

48  
Rij

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ACATLÁN**

**EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ROCA**

**ALEJANDRO VIRUEGA MARTINEZ  
ASESOR: ING. CELSO BARRERA CHÁVEZ**

*Ing. Civil*

México, D. F. Marzo 1996.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

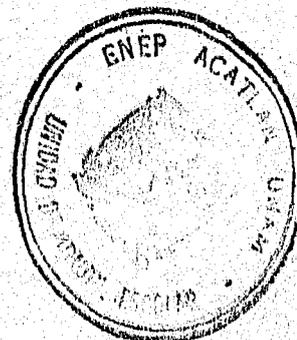
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

48  
24°

**OBJETIVO:**

DESCRIBIR LOS PROCEDIMIENTOS MÁS COMUNES DE CONSTRUCCIÓN A UTILIZAR PARA LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ROCA, MENCIONANDO CADA UNO DE LOS PASOS A SEGUIR , PARA LA EXCAVACIÓN, ASÍ COMO LOS ADEMÉS UTILIZADOS PARA EL SOPORTE DEL TÚNEL, HACIENDO MENCIÓN DE LAS APLICACIONES MAS COMUNES.



**- INTRODUCCIÓN** 4

**CAPITULO I.- GENERALIDADES** 5

- I.A.- ASPECTOS GEOLÓGICOS
- I.A.1.- ORIGEN DE LAS ROCAS
- I.A.2.- ROCAS ÍGNEAS
- I.A.3.- ROCAS SEDIMENTARIAS
- I.A.4.- ROCAS METAMÓRFICAS
- I.B.- CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS
- I.B.1.- CLASIFICACIÓN DE TERZAGHI
- I.B.2.- ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA DE DEERE (RQD)

**CAPITULO II.- PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA EXCAVACIÓN** 22

**II.A.- MÉTODO CONVENCIONAL**

- II.A.1.- TRAZO
- II.A.2.- EXCAVACIÓN DE LUMBRERA O PORTAL
- II.A.3.- PERFORACIÓN O BARRENACION
- II.A.4.- EXPLOSIVOS POBLADO Y DETONACIÓN
- II.A.5.- VENTILACIÓN
- II.A.6.- REZAGA
- II.A.7.- AMACISE Y AFINE

**II.B.- EXCAVACIÓN CON MAQUINARIA (TOPO)**

- II.B.1.- DESCRIPCIÓN Y PARTES QUE LO COMPONEN
- II.B.2.- TRAZO Y ALINEAMIENTO
- II.B.3.- EXCAVACIÓN
- II.B.4.- REZAGA
- II.B.5.- VENTILACIÓN
- II.B.6.- NIVEL FREÁTICO
- II.B.7.- VENTAJAS DE LA EXCAVACIÓN CON TOPO.

**CAPITULO III.- ADEMES UTILIZADOS EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ROCA 53**

**III.A.- ADEME CON ARMADURA**

**III.B.- ADEME CON CONCRETO LANZADO**

III.B.1.- CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO LANZADO

III.B.2.- PRUEBAS PRACTICADAS AL CONCRETO LANZADO

III.B.3.- TIPOS DE CONCRETO LANZADO

III.B.4.- APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO

III.B.5.- FALLAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN LA ESTRUCTURA ROCA  
CONCRETO LANZADO

**III.C.- ANCLAJES**

III.C.1.- GRUPOS DE ANCLAS

III.C.2.- PERNOS DE ANCLAJE.

**III.D.- ADEME CON DOVELAS**

**CAPITULO IV.- APLICACIONES DE LOS TÚNELES**

**72**

**IV.A.- SISTEMAS DE TRANSPORTE.**

IV.A.1.- SISTEMA CARRETERO

IV.A.2.- SISTEMA FERROVIARIO COMERCIAL

IV.A.3.- SISTEMA FERROVIARIO URBANO

**IV.B.- TRANSPORTE DE FLUIDOS**

IV.B.1.- CONDUCCIÓN DE AGUAS NEGRAS

IV.B.2.- CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE.

**IV.C.- SISTEMAS HIDRÁULICOS**

IV.C.1.- TÚNELES PARA ALIMENTAR GENERADORES A ALTA PRESIÓN

IV.C.2.- OBRAS DE DESVÍO Y VERTEDORES

**IV.D.- TÚNELES PARA ALOJAMIENTO DE TUBERÍAS DE SERVICIO**

**- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**81**

## INTRODUCCIÓN:

A partir de la revolución industrial ha sido necesaria la construcción de túneles a mediana y gran profundidad en una diversidad de suelos, haciendo uso de diversos métodos de excavación para las diferentes formas geológicas que atraviesan.

No con el interés de sustraer las riquezas minerales del subsuelo, sino ahora con el fin de acortar distancias, de salvar obstáculos, transportar fluidos, almacenar materiales, transporte de carga y personas.

La construcción de túneles esta ligada a la mecánica de suelos, la mecánica de rocas y la geología aplicada. Raros son los túneles cuyo trazo corra por completo solo por suelos, aun cuando en esos casos poco frecuentes en número pueden presentarse algunos de los problemas mas difíciles de resolver en el arte de la construcción de túneles. Además de las rocas moderadamente o intensamente fracturadas, pero con sus juntas o fracturas rellenas de suelos, presentan comportamientos que resultan imposibles de separar nítidamente de los que son objeto de interés en la mecánica de suelos.

Los túneles son quizá la estructura en la que mas difícil puede resultar separar las tres disciplinas de la geotécnica.

El túnel es una estructura que durante su construcción puede ser peligrosa si no se toman las precauciones necesarias, e incierta si no se realizan los estudios adecuados, pese a los avances que sus técnicas han experimentado en los últimos años. Mucho mas que en otras estructuras 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.

El revestimiento de un túnel se considera muchas veces como un elemento rígido en contacto mas o menos continuo con el material que lo rodea. Esta es una visión limitada, pues hay casos en que otros tipos de elementos de soporte, tales como anclajes bastan para resolver el problema y hay otros en que el material en que se excava el túnel es capaz de sostenerse por si mismo.

El método de excavación que se elija, en el caso que nos corresponde ya sea método convencional o excavación con topo, debe cumplir con ciertos requisitos para que el túnel sea 100% funcional y seguro; primera que pueda construirse en forma segura de manera que permanezca cumpliendo sus funciones por si mismo o con ayuda de un revestimiento, segundo; que la construcción no cause daños a estructuras vecinas, si las hubiere y tercero que sea capaz de permanecer durante toda su vida útil a cubierto de las influencias a que pueda quedar sujeto como la presión de tierra pero otros muchos accidentes o circunstancias pueden ser importantes.

**Túnel:** "Es un conducto (artificial o natural), subterráneo que establece una comunicación entre dos puntos para que puedan transportarse a través de el carga, pasaje, fluidos, minerales o para otro tipo de servicios".

## **Capitulo I.- Generalidades**

Para la construcción de toda obra, sea cual sea el tipo de obra a realizar, es necesario el conocimiento de las características mas elementales, el saber por donde debe empezar y cuales son los pasos que debe seguir la persona a quien se encarga el diseño de una o varias obras, para el caso que nos interesa que son las obras subterráneas, la discusión detallada de cada paso se vera en los capítulos siguientes.

El propósito principal de cualquier diseño de excavación subterránea debe utilizar la roca misma como material estructural principal, provocando la menor perturbación posible durante el proceso de excavación y añadiendo el mínimo posible de ademe metálico o de concreto. En su estado Inalterado o cuando se someten a esfuerzos de compresión, la mayoría de las rocas duras son mucho mas resistentes que el concreto y muchas alcanzan el mismo grado de resistencia que el acero, en consecuencia, es un contrasentido económico remplazar un material que puede ser perfectamente competente con otro que lo puede ser menos.

La medida en que se logra este propósito depende de las condiciones geológicas existentes y de la medida en que el ingeniero está conciente de ellas y las puede tomar en cuenta. Por lo tanto una Interpretación exacta de la geología es un prerequisite esencial para un diseño lógico.

Los estudios de geología superficial, mediciones geofísicas y perforaciones de exploración proporcionan información directa útil, pero de igual importancia para el geólogo puede ser el conocimiento de la geología regional y la historia geológica local, así como conocer a fondo el modo en que reacciona la roca al ambiente geológico cambiante. Tales consideraciones le permitirán hacer una estimación semicuantitativa muy útil de las características geológicas que encontrará en las profundidades, mas no su localización exacta.

La necesidad de hacer pronósticos cuantitativos de la cantidad, la inclinación y la orientación de los accidentes geológicos y de las posibles propiedades mecánicas de la roca, ha sido desde hace mucho tiempo esencial para la construcción de obras subterráneas.

### **I.A.- Aspectos Geológicos.**

Los aspectos geológicos son indispensables para cualquier tipo de obra, pero en el caso de los túneles es mucho más importante conocer las condiciones geológicas ya que durante el proceso constructivo como durante su vida útil, albergará a personas las cuales estarán "aisladas", del exterior y sujetos a condiciones que imperen en el momento.

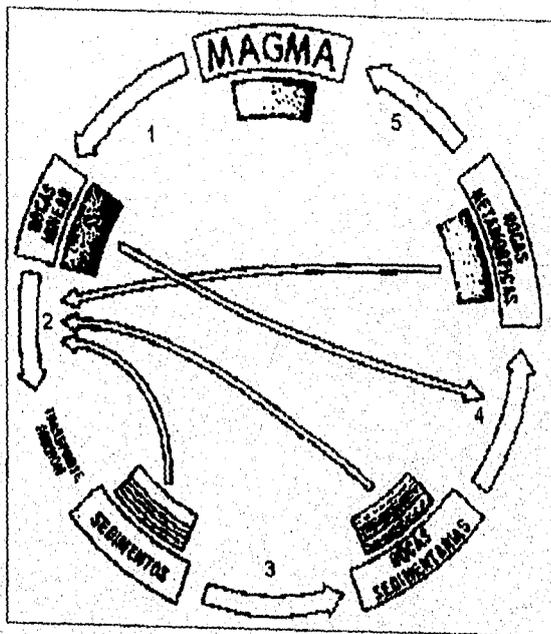
Es necesario determinar la presencia de fallas, roca fracturada, dirección y echado, grado de la estratificación, grietas y juntas, la presencia de agua que puede ser caliente o fría, o contener ingredientes corrosivos o irritantes, bolsas de gases explosivos y tóxicos.

Es muy importante que no se escatime en el costo de los estudios geológicos y que el tiempo para su realización sea el necesario. Ya que estos pueden revelar la presencia de anomalías, que al momento de surgir de imprevisto durante el proceso constructivo pueden incrementar exageradamente el costo de la obra.

### **I.A.1.- Origen de las Rocas.**

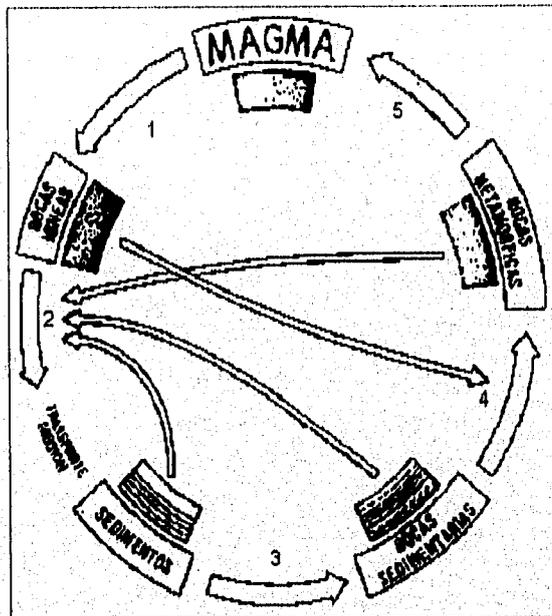
El origen de las rocas se remonta desde el principio de la formación de la tierra hace miles de millones de años. El magma producto de las erupciones volcánicas, después de su proceso de enfriamiento se convierte en roca, la cual queda sujeta a intemperismos físicos o mecánicos, convirtiéndose en otros materiales, los cuales a través del tiempo, a la acción de los agentes mecánicos y al efecto de presiones y temperaturas; generan nuevos tipos de rocas, que de igual forma habrán de recorrer el mismo ciclo, ver fig. N° 1. De acuerdo a su origen las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

**Roca:** "Es un agregado de minerales de diferentes clases en proporciones variables, el cual ha sufrido una serie de alteraciones físicas y químicas a través del tiempo".



- 1.- Cristalización
- 2.- Intemperismo
- 3.- Litificación
- 4.- Metamorfismo
- 5.- Fusión

Fig. Nº 1



- 1.- Cristalización
- 2.- Intemperismo
- 3.- Litificación
- 4.- Metamorfismo
- 5.- Fusión

Fig. Nº 1

## **I.A.2.- Rocas Ígneas.**

Las rocas ígneas son producto del enfriamiento del magma que emana del interior de la corteza terrestre, a través de fisuras o conos volcánicos (erupciones), y del magma que no llega a salir al exterior y se enfría dentro de la corteza.

El magma es una solución de minerales que se produce por la presión y fricción que ejercen las capas de las rocas suprayacentes y por las temperaturas que emanan de los materiales radiactivos. Los cuales derriten las rocas que los circundan, convirtiéndolas en magma,

Las rocas ígneas, se dividen en rocas ígneas intrusivas y rocas ígneas extrusivas.

### **Rocas Ígneas Intrusivas.**

Son aquellas que se originan del magma que se solidificó dentro de la corteza terrestre, las rocas ígneas intrusivas también reciben el nombre de rocas plutónicas.

Un plutón de poco espesor en relación con sus otras dimensiones se llama Plutón tabular, el cual puede ser concordante cuando sus límites son paralelos a la estratificación como en el caso del manto que a su vez puede ser horizontal, inclinado o vertical; o discordantes cuando atraviesan la estratificación como en el caso del dique que se originan cuando el magma se abre camino a través de las rocas adyacentes .

Cualquier plutón que no tenga forma tabular se clasifica como plutón macizo. Los lacolitos (del griego *lakkos*, "cisterna" y *lithos*, "piedra"), son un macizo concordante formado cuando el magma empuja hacia arriba las rocas suprayacentes creando una especie de domo, los batolitos (del griego *bathos*, "profundo" y *lithos*, "piedra")son discordantes dado que su tamaño aumenta conforme se extiende hacia abajo y cuya base o fondo no se puede determinar; los batolitos son, en realidad, los receptáculos de magma solidificado.

### **Rocas Ígneas Extrusivas**

Son aquellas que se originan del magma que se enfría fuera de la corteza terrestre, como resultado de los derrames de lava y de la que se expulsa al momento de romperse el cono volcánico.

Cuando el magma se derrama sobre la superficie se llama lava y cuando los fragmentos solidificados de magma son arrojados violentamente constituyen los materiales piroclásticos.

Eventualmente los restos piroclásticos llegan a endurecerse convirtiéndose en roca por medio de la percolación del agua del subsuelo.

La ceniza volcánica endurecida hasta convertirse en roca se llama toba, mientras que la brecha volcánica son bloques angulares de lava solidificada relativamente grandes incluidos en una masa de ceniza. Si los fragmentos grandes incluidos están redondeados la roca se llama conglomerado volcánico.

Los derrames de lava dan origen a rocas como el basalto, mientras que la lava que es expulsada forma rocas como la piedra pómez.

## **Textura**

La textura es un derivado de una palabra latina que significa entretelar o tensar. es una característica física de todas las rocas. Al referirnos a la textura de las rocas ígneas, hablamos específicamente del tamaño, forma y arreglo, y esto depende de la velocidad de enfriamiento, del tamaño y de la forma del cuerpo del magma, así como su profundidad bajo la superficie.

### **Textura de grano grueso.**

Si el magma se enfría a una velocidad relativamente lenta, habrá tenido tiempo de formar granos que, a simple vista, se pueden ver por lo tanto las rocas de granos minerales grandes se llaman rocas de grano grueso.

### **Textura de grano fino.**

Un cuerpo pequeño con una gran superficie rodeado por roca sólida fría, pierde su calor más rápidamente que el mismo volumen de magma si estuviera en un depósito esférico y puesto que el enfriamiento rápido impide la formación de granos grandes. La roca resultante tendrá una textura de grano fino.

### **Textura vítrea**

Cuando el magma es eyectado rápidamente por un volcán o por una fisura a la superficie, se puede enfriar tan rápidamente que no da tiempo a la formación de minerales. Por lo tanto el producto resultante es un vidrio.

### **I.A.3.- Rocas Sedimentarias.**

Como vimos anteriormente, las rocas ígneas se forman a partir de un material fundido originado en algún lugar bajo la superficie terrestre.

En contraste, las rocas sedimentarias se forman a más bajas temperaturas, las cuales prevalecen en o cerca de la superficie terrestre, estas se hallan frecuentemente dispuestas en capas o estratificadas, la mayoría de las rocas sedimentarias se depositan en una serie de capas individuales superpuestas.

Las rocas sedimentarias, se originan de dos formas:

A) Los depósitos pueden formarse por la acumulación de minerales y rocas, por la erosión de las rocas existentes o por los productos intemperizados de estas rocas. Los productos se acumulan en depósitos que reciben el nombre de "DEPÓSITOS DETRÍTICOS".

Como ejemplo de este tipo de rocas, tenemos a los granos de cuarzo disgregados por el agua y arrastrados a depósitos en donde se asientan en forma de capas de arena, al paso del tiempo cuando este depósito se cementa, tendremos una arenisca o una roca de origen detrítico.

B) Los depósitos pueden ser producidos por procesos químicos, los cuales se sedimentan generalmente por la acumulación del material disuelto en agua. Este fenómeno puede efectuarse directamente a través de procesos inorgánicos o indirectamente mediante la intervención de plantas y animales.

Como ejemplo podemos citar a los corales, los cuales separan del agua de mar el carbonato de calcio formando esqueletos. En el momento en que los animales mueren, sus esqueletos se acumulan en depósito bioquímico formando una caliza.

Se emplean varios términos para describir el medio en el que se acumulo originalmente un sedimento. Por ejemplo, si una caliza contiene fósiles de un animal que se sabe solamente vivió en el mar, la roca es una caliza marina. Las rocas formadas por los depósitos sedimentados por un río reciben el adjetivo fluvial. El término eólico describe las rocas formadas por material depositado por el viento. Y las rocas formadas por los depósitos de un lago se llaman lacustres.

### **Proceso de sedimentación**

El proceso general por el que se asienta el material que forma las rocas se llama sedimentación o depósito. Para tener cualquier depósito debe existir una fuente de sedimentos, se necesita también algún medio para transportar este sedimento y finalmente debe disponerse de algún lugar y algún proceso para el depósito del material sedimentario

### **Fuente del material**

Las rocas ígneas son la fuente primaria de los sedimentos pero las rocas metamórficas y otras sedimentarias pueden servir como fuente inmediata. El intemperismo de las rocas anteriores aporta tanto los sedimentos detríticos como el material soluble que más tarde se convierte en depósitos químicos, por ejemplo el intemperismo químico de una masa granítica produce arcillas, sales solubles, óxido de hierro y sílice, pero el intemperismo mecánico de la misma masa granítica produce fragmentos de granito y granos de cuarzo original, de feldespato y de los minerales ferromagnesianos que integran el granito.

### **Métodos de transporte**

El viento y el agua en las corrientes superficiales, a través del subsuelo, en las corrientes oceánicas y en los glaciares, son el principal medio de transporte del material de un lugar a otro. Los deslizamientos de tierra y otros movimientos impelidos por la gravedad desempeñan también un lugar importante.

### **Sedimentación**

El material detrítico se deposita cuando su agente de transporte deja de tener la energía suficiente para seguir desplazándolo. El material transportado en solución se deposita de manera diferente: por precipitación, un proceso químico que convierte en sólido el material disuelto separándolo del líquido

En las rocas sedimentarias los tres minerales más comunes son la arcilla, el cuarzo y la calcita. La caliza por ejemplo se compone principalmente de calcita pero una caliza más pura contiene pequeñas cantidades de arcilla o cuarzo. Los granos de muchas areniscas son predominantemente cuarzo pero el material cementante puede ser calcita dolomita u óxido de hierro. En general se puede decir que las rocas sedimentarias son mezclas de dos o más minerales.

### **Textura**

Existen dos tipos principales de textura en las rocas sedimentarias la clástica y la no clástica, el proceso de depósito de un sedimento afecta la textura.

Las rocas que se han formado de depósitos de mineral y de fragmentos rocosos se dice que tienen una textura clástica, esta palabra se deriva de la voz griega que significa roto o fragmentado, por ejemplo la roca que se forma por el escombros descargado por un glaciar está constituido por una mezcla confusa de material rocoso que varía desde partículas de tamaño coloidal hasta grandes bloques.

Las rocas sedimentarias de origen químico pueden mostrar también una textura clástica, por ejemplo, una roca formada predominantemente de fragmentos de concha de un depósito bioquímico.

Las rocas sedimentarias formadas por procesos químicos, tienen una textura no clástica en la que los granos están entrelazados. Estas rocas tienen casi la misma apariencia que las rocas ígneas de textura cristalina. Los cristales minerales que se precipitan de una solución acuosa son, por lo común, de tamaño muy pequeño.

Como ejemplo de rocas sedimentarias tenemos:

El conglomerado que es una roca detrítica constituida por fragmentos más o menos redondeados e los cuales una proporción apreciable son del tamaño de granulos. Si los fragmentos son más angulares que redondeados la roca se llama brecha.

La arenisca esta formada por la consolidación de granos individuales del tamaño de la arena.

La lodolita y la lutita son rocas detríticas de grano fino compuestas de partículas del tamaño de arcilla y limo, las lutitas se parten en tajos laminados mas o menos paralelas a la estratificación.

La creta esta formada en parte de calcita de origen bioquímico, en la forma de esqueletos o fragmentos de plantas y animales oceánicos microscópicos.

#### **I.A.4.- Rocas Metamórficas.**

Son el resultado de modificaciones en el estado sólido de las rocas, como consecuencia de intensos cambios en la temperatura, presión y ambiente químico, todos estos factores son producidos por las mismas fuerzas que pliegan, afallan, inyectan magma y elevan o deprimen las masas de roca.

El metamorfismo se desarrolla por debajo de la corteza terrestre, en la parte inferior de la zona de intemperismo y cementación, también se produce fuera de la zona de fusión. Dentro de este ambiente las rocas sufren innumerables cambios químicos y estructurales, adaptándose a condiciones diferentes en las que se formaron originalmente.

La acción de la presión, provoca cambios que reducen el espacio ocupado por la masa de roca, los cuales incluyen la recristalización y la formación de nuevos minerales con un arreglo atómico más compacto.

Cuando las rocas quedan sepultadas a profundidades de varios kilómetros, se vuelven gradualmente plásticas, susceptibles al calor y a las fuerzas de deformación que actúan dentro de la corteza terrestre.

#### **Tipos de metamorfismo**

##### **a) Metamorfismo de Contacto**

La alteración de rocas por transferencia iónica producida por las altas temperaturas y por la introducción de soluciones magmáticas en o cerca del contacto de un cuerpo de magma, se llama metamorfismo de contacto, este se produce en zonas restringidas llamadas aureolas o halos, que raras veces tienen más de unas cuantas decenas de metros de espesor y en otras ocasiones alcanzan solamente unos cuantos milímetros. Durante el metamorfismo de contacto varían las temperaturas entre 300° y 800° C., y las presiones entre 100 y 3000 atm.

El calor del metamorfismo de contacto produce una gran cantidad de recristalización.

##### **b) Metamorfismo Regional**

Este se desarrolla en áreas extensas afectando miles de kilómetros cuadrados de roca a varios miles de metros de profundidad. El metamorfismo regional puede dividirse en zonas de alto, mediano y bajo grado.

El metamorfismo de alto grado se lleva a cabo en las rocas inmediatas a la cámara magmática, más allá de la zona del metamorfismo de contacto. El metamorfismo de bajo grado se encuentra más lejos de la cámara magmática y se hace transicional con la roca sedimentaria no metamórfica.

#### **Textura**

En la mayor parte de las rocas sujetas a calor y a fuerzas de deformación durante el metamorfismo de contacto, los minerales tienden a estar ordenados en franjas paralelas de granos planos o alargados. Este arreglo le da a la roca la propiedad llamada foliación (del latín *folium*, "en hojas u hojeados", por lo tanto formado por hojas o láminas delgadas), por lo tanto las texturas serán foliadas y no foliadas (ya sea densa o granular).

Las texturas foliadas son aquellas que presentan clivaje en las rocas y las no foliadas son las que debido a la textura densa no pueden distinguirse a simple vista los granos individuales y estas no muestran clivaje.

### **Clivaje**

El clivaje es la relativa facilidad con que se rompe un mineral a lo largo de planos paralelos, existiendo tres grados de clivaje de la roca:

#### **a) Apizarrado**

El cual se presenta a lo largo de planos separados por distancias de dimensiones microscópicas.

#### **b) Filítico:**

Del griego *phillum*, "hoja", en el que el clivaje produce láminas apenas visibles a simple vista. El clivaje filítico produce hojuelas mas grandes que el apizarrado.

#### **c) Esquistoso**

Del griego *schistos*, "dividido, divisible"; en este el clivaje produce láminas claramente visibles. La superficie del clivaje esquistoso son mas rugosas que las del apizarrado o filítico.

### **Tipos de rocas metamórficas**

La pizarra es una roca metamórfica, producida por un metamorfismo de bajo grado, a partir de una lutita. Es de grano fino y presenta clivaje de roca apizarrado, producido por el alineamiento de minerales laminados bajo la presión del metamorfismo.

La filita es una roca metamórfica de composición semejante a la de la pizarra, pero cuyos minerales se presentan en mayor tamaño, esta en realidad es una pizarra que ha sufrido un grado superior de metamorfismo.

El esquistoso es la roca metamórfica mas abundante, formada por metamorfismo regional ya que se puede derivar de muchas rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas de baja presión. Pero de todos los esquistos domina la presencia claramente visible de hojuelas de algún mineral laminado como mica, talco, clorita o hematita.

### **I.B.- Clasificación de las Rocas.**

Se han presentado a polémica varias tentativas para poder designar la calidad y condiciones de las rocas, para poder elegir los medios más económicos de soporte, por lo tanto es importante saber que el comportamiento de los túneles esta principalmente regido por la calidad de la roca.

Los estudios para la construcción de los túneles constituyen una especialización entre la geotécnia, en virtud de la naturaleza de la obra a efectuar, así como la magnitud de los factores geológicos y físicos, que deberán determinarse antes de iniciar su construcción y se deberá continuar investigando durante el transcurso de ella.

En general la investigación se inicia con un levantamiento geológico superficial a detalle a lo largo del trazo del túnel, con el propósito de determinar la naturaleza de las rocas existentes así como la posible presencia de fallas y de otras estructuras geológicas. El levantamiento se utiliza para la investigación geológica, el cual incluye el trazo del túnel y las condiciones geológicas y estructurales existentes en su proceso de construcción.

Con base en la información geológica, se programan exploraciones con recuperación de muestras para su estudio a lo largo del eje del túnel, con la finalidad siguiente:

- Determinar las condiciones físicas de la roca del suelo.
- Determinar la presencia de grietas, fallas y algún otro tipo de accidente geológico, que ocasione problemas durante la construcción.
- Conocer la profundidad del manto freático y determinar si los niveles son superiores a la rasante del túnel.
- Determinar cambios lito-estratigráficos en el subsuelo.
- Conocer lo grados de alteración de las rocas en el subsuelo.
- Someter las muestras obtenidas a pruebas de laboratorios.

Los estudios efectuados tienden a impedir en lo posible la presencia de imprevistos durante la excavación del túnel, así como determinar la necesidad de ademarlos o no, el tipo y forma del ademe a utilizar durante su construcción o terminación,

Las pruebas de laboratorio que se deben de efectuar a las muestras extraídas durante el estudio para la construcción de un túnel, son las siguientes:

- Prueba de comportamiento a diversos esfuerzos.
- Pruebas de deformación por sometimiento a compresiones prolongadas.
- Pruebas por solubilidad por sumersión en líquidos.

Estas pruebas son complementadas con otras muy diversas, de acuerdo a la finalidad del túnel.

### **I.B.I.- Clasificación de Terzaghi.**

Desde el punto de vista de la Ingeniería, conocer los tipos de defectos en la roca y en sus Intensidad resulta ser más importante, que el tipo de roca que se pueda encontrar. Por tanto, en la exploración se debe tener especial atención en los efectos encontrados en la roca.

El informe geológico, debe contener una descripción detallada de los defectos existente en la roca, los cuales deberán ser traducidos en términos geológicos, de igual forma se deberá informar la existencia de roca defectuosa en términos de "TUNELEO".

#### **Roca Inalterada.**

Este tipo de rocas carece de fisuras y ramales, de tal forma que cuando se rompe, lo hace a través de la roca sana. Como consecuencia del daño que se hace a la roca con el uso de explosivos, pueden desprenderse del techo desgajes durante varias horas o inclusive días después de la tronada. Este fenómeno se conoce con el nombre de "DESPRENDIDO". La roca dura inalterada también puede verse afectada por relajamientos de la estructura, registrando una separación espontánea y violenta de las láminas de las paredes y/o del techo.

