio exterior del marco y la superficie de la excavación, estos puntos deben ser dos en la clave, uno en cada extremo del eje horizontal y varios puntos más a uno y otro lado del eje, equidistantes del eje del marco, según sea el tamaño de la sección.

El retaque propiamente dicho consiste en rellenar en forma ordenada con madera el espacio entre los bloques de madera y el terreno en el claro entre dos marcos, soportando la roca pero sin llegar a cubrirlo totalmente para el retaque de madera, debe necesariamente analizarse la utilización de las cuñas de madera colocadas convenientemente. La madera que se utiliza para ello es de 2" x 8" x 8", 4" x 8" x 8" y cuñas de 3" x 6" x 8".

La elección del ademe metálico depende del método de ataque elegido y éste depende de las características de la roca y de las dimensiones de la sección de excavación.

Los métodos de excavación más usados son:

- A sección completa.
- Media sección superior y de banqueo.
- Media sección superior en primera etapa y banqueo en segunda etapa.
- Con túneles pilotos.

La rigidez de apoyo de la estructura de ademe en el piso (rastras, zapatas), tiene también una importancia fundamental en la resistencia global de dicha estructura, ya que quedan ubicadas en los rincones más inaccesibles del piso, donde suele acumularse agua y donde con frecuencia queda muy fracturado o alterado el terreno por el explosivo, o por cualquiera que sea el método de excavación; considérese entonces que no es rara su colocación defectuosa y que a su deformación propia se añade la del piso de apoyo, la cual puede ser importante si ha sido aquel deteriorado por el agua o por el procedimiento constructivo y, como la supervisión de estos elementos raramente se hace, debido a su inaccesibilidad (muchas veces quedan cubiertos por rezaga o sumergidos en el agua), es razonable suponer que la distribución real de esfuerzos no

tendrá en general parecido con la supuesta en el análisis de la estructura de ademe para su diseño.



Figura 32.  
Soporte temporal con marcos.

#### 4.3.2.- Anclas.

En México existe la costumbre de emplear pernos de roca para detener bloques o lajas de roca suelta en minas subterráneas; en obras civiles es menos frecuente verlos usar. La aplicación más sencilla es la de pernos puntuales o aislados para evitar posibles desprendimientos locales. En los casos de rocas más fracturada es necesario ampliar la acción individual; así, por ejemplo, se prolonga la presión en la cabeza de cada perno con placas o madrinas y también se pone malla sujeta a los pernos para que queden en ella atrapados los fragmentos de roca sueltos.

Las anclas o pernos de soporte, en uno de forma temporal, consiste en colocar los pernos del tipo y de la longitud adecuados, ligados uno entre sí con canales de fierro siguiendo un patrón previamente establecido comprimiendo la roca antes que empiece a sufrir deformaciones, con el fin de que el sistema de roca-pernos sea capaz de autosoportarse y soportar la correspondiente carga de roca, excepto cuando las anclas soportan fragmentos sueltos. Será condición necesaria que los sistemas de anclaje se

coloquen inmediatamente después de abrir las excavaciones y que la roca sea competente, para lo que deben hacerse pruebas previas de la capacidad de la roca.

No hay un procedimiento generalizando para calcular un sistema de anclaje, por lo que para cada caso se analizará el mecanismo de falla de la roca y se determinará el número necesario de acuerdo al patrón de la barrenación más conveniente en función de la capacidad de los pernos.

Los detalles de refuerzo con pernos, deben basarse en la información geológica sobre la localización de fallas, grietas, juntas, sismos, propiedades físicas de las rocas, etc. Un espaciamiento basado en las condiciones de la superficie de la excavación, puede tener consecuencias graves. El perno de anclaje consiste en una varilla de fierro liso o corrugado que se hace trabajar a tensión quedando fijo un extremo dentro de la masa de roca en un barreno perforado previamente de diámetro y longitud adecuados, el otro extremo generalmente con cuerda fuera de la roca, sirve para aplicar la tensión con el par indicado con una llave de impacto.

En algunas ocasiones se utilizan barras de acero de refuerzo sin tensor para estabilizar la roca, actuando pasivamente, es decir, la roca se afloja antes que el perno y puede ejercer compresión alrededor de la excavación.

La resistencia de un perno de roca esta definida por su longitud de anclaje y se considera competente si la tensión aplicada puede llegar al límite elástico del acero; en la práctica de tensión que se aplica a los pernos es del orden de  $2/3$  del límite elástico.

Desde hace algún tiempo se han venido usando los pernos con mortero de cemento, con el fin de que trabajen permanentemente protegiéndolos contra la corrosión y contra posibles pérdidas de tensión originados por sismos, voladuras, etc., ésta condición favorable hace que la compresión efectiva de la roca no se pierda y ha difundido más la utilización de los pernos de anclaje.

Los pernos de anclaje se pueden dividir en dos clases principales que son los siguientes:

➤ Pernos por Expansión.

Son los pernos que se fabrican en la obra, los de cuña y pernos de concha de expansión.

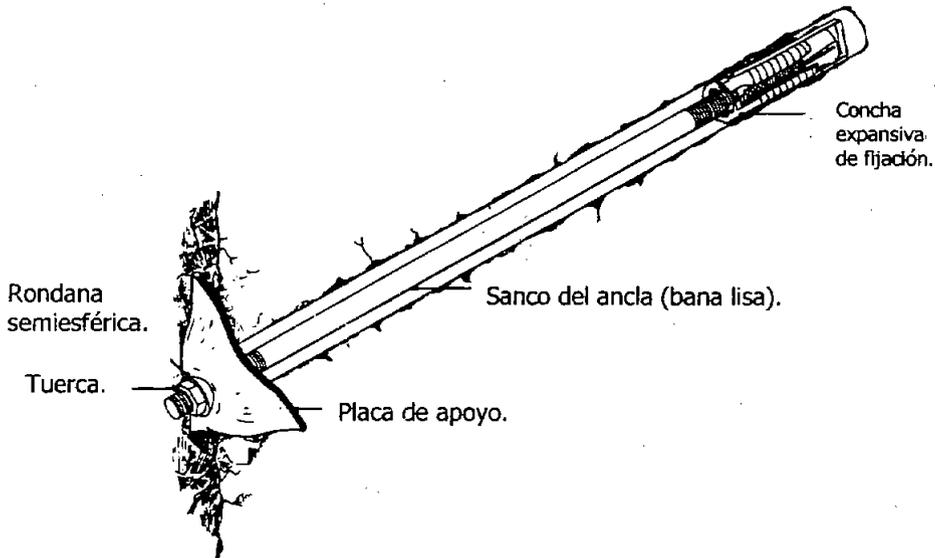


Figura 33.  
Anclaje por expansión.

Tabla 11.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Tipo del acero.	700 N/mm <sup>2</sup>	70 kp/mm <sup>2</sup>	102 kpsi
Diámetro del acero.	16 mm	16 mm	5/8 in
Capacidad de carga del acero.	140kN	14 tons	15.5 tons
Capacidad de carga a la ruptura.	180 kN	18 tons	20 tons
Deformación antes de la ruptura.	14 %	14 %	14 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	2 kg/m	2 kg/m	1.34 lb/ft
Longitud de las anclas.			
Diámetro de la perforación recomendada.	35 - 38 mm	35-38 mm	1 3/8 in

#### Ventajas.

Es relativamente barata. El ancla produce una acción de soporte inmediata después de la instalación. Al darle vueltas al ancla, se puede aplicar un par de fuerzas a la cabeza del ancla y la tensión se acumula en el ancla: En rocas duras se pueden alcanzar cargas altas.

Desventajas.

Esta limitada a usarse en rocas medianamente duras a rocas duras. Es difícil de instalarse con confiabilidad. Deberá efectuarse la comprobación mediante pruebas de se tenso adecuadamente. Comúnmente se tienen pérdidas de la capacidad del esfuerzo o tensión que como resultado de vibraciones por explosivos o rompimiento de fragmentos de roca bajo la placa de apoyo cuando se tienen fuerzas altas de contacto. De preferencia deben ser usadas para refuerzo temporal al menos que sean protegidas contra la corrosión; inyectándolas posteriormente a su colocación

➤ Pernos de Fricción o Inyección.

Pueden ser desde simples varillas de fierro corrugado de corta longitud introducidas en un barreno que previamente ha sido llenado con mortero fresco y los pernos de expansión de cuña con inyección de mortero posterior al tensado.

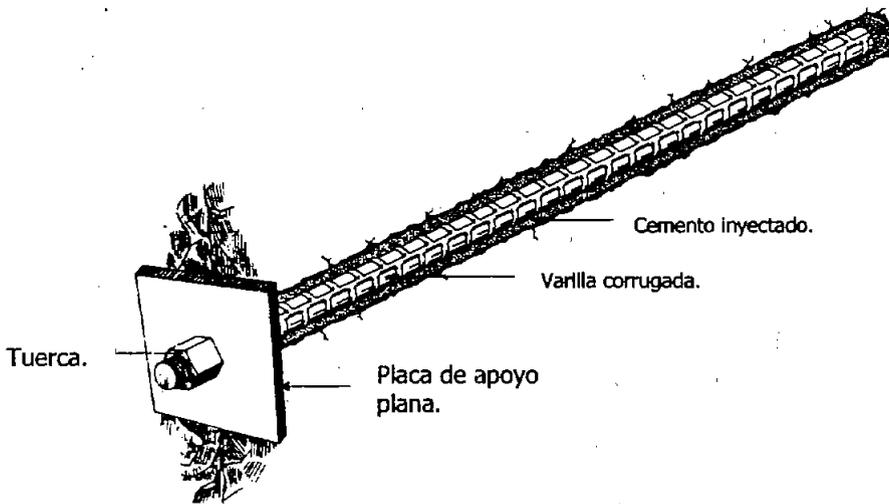


Figura 34.

Ancla de roca inyectada con cemento-varilla corrugada.

Tabla 12.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Tipo del acero.	570 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/mm <sup>2</sup>	83 kpsi
Diámetro del acero.	20 mm	20 mm	7/8 in
Capacidad de carga del acero.	120kN	12 tons	13 tons
Capacidad de carga a la ruptura.	180 kN	18 tons	20 tons
Deformación antes de la ruptura.	15 %	15 %	15 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	2.6 kg/m	2.6 kg/m	1.75 lb/ft
Longitud de las anclas.			
Diámetro de la perforación recomendada.	35 ± 38 mm	35 ± 38 mm	1 3/8 in

#### Ventajas.

Este es un sistema competente y durable de refuerzo cuando las anclas son bien instaladas, para comentarios posteriores. El sistema permite una capacidad alta de carga o refuerzo en condiciones de rocas duras.

#### Desventajas.

El uso de cemento estándar en la inyección requiere de varios días de curado antes que el ancla pueda tomar su carga total. La calidad de la inyección y la mezcla inyección es difícil de comprobar y mantener constante. No puede usarse en agujeros que tengan flujo de agua. En tensar el ancla de roca solamente es posible si se utilizan procedimientos especiales de instalación.

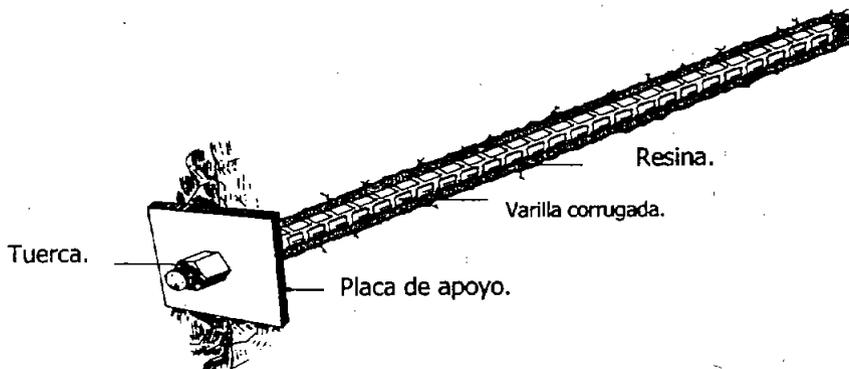


Figura 35.

Varilla de anclaje de roca inyectada con resina-varilla corrugada.

Tabla 13.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Tipo del acero.	570 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/mm <sup>2</sup>	83 kpsi
Diámetro del acero.	20 mm	20 mm	7/8 in
Capacidad de carga del acero.	120kN	12 tons	13 tons
Capacidad de carga a la ruptura.	180 kN	18 tons	20 tons
Deformación antes de la ruptura.	15 %	15 %	15 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	2.6 kg/m	2.6 kg/m	1.75 lb/ft
Longitud de las anclas.			
Diámetro de la perforación recomendada.	Max. 30 mm	Max. 30 mm	Max. 1 3/8 in

#### Ventajas.

Si se instala adecuadamente, este es un sistema competente y durable, para comentarios posteriores. El sistema permite dar una capacidad alta de carga en condiciones de roca dura. El ancla da un soporte rápido de acción después de la instalación. Si se utiliza una resina solidificación rápida, para anclar el fondo de la barra, el ancla de roca puede ser tensionada y después inyectada.

#### Desventajas.

El diámetro del agujero es crucial para la colocación adecuada y mezcla de la resina, como también para el relleno del espacio anular entre el ancla de roca y la pared del agujero. Las dificultades con los cartuchos de resina en un ambiente subterráneo pueden llegar a afectar la instalación adecuada, la resina puede ser sucia y difícil de manejarse, también contaminante. La resina tiene una vida limitada.

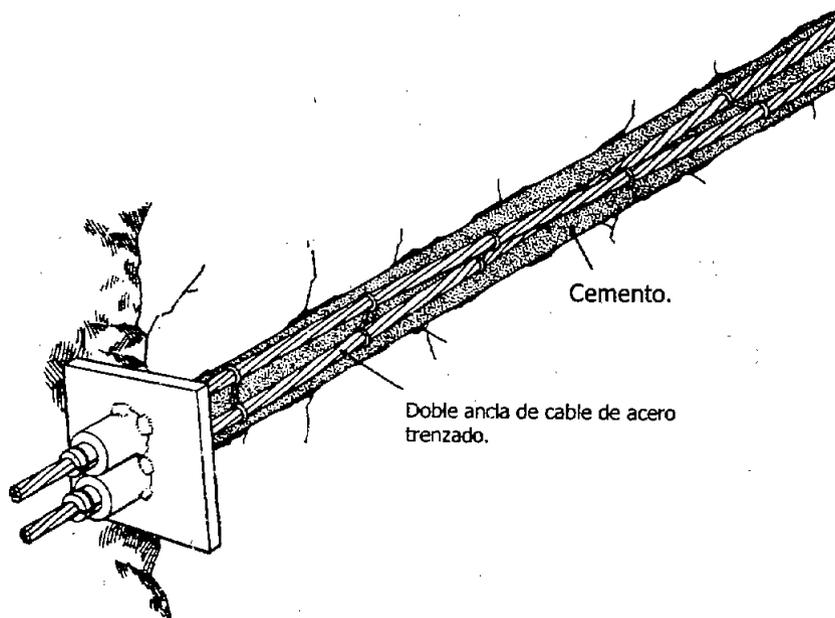


Figura 36.

Anclas de acero inyectado-doble cable trenzado con cemento.

Tabla 14.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Tipo del acero.	1950 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/mm <sup>2</sup>	283 kpsi
Diámetro del cable.	2 x 15.2 mm	2 x 15.2 mm	2 x 5/8 in
Capacidad de carga del cable.	500 kN	50 tons	55 tons
Capacidad de carga a la ruptura.	500 kN	50 tons	55 tons
Deformación antes de la ruptura.	4.8 %	4.8 %	4.8 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	2.1 kg/m	2.1 kg/m	1.41 lb/ft
Longitud de las anclas.			
Diámetro de la perforación recomendada.	48 - 64 mm	48 - 64mm	2 - 2 1/2 in

**Ventajas.**

Barato, bien instalado es un sistema competente y durable de refuerzo para comentarios adicionales. Este sistema provee una capacidad alta de carga en condiciones de roca dura, puede ser instalado en cualquier longitud en áreas estrechas.

**Desventajas.**

El uso de cemento estándar en la inyección requiere de varios días de curado antes de se le puede dar al cable la carga total. La calidad de la mezcla y el inyectado es difícil de verificar y mantener constante. Es difícil de usarse en agujeros con flujo de agua. El tensionamiento del ancla del cable solo es posible si se siguen procedimientos especiales de instalación.

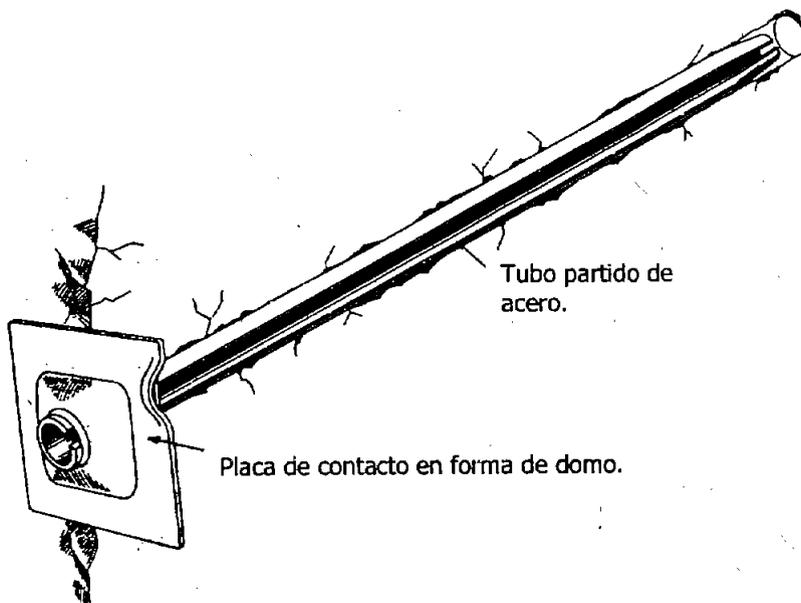


Figura 37.

Anclas de tubo partido fijadas por fricción - Split Set © SS-39/SS-46.

Tabla 15.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Diámetro del tubo.	39/46 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/mm <sup>2</sup>	283 kpsi
Diámetro del acero.	90/135 mm	2 x 15.2 mm	2 x 5/8 in
Capacidad de carga del tubo.	110/163 kN	50 tons	55 tons
Deformación antes de la ruptura.	16/16 %	16/16 %	16/16 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	1.8/2.8kg/m	1.8/2.8 kg/m	1.2/1.9 lb/ft
Longitud de las anclas.	0.9-3/0.9-3.6m	0.9-3/0.9-3.6m	3-10/3-12 ft
Diámetro de la perforación recomendada.	35-38/41-45mm	35-38/41-45mm	13/8-11/2 / 15/8-13/4in

#### Ventajas.

La instalación es simple. Da un acción de soporte inmediata después de la instalación. No se necesita otra cosa más que una pierna de pistola o una pistola de jumbo para su instalación. Permite una fácil aplicación de la malla de acero.

#### Desventajas.

Es relativamente cara. El diámetro del agujero es crucial en la prevención de la falla durante la instalación y de la fuerza que se intenta aplicar a la roca. La instalación exitosa de anclas largas es muy difícil no se puede usar para instalaciones permanentes al menos que se proteja contra la corrosión. El tubo de acero es sensitivo a la corrosión tanto dentro de túneles como en superficies exteriores.