#### **Roca Estratificada.**

Se constituye por capas unitarias con poca o ninguna resistencia a la separación a lo largo del plano limítrofe entre estratos. La capa puede haberse debilitado o no debido a fracturas transversales. Los desprendidos son comunes en este tipo de roca.

#### **Roca Medianamente Fisurada.**

Tiene fisuras y ramaleos, pero los bloques entre las juntas están soldados o íntimamente embonados que las paredes verticales no necesitan refuerzos. En rocas de este tipo, se pueden encontrar a la vez desprendimiento y chasquido.

#### **Roca Agrietada en Bloques.**

Es una roca químicamente inalterada o casi inalterada, cuyos fragmentos se encuentran totalmente separados unos de los otros y no embonan. Esta roca puede necesitar además laterales.

#### **Roca Triturada.**

Es una roca químicamente sana, que tiene la apariencia de ser un producto de trituradora. Si los fragmentos en su mayoría o todos son del tamaño de arenas y no ha habido recementación, la roca triturada que está abajo del nivel de las aguas frías tienen las propiedades de una arena saturada.

### **Roca Comprimida.**

Avanza lentamente en el túnel sin aumento perceptible de volumen, un pre-requisito de compresión es un porcentaje elevado de partículas microscópicas de mica o de minerales arcillosos de poca expansibilidad.

### **Roca Expansiva.**

Avanza básicamente en el túnel debido a su propia expansión. La capa de esponjamiento parece estar limitada a las rocas que contienen minerales arcillosos como la montmorillonita con una alta capacidad de expandirse.

**Montmorillonita:** "Familia de arcillas minerales, silicatos hidratados de aluminio con una estructura a manera de emparedado de una hoja iónica de aluminio e hidróxido entre dos de hidróxido de silicio ( $\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ). Estos emparedados se apilan unos sobre otros con agua entre ellos y pueden mantenerse unidos por ligaduras débiles. Como consecuencia, fácilmente puede entrar agua en el enrejado. Esto da lugar a que el mineral se hinche notablemente y se debilite con posterioridad a la atracción entre los emparedados. Consecuentemente, una masa de Montmorillonita colocada en un cubo de agua se deshace rápidamente convirtiéndose en una masa suelta e incoherente". (\*)

El concepto usado por Terzaghi para estimar la carga de la roca transmitida a los marcos de acero para el soporte de un túnel, se representa en la figura N° 2.

Durante la construcción del túnel, habrá un relajamiento de la cohesión de la formación rocosa arriba y en los lados del túnel. La roca suelta dentro del área a-c-d-b, tenderá a irrumpir el túnel. A este movimiento se opondrán fuerzas de fricción a lo largo de los límites laterales a-c y d-b, y estas fuerzas de fricción a lo largo de los límites transfieren la parte más importante del peso de la carga de la roca  $W_1$ , al material de los lados del túnel. El techo y los lados del túnel no tiene que soportar el resto de la carga que equivale a una altura  $H_p$ .

El ancho  $B_1$  de la zona de la roca donde existe el movimiento dependerá de las características de la roca y de las dimensiones del túnel ( $H_t$  y  $B$ ).

\* Fundamentos de Geología Física

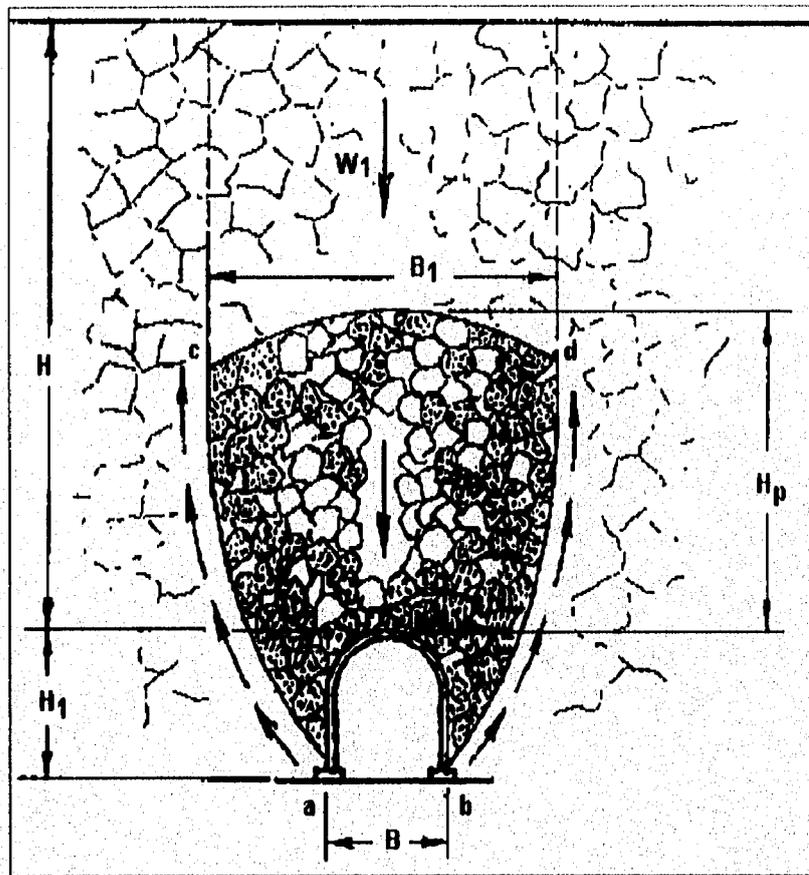


Fig. N° 2

### 1.B.2.- Índice de Calidad de la Roca de Deere ( RQD, Rock Quality Designation).

En 1964 Deere propuso un índice cuantitativo de la calidad de la roca, basado en la recuperación de los núcleos con perforación de diamante, el sistema se denomina "Rock Quality Designation (RQD)" Índice de control de Calidad de la Roca. Su aplicación se ha diversificado y ha permitido comprobar su utilidad en la clasificación del macizo rocoso para la selección de los refuerzos en los túneles.

El RQD, se define como el porcentaje de núcleos que se recuperan en piezas enteras de 100 mm. o más, en el largo del total del barreno, por lo tanto:

$$\text{RQD (\%)} = 100 \times \frac{\text{Longitud de los núcleos mayores de 100 mm.}}{\text{Largo del Barreno.}}$$

Esta normalmente aceptado que el RQD, se establece en núcleos de cuando menos de 50 mm. de diámetro, que son recuperados con una perforadora de diamante de doble barril. Un valor RQD para cada tramo perforado de 2 mts. Esta operación es sencilla y rápida si se ejecuta conjuntamente con el registro geológico normal del sondeo, casi no son afectados los costo de la exploración.

Deere propuso la siguiente relación entre el valor numérico RQD y la calidad de la roca desde el punto de vista de la ingeniería.

RQD	CALIDAD DE LA ROCA
0 - 25%	MUY MALA
25 - 50%	MALA
50 - 75%	REGULAR
75 - 90%	BUENA
90 - 100%	MUY BUENA

Ya que el RQD permite dar un valor numérico de la calidad de la roca, no es de sorprenderse que se haya tratado de relacionar este número con la clasificación cualitativa de Terzaghi. Cording, Hendron y Deere modificaron el factor de carga de Terzaghi y relacionaron este valor modificado con el RQD como se muestra en la siguiente figura N°3.

Este diagrama sugiere que puede existir correlación razonable entre RQD y el factor de carga de Terzaghi para excavaciones con ademe de acero, pero desaparece en el caso de excavaciones reforzadas con anclas,

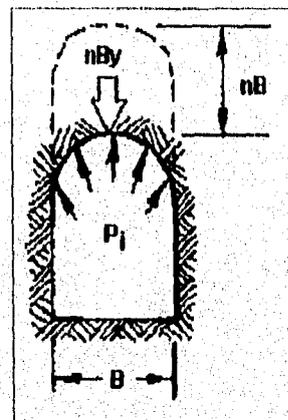
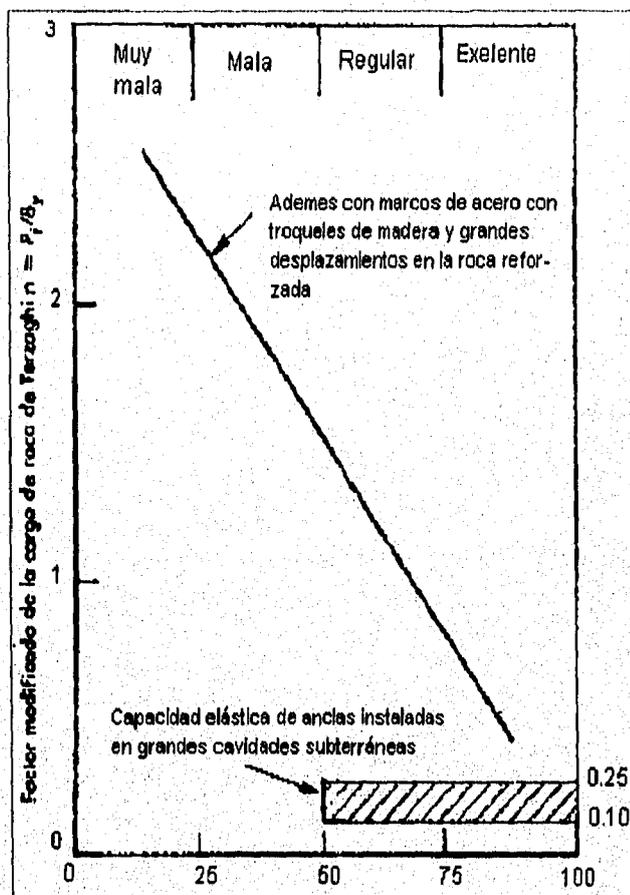


Fig. N° 3

El criterio de refuerzos del RQD, tiene limitaciones en el caso de que prevalezcan fracturas con rellenos delgados de arcillas o de material meteorizado. Este tipo de casos pueden presentarse cerca de la superficie, donde la meteorización o las infiltraciones provocan arcilla, reduciendo la resistencia a la fricción a lo largo de los planos de la fractura.

En la construcción de una obra subterránea, es recomendable que a lo largo del túnel se realicen sondeos para confirmar la naturaleza de todas las formaciones por las que atravesará el túnel, de esta forma se podrá conocer con mayor exactitud las dificultades posibles, ya sean de tipo mecánico o hidrológicos, por lo que es imperante implantar una investigación basada en muestreo y pruebas de sondeo, para precisar o corroborar los resultados preliminares de las informaciones obtenidas por métodos indirectos como la geofísica.

Es necesario determinar la densidad de los sondeos a efectuar, ya que depende fundamentalmente de la heterogeneidad de las formaciones y de la profundidad a que se encuentre el túnel, por lo que se recomienda que el espaciamiento de los sondeos de exploración, sea:

PROFUNDIDAD DEL TÚNEL (Mts.)	ESPACIAMIENTO DE LOS SONDEOS DE EXPLORACIÓN (Mts.)
0 - 91	30 - 152
91 - 227	152 - 304
227 o más	304 - 760

Es conveniente que en las zonas donde la calidad de la roca es buena, la separaciones se aumenten o en caso contrario se disminuyan, si la calidad de la roca es demasiado mala. El método RQD, consiste en ubicar el macizo rocoso en el caso que le corresponde y así poder asignarle el sistema de soporte más conveniente para la carga tentativa, que actuará en el soporte.

Esta relación RQD-soporte, esta limitada por las siguientes hipótesis:

- El RQD describe adecuadamente la calidad de la roca.
- El ancho del túnel deberá estar comprendido entre 6 y 12 mts.
- El túnel es de sección transversal circular o de herradura de altura aproximadamente igual al ancho.
- Los niveles de refuerzo no alcanzan la resistencia a compresión de la roca.
- Los ademes deben ser instalados lo más pronto posible, para evitar el aflojamiento de la roca y el movimiento de las cuñas. Por lo que se recomienda que el ademe sea colocado cerca del frente de 0.61 a 1.20 mts, para marcos metálicos y hasta el frente para concreto lanzado.

Este método no toma en cuenta la influencia que tienen las condiciones de estabilidad del túnel como la abertura, rugosidad y tipos de rellenos en las discontinuidades, así como la orientación favorable o desfavorable de los planos de debilidad, por lo que es necesario observar continuamente el desarrollo de la obra, ya que la falla se presenta en forma gradual y se manifiesta con deformaciones en los marcos, aflojamiento de las anclas y agrietamiento del concreto lanzado. Si esas fallas se detectan a tiempo, es posible tomar medidas correctivas para reforzar el sistema de soporte.

Por otra parte, este método considera los dos sistemas de excavación, el convencional mediante la utilización de explosivos y por medio de maquinaria. Las cargas de diseño para túneles excavados por medio de explosivos resultan 20% menos que las calculadas empleando el método de Terzaghi, esta relación entre el RQD y el factor de carga de la roca queda representado en la figura N° 3.

**Tiempo libre de soporte, clasificación de Laufer.**

La clasificación de Laufer compara el tiempo que pueden permanecer sin adermarse las paredes de un túnel con respecto a la calidad de la roca que compone dichas paredes, clasificándolas en siete categorías.

Clase	Descripción del material	Longitud del soporte	Tiempo sin derrumbarse
A	Roca sana	4.00 m.	20 años
B	Roca algo fracturada	4.00 m	6 meses
C	Roca fracturada	3.00 m	1 semana
D	Material desmenuzable	1.50 m	5 horas
E	Material muy desmenuzable	0.80 m.	20 minutos
F	Suelo de empuje inmediato	0.40 m.	2 minutos
G	Suelo de empuje instantáneo	0.15 m.	10 segundos

## **Capitulo II.- Procedimiento Constructivo de la Excavación**

Actualmente los métodos de excavación son diversos pero una selección adecuada es aquella que es compatible con el sistema de rezagado y con el sistema de ademado, además la selección del método de excavación dependerá mucho de los resultados del informe geológico y de los estudios preliminares que se hayan realizado.

Como se verá mas adelante existen dos métodos generales, el de barrenación con explosivos y el de excavación con maquinaria (topo), que con ciertas modificaciones dependiendo de las características de la roca que se va a excavar, surgen otros métodos de excavación.

La seguridad es un factor que debe tenerse presente en todo momento, ya que toda excavación subterránea por muy pequeña que sea encierra un peligro, dado que la presencia de accidentes esta presente durante todo el tiempo que dure la obra, por lo tanto el método de excavación que se haya elegido para la obra debe ser seguro para los obreros que van a laborar durante su realización como durante su vida útil después de la construcción.

El procedimiento de excavación que se elija dependerá también del programa comprometido y de la amortización de los equipos.

## **II.A.- Método convencional**

Durante los años cuarenta la excavación de túneles se hacía por el método convencional, siendo un sistema tradicional en el cual las etapas de excavación están muy bien definidas, imaginan un proceso largo, complicado y peligroso; ya que el manejo de los explosivos y la presencia de maquinaria de diversos tipos y tamaños da la impresión de un caos dentro del túnel. Como es el caso de avance superior y banqueo que fue casi un estándar durante un tiempo en la perforación de túneles de sección grande. Sin embargo la evolución de los sistemas de excavación a provocado que el método de frente completa sea actualmente el más popular.

Por otro lado la sustitución de las dinamitas por hidrogeles y la construcción de equipos de barrenación, de carga y rezaga más compactos y sistemas de ventilación más eficientes simplifican el proceso de excavación del túnel.

Cuatro son los sistemas de excavación basados en el método convencional:

### **a) Método de frente completa.**

Es un método diseñado para romper la totalidad del área de la sección de la frente en un disparo. Este procedimiento se ha utilizado siempre para túneles pequeños. Sin embargo, la introducción en años recientes de jumbos de barrenación más grandes y eficientes, de equipos y brocas de barrenación mejorados y equipo de rezagado más grande a contribuido a una aplicación más amplia de la técnica de frente completa.

### **b) Método de frente superior y banqueo.**

Es un método tradicional de antaño y se utiliza en terreno débil y en la mayoría de los túneles que exceden una altura de 10 m.. Consiste en perforar una frente en la parte superior del túnel que toma una porción de la altura terminada y la anchura completa. La porción inferior se ataca en uno o más bancos con barrenos horizontales o verticales que se disparan en secuencia con retardos de milisegundos (ms).

### **c) Método del túnel piloto.**

Una frente piloto se perfora en la línea central del túnel propuesto por los métodos convencionales que generalmente se completa de portal a portal. El túnel piloto se amplía hasta el tamaño completo por medio de barrenos largos paralelos a la línea central. Este método es ventajoso donde el sobreromplimiento y el quebrado de las paredes debe ser evitado.

Con este método se forman ranuras a los lados del túnel piloto al diámetro completo que tendría el túnel terminado. Estas ranuras están espaciadas a intervalos predeterminados y se utilizan para perforar los barrenos largos paralelos y efectuar la operación de agrandamiento.

**d) Método del túnel pionero.**

Este consiste en un túnel pequeño paralelo a la línea del túnel principal aproximadamente a 15 o 20 m.. La frente pionera se avanza considerablemente adelante del túnel principal, cada 450 m., se perforan cruceros a la línea de excavación principal para abrir dos frentes adicionales. Si el túnel pionero encuentra cambios substanciales en el terreno, da aviso con suficiente tiempo para que se puedan planear las modificaciones necesarias en el procedimiento de construcción de la frente principal minimizando los retrasos. Posteriormente el túnel pionero es aprovechado para fines de ventilación.

### **II.A.1.- Trazo**

Es la fijación de la dirección que habrá de seguir el túnel, el trazo el "bajado" de la superficie al interior del túnel por diferentes métodos, de los cuales se mencionan algunos a continuación:

#### **A) El de las Plomadas.**

Consiste en ubicar dos puntos del trazo superficial en el interior de la lumbrera, utilizando un hilo resistente y unas plomadas de gran pesos sumergidas en aceite de alta densidad para evitar el movimiento que tendrían debido a la longitud del hilo. Cuando las plomadas se han estabilizado, podemos decir que la unión de esos puntos es el eje provisional del túnel, para materializar estos, se debe auxiliar de dos aparatos que son colocados en puntos específicos.

Visando el hilo de una sola plomada con los dos aparatos y retirando el recipiente del aceite se puede encontrar el punto por la intersección de los planos que describen los aparatos, el mismo procedimiento se realizará con la otra plomada.

Este procedimiento puede tener graves errores, si se carece del personal adecuado y los materiales necesarios, además las colocación de las plomadas llevan en si un error de apreciación.

#### **B) Método del Teodolito en Túnel y Oculares Acodados.**

Un teodolito por si solo colocado en el interior de una lumbrera, no puede servirnos para baja un punto, que sea colocado en el brocal de la misma, ya que debido a su forma, es prácticamente imposible afocar un punto con el aparato en un ángulo de 90°.

Para solucionar este problema existen oculares acodados que se pueden adaptar al teodolito y de esta manera hacer posible el visado de un hilo colocado en el brocal de la lumbrera, que representa el trazo superficial, mediante aproximaciones sucesivas se hace coincidir la retícula del aparato con el hilo en el brocal y después ubicar puntos en el túnel con el aparato en esa posición y de esta forma trasladar el trazo superficial al interior.

Los errores que se cometen con este procedimiento son al colocar el hilo en la superficie y el de la apreciación del operador; sin embargo, es uno de los más empleados por ser sencillo y rápido. en la figura N° 4 lo podemos apreciar.

Una vez bajado el trazo, es necesario referenciarlo en el interior con varios puntos, para que no existan riesgos de perderlo, la forma más conveniente de ubicar el trazo interior es en mojoneras con placas metálicas, donde se puntea el eje. Las referencias deberán mencionarse en la libreta de tránsito, mencionado los marcos o los cadenamientos donde se localizan, si se trata de concreto lanzado.



Fig. N° 4

Como ya se dijo los puntos deberán de enumerarse y cadenarse, para apoyar en ellos trabajos posteriores. En este momento ya tenemos localizado el eje que habrá de seguir la excavación en su inicio.

Es recomendable que la prolongación del trazo se haga con el teodolito en forma directa, ya que de esa manera se evita el error de colimación que tenga el aparato y la formación de puntos de inflexión accidentales.

## **II.A.2.- Excavación de Lumbrera o Portal**

### **Portal**

La excavación se realiza mediante el uso de retroexcavadoras o a mano, esto para remover la capa vegetal y la capa de suelo depositada sobre la roca a través del tiempo. El ataque de la roca se realiza haciendo uso del método convencional; después de haber avanzado un tramo considerable se cuela un marco de concreto armado en la sección inicial del ataque, esto para prevenir desprendimientos por deslaves o vibraciones de las detonaciones posteriores.

### **Lumbreras**

Existen dos tipos de lumbreras las verticales y las horizontales.

Cuando la longitud del túnel es pequeña de aproximadamente dos kilómetros, se excava únicamente una. Pero cuando la longitud es mayor es necesario la construcción de más lumbreras, pero esto depende del programa comprometido y de la amortización de los equipos.

El tipo de ataque puede ser, con martillos neumáticos, con la ayuda de traxcavos, retroexcavadoras, dragas con almeja libre o con explosivos como se aprecia en la fig. N° 5.

Cuando el ataque es por medio de explosivos, previamente se elabora un diagrama de barrenación, el cual esta en función del grado de fracturación, de los tipos de fractura de la roca y dureza de la misma.

En profundidades de 0 a 25 mts., la rezaga es extraída por medio de grúas con almejas y con rezagadoras o grúas con botes para rezaga, los cuales pueden ser cargados a mano o con maquinaria. Para profundidades mayores de 25 mts., se utiliza un equipo de manteo, el cual incluye tolvas, malacate de rezaga, guías de cables para el bote, entre otros.

El revestimiento puede ser; marcos metálicos, doveias, concreto lanzado, hidráulico o sin ademe. A parte de la lumbrera se excava un tramo adicional en cual albergará a la alcancía de rezaga.

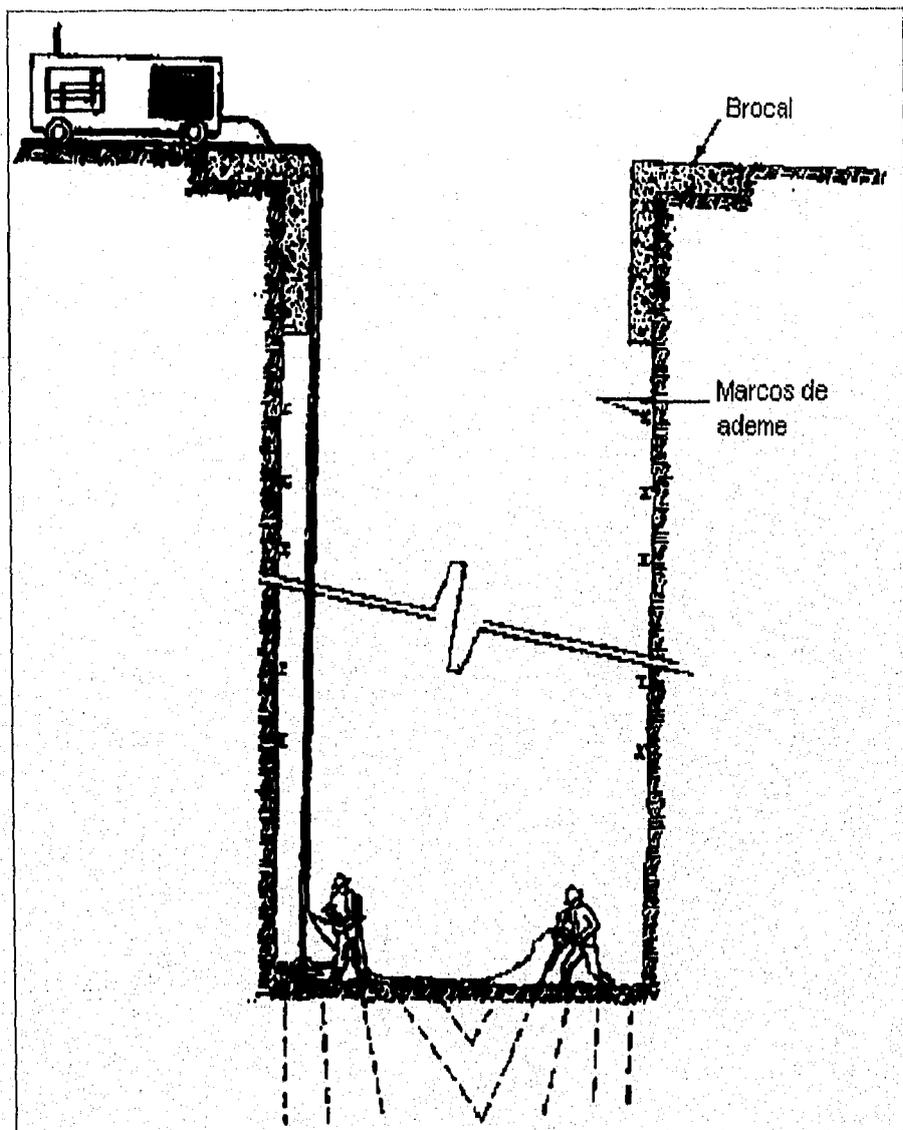


Fig. Nº 5

### II.A.3.- Perforación o Barrenación

Una vez ubicado el trazo en el interior de la lumbrera, se procede a determinar el tipo de plantilla a utilizar, la cual estará en función de varios factores.

La posición de las perforaciones, también conocida como trazo de perforación, tiene como objeto romper el mayor volumen de roca con la menor cantidad de explosivos y el menor número de barrenos.

El trazo para producir óptimos resultados varía por diferentes factores, tales como el tamaño del túnel, la profundidad de los barrenos, el tipo de los explosivos, el grado de fracturación de la roca, tipo de fracturas, dureza de la roca y el método de montaje de la maquinaria.

Una marca de pintura en el lugar donde se desea barrenar, ayudará a la más rápida colocación de la maquinaria en su posición.

Un diagrama de barrenación básicamente está formado por tres partes:

- 1) Una planta donde se muestra en sección, la distribución de los barrenos con la respectiva secuencia de los tiempos de los estopines.
- 2) Otra planta donde se muestran por zonas las cargas con explosivos, es decir, que no todos los barrenos con el mismo tiempo se deberán cargar igual y viceversa.
- 3) Una planta donde se muestra un corte horizontal del tipo de cuña indicando la distribución de la carga explosiva.

Es conveniente agregar al diagrama de barrenación:

- A) Una sección donde se muestre el diagrama de conexiones eléctricas.
- B) Datos numéricos referentes al consumo de explosivos  $\text{kg}/\text{m}^3$ , consumo de estopines por  $\text{pza}/\text{m}^3$ , y el coeficiente de barrenación/ $\text{m}^3$ .

En las figuras N° 6, 7 y 7a se presentan algunos tipos de plantilla de detonación. (**Cada túnel tendrá una plantilla de detonación diferente de acuerdo a las características geológicas del lugar.**)

En los diagramas de barrenación se pueden presentar varios tipos de cuñas y barrenaciones ver figura N° 8, aquí mencionamos algunos de ellos:

**PLANTILLA**

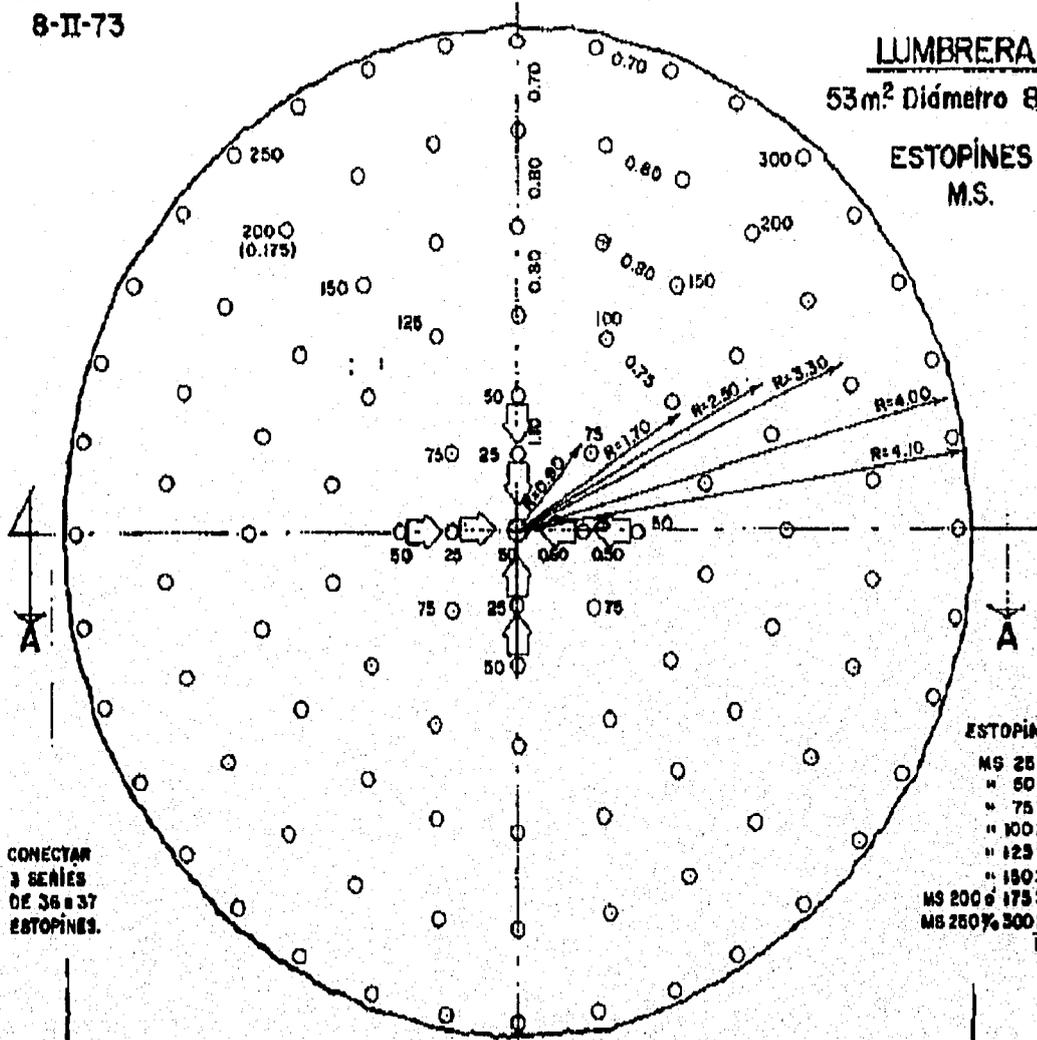
Cuña pirámide

8-II-73

**LUMBRERA 9A**

53m<sup>2</sup> Diámetro 820m

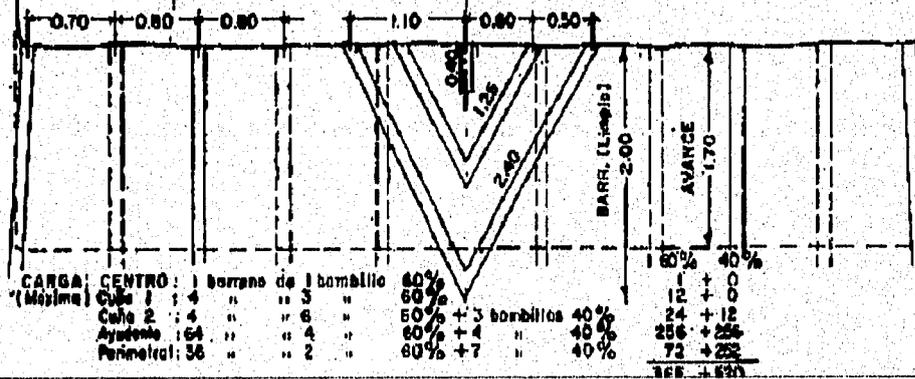
**ESTOPINES**  
M.S.



CONECTAR  
3 SERIES  
DE 36 a 37  
ESTOPINES.

**ESTOPINES**

MS 25:	4
" 50:	8
" 75:	4
" 100:	7
" 125:	7
" 150:	20
MS 200 ó 175:	26
MS 250 ó 300:	36
109	



CARGA CENTRO:	1 berrano de 1 bombillo	40%		
(Máxima) Cuña 1:	4 " " 3 " "	60%		12 + 0
Cuña 2:	4 " " 6 " "	50%	+ 3 bombillos 40%	24 + 12
Ayuntamiento:	164 " " 4 " "	60%	+ 4 " "	256 + 256
Perimetral:	36 " " 2 " "	60%	+ 7 " "	72 + 252
				355 + 530

Fig. Nº 6

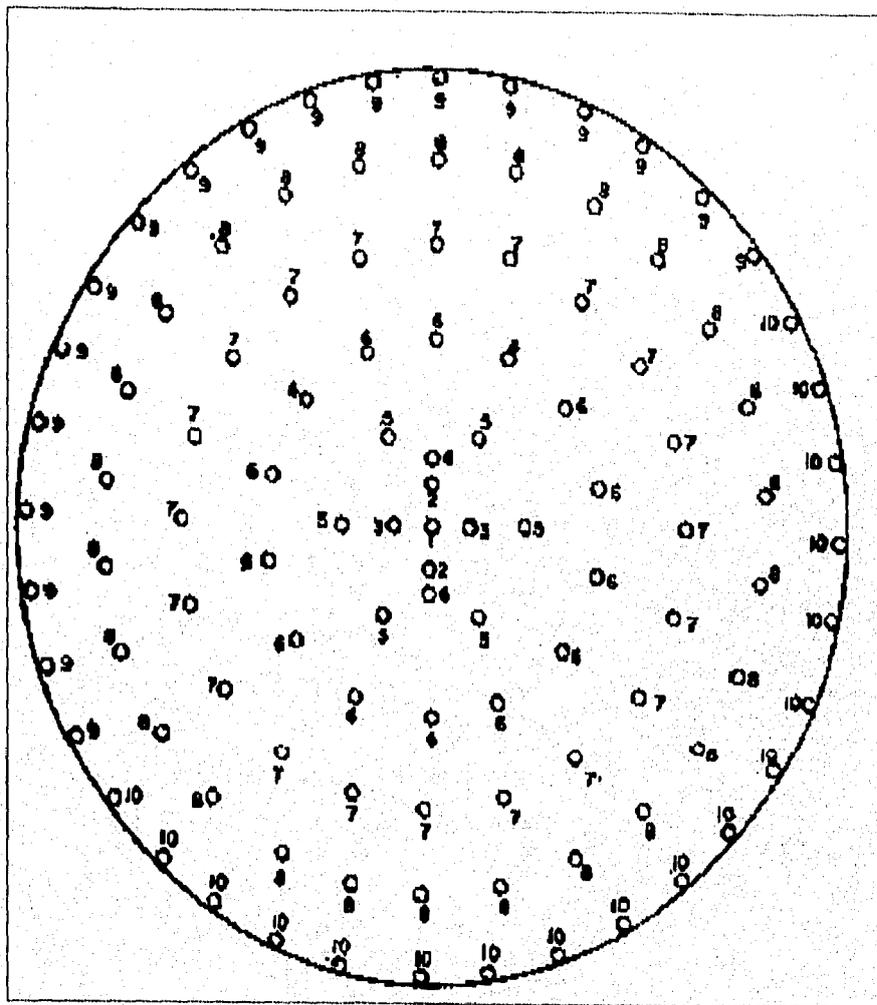


Fig. N° 7

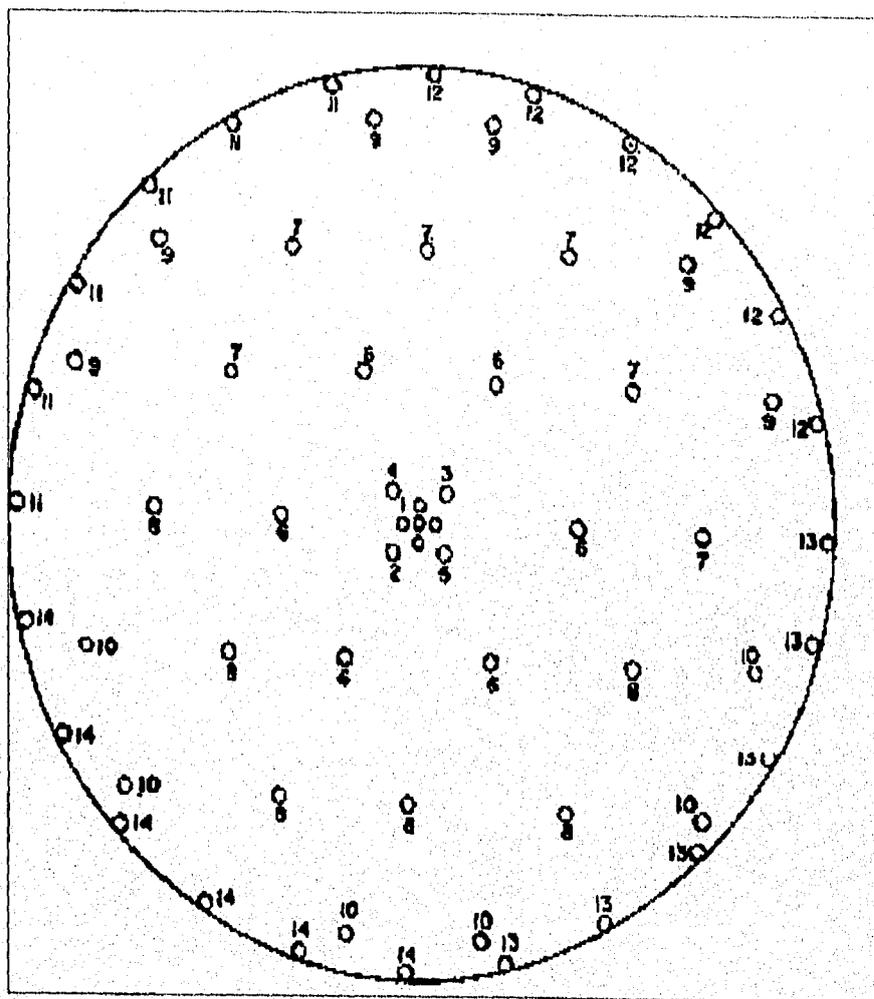


Fig. N° 7 a

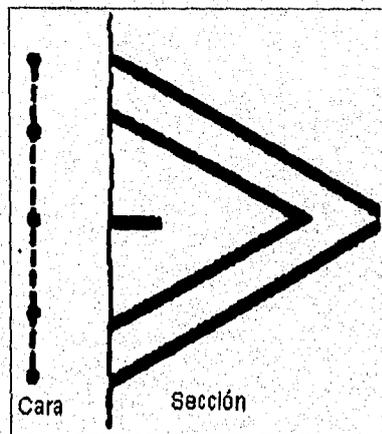
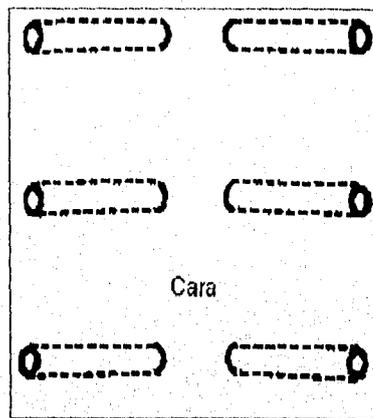
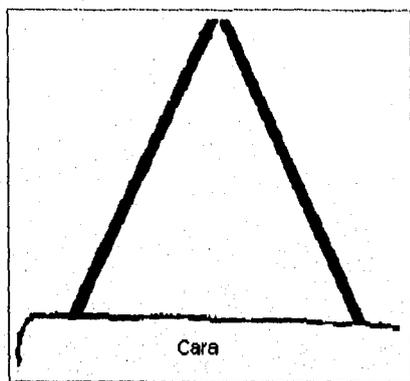


Fig. N° 8

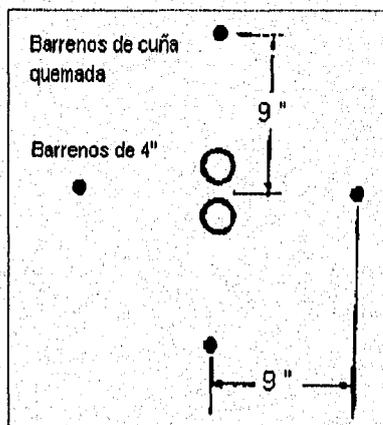
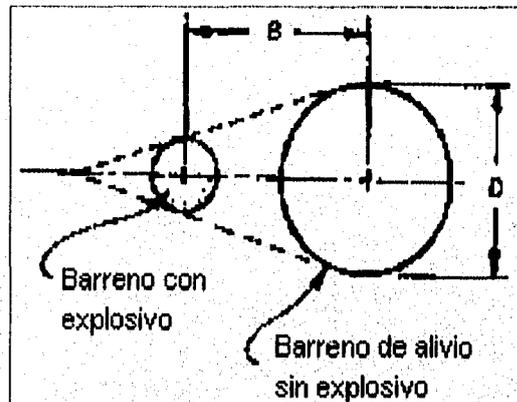
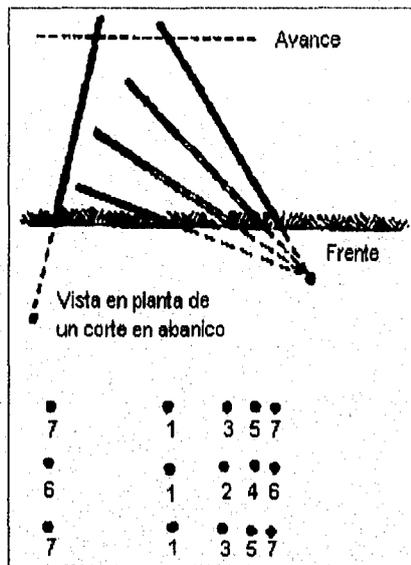


Fig. N° 8

a) **Barrenos de alivio.**

Son los barrenos que se perforan perpendicularmente al frente del túnel y paralelos el uno con respecto al otro, los cuales se dejan libre de explosivos.

b) **Barrenos paralelos.**

Se utilizan cuando el túnel es demasiado pequeño, para permitir la barrenación de algún otro tipo de cuña.

c) **Barrenos de Contorno Controlado.**

Son barrenos perimetrales a la sección del túnel, los cuales se cargan y se detonan dentro del mismo ciclo de la cuña.

d) **Barrenos de Cuña.**

Estos barrenos proporcionan una cavidad por la que se podrá romper el resto del frente, asegurando además una fragmentación adecuada para los equipos que realizan la rezaga.

e) **Barrenos Repartidores.**

Ocupan un lugar intermedio entre los barrenos de cuña y los barrenos de contorno controlado

f) **Barrenos de Piso.**

Ocupan una o dos hileras inmediatamente sobre el nivel del piso, generalmente con un pequeño ángulo hacia abajo.

Las barrenaciones con cuñas en ángulo generalmente requieren menos barrenos y explosivos por pie de avance. Su uso esta restringido por el ancho de la frente. Normalmente la cuña en ángulo se usa en túneles con equipo de perforación que se autodesplace, la frente debe ser lo suficientemente amplia para permitir que los taladros se coloquen en ángulos relativamente pequeños en relación con la cara.

**Cuña:** "Es una abertura en el centro de la cara que se necesita para avanzar en cualquier frente y es sumamente importante en cualquier excavación de túneles, de manera que si no se utiliza la cuña apropiada, los barrenos no pueden romper con efectividad".<sup>1</sup>

a) **Cuña en "V".**

Esta es una de las más antiguas cuñas en ángulo, cada "V", consiste en dos barrenos partiendo de dos puntos en la frente para encontrarse o casi encontrarse en el fondo de los barrenos. Para lograr el máximo avance en las barrenaciones la cuña debe tener el ángulo lo mas amplio posible.

La cuña debe tener una "V", o varias perforadas paralelamente una a otra. El número de "VS" necesarias depende principalmente de la estructura o la estratificación de la roca. Un avance característico para este tipo de cuñas es de 45 a 50 % del ancho del túnel.

---

<sup>1</sup> Manual para el uso de Explosivos

b) **Cuña en Abanico.**

Es una cuña en "V" modificada, en la cual el primer barreno es perforado en ángulo inclinado hacia la cara, que se dispara primero quebrando hacia ésta. Los siguientes barrenos que se disparan en secuencia hacia este corte inicial se perforan con ángulos que aumentan su inclinación y su profundidad

c) **Cuña Quemada.**

Esta cuña se utiliza exclusivamente en túneles con pequeñas áreas de sección transversal, pues todos los barrenos se perforan paralelos a la línea central de avance y perpendiculares a la cara existente, de esta manera se pueden sacar barrenaciones más profundas. Es importante que los barrenos se perforen en forma exacta y paralelos ya que la localización inadecuada de estos puede provocar chicolones.

**Chicolón;** "Es la parte del barreno que se queda en la cara después del disparo, que no corta efectivamente la roca a su alrededor".<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Manual para el uso de Explosivos

#### II.A.4.- Explosivos Poblado y Detonación.

En la ingeniería de las excavaciones subterráneas, las voladuras son igual de importantes que la elección de la forma correcta de la excavación que tendrá que adaptarse, ya que al ser deficiente el cálculo de explosivos y la distribución de estos, el frente resultante será muy inestable o quedara completamente destruido.

##### **Mecánica de ruptura de las rocas.**

Cuando se detona un explosivo colocado en un barreno, los gases de alta presión que produce la explosión hacen impacto en las paredes del barreno y generan una onda de presión intensa que viaja hacia afuera de la roca. En las inmediaciones de las paredes del barreno, los esfuerzos pueden rebasar la resistencia de la roca, lo que posiblemente ocasionaría la ruptura y trituración de la misma. Ya que la intensidad de los esfuerzos que genera la explosión disminuye rápidamente en relación a la distancia del barreno, el comportamiento de la roca variará desde una deformación plástica hasta una fracturación elástica quebradiza y el tamaño de las partículas aumentará rápidamente en relación a la distancia del barreno, como se aprecia en la figura N° 9.

Fuera de esta zona en la que se rebasa la resistencia a la compresión de la roca, se formara una zona de fisuras radiales por el componente de esfuerzos a la tensión tangenciales producto del campo de los esfuerzos producido por la explosión. Esas fisuras radiales seguirán propagándose mientras el esfuerzo a la tensión tangencial en la punta de las fisuras rebasa la resistencia a la tensión de la roca.

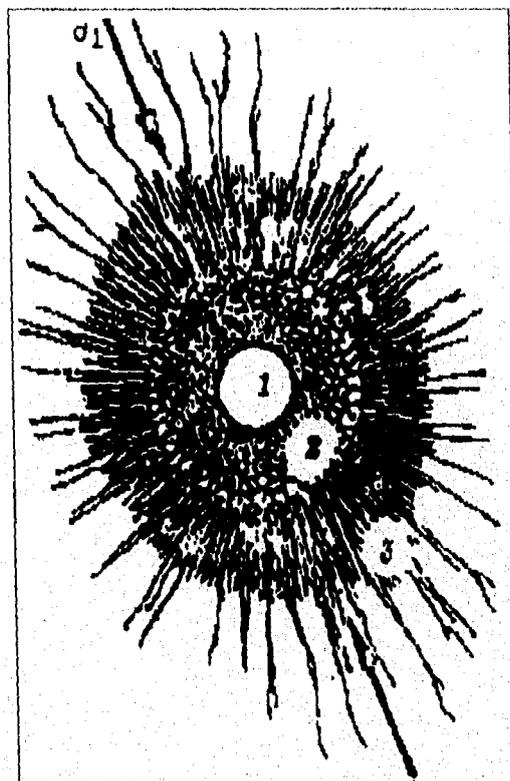
Cuando el barreno se encuentra cerca de un frente libre producido por una voladura anterior o por un barreno de alivio sin carga, el desarrollo de la fracturación alrededor del barreno queda influenciado en una forma notable por esta frente libre como se ve en la figura N° 10. Esto se debe a que la onda de esfuerzo de compresión radial a la que viaja hacia afuera del barreno se convierte en una onda reflejada de esfuerzo a la tensión cuando encuentra un frente libre. Esta onda de esfuerzo a la tensión se desplaza en sentido contrario desde el frente libre rumbo al barreno y aparte de provocar desmoronamiento en el frente libre, también puede alterar el campo de los esfuerzos alrededor del barreno y alterar la distribución de las fisuras, la voladura siempre tiene que presentarse hacia el frente libre para permitir el abundamiento de la roca y evitar que la voladura "se quede".

Además de los efectos de los esfuerzos dinámicos que se acaban de examinar, también los gases producidos por la explosión tienen un papel importante en abrir las fisuras y propiciar su propagación. Esta presión de gases tiene una importancia todavía mayor en ciertas, técnicas tales como el precorte y las voladuras de contorno controlado en las cuales las fracturas se forzan a crecer en determinadas direcciones.

**Explosivo:** "Sustancia líquida o sólida que en breve tiempo desprende gran cantidad de energía en forma de gas y calor que puede producir efectos muy destructivos".<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Manual para el uso de Explosivos



- 1.- Zona de pulverización
- 2.- Zona de trituración
- 3.- Zona de fracturación en dirección al esfuerzo sigma

Fig. N° 9

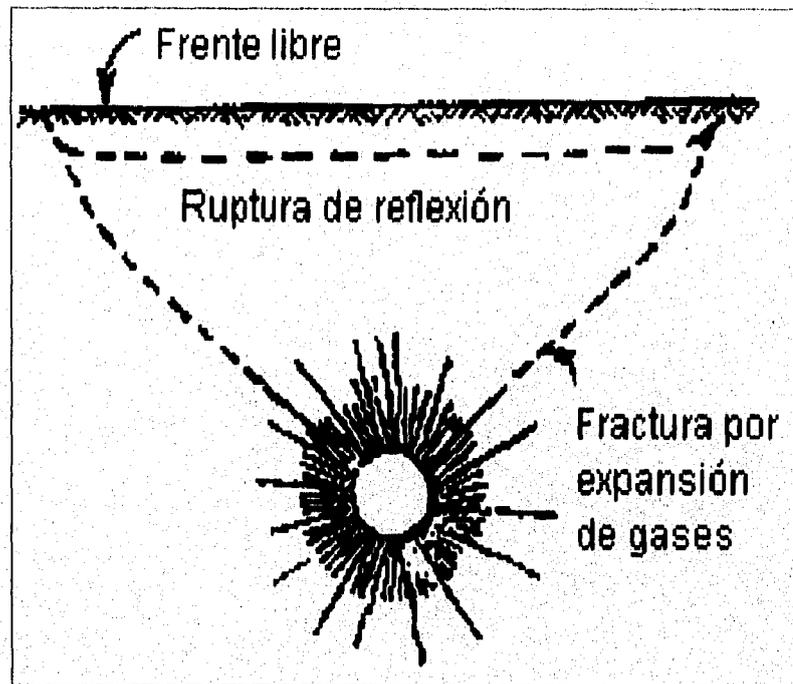


Fig. N° 10

En los trabajos de excavación de roca se emplean comúnmente los explosivos comerciales conocidos como "dinamitas", de los cuales existen muy numerosas variedades que se distinguen por sus propiedades y particularidades que los caracterizan, como son la potencia, la densidad, la velocidad de propagación, la resistencia al agua, la generación de gases como producto de la reacción química, etc.

### **Clasificación de los explosivos de acuerdo a su potencia y sensibilidad**

#### **Explosivos Primarios**

Son aquellos que se utilizan exclusivamente como cebos o iniciadores de grandes cargas de explosivos y dada la sensibilidad de estos no pueden ser utilizados como "explosivos" de trabajo, debido a los riesgos que implica su manejo.

#### **Explosivos Secundarios**

Son del tipo comercial estándar comúnmente empleados a gran escala en trabajos de voladuras de roca, los que a su vez son iniciados por un cebo o iniciador constituido por un explosivo primario.

**Cebo:** " Es la porción de la carga explosiva que consiste de un cartucho o recipiente de explosivos, dentro del cual se inserta un detonador o cordón detonante y cuyo propósito es iniciar la carga principal".<sup>4</sup>

A las barrenaciones realizadas en la etapa anterior, se les colocan las cargas o explosivos con su respectivo iniciador hasta la profundidad requerida, mientras que el resto de barreno deberá retacarse.

**Retaque:** "Consiste en utilizar arena, trozos de piedra o algún material inerte con el fin de confinar la energía del explosivo para aumentar la efectividad de este".<sup>5</sup>

La detonación es aquella acción que se realiza para hacer explotar las cargas depositadas dentro de un barreno, comúnmente se acostumbra detonar varias cargas al mismo tiempo, para esto se puede usar circuitos en serie, en paralelo o en serie-paralelo.

Es recomendable hacer detonar primero la zona central o cuña para la perforación del cráter, continuando con la zona de transición de la primera y finalmente los exteriores que formaran el contorno del túnel.

---

<sup>4</sup> Manual para el uso de Explosivos

<sup>5</sup> Manual para el uso de Explosivos

## **Características que determinan la conveniencia o inconveniencia de un explosivo.**

### **A) Efecto del Estallido.**

Esta influenciado por complejos factores, como son la generación de gases de la explosión, el volumen de gases liberados, la presión y la temperatura de los gases, y la velocidad de la propagación de la detonación que tiene importancia en el efecto del impacto, ver figura N°11.

### **B) Calor de la Explosión.**

Teóricamente al producirse la explosión ocurre una reacción exotérmica que genera una cantidad de calor igual a la teórica potencial. Esto en la practica nunca ocurre, puesto que la transformación siempre es incompleta por razones diversas, como cuando se realizan trabajos en rocas suaves en las que el enfriamiento es mucho más rápido que en rocas duras.

### **C) Densidad del Explosivo.**

Depende la densidad y tamaño de las partículas que componen la mezcla, la carga neumática en algunos tipos de cargadores de campo o el cargador mecánico con transportadores helicoidales, pueden aumentar la densidad del producto, rompiendo los gránulos que lo componen.

Teóricamente las partículas más pequeñas deberían de incrementar la velocidad y la densidad por lo que se ha incrementado la pulverización a partículas más pequeñas.

### **D) Sensibilidad a la Detonación y Estabilidad de la detonación.**

Un buen explosivo debe tener una sensibilidad a la iniciación, es decir, tendencia a detonar adecuadamente al uso que se le destine, para que rinda al máximo sin detrimento de seguridad en su manejo, por lo general la hipersensibilidad de los explosivos implica un serio aumento de los riesgo que se corren en su transporte y manejo.

### **E) Velocidad de Detonación.**

Es la rapidez con la que se propaga la onda de detonación y es medida en mts./seg., por lo general en tanto mayor es la velocidad de detonación de un explosivo, mayor resulta ser el efecto de su impacto y de su rompimiento en la roca, en la figura N° 11, aparecen tres pruebas de diferentes explosivos detonados bajo agua, notese el efecto del estallido para cada caso.

### **F) Efecto de la Humedad.**

La mayoría de los explosivos comerciales empleados en los trabajos de voladura de rocas contienen sales generadoras de oxígeno durante la reacción, las cuales suelen ser solubles en el agua como los nitratos, cloratos y percloratos; razón por la que generalmente requieren una protección especial contra la humedad a fin de que no se vuelvan inertes. Estos tratamientos se les dan en la fabricación por procedimientos diversos, como por ejemplo adicionándoles las llamadas gelatinas.

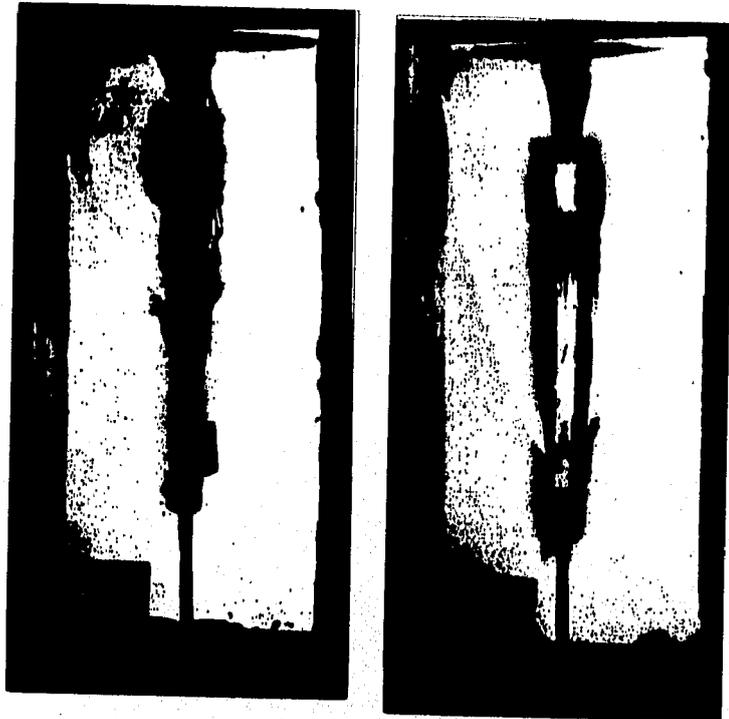


Fig. N° 11

Por otra parte en tanto menor es el contenido de sales, mayor es la resistencia del explosivo contra el efecto de la humedad, como ejemplo podemos citar a las dinamitas del tipo gelatinas.

#### G) Emisión de Gases Dañinos y Tóxicos.

En general se busca que los explosivos generen un mínimo de gases tóxicos, especialmente cuando se utilizan en trabajos subterráneos o en sitios en los que se tiene una ventilación deficiente. En la práctica, todo explosivo libera en mayor o menor grado una cierta cantidad de gases que tienen nocivo efecto fisiológico sobre la salud de los trabajadores, razón por la cual en la selección de los mismos este aspecto es tan importante.

### **Tipos y Clases de Explosivos en los Trabajos de excavación en Roca.**

#### **Dinamitas de Nitroglicerina.**

Las cuales tienen como único constituyente explosivo la nitroglicerina. Estos se caracterizan por su alta velocidad, que imparte una acción rápida y fracturadora, producen abundantes gases, lo que las hace poco aptas para ser empleados en trabajos subterráneos.

#### **Gelatinas.**

Fabricadas a base de nitroglicerina y algodón-polvora, cuya consistencia varía desde un líquido grueso y viscoso hasta una sustancia dura como el hule. Por lo general estos explosivos son densos, plásticos y prácticamente impermeables, producen muy poca cantidad de gases, entre los grados de 20 a 60% .