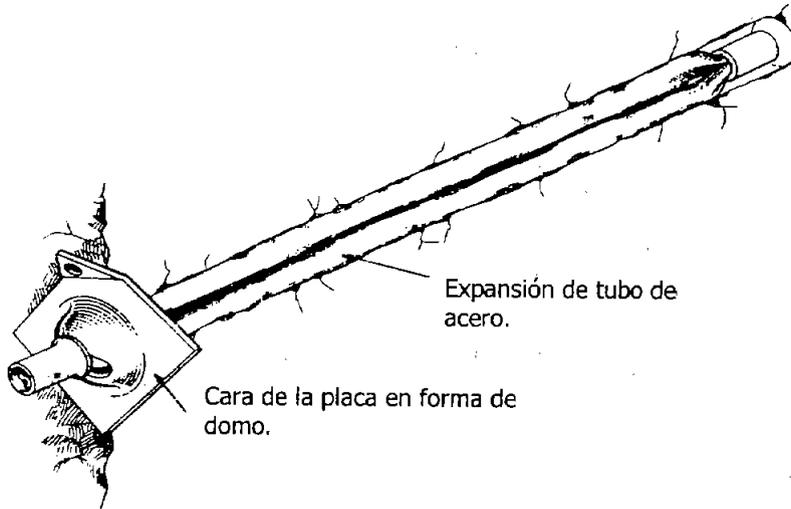


Figura 38.

Anclas de roca fijadas por fricción tipo swellex ® EXL/super.

Tabla 16.

DATOS TÉCNICOS TÍPICOS.	UNIDADES SI.	MÉTRICAS.	INGLESAS.
Diámetro del tubo.	26/36 mm	26/36 mm	1 / 1 3/8 in
Capacidad de carga del tubo.	100/205 kN	10/20 tons	11/22 tons
Capacidad de carga a la ruptura.	110/215 kN%	11/22 tons	12/24 tons
Deformación antes de la ruptura.	20/15 %	20/15 %	20/15 %
Peso del ancla sin placa de apoyo y tuerca.	2/4 kg/m	2/4 kg/m	1.34/2.68 lb/ft
Diámetro de la perforación recomendada.	35 ±4/48±4 mm	35 ±4/48±4 mm	1 3/8 / 1 7/8 in

#### Ventajas.

Instalación rápida y simple. Da un acción de soporte inmediata después de su instalación. Puede ser utilizada en una gran cantidad de condiciones de terreno. La instalación causa una contracción tanto en el ancho como en la longitud. Tiene una tensión efectiva contra la placa de soporte colocada en la superficie de la roca.

## Desventajas.

Relativamente cara. Instalaciones permanentes a largo plazo requieren anclas recubiertas. Requiere una bomba para su instalación. Las condiciones del terreno varían en un rango muy amplio. Esto implica que los problemas de estabilidad pueden tener grandes diferencias de acuerdo a las condiciones prevalecientes del terreno. Las medidas de soporte de roca deberán por eso adaptarse a las condiciones actuales de roca. La experiencia ha demostrado que las anclas de roca muy a menudo deben de aplicarse en combinación con un soporte superficial para hacerla más efectiva y confiable. El efecto del soporte superficial es el de proporcionar confinamiento superficial a la roca fracturada y de esta manera soportar o retener la roca entre las anclas de roca. Las dos medidas combinadas deben actuar para preservar la integridad del macizo rocoso. La adaptación del ancla a las condiciones reales del terreno se efectúa respectivamente variando el tipo de ancla, de las cantidades y cualidades de las anclas de roca y el soporte superficial. Ejemplos de tipos de soportes superficial son: placas, malla de acero, concreto lanzado y tirantes o solerás de acero.

Las anclas soportan la roca de las excavaciones subterráneas mediante las suposiciones siguientes:

## a).- Por Suspensión.

Cuando se colocan aisladamente para soportar fragmentos de roca que pueden desprenderse.

## b).- Formando Vigas a Losas.

Este concepto se ha utilizado con buenos resultados en rocas sedimentarias, aunque es válido para cualquier tipo de roca de buena calidad; en los techos planos de las excavaciones en donde se utilizan para completar el concepto de trabe compuesta, tirantes o canales para observar las tensiones. Las anclas unen entre sí a los estratos que no tienen adherencia, formando la viga autosoportante capaz de soportar la correspondiente carga de la roca.

## c).- Formando Arcos.

Los arcos de la sección de las galerías se refuerzan igualmente formando una sección capaz de resistir la carga de la roca; la tensión de los pernos, forma una zona alrededor de la excavación.

## d).- Reforzando excavaciones de secciones irregulares.

En donde se presentan concentraciones de esfuerzos de compresión, tensión a corte ocasionados por la geometría o por el método de construcción.

En el campo con el fin de que este sistema de protección de los resultados buscados, es necesario seguir las reglas básicas:

- Localizar con pintura en el perímetro de la sección del túnel la posición de los pernos.
- Perforar los barrenos en la dirección indicada en el diseño.
- Colocar el perno con la concha de expansión casi totalmente cerrada, inmediatamente y sostenida en la posición. Se efectúa la expansión girando el cuerpo del perno a mano.
- Se coloca después de la placa y tuerca los demás accesorios apretando la tuerca a mano.
- Se aprieta el perno de acuerdo con las pruebas previas con una llave de par (torquímetro).
- Si hay que ligar las anclas con fierro canal o malla de alambre, estos elementos se dejan sujetos debajo de la placa.
- Después de cada voladura, los pernos de soporte deben revisarse apretándolos.

Si la masa de roca no es suficientemente competente conviene inyectar; en terrenos suaves es importante utilizar anclas de fricción.

Se deberá de tener un mantenimiento y supervisión estricta durante la etapa constructiva.

Por lo que se refiere al ademe de anclas hay una cierta resistencia hacia su empleo ya que la estructura tiene sus inconvenientes, que también hay que tomarlos en cuenta a la hora de realizar el diseño como lo es su carácter puntual y discontinuo que debe suplirse con otros elementos de liga y distribución o con patrones de anclaje más cerrados que procuren el traslape de acciones individuales; la dificultad de acceso para la perforación y la instalación de puntos donde más se requieren; dicha dificultad puede interferir en otras actividades del ciclo; la dificultad de supervisión y prueba porque implica la estrecha vigilancia del trabajo por gente especializada y la realización de pruebas in situ selectivas que enfrentan problemas de inaccesibilidad e interferencia; la escasez o la diferente calidad de las señales de alarma que puedan advertir con tiempo la presencia de zonas de debilidad. Todos estos inconvenientes, como es fácil suponer, tienen en gran medida solución, pero ella puede hacerse esperar por mucho tiempo si el procedimiento se acepta de mal grado o se rechaza con base en aparentes fracasos.

#### 4.3.3.- Concreto Lanzado.

En sus principios la utilización del concreto lanzado no difería mucho de la gunita o mortero lanzado, que es su antecesora y a la que se le daba la función exclusiva de recubrimiento

Consiste en conducir y proyectar neumáticamente a través de una manguera de alta presión y resistente al desgaste de una mezcla convenientemente dosificada de concreto fresco.

Una de sus cualidades más apreciadas es su capacidad extraordinaria de incluir la resistencia intrínseca del terreno, es decir su autosoporte. El concreto lanzado la hace posible en virtud de estas características únicas:

- Una adherencia con la superficie del terreno promovida por aditivos y por acción mecánica (martilleo y empastado), que ejerce sobre aquélla, la mezcla lanzada a gran velocidad.
- Una rigidez paulatina creciente al adquirir un fraguado y un endurecimiento progresivo conforme la pasta plástica inicial va convirtiéndose en un auténtico concreto.
- Un trabajo de membrana en el que el escaso espesor comparado con la gran superficie cubierta por el concreto lanzado y las sinuosidades resultantes de su adaptación a las desigualdades del contorno excavado, proporcionan resistencia y flexibilidad a la vez.
- Una continuidad, una densidad y una consistencia muy útiles para abrigar al terreno y protegerse así mismo contra el deterioro por efectos del intemperismo o de otros fenómenos que se hacen presentes a través del tiempo y que pueden afectar la estabilidad.
- Una facilidad especial para aplicarse con prontitud en espacios de diferentes tamaños y en contornos de diferentes geometrías.

Existen dos procedimientos para la mezcla del concreto lanzado: Mezcla húmeda y Mezcla seca.

El procedimiento de mezcla húmeda, consiste en mezclar agregados y cemento con el agua previamente y expulsar el producto por una boquilla en el extremo de la manguera; tiene la ventaja del control rígido de agua cemento considerando la resistencia buscada; desde el punto de vista de la colocación, es menos flexible que la mezcla seca por ésta misma condición, tiene la desventaja de poder mezclar correctamente los aditivos acelerantes, ya que por su acción rápida debe de añadirse

necesariamente en la boquilla, no siendo posible hacer una buena mezcla entre el acelerante y el concreto fresco antes de la expulsión.

La mezcla seca consiste en dosificar en seco y pasar la mezcla a la lanzadora; el agua se añade en la boquilla y la regula el operador de lanzado, los aditivos se añaden en la lanzadora si son polvos, si son líquidos se mezclan con el agua antes de llegar a la boquilla.

Puede usarse como soporte temporal haciendo las veces de ademe pesado, trabajando monolíticamente con la roca y con la condición de que se coloque inmediatamente después de la excavación y de que la mezcla con el aditivo produzca un fraguado muy rápido y una buena resistencia temprana.

El concreto lanzado puede definirse como concreto transportado a través de una tubería o manguera y proyectado neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie. El impacto producido sobre la superficie compacta al concreto.

En caso de túneles es cada día mayor la aplicación de este tipo de concreto, ya sea como soporte temporal o como revestimiento definitivo.

Es importante hacer notar, que generalmente el concreto lanzado no actúa como una bóveda que soporta la roca, sino esencialmente como sellado de la misma. En el marco de una construcción mixta que consta de: concreto, acero y roca, esto es que el concreto actúa como un estabilizador de la roca o suelo, formando con él un conjunto autoportable aún cuando en algunos casos sea necesario reforzarlo.

Como ya se mencionó anteriormente en función del mezclado de los materiales existen dos procedimientos o métodos de lanzado; uno conocido como "mezcla seca" y el otro como "mezcla húmeda".

#### 4.3.3.1.- Procedimiento de "Mezcla Seca".

Este procedimiento consiste básicamente en mezclar en seco los componentes sólidos del concreto en la proporción que se deben emplear (cemento, gravilla, arena, aditivo), esta mezcla se introduce en la lanzadora y se transporta neumáticamente por la tubería hasta una boquilla especial, en la cual a través de un múltiple perforado se introduce el agua a presión mezclándose con los ingredientes secos del concreto.

El método vía seca consiste básicamente en lo siguiente:

- a) Se prepara una mezcla de cemento, agregados secos o con su humedad natural (del 3 al 6%), Fibras metálicas (si son especificadas), y en su caso aditivos en polvo; mezclados hasta conseguir una perfecta homogeneidad. (Recuerde que el

rebote de fibras en el concreto lanzado es muy alto por lo que se debe de poner dosificaciones mayores).

- b) La mezcla se carga en la máquina lanzadora, en ese momento se pueden agregar los aditivos acelerantes en polvo para conseguir resistencias iniciales altas y disminuir el rebote.
- c) El equipo introduce el material hacia la manguera, mediante el empleo de aire comprimido.
- d) El material es transportado mediante aire comprimido hacia la boquilla a gran velocidad.
- e) En ésta se introduce agua a presión a través de un anillo de distribución que corta el paso del material seco, humedeciéndolo junto con el aditivo acelerante líquido, si se usa, mezclándose con los demás ingredientes.
- f) La mezcla ya húmeda es lanzada a alta velocidad desde la boquilla hacia la superficie, compactándose simultáneamente con la colocación.

#### Ventajas:

La aplicación por vía seca presenta ventajas en los siguientes aspectos:

- El agua de mezclado y la consistencia de la mezcla se controlan directamente en la boquilla, lo que permite adaptarse a condiciones variables de colocación y a las variaciones de la humedad del agregado.
- Permite mayores distancias de transporte.
- Se simplifican las operaciones de inicio y término con un mínimo de pérdida y mayor flexibilidad de colocación.
- Requiere bajas relaciones de agua -cemento.
- Permite obtener una mayor energía de compactación.
- La máquina de impulsión es generalmente más económica.

#### Desventajas:

- Tiende a generar polvo.
- Mayor cantidad de rebote 30 %.

- Presenta variaciones en la dosificación del agua, en la homogeneidad en la mezcla y en las resistencias.
- Requiere mayor habilidad del lanzador para su colocación.
- Mayor desgaste de piezas del equipo.
- Bajo rendimiento de colocación.

Los concretos y morteros lanzados por vía seca, tienen una muy amplia gama de aplicaciones, con la sola excepción de obras en espacios cerrados y estrechos en las que, incluso, una generación reducida de polvo y rebote pueda dificultar la colocación.

#### Control de Filtraciones.

En las sitios donde se encuentran flujos de agua estos deben controlarse y canalizarse, mediante instalaciones de tubos de plástico o fierro, de tal modo que la mayor parte del flujo pase por el tubo, inmediatamente después se sella con concreto lanzado o bien con mortero.

En las zonas donde la cantidad de agua sea pequeña que no se puede drenar como se indicó anteriormente, se puede aplicar el concreto lanzado probablemente y disminuyendo el contenido de agua, permitiendo al concreto lanzado absorber algo de agua del escurrimiento.

El sellado más efectivo del túnel de concreto lanzado se logra cuando se lanza en todo el perímetro del túnel, en la bóveda y los muros, colocando después una losa de fondo. Si no se colocan drenes el revestimiento debe ser de espesor suficiente para resistir las presiones hidrostáticas.

#### Equipos para vía seca.

Los equipos para vía seca se dividen en dos tipos, el equipo de doble cámara y los de alimentación continua:

##### a) Los equipos de doble cámara.

El primer equipo inventado fue de este tipo, de doble cámara, todavía hay algunos equipos funcionando, pero muy rara vez se emplean en trabajos de construcción subterránea. Este equipo se alimenta en la cámara superior por bachadas. Se requiere gran habilidad para operar este tipo de equipos.

b) Equipos de alimentación continua.

Este tipo de equipos fue introducido en los 60's, actualmente existen dos variantes el tipo tazón y el de tipo Rotor.

El tipo tazón se alimenta por la tolva, el material es desplazado por un agitador hacia el depósito que alimentará al tazón. Mientras el tazón gira se introduce el material por gravedad. La almohadilla sella el aire comprimido y lo dirige hacia un área específica del tazón. La presión empuja al material hacia abajo y a través de la salida del equipo al cual se conecta la manguera que llevara el material hasta la boquilla.

El tipo rotor, a diferencia del equipo anterior, se alimenta el material en la tolva, con ayuda del agitador introduce por gravedad el material a un cilindro del rotor, el cual está girando y se sella con la almohadilla, la cual lo pasa bajo el flujo de aire a presión el cual descarga el material directamente a la manguera.

La diferencia entre los dos equipos es el sistema de sellado de la cámara. El equipo de tazón es un poco más sensible al contenido de humedad en la mezcla, y tiende a crear una costra de concreto en los tazones ya que el material es empujado hacia abajo y hacia afuera. Referente a la descarga de material el equipo tipo tazón es más productivo, mientras que el de tipo rotor puede manejar una mayor variedad de mezclas.

Boquillas para vía seca.

Existen boquillas de diversas formas, tamaños y materiales. Las boquillas se colocan al final de la manguera y funcionan con el mismo principio básicamente; en la vía seca, la boquilla está formada por una punta, un anillo de distribución de agua, una válvula de control y el cuerpo de la boquilla. La función del anillo de distribución, el cual se localiza dentro del cuerpo, es la crear una "red" por la cual debe de pasar el material, impulsado por el aire comprimido. La eficiencia depende de la presión del agua la cual debe ser por lo menos 15 psi mayor que la presión del aire, así como la habilidad del lanzador a la hora de ajustar el flujo de agua. La punta nos ayuda a mezclar el concreto.

Entre mayor sea la presión del agua es mejor. Si la presión del agua no es mayor que la presión del material que pasa por la manguera, solo empujará el agua humedeciendo solo la parte exterior de la corriente del material y el centro estará seco formándose mucho polvo.

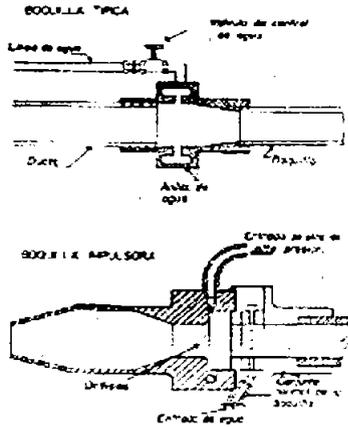


Figura 39.  
Boquillas para mezcla seca.

La presión no tiene nada que ver con el volumen de agua que se utiliza para hacer la mezcla.

Se debe tener una presión del agua mínima de 0.10 mpa en el anillo de distribución. El anillo de distribución se debe remover y limpiar perfectamente al término de cada jornada ya que un anillo de distribución limpio es esencial para el adecuado desempeño del concreto lanzado vía seca.

Los propulsores de agua deben de ser capaces de suministrar por lo menos 10 gal/min a 60 psi en la boquilla para boquillas estándares, el agua debe de ser constante y de 15 a 30 psi mayor que la presión del aire.

#### 4.3.3.2.- Procedimiento de Mezcla Húmeda.

Con este procedimiento se mezclan previamente a la introducción en la lanzadora los componentes sólidos y el agua; puede considerarse este procedimiento como un concreto bombeado a alta velocidad a través de una tubería hasta una boquilla conectada a una línea de aire comprimido, que proyecta el concreto con fuerza y velocidad sobre una superficie.

Su proceso comprende las etapas siguientes:

- a) Se mezclan el cemento, los agregados, el agua y los aditivos, exceptuando el acelerante hasta conseguir una mezcla homogénea. Con el revenimiento mínimo que pueda ser bombeado, un revenimiento entre 8 y 20 cm es deseable.
- b) El concreto o mortero se carga en la tolva de la máquina lanzadora.
- c) La mezcla se introduce hacia la manguera de transporte.
- d) El material es transportado por desplazamiento mecánico similar al del concreto bombeado (flujo denso). En la boquilla se inyecta aire a presión para incrementar la velocidad, y es donde los aditivos acelerantes se adicionan habitualmente. El aire comprimido se añade en la boquilla para descompactar la mezcla y darle velocidad necesaria para el lanzado.
- e) El concreto o mortero es lanzado a alta velocidad contra la superficie, compactándose junto con la colocación.

Debido al método de impulsión desde la máquina a la boquilla, se asemeja a un concreto bombeado tradicional.

Ventajas:

La aplicación por vía húmeda presenta ventajas tales como:

- El agua de mezclado es controlada en la etapa de mezclado dosificándose con mayor precisión.
- Permite reducir la cantidad de agua mediante el adecuado empleo de aditivos plastificantes y superfluidificantes.
- Se logran mezclas más homogéneas, con mejores resistencias a compresión y más uniformes.
- Mejor adherencia.
- Disminuyen las pérdidas de cemento y la generación de polvo.
- Normalmente produce mucho menos rebote. Con equipos adecuados y mano de obra calificada se obtiene rebotes que oscilan entre el 5 y el 10 % incluyendo concreto lanzado con fibra.
- Permite obtener mayores volúmenes de producción.

- Mejor ambiente de trabajo, al prácticamente no existir el polvo.
- Ideal para la aplicación de fibras.
- Más económico.

#### Desventajas:

- Distancia de transporte limitada.
- Limpieza.
- Línea más pesada.

El concreto lanzado se utiliza cada vez más. Actualmente, el desarrollo de la proyección por vía húmeda esta en pleno apogeo. Se está perfeccionando debido a la creación de nuevos aditivos y adiciones, logrando relaciones agua-cemento menores, una mayor resistencia y obteniendo concretos de una mejor calidad que le permitirá irse posesionando del mercado. En algunos países tales como Noruega, Suiza, Francia, Hong Kong, es en la actualidad el único método empleado.