Cuando se cargan bien confinados, desarrollan una muy alta velocidad de detonación.

#### **Dinamitas Granulares.**

Están formadas por nitroglicerinas y nitrato de amonio en mayores cantidades que en las dinamitas amoniacaes, tienen poca resistencia al agua y producen gran cantidad de gases. Este tipo de explosivos se fabrica especialmente para cargar barrenos secanteados y aquellos irregulares en los que no es posible introducir cartuchos. Dadas sus características es un explosivo adecuado para la producción de cascajo y piedra suelta, especialmente tratándose de roca suave.

### **Artificios para voladuras.**

Por artificios para voladuras se entienden los productos o explosivos empleados para:

- a) Cebas explosivas; Entendiéndose a su vez por cebo la porción de carga explosiva violenta provista de un detonador, cuya finalidad es iniciar la explosión del resto de la carga ver figura N° 12.
- b) Suministrar o transmitir una llama que inicie una explosión como en el caso de las mechas para minas.
- c) Llevar una onda detonadora de un punto a otro, o de una carga explosiva a otra, a fin de hacer estallar oportunamente y eficientemente todo el conjunto de cargas alojadas dentro de los barrenos que forman parte de una voladura o tronada. Invariablemente los artificios son consumidos o destruidos en la tronada y básicamente se dividen en:

#### **Iniciadores.**

Son los dispositivos empleados para encender y llevar una llama que inicie una explosión. El iniciador más conocido es el llamado mecha para minas, el cual es un cordón formado por un núcleo central de pólvora negra a base de potasio, envuelto en varias cubiertas de materiales textiles impermeables.

#### **Detonadores.**

Son artificios generalmente formados por una cápsula metálica que contiene en su interior uno o más explosivos de gran sensibilidad que hacen estallar los cebos o cargas explosivas de los barrenos. Se fabrican de muy diversos tipos, caracterizándose especialmente por el tipo de iniciador de disparo, que puede ser con mecha o eléctrico, instantáneo o de retardo, así como por su calibre.

#### **Detonadores Eléctricos.**

Son fulminantes fabricados para ser detonados por medio de una corriente eléctrica, su construcción es parecida a la de las cápsulas fulminantes, pero adicionalmente encima de las cargas de ignición tiene un puente de alambre que une las conexiones del detonador, los que son mantenidos en su posición correcta por medio de un aislante de plástico y un tapón de hule, este también se conoce como estopin eléctrico.

#### **Detonadores Instantáneos.**

En estos la carga de ignición inicia la detonación en forma prácticamente instantánea.

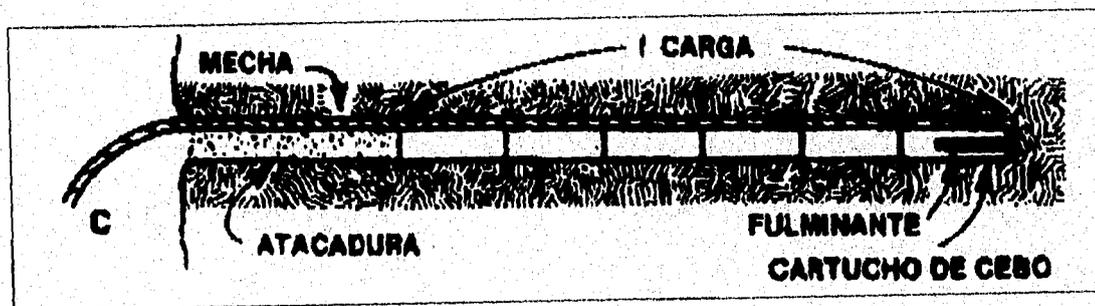
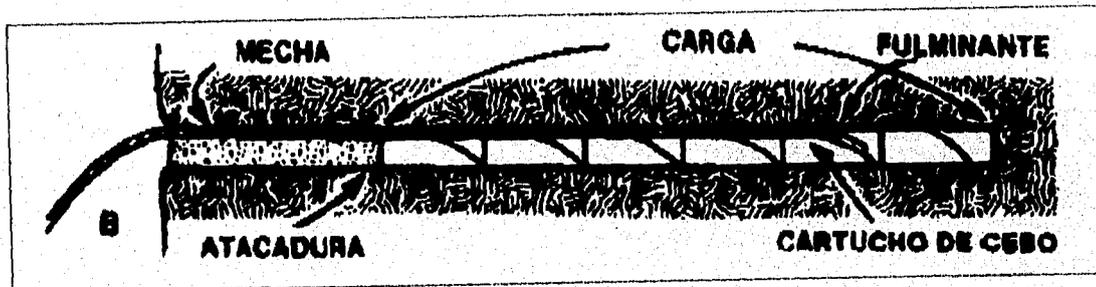


Fig. Nº 12

### **Artificios para voladuras.**

Por artificios para voladuras se entienden los productos o explosivos empleados para:

a) Cegar cargas explosivas; Entendiéndose a su vez por cebo la porción de carga explosiva violenta provista de un detonador, cuya finalidad es iniciar la explosión del resto de la carga ver figura N° 12.

b) Suministrar o transmitir una llama que inicie una explosión como en el caso de las mechas para minas.

c) Llevar una onda detonadora de un punto a otro, o de una carga explosiva a otra, a fin de hacer estallar oportunamente y eficientemente todo el conjunto de cargas alojadas dentro de los barrenos que forman parte de una voladura o tronada. Invariablemente los artificios son consumidos o destruidos en la tronada y básicamente se dividen en:

#### **Iniciadores.**

Son los dispositivos empleados para encender y llevar una llama que inicie una explosión. El iniciador mas conocido es el llamado mecha para minas, el cual es un cordón formado por un núcleo central de pólvora negra a base de potasio, envuelto en varias cubiertas de materiales textiles impermeables.

#### **Detonadores.**

Son artificios generalmente formados por una cápsula metálica que contiene en su interior uno o mas explosivos de gran sensibilidad que hacen estallar los cebos o cargas explosivas de los barrenos. Se fabrican de muy diversos tipos, caracterizándose especialmente por el tipo de iniciador de disparo, que puede ser con mecha o eléctrico, instantáneo o de retardo, así como por su calibre.

#### **Detonadores Eléctricos.**

Son fulminantes fabricados para ser detonados por medio de una corriente eléctrica, su construcción es parecida a la de las cápsulas fulminantes, pero adicionalmente encima de las cargas de ignición tiene un puente de alambre que une las conexiones del detonador, los que son mantenidos en su posición correcta por medio de un aislante de plástico y un tapón de hule, este también se conoce como estopin eléctrico.

#### **Detonadores Instantáneos.**

En estos la carga de ignición inicia la detonación en forma prácticamente instantánea.

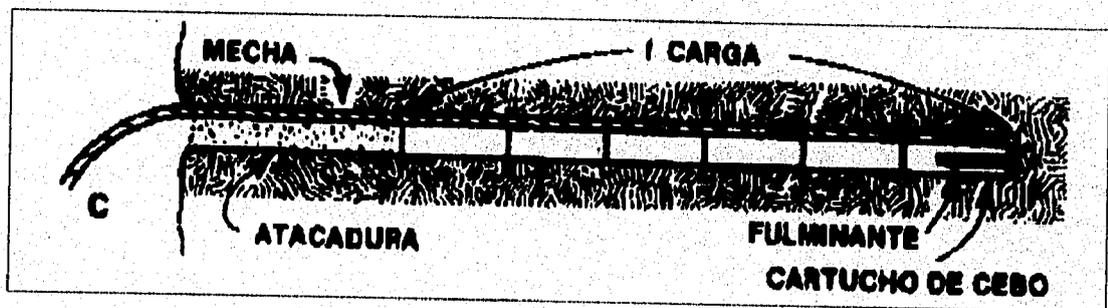
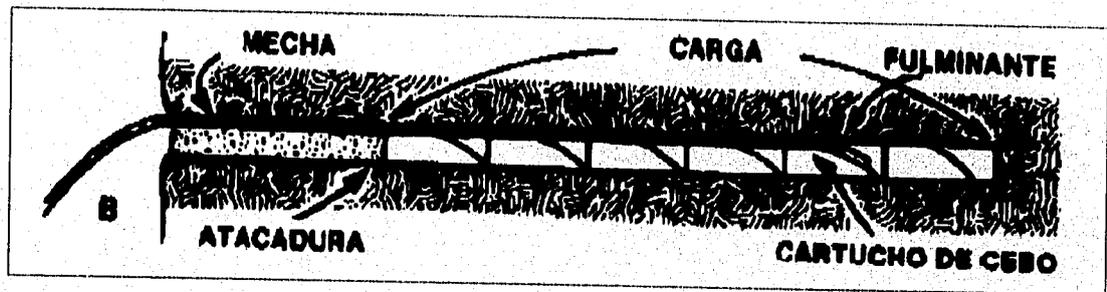
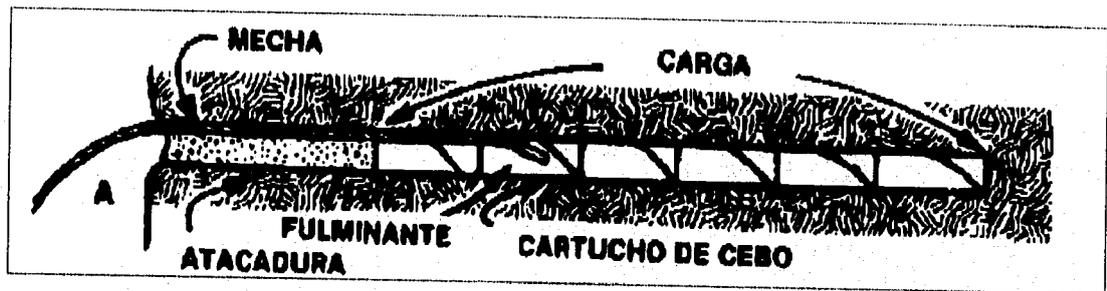


Fig. Nº 12

#### **Detonadores Eléctricos de Retardo.**

Su construcción es semejante a la de los detonadores instantáneos salvo que entre el puente eléctrico y la carga de ignición llevan un elemento de retardo

#### **Estopines reguladores de tiempo.**

Su construcción es semejante a la de los detonadores instantáneos salvo que entre el puente eléctrico y la carga de ignición llevan un elemento de retardo.

#### **Mecha Detonante Primacord.**

Es un cordón detonante que contiene un núcleo de "neperina", protegido por una envoltura impermeable. Está caracterizada por una velocidad de detonación muy alta, es poco sensible a los golpes. El explosivo detonante absorbe muy lentamente el agua pero estalla aún en el caso de que el núcleo esté empapado.

#### **Detonantes Reforzadores.**

Son dispositivos que contienen cargas explosivas de muy alta velocidad utilizándose para aumentar la intensidad de la explosión de la mecha detonante primacord. Usándose esencialmente cuando la primacord se encuentra empapada o congelada.

#### **Pasos a seguir para la perforación y cargado:**

La primera consideración para cualquier operación de tuneleo debe ser la seguridad de los operarios. Todo operario bajo la dirección de un supervisor debe aceptar la responsabilidad de su propia seguridad y la seguridad de los que se encuentran en el área; los siguientes principios de perforación y cargado deberán observarse en conjunto con los procedimientos de seguridad de la compañía.

a) La frente deberá inspeccionarse para explosivos no detonados antes de cualquier perforación, esto puede involucrar el tener que lavar la frente mediante una manguera y agua. Siempre inspeccione y lave cualquier chocolón. La inspección visual puede no ser suficiente para determinar si existen explosivos no detonados.

b) Al empezar un nuevo barreno, nunca apoye la broca en el barreno de un chocolón. No existen excepciones a esta regla. Cualquier explosivo que pueda encontrarse dentro del chocolón es casi seguro que detone.

c) Barrene siempre a la profundidad requerida. Lo mejor posible que se pueda, todos los barrenos deben tener el fondo en el mismo plano vertical. Una barrenación sacará la profundidad del barreno mas corto que se tenga.

d) Al perforar una barrenación quemada todos los barrenos deben estar paralelos. Evite desviarse hacia los costados.

e) Después de terminar la barrenación limpie todos los barrenos con agua o aire antes de cargar. Precaución: párese a un lado del barreno al estarlo limpiando para evitar las rocas que puedan proyectarse del barreno que esta limpiando, asegurarse que las demás personas estén alejadas.

f) Un atacador lo suficientemente largo para alcanzar el fondo del barreno es esencial. El atacador debe ser de madera o de algún plástico aprobado. Sin que tenga partes de metal que puedan producir chispa. La punta deberá ser plana. El diámetro mínimo del atacador deberá ser igual al diámetro del explosivo.

g) Introduzca siempre el atacador a toda la profundidad del barreno, para verificar esta y ver si el barreno aún está limpio.

h) Introduzca siempre el cartucho-cebo antes que ningún otro al barreno con la punta del estopín dirigida hacia el cuello del barreno. Nunca coloque ningún cartucho detrás del cartucho-cebo. A este se le llama cartucho colchón y frecuentemente no detonara debido al efecto de la onda de detonación.

i) El cartucho -cebo debe empujarse al fondo del barreno, pero nunca debe atacarse.

j) El resto del barreno deberá cargarse con no más de dos cartuchos a la vez. Una práctica común era rasgar los cartuchos antes de ser cargados, pero debido a las excelentes características de atacado que tienen los hidrogeles "Tovex", no es necesario hacerlo. El ejercer una presión firme y constante romperá el cartucho expandiéndose y llenando completamente el barreno.

k) Durante el cargado, los alambres del estopín deberán sostenerse tensos para evitar romper el aislamiento con el atacador.

l) Aun cuando el uso del taco no es una práctica común en la mayoría de los túneles, puede reducir la cantidad de explosivos requeridos, el humo y el golpe de aire, mejorando por lo tanto los resultados de la voladura.

m) Después de haber cargado toda la barrenación, los alambres del estopín deberán ser conectados, evitando que conexiones desnudas toquen la frente o bien hagan contacto entre sí.

n) Si existe algún retraso antes del disparo, coloque siempre en corto las puntas del circuito.

o) Antes de conectar la línea de voladura asegúrese de que todo el personal esté alejado. Coloque guardias en todos los puntos necesarios para evitar que alguien entre al área de voladura. Establezca un sistema regular de advertencia que sea conocido por todo el personal, el cual deberá hacerse sonar previo a la voladura. Este sistema deberá incluir avisos cinco minutos, y un minuto antes del disparo así como una señal posterior a la voladura.

p) No regrese al área de voladura hasta que todo el humo y gases se hayan ido y la visibilidad sea buena. En ningún caso el tiempo de espera deberá ser menor de quince minutos.

### **Precaución y manejo de explosivos.**

Aún cuando el manejo de explosivos, del punto de almacenamiento al lugar de uso involucra diferentes procedimientos de seguridad, ciertos principios generales se aplican siempre:

- a) Los explosivos y detonadores deberán mantenerse aparte hasta el último momento.
- b) Siempre deberán manejarse cuidadosamente, mantenerse secos y protegidos de golpes, fricción, fuego o chispas.
- c) Los alambres de los detonadores eléctricos deberán mantenerse fuera de contacto de corrientes erráticas o superficies cargadas eléctricamente.
- d) Todos los explosivos y detonadores que no se usen al final de un día, deberán regresarse al almacén adecuado.
- e) El movimiento de materiales explosivos de la superficie al interior de túnel deberá programarse en una base diaria o de intervalos de tiempo cortos. Idealmente deberán mandarse fuera de turnos de trabajo.
- f) Los explosivos deberán transportarse en el interior del túnel en un carro cerrado o receptáculo construido para ese único propósito. Su interior deberá ser recubierto de madera sin exposición de partes metálicas. Los detonadores podrán llevarse en compartimientos separados de los explosivos, por lo menos con capas de 10 cm. de madera.

### **II.A.5.- Ventilación.**

Después de cada detonación, y aun durante todo el tiempo de trabajo se hace necesario ventilar el túnel por varias razones, siendo las primordiales:

- a) Sacar los polvos producidos en la barrenación, detonación y rezaga del material.
- b) Para desalojar los gases tóxicos producidos por las explosiones.
- c) Para proporcionar aire fresco a los obreros.

La ventilación mecánica se realiza por lo general, por medio de abanicos impulsados por motores eléctricos, los cuales tienen la particularidad de inyectar aire fresco al túnel o sacar el polvo y el aire viciado.

Dependiendo del sentido del aire, la ventilación se puede realizar mediante tres procesos:

- a) Introducción del aire fresco.
- b) Aspiración o extracción del aire viciado.
- c) Proceso combinado.

El primero de ellos consiste en inyectar aire fresco al túnel desde la superficie hasta el frente de ataque.

El segundo, consiste en absorber el aire viciado y polvo por medio de un ducto, con uno de sus extremos colocado a 20 ó 30 mt., del frente.

En el tercero se inyecta aire fresco al frente del túnel durante las operaciones de barrenación y rezaga, además extraer el aire viciado durante la carga y voladura.

El volumen requerido para la ventilación del túnel variará con el número de trabajadores que se encuentren dentro del mismo, con la frecuencia de las explosiones, con el método para controlar el polvo, con el número de máquinas que consuman aire comprimido dentro del túnel y con las dimensiones del túnel ver figura N° 13.

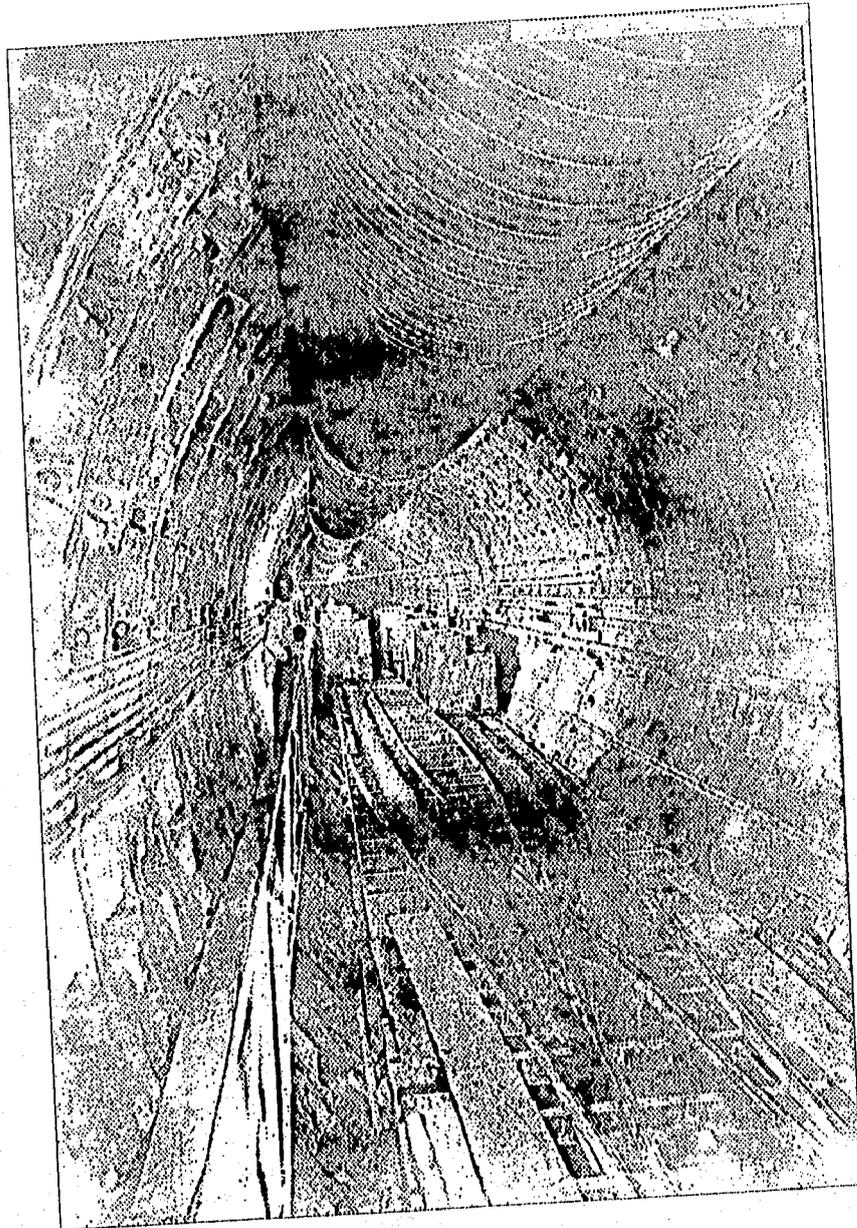


Fig. N° 13

## **II.A.6.- Rezaga.**

Es la operación que consiste en cargar el material producto de la excavación para sacarla del túnel. El material es transportado en vagonetas o en botes sobre plataformas para que posteriormente sean vaciados en las alcancías localizadas en el fondo de las lumbreras y de aquí llevado (Mantear) el material al exterior ver figura N° 14 y 14a.

Podemos decir que esta actividad consta de cuatro partes.

- 1.- Cargar el material del frente producto de la voladura por los obreros.
- 2.- Transporte del material producto de la excavación en carros mineros del frente de trabajo hasta la lumbrera.
- 3.- Vaciado de este material a las tolvas receptoras en la lumbrera.
- 4.- Izado (Manteo) del material del fondo de la lumbrera a la superficie con botes especiales de vaciado automático.

Coordinar lo más posible las cuatro partes de que consta la rezaga, trae como consecuencia un menor número de vagonetas a utilizar, esto evita congestionamientos innecesarios.

La carga del material en el frente se puede realizar con rezagadoras, cargadores de descarga frontal o cargadores de descarga lateral. El transporte deberá hacerse tirando y no empujando el tren de transporte; al iniciarse la rezaga debe estar cercana al cambio californiano de tal suerte que cuando los carros cargados que están en el cambio manson los enganche la locomotora para iniciar su recorrido a la lumbrera, una vez que la locomotora ha colocado los carros en posición de vaciado en la alcancía, la descarga puede ser directamente a botes rezagadores o a la alcancía. Esta actividad se efectúa a base de malacates de doble tambor; ya sea operando dos botes o solamente uno.

Es muy importante tratar que el manteo no se interrumpa por ningún motivo ya que se presenta un desequilibrio entre el manteo con el vaciado, el acarreo horizontal y la carga en el frente.

### **Equipo de Manteo.**

El equipo seleccionado para el manteo del material producto de la excavación del túnel se divide en tres partes:

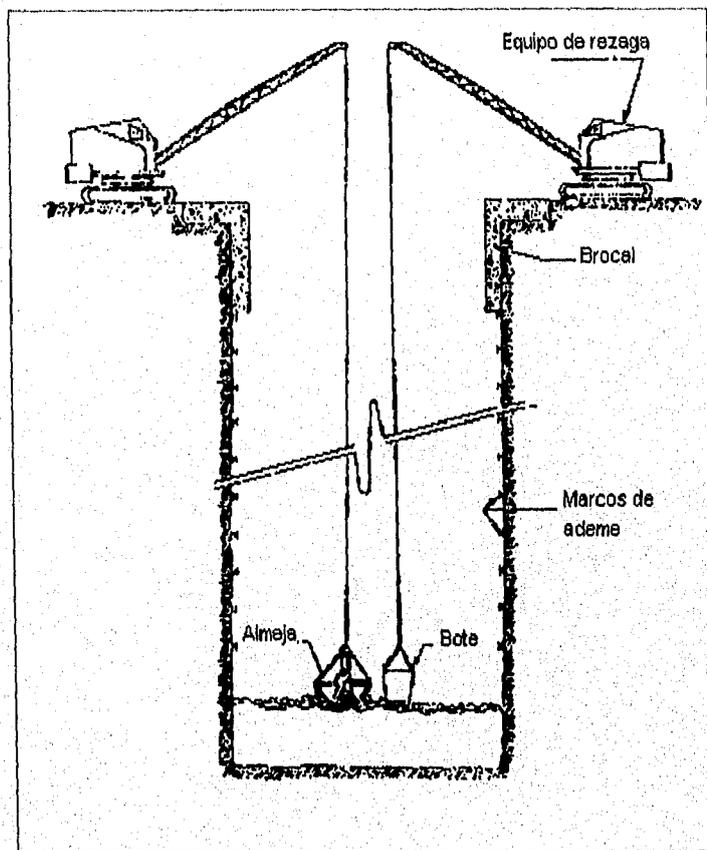


Fig. N° 14

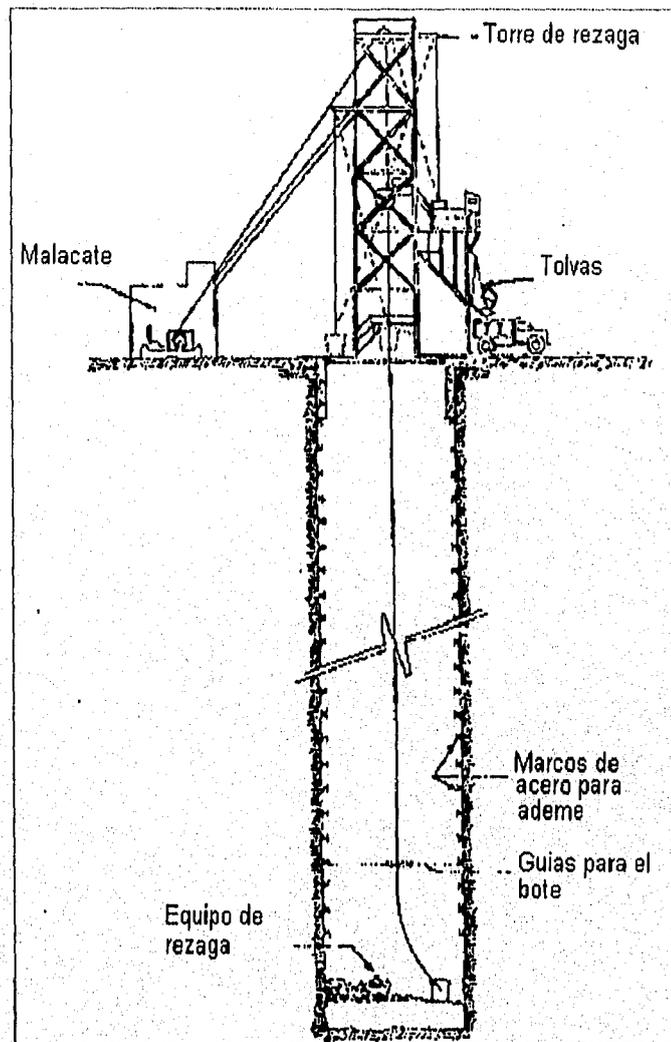


Fig. Nº 14 a

**a) Equipo de superficie en el brocal de la lumbrera.**

Para esta primera parte se puede decir que el equipo a seleccionar es el tradicional el cual consiste en; una torre metálica de diseño especial montada sobre cuatro bases de concreto y en algunas veces un apoyo extra.

Esta estructura lleva las guías para los botes cargadores, lo cual se hace del lado opuesto de donde se encuentra el malacate. En este mismo lado y prácticamente incorporado a la torre se encuentra una tolva para la recepción del material con una criba de rieles que permite retener el material mayor de 50 cm., de esta manera el material pequeño se puede descargar sin problema de atascamiento operando la puertas neumáticamente. Dicha torre también contiene un sistema de cables y poleas para el izaje de los botes cargadores (skips), dispuestos de tal modo que sea posible la maniobra simultánea de ascenso y descenso de los botes.

También en superficie se debe instalar un malacate eléctrico con el tambor de enrollamiento de cables seccionado en dos partes, operando un solo bote y contrapeso o bien dos botes de igual capacidad.

**b) Equipo en la longitud vertical de la lumbrera.**

Esta parte se concreta casi exclusivamente a las guías del cable que están sujetas en la parte superior de la torre, en el cual existe un mecanismo de seguridad de que en caso de que el bote subiera sin control, quedará suspendido en la parte superior y perfectamente asegurado en la parte inferior, en un marco de fierro estructural quedará sujeto el otro extremo de las guías por debajo de la máxima profundidad alcanzada por el fondo del bote, en esta estructura deben existir resortes amortiguadores y mecanismos para tensar las guías cuando se requiera.

**c) Equipo de la base o fondo de la estructura.**

Consiste básicamente en una excavación bajo el piso del túnel aproximadamente del mismo diámetro que la lumbrera. En esta área quedará instalada la tolva de recepción de la descarga de los carros mineros, obturada por una compuerta deslizante operada mecánicamente. Coincidiendo con el umbral de la tolva respectiva, se deberá encontrar la arista superior del bote de manto.

Durante el ascenso de un bote y el descenso del otro, el tren de descarga deberá hacer el movimiento de los carros y la descarga del material.

### **II.A.7.- Amacice y Afine**

Después de cada tronada en los frentes de excavación, tanto en las paredes como en el techo de misma en las inmediaciones de la tronada quedan rocas flojas que representan un serio peligro para los trabajadores y por lo tanto es realizada inmediatamente después de que se termina la ventilación mientras el equipo de rezagado transita hasta el frente. El amacice es ejecutado por cuadrillas de barrenadores experimentados que por medio de barras van desprendiendo las rocas sueltas y amacizando las paredes y el cielo del túnel.

Por acceso difícil, mala visibilidad o supervisión inadecuada, puede suceder que el amacice manual quede incompleto y que haya desprendimientos posteriores a consecuencia de las siguientes voladuras o de la deformación de la excavación, para solucionar este problema, un martillo neumático o hidráulico pesado montado sobre un brazo articulado que se encuentra instalado sobre un vehículo avanza después de la voladura y amaciza mecánicamente el techo y las paredes el brazo articulado necesita tener un alcance suficiente para tener acceso a toda la zona que se acaba de volar sin necesidad de rezaga previa. El peso y la potencia del martillo deben ser suficientes para poder abatir toda la roca suelta, como aparece en la figura N° 15.

Por perfecta que sea un barrenación y tronada, las paredes del túnel quedan con irregularidades, algunas de las cuales se proyectan penetrando en la sección teórica del revestimiento de concreto, por lo que para tener una superficie adecuada, es necesario realizar trabajos de barrenación secundaria e ir tronando las salientes.



Fig. N° 15

## **II.B.- Excavación de Túneles en roca por medio de Maquinaria "Topo"**

Los topos para excavación de túneles implican una gran inversión; no es probable que sean eficientes bajo condiciones de terreno diferentes a aquellos para los que fueron diseñados y pueden ser la causa de retrasos y gastos si se encuentra en condiciones desfavorables en el trabajo.

La inversión inicial incluye no solamente la maquina y la planta auxiliar sino también todo el equipo e instalaciones en el lugar, la disposición de las cámaras del escudo, túneles de acceso, vías, tiros, arreglos superficiales para la eliminación y acarreo del material de excavación, los cuales están integrados para trabajar con las características especiales y alta producción de la maquina. Dicha maquina fabricada para hacer una importante perforación, arrastra un largo tren de equipos auxiliares y no puede funcionar con todo su potencial hasta que se excave y revista un tramo suficientemente largo del túnel para poder tener espacio para que el resto del equipo se instale y se empiece a trabajar ver figura N° 16.

Para que una maquina que va excavar todo el frente del túnel se justifique económicamente debe de haber tiempo y capital disponible para conseguir la maquina y todos sus aditamentos auxiliares para después ponerla a trabajar. No es probable que se útil a menos que la excavación sea superior a un kilometro de longitud y se realice en condiciones razonablemente uniforme.

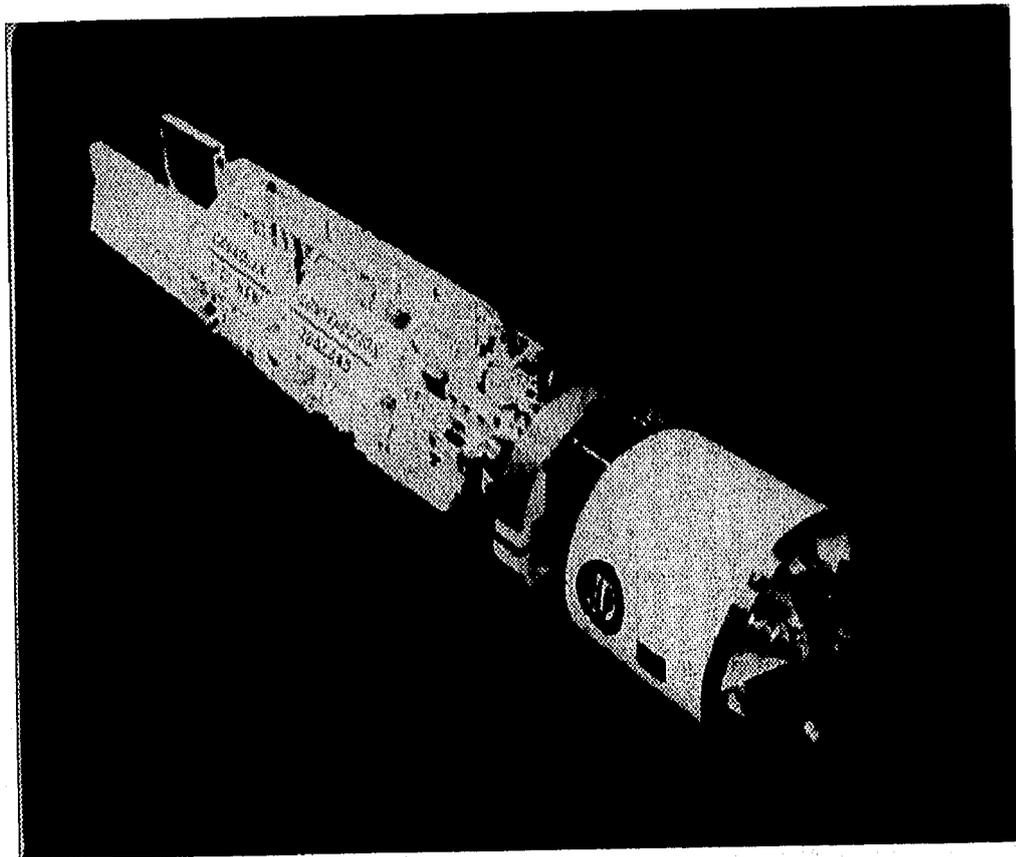


Fig. N° 16

### **II.B.1.- Descripción y partes que componen el Topo**

El topo mecánico es una maquina compacta, diseñada para excavar túneles en diámetros que van desde 2.44 mts., hasta 6.71 mts., pudiéndose fabricar para mayor diámetro si el proyecto y las necesidades lo requieren.

El Topo mecánico, se usa en terreno rocoso, teniendo una cabeza giratoria con un número variable de cortadores troncónicos, que también giran sobre su propio eje, un sistema de gatos que producen una presión de los cortadores de la cabeza giratoria sobre el frente que se esta atacando.

Partes que la componen.

A continuación se mencionaran cada una de las partes que lo componen así como su funcionamiento:

#### **a) Cuerpo del Topo.**

Es la parte central o troncal de la maquina, es de forma cilíndrica; en donde se encuentra el tablero de controles para el operador, durante el ciclo de excavación el cuerpo se mueve hacia adelante, independientemente de las demás partes. Del cuerpo salen de sus dos lados oblicuamente las patas de atraque, también del cuerpo salen las patas de soporte.

#### **b) Patas de Atraque.**

Son generalmente ocho, cuatro delanteras y cuatro traseras; salen del interior del cuerpo central del topo que son accionados por gatos hidráulicos alimentados por una bomba hidráulica. La fuerza de atraque es de 720 ton., su movimiento es individual en cada una de las ocho extremidades, es hacia arriba y hacia abajo.

#### **c) Cabeza Giratoria.**

Es la parte delantera de la maquina, en la cabeza es donde están incrustados los cortadores, su giro es en sentido de las manecillas del reloj a una velocidad de 10.75 rpm..

**d) Patas de Soporte.**

Tendrá dos soportes en la parte trasera del cuerpo, su movimiento es por medio de gatos hidráulicos, con un movimiento de arriba hacia abajo, son de forma cilíndrica teniendo en su extremo una placa rectangular con movimiento individual para adaptarse al movimiento del túnel.

**e) Cilindros Hidráulicos ( Gatos de Empuje).**

Que, como su nombre lo indica, sirven de empuje hacia la cabeza cortadora que al estar girando provoca el corte del material, el empuje es de 120 ton., que son alimentados por la bomba hidráulica, la presión debe ser constante en todos los cilindros para no producir desviaciones en la línea de trazo.

**f) Cortadores.**

Estos son los elementos más importantes de la maquinaria; existen dos tipos de cortadores:

a) De anillos lisos con endurecimiento superficial.

b) De anillos Insertos de carburo de tungsteno.

El cortador es troncónico y su diámetro es variable, aproximadamente de 25 cm.. Los cortadores en número variable están colocados de modo que sus filos describan circunferencias concéntricas con la menor separación entre ellos.

En el caso del cortador con anillos, estos pueden estar forjados de una pieza con el, o bien, pueden ser colocados a este a presión o con soldadura. El número de anillos de un cortador puede variar de uno a cinco o más ver figura N° 17 y 18.

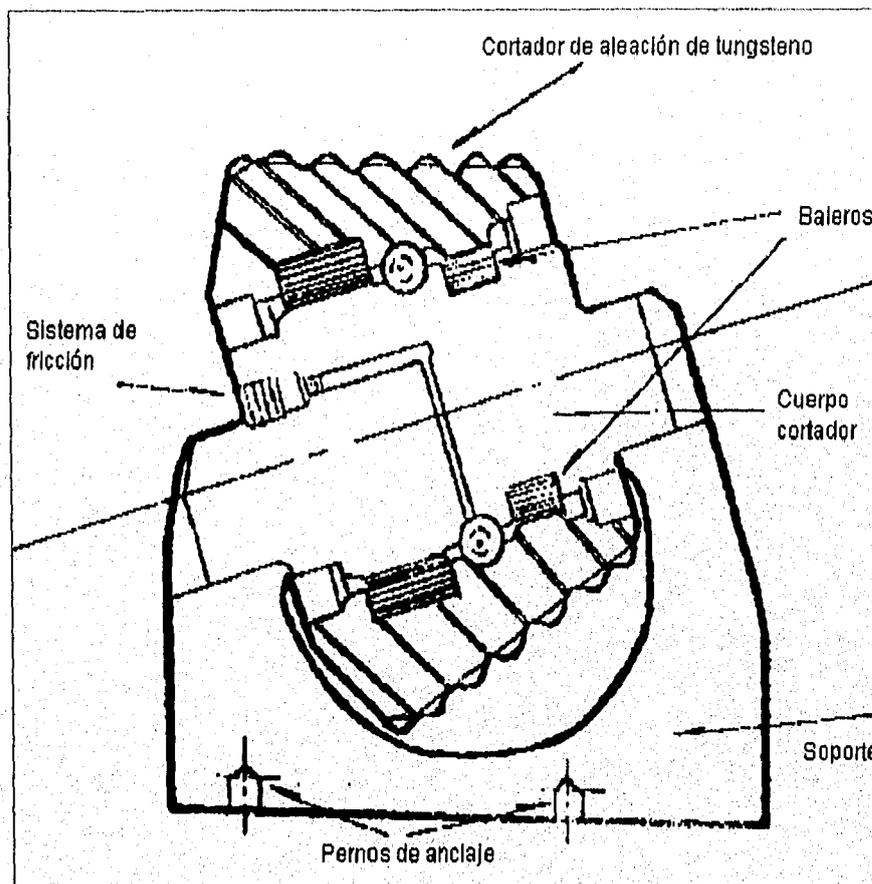


Fig. N° 17

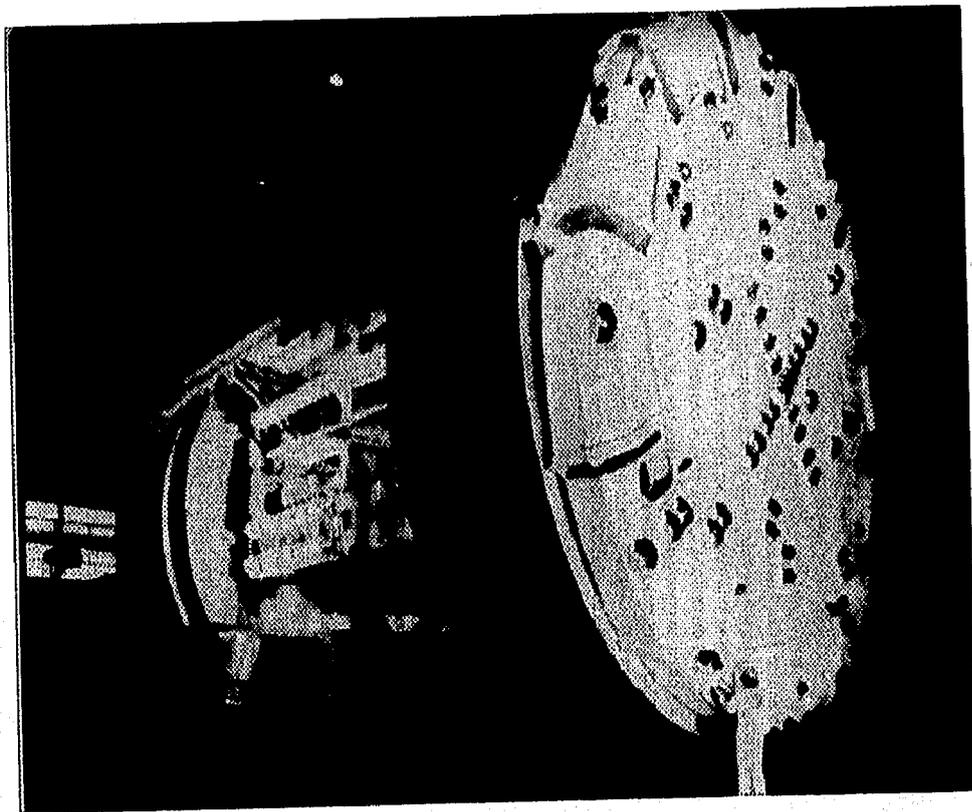


Fig. N° 17 a

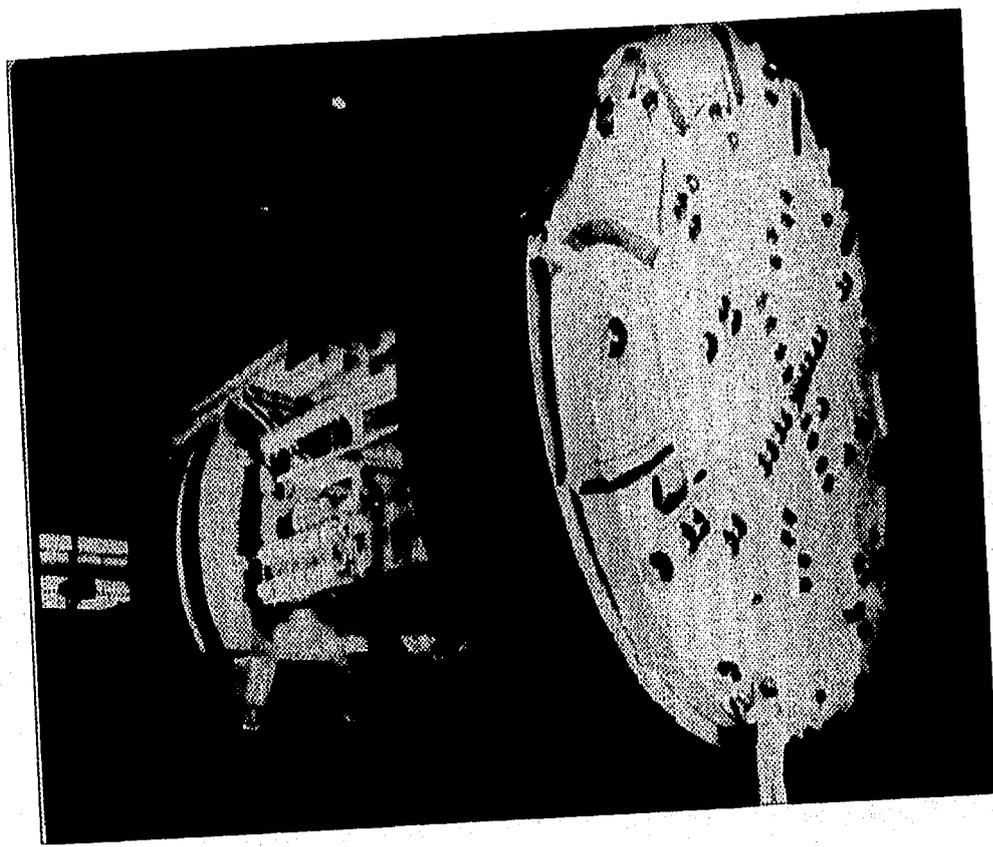


Fig. N° 17 a

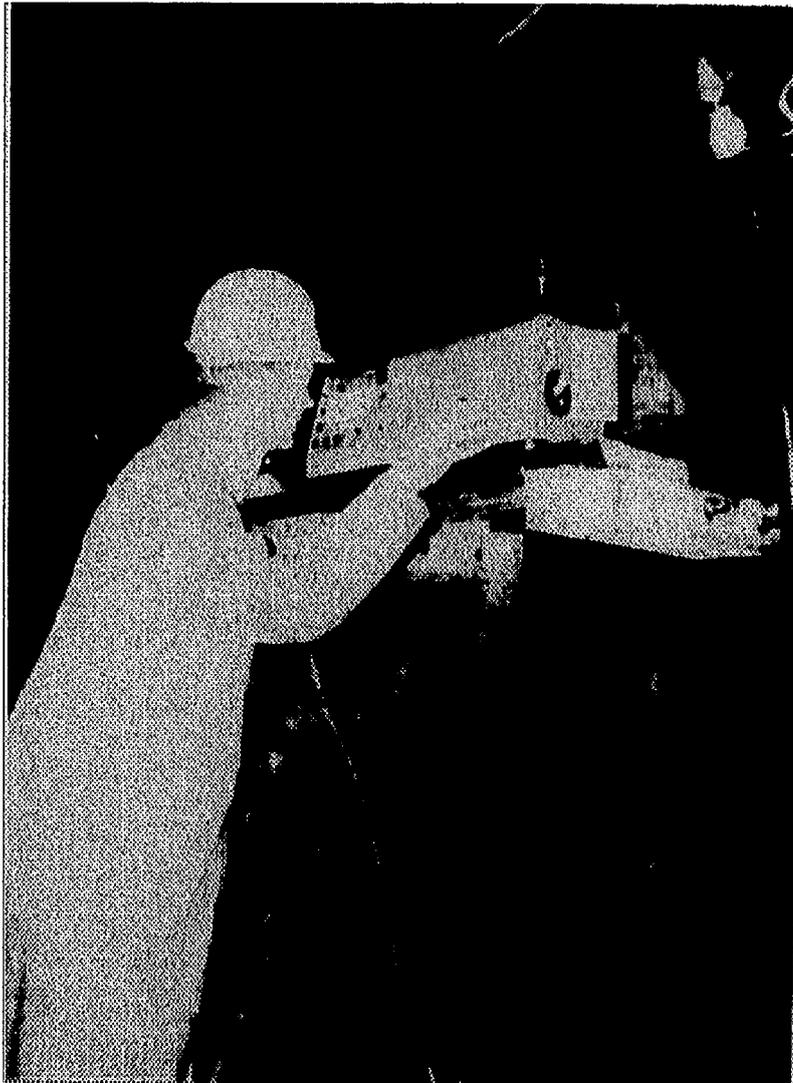


Fig. N° 19

## **II.B.2.- Trazo o Alineamiento.**

El uso del sistema láser en la construcción de túneles sirve no solo para reducir costos, sino para mejorar la exactitud, reducir pérdidas y proporcionar mayor seguridad.

El uso de un láser con tarjetas computadas elimina mucho tiempo de chequeo después de cada empuje ayudando a acelerar el ciclo. El escudo puede ser dirigido únicamente por el operador y el turno de topógrafos debe comprobar constantemente la colección del láser, tarjetas y puntos intermedios o puntos de control, sin interferir con las actividades del ciclo.

El corazón de un láser consiste en un tubo de plasma helio-neon que produce una poderosa monocromática haz de luz concentrada. El tubo está sellado de fábrica protegiéndolo así de basuras, polvo, humedad, vibración y otros problemas asociados con la obra.

La combinación más conveniente es la que proyecta la luz del láser a través del sistema óptico de un teodolito, de manera que algunas horizontales y verticales pueden girarse con precisión. La combinación del láser teodolito se monta en un soporte especialmente diseñado, fijo al revestimiento primario como se aprecia en la figura N° 19. El soporte se diseña de manera que el láser teodolito se coloque en tres dimensiones y la luz láser precisamente orientada en azimut (dirección), y deflexión (pendiente), la posición del láser teodolito y la orientación de la luz láser se calculan con equipo de procesamiento de datos y es registrado en una computadora.

La luz láser se dirige a dos tarjetas fijadas en el escudo, en la intersección de la luz láser y las tarjetas aparecen puntos rojos brillantes, conforme el escudo se mueve los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas. La posición relativa de las trayectorias marcadas por la sucesión de puntos es comparada con la trayectoria calculada, así indicando la desviación del escudo en la posición deseada.

En una sección del túnel en tangente o en línea recta la trayectoria calculada es la línea recta inclinada en la sección del túnel en curva, la trayectoria calculada se aproxima a una hipérbola. A lo largo de la trayectoria graficada, se marcan estaciones a cada ciertos intervalos para referencias.

En el techo del compartimiento del operador del escudo se montan dos tarjetas, se usan dos tarjetas en lugar de una basándose en el principio de un rifle, tiene la mira trasera y la delantera. Las tarjetas se colocan en soportes con pasadores y pueden moverse lateralmente alrededor del centro del escudo para compensar el giro del mismo.

Si por alguna razón el láser se mueve, debido a un movimiento del revestimiento, o por accidente, la luz no pasará a través de los puntos de control y el operador no verá los puntos rojos.

Un punto de control es una placa perforada que se coloca entre el láser y el escudo; la luz del rayo debe pasar en todo momento a través del orificio, se colocan normalmente tres puntos de control. Ocasionalmente la luz puede alcanzar las tarjetas debido al movimiento de los puntos de control, en cualquier caso ambos, el láser y los puntos de control deben ser revisados para corregir la adecuada posición y orientación.

### **II.B.3.- Excavación.**

Empieza el ciclo de barrenación cuando la maquina ha sido atracada contra las paredes del túnel, por medio de las ocho patas de atraque, las cuales ejercen una fuerza de 720 ton., y la cabeza cortadora esta en posición de avanzar, pudiéndose controlar las ocho patas de atraque hidráulico para nivelar la maquina.

Estando la maquina atracada y nivelada , empieza el empuje de los gatos hidráulicos hacia el frente con una fuerza de 275 ton., a la vez que la cabeza gira, haciendo girar también los 25 cortadores sobre su propio eje girando la cabeza a una velocidad de 10.75 r.p.m..

El giro en la cabeza se efectúa por medio de motores, que accionan sobre una corona ligada a la cabeza por medio de una flecha. En la mayoría de los topos, los motores se encuentran en la parte posterior, desplazándose junto con la cabeza al accionar los gatos de empuje, ya que la flecha pasa a través del cuerpo. En cada empuje el avance promedio es de 55 a 60 cm..

La cabeza se ha movido hacia adelante, haciendo el corte; las patas soportes hidráulicas también salen hacia abajo para dar apoyo a la maquina. Los soportes de atraque son retraídos para mover el cuerpo del topo hacia adelante, a la misma distancia que había avanzado la excavación; quedando el cuerpo del topo adelante, se atraca nuevamente la maquina a las paredes del túnel con sus ocho patas de soporte hidráulicos, retrándose entonces hacia arriba los soportes que estaban apoyando la maquina, iniciándose otro ciclo de barrenación.

#### **II.B.4.- Rezaga.**

El producto del corte, la rezaga, esta constituida por lajas y dependiendo del tipo de roca de un porcentaje de finos. La cabeza cortadora tiene dos canchilones que recogen la rezaga; al llegar el canchilón a la parte superior, depositan el material a una banda transportadora que lo conduce a una tolva, donde arranca otra banda transportadora de rezaga de 100 mt., de longitud, colocadas sobre una estructura metálica formada por marcos transversales unidos entre sí. La estructura esta provista de ruedas y va sobre rieles separados aproximadamente dos metros, la altura de los marcos es mas o menos la misma (2.0 mt.), de manera que las vagonetas extractoras de rezaga, que pueden ser de una capacidad de 5 a 10 mt<sup>3</sup>, se colocan en un número de 4 ó 5 dentro de la estructura y son cargadas a medida que van saliendo, siendo estas jaladas por una locomotora eléctrica, hasta la salida del túnel donde se encuentra la alcancía.

Para minimizar los problemas de rezaga, es conveniente poner una rejilla protectora que gire junto con la cabeza y que permita el paso de rocas que pueda asimilar el sistema de rezaga.

### **II.B.5.- Ventilación.**

Una pantalla aísla la cabeza giratoria del cuerpo del topo para evitar en lo posible el polvo. Existen unos aspersores alojados en la pantalla contra polvo, los cuales rocían agua con el fin de reducir la cantidad de polvo.

Generalmente es inevitable la presencia de partículas muy finas de polvo que pueden ser bastante abrasivas o contener sales corrosivas procedentes de la ruptura de las rocas o de depósitos de arena. Los cuales al estar presentes en el aire, se asientan sobre las superficies húmedas y forman así una pasta abrasiva que podría destruir las chumaceras, valeros y pernos.

Las chumaceras mecánicas, especialmente las que están cerca el frente de trabajo, necesitan una protección muy especial, se deben utilizar sellos complejos, complementados con una inyección automática continua de grasa. La superficie donde se asientan los sellos necesitan también una protección contra el desgaste natural y la corrosión, lo mismo que las superficies móviles del sistema hidráulico como son los arietes impulsados y las válvulas de control en donde se puede considerar necesario el uso de una resistente superficie cromada o aleaciones especiales.

Para evitar todo esto el polvo es extraído del frente hasta un ciclón, el cual es conectado hasta la tubería de succión que llega hasta el topo. El aire fresco es mandado a todo el frente de trabajo desde el portal de entrada.

El sistema de agua esta construido en la maquina para enfriar el aceite hidráulico y ayudar a la eliminación de polvo en el frente. La válvula de solenoide y el arrancador del motor de la bomba de agua, son operados por el control de polvo el cual a su vez es controlado desde el tablero de control del operador.

### **II.B.6.- Nivel Freático.**

El agua fluye a través de las capas del terreno que se esta perforando y esta sujeta a variaciones por lo que su estimación es imprecisa.

En la tunelización el control de aguas consiste primordialmente en dos operaciones, evitar la penetración de cantidades excesivas de agua y sacar el agua que penetra.

La primera consiste en realizar un tratamiento de impermeabilización, o sea, inyectar a presión mezclas de cemento o de productos químicos en el frente de la excavación. Las inyecciones tienen por objeto obturar las fisuras en la roca a fin de disminuir la afluencia del agua hacia el túnel o lumbrera, según sea el caso. Se realizan principalmente cuando las aportaciones de agua son de tal importancia que retrasan el ciclo de la excavación.

La segunda operación consiste en construir sumideros o cárcamos de bombeo cerca del portal de entrada o de la lumbrera y drenar o bombear horizontalmente el agua que fluye del frente hacia ellos, posteriormente el agua se bombeará hasta la superficie.

## **II.B.7.- Inyecciones.**

Al realizar un empuje queda un espacio vacío entre las dovelas y el terreno natural, el cual se llena mediante inyecciones de materiales para reducir los asentamientos en la superficie y para disminuir al mínimo las filtraciones de agua hacia el túnel.

Las inyecciones se realizan en cuatro etapas:

a) El espacio vacío se rellena con gravilla inyectada a presión, la gravilla se coloca mediante el uso de una lanzadora neumática que se conecta a una manguera, la cual se introduce en perforaciones previamente dejadas en las dovelas. El tamaño de la gravilla varía de 4 a 6 mm., y su colocación se puede hacer con el avance del escudo.

b) Se realiza un tapón en los últimos tres anillos de los tramos a tratar, se inyecta un mortero de fraguado rápido cuya finalidad es evitar que la lechada de las etapas siguientes se prolonguen a la zona del escudo.

c) La inyección que sigue es menos densa que la anterior, consiste en un mortero más fluido y sin acelerante que se usa para llenar los vacíos dejados por la gravilla.

d) Por último se inyecta una mezcla fluida, formada de agua cemento y bentonita, cuya función principal es la de sello e impermeabilización.

### **II.B.8.- Ventajas de la Excavación con Topo.**

Superando las limitaciones en cuanto a la longitud del túnel que restringen el uso económico del topo. Habiendo pasado esta etapa las ventajas que se pueden obtener son varias.

- a) Avance más rápido de los túneles.
- b) Perforación redonda, lisa y libre de irregularidades.
- c) Poca sobreexcitación; esta representa un promedio de alrededor del 5%, en comparación con el 20% que se obtiene en el método de barrenación y voladura.
- d) Ahorro de concreto para el revestimiento.
- e) Requiere menos soporte, se tienen menos caídas de roca.
- f) Adaptable al sistema de operación del tipo continuo, para mejoramiento continuo.
- g) Es menos peligroso, porque se reduce la exposición del personal a las operaciones de excavación y a la roca sin soporte; no se requieren explosivos.
- h) Se logra una operación uniforme que ocasiona molestias pequeñas o nulas a las instalaciones de superficie o a otras instalaciones cercanas.

### **Capitulo III.- Ademes utilizados en la excavación de túneles en roca.**

El ademe es la operación que consiste en evitar al máximo la descompresión que sufre el terreno en las proximidades de la excavación. Esta descompresión interna se acompaña de los efectos de una dilatación y de una caída de las paredes del medio, a un punto tal que en un terreno descompresionado la estabilidad del conjunto solo puede ser asegurado por medio de un sistema de ademado que asegure la sustentación y por lo tanto la seguridad de la obra.