La colocación de morteros y concretos por vía húmeda ha adquirido cada vez más importancia en construcciones subterráneas, como túneles, minas y otras obras que requieran grandes volúmenes de colocación, o sean muy sensibles a la presencia de polvo y rebote.

El concreto lanzado vía húmeda es más económico que el concreto lanzado vía seca.

#### Mezclas.

La calidad del concreto lanzado depende de la calidad de los materiales, de la granulometría, de los agregados, de la relación agua cemento y del grado de compactación. Un agregado bien graduado nos da buena compactación, densidad, impermeabilidad y resistencia.

Los aditivos acelerantes del fraguado dan al concreto lanzado, sus características más apreciadas, debe dosificarse entre el 2 y el 6% del peso del cemento y estos deben ser compatibles con el concreto.

#### Equipo vía húmeda.

El concreto lanzado vía húmeda es colocado principalmente por una bomba de concreto. Las cuales empujan al concreto por la manguera hacia la boquilla. La mayoría

de las bombas de concreto son de desplazamiento positivo, y utilizan dos pistones en combinación con una válvula para empujar el concreto. La válvula se localiza en la tolva, y permite la alimentación con material al pistón que se encuentra vacío, simultáneamente el segundo pistón empuja al concreto, alternando una vez que este se encuentra vacío.

Hay otro tipo de bombas que en ocasiones se utilizan como bombas peristálticas las cuales exprimen al concreto por medio de rodillos mecánicos los cuales provocan el desplazamiento del concreto hacia la boquilla.

Mangueras y boquillas.

Las mangueras que se emplean en los trabajos de concreto lanzado, sirven para transportar concreto, aire y agua. Las mangueras deben de ser del tipo, resistencia y tamaño adecuado. Es muy importante que el diámetro interior de la manguera de concreto sea por lo menos 3 veces mayor que el tamaño máximo de agregado utilizado. Utilice exclusivamente mangueras diseñadas para concreto lanzado, ya que otro tipo de mangueras se puede desgastar muy rápidamente y explotar debido a la alta presión durante la aplicación.

Los acoplamientos entre mangueras no deben de obstruir o impedir el flujo de concreto, agua o aire y deben de contar siempre con dispositivos de seguridad para impedir que se separen durante la aplicación.

Siempre se debe de limpiar las mangueras inmediatamente terminado su uso.

Las mangueras de aire deben de soportar por lo menos el doble de la presión de operación. En el concreto lanzado vía seca se requiere una presión del aire de 700 kpa (100 psi).

Boquilla vía húmeda.

La boquilla está formada por una Punta de plástico, un anillo de distribución de aire, una válvula de control para el flujo de aire y otra para flujo de aditivo acelerante, y el cuerpo de la boquilla. El concreto llega al cuerpo de la boquilla a una velocidad de (3fps). Conforme el concreto avanza por la boquilla se encuentra con una corriente de aire comprimido.

La cual descompacta al concreto y le da la velocidad de lanzado. El aire debe de tener la fuerza suficiente para evitar que regrese el concreto y tape los orificios. Conforme el concreto es cortado por el flujo del aire, se mezcla con el aditivo acelerante líquido.

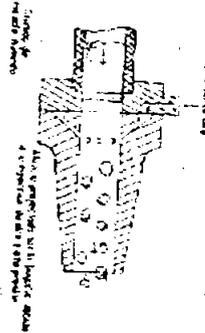


Figura 40.  
Boquilla para mezcla húmeda.

El aire comprimido sale en la boquilla a 150 fps mínimo. Se pueden obtener algunas características de adherencia, compactación o densidad con ayuda de los aditivos, en lugar de emplear la velocidad.

Existen diferentes formas y largos de las boquillas, la elección del tipo de boquilla esta en función del patrón de aplicación deseado. Con Boquillas con puntas cortas se obtiene un patrón ancho y con boquillas con puntas largas, uno delgado.

Equipo Auxiliar.

Equipo de mezclado.

En la mayoría de las aplicaciones de concreto lanzado vía húmeda se utiliza los camiones premezcladores que entregan el concreto directamente a la tolva del equipo. En trabajos donde el concreto lanzado es mezclado en sitio, se utilizan mezcladores portátiles que pueden operar ya sea por bacheadas o de tipo continuo. Los primeros son generalmente tambores rotatorios con aspas, que se alimentan los ingredientes y se mezcla hasta que se tiene una mezcla homogénea, se descarga y se reinicia el proceso de carga de materiales. Los de tipo continuo, cuentan con depósitos para cada ingrediente, los cuales son dosificados a través de bandas continuas o por tornillos sin fin que según su velocidad o tamaño gradúan los materiales los cuales se mezclan por un tornillo sin fin descargando a un depósito o directamente al equipo según se requiera. La dosificación de los materiales es más exacta por peso que por volumen.

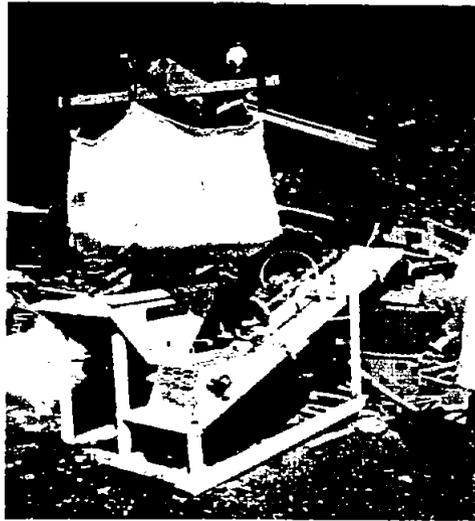


Figura 41.  
Equipo de mezclado.



Figura 42.  
Máquina controlada con control remoto para la colocación del concreto lanzado.

#### 4.3.3.3.- Funciones del Concreto Lanzado.

Una de las ventajas que tiene el concreto lanzado como método de soporte de túneles es su extrema flexibilidad, que le permite actuar como un recubrimiento final y adaptarse a diferentes tipos de rocas. Además de sus diversas propiedades tanto

estructurales como físicas, se puede aplicar en grandes cantidades disminuyendo las demoras en el avance e incrementando la seguridad y con un costo mucho menor que otros sistemas de soporte.

Cuando aplicamos el concreto lanzado contra la superficie de la roca, a altas velocidades, primero debemos llenar grietas, fallas, fisuras, y después aplicar una capa uniforme al resto de la superficie, incluyendo las zonas previamente lanzadas; Con ello se unen partículas parcialmente soportadas y se previenen deterioraciones futuras.

La primera capa que colocamos está constituida por la pasta de cemento (cemento y agua), y agregados finos menores a 0.2 mm, los cuales son transportados por el agregado grueso, el cual se encuentra cubierto de ellos inicialmente. Durante la construcción de esta primera capa el agregado grueso rebota casi en su totalidad, pero se deposita en la superficie de la roca el material más fino, los cuales se introducen y rellenan fisuras, grietas y juntas en el contorno de la roca y se compactan por impactos subsecuentes teniendo un efecto de pegado una vez que ha endurecido el concreto. Obtenemos así un efecto de cuna, (similar al mortero que empleamos para pegar ladrillos en una construcción tradicional).

Una vez que se ha colocado esta primera capa de material fino, permitirá a las partículas mayores incorporarse e incrementar los espesores que se están colocando, disminuyendo el rebote del material grueso. Compactándose con las proyecciones sucesivas.

La capa de concreto lanzado se adherirá a la superficie con una resistencia máxima de 3 Mpa, claro la adhesión es mucho mejor en rocas limpias, y rugosas que sobre superficies lisas como metal o plástico, aunque las rocas que presentan cierta intemperización, superficies arcillosas ó lodosas, se puede obtener una adhesión muy pobre. Cuanto más rugosa, sólida y limpia sea la superficie de aplicación, mayor será también la adherencia del concreto lanzado.

La superficie de la roca se puede limpiar usando la boquilla para lanzar agua y aire comprimido, eliminando las partículas sueltas, el polvo, lodo, etc.

La adhesión del concreto a la roca se puede dañar por la presencia de agua en la superficie, la cual debe de ser canalizada o drenada, antes de aplicar el concreto lanzado.

El concreto lanzado además del efecto de cuña nos ofrece varios efectos en la estabilización de obras subterráneas tales como:

- Resistencia al corte, lo que significa que un bloque de roca solo puede caer únicamente por los esfuerzos de corte a través de la capa de concreto lanzado.

- Nos crea un efecto de arco al aplicarlo en toda la superficie del túnel, aunque en ocasiones actúan sólo en pequeños arcos locales.
- Protege a la roca del intemperismo y los cambios de temperatura.
- Mantiene las partículas pequeñas en su lugar evitando que se caigan las rocas más grandes, creando una estabilidad al momento de su aplicación.
- Transmite los esfuerzos de las zonas débiles a rocas sanas, redistribuyendo los esfuerzos actuantes.
- Efectos simultáneos y combinados de los mecanismos mencionados anteriormente.
- El concreto lanzado es forzado a entrar en las fracturas abiertas y en las irregularidades de la superficie de la roca, cumpliendo la misma función de liga que la del mortero en la mampostería.
- El concreto lanzado impide el drenaje del agua a través de las juntas, evitando la socavación de los materiales de relleno y la intemperización de la roca.
- El concreto lanzado, trabajando al esfuerzo cortante y colocado oportunamente impide la caída de bloques sueltos del techo del túnel con la colocación de una malla electrosoldada.
- Una capa de concreto lanzado de 15 a 20 cm de espesor constituye un soporte semejante a un anillo o a un arco.

#### Preparación del lugar de colocación.

La preparación de la superficie depende del tipo de material. La naturaleza del soporte tiene una importancia primordial para la adherencia del concreto lanzado.

Es mejor la adherencia del concreto lanzado sobre una superficie rugosa que sobre una lisa. Cuanto más rugosa, sólida y limpia sea la superficie de aplicación, mayor será también la adherencia del concreto lanzado.

En los trabajos en los cuales se aplica el concreto lanzado sobre el terreno natural tales como taludes, el revestimiento de canales, etc., el terreno debe de compactarse y nivelarse antes de aplicar el concreto lanzado, se debe prevenir la absorción del agua de la mezcla hacia el terreno, mediante el humedecimiento de la superficie evitando encharcamientos, o colocando barreras impermeables. Cuando se requiera, se deben emplear sistemas de anclaje.

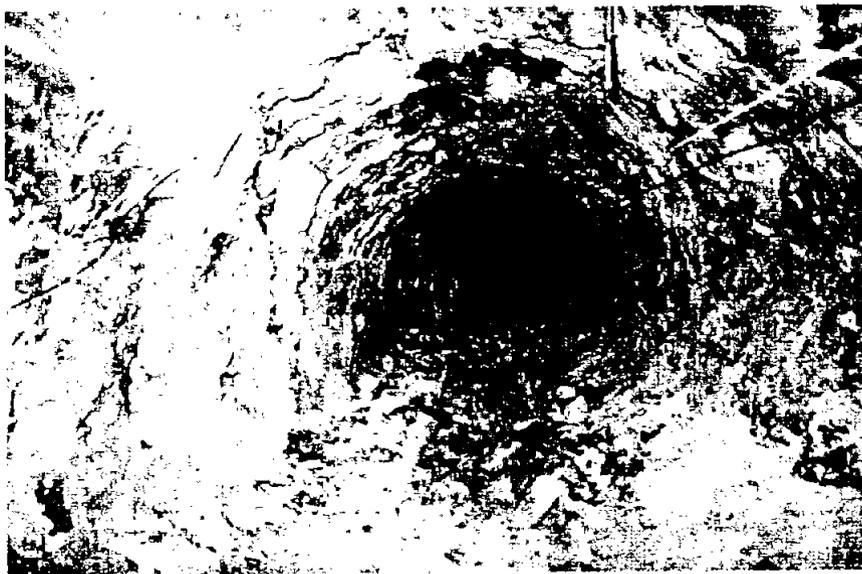


Figura 43.  
Preparación del lugar.

Sobre roca, la adherencia es generalmente buena, a condición de que la piedra esté limpia, sana, y sea suficientemente sólida. Debe removerse todo el material suelto, lodo, polvo y sustancias extrañas, para garantizar una buena adherencia.

En ciertas situaciones, puede ser peligroso o inconveniente efectuar una remoción completa, por lo que se recurre a una consolidación provisional antes de aplicar el recubrimiento definitivo.

La adherencia en rocas intemperizadas, estratificadas resulta difícil. Lo mismo ocurre con las rocas que se descomponen superficialmente al contacto con el aire o con la humedad. Por lo que se deben emplear sistemas de anclaje.

Cuando se aplica concreto o mortero lanzado sobre superficies de acero, como es el caso en el revestimiento contra el fuego, refuerzos estructurales y concreto armado en general, antes de la colocación, debe removerse el óxido, aceites, pinturas y cualquier otro contaminante.

La limpieza se realiza por lavado con agua, empleando los mismos equipos de concreto lanzado aunque en ciertos casos particulares, es preciso recurrir a otros métodos como chorro de arena (Sand blast), por mencionar alguno. Cuando se emplea

agua en la limpieza, debe evitarse el encharcamiento y eliminar el agua libre de la superficie.

Para que el concreto lanzado sea colocado correctamente y pueda adherirse a la superficie de aplicación, ésta no debe vibrar, ya que puede desprender al concreto adherido anteriormente.

Cuando el concreto lanzado se utiliza para reparar superficies de concreto o mampostería. Previamente a su aplicación, se deben de eliminar los restos de mortero y lechada. La superficie debe estar rugosa, sana, limpia, libre de partículas sueltas, libre de aceites, grasa, algas, pintura, membranas de curado, material deteriorado o débil que puedan interferir con la adherencia, principalmente con el refuerzo y anclajes.

A continuación, se limpia la superficie con aire y/o agua a presión para eliminar polvo y partículas sueltas. La superficie debe estar saturada, pero sin encharcamientos, al momento de la proyección de mezclas.

Cuando se emplean cimbras, se puede construir de cualquier material rígido como acero, madera, madera contrachapada, polietileno, etc. En todos los casos, la cimbra debe estar correctamente alineada, apuntalada y sujeta, a fin de prevenir vibración o pandeo debido al impacto de la mezcla proyectada o al peso del material en estado fresco. Las cimbras deben diseñarse de tal manera que faciliten la salida del aire comprimido y el rebote durante la colocación. Las cimbras deben cumplir con los requisitos habituales para concreto tradicional, y emplear un desmoldante para evitar la adherencia como la absorción de agua del concreto.

Otro aspecto importante de la preparación del lugar es la colocación de protecciones que impidan que el polvo, el rebote y los derrames dañen los equipos, instalaciones y estructuras adyacentes, incluidas las superficies donde posteriormente se colocará concreto lanzado. Este problema se agrava en días ventosos, por lo que es necesario evaluar el efecto de la aplicación del concreto lanzado a las superficies adyacentes y tomar las medidas necesarias para protegerlos.

Eventualmente la protección se puede hacer aislando las áreas susceptibles a daños de los trabajos de colocación del concreto. Las protecciones con cubiertas pueden ser de madera, metal, láminas de polietileno, o bien pueden ser recubrimientos temporales, como cubiertas de plástico, fundas, y otros elementos que pueden removerse sin dificultad.

En algunas ocasiones no es posible proteger las superficies, por lo que se debe realizar la limpieza y lavado de la superficie antes de que endurezca el concreto.

Es necesario tener los equipos y herramientas adecuadas para el retiro de los residuos producto del rebote y limpieza del trabajo.

El concreto lanzado sobre sistemas de impermeabilización basada en láminas plásticas (tipo pvc, hypalón, etc.), no tiene ninguna adherencia.

Cuando un concreto o mortero lanzado tiene que soportar cargas estructurales, requiere un refuerzo estructural con varillas, mallas de acero, o fibra siguiendo el mismo criterio que en concretos armados convencionales.

Por otra parte, cuando hay problemas de adherencia, entre el terreno y el concreto, un correcto armado y anclado impide el desprendimiento.

El refuerzo de mezclas proyectadas debe diseñarse y colocarse, pensando en causar el mínimo de interferencia con la proyección. El armado aumenta el rebote y requieren especial cuidado para su recubrimiento, para evitar la formación de vacíos y porosidades detrás de las barras, llamados "sombas".

Los refuerzos deben sujetarse rígidamente en su posición, con la separación y recubrimiento especificados en los planos de la obra, amarrados entre sí y con los anclajes mediante el alambre, de modo de prevenir vibraciones y desplazamientos durante la proyección, o flexión bajo carga. Antes de colocar la mezcla, el refuerzo debe limpiarse para eliminar óxido, aceites y cualquier otra sustancia que pueda reducir la adherencia.

Cuando el refuerzo está constituido por varias capas, las exteriores deben ser más abiertas para permitir el acceso de la boquilla de proyección, o bien deben de colocarse a medida que se va lanzando concreto.

En grandes espesores y con mallas pesadas se usan barras de anclaje. También se utilizan barras de gran longitud para anclajes y estabilización de roca, las que se fijan mediante inyecciones de lechada de cemento con aditivo.

Impermeabilización previa.

Es muy importante que la superficie de aplicación no presente escurrimientos o agua bajo presión, ya que nos afectara la adherencia del concreto lanzado.

El concreto lanzado es un material elaborado con cemento y no puede exponerse en su estado fresco a esfuerzos tales como los del agua corriente o bajo presión, sino hasta que se haya endurecido y tenga la resistencia suficiente. De lo contrario se producirán inevitablemente daños como bajas resistencias, filtraciones, desprendimientos.

Para evitar tales inconvenientes, es indispensable desviar los flujos de agua que puedan afectar la superficie de aplicación del concreto lanzado. La operación en cuestión, empleada principalmente en trabajos subterráneos, consiste en uno o varios

métodos tales como la colocación de drenes para captación y desviación del agua, la preinyección ó la utilización de elementos filtrantes para colocar el concreto lanzado sobre ellos.

Los drenajes son unos tubos que permiten desviar definitivamente las llegadas de agua, y continúan funcionando aun bajo la cubierta de concreto lanzado, a condición de que los cuerpos en suspensión en el agua no los obstruyan, formando con el tiempo depósitos.

#### Colocación.

El objetivo de la colocación del concreto lanzado, es obtener un concreto compacto, resistente y bien adherido, reduciendo al mínimo la pérdida de material debido al rebote en una operación continua y uniforme. Al igual que todo método de construcción, el procedimiento del lanzado se encuentra sometido a ciertos principios, Las técnicas y procedimientos de colocación se reflejan enormemente en la calidad del concreto colocado y en la cantidad así como en la composición del rebote.

Para dar comienzo a la colocación, la máquina de impulsión con sus equipos de apoyo y accesorios, deben estar correctamente instalados, limpios, con sus medidores calibrados y con su mantenimiento al día. Las mangueras de mezcla, deben estar lo más recto posible a fin de obtener un flujo continuo y reducir el desgaste.

Dentro de la operación de colocación por vía seca, es fundamental el control de agua de mezclado para tener la trabajabilidad y relación agua-cemento requeridas.

Otra variable a controlar es la fuerza del impacto, que depende de la velocidad y distancia de proyección. Para la mayoría de las aplicaciones, la distancia normal de la boquilla a la superficie está entre 0.60 y 1.80 m. A mayores distancias ha de requerirse un aumento de la velocidad del material, aumentando también el rebote.

Si esta distancia es demasiado corta, es imposible que la capa de concreto se forme sobre la superficie de aplicación, ya que el material es arrancado continuamente por el chorro. En cambio, si la boquilla se encuentra a una distancia excesiva de la superficie de aplicación, el chorro pierde fuerza, reduciéndose la adherencia y la compactación del concreto sobre la superficie. En ambos casos, la cantidad de material que se adhiere a la superficie de proyección es menor, y la cantidad de material de rebote aumenta proporcionalmente.