Las características que debe cumplir un soporte son:

- El soporte debe ser compatible con los métodos de excavación.
- Mantener el túnel abierto y estable a fin de permitir el desarrollo de las actividades correspondientes a su construcción y funcionamiento.
- El diseño debe ser tal que se obtenga la mayor ventaja de su resistencia, por ello el soporte debe ser simultáneamente tan flexible que permita a los bloques de la masa rocosa un desplazamiento tal que induzca el arqueo, y tan resistente que soporte toda la carga que la roca transmita, pero sin rebasar su límite de fluencia.

En base a las cargas y los tipos de fallas existentes en el macizo rocoso el cual atravesará el túnel se tienen los siguientes tipos de ademes; primario y permanente.

#### **Ademe Primario.**

El túnel en roca firme puede quedar sin revestir, pero, en muchos tipos de terrenos demasiados frágiles es necesario el ademado. La función del ademe primario es la estabilidad de las paredes del túnel durante la excavación.

Los soportes primarios generalmente consisten en marcos metálicos que se quitan antes de colocar el revestimiento definitivo.

#### **Ademe Permanente**

Es aquel en el cual se da el acabado definitivo y protección final a la excavación. Los soportes primarios generalmente se dejan en su lugar y se ahogan en concreto.

### **III.A.- Ademe con Armaduras.**

Dependiendo de las características de la roca y del tamaño del túnel a excavar, se puede decidir si el ademe se deberá proporcionar con marcos metálicos o de madera.

En todo caso es conveniente realizar un estudio económico para elegir el tipo de ademe, pero se puede adelantar que en excavaciones de gran sección transversal el ademe metálico será el más económico ver figura 20.

Las ventajas del ademe metálico son:

- a) Mayor ligereza y rapidez en la colocación.
- b) Menor sección de excavación.
- c) Menor volumen de concreto.
- d) Suplen al acero de refuerzo en el revestimiento definitivo.
- e) Ocupan menor espacio en el túnel.

Aunque en túneles de gran sección transversal se pueden utilizar ademes de madera, es recomendable utilizar marcos metálicos debido a la facilidad de colocación y amplio espacio libre que deja, ya que el de madera es necesario colocarlo formando una estructura muy elaborada que incrementa la posibilidad de falla. Sin embargo, en secciones pequeñas se emplean marcos de madera.

Entre el momento de la voladura y el de colocación del ademe pueden fácilmente transcurrir dos o más horas por lo que es necesario definir el tiempo máximo que puede permanecer el túnel sin ademar.

En túneles largos donde el procedimiento de excavación puede variar desde sección completa hasta túnel piloto dependiendo de las características geológicas, es conveniente que los marcos estén formados por varias partes de tal forma que se incremente su versatilidad. Los segmentos de los marcos se ligan entre sí con tornillos o con soldadura.

Al colocar el marco es necesario acuarlo con madera contra el terreno, con el objeto de lograr que las cargas de la roca se transmitan como concentraciones en la estructura de soporte, como se ve en la figura N° 21.

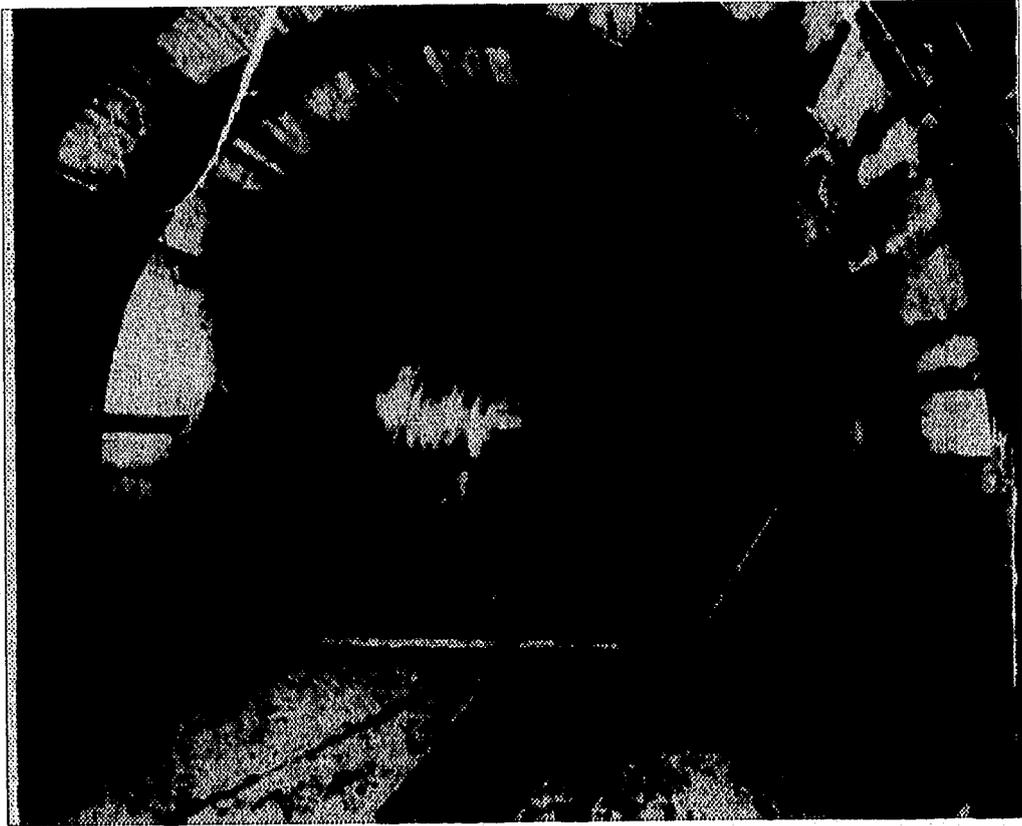


Fig. N° 20

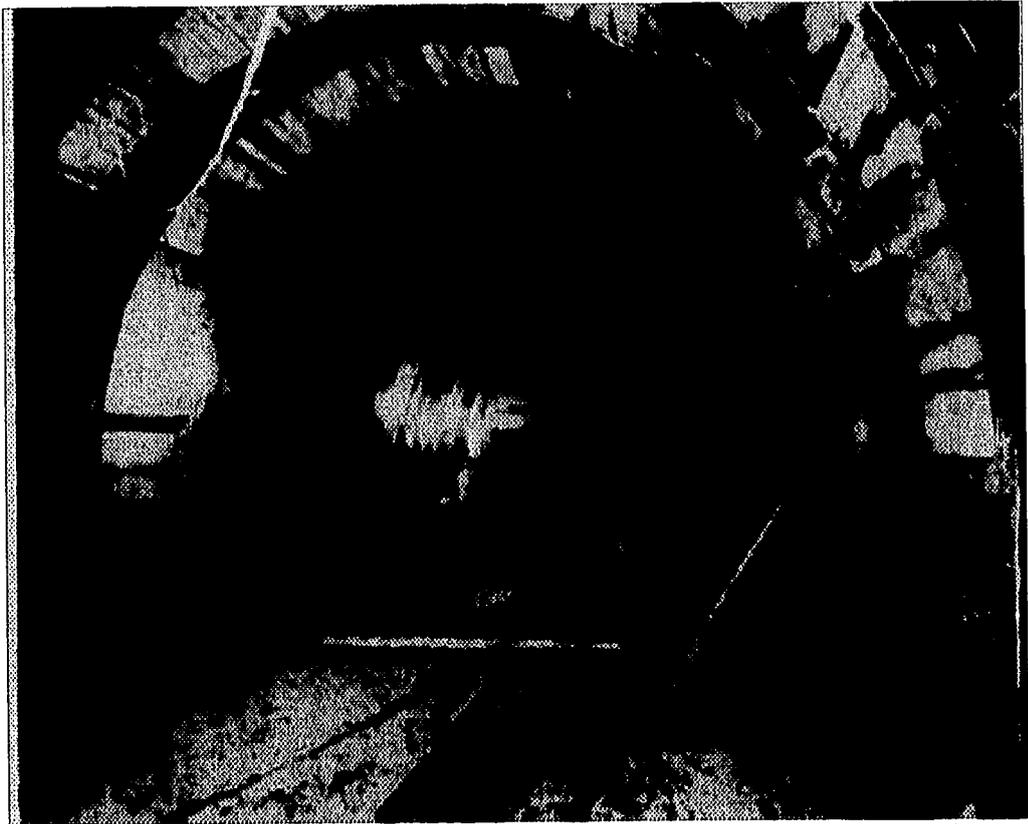


Fig. № 20

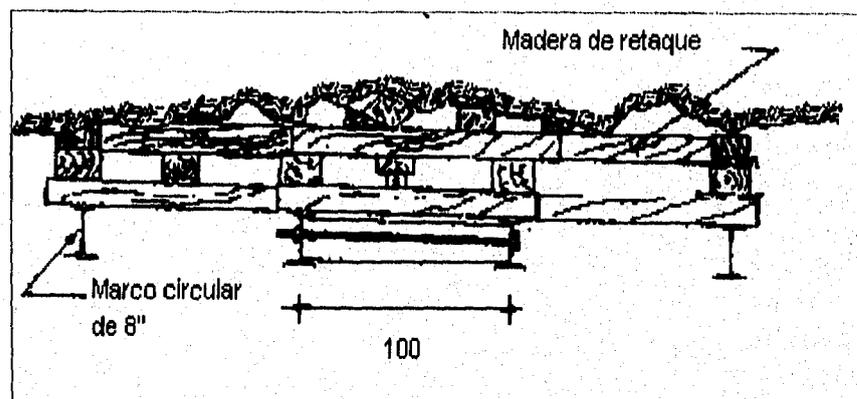


Fig. N° 21

### **III.B.- Ademe con Concreto Lanzado.**

En las excavaciones subterráneas se utiliza cada vez mas el mortero y el concreto por aplicación neumática (conocido como gunito o concreto lanzado).El concreto lanzado es una técnica que de soporte del terreno que en combinación con métodos como la colocación de anclas en la roca, las costillas arqueadas de acero y el refuerzo con malla. Representa un papel importante en el llamado New Austriam Tunnelling Method ( Nuevo Método Austríaco para la Excavación de Túneles), que tiene por principio básico determinar y controlar el desarrollo de los esfuerzos y deflexiones, y su interacción con el soporte y el revestimiento para establecer dentro de la roca circundante un anillo resistente a la carga.

La calidad del concreto lanzado depende de los materiales empleados, de la mezcla y de la manera preponderante del método de colocación. De particular importancia para el producto terminado es la habilidad del operados de la boquilla para preparar la superficie, controlar el ritmo y espesor de proyección y, en el caso del proceso seco, para determinar la relación agua cemento.

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 lo suficientemente delgada para que sea flexible y se ajuste a las deformaciones sin presentar agrietamiento. Se ha considerado con objeto de lograr una resistencia adicional a la flexión, el concreto lanzado lleve incorporadas en el fibras de acero o fibras de vidrio resistentes a los álcalis.

### III.B.1.- Características del Concreto Lanzado

A continuación se mencionan las características de cada uno de los materiales necesarios para fabricar un concreto lanzado.

#### Cemento.

El cemento portland debe cumplir los requisitos de calidad respectivos. Si el concreto lanzado está expuesto a suelo o aguas freáticas que contengan elevadas concentraciones de sulfatos disueltos, deberán usarse cementos resistentes a los sulfatos. Cuando las exigencias requieran alta resistencia rápida, se preferirá el empleo de un cemento portland de endurecimiento rápido.

Así mismo se puede hacer uso del cemento alto en alumina el cual proporciona una resistencia alta a los ácidos. Sin embargo, su uso puede requerir ciertas precauciones, debido a su alto calor prematuro de hidratación. Esto incluye una limitación al tamaño de la revoltura, limpieza frecuente del lanzador y de los tubos.

#### Agregados.

La arena para el concreto lanzado deberá especificarse un grado zona 2 de "15 mm., a fino", pero pueden usarse arenas más gruesas, las curvas granulométricas se pueden comparar en la fig. N° 22 y 23. Pueden usarse arenas que no cumplan con la granulometría anterior, si las pruebas preliminares demuestran que proporcionan buenos resultados.

Así mismo la arena empleada para acabados, recubrimientos rápidos y ciertos usos especiales puede ser más fina que la de esa granulometría. Sin embargo debe tenerse en cuenta que las arenas más finas generalmente originan una contracción mayor por secado, y las arenas más gruesas dan más rebote. Para secciones de varios centímetros de espesor, puede ser ventajosa la incorporación de agregado más grueso en la mezcla, para dicho efecto deberán rechazarse los sobretamaños o los de forma alargada cribándolos, ya que es posible que ocasionen taponamientos en la manguera.

La humedad de los agregados nunca debe exceder del 5%, para evitar el taponamiento de las mangueras y del chiflón. Los agregados húmedos evitan la formación de polvo tanto en la lanzadora como en el chiflón y realmente mejoran la hidratación en el chiflón.

En el procedimiento de mezcla húmeda, los agregados deben contener entre el 40 y el 60% del agua requerida para la mezcla final, por lo que esta debe usarse tan pronto como sea posible y antes de 1 ½ a 2 horas después de mezclada. Esto puede ser una desventaja cuando se tienen acarreos grandes. El contenido de humedad de los agregados es de tal importancia que obliga a tener tolvas de almacenamiento cubiertas y protegidas contra las variaciones del clima. Las tolvas de almacenamiento deben ser dobles y deben usarse cíclicamente para permitir que se establezca la humedad de los agregados frescos.

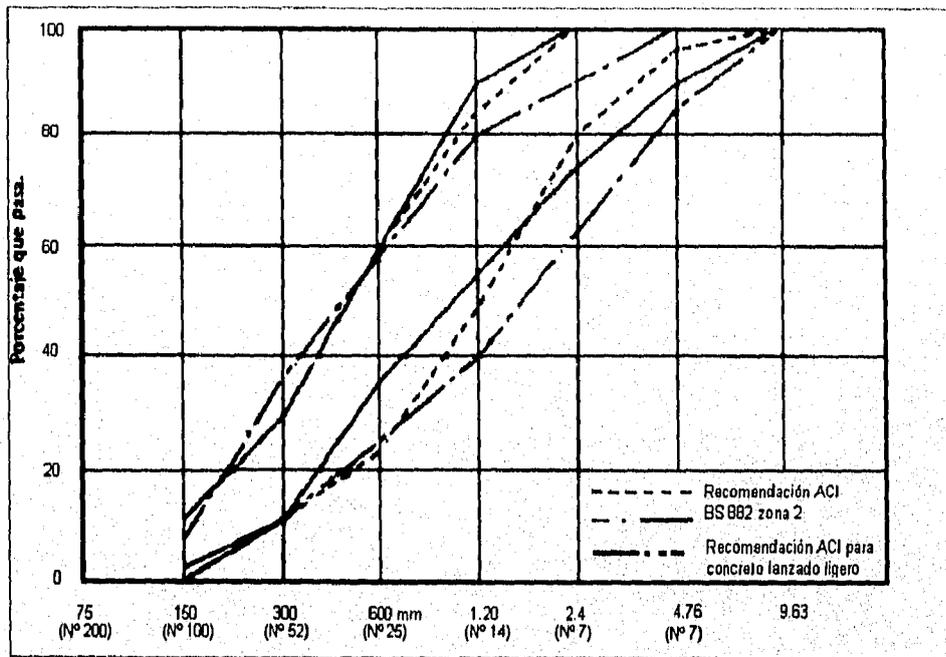


Fig. Nº 22

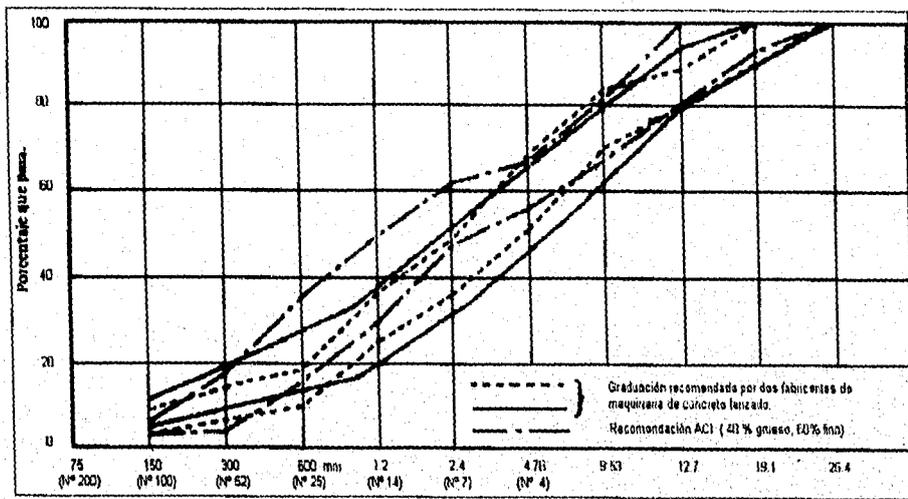


Fig. N° 23

#### Agua.

El agua para el mezclado y curado deberá ser limpia y químicamente aceptable. Así mismo el agua para curado también deberá estar libre de sustancias que puedan ser dañinas al concreto o al acero, esta debe ser suministrada a una presión constante de 4 kg/cm<sup>2</sup> (60 psi.).

En el procedimiento de mezcla seca el agua se agrega en el chiflón y es controlada por el operador, no debe aplicarse concreto lanzado cuando la temperatura ambiental sea menor a 1° C.

#### Aditivos.

Puede ser deseable incluir aditivos en el concreto lanzado para usos y condiciones de colocación especiales. Empleando con cuidado los aditivos pueden obtenerse resultados muy satisfactorios, pero algunos aditivos que han sido satisfactorios en el concreto normal, pueden no ser útiles en el concreto lanzado.

El acelerante en polvo, por lo general se agrega a la mezcla en la tolva de la lanzadora y debe tenerse cuidado en su correcta distribución utilizando un espaciador. Una desigual distribución del acelerante puede ocasionar que queden zonas débiles en el revestimiento y que se produzcan taponamientos en el lanzador. Los acelerantes líquidos son más costosos y por lo tanto se utilizan menos, estos son adicionados en el chiflón mediante una línea por separado, a la presión debida. También se puede agregar a la mezcla en la tolva de la lanzadora en cantidades reguladas. La mayoría de los aditivos utilizados son muy cáusticos por lo que su manejo debe hacerse con cuidado.

### **III.B.2.- Pruebas Practicadas al Concreto Lanzado.**

#### **Análisis del concreto lanzado fresco.**

Los diversos métodos empleados para analizar el concreto lanzado fresco, no son muy diferentes de aquellos que se usan para analizar el concreto normal fresco, el contenido aproximado de cemento, de una muestra, deberá encontrarse lavándola completamente a través de un juego de cribas y tomando la parte que pase la criba N° 200 (75 mm), como el contenido total de cemento.

#### **Pruebas del concreto lanzado endurecido.**

El concreto lanzado presenta ciertos problemas cuando se requieren pruebas del control de calidad. Algunas de las pruebas normales para el concreto endurecido son aplicables al concreto lanzado, ya que es imposible lanzar concreto a moldes para elaborar pruebas cilíndricas o cúbicas normales. La comprobación de los valores de resistencia a la compresión se obtienen solamente sobre la ruptura de corazones cortados ya sea del concreto lanzado al elemento de trabajo, o de muestras representativas. El corte de corazones en elementos de trabajo en general no es deseable, debiendo aumentarse el uso de tableros de prueba colocados a lo largo del área de trabajo, estos tableros se hacen generalmente de madera chapada de 20 mm., de espesor y se les colocan divisiones de malla ligera para formar unas canastillas de planta cuadrada, las que deberán ser cuando menos de 600 mm., por lado

#### **Resistencia.**

La resistencia a la ruptura por compresión de concreto lanzado frecuentemente excede a 70 N/mm<sup>2</sup>, y los esfuerzos a la tensión alcanzan hasta 4 N/mm<sup>2</sup>.

En general estos valores tan elevados se deben al alto grado de compactación alcanzado, al alto contenido de cemento y a la baja relación agua-cemento. Sin embargo, las variaciones son frecuentemente grandes y para el uso de pequeñas muestras tiende a exagerar la resistencia aparente. El diámetro recomendado para corazones de concreto lanzado con un espesor de hasta 100 mm., es de 50 a 90 mm., para espesores mayores, los que se usan en recubrimientos de túneles, paredes de tanques de almacenamiento etc.

Los corazones se prueban si es necesario a la compresión, después de haberlos cabeceado. Para determinar la resistencia del corazón a la tensión indirecta, se utiliza la prueba brasileña, de tenso compresión haciendo una correlación con su resistencia a la compresión.

Generalmente es imposible obtener muestras de concreto lanzado para su prueba que tengan mas de 75 mm., de altura, por lo que se aceptan varios factores de correlación, para la relación 1/d y para el material empleado en su cabeceado. Con estos factores de correlación aplicados a la resistencia de ruptura obtenidas en el corazón se obtendrán las resistencias equivalentes a un corazón de relación de esbeltez normal.

#### **Adherencia.**

La prueba de adherencia es peculiar para el concreto lanzado y no se incluye en ninguna norma británica. Puede especificarse cuando la adherencia del concreto lanzado a la base es de primordial importancia, como el revestimientos de túneles, capas resistentes a la abrasión, reparación de muros marítimos etc., esta prueba aparece ejemplificada en la figura N° 24.

#### **Absorción.**

El agua absorbida por una muestra de concreto lanzado por inmersión simple, no debe exceder del 10 %, siendo normal del 6 al 7 %.

#### **Permeabilidad.**

En la mayoría de las pruebas de permeabilidad, se aplican presiones elevadas de agua por un lado de la muestra y se determina el grado de permeabilidad, el concreto lanzado es muy impermeable, en la figura N° 25 aparece esquematizada la prueba..

#### **Resistencia a los Ácidos.**

La resistencia al ataque de los ácidos, se determina por inmersión de diversas muestras en varias concentraciones de ácidos por determinado tiempo. En general el concreto lanzado, tiene una resistencia superior a la del concreto normal, debido a su grado de compactación y a su alto contenido de cemento resistente a los sulfatos, aumentando aún más esta resistencia.

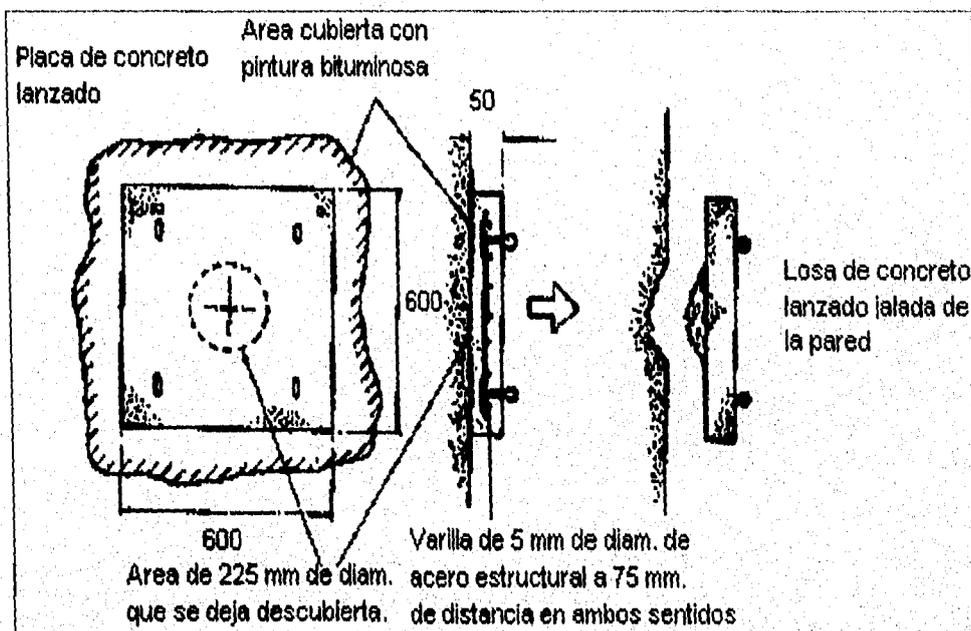


Fig. N° 24

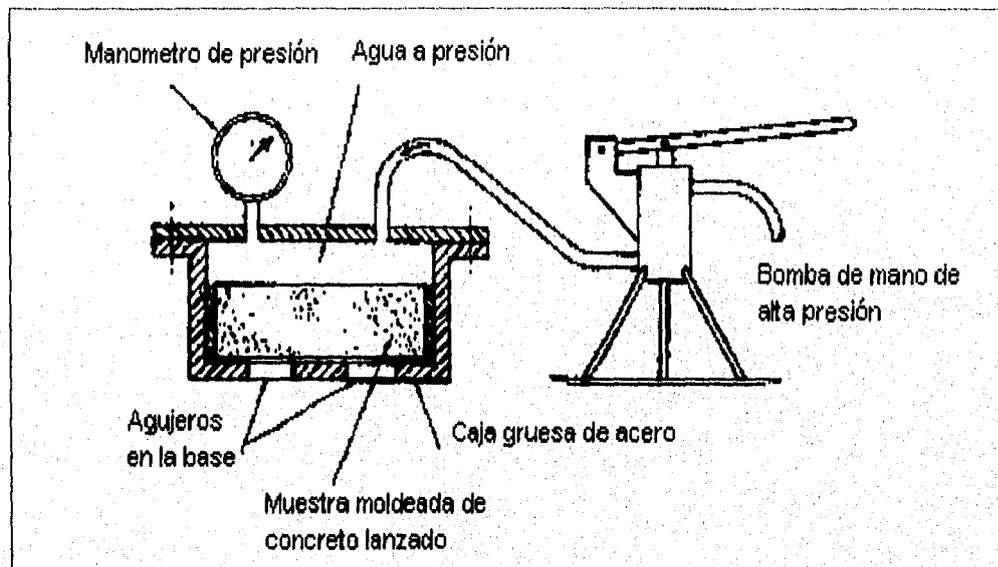


Fig. N° 25

### **III.B.3.- Tipos de concreto lanzado**

Existen dos tipos de concreto lanzado; el de la mezcla húmeda y el de la mezcla seca.

#### **Procedimiento de la Mezcla Seca.**

Este es el más apropiado para el concreto lanzado de agregado grueso, consiste en una revoltura de agregado seco y cemento que es depositado en una maquina lanzadora, de la cual se envía en un chorro de aire a presión a través de una manguera y es proyectada neumáticamente a alta velocidad sobre la superficie por recubrir. El agua de hidratación se añade en la boquilla inmediatamente antes de la expulsión. La cantidad de agua la regula el operador, los aditivos en polvo se añades en la mezcla seca, cuando esta se alimenta a la maquina lanzadora, si se usan aditivos líquidos, estos se mezclan con el agua de hidratación, antes de llegar a la boquilla de expulsión.

Pasos a seguir para prepara la mezcla:

- a) Los materiales (Cemento y agregados), se mezclan en una mezcladora o en un gusano.
- b) La mezcla obtenida se introduce en un alimentador mecánico especial.
- c) Posteriormente pasa a la tubería o manguera alimentadora por una rueda de alimentación o distribuidor.
- d) La mezcla es transportada por aire comprimido a través de la manguera hasta una boquilla de salida, dicha manguera tiene en el interior un tubo múltiple perforado por el que circula el agua a presión que ha de mezclarse con el material expulsado.
- e) La mezcla (agua-agregado-cemento), es lanzada por la boquilla a una velocidad considerable sobre la superficie por recubrir.

#### **Procedimiento de la Mezcla Húmeda.**

En este procedimiento se mezclan todos los materiales, incluyendo el agua, antes de que entren en la tubería. Tiene la ventaja de llevar un control rígido de la relación agua-cemento de la revoltura, pero la única condicionante es que el agregado del concreto no debe ser mayor de 3/8". Es recomendable este método, para emplearse en los accesos de pequeñas dimensiones.

**Mecánica a seguir para elaborar la mezcla húmeda.**

**a) Se introducen las cantidades de agregados, cemento y agua previamente medidos, que se revuelven en una mezcladora convencional.**

**b) Se introduce la mezcla resultante en la cámara del equipo alimentador.**

**c) De ahí se conduce neumáticamente a través de una manguera ala boquilla.**

**d) En la boquilla se inyecta aire adicional para incrementar la velocidad y mejorar la trayectoria del chorro.**

#### **II.B.4.- Aplicación del concreto Lanzado**

La preparación de la superficie que recibirá el concreto lanzado es una parte muy importante de la operación. Un amacise efectivo es importante para la seguridad del personal y también para reducir el riesgo de concreto lanzado "falso" producido al rociarlo sobre rocas sueltas. Evidentemente si la roca es muy mala puede ser que el amacise sea imposible, por lo tanto el concreto lanzado tendrá que aplicarse sobre la roca inmediatamente después de su exposición para obtener un refuerzo. En tal caso una segunda aplicación de concreto lanzado con una malla de refuerzo puede ser necesaria para complementar el tratamiento de la superficie.

Si se pretende tener una ligazón adecuada, la superficie sobre la que se va a lanzar el concreto debe estar libre de cualquier material extraño o suelto. El polvo de las voladuras y el relleno de las fisuras tendrán que lavarse de las superficies y esto se logra fácilmente con el chorro de una mezcla de aire con agua o chorros de arena, ambos sistemas se pueden aplicar con la máquina para lanzar el concreto a condición de cambiar la boquilla.

Una vez limpia la superficie la operación podrá dar comienzo. El operador de la boquilla elige la presión de aire y el operador de la máquina ajusta el flujo del material para adaptarse a esa presión de aire. Una alimentación insuficiente producirá brotes del material en vez de un flujo continuo y una alimentación exagerada provocará atascamientos en la máquina.