Para reducir el rebote al mínimo, es preciso que la distancia entre la boquilla y la superficie de aplicación se encuentre en una relación correcta con la velocidad de salida del material de proyección.

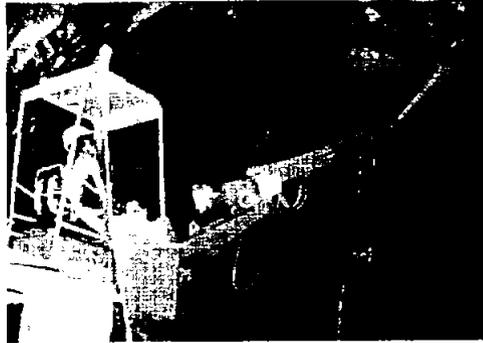


Figura 44.  
Colocación del concreto lanzado.

En mezclas secas, los factores que determinan la velocidad del material en la boquilla son el volumen y la presión del aire, diámetro de la tubería y longitud, tipo de boquilla, material y cantidad a colocar. Estos factores permiten una gran flexibilidad y versatilidad en colocación de diferentes y a diferentes velocidades según las necesidades de aplicación. Pequeñas o grandes variaciones en el flujo, contenido de agua y velocidad pueden ser realizados por el lanzador.

En mezclas húmedas la velocidad se controla mediante el flujo de concreto y la cantidad de aire que se dispone en la boquilla.

El concreto lanzado se aplican normalmente por capas, una capa se forma de varias pasadas de la boquilla sobre una sección del área de trabajo, cuando sea posible a las secciones deben de dársele el espesor completo en una sola capa, con el fin de disminuir la formación de juntas frías, ahorrar tiempo y disminuir el rebote.

Según el lugar de colocación el espesor de capa está limitado por la posibilidad de deslizamiento o desprendimiento de la mezcla fresca. Con el fin de que el concreto lanzado fresco se adhiera a la superficie de aplicación, su propio peso no debe afectar su cohesión interna ni su adherencia. Si la capa es demasiado gruesa, y, por consiguiente, demasiado pesada, ella se desprenderá de la superficie de aplicación.

Normalmente el espesor de la capa está dado por la cantidad de concreto colocado que no se deslice o desprenda. No se debe aplicar más cantidad de concreto lanzado que la que pueda adherirse impecablemente.

La capa siguiente de concreto lanzado no podrá aplicarse sino después del endurecimiento de la capa anterior. En ese momento se pueden remover zonas defectuosas, por ejemplo material suelto, zonas disparejas, acumulación de rebote o derrames, etc.

La cantidad de rebote depende también del ángulo de impacto del material lanzado. Como regla general, la boquilla debe sostenerse en posición perpendicular a la superficie receptora y con movimientos continuos en pequeños círculos sobre el área de trabajo para una correcta distribución y homogeneización de la mezcla.

El armado aumenta el rebote. Cuando se coloca concreto a través del refuerzo, la boquilla debe colocarse más cerca y en un ligero ángulo hacia arriba, a fin de embeber el acero horizontal y minimizar la acumulación de rebote. También la mezcla debe estar un poco más húmeda. De este modo, se impulsa la mezcla fresca por detrás de la barra y se previene la acumulación prematura de material sobre la cara frontal del refuerzo para evitar la formación de cavidades y porosidades detrás de las barras, llamados "sombras".

La resistencia, la impermeabilidad y la adherencia del concreto lanzado dependen de la cantidad de cavidades y las porosidades que contenga. Los defectos de este tipo se producen por la presencia de material de rebote -por ejemplo sobre salientes de roca o en los ángulos-, así como por el recubrimiento insuficiente de las armaduras.

El lanzador deberá tratar, por tanto, de que en ningún lugar pueda acumularse material de rebote o formarse sombras. Con este fin, deber manejar hábilmente la boquilla. No obstante, no siempre resulta posible incorporar el material de rebote de manera compacta o eliminarlo por soplado con la ayuda del chorro de lanzado. En este caso, es preciso que una segunda persona intervenga para alejar continuamente el material de rebote, con la ayuda de aire comprimido.

En aplicación de muros, la operación se inicia desde la base. Para espesores gruesos, se puede emplear el método "de bancada", que consiste en conformar una especie de repisa inclinada en la base del muro, y luego se aplican capas superpuestas de abajo hacia arriba hasta completar el muro.

Estas capas van inclinadas a 45 grados, pero la boquilla perpendicular a las mismas. Cuando se aplica sobre losas de piso, la boquilla se desvía ligeramente de la perpendicular, de modo que el rebote se desplace hacia la superficie ya terminada, donde puede ser removido.

No deben aplicarse compuestos de curado y otros materiales que impidan la adherencia entre capas sucesivas. Es una buena práctica dejar estas superficies ásperas para mejorar la adherencia de la capa subsiguiente.

La colocación debe suspenderse, cuando se produzcan condiciones ambientales extremas y no se disponga de protecciones adecuadas, como es el caso de vientos fuertes, temperaturas cercanas a la congelación, lluvias, temperaturas muy altas en ambiente seco, etc.

### Seguridad.

Durante la colocación es importante que todo el personal, cercano al área de proyección, use ropas, casco, guantes y protección ocular adecuados, y que se cuente con protecciones para aislar las zonas adyacentes. En áreas cerradas el personal se debe proteger del polvo mediante mascarar o respiradores, y proveerse de ventilación adecuada. En algunos casos, es recomendable proteger la piel expuesta con cremas o ungüentos.

El uso de fibras de acero o vidrio puede afectar al personal durante la colocación y la terminación, por lo que deben llevar protección completa de la piel y el rostro.

También el ruido de compresores puede representar un factor molesto, y que interfiere en la correcta ejecución, por lo que pueden requerirse ciertas medidas de insonorización.

Se recomienda contar con un botiquín de primeros auxilios siempre a la mano, en todo trabajo de concreto lanzado.

### Técnicas de colocación.

Para minimizar la fatiga de los brazos: La manguera se debe de colocar entre las piernas del lanzador, preferentemente entre los muslos. El siguiente paso es apretar las piernas contra la manguera con ello se transfiere el peso de la manguera a las piernas y no a los brazos. Como la fuerza de las piernas es mucho mayor que la de los brazos el lanzador puede fácilmente arrastrar la manguera en cualquier dirección utilizando sus piernas. Con ello se eliminan levantamientos innecesarios, jalones que pueden ocasionar una lesión.

Después de que la superficie ha sido limpiada, la boquilla debe de apuntar al piso para de esta manera ajustar la mezcla y una vez que se tiene la consistencia deseada empezar a colocarla en la pared.

En túneles el lanzador debe de empezar siempre de abajo hacia arriba, hasta llegar al hombro del túnel, el mismo procedimiento se aplica para el otro lado, el próximo paso es comenzar a aplicar el concreto sobrecabeza. Cuando se realiza cualquier trabajo sobrecabeza el lanzador debe de empezar desde el final hacia el principio. En otras palabras el lanzador no debe de estar debajo del concreto recién colocado. Con este procedimiento se previene cualquier posible accidente si alguna parte se llega a desprender.

Como práctica general el lanzador puede revisar la presión del aire en la manguera colocando su mano frente a la boquilla (se recomienda el uso de guantes). Si puede colocar su mano en la punta, se necesita incrementar la presión de aire.

El flujo del material se determina de diferente manera. La manguera se hinchará un poco conforme el material pasa a través de ella, o se incrementa la vibración conforme se incrementa el flujo.

Rebote.

El fenómeno del rebote se refiere a las partículas que golpean la superficie y no se adhieren a ésta. Es indudablemente la principal característica del concreto lanzado, pero necesaria para su correcta aplicación.

Sus causas son numerosas y muy variadas, como la naturaleza y la composición de los agregados y el diseño de mezcla, la superficie de aplicación, la presión de proyección, la habilidad del lanzador, el espesor de la capa, la cantidad de aditivo acelerante y otros más, que nos afectará la cantidad del material de rebote.

El 90% del rebote ocurre durante el 2% de la colocación del material. Durante el lanzamiento, en las primeras fracciones de segundo, las partículas de mayor tamaño, cubiertas con pasta, se impactan contra la superficie, quedando adherido a esta solo la pasta y rebotando las partículas de mayor tamaño, conforme se incrementa el espesor de pasta sobre la superficie de aplicación, se incorporarán tamaños mayores de partículas disminuyendo dramáticamente el rebote aunque una parte del material sigue rebotando todavía.

Con los agregados de diámetro superior, se pierden también ingredientes finos y cemento, ya sea porque se adhieren a los granos gruesos o porque son arrastrados por estos últimos.

Al principio de la proyección, casi todos los elementos gruesos rebotan, a continuación sólo algunos de ellos, por lo que la constitución del material de rebote es, grueso al principio y más fino después y con un contenido pobre de cemento.

A partir de cierto espesor de aplicación, la cantidad y la composición del material de rebote son constantes, siempre que no intervengan nuevos factores.

Cambio típico en la cantidad de cemento con relación al agregado en el concreto lanzado.

Generalmente, la cantidad de material de rebote es menor si se utilizan una granulométrica bien graduada. Su contenido en ingredientes muy finos debería ser ligeramente superior al normal. Un agregado con tamaño superior a  $\frac{3}{4}$ " no es económico, ya que rebota casi integralmente. Los agregados gruesos producen, por tanto, más material de rebote que los finos. Es evidente que el rebote se determina igualmente por la estructura de la superficie de aplicación.

Tabla 16.

Mezcla dosificada en la máquina.	Mezcla colocada en la superficie de aplicación.
1 : 3.0	1 : 2.0
1 : 3.5	1 : 2.8
1 : 4.0	1 : 3.35
1 : 4.5	1 : 3.6
1 : 5.0	1 : 3.8
1 : 6.0	1 : 4.1

Manteniendo la boquilla en posición perpendicular a una superficie plana, las trayectorias de las partículas que rebotan son casi idénticas. Podemos decir que el ángulo de rebote sobre la superficie de aplicación es igual que el de impacto.

No es este el caso cuando se trata de una superficie de aplicación irregular. Cada una de las superficies con inclinaciones diferentes de una roca muy cortada, por ejemplo, desvía el cono de proyección a su manera, dando lugar a un desorden de trayectorias que se cruzan. Los granos que rebotan chocan a su vez en los salientes de la superficie de aplicación, en las partes hundidas se producen torbellinos que reúnen las piezas que chocan y el chorro de proyección. Es evidente que bajo estas circunstancias, las pérdidas de material son más elevadas que en el primer caso.

De esto se puede deducir otra regla. Cuanto más irregular sea la superficie de aplicación, mayor será también la cantidad de material de rebote. Así se justifica la prescripción categórica de dirigir la boquilla, en lo posible, en dirección perpendicular a la superficie de aplicación. Naturalmente, esto no es realizable sino dentro de ciertos límites, por ejemplo: frente a una roca muy irregular, no es posible ajustar la posición de la boquilla según la inclinación de cada cara, por lo tanto la boquilla debe adaptarse al plano de superficie predominante.

La velocidad de la mezcla al abandonar la boquilla y en el momento de impacto en la superficie de aplicación es también una causa muy importante del rebote.

Cuanto más fuerte sea el impacto, mayor será también el número de partículas que rebotan. No obstante un bajo rebote puede ser tan negativo como un alto rebote, Si el concreto lanzado se hace a una baja velocidad y casi no alcanza la superficie, no habrá mucho rebote y será cubierta o "pintada" con material. Esto aparentemente es satisfactorio, pero en realidad no hay adherencia, y provoca una compactación y/o

densidad insuficiente del concreto lanzado colocado en obra, obteniendo un concreto de mala calidad.

Por consiguiente, existe una velocidad de impacto óptima que produce el mínimo de material de rebote obteniendo la mejor compactación, densidad y adherencia. En la práctica, el consumo de aire en la boquilla, así como otras condiciones de elaboración, pueden variar a corto plazo el lanzador experto se adapta a las circunstancias, modificando la distancia de la boquilla a la superficie de aplicación.

Los diferentes puntos expuestos ponen claramente en evidencia la importancia primordial de la experiencia y de la capacidad del lanzador. Más que todos los demás factores, es, en definitiva, el manejo de la boquilla el que determina la cantidad de material de rebote. La naturaleza de la superficie de aplicación, y la dirección del chorro dependiente de la misma, así como la distancia de la boquilla determinan la cantidad de material de rebote; ahora bien, en lo que respecta el fenómeno del rebote propiamente dicho, bajo condiciones idénticas, importa muy poco que el choque se dirija verticalmente hacia arriba, horizontalmente o perpendicularmente hacia abajo. En cada caso, la dinámica del rebote es exactamente la misma.

Por otra parte, la cantidad de material que rebota y el que se pierde es muy diferente: si se proyecta verticalmente hacia arriba, por ejemplo durante el revestimiento de una bóveda de túnel, prácticamente todas las partículas que rebotan caen al suelo, razón por la que el material de rebote es mayor. En cambio, cuando la proyección es sobre una superficie vertical por ejemplo contra un muro, una parte del material que rebota es empujado de nuevo por el cono de proyección antes de que pueda caer. Esto explica que la cantidad de material de rebote es inferior durante la aplicación sobre superficies verticales. Finalmente, si la boquilla se dirige perpendicularmente hacia abajo, por ejemplo sobre el fondo de una piscina, el material de rebote se acumula sobre la superficie de aplicación, en la que un lanzador experto puede reincorporarlo continuamente, en parte o totalmente, en el concreto colocado en obra: en este caso, el material de rebote es muy reducido o casi nulo.

Tabla 17.

Valores típicos de rebote.		
	Vía seca	Vía húmeda
Superficies horizontales	5 - 15	0 - 5
Superficies verticales	10 - 30	5 - 10
Sobrecabeza	25 - 50	10 - 20

Nota: Estos valores pueden ser hasta un 50 % mayores si se aplican capas muy delgadas o cuando se lanza a través de mucho refuerzo.

Estas consideraciones se refieren a la técnica clásica que consiste en no aplicar, en cada caso, sino la cantidad de concreto lanzado que pueda adherirse impecablemente a la superficie de aplicación, sin desprenderse bajo el efecto de su propio peso.

La cantidad de material de rebote disminuye generalmente algo si se utiliza un acelerante, en este caso, el concreto lanzado puede aplicarse por capas más espesas. De manera más particular, en presencia de superficies de aplicación verticales, una dosificación apropiada del acelerador permite colocar en obra, de manera ininterrumpida, capas de concreto lanzado de espesor prácticamente ilimitado. En este caso, se procede desde abajo hacia arriba, sacando el máximo provecho del fraguado acelerado del concreto lanzado como del efecto de sostén de la masa ya aplicada.

Un lanzador sin experiencia, o agregados de mala calidad, puede aumentar sensiblemente la cantidad de material de rebote. La curva granulométrica del material de rebote es diferente a la de los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla en seco. Esta diferencia depende de factores que provocan el rebote.

A pesar de su composición desequilibrada -agregados muy gruesos y poco cemento- el material de rebote puede alcanzar un grado de dureza considerable (esto lo saben bien los que se han visto obligados a eliminar material de rebote endurecido).

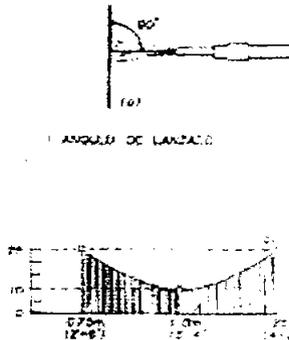


Figura 45.

Efecto de la distancia de lanzado en el rebote.

Para el concreto lanzado propiamente dicho, el material de rebote debe considerarse como totalmente perdido. Efectivamente, la mayoría de las veces resulta muy difícil y costoso recuperarlo a tiempo y sin impurezas para transportarlo a la mezcladora y reutilizarlo.

## V.- REVESTIMIENTO DEFINITIVO DE LOS TÚNELES.

Una vez concluida la excavación se da comienzo a las actividades y preparativos para el revestimiento definitivo del túnel. Es importante hacer el replanteo del trazo real del túnel y así definir el eje de la cimbra para dar los espesores del revestimiento definitivo que marca el proyecto como mínimo.

Es recomendable, así mismo realizar un estudio de pendientes teniendo en mente que como mínimo debe mantenerse constante ésta, en los tramos que por dificultades durante la excavación no pudo cumplirse con los niveles señalados por el proyecto.

El concreto hidráulico a utilizarse puede ser suministrado al sitio de colado por camiones revolventes o ser elaborados directamente en la obra mediante plantas dosificadoras, ubicadas en un sitio previamente establecido, donde podrá ser conducido a través de tuberías o por pozos perforados expresos a lo largo del túnel para tal fin.

Los revestimientos son necesarios en la mayoría de los túneles. Se colocan con dos fines: estructuralmente para contener y soportar el terreno expuesto, y operacionalmente para proporcionar una superficie interna que sea adecuada a las funciones del túnel. La secuencia de las operaciones de revestimiento es variada y a menudo compleja, por lo que la terminología es frecuentemente ambigua.

Los requisitos principales que deben cumplir los revestimientos estructurales permanentes son:

- 1.- Proporcionar el apoyo estructural necesario.
- 2.- Controlar o eliminar la entrada o escape del agua.
- 3.- Ajustar la sección transversal de operación.

Al cumplir dichos requisitos, el sistema de revestimiento escogido deberá ser capaz de ofrecer una construcción segura y económica, y adaptarse a posibles variaciones y contingencias imprevistas que se pudieran encontrar en el progreso de la obra.

La adaptabilidad del sistema de revestimiento puede constituir un factor muy importante, ya que la urgente necesidad de tener que cambiar a un revestimiento diferente puede causar demoras e interrupciones en el programa y ocasionar fuertes costos.

Cuando se excava un túnel, se altera el equilibrio estable que existe entre el terreno y será preciso establecer un nuevo patrón de esfuerzos mediante la ayuda de estructuras de apoyo. En roca sólida y homogénea se desarrollará una acción de arco, y

tal vez no sea necesario un soporte adicional; mientras que en un terreno blando y plástico es posible que se desarrolle una condición muy semejante a la presión hidrostática, rápida o lentamente, y sea necesario colocar un ademe capaz de resistir toda la presión de sobrecarga. En la mayor parte de los túneles los requerimientos se hallan entre ambos extremos, y el arte de diseñar un túnel descansa en la valoración de las necesidades reales de cada etapa, por lo que hay que obrar en consecuencia dejando márgenes convenientes para lo inesperado. La sincronización del ademe es de vital importancia para evitar inmediatamente cualquier movimiento que pudiera provocar catástrofes, pero debe permitir los movimientos causados por deformaciones en el terreno circundante con cambios concomitantes en un esfuerzo para establecer un equilibrio nuevo y estable. Es un punto que depende parcialmente de los cálculos basados en las propiedades determinadas del terreno, pero en mayor grado del juicio que brinda la experiencia para obtener así el mejor resultado. El problema más importante consiste en prever y controlar en conjunto los esfuerzos y movimientos en el terreno circundante, pero se deberá tomar en cuenta la pérdida de suelo por desprendimiento de los bloques sueltos de roca o por la erosión causada por el agua.

Casi todo el diseño de los revestimientos han sido empírico en la práctica, basándose en la experiencia. En los revestimientos con tramos de hierro colado siempre ha habido un margen sustancial de resistencia para adaptarse a los métodos de fundición y para enfrentarse resueltamente a los procedimientos de manipulación y erección, por lo que nunca se había realizado un análisis estricto de la estructura terminada. Los revestimientos con tramos de concreto precolado se desarrollaron a partir de adaptaciones de los de hierro colado.

En la roca, las propiedades de los núcleos de muestra constituyen de por sí una base inadecuada para establecer pronósticos de comportamientos. Es muy importante la estructura de unión de la masa, la cual es aún más difícil de determinar mediante cualquier tipo de exploración previa.

No se tiene la intención de presentar en este trabajo, ni de analizar más adelante, las diversas fórmulas matemáticas que constituyen las herramientas para el diseño de los túneles. Se puede observar que el proceso para el diseño estructural de un túnel no es semejante al de un puente u otra estructura superficial no sólo debido a que el terreno, que impone las cargas, no se conocen en su totalidad previamente, sino debido a la interacción entre terreno, los procedimientos de construcción y la estructura.

El cambio en la forma de la cavidad excavada constituye un aspecto importante del diseño del revestimiento. Un agujero circular se distorsionará hasta tomar la forma de una elipse con su eje mayor horizontal, debido a la acción de esfuerzo vertical que resulta de la sobrecarga. Un revestimiento rígido circular dentro de dicha perforación resistirá la distorsión y estará sometido a esfuerzos de flexión, mientras que un revestimiento flexible tomará la forma de elipse, pero desarrollará una presión pasiva en el terreno, donde desplazará hacia arriba al suelo. Un revestimiento flexible que actúa en

forma compuesta con el suelo ofrecerá un diseño más delgado y ligero que un cilindro rígido que deberá resistir grandes momentos a flexión.

Existen razones y propósitos para revestir un túnel que pueden ser de índoles diversas a las consideraciones puramente estructurales. De ahí que no sea la resistencia mecánica la propiedad que en forma predominante deba especificarse para el concreto.

No obstante, ya que existe relación entre la resistencia mecánica y otras características requeridas, la búsqueda de estas últimas suelen conducir paralelamente a la obtención de un concreto de alta resistencia mecánica.

De conformidad con las técnicas actuales existen dos procedimientos básicos para revestir un túnel de concreto:

- a) Revestimiento de concreto convencional que consiste en el empleo de mezclas comunes de consistencia entre plásticas y fluidas que se colocan mediante el apoyo de cimbras.
- b) Revestimiento de concreto lanzado que consiste en el uso de mezclas de consistencia relativamente seca, que se proyectan directamente sobre la superficie de excavación y no requieren del apoyo de cimbras.

El concreto convencional es el más utilizado y adaptable a las necesidades que son frecuentes para revestimientos definitivos de túneles, principalmente hidráulicos. El concreto lanzado ofrece ventajas como soporte temporal y como revestimiento definitivo de túneles, en donde se permiten mayores tolerancias geométricas y no existen requisitos especiales de acabado.

Los principales materiales y métodos de construcción para los revestimientos permanentes de los túneles perforados son:

- Concreto in situ.
- Concreto lanzado.
- Segmentos prefabricados, empernados o flexibles.
- Enladrillado y mampostería.

### 5.1.- Revestimiento de Concreto.

El concreto representa la forma más utilizada para el revestimiento permanente de los túneles en roca. Tiene la ventaja de que se puede diseñar con la forma que se desee para la sección transversal. Se cuela por lo común utilizando una cimbra viajera corrediza muy por detrás del frente de trabajo, tanto en tiempo como en distancia, incorporando cualquier ademe permanente ya colocado y, posiblemente, también los ademes temporales. En lo posible, se diseñará el revestimiento para que funcione a compresión sin grandes momentos flexionantes, por consiguiente, se evita considerablemente el refuerzo en las varillas, aunque puede ser necesario en los casos en que la carga sea desigual y variable.

A menudo es preferible realizar el colado del concreto del techo y los muros antes de colar el piso, pero a veces es ventajoso colar primero el piso, con lo que se tiene un apoyo continuo y uniforme para las cimbras principales. Las condiciones de colado del concreto no serán siempre favorables para obtener una alta calidad uniforme, y los espesores serán a menudo tales que sólo será necesario especificar una baja resistencia. La mezcla del concreto en la superficie y subsiguiente colocación por medio de una bomba podrá presentar limitadas ventajas según se aumente la distancia desde el pozo. Tiene una aplicación más general el transporte de vagonetes con agitación adecuada y pasar por medios neumáticos el concreto a las cimbras. Siempre se presentan dificultades cuando se trata de asegurar un concreto denso y uniforme en la corona del arco, siendo necesario tener especial cuidado para evitar los espacios vacíos. En cualquier caso, es probable que se tenga que suministrar especialmente la lechada de concreto.



Figura 46.  
Revestimiento de concreto.

En un túnel de grandes dimensiones puede haber tres juegos de cimbras, cada una de aproximadamente de 10 m de largo y diseñarlas de tal manera que se puedan desmantelar fácilmente o, si no, doblarlas y desplazarlas hacia delante pasando los dos juegos que se están utilizando para volverlas a utilizar 30 m más adelante.

Cuando sea importante terminar rápidamente el revestimiento de concreto inmediatamente después de la excavación, las cimbras pueden ser mucho más cortas, casi tan cortas como la longitud de cada avance, tal vez de 1 ½ m; pero se perderían muchas de las ventajas del colado del concreto en gran escala in situ; en este caso, podría ser más conveniente utilizar revestimientos con tramos precolados.

#### 5.1.1.- Control de Calidad del Concreto Para el Revestimiento de Túneles.

En toda construcción es necesario por parte del contratista efectuar pruebas de laboratorio, con objeto de detectar oportunamente cualquier posible desviación respecto a las especificaciones y poder efectuar los ajustes que procedan.

##### Propiedades del Concreto Convencional.

El concreto que se emplea para revestir túneles suele verse sometido a acciones de muy variada índole, que guardan relación con las causas que obligan a revestirlo, el tipo de servicio que prestan y las condiciones en que se operan.

Para cumplir con su función bajo estas diversas condiciones y circunstancias, el revestimiento de concreto debe poseer dos atributos básicos: resistencia y durabilidad. Esto significa así mismo, que eventualmente debe poseer buenas características y propiedades en los siguientes aspectos:

- Resistencia mecánica.

Aún cuando una elevada resistencia mecánica suele ser índice de buena calidad en el concreto, ésta relación no puede considerarse como una regla de carácter general, porque hay ciertos aspectos que dependen de otros.

La obtención de una alta resistencia mecánica, requiere del uso de una baja relación agua-cemento. Sin embargo, ésta condición no siempre es suficiente, porque con una determinada relación agua-cemento, el mejor concreto es el que contiene menos agua, es decir, el que se elabora con la consistencia más seca, siempre y cuando se le pueda compactar eficientemente.

En el caso particular del revestimiento de túneles, suelen existir determinadas condiciones de colocación impuestas por limitaciones del espacio entre la cimbra y el terreno y por restricciones del acceso que impiden el uso de mezclas de concreto de consistencia seca.

Debido a éstas restricciones y limitaciones es frecuente la tendencia a emplear mezclas relativamente fluidas, pero a condición de que sean adhesivas y poco segregables.

Como consecuencia los consumos de cemento requeridos para el logro de una misma resistencia especificada, suelen ser un poco más altos en el concreto para revestimiento de túneles por el método del concreto convencional.

Pruebas de Control de Ajuste.

Estas pruebas deben realizarse:

- En los componentes del concreto antes de ser utilizados.
- En la mezcla seca ya dosificada y homogeneizada (para proceso de mezcla seca).
- Ensayes de resistencia a edad temprana.

Prueba a los Materiales.

➤ Cemento.

Con anticipación, al comienzo de la obra deben efectuarse ensayos de calidad (análisis físicos y químicos), al cemento que se piensa utilizar con objeto de verificar que cumpla con las especificaciones inherentes a su tipo de clase; durante la realización de los trabajos deben efectuarse ensayos periódicos, esta periodicidad depende de los volúmenes que se empleen, generalmente se acostumbra ensayar una muestra a la semana por cada marca y tipo de cemento que se utiliza.

➤ Aditivos.

Una vez aprobado el uso de un aditivo con base a los resultados obtenidos en los ensayos de preconstrucción deben determinárseles algunas propiedades índice como puede ser: color, peso específico, etc. Cada vez que se adquiera un nuevo lote, debe verificarse su uniformidad mediante esas características y así mismo, debe verificarse su comportamiento por medio de la determinación de tiempo de fraguado y ensayos de resistencia.

➤ Agregados.

Antes de ser aprobados los agregados deben ser sometidos a las pruebas indicadas en las especificaciones, con objeto de comprobar su calidad. Durante su utilización periódica deben tomarse muestras para verificar que no han cambiado sus

características; la frecuencia de muestreo puede variar en función de los volúmenes empleados, en general se acostumbra obtener una muestra a la semana.

En el caso de la mezcla seca se recomienda que la humedad de la mezcla de agregados (gravilla-arena), se mantenga entre 3 y 8%.

➤ Análisis de la mezcla seca.

Este tipo de análisis se realiza con el objeto de juzgar la homogeneidad de la mezcla seca (cemento, gravilla y arena), y verificar el contenido de cemento, esto es conveniente efectuarlo cuando menos una vez por cada día de trabajo; el procedimiento es el siguiente:

- De una revoltura seca elegida al azar deben obtenerse dos muestras que representen dos porciones de la misma. Cada muestra debe constar de aproximadamente 10 Kg de material. Simultáneamente deben obtenerse muestras de la arena y la gravilla, si se dosifican por separados o bien de la mezcla gravilla-arena.
- A las muestras y grava se les determina el porcentaje de material que pasa la malla No. 200, por vía húmeda se les debe determinar además su contenido de humedad y granulometría.
- A las muestras de mezcla seca debe determinárseles su proporción de material más fino que la maya No. 200 por vía húmeda, y posteriormente su composición granulométrica.
- A partir, de la información anterior pueden determinarse en la mezcla seca, hechas las correcciones correspondientes, la proporción de gravilla y arena, y contenido aproximado de cemento.

➤ Ensayos de resistencia a edad temprana.

Para controlar y ajustar la calidad del concreto durante el lanzado, deben elaborarse tableros de prueba, los cuales deben relacionarse con los distintos frentes de trabajo, representando a los equipos y operadores.

De cada tablero deben extraerse núcleos (normalmente de 3" de diámetro), los cuales es conveniente ensayar a 24 o 48 horas de edad, a fin de compararlas con los obtenidos en los ensayos de pre-construcción y juzgar anticipadamente si se cumplirá con la resistencia a la edad del proyecto, efectuando correcciones en caso necesario.

Es recomendable además en una de cada 5 o 10 tableros extraer núcleos adicionales para ensayar a la edad del proyecto (7 o 28 días). Para cada edad de ensayo se deben extraer 3 núcleos.

Los problemas más comunes que podemos encontrar son:

- Falso fraguado. En ocasiones el cemento se utiliza en la elaboración del concreto sin haberse enfriado totalmente, lo cual puede producir un falso fraguado que llega a taponar las tuberías de colado.
- Zonas sin colar. Por defectos en el vibrado del concreto, por algún falso fraguado, por muy bajo rendimiento en el concreto, etc., al descimbrar puede aparecer pequeñas zonas sin concreto que necesariamente hay que reparar, siendo éste tipo de reparación muy lenta y costosa.
- Exposición del acero de refuerzo, que se presenta al no haber hecho correctamente el armado, incluidos los separadores.
- Falta de espesor de la clave. Problemas como los descritos en los dos primeros puntos, aunados a una deficiente operación en la inyección del concreto, pueden ocasionar que la clave no quede totalmente llena por éste, lo que conducirá a tener que rellenar el hueco posteriormente, casi siempre con inyecciones de lechada de cemento.
- Burbujas en la cubeta del túnel, que se presentan al tener un exceso de vibrado y que también habrá que resanar, sobre todo en túneles para fines hidráulicos.

## 5.2.- Revestimiento con Concreto Lanzado y Anclas.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el concreto lanzado se ha convertido en una técnica que cada vez se utiliza más para los soportes del terreno, sólo o en combinación con métodos como la colocación de anclas en las rocas, las costillas arqueadas de acero y el refuerzo con malla, que tiene por principio básico determinar, y el revestimiento para establecer, dentro de la roca circundante un anillo resistente a la carga.

En el capítulo anterior también se mencionó en que forma debe de ser aplicado, el tipo de mezclas existentes, así como el equipo necesario para su aplicación, además de los cuidados que se debe tener al manejarlo y las ventajas y desventajas de ambos tipos de mezclas.



Figuras 47 y 48.

Revestimiento con anclas y concreto lanzado.

Por lo que podemos decir que es obvio que el concreto lanzado no se debe tratar en ningún momento como un elemento estructural independiente, sino como una parte integrante de un grueso cilindro de roca. En realidad, es importante que la capa de concreto sea suficientemente delgada para que sea flexible y que se ajuste a los cambios de forma sin que se presenten grietas. Se ha sugerido que, con objeto de lograr una resistencia adicional a la flexión, el concreto lanzado lleve incorporadas en él fibras de acero o fibras de vidrio resistentes a los álcalis.

Las anclas de roca no pueden constituir por sí mismas ningún tipo de revestimiento, pero representan un medio auxiliar de ademe que puede ser especialmente efectivo junto con el concreto lanzado. Su función y tipo de anclas así como ventajas y desventajas, también fueron estudiadas en el capítulo anterior.

Estas anclas contribuyen a establecer el cilindro esforzado de la roca rodeando la excavación del túnel.

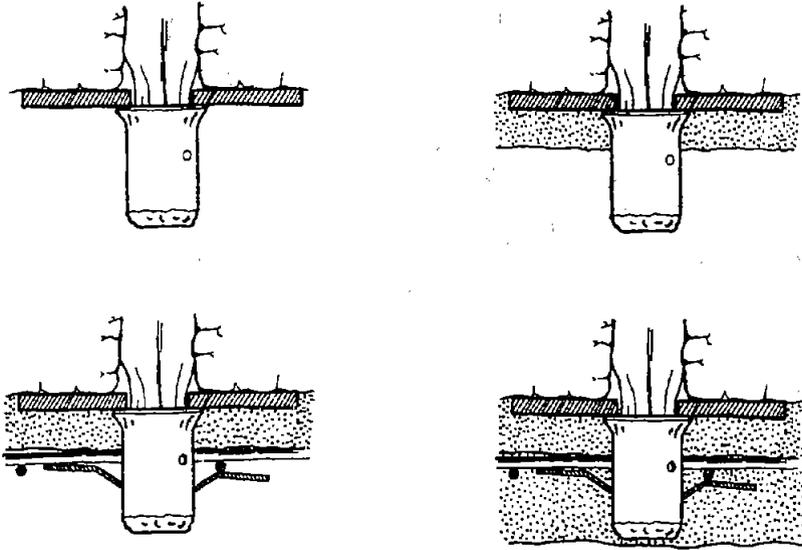


Figura 49.

Detalles del refuerzo en la aplicación de concreto lanzado  
en combinación con anclas de roca.

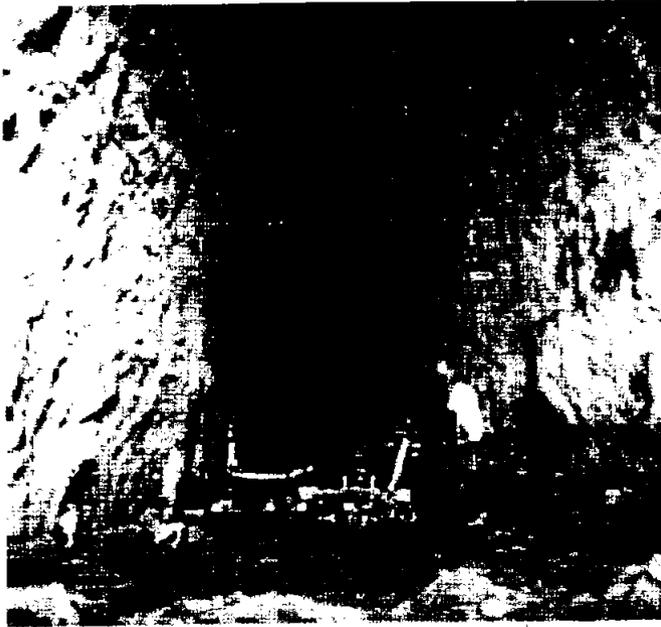


Figura 50.

Acabado del revestimiento con anclas y concreto lanzado.

### 5.3.- Revestimiento con Prefabricados.

Los anillos circulares segmentados, ya sean de hierro colado o de concreto, proporcionan un revestimiento permanente e inmediato de gran resistencia, siempre y cuando, al hacer la obra, se puedan poner en íntimo contacto con el terreno excavado por medio de la inyección con selladores o con cualquier otro procedimiento. Su uso en los túneles se remonta hasta 1869 en Londres, y pueden haberse derivado de las tuberías de hierro colado empleadas en la perforación de los tiros en las minas a fines del S. XVIII.

Como revestimientos permanentes, todos los tipos por tramos tienen la ventaja básica de que, inmediatamente después de que se han colado, proporcionan una fuerte estructura de soporte con una útil flexibilidad, pero para desarrollar la interacción entre el revestimiento y el terreno es muy importante la sincronización de las operaciones de inyección. Los diferentes tipos varían en su capacidad para impermeabilizar, por lo que se deberá evaluar dicha capacidad en relación con los requisitos de operación y la naturaleza del terreno. La forma circular es la que se utiliza con más frecuencia, exceptuando los túneles para drenaje de forma ovoidal que se han construido con tramos de hierro colado. En algunos casos especiales, las uniones y transiciones entre los túneles circulares de hierro colado se han formado de manera continua mediante piezas de dicho material de una compleja geometría.



Figura 51.  
Revestimiento con prefabricados.

Entre las principales variantes en los materiales utilizados en los revestimientos por tramos está la fundición gris del hierro, el hierro S.G., acero soldado o concreto precolado; en la estructura, anillos ya sean empernados o cimentados con inyecciones de lechada o anillos de junta flexible.

➤ Anillos empernados de hierro colado.

El proceso de construcción de túneles con anillos empernados de hierro colado tiene el esquema siguiente: la excavación avanza cada vez una distancia igual al ancho de un anillo, y el nuevo anillo se coloca inmediatamente, empernando entre sí los segmentos en la junta transversal y uniéndolos mediante pernos a la brida circular del anillo terminado anteriormente. En un anillo típico hay seis o más tramos embridados y una pequeña cuña. Los tramos son idénticos con excepción de los dos superiores, que están ligeramente recortados en uno de los extremos y tienen una brida oblicua terminal que forma un espacio ahusado para la cuña; la colocación de un anillo se puede terminar desde el interior de la excavación con la entrada definitiva y asegurando la cuña. Se deberá inyectar tan rápidamente como sea posible la lechada de cemento para que se llene el espacio de trabajo entre la superficie del hierro y el terreno; esto se hace con el fin de permitir que el revestimiento soporte la carga del terreno sin que se presenten asentamientos.

Se ha utilizado mucho el hierro colado gris de un grado relativamente bajo. Este material tiene una resistencia a la compresión muy adecuada, pero una resistencia a la tensión relativamente baja y, además es frágil. Tiene una alta densidad. Cuando se utiliza en los túneles como anillos circulares, la mayor parte de la carga del terreno se transmite por esfuerzo directo a la compresión. Los momentos flexionantes y los consiguientes esfuerzos a la tensión son generalmente mínimos en estos anillos, debido a la ligera flexibilidad en las juntas transversales que permite que la forma del anillo se adapte a una forma ligeramente elíptica.