La distancia óptima entre la boquilla y la superficie sobre la cual se está lanzando es aproximadamente de un metro, el porcentaje de rebote está notablemente reducido a esta distancia, el rebote también está sujeto al ángulo de la boquilla con respecto a la horizontal.

Cuando se lance concreto sobre malla soldada, habrá de tener cuidado de no dejar huecos atrás de los alambres individuales, uno de los métodos que se usan para solucionar este problema es acercar la boquilla a la superficie o cuando se utilizan máquinas robot es la de variar el ángulo de proyección con respecto a la superficie.

#### **Ventajas del concreto lanzado.**

- a) El concreto lanzado es forzado a entrar en las fracturas abiertas, fisuras, grietas e irregularidades en la superficie de la roca, y de esta forma tiene la misma función de liga que un mortero en un muro de piedra.
- b) El concreto lanzado impide el drenaje del agua contenida en las fracturas y también impide la tubificación del material que rellena las fracturas e impide la intemperización de la roca.
- c) El concreto lanzado provee una considerable resistencia a la caída o aflojamiento de bloques del techo del túnel, siempre que se realice inmediatamente después de la excavación.
- d) Un espesor de concreto lanzado comprendido entre 15 y 25 cm., proporciona un soporte estructural semejante a un anillo o a un arco.

## **Equipo empleado para la colocación del concreto lanzado**

El equipo empleado para su colocación esta compuesto por los siguientes elementos:

### **a) compresor:**

Todo el sistema comprende de un sistema de aire comprimido. No solamente debe suministrar el compresor un volumen suficiente de aire a la presión correcta, sino que esta presión no debe tener fluctuaciones. El aire suministrado debe estar seco y libre de aceite. El aire húmedo puede ocasionar que el vapor de agua se condense dentro de la lanzadora, tapándola, al adherirse gradualmente capas de cemento.

Normalmente se requiere que la lanzadora proporcione una capacidad del compresor no menor de 7,000 lts./min., para la aplicación de concreto lanzado en estructuras, se necesita un compresor con una capacidad de 10,000 a 17,000 lts./min., dependiendo del tipo de lanzadora.

Las presiones de funcionamiento están relacionadas con la longitud de la manguera y la altura de la boquilla arriba de la lanzadora. Deben incrementarse en aproximadamente 2.2 KN/ m<sup>2</sup>, por metro de longitud de la manguera y por 4.5 KN/m<sup>2</sup>, por metro de altura arriba de la lanzadora. La altura máxima a la cual puede entregarse con seguridad en concreto lanzado es de unos 100 m. arriba de la lanzadora.

### **Suministro de agua**

El agua llega a una válvula instalada en la boquilla a través de una línea ligera flexible, de alta presión. Siempre que sea posible, esta línea se conectara directamente a la alimentación principal, siempre que esta alimentación tenga una presión no menor de 400 KN/m<sup>2</sup>. Cuando tenga que proveerse presión adicional, se llevara acabo usando ya sea una bomba accionada por motor (de aire eléctrico o de petróleo), alimentada del abastecimiento y que normalmente descarga a un tanque de presión para romper los impulsos, usando tanques fijos de aire presurizado.

### **Mangueras**

Todas las mangueras deberán ser de alta presión, las mangueras para material podrán ser: anti-estáticas o conductoras y conectadas a tierra, la formación electrostática en la boquilla puede ser desagradable y aun peligrosa.

Un punto que debe observarse estrechamente es la concordancia de la manguera de alimentación y de los coples; si un motor tiene una entrada de 25 mm de diámetro, no es aconsejable conectarlo a un compresor con una línea o manguera de 12 o 20 mm. de diámetro. La línea de alimentación que es muy pequeña dará como resultado un control inadecuado de la lanzadora, o en caso de ser posible el control, promoverá la congelación de las válvulas y las aspas del motor; deberán evitarse las expansiones adiabáticas a través de los coples, válvulas y accesorios. Las mangueras o conexiones de mayor diámetro de las líneas no ofrecen problemas en este aspecto, pero son estorbosas e incómodas.

### **La lanzadora**

La lanzadora deberá escogerse de acuerdo con el tipo y cantidad de concreto lanzado que se necesite. Su rendimiento debe ser de manera que suministre a la boquilla una corriente regular, uniforme, vigorosa y sin pulsaciones. Los agregados de 20 y aún 25 mm., usados para las secciones gruesas de lanzamiento, pueden acomodarse solamente en las maquinas grandes. Estas máquinas también pueden ser usadas como una alternativa de una bomba convencional de concreto, en cuyo caso se usa una boquilla en forma de zapato o de tolva receptora.

### **Boquilla**

El funcionamiento de la boquilla es convertir la corriente entrante de material mezclado en seco, en mortero humedecido que transite a suficiente velocidad para ser dirigido con exactitud a un punto específico, a cierta distancia, en donde producirá un impacto sobre la superficie y se quedará ahí pegado. El mezclado íntimo del agua y del material en la boquilla se conoce como hidratación, entendiéndose por hidratación, a la combinación química de cemento y agua.

Las boquillas varían mucho en su diseño y no deberán intercambiarse entre uno y otro tipo de máquinas. Todas retienen sus dispositivos básicos para suministrar un flujo variable, agua orientada radialmente, los que pueden ser un anillo perforado de bronce, hule o acero, o una roldana ranurada, una roldana de hoja de expansión etc. Un buen dispositivo envolverá la mezcla en un chorro de agua debiendo estar diseñado de tal manera que el lanzador pueda regular fácil y rápidamente el flujo del agua.

La punta de la boquilla está generalmente hecha o recubierta de hule para lograr uniformidad en los resultados facilidad de limpieza y prevención al desgaste. Un chorro de concreto lanzado desgastaría un espesor de 3mm., de punta de boquilla de acero en un día, mientras que una punta de hule durará por espacio de una semana o mas.

#### **II.B.5.- Fallas que se puedan presentar en la estructura roca concreto lanzado.**

1) Falla progresiva en la roca soportada con concreto lanzado.

En la figura N° 26, vamos a considerar que la sección este en equilibrio por un tiempo suficientemente largo después de la excavación, a fin de que el concreto lanzado ya colocado obtenga su resistencia, es necesario que las fuerzas cortantes a lo largo a las caras del bloque A, sean de tal magnitud que lo soportan por algunas horas; luego se supone que un movimiento de traslación y rotación, ocurre para reducir estas fuerzas cortantes a cero.

Por lo tanto, la resistencia al esfuerzo cortante del concreto lanzado alrededor de la periferia de la base del bloque, necesario para mantenerlo en equilibrio se puede calcular. Recíprocamente si la resistencia del esfuerzo cortante del concreto lanzado es conocido, se puede calcular un factor de seguridad contra una caída del bloque A, y detener así un falla progresiva.

1) Falla progresiva en la roca soportada con concreto lanzado.

En la figura N° 26, vamos a considerar que la sección este en equilibrio por un tiempo suficientemente largo después de la excavación, a fin de que el concreto lanzado ya colocado obtenga su resistencia, es necesario que las fuerzas cortantes a lo largo a las caras del bloque A, sean de tal magnitud que lo soportan por algunas horas; luego se supone que un movimiento de traslación y rotación, ocurre para reducir estas fuerzas cortantes a cero.

Por lo tanto, la resistencia al esfuerzo cortante del concreto lanzado alrededor de la periferia de la base del bloque, necesario para mantenerlo en equilibrio se puede calcular. Recíprocamente si la resistencia del esfuerzo cortante del concreto lanzado es conocido, se puede calcular un factor de seguridad contra una caída del bloque A, y detener así un falla progresiva.

### **III.C.- Anclajes.**

Se trata de un sistema para reforzar y soportar las rocas que rodean la excavación, por medio de pernos anclados profundamente en la roca y esforzados para someterlos a compresión desde del frente. El termino también se utiliza para identificar barra no tensionadas, con inyecciones de selladores como refuerzo.

No existe un método de diseño que sea aceptado por todos, en lugar de ello, se determinan los mecanismos de falla de la roca y se calcula el número y capacidad de las anclas para evitarlo. El principio general del anclaje de las rocas es hacer que esta forme parte de la estructura de soporte, es decir, que se auto soporte a excepción de cuando las anclas soportan fragmentos sueltos de la roca.

Para que esto suceda, efectivamente las anclas deberán de colocarse inmediatamente después de abrir la excavación. La función principal del anclaje de la roca es de mantener la integridad de la roca sometida a esfuerzos, a modo que actúen de una manera más efectiva como un arco o viga tendidos a través de la excavación; o para fijar cualquier roca suelta o estrato delgado de la superficie de la cavidad, anclándolos profundamente. La relativa importancia de dichos aspectos, dependerá de las circunstancias del túnel.

El objeto del anclaje de las rocas en el caso de aberturas circulares o en arcos, es la de crear una zona de compresión radial en la roca y reforzar superficie la de rocas altamente esforzadas al rededor de la cavidad. Cuando se trate del techo de un frente rectangular, los pernos de anclaje deberán de unir entre si las capas de roca para formar una viga fija más fuerte que la suma de las capas individuales y para sostener los estratos más debiles desde una zona superior más resistente.

Se puede considerar, que las anclas soportan la roca de las excavaciones subterráneas mediante cuatro mecanismos distintos:

#### **A) Por suspensión.**

Es el caso en que se colocan anclas para asegurar fragmentos de roca que pueden caer hacia la excavación.

#### **B) Formando vigas.**

Este proceso, se presenta principalmente en las excavaciones en rocas estratificadas, las anclas unen entre si a varios estratos que tienen pequeña o nula adherencia entre ellos, formando así un viga capaz de auto soportarse y de soportar la roca que yace sobre ellas.

C) Reforzando excavaciones que se autoportan en la zonas donde se presentan concentraciones de esfuerzos, ya sean de compresión, tensión o corte.

Estos esfuerzos, pueden ser causados por la geometría de la excavación o por los métodos de construcción y se determinan mediante el uso de las teorías de elasticidad y de plasticidad si son aplicables.

D) Reforzando zonas sujetas a grandes esfuerzos cortante y de compresión.

Estos casos se presentan en lumbreras, excavaciones muy inclinadas para túneles de presión de centrales hidroeléctricas, fallas o zonas de cortante, etc. Estas anclas tendrán esfuerzos de cortante muy importantes.

## II.C.I.- Grupos de Anclas.

Las anclas se pueden dividir en cuatro grupos:

El primer grupo lo comprenden las varillas de madera, las cuales se idearon para evitar dañar la maquinaria de corte del carbón y las bandas transportadoras; también se usaron en tiempo de escasez de acero durante la guerra, estas varillas sin tensar solo sirven para refuerzo muy ligero. Se emplean muy poco en la actualidad.

El segundo grupo abarca las varillas de acero, ancladas o inyectadas sin tensar: incluye los "perforbolts", pernos worley, juegos de cuñas y varillas inyectadas; se utilizan en circunstancias que permiten la instalación muy pronta de los refuerzos. Estas varillas solo pueden aceptar cargas cuando se tensan por la deformación de la roca circundante, pero si las varillas se colocan con demasiado retraso a gran distancia del frente, buena parte de la deformación a corto plazo de la roca se habrá efectuado ya y las varillas no surtirán efecto.

En el tercer grupo las anclas mecánicamente fijadas y tensadas son las que se analizan: estas se utilizan con inyección subsecuente. Las anclas de ranura y cuña son efectivas solo en roca muy buena y han sido reemplazadas con frecuencia por las anclas con casquillo expansivo, de las que existen muchas variedades. En formaciones de roca de buena calidad se logran tensar las anclas hasta alcanzar casi la resistencia a la ductilidad del perno pero en roca de menor calidad de trituración local en la punta del ancla permitirá que esta se zafe.

El cuarto grupo comprende a las anclas tensadas e inyectadas: se inventaron para lograr mejores anclajes en terreno malo y mayor protección anticorrosiva para las anclas de acero, tal vez sea el sistema de anclaje predominante en el futuro. El sistema mas sofisticado es el de los cartuchos de resina en dos etapas, con el que se logra tensar el ancla a toda capacidad en una sola operación rápida y sencilla. A pesar de alto costo de la resina, el costo total del sistema instalado se puede comparar ventajosamente con otros sistemas de anclaje por el factor reducido de mano de obra.

## **II.C.2.- Pernos de Anclaje.**

Los pernos de anclaje, son por lo común barras de acero semiduro de tensión media, hasta de 30 mm., de diámetro, con un extremo roscado para tuercas y arandelas; y el otro adaptado al tipo de anclaje que se haya escogido. Las arandelas o rondanas, son placas planas que se ajustan contra la superficie de la roca, y que se barrenan si se desea la aplicación de la inyección de la lechada, existen arandelas perfiladas para deformarse a la tensión especificada.

Es importante, la precisión en el diámetro del barreno lo suficientemente ancho para que pase libremente el conjunto del perno de anclaje, pero lo suficientemente apretado para que ajustarse al anclaje sin excesiva holgura. Se debe cuidar que sea exacta la profundidad de los pernos del anclaje.

El sistema de anclaje se debe diseñar para adaptarse al túnel, a la roca y al método de excavación. Los pernos deben de atravesar normalmente la estratificación rocosa y se debe anclar siempre en la roca en buen estado, es recomendable variar la longitud de manera que no queden todos los anclajes en el mismo nivel, con propósito de evitar un plano de falla.

Los pernos de anclaje, pueden ser de tres tipos:

### **A) Casquillos de expansión.**

El casquillo o concha de expansión, consiste en un tapón en forma de cuña, que se enrosca en el extremo del perno y por consiguiente las cuñas u hojas son empujadas hacia afuera contra las paredes del barreno.

### **B) Ranura y cuña.**

Los pernos de ranura y cuña, se anclan empujando el extremo ranurado contra una cuña en el extremo del barreno expandiendo por consiguiente el extremo del perno contra las paredes del barreno.

### **C) Pernos con resina para anclaje.**

El anclaje con resinas, se efectúa llenando el espacio entre el perno y el agujero con lechada resina-poliéster, ya sea parcialmente o en toda su longitud. La resina y un catalizador que acelera la reacción se preparan en forma de cartucho y se mezclan después de la inserción en el agujero con la colocación y rotación del perno. Son necesarios ciertos dispositivos para mantener la lechada en un agujero inclinado, hasta que fragüe la lechada y obtenga su resistencia.

En la siguiente tabla podemos ver algunos ejemplos de anclas y las características de cada uno.

tipo de ancla	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Varilla de Madera	Se coloca en los barrenos ajustados y la humedad de la roca la incha de manera que se produce una fuerza radial que genera una resistencia a la fricción ver figura N° 27	Baratas y fáciles de fabricar	Muy frágiles para presiones de refuerzo muy leves no se pueden tensar	Minas de carbón
Ancla de fijado mecánico	Se inserta y cuando se aprieta la tuerca contra la rondana hay un desplazamiento de la barra con respecto al ancla, lo que la va forzando y por lo tanto se expande ver figura N° 28	Produce un anclaje a todo lo largo del barreno extenderse y volver a usarse	Su vida útil es corta pues no se puede inyectar y se oxida muy rápidamente	Minas de carbón
Ancla de fricción	Es un tubo partido que al comprimirse aplica una fuerza radial contra la roca y genera una resistencia a la fricción ver figura N°29	Barato de sencilla y rápida instalación	No se puede inyectar ni tensar	Refuerzo ligero en minas
Sistema perfbolt	Medios tubos perforados se rellenan de mortero se amarran y se insertan en el barreno, el mortero se exprime a presión cuando la varilla se empuja por el centro método inventado en Escandinavia ver figura N° 30	Sencillo y efectivo, se pueden usar tramos cortos para formar una ancla y tensar la barra	Caro si se compara con las varillas inyectadas	Construcción
Varilla inyectada sin tensar	Se bombea un mortero grueso en el barreno y se empuja la varilla en la lechada se puede añadir una placa de reten con tuerca como refuerzo ver figura N° 31	Sencillo y económico	No se puede tensar su instalación debe ser antes de que se deforme la roca	Minería y construcción
Ancla ranurada con cuña	El final de la varilla se ranura y la cuña penetra al empujarse el conjunto contra el fondo del barreno, la cuña expande la extremidad del ancla y la fija en la roca ver figura N° 32	En roca dura proporciona un anclaje excelente, tensa de inmediato el ancla	Puede presentarse una trituración local en la roca cuando su resistencia es baja	Minería

Continuación

tipo de ancla	Características	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Ancla mecánicamente fijada tensada e inyectada	Se jala una cuña fija al perno dentro de un casquillo cónico que al expandirse presiona contra las paredes del barreno, un tapón confina la lechada y centra el perno, la lechada se inyecta a través de un orificio a través del tapón ver figura N° 33	El ancla se puede tensar inmediatamente e al colocarse, logra cargas de anclaje elevadas	Bastante costoso requiere de una mano de obra experta requiere una prueba de agua antes de inyectar la lechada	Construcción
Ancla fijada y tensada con mortero	El fijado con mortero tiene la ventaja de poderse utilizar en macizos de roca muy mala, un sistema alternativo consiste en inyectar una mezcla seca de arena/cemento por un tubo y agua por otro, cuenta con una placa indicadora de carga que cuando se deforma es cuando esta sometida a carga ver figura N° 34	Económico con buenas perspectivas de anclaje, la placa indicadora de carga produce el efecto de un resorte	Necesita mucho cuidado para formar un buen anclaje no se puede tensar hasta que la lechada ha fraguado	Minería
Barra con rosca tensada y fijada en resina	Es el sistema mas complejo combina la mayoría de las ventajas de los otros sistemas, el catalizador separado de la resina por envolturas en forma de "salchicha", se empujan dentro del barreno con faenero y luego se inserta la barra con un movimiento de rotación que rompe las cápsulas mezclando la resina y el catalizador (endurecedor) ver figura N° 35	Adecuado y fácil de usar se obtienen anclajes de resistencia alta en roca de mala calidad en una sola operación se obtiene un sistema de anclaje totalmente inyectado	Las resinas son costosas tienen un tiempo de almacenamiento limitado	Minería y construcción