En el transporte, manipulación y colocación, los segmentos deberán resistir el manejo rudo en condiciones difíciles, incluyendo la posibilidad de que se les deje caer. Cuando deban colocarse detrás de un escudo, es posible que el empuje longitudinal de los gatos se aplique desigualmente sobre la superficie de los segmentos. Por consiguiente, se ha desarrollado el proporcionamiento de los segmentos típicos. A veces ha sido necesario determinar un factor que limite el peso máximo y, por lo tanto, las dimensiones de los segmentos para túneles pequeños y medios para poder transportarlos a su lugar sólo con la fuerza del hombre. Es posible instalar dispositivos de izaje en los túneles de mayor tamaño, pero es frecuente que sigan habiendo restricciones y acceso difícil.

Cuando se colocan en un túnel anillos embridados de hierro colado, el patrón de las costillas podrá tener sus ventajas en algunos casos como, por ejemplo, para fijar las frecuentes ménsulas de soporte para los cables y tuberías en los túneles para ferrocarril,

puede ser necesario un piso liso y de fácil drenaje, lo que se puede lograr con un relleno de concreto o un revestimiento completamente liso en el caso de drenaje. Si fuera necesario en algún momento un revestimiento secundario, el costillaje de hierro no será desventajoso excepto en lo que toca al punto del nivel más bajo de la sección transversal.

➤ Hierro de grafito esferoidal.

El hierro colado S.G., tiene casi la misma composición química que el hierro colado de fundición gris, pero el contenido de grafito es de forma nodular más bien que escamosa. Esto hace que su resistencia a la tensión sea mucho mayor y su resistencia a la compresión algo mayor, es menos frágil y probablemente más resistente a la corrosión. Su comportamiento es más parecido al del acero dulce, pero se puede usar en los revestimientos que utilizan tramos de acero, exactamente que si fuera hierro gris. Se pueden utilizar secciones algo más delgadas y ligeras, y con una distribución del material estructuralmente más económica, siempre que la distorsión durante el enfriamiento se pueda mantener dentro de los límites aceptables en el proceso de fundición.

El peso más bajo del material que se debe transportar y colocar en la obra tiene evidentes ventajas en la construcción; en todos los otros aspectos relacionados con el revestimiento de los túneles a que se ha hecho referencia son prácticamente los mismos que los de hierro colado gris. Es más elevado el costo por tonelada, lo que no queda compensado por la reducción en el peso, pero son posibles los ahorros considerables en el manejo y tiempo de colocación.

➤ Segmentos de acero soldado.

El acero soldado no se ha utilizado con frecuencia para revestimientos circulares por tramos. Se usa a veces en donde se han impuesto cargas anormales por las estructuras cercanas o en los entronques u otros accesos del túnel debido a la resistencia adicional a la flexión y a la tensión del acero comparado con las del hierro colado. Los revestimientos de acero colado, con tramos unidos por pernos, se utilizan en secciones considerables de túneles de los Estados Unidos; se prefirió el hierro colado para los túneles del agua de circulación en la estación de energía nuclear de Dungeness, especialmente con el fin de resistir la alta carga de empuje producida por el escudo durante la excavación del túnel.

La impermeabilización presenta los mismos problemas que los otros revestimientos unidos con pernos, a menos que sea práctico utilizar la soldadura. La corrosión en terrenos desfavorables exige mayor atención que cuando se usa hierro colado. No existe una gran diferencia entre la resistencia de los dos materiales a la corrosión del terreno; sin embargo:

- El acero carece de la película de arena fundida que recubre las piezas fundidas.

- Si se desea sacar ventaja de la resistencia, como se utilizarían secciones más delgadas, se tendría una pérdida proporcional mayor cuando fuera atacado el material.

Por lo que, serán necesarios métodos más elaborados para el revestimiento.

➤ Concreto precolado embridado.

La primera sustitución importante del concreto en lugar del hierro colado se hizo, en la prolongación de Ilford de la London Central Line en 1939, el diseño y las principales dimensiones siguieron muy cerca del patrón de los tramos de hierro colado. Las bridas eran considerablemente de mayor espesor, se introdujeron nervaduras atesadoras longitudinales para resistir el empuje de los gatos sobre el escudo y se redujo el número de pernos en el círculo.

Cuando se le compara con el hierro colado, se observa que el concreto de alta calidad debe tener mayor espesor y refuerzo de acero en los lugares donde pueda haber tensión. Los tramos son más propensos a dañarse por el manejo y por la aplicación de los gatos y, también, después de la colocación debido a su mayor rigidez; las grietas no serán evidentes sino hasta más tarde si hay filtraciones, las juntas de cruz se colocan por lo común junto con un empaque bituminoso. La impermeabilización es más difícil que cuando se utilizan segmentos de hierro colado, es probable que se establezcan especificaciones cuando se esperan condiciones difíciles. La exactitud dimensional y la confiabilidad exigen muy altas normas de fabricación, las cuales se han mejorado progresivamente con la experiencia. No hay mucha investigación sobre la resistencia a la corrosión; cuando se utiliza hierro colado en el caso de terrenos químicamente agresivos, los problemas requieren un estudio cuidadoso. Es preciso controlar de manera exacta la calidad de concreto y el recubrimiento sobre el acero usando un cemento resistente a los sulfatos donde sea apropiado.

Es posible obtener de los fabricantes especialistas una variedad de tamaños normativos, y el costo es del orden de una tercera parte menos que el de los anillos de hierro colado.

➤ Revestimientos de expansión.

El desarrollo de los revestimientos expandibles con juntas flexibles representó un importante avance comparado con el de los revestimientos, de bridas unidas con pernos, ya sea de hierro colado o de concreto, los que formaban un cilindro rígido de continuo y al que se le tenía que aplicar inmediatamente una inyección de lechada, como una fase del ciclo de operaciones, para asegurar el terreno. La nueva técnica está especialmente adaptada para la arcilla compactada. Esta técnica se apoya en el principio de que el anillo formado por segmentos se arma directamente detrás del escudo, en estrecho

contacto con el terreno exactamente perfilado, y se aplica un esfuerzo tangencial adecuado a la comprensión mediante cuñas o gatos. No existe ningún espacio libre que se desea sellar con lechada de cemento, por lo que la excavación puede avanzar tan pronto como se termine la colocación de las cuñas. La eliminación total de los pernos, tanto en las juntas de cruz como en las circulares, constituye un ahorro adicional tanto en tiempo como en costos. Estos ahorros en el tiempo favorecen el uso de escudos excavadores, debido a que, de este modo, la excavación se interrumpe durante una menor proporción del ciclo.

Se tienen ejemplos de la aplicación en gran escala de este principio en los túneles de ferrocarril de Potter's Bar en 1959, y en el sistema Don Seg utilizado en un túnel para agua con una longitud de 27 Km, a través de Londres en 1959, y en el revestimiento flexible por tramos de hierro colado y concreto diseñados para la Victoria Line en 1968, y los túneles posteriores en el ferrocarril subterráneo de Londres. El sistema Don Seg utiliza en cada anillo 10 segmentos sólidos idénticos de concreto, cada uno ahusado longitudinalmente, pero colocados en direcciones alternadas. Es necesario un colado muy exacto. Los anillos se comprimen contra la arcilla utilizando los gatos del escudo para empujar los segmentos y que queden alineados contra el segmento ahusado. De esta forma, se logra un interior liso y uniforme. El sistema de bloques de cuña se desarrolló a partir del sistema anterior; utiliza un solo bloque de cuña, ahusado longitudinalmente y colocado en la corona mediante gatos. En los anillos de concreto de la Victoria Line se utilizaron gatos colocados muy bajos a cada lado, con el fin de esforzar los anillos; luego se empacaron y colocaron cuñas, en los espacios vacíos se utilizaron anillos de hierro en la sección central de la línea, ya que suministraban un mayor margen de resistencia y mayor flexibilidad en el segmento más delgado para adaptarse a las cargas y distorsiones desiguales. Los experimentos realizados para investigar la utilización del hierro S.G., pusieron de relieve sus ventajas, pero los costos materiales para cualquier forma de hierro colado sólo pueden competir con el concreto en circunstancias muy especiales.

La dificultad de impermeabilización cualesquiera de estos sistemas flexibles es de tal naturaleza que, por lo común, no son adecuados para terrenos acuíferos.

➤ Revestimiento liso.

Para lograr un interior liso en los túneles para agua o sistemas de alcantarillado u otros fines, se pueden utilizar diversos sistemas de revestimiento con segmentos de concreto. Ya se han mencionado los sistemas Don Seg y el de los bloques de cuña, pero no se pueden utilizar junto con la inyección de lechada de cemento.

Otros diseños se deben construir sobre un anillo anterior, dejando un espacio exterior de unos 25 mm para que se rellene con lechada de cemento, lo mismo que se hizo con los segmentos de las bridas y unidos con pernos. El minitúnel constituye un sistema especial utilizado en la perforación de drenajes de casi 1 m de diámetro; se

levanta un anillo formado de tres segmentos, detrás de un escudo especial, y se realiza la inyección de lechada de cemento.

#### 5.4.- Revestimiento con Enladrillado y Mampostería.

Ni el enladrillado ni la mampostería se utilizan por lo general como material en el revestimiento estructural de un túnel. La mayor parte de los túneles de canales y ferrocarriles construidos en gran breña estaban revestidos de ladrillos, los cuales se fabricaban a menudo en el lugar. La totalidad del método inglés se basaba en alterar la excavación y el adomado con la albañilería, y las habilidades necesarias se hallaban altamente desarrolladas; no sería fácil tratar de revivirlas hoy en día. Los túneles para el drenaje se construían por lo común de ladrillos; se especificaban los ladrillos azules de gran dureza para el piso, ya que se trataba del material más capaz de resistir la erosión causada por la acción abrasiva de la arenisca.

La mampostería se utilizaba con menos frecuencia en las localidades que disponían de piedras consideradas como adecuadas.

Los problemas de reparación de dichos revestimientos en los viejos túneles de ferrocarriles y drenaje en especial, podrán llegar a ser cada vez más importantes, y pueden variar desde la limpieza y afinado de las uniones y la sustitución local de ladrillos, hasta una amplia reconstrucción o, posiblemente, la reposición total.

## 6.- INSTRUMENTACIÓN.

Las mediciones que se realizan durante la construcción, pueden servir para verificar, si el diseño es el adecuado a bien señalar áreas en las que conviene hacer modificaciones.

La instrumentación debe planearse y programarse con la finalidad de poder verificar durante la construcción del túnel su comportamiento, o bien para la verificación del diseño que será utilizado como revestimiento definitivo.

Por consiguiente deben concebirse tomando en cuenta primero que nada el conjunto, y después las partes a las que va a estar más directamente relacionada.

En el túnel la instrumentación queda por lo general instalada después de que ha pasado el frente, por lo que registra sólo una porción de la respuesta de la roca a la excavación. Más aun, el soporte inicial suele aplicarse antes de que se interpreten o quizá se tomen las primeras mediciones.

Por consiguiente no hay oportunidad para influir en la decisión respecto a la elección del soporte en la sección sobre la base de las mediciones de la instrumentación.

Estas pueden ser muy útiles, en cambio para indicar en que momento se estabilizan los movimientos de la roca que deben ser elemento adecuado para colocar el revestimiento definitivo. Si los movimientos no se estabilizan, entonces si se puede modificar el soporte temporal o el definitivo, basándose en las mediciones. Pero quizá el mejor uso de estas observaciones, en una situación así, es la de poder modificar el soporte de futuras secciones, en la que se espera que se plantee en situaciones semejantes.

### 6.1.- Importancia de la Instrumentación.

El estado inicial de esfuerzos en el terreno, debido a las fuerzas gravitacionales y posibles influencias tectónicas, la roca se encuentra sujeta a esfuerzos antes de que la cavidad se lleve a cabo. Así se habla de un estado inicial de esfuerzos o primaria, que por supuesto es diferente de un punto a otro.

Existen dos condiciones en los que los esfuerzos iniciales pueden ocasionar problemas durante el desarrollo del trabajo:

- a) Cuando el terreno en la vecindad de la excavación reacciona a los cambios en el campo de esfuerzos por procesos de flujo plástico o de rotura, las que pueden provocar, ya sea el cierre de la excavación o si éste evita el desarrollo de la presión de la roca.

- b) Cuando en roca dura, a grandes profundidades el fenómeno de explosión se manifiesta en forma de estallidos y separación de fragmentos de roca, algunas veces de tales dimensiones que ponen en peligro, la vida de las personas que trabajan en el túnel.

### 6.2.- Objetivo de la Instrumentación.

El diseño de cavidades subterráneas tales como túneles, conductos y cavernas en suelos, desde blandos hasta rocas, hace poco era cuestión solo de la experiencia.

En las últimas décadas, sin embargo, han aparecido métodos de investigación de campo y técnicas de medición sistematizadas, así como nuevos métodos de cálculo que proporcionan poderosos elementos de diseño, que conducen a estructuras subterráneas más seguras y económicas.

La instrumentación y medición de túneles tiene como finalidad conocer la problemática que existe entre la construcción de un túnel y los diversos aspectos de la instrumentación: los instrumentos tomando en cuenta su diseño conceptual, su fabricación y su uso; la instrumentación, entendida está como la definición del número, tipo y ubicación de los instrumentos requeridos para realizar las mediciones; la ingeniería de proyectos, que establece las características geométricas de la excavación, la forma de su ejecución y los ademes provisionales y definitivos determinados para lograr su estabilización; y la actividad culminante como la construcción de túneles.

Se han planteado un buen número de razones que fundamentan la necesidad y la conveniencia de realizar mediciones en túneles, todas ellas válidas, algunas con mayor importancia en casos particulares y fundamentalmente pueden expresarse en dos grandes grupos.

- Registrar el comportamiento que se acusa en el espacio afectado por la excavación, donde esta induce variaciones en el estado físico del medio que la rodea, es decir, variaciones en esfuerzos y en presiones hidráulicas e inducción de deformaciones y desplazamientos de la masa del subsuelo en que se excava el túnel, y en los elementos estructurales que se utilicen para estabilizar los huecos creados.
- Mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de obras, de tal manera que se puedan mejorar o refinar, e incluso establecer procedimientos de análisis y diseño para este tipo de obras de ingeniería.

Estos dos propósitos generales tienen su origen en la responsabilidad que adquirimos para lograr que las obras a las que nos aplicamos se realicen cumpliendo los tres preceptos básicos que son la esencia misma de la ingeniería: que las obras se realicen con seguridad, economía y confiabilidad. Seguridad en el sentido que no se

pongan en peligro las inversiones aplicadas a la obra, la integridad de los equipos utilizados para su ejecución y mucho menos la vida del personal que labora en ellas. Economía en el renglón de costos y beneficios correspondientes a la ingeniería, establecer los conceptos que deben aplicarse a las erogaciones para ejecutar la obra con el monto requerido para realizarla, pero no mucho más. Confiabilidad para que la obra ejecutada cumpla satisfactoriamente con la función que le dio origen.

Aunque también podemos dividir las mediciones que se llevan a cabo durante la construcción de túneles en:

➤ Corto plazo.

- Proporcionar los elementos que permitan garantizar la seguridad tanto de la excavación como de las estructuras vecinas o de superficie que pudiesen resultar afectadas.
- Favorecer la toma de decisiones respecto a la clase, profusión y resistencia del soporte temporal.
- Fundamentar la toma de decisiones con respecto a la elección, cambio o modificación de los procedimientos de excavación.

➤ Mediano plazo.

- Conocer la naturaleza y, si resulta posible, cuantificar la presión del terreno. Definir parámetros de deformabilidad del terreno y criterios para juzgar la interacción terreno-revestimiento.
- Obtener las bases para ajustar el diseño del revestimiento definitivo a la naturaleza del terreno y al comportamiento observado de la excavación.

➤ Largo plazo.

- Comparar las predicciones teóricas con el comportamiento real de las estructuras de soporte y de revestimiento definitivo.
- Ajustar las hipótesis de comportamiento del terreno que circunda a la excavación para futuros diseños.

### 6.3.- Aspectos Fundamentales en la Instrumentación.

La importancia práctica de las mediciones sistemáticas de un proyecto depende, hasta que grado los resultados de las observaciones continuas pueden influir en el procedimiento, esto se pueden ilustrar de la siguiente manera:

Mucho de esto tiene que ver la confiabilidad de operación de los instrumentos, pero también parte de esta actividad ha sido motivada por una inapropiada utilización de instrumentos de calidad satisfactoria; en cuanto al uso inadecuado, podemos mencionar los siguientes aspectos:

- Manejo.
- Colocación.
- Lectura.
- Interpretación.

El monitoreo durante el desarrollo de una excavación subterránea, es esencial para controlar correctamente la estabilidad de la roca y poder obtener retroalimentación útil para el diseño de un sistema de sostén en los techos. El sistema de monitoreo debe ser necesariamente objetivo pues de otra manera las decisiones que se asocian con la estabilidad de la excavación, carecerían de valor real ya que se basarían sólo en consecuencias y no en la continuidad de observaciones. El monitoreo, pues, es importante para mejorar la seguridad y la economía.

El monitoreo se puede efectuar mediante inspecciones visuales de las anclas y de la roca circundante. Por medio de sencillas revisiones en las anclas mismas y, colocando, adicionalmente, instrumentación especial. La inspección visual y la verificación de las anclas ya instaladas solamente se pueden realizar durante y después de la excavación, pero el uso de instrumentos antes, durante y después de excavaciones subterráneas, se puede utilizar para los siguientes propósitos (HOEK & BROWN 1980):

Antes de la excavación.

Para registrar información necesaria que permita el diseño de un sistema de anclaje. Esto incluiría el módulo de deformación de la masa de la roca, la resistencia in situ de la roca y las condiciones in situ de los esfuerzos de carga.

Durante la excavación.

Para confirmar la validez del diseño y proporcionar bases de cambio de diseño. Además, el monitoreo de desplazamientos proporciona información que puede usarse para mejorar la seguridad y la economía de una obra bajo tierra.

Después de la excavación.

Para verificar el comportamiento general de la excavación durante las operaciones (en aplicaciones de ingeniería civil), o para monitorear la respuesta de una excavación a los sistemas de minado adyacentes a operaciones subterráneas (en aplicaciones mineras).

Un programa subterráneo de instrumentación debe satisfacer los requisitos antes mencionados tan eficiente como económicamente sea posible, sin dejar de enfatizar la importancia de que sea sencillo, robusto y confiable puesto que el ejercicio al que será sometido este programa de instrumentación, estará sujeto a condiciones severas de, por ejemplo, temperaturas, humedad y manejos rudos.

Existe una amplia gama de instrumentos para uso subterráneo, pero queda fuera del alcance de este trabajo enumerar todos los que hay disponibles. Aún así, se examinarán algunos de los más importantes instrumentos y las técnicas de medición que se desprenden de ellos. Sin embargo, se le deja al lector el interés de darle seguimiento a los detalles de los mismos en catálogos y manuales proporcionados por los fabricantes.

Antes de la Excavación:

Se pueden encontrar descripciones detalladas respecto a instrumentos y equipos para la recopilación de datos geológicos estructurales en una buena cantidad de libros, entre éstos, (HOEK & BROWN 1980) y acerca de las características de resistencia y deformación de rocas, (LAMA & VUTUKURI 1978).

Mediciones de esfuerzos de carga en rocas:

Uno de los criterios más importantes de diseño para el refuerzo de rocas emana de las condiciones de los esfuerzos de carga in situ de las rocas. Con muy pocas excepciones un conocimiento detallado de estas condiciones de esfuerzo in situ resulta innecesario. En general, la información más sobresaliente para establecer la estabilidad de una excavación subterránea, es, en orden de importancia, la siguiente: el rumbo principal de los esfuerzos, la relación entre sí de los rumbos principales de los esfuerzos y la magnitud absoluta de éstos. Con lo anterior en mente, cualquier diferencia mínima que se presente entre los métodos posibles de medición de esfuerzos que se piense afecten la elección de un método para una situación en particular, pasa a ser de menor

importancia ya que las consideraciones más importantes se interesan en la disponibilidad de la instrumentación y en gente con experiencia. El éxito culminante de una actividad de campo depende de los detalles prácticos. Esto se ha demostrado, por ejemplo, en (STILLBORG & LEIJON 1982).