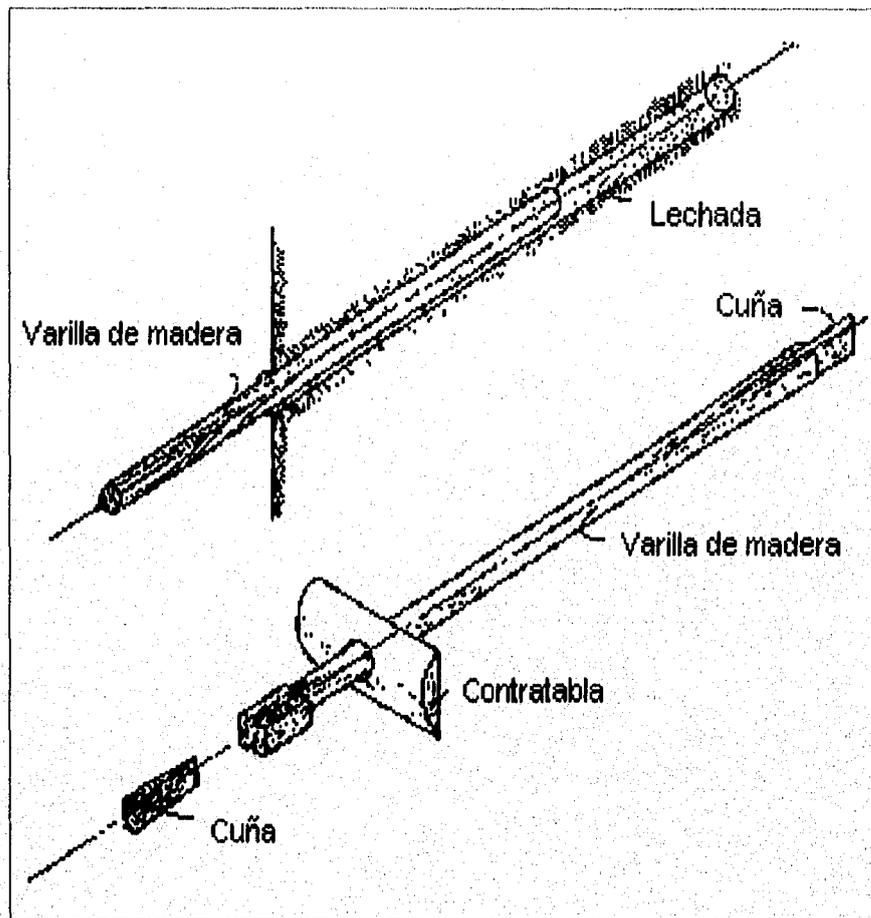


Fig. N° 27

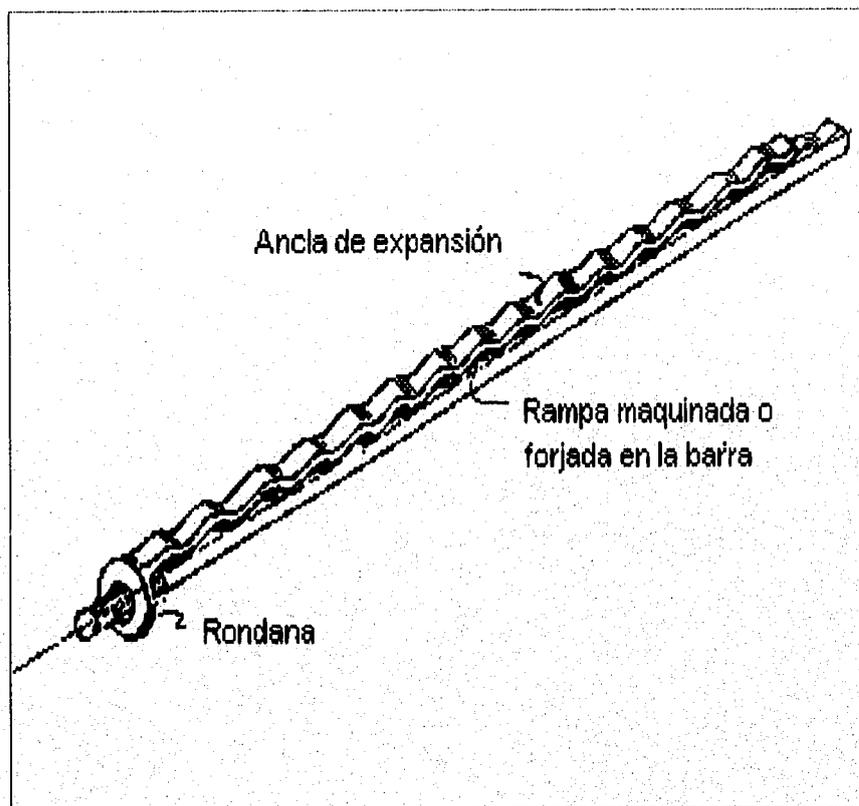


Fig. N° 28

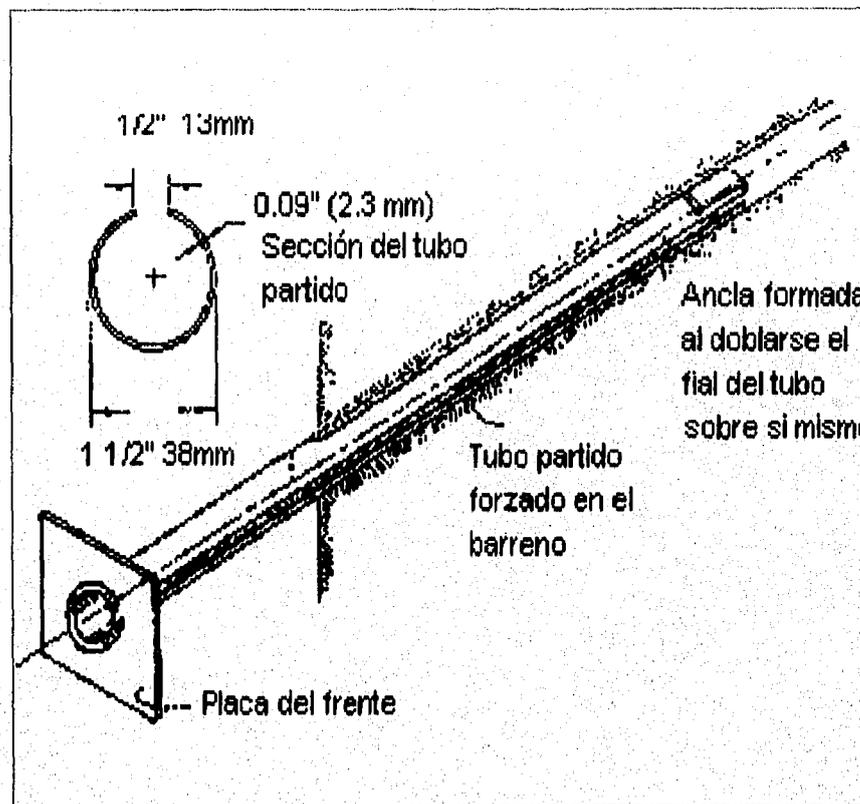


Fig. N° 29

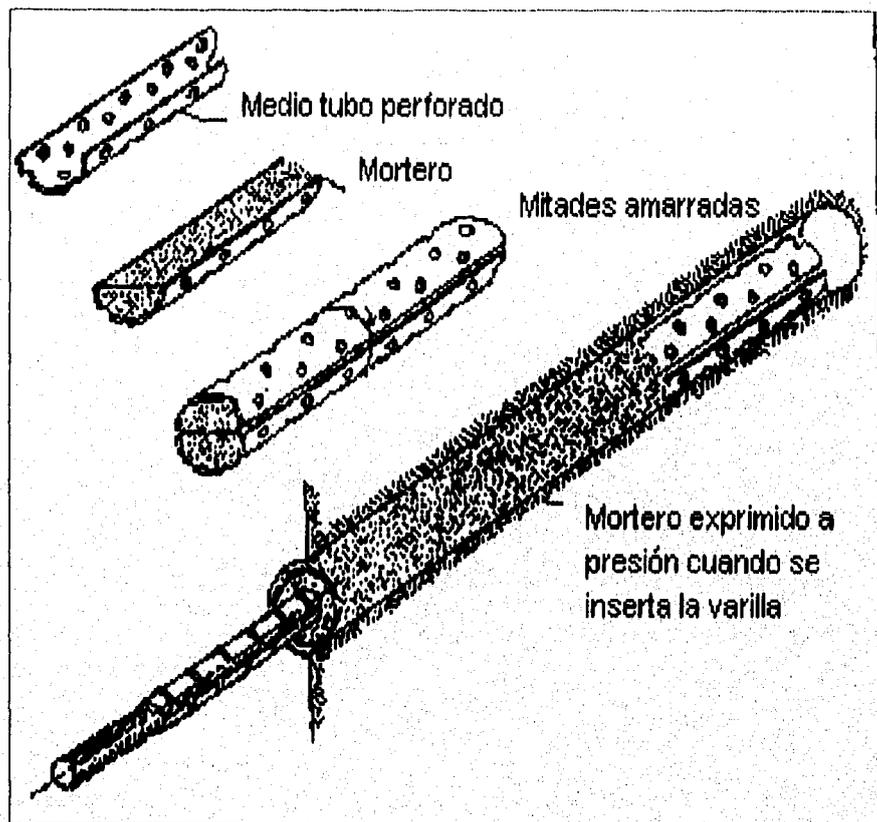


Fig. N° 30

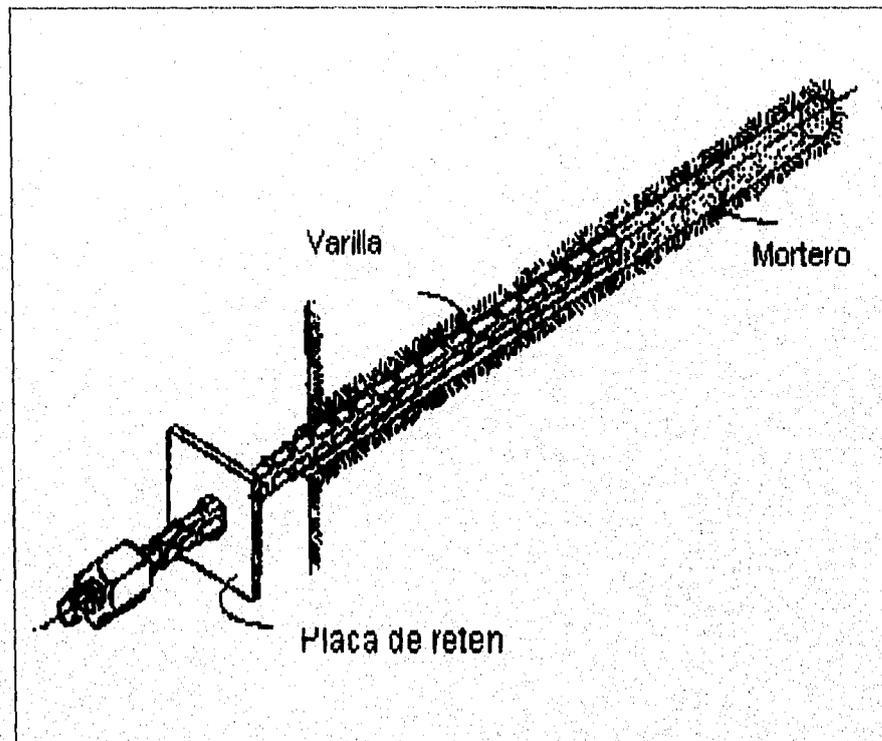


Fig. N° 31

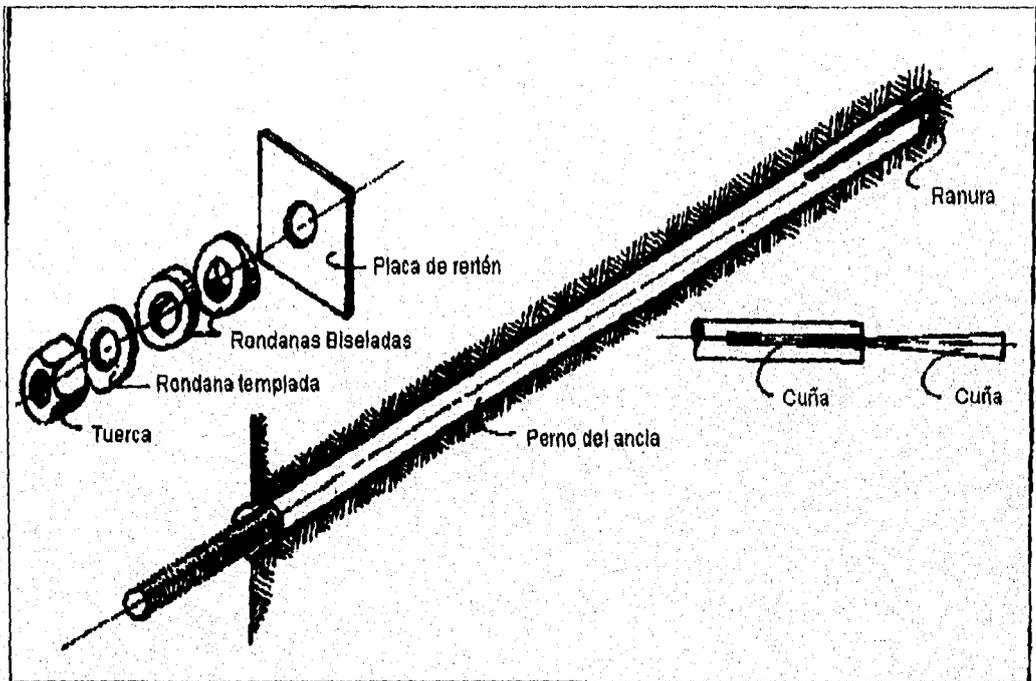


Fig. N° 32

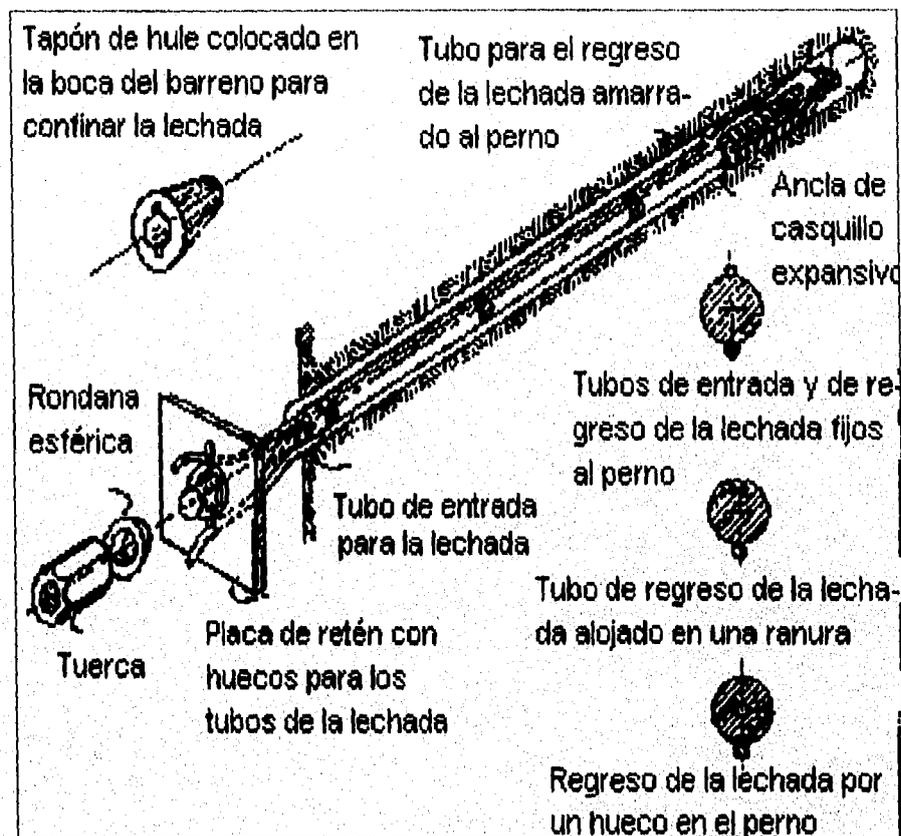


Fig. N° 33

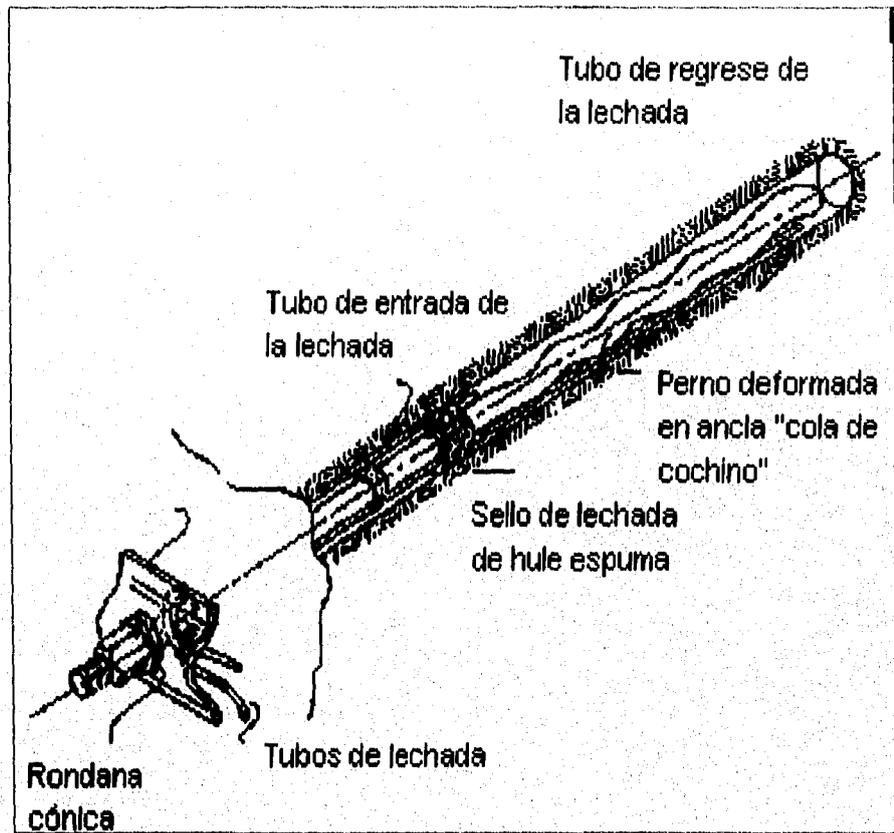


Fig. N° 34

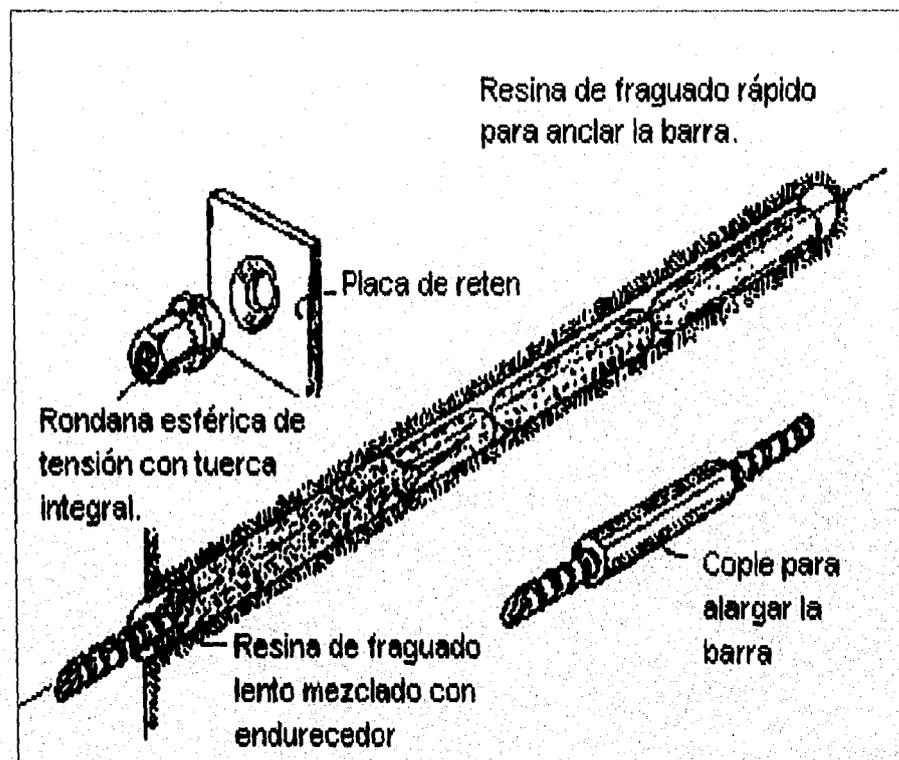


Fig. N° 35

### **Instalación de anclas**

Para las excavaciones por lo general más grandes en las minas mecanizadas y de las obras de ingeniería civil, casi siempre hay que asegurar el acceso con un vehículo de plataforma telescópica.

El largo de las anclas es igual de importante que se localización, y desde luego el punto de vista del instalador, la instalación de un ancla muy larga puede ser una operación difícil y peligrosa cuando se realiza desde una canastilla sostenida por brazo telescópico. Si se necesitan anclas largas, será mucho menos peligroso para el operados colocar tramos acoplados, y el efecto como refuerzo será igual.

En el caso de cavidades grandes donde se instalan grúas viajeras, habrá que pensar en anclar las vigas carriles a las paredes de la cavidad de modo que estén disponibles muy al principio de la construcción para favorecerla o ayudarla en la construcción o instalación de la grúa permanente.

Cuando se tienen que tensar las anclas, se necesita alguna forma de fijación para sujetar la extremidad del perno en el terreno. Los tres tipos más comunes de anclajes son el mecánico, el de la lechada de cemento y el químico (resina sintética).

Las anclas pueden tensarse al aplicar un calibrador de torsión a la tuerca o por tensión directa en el perno.

En aquellos casos en los que se necesiten tensiones de 10 ton. o menos, la llave de torsión calibrada o la llave de impacto prefijada para dejar de girar al llegar a cierto valor de torsión es generalmente todo lo que se necesita. Para cargas más altas, la incertidumbre que existe en la relación entre torsión aplicada a la tuerca y la tensión aplicada al ancla puede dar lugar a enormes variaciones en cuanto a esa tensión.

Cuando se necesitan resistencias altas o cuando se considera necesario determinar la verdadera tensión de un ancla con cierta precisión, conviene aplicar el sistema de tensado hidráulico, directo al conjunto cuidando los siguientes factores:

- a) Se tiene que aplicar una tensión directa sobre el ancla sin impedir su función como elemento de refuerzo.
- b) Tiene que ajustarse la carga en el ancla y apretar la tuerca en un valor de carga prefijada.
- c) La carga tiene que aplicarse de tal manera que solo puede haber una separación entre la tuerca y la superficie de la rondana con la que esté en contacto.
- d) La capacidad del gato tiene que ser suficiente para poder hacer la prueba de adherencia del conjunto del ancla.

### **III.D.- Ademe con Dovelas.**

Al terminar el avance del escudo, los gatos se retraen dejando el espacio necesario para armar un nuevo anillo.

Los anillos de concreto están formados por varias piezas, por mencionar un caso en especial de ocho piezas, de las cuales son tres tipos de dovelas una del tipo "A" o cuña, cinco del tipo "B" y dos del tipo "C".

Cada una de las piezas es bajada de una plataforma especial y tomada por un polipasto de 5 ton., el cual esta montado en la viga que va desde la parte posterior del escudo hasta la primera plataforma, cuya función es tomar cada uno de los elementos y colocarlos hasta su posición dentro del faldón. Una vez colocada la dovela dentro del faldón, esta posición es colocada en su posición definitiva mediante un anillo erector de tipo engrane con dientes interiores, el cual es accionado por dos motores hidráulicos.

El orden de la colocación es como sigue; la secuencia será ascendente, instalándose en primer lugar las dovelas del tipo "B", que son las que forman la cubeta; posteriormente se instalaran las dovelas del tipo "C" y al final se cerrara el anillo con la dovela del tipo "A" o cuña.

Esta colocación del revestimiento se realiza sin interrumpir la excavación ni la rezaga, a medida que el anillo se va ensamblando, los gatos de empuje se van retirando, posteriormente se aprieta la tornillería que une los segmentos entre sí con el anillo anterior. Cuando se termina de armar el anillo se cierra un ciclo de excavación con avance igual a la longitud de los gatos de empuje, ver figura N° 36.

Cuando el trazo del túnel presenta curvas es necesario colocar anillos correctivos, que son anillos que presentan una disminución gradual del ancho nominal (1.00 m.), hasta un ancho de 0.95 m.. Estas dimensiones máxima y mínima se encuentran diametralmente opuestas. El número y frecuencia de los anillos correctivos es función del radio de la curva.

#### **Capitulo IV.- Aplicación de los Túneles Excavados en Roca.**

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, dimensión, forma y revestimiento son diversas. En el proyecto y la construcción, los factores importantes que se deben analizar en relación a la función abarcan: localización, suelo, dimensiones y geometría, la forma estructural, el método de construcción y el equipo permanente.

La aplicación de los túneles excavados en roca es muy variado que va desde túneles carreteros hasta almacenamientos militares y de combustibles

#### **IV.A.- Sistema carretero.**

Actualmente uno de los problemas principales en las ciudades, son los congestionamientos vehiculares en las vías de comunicación, por tal motivo, es necesario desarrollar nuevas vías terrestres que agilicen la carga vehicular. Esto ha obligado a la construcción de túneles que acorten distancias y salven obstáculos, con un grado de eficiencia y confiabilidad aceptable, además de minimizar costos y tiempo.

La aplicación de túneles en carreteras es amplia y su utilización en la tecnología en las vías terrestres está desigualmente repartida, estas estructuras constituyen un recurso familiar a los proyectistas en todo el mundo, pero en las carreteras el empleo de los túneles parece hasta cierto grado materia de preferencia personal o de costumbres y tradiciones imperantes en cada país.

Existen naciones en cuya red carretera el túnel es una estructura frecuente y en algunas de ellas, cabría preguntarse si es demasiado frecuente. Varios países europeos, son ejemplo de todo lo anterior, mientras que en otras naciones, por el contrario los túneles escasean en la red carretera o no existen.

La pendiente en los túneles carreteros, es variable y flexible esto es particularmente pertinente para túneles de carreteras subacuáticas, donde es necesario un descenso de 30 mts. a fin de poder pasar bajo una vía fluvial navegable.

Una pendiente de 3.5% a 4.5% es normal, y en condiciones especiales las cortas rampas de acceso en un espacio restringido, pueden justificar una pendiente de hasta 6.5%, se notará que un descenso de 30 mts. a 3%, requiere de una longitud de 900 mts. en gran parte dentro del túnel, mientras que una pendiente de 6% divide en dos esta longitud.

En los sistemas montañosos, en los túneles con pendientes abruptas existen factores con los cuales se debe tener especial cuidado. En ascensos demasiado largos los vehículos pesados y muy cargados, circularán a baja velocidad, retardando el tránsito y propiciando la emisión de gases dañinos como el monóxido de carbono de la gasolina y el humo de los motores a diesel, que se incrementa desproporcionadamente demandando una mayor ventilación. En el caso de curvas verticales en un cambio de pendiente, las condiciones son las mismas para el caso de una carretera al aire libre, pero cuando una depresión en la línea de visibilidad queda restringida por el techo del túnel, propicia la generación de accidentes.

Las paredes del túnel deben ser impermeables, para evitar que la superficie de la carpeta se torne resbalosa, pero si es necesario liberar la presión del agua, por quedar el túnel por debajo del nivel freático, se puede permitir el escurrimiento a través de drenes, pero se deberá de canalizar el agua por medio de un sistema de drenaje previamente construido, además que debe cuidarse una estética con materiales y colores que proporcionen una apariencia agradable a los automovilistas.

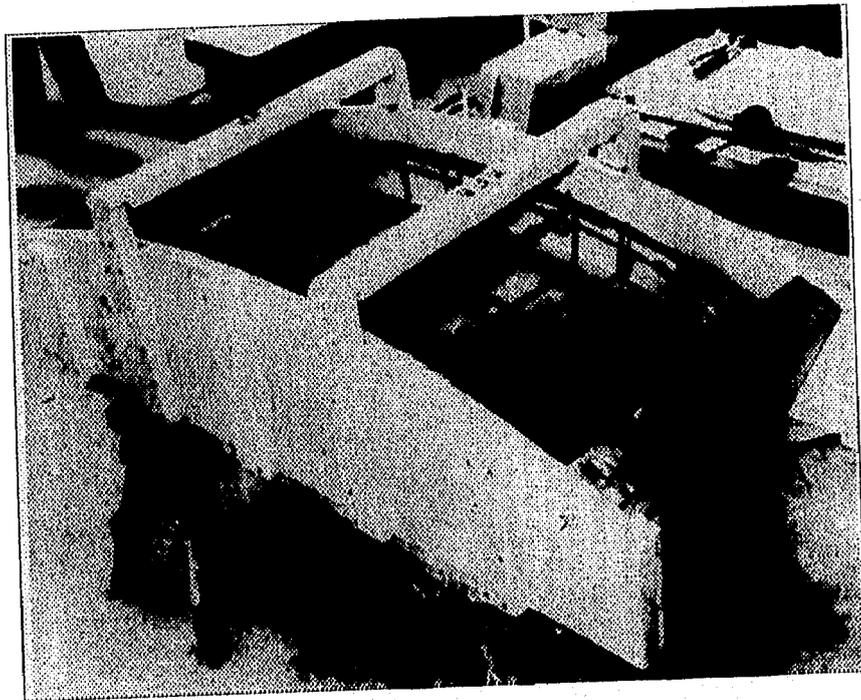
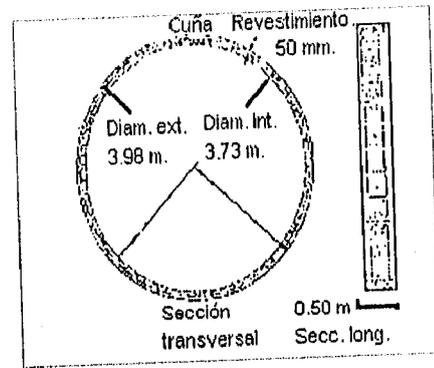
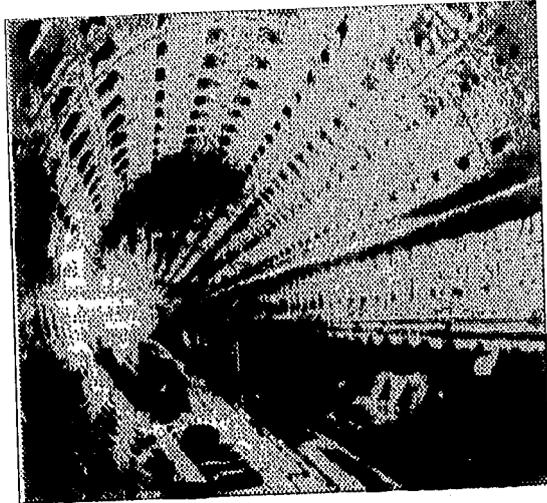


Fig. Nº 36

#### **IV.A.2.- Sistema ferroviario comercial.**

La forma estructural más común para los túneles de ferrocarril, es probablemente la de herradura que va de 5 por 7 mt., para túneles de una sola vía a 8.5 por 7 mt., para vía gemelas. Los factores de control fundamentales son; la potencia locomotriz y la adherencia de las ruedas a los rieles.

Lo que rige el perfil longitudinal de todos los túneles de ferrocarril, es una pendiente aceptable y se entiende por pendiente aceptable que sea menor del 1%, pero en casos excepcionales, se pueden utilizar pendientes más pronunciadas siempre y cuando no sean muy frecuentes.

#### **IV.A.3.- Sistema ferroviario urbano.**

La falta de espacios y la necesidad de un sistema de transporte más rápido, ha originado la transformación de calles en avenidas y así sucesivamente de periféricos y viaductos, ocasionando paulatinamente congestiones tan grandes como sea la vía de comunicación en cuestión.

Todo esto sumado al daño ecológico por contaminantes, producto de la combustión de los motores a gasolina y a diesel, ha obligado que la construcción de las vías de transporte sean ahora a través del subsuelo, utilizando un transporte que no genere agentes contaminantes.

La construcción de túneles para circulación de trenes urbanos, se han vuelto comunes en las grandes ciudades, perfeccionado los procedimientos constructivos y las secciones ya sean rectangulares o circulares ahora son más grandes.

A diferencia de los túneles para carreteras y ferrocarriles, en los cuales las filtraciones se permiten siempre y cuando sean controladas o escurran debido a la pendiente en los túneles, para los trenes urbanos esto debe tratarse de evitarse, ya que no existen pendientes para el escurrimiento y los equipos de arrastre trabajan sobre vías energizadas y para una buena tracción los rieles deben estar secos. En caso de existir un accidente debe contarse con un sistema de cárcamos de bombeo a todo lo largo del túnel.

Las pendientes en este tipo de túnel, pueden ser más pronunciadas que los túneles ferroviarios, ya que no se tienen que transportar cargas pesadas, en sistemas profundos, los túneles de las estaciones son una sección mayor que los túneles de recorrido. A través de todo el túnel se exigen normas estrictas de ventilación, impermeabilización y revestimiento en acabados e iluminación agradables para el usuario.

#### **IV.B.1.- Conducción de aguas negras.**

En varias ciudades grandes, las demandas de una población creciente, una industria en expansión y las cada vez más estrictas normas para evitar la contaminación de los ríos y los mantos freáticos, hace necesario que se construyan sistemas de alcantarillado más grandes y funcionales, como el sistema de drenaje profundo de la ciudad de México, en estos el volumen que se maneja es igual al volumen suministrado, pero a este hay que sumar el volumen de agua, producto de las tormentas.

Los túneles son necesarios cuando la profundidad por la pendiente para el tendido de los tubos, es demasiado grande para excavar zanjas o cuando no se puede tolerar la modificación de la superficie, además de que ya no se permiten las descargas de viejas alcantarillas a los ríos o al mar.

Los requisitos que debe cubrir un túnel para drenaje son:

- A) Un gradiente descendente y continuo además de paredes lisas, lo cual debe de ser tal , que se mantenga en todo momento una velocidad adecuada para poder acarrear los sólidos y evitar el asentamiento de arena.
- B) La impermeabilización es imprescindible, ya que estos transportan desechos orgánico y corrosivos provenientes de la fabricas, ya que se pueden presentar fugas al subsuelo contaminando los mantos acuíferos.
- C) Una ventilación a todo lo largo del túnel, es necesaria para evitar la acumulación de gases tóxicos y explosivos.
- D) La resistencia a la erosión y a la corrosión es primordial, tomado en cuenta que la construcción del túnel es una obra sumamente cara, por lo tanto la calidad de los materiales y del proceso constructivo deben ser tales que la obra sobrepase considerablemente la vida útil que se ha considerado. El túnel deberá ser resistente a la corrosión por desechos de fabricas, a la abrasión producida por arenas, a la acción de los ácidos y al ataque de bacterias.

#### IV.B.2.- Conducción de agua potable.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

La escasez de agua potable y la creciente demanda de esta en las grandes ciudades, ha obligado a la extracción de los mantos acuíferos, agotándolos y al agua existente en zonas aledañas. Este problema no se reserva para las ciudades modernas, la escasez de agua ha existido siempre.

Los acueductos se remontan desde la antigüedad y estos pueden ser aéreos, superficiales o subterráneos, pero para el caso que nos interesa, analizaremos únicamente el subterráneo (túneles). Por lo general el agua, no fluye a presiones altas y puede fluir por los túneles parcialmente llenos.

Los túneles deben cumplir con ciertos requisitos como un gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo, de acuerdo al volumen y la velocidad del agua, para esto se requiere de un revestimiento liso impermeable y sin obstrucción alguna.

Se deben tomar en cuenta las pérdidas debidas a fugas a todo lo largo del túnel, ya que al principio pueden ser insignificantes, pero la pérdida acumulativa a todo lo largo del túnel unos años después puede ser excesiva debido a la ampliación de los huecos por de la erosión.

La contaminación por infiltración, es menos probable excepto en el caso de que falle el abastecimiento o que el túnel este parcialmente lleno.

Es primordial, llevar un control de calidad rigurosa ya que se va a transportar agua para consumo humano, por lo tanto el revestimiento que va proporcionar un soporte al suelo excavado debe ser liso e impermeable en ambos sentidos.

#### **IV.C.1.- Túneles para alimentar generadores a alta presión.**

Las casas de máquinas de las presas siempre se localizan a varios metros por debajo del nivel del embalse, por lo anterior, es necesario la construcción de túneles que suministren el agua a alta presión a las turbinas o turbogeneradores de manera que sea mínima la pérdida de carga por fricción en las curvas o en los cambios de sección y se pueda obtener la máxima carga hidrodinámica. Para estos se necesita que el túnel sea muy empinado o vertical, pero esta condición provoca que las presiones hidrostática sean muy altas, además de las presiones de succión que provoque el agua a altas velocidades sobre las paredes del túnel y las presiones por hondas de choque que por el oleaje, se originan cuando se abren o se cierran las válvulas.

Para controlar y disipar la energía de la masa de agua, en movimiento se construyen pozos de alivio y recubrimientos de concretos de alta resistencia con placas de acero ancladas no restándole importancia a la impermeabilización.

#### **IV.C.2.- Obras de desvío y vertedores.**

Este tipo de obras son necesarias para controlar el flujo de agua a través de la presa mientras dure la construcción de esta, en su uso subsiguiente ya sea por el método de túneles o atagufas.

El túnel practicado a través de la roca sirve para mantener seco el área de trabajo desviando el flujo del agua a través del túnel, esto garantiza que la estructura será continua sin aberturas temporales que tengan que cerrarse posteriormente.

Independientemente de que se construyan túneles para obras de desvío es necesarios construirlos para los vertedores, estos sirven para desalojar los excedentes de agua o para dosificar los riegos a los cultivos y la generación de energía.

En caso de que la roca no sea compacta, el túnel deberá revestirse con concreto para evitar la erosión por presiones negativas y las turbulencias en la temporada de crecidas.

#### **IV.D.- Túneles para alojamiento de tuberías de servicio.**

La aplicación de los túneles se ha diversificado siendo estos utilizados para la conducción de tuberías de agua potable, de gas, de conductores eléctricos, de líneas telefónicas, etc. Para cada caso es necesario que se construya el túnel con ciertas características como son; que para el caso de conducción de líneas eléctricas, una ventilación adecuada ya que el flujo eléctrico genera una gran cantidad de calor, el cual se debe disipar. A parte de contar con accesos a cada cierta distancia.

Otra cosa que debe tomarse en cuenta y darle mucha importancia es la impermeabilización.

Para la conducción de líneas de gas es indispensable la ventilación, ya que las fugas y la acumulación de gas resultaría muy peligrosos.

Todos los servicios podrían ir alojados en un solo túnel, lo cual no es recomendable, ya que la generación de calor, las fugas de gas y los cortos circuitos resultan una combinación muy peligrosa.

### **Conclusiones.**

El túnel como una alternativa más para solucionar problemas en la minería, en el transporte de carga y de personas, almacenamientos de carácter bélico que han dado resultados bastante satisfactorios. Pero la empresa constructora que decida emprender una obra de ese tipo debe invertir tiempo y talvez más dinero en los estudios geológicos preliminares, ya que la pérdida de tiempo por atrasos debidos a la presencia de imprevistos que provocan incrementos muy grandes en la adaptación de procedimientos constructivos que podrían haberse previsto con alteración.

La excavación con topo, puede ser la alternativa más razonable, ya que el hecho de realizar cuatro pasos (barrenado, poblado, detonación y rezaga), en uno sólo, simplifica la cantidades de gente elimina los equipos de barrenación y de los explosivos, reflejándose en un abatimiento del costo de la obra.

Pero Independiente de lo anterior, son capaces de excavar túneles de gran diámetro en rocas muy duras, causando daños mínimos a la roca circundante, así evitando el peligro de desprendimientos, lo cual lo convierte en un procedimiento de excavación seguro.