El campo tridimensional total de los esfuerzos de carga puede determinarse desde un solo barreno mediante la aplicación de una técnica de barrenación que consiste en el encamisado del núcleo, por ejemplo, usando el manómetro de tensión CSIRO de Inclusión Hueca. Esta cámara se suministra con nueve o doce manómetros de medición de esfuerzos (tensiones), totalmente encapsulados en resina epóxica. Después que la cámara haya sido adherida dentro del barreno mediante resina epóxica, se pueden tomar las lecturas de tensión desde la cámara en tanto se continúa con la barrenación envolvente. Esta técnica ha sido utilizada ampliamente y con ella se han obtenido resultados muy confiables. (STILLBORG & LEIJON 1982).

#### Mediciones de Aguas Subterráneas:

Este es un problema práctico muy importante en las excavaciones subterráneas puesto que la estabilidad de la masa de las rocas puede verse severamente afectada ante la excesiva presencia de agua subterránea. Muchos de los problemas que se presentan debido a aguas subterráneas son difíciles de cuantificar con precisión. Sin embargo, hay instrumentos y equipos disponibles para medir la cantidad de flujo del agua subterránea a los diferentes niveles de profundidad de un barreno. De acuerdo a mediciones obtenidas de diferentes barrenos, es posible calcular la permeabilidad de la masa de las rocas y la distribución de la presión del agua en la masa de las rocas. En (RISSLER 1978), se puede encontrar un resumen comprensible acerca de la permeabilidad entre las uniones de las rocas.

#### Durante la Excavación:

Durante la excavación, las mediciones se deben realizar ya sea para verificar la validez del diseño del sistema de anclaje o para permitir darle término a un diseño en curso. Además, estas mediciones deben proporcionar información que asegure se han están tomando (todas), las medidas adecuadas para evitar un deterioro en las condiciones generales a tal grado que aumenten a costos insostenibles o lleguen a ser imposibles de solución.

Es importante que se utilicen instrumentos sencillos y robustos para las mediciones durante la fase de excavación y que sean de fácil lectura y no interfieran con otras actividades de excavación que se estén realizando simultáneamente. En la opinión de algunos autores, las mediciones de deformaciones son las que proporcionan los medios más efectivos para monitorear el comportamiento no solamente de un sistema de anclaje sino también, y en general, el comportamiento de una masa de roca. Es

preferible que las mediciones que se hagan en las anclas, en el contorno de apertura de éstas y en la masa de roca circundante, se tomen al mismo tiempo.

#### Medición de pernos:

Con una llave de par es posible obtener una relación aproximada entre el par y la tensión dentro del ancla para aquellas que hayan sido colocadas mecánicamente. A pesar del hecho de que una cabeza de ancla oxidada distorsionará las mediciones, esta técnica aún es muy útil para detectar anclas inactivas. Este tipo de retroalimentación se puede usar para determinar la efectividad del diseño de anclas para diferentes operaciones mineras y para establecer nuevas especificaciones de diseño para anclajes.

Para anclas bipartidas, en caso que el anillo del ancla se desprenda y la placa de contacto del ancla se separe de la roca, denota una señal anticipada que advierte acerca de la necesidad de requerir más pernos (SCOTT, 1984).

Una versión ligeramente modificada del ancla Swellex se puede utilizar para monitorear la deformación de la roca, porciones de la soldadura y de la camisa inferior se han quitado en un torno. Esto proporciona superficies sobre las que se pueden hacer mediciones del desplazamiento de la camisa inferior con relación al tubo principal. Un tubo delgado de acero colocado sobre la porción inferior del ancla evita la expansión en la longitud de éste, menos en los dos últimos pies del mismo. La colocación de estas unidades de monitoreo a intervalos regulares dentro del patrón de colocación de las anclas permite un sistema rápido y útil para la determinación de la estabilidad de las rocas.

#### Mediciones por Convergencia:

Éstas normalmente se realizan por medio de una cinta o un vástago extensor de mediciones situado entre las marcas de medición sobre las paredes y el techo de la apertura. Un dispositivo clásico de medición por convergencia para un túnel. El dispositivo incluye dos extensómetros de vástago de medición del barreno de 8 metros de longitud. Con estos extensómetros del barreno, se pueden determinar los rumbos de deformación de las paredes y del techo del túnel. Aun un pedazo de alambre para voladuras que se haya atado a un ancla de techo y que a su extremo opuesto se le coloque un peso muerto, (plomada), se puede utilizar como instrumento útil aunque rústico para advertir convergencias de techo. Así, el cambio en la distancia entre la plomada y el del bloque de roca se podrá medir por medio de un flexómetro.

#### Extensómetros del barreno:

Se utilizan para medir las deformaciones en la masa de roca circundante a una excavación subterránea. El vástago extensómetro es el más versátil de los diferentes

extensómetros que haya disponibles. Consiste de uno o varios vástagos, cada uno conectado a un ancla y enfundado dentro de un tubo de plástico.

La verificación del trazo y del perfil longitudinal de un túnel al término de las diversas etapas de excavación del mismo, reviste particular importancia tanto desde el punto de vista de estimación de volúmenes como de tolerancias geométricas del túnel terminado. Esta verificación que se realiza con métodos topográficos convencionales, se requiere para la toma de decisiones acerca de los recortes, peines o afines que deberán ejecutarse o bien acerca de modificaciones en trazo y pendiente que minimicen estos trabajos y los volúmenes de concreto para el revestimiento.

Los perfiles transversales de un túnel se han venido determinando tradicionalmente utilizando métodos topográficos simples, aunque lentos y difíciles de verificar. Con estos instrumentos se puede lograr:

- Control continuo del perfil del frente de excavación.
- Determinación de la sobre excavación o sub excavación.
- Cálculo de volúmenes precisos.
- Monitoreo de las dimensiones planeadas.
- Control de deformaciones cuando estas son de gran magnitud.

Las características sobresalientes de este procedimiento son:

- Los datos teóricos de perfil y las tolerancias pueden ser programados.
- El perfil efectivo es rastreado automáticamente y transmitido inmediatamente a la pantalla de video de la computadora. Las desviaciones del perfil teórico aparecen claramente.
- El instrumento es fácilmente transportable dentro del túnel. Es posible ejecutar de 8 a 12 mediciones de perfil en una hora.
- La evaluación es inmediata y a la vista. Las medidas pueden ser transferidas al papel con una unidad copiadora.

Los túneles generalmente se revisten con concreto cuando ya la excavación se encuentra estabilizada; sin embargo, cuando por razones de programa se requiere revestir antes de alcanzar la estabilidad o bien cuando se observan deformaciones crecientes a ritmo más o menos constantes que no disminuyen a pesar del soporte

temporal, el revestimiento tiene como una de sus funciones primordiales detener los movimientos de la excavación y estabilizarla en forma definitiva.

En uno u otro caso, sea por su efecto estabilizador, por razones constructivas o por requerimientos geométricos, o sea por algunas de estas causas combinadas, el caso es que los revestimientos de concreto en túneles son en general estructuras gruesas, bastantes rígidas y sobradas con espesores mínimos de 25 cm ( con frecuencia mayores).

Por lo anterior resulta que las deformaciones de convergencia en revestimientos son pequeñas y usualmente sólo es apreciables con instrumentos muy sensibles y precisos, razón por la que pocas veces suelen medirse; quizá también, las deformaciones en los revestimientos no se llegan a medir debido a que éstos se consideran como la última etapa de construcción de un túnel, e indebidamente, se acepta a priori que no sufrirán deformaciones dignas de tomarse en cuenta.

Dentro de la instrumentación de túneles se utiliza usualmente el "Distómetro" el cual mide los incrementos de longitud en la sección de medición. Este aparato consta de las siguientes partes:

- Micrómetro, para calibración de tensión.
- Reloj, para lecturas de diferencias de longitud.
- Dos Rótulas.

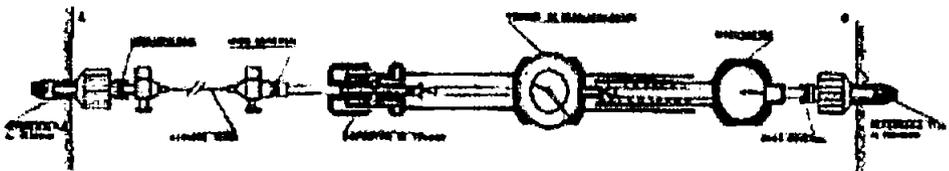


Figura 53.  
Esquema ilustrativo del Distómetro.

Se calibra para tensión y longitud, pesa 8 Kg para calibración por tensión, además se necesita el siguiente material complementario:

- Bulones para anclas, para marcos de acero, para roca sana y concreto.
- Taladros de rotopercusión.

- Brocas para concreto.
- Alambre de acero invar.
- Tambor de aluminio para protección del alambre invar.
- Coples sujetahilos.
- Terraómetro.

El equipo adicional consta de:

- Planta generadora.
- Grúa articulada con canastilla montada en camión diesel.

#### Calibraciones.

Se coloca el aparato en su calibrador donde deberá permanecer un tiempo mínimo de 30 minutos para su adaptación a la temperatura dentro del túnel. Transcurrido ese lapso de tiempo se procede a hacer las calibraciones siguientes:

##### a) Calibración por Tensión.

Se coloca el aparato en la parte central del calibrador y se pone la pesa de 8 Kg en su extremo libre, ésta nos servirá para dar el ajuste al micrómetro.

##### b) Calibración por Longitud.

Se coloca el aparato en un extremo del calibrador en la parte superior por una rótula y en la parte inferior por un perno, se procede a darle la tensión equivalente a 8 Kg, por medio de una tuerca de ajuste hasta que el micrómetro marque cero, donde el reloj nos dará la lectura de calibración por longitud.

Estas operaciones a y b se repetirán cuantas veces sea necesario, donde el promedio de las lecturas obtenidas será la calibración inicial (E); que se anotará en el registro junto con las temperaturas de calibración; terminando las calibraciones se procede a la colocación del aparato a las secciones de instrumentación.

## Secciones de Medición.

Las secciones de medición típicas que se utilizan en el túnel consisten en tres puntos de medición; uno instalado en las claves y los otros dos en las paredes, donde se instalarán los bulones que se requieran para dicha sección (anclas, marcos, roca sana y concreto).

## Colocación del Aparato (Distómetro).

La colocación del Distómetro en las secciones de medición: Se coloca el Distómetro en el punto A, la rótula se instala en el punto B y se unen A y B con el alambre invar dándole la tensión de 8 Kg por medio de la tuerca de ajuste, que será hasta que el micrómetro marque cero, luego, se procede a tomar la lectura M' en el reloj, anotándola en el registro de campo, efectuando esta operación cuantas veces sea necesario, de acuerdo con la experiencia del instrumentista, donde se anotará en la tabla de mediciones el promedio de las lecturas donde llevarse a cabo este mismo procedimiento para los demás puntos de la sección.

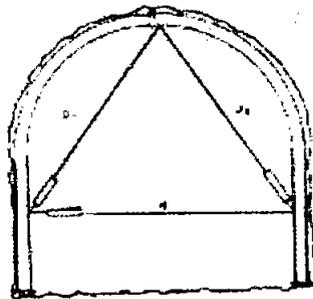


Figura 54.  
Colocación del Distómetro.

➤ Corrección por temperatura (AT).

Se aplicará cuando la diferencia de temperatura sea de décimos, de milímetros y se efectuará de la siguiente forma:

$$AT = (T_1 - T_2) CL$$

En donde:

AT = Incremento de temperatura.

$T_1$  = Temperatura inicial de calibración.

$T_2$  = Temperatura al efectuarse la lectura.

$C$  = Constante de deformación equivalente a 0.1(10-5).

$L$  = Longitud entre puntos de medición.

➤ Corrección por calibración (AE).

Se efectuará de la siguiente forma:

$$AE = E_i - E_1$$

En donde:

AE = Incremento de longitud.

$E_i$  = Calibración inicial.

$E_1$  = Calibración de las mediciones sucesivas.

➤ Lectura corregida (M).

$$M = M' - AE - AT$$

En donde:

M = Lectura corregida.

$M'$  = Lectura de medición.

AE = Incremento de medición.

AT = Incremento por temperatura.

➤ Convergencia (A).

Es el incremento de longitud dada en milímetros que será la diferencia de lecturas donde:

$$A = IM - M.$$

En donde:

A = Convergencia en milímetros.

IM = Lectura inicial de medición.

M = Lectura corregida.

El signo resultante nos indicará:

(+) = Acortamiento.

(-) = Alargamiento.

Todos los datos anteriormente mencionados, se anotarán en las tablas de medición de convergencia. La tabla de medición de convergencia nos proporcionará los datos para elaborar la curva de deformación de la sección de medición.

La curva de deformación nos servirá para el cálculo de la velocidad de deformación que será igual a la pendiente de la misma. Se podrá considerar la estabilidad total de la sección cuando la velocidad de deformación sea menor a igual a 0.5 milímetros por mes.

## 7.- CONCLUSIONES.

A través de este trabajo se han hecho notar varios de los factores que intervienen en un momento dado, unos a favor y otros en contra de la estabilidad, muchos de los cuales son hasta el momento difíciles de incorporar en un modelo y más difíciles aún de medir con precisión. Se ha de resignar el análisis con intentar definir situaciones y respuestas envolventes, sin distinguir a detalle a muchos de los factores significativos. En rocas, la complejidad y dificultad del análisis proviene de la naturaleza discontinua del medio, la no-linealidad y la no-reversibilidad de los ciclos de carga y descarga, así como la dilatación, los equilibrios dependientes del tiempo (viscosidad), de la historia geológica, y las respuestas mecánicas dispersas a la vez por la discontinuidad y heterogeneidad de la masa como por el nivel de ignorancia de las mismas en cada punto.

Evidentemente aquí el diseño previo a la construcción ha de darse como preliminar y con debidos márgenes conservadores, para ajustarlo después sobre la marcha, es decir, a medida que la excavación avance. Durante ésta habrá necesariamente que observar y medir para definir esas envolventes de respuesta que sirvan para retroalimentar las hipótesis de base del diseño.

Dependiendo de la calidad de la roca es factible utilizar ya sea el método a sección completa o a media sección para la perforación del túnel, se estudió de manera profunda cuando se utiliza cada proceso constructivo, de esta forma se dará énfasis a lo siguiente:

Cuando la roca es muy buena, ésta se podrá trabajar tan sólo con el ciclo básico de excavación, el cual contempla las siguientes acciones:

- Trazo y acercamiento del equipo.
- Barrenación.
- Carga de explosivos.
- Ventilación.
- Amacice de clave y laterales.
- Rezagado (carga del producto de la voladura y su transporte).

Y a medida que la calidad disminuye, tendrá que contemplarse la utilización de soportes adicionales como; marcos metálicos o marcos de madera. Es a la perforación que le llamamos de mantenimiento logístico como son, colocación de líneas de tubería

para abastecimiento y desaloje de aire, tuberías para conducir agua para la barrenación, así como, la instalación de cables de energía eléctrica y de teléfonos.

En este capítulo también se estudió que para poder considerar determinado proceso constructivo es de vital importancia conocer el tipo de terreno en el que se trabajará, el cual se clasificó en 5 categorías y son las siguientes:

Primera Categoría.

Esta se podrá trabajar sin ademe, y además exige empleo de explosivos.

Segunda Categoría.

Terreno bueno extraído sin explosivos, como son arcillas duras, tierras compactas, areniscas y gravas aglomeradas.

Tercera Categoría.

En esta categoría están comprendidos los terrenos malos, compuestos principalmente de arcillas consistentes, tierra seca y rocas que presentan dislocamientos.

Cuarta Categoría.

Mal terreno como son arcillas blandas, arenas húmedas, tierras vegetales sin gran cohesión y rocas descompuestas.

Quinta Categoría.

Podemos considerar los terrenos sueltos, arenas a gravas secas, en los cuales no se puede realizar la excavación sin contar con una protección continua.

Enmarcando en una o más de estas categorías el terreno a perforar, se podrán elegir los métodos de trabajo. Por ejemplo en suelos contemplados en la primera, segunda y tercera categoría, es aconsejable utilizar el método a sección completa, o método inglés; para las demás categorías es indispensable el método de ataque a media sección.

Dentro del proceso constructivo es de vital importancia hacer las consideraciones necesarias para determinar la estructura que deberá colocarse, inmediatamente después de la tronada, siendo generalmente esta una serie de marcos colocados lo más cercano posible al frente de la excavación y planeados para trabajar temporalmente hasta colocar el revestimiento definitivo, aquí existe la disyuntiva de colocar marcos de madera o marcos de acero, por experiencias de las constructoras se aconseja, que en secciones medianas o grandes es conveniente utilizar marcos de acero, pues presenta mayores

ventajas que los marcos de madera, los cuales podrán ser utilizadas en secciones pequeñas con las condicionantes que se fijaron en el cuarto capítulo.

Los túneles soportados por marcos metálicos y retaque de madera son muchos y si los que han resultado en acierto parecen ser los más, es seguramente debido a esa capacidad de compensación de errores, que suelen tener las estructuras complejas o muy sobradas en unas zonas a cambio de los escasos en otras. Pero no hay que olvidar que ha habido fracasos, que llevaron a caídos locales o a colapsos masivos, muy probablemente a causa de una acumulación desfavorable de esas deficiencias que son consustanciales a este tipo de estructuras; de ahí que el cálculo y diseño que de éstas últimas deba hacerse, se esté siempre sobre aviso de las posibilidades de que aquellas deficiencias se presenten, varias o todas, en el sentido más desfavorable.

Los sistemas de anclaje utilizados para conducir esfuerzos de la roca al ademe serán analizados y calculados en forma directamente del mecanismo de falla de la roca y su cantidad será adecuada al patrón de barrenación más conveniente en función de la capacidad de explosivos. Aunque cabe aclarar que en busca de la oportunidad y de la eficiencia, se han ido perfeccionando los procedimientos de barrenación y de instalación. En el extremo de la más alta mecanización existen máquinas con dispositivos revólver que perforan, alimentan los cartuchos e insertan las anclas en operaciones enteramente automáticas. Su costo tan alto las hace justificables sólo en grandes túneles cuyos terrenos puedan ser y convenga anclarlos con densidades de anclaje importantes.

Se considera que este sistema de ademe (anclaje), se utiliza mucho porque quizá sea el que menos interfiera en la sección de excavación, tanto en su instalación, como en su posterior eventual refuerzo, el cual se consigue muchas veces simplemente cerrando el patrón de distribución de anclas y/o incrementando su longitud.

Utilizando la tecnología en estos momentos, el concreto lanzado, descrito en el capítulo 4, se utiliza cada vez más ya sea como soporte temporal o como revestimiento definitivo; en la perforación de suelos rocosos, se actúa como un estabilizador de la roca para poder formar un bloque monolítico de concreto, acero, roca y suelo.

Como se estudió anteriormente existen procedimientos de mezcla seca y mezcla húmeda, siendo el primero de ellos el más aconsejable, puesto que la calidad del mismo es más controlable, dada su preparación antes del lanzado, evitando con esto fraguados iniciales del concreto innecesarios, si este no se coloca de manera oportuna e inmediata por condiciones de la obra.

Es importante mencionar que el concreto lanzado acepta la combinación con malla electrosoldada, que es lo común, pero también varillas, marcos o anclas, todo esto con el fin de dar una estructura de ademe más reforzada o más rígida, con dosificaciones de los diferentes materiales ajustadas a la mejor conveniencia. De esta manera se puede incorporar resistencia adicional, cuando se requiere con menor labor y

más eficiencia que en el caso de marcos metálicos y de madera. A veces el refuerzo resulta suficiente con añadir una capa más de concreto lanzado y esto se puede lograr muchas veces sin invadir la sección útil del túnel.

Aunque, como ya se mencionó en el apartado correspondiente, la estructura de ademe basado en anclas tiene sus inconvenientes, que también hay que tomarlos en cuenta a la hora de realizar el diseño como lo es su carácter puntual y discontinuo que debe suplirse con otros elementos de liga y distribución o con patrones de anclaje más cerrados que procuren el traslape de acciones individuales; la dificultad de acceso para la perforación y la instalación de puntos donde más se requieren.

Como colofón a los procesos constructivos sin tomar en cuenta la instrumentación para procesos constructivos en la perforación de túneles en suelos rocosos, tendremos que después de concluida la excavación se da comienzo al revestimiento definitivo del túnel, en este momento es de suma importancia hacer el replanteo del trazo real del túnel y definir el eje de la cimbra para poder dar los espesores del revestimiento definitivo, así mismo analizar los pendientes construidos para constatar que están ejecutadas conforme esta señalado en el proyecto, y si no es así, es aquí donde se tendrá que corregir.

Para el cálculo y diseño del espesor y tipo de revestimiento del túnel el proyectista tuvo que considerar las cargas estructurales que tendrá que soportar dicho revestimiento entre las que destacan de manera fundamental las siguientes:

- Presión de Roca.
- Presión Real de Montaña.
- Presión por Expansión.

En la presión Geostática se ha realizado el análisis de la determinación de esfuerzos en el revestimiento del túnel, resulta aconsejable utilizar para el diseño factores de seguridad mayores que para otro tipo de estructuras, puesta que técnicamente no es posible conocer con certeza las propiedades mecánicas del terreno, y como si fuese un material homogéneo e isotrópico.

Hay soluciones teóricas del problema que permiten calcular los esfuerzos y las deformaciones de los túneles en materiales idealizados, pero el proyectista debe adaptar los cálculos a materiales reales, cuyas propiedades no necesariamente son las mismas que las de los materiales ideales considerados, además, las propiedades del material real rara vez se conocen en forma segura y cambian mucho en distancias cortas. Como consecuencia, los conceptos presupuestos en las soluciones teóricas a menudo no son muy satisfactorios. Por lo anterior, será preciso continuar investigando el

comportamiento de los túneles, para llegar a mejores métodos de análisis; es opinión general de los especialistas que la combinación de estudios teóricos y de conocimiento empírico, resultado de observación y mediciones de comportamiento de túneles reales será el camino más prometedor para llegar pronto a mejorar substancialmente los métodos de análisis de que hoy se dispone o para desarrollar otros nuevos y mejores.

De acuerdo con las técnicas actuales existen dos procedimientos básicos para revestir un túnel de concreto:

- a) Revestimiento de concreto convencional, que consiste en el empleo de mezclas comunes entre plásticas y fluidas que se coloca mediante el uso de cimbras.
- b) Revestimiento de concreto lanzado que no requieren del apoyo de cimbras en ambos casos, es necesario llevar un control de calidad rigida, con el fin de detectar oportunamente cualquier posible desviación respecto especificaciones marcadas en el proyecto y, de esa manera efectuar las correcciones necesarias que conlleven a una calidad óptima del concreto. Las pruebas deberán realizarse desde el cemento y los materiales pétreos antes de ser mezclados, y cuando esté ya hecha, también es necesario extraer núcleos de concreto, para que los esfuerzos de compresión en el fraguado final estén de acuerdo con lo estipulado en el proyecto.

Cuando existen requisitos especiales de acabado es aconsejable la utilización del concreto convencional como revestimiento definitivo, pero cuando existen determinadas condiciones de colocación impuestas por limitaciones de espacio entre la cimbra y el terreno, es aconsejable la utilización del concreto lanzado como revestimiento definitivo.

Es necesario notar que el proyectista, quizá influenciado por el diseño estructural, se siente a menudo en el compromiso de dar un diseño definitivo de la estructura de ademe antes de que se empiece la construcción. La complejidad del problema, sin embargo hace imposible que se pueda cumplir cabalmente dicho compromiso. De proceder así, en el mejor de los casos se incurrirá en proporcionar soluciones muy conservadoras, pero en el peor de los casos se puede llegar a absurdos que comprometan la estabilidad del túnel, por ignorar los mecanismos de los cuales ésta depende.

Lo que hizo Terzaghi en toda su práctica profesional y que en geotécnia se le conoce como método Observacional, es aplicar el método científico a un modelo predictivo de comportamiento. Es un diseño evolutivo y eminentemente interactivo. Va aparejado, como es natural, a procedimientos constructivos de alta adaptabilidad, es decir, que puedan ajustarse con facilidad y sin grandes demoras a la variabilidad y heterogeneidad propia del terreno y que, por consecuencia, sean compatibles con estructuras de ademe igualmente adaptables, mismas que además sean capaces de inducir los mecanismos de autosoprote del terreno.

Son en estos casos la utilización de las observaciones y levantamientos geológicos y las mediciones in situ del comportamiento las verdaderas herramientas del cálculo. Los modelos mecánicos han de emplearse más bien para establecer un marco de referencia que ubique y ayude a interpretar correctamente las observaciones y mediciones.

Con apoyo a estas consideraciones, es razonable concluir, que la manera más apropiada de abordar el problema, para lograr que una estructura de ademe se convierta en un verdadero sistema de soporte, sea parecida, quizá, a la que acostumbran emplear los seguidores en relación con los túneles y que se resumiría de la siguiente forma:

- Obtener una descripción geológica y una caracterización geotécnica lo más detallada posible de los terrenos por excavar a lo largo de una franja suficientemente ancha para ser representativa y que incluya el trazo del túnel.
- Definir, en función de ella, la ubicación y extensión aproximada de las diferentes categorías de terrenos a lo largo del eje del túnel y establecer una clasificación del comportamiento geotécnico de los mismos al nivel de la excavación. Destacar claramente rangos de variación predecibles, y nivel de precisión de los mismos, así como, lugares o zonas de comportamientos extremos. El manejo de cuatro a seis clases de terreno como máximo es lo más aconsejable.
- Especificar, sobre la base de la más amplia experiencia, las estructuras de ademe y los procedimientos constructivos compatibles con cada clase de terreno. Aquí igualmente conviene establecer rangos previsibles de variación. Evítese el uso de calificaciones de terrenos y ademes a priori. El cálculo de ademes, apoyado en métodos semiempíricos de estimación de carga de terreno o de selección de ademe, debe utilizarse a título orientativo y para basar comparaciones, ajustes y retroalimentación posteriores.
- Especificar los sistemas de observación y medición del comportamiento in situ que deben utilizarse (método Observacional), con una clara indicación de su objetivo y del sistema de información y retroalimentación que se deberá seguir.
- Establecer con detalle las especificaciones del revestimiento definitivo y las posibilidades de adaptar su diseño y construcción al criterio del método Observacional y del diseño interactivo.
- Fijar claramente las responsabilidades de diseño en sus diferentes fases.

- Indicar las vías de comunicación y de entendimiento, así como las bases de responsabilidad compartida que se habrán de otorgar en las diferentes fases del proyecto, desde su concurso y contratación hasta su ejecución y entrega para que se cumplan las condiciones de un diseño auténticamente evolutivo e interactivo destinado a la económica, segura y satisfactoria consecución de la obra.

En todo lo anterior deben de adquirir una especial importancia las definiciones de imprevistos, de los riesgos y de los comportamientos extremos y de la manera como habrán de abordarse, resolverse o inclusive evitarse.

## Glosario

### Términos de uso Común en los Trabajos de Excavación y Diseño de Túneles.

**A carril (Loading):** Forma de cargar la dinamita en una columna dentro del barreno.

**Ademe de pozo:** Protección que se le da a las paredes en un pozo para evitar derrumbes.

**Al tresbolillo:** Disposición de los barrenos en filas paralelas cruzadas en diagonal.

**Alambres colectores:** Alambres que comunican entre sí varias series de estopines.

**Alcancía:** Excavación hecha a un nivel inferior del piso del túnel que se utiliza para la carga de los botes de rezaga.

**Anillo de refuerzo:** Anillo de material compresible insertado bajo la cabeza y la rosca de un tornillo que conecta los revestimientos de un túnel, para sellar agujeros de tornillos.

**Artificios:** Accesorios empleados en una voladura, tales como cápsulas, explosivos, mechas, etc.

**Atacador o fainero:** Palo que se usa para atacar los explosivos.

**Atacar:** Acción de apretar o apelmazar los explosivos en el barreno.

**Banco:** Parte superior de una sección de un túnel, con la superficie de arriba horizontal o casi horizontal, y que se deja temporalmente sin excavar.

**Banderilla:** Barra de perforación que queda traspada en el frente.

**Barrenación o tanda:** Conjunto de barrenos que se disparan en una sola voladura o tronada.

**Barreno atrasado:** Barreno cuya carga explosiva estalla después del tiempo calculado para ello.

**Barrenos de cielo:** Perforaciones que se hacen siguiendo el perímetro de la voladura en la parte superior.

**Barrenos de culebra:** Barrenos horizontales o inclinados que se colocan al pie de una pedrera para ayudar a la barrenación vertical.

**Barrenos de cuña:** Perforaciones que se hacen generalmente en la parte media de la voladura, las cuales tienen una inclinación hacia el centro formando una pirámide o cuña.

**Barrenos de empareje:** Barrenos de plata, de tabla y de cielo que da figura al corte.

**Barrenos de Plata:** Barrenos perforados en la parte inferior de una voladura o tronada.

**Barrenos de pozo:** Barrenos de diámetro grande (mayor de 5 cm).

**Barrenos de tabla:** Perforaciones que se hacen en los lados derecho e izquierdo, siguiendo el perímetro de una voladura.

**Barrenos quedados:** Barrenos cuya detonación falla total o parcialmente.

**Barrenos quemados:** Perforación o perforaciones de diámetro grande a las cuales no se les pone carga explosiva.

**Barrenos robados:** Barrenos que han sido cortados por el adyacente, pudiendo dejar parte del explosivo sin detonar.

**Barrenos secanteados o secante:** Barreno cuyo fondo ha sido ensanchado por una explosión preliminar, esto se hace para dar mayor capacidad de carga.

**Becerro:** Bomba para lodos de accionamiento neumático.

**Bombillo:** Cartucho de dinamita de tamaño estándar.

**Boni:** Bonificación en efectivo que se le entrega al trabajador por un mayor avance.

**Bonificación:** Pago extra que se le hace al trabajador en proporción del avance obtenido en una semana.

**Calesa o jaula:** Canastilla con la que se transporta verticalmente al personal, mediante el uso del malacate.

**Caña:** Huella dejada por un barreno que se manifiesta después de la voladura.

**Cárcamo:** Excavación hecha dentro del túnel para alojar la succión de las bombas.

**Carga de Fondo:** colocación de una mayor densidad de carga por metro de barreno en el fondo de la perforación.

**Cargas salteadas:** Método de cargar un barreno dejando separadores entre cada bombillo o cartucho.

**Carro de perforadoras:** Armazón que rueda sobre vías o sobre ruedas de hule, y que lleva los barrenos para la excavación de túneles en roca.

**Castillo o torre:** Estructura metálica o de madera que se coloca sobre las lumbreras y que sirve para el mateo de los materiales de rezaga.

**Cebo o espoleta:** Bombillo en el cual se le coloca el detonador cuya finalidad es iniciar la explosión del resto de la carga.

**Conducto evasé:** Conducto de extracción cuya sección transversal aumenta en la dirección del flujo de aire, con una proporción destinada a recuperar la presión.

**Confiabilidad:** El grado en que un instrumento posee la propiedad de permitir la obtención de los mismos resultados bajo condiciones de operación constante.

**Confiable:** Que exhibe, un instrumento, una consistencia razonable en los resultados de un grupo de ensayos repetidos.

**Contra pozo o chifen:** Aberturas perforadas hacia arriba.

**Corte en cajón:** excavación a través de una montaña dejando una pared a cada lado.

**Corte en ladera o balcón:** Excavación en la ladera de una montaña dejando una pared a cada lado.

**Coyotera:** Túneles de diámetro pequeño donde se colocan grandes cantidades de explosivos, se usan para derrumbar grandes volúmenes.

**Crucero:** (Min), frentes transversales a las vetas. (Const), cualquier túnel excavado en un ángulo respecto a la dirección general del túnel principal.

**Cuele:** Avance de un túnel, pozo o contrapozo, también se usa para indicar la profundidad del barreno.

**Cuña:** Conjunto de barrenos que forman una abertura inicial, con objeto de que los barrenos adyacentes tengan salida.

**Chocolones o fuque:** Parte de un barreno que queda en el frente después de una voladura. También se le llama a cualquier excavación pequeña que se tenga que hacer dentro del túnel.

**Chorreadero:** Parte de donde se tira la rezaga o mineral.

**Desencape o descapote:** Quitar el material que se encuentra arriba de la roca, en minería es quitar o remover todo el material estéril que está sobre la veta.

**Desentonador eléctrico o estopin:** Cápsula explosiva que se hace estallar por medio de electricidad.

**Destapador o cucharilla:** Instrumento hecho de una varilla de bronce o cobre que se utiliza para descargar un barreno.

**Disco de avance o escudo:** Cilindro de acero de un diámetro igual al del túnel, para la excavación de túneles en terrenos blandos.

**Disparo o tronada:** Acción de provocar una voladura o también la voladura en si.

**Escape súbito:** Pérdida súbita de una gran cantidad de aire comprimido en la parte superior del escudo del túnel.

**Exclusa de aire:** Compartimiento en el que se puede igualar la presión del aire con la del aire comprimido en la excavación de túneles con disco de avance, y también a la del exterior, para permitir el paso de trabajadores o materiales.

**Escombrar:** Eliminación del material excavado o volado del frente del túnel.

**Estopin de tiempo:** Cápsula explosiva cuya acción es retardada en determinación tiempo después de emitida la corriente eléctrica, los tiempos se miden en milisegundos.

**Explosor:** Máquina que suministra la corriente necesaria para los disparos eléctricos, hay de diferentes tipos siendo los más comunes los de condensador y de generador o cremallera.

**Frente:** Altura de una pedrera o tope de un túnel.

**Fulminantes:** Cápsula explosiva que se emplea con mecha.

**Fuque:** Fracción del barreno que queda en el frente después de la voladura.

**Galería de acarreo o tiro:** Túnel transversal corto que comunica túneles paralelos, o que conduce a la superficie de la ladera en un túnel en una colina.

**Galería de túnel:** Pequeño túnel, o túneles, excavados dentro de una gran sección transversal de un túnel y que se ampliará hasta construir la sección total.

**Girasol:** Aparato de topografía formado por un círculo graduado de 0° a 360°, que va montado sobre un soporte en el que se puede deslizar, se utiliza para hacer secciones transversales de topografía mediante radiaciones.

**Galvanómetro:** Aparato con el cual se registra la continuidad de un circuito determinado, si está cerrado o abierto.

**Intervalo de medición:** Campo en cuál un instrumento es confiable.

**Jumbo:** Estructura metálica que sirve de apoyo a las máquinas perforadoras, puede ser tabular o de perfiles estándar, también puede ser un equipo montado sobre un vehículo.

**Lumbrera:** Excavación vertical desde la superficie hasta el túnel, en minoría cualquier excavación vertical que sale a la superficie.

**Malacate:** Aparejo mecánico con un tambor y cable accionado con motor eléctrico, de combustión interna o neumático que se utiliza para mantear maniobras de equipo.

**Manteo:** Operación de extraer el material de una tronada fuera del túnel, utilizando malacates.

**Marinola:** Rueda montada sobre un aparejo que se inserta al lado de las vagonetas que al girar sobre una estructura metálica provoca el volteo suficiente para el vaciado del material.

**Mecha detonante:** es un cordón detonante con un corazón de explosivo de alta velocidad (6 km por seg).

**Medir:** Comparar una cantidad respecto a una unidad y definir el número de veces que la parte medida contiene a la unidad.

**Medición (medida):** Acción y efecto de medir con un dispositivo simple o con algún instrumento confiable.

**Moneo:** Voladura secundaria para romper piedras de gran tamaño que no caben en el bote de la rezagadora.

**Perforación preliminar:** Véase túnel piloto.

**Perrera:** Depósito para explosivos montada sobre ruedas con capacidad para una carga y media, debe tener dos compartimientos, uno para los estopinos y otro para los explosivos.

**Placa de revestimiento:** Segmento de acero para soportar el interior de la excavación de un túnel.

**Plasta:** Procedimiento para romper rocas sin haber hecho un barreno, se coloca la carga sobre la roca, cubriéndola con lodo.

**Poblador:** Persona que carga los barrones, se encarga de conectar los circuitos y hacer el disparo.

**Polvorín:** Caseta para almacenar explosivos.

**Precisión:** La cualidad de ser exacto (preciso), correcto, sin error.

**Precisión de campo:** Límites entre los que son confiables las mediciones que se llevan a cabo en la obra misma en las condiciones normales de trabajo.

**Precisión efectiva:** Desviación estándar de un gran número de lecturas efectuadas con un instrumento bajo condiciones constantes de operación.

**Relleno en seco:** Relleno de un espacio vacío con mortero rígido colocado en pequeñas cantidades, cada una de ellas apisonada cuidadosamente.

**Remoción de rocas:** Quitar las rocas sueltas de la superficie del túnel después de la explosión.

**Resolución (sensibilidad):** La lectura más pequeña de un instrumento; respuesta de un dispositivo a los menores cambios (precisión de lectura).

**Retacar:** Encerrar el explosivo en un barreno con arena, arcilla u otro taco.

**Rezaga:** Material producto de la voladura o tronada.

**Rezagar:** Acción de cargar, extraer el producto de una voladura.

**Tablazón de sostén:** Tablones de madera para mantener en su lugar el frente de excavación del túnel en terreno suelto.

**Tablestaca:** Tablones de madera hincados en el terreno blando, sobre soportes también de madera, para contener el material durante la excavación.

**Tarango:** Estructura de metal o madera que sirve de apoyo para los trabajadores.

**Tolvero:** Encargado de la descarga de los carros a la tolva de manto.

**Túnel piloto:** Pequeño túnel excavado sobre parte o sobre la longitud total para explorar las condiciones geológicas y ayudar a la excavación final.

**Voltiohmetro:** Es el instrumento que combina un voltímetro y un ohmetro, es decir determina intensidad de corriente y resistencia del conductor.

**Bibliografía.**

- Curso Víctor Hardy 85. Túneles y Excavaciones Subterráneas. Tomo I. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas A.C. México D.F. 1985.
- Curso Víctor Hardy 85. Túneles y Excavaciones Subterráneas. Tomo II. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas A.C. México D.F. 1985.
- Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Tomo II. Vigésimoprimera reimpresión de la segunda edición. Ed. Limusa. México 2002.
- Frederick S. Merritt, M. Kent Loftin y Jonathan T. Ricketts. Manual del Ingeniero Civil. Tomo II. Cuarta edición. Ed. McGraw-Hill. México 1999.
- T.F. Ryan. Concreto Lanzado. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Segunda reimpresión México 1981.
- T. M. Megaw y J.V. Bartlett. Túneles. Planeación, Diseño y Construcción. Volumen 1. Ed, Limusa. Primera Edición. México 1988.
- T. M. Megaw y J.V. Bartlett. Túneles. Planeación, Diseño y Construcción. Volumen 2. Ed, Limusa. Primera Edición. México 1990.
- Túneles Carreteros 1984. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C. México 1985.