



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
“ACATLÁN”**

“TÉCNICAS PARA EL USO DE EXPLOSIVOS EN TÚNELES”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERIO CIVIL**

P R E S E N T A:

TOMÁS MANUEL ORTEGA PATIÑO

ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE

FEBRERO, 2007



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.

DEDICATORIAS

A Dios:

Por el simple hecho de haberme dado la oportunidad de vivir.

A mis papas:

Esta es una muestra de mi agradecimiento por su gran esfuerzo al darnos educación tanto seglar como espiritual a cada uno sus hijos, a ti papá por tus consejos y tu gran experiencia, por tu dedicación al mantenernos a mí y a mis hermanos, a ti mamá por tus desvelos junto conmigo por preocuparte a diario por nuestra salud.

A mis hermanos:

Gracias por ser además de mis hermanos mis amigos de toda la vida, por apoyarme ya sea con hechos o con palabras en todo momento.

A Jael:

Por su compañía y por ser una gran amiga además de ser una motivación muy grande en mi vida.

A los profesores de la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por su dedicación y esfuerzo por darnos una formación profesional y que día con día se esmeran por hacer de cada uno de sus alumnos profesionistas y ciudadanos ejemplares.



INDICE



INDICE

	PAG
INTRODUCCIÓN	I
CAPÍTULO I. NOCIONES DE LOS TÚNELES	1
I.1. Generalidades	1
I.2. Desarrollo histórico	3
I.3. Tipos de túneles	6
I.4. Estudios del macizo rocoso	20
I.5. Ensayos de campo	37
CAPÍTULO II. TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES	41
II.1. Generalidades	41
II.2. Clasificación de los terrenos para el empleo de los métodos de perforación	43
II.3. Selección del método y equipo de perforación.	51
II.4. Perforación de túneles en terreno blando.	70
II.4.1. Escudo GREADHEAD	78
II.5. Perforación de túneles en roca	83
II.6. Ventilación de túneles	95
CAPÍTULO III. ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL USO DE EXPLOSIVOS	99
III.1. Generalidades	99
III.2. Deformación tectónica de las rocas	101
III.3. Trazo topográfico previo a la perforación del túnel	103
III.4. Tipos de explosivos utilizados	114
III.4.1. Breve historia del uso de explosivos	114
III.4.2. Funcionamiento de los explosivos	117
III.4.3. Características de los explosivos	119
III.4.4. Clases de explosivos	121
III.4.5 Dispositivos de disparo	128
III.4.6. Retaques	140
III.4.7. Sistemas de comprobación y de disparo	141
III.4.8. Cebado, cargado y conexión	145
III.5. Diseño de voladuras	148
III.5.1. Métodos de voladuras	149
III.5.1.1. Método de frente completa	149
III.5.1.2. Método de ataque superior y banco	149
III.5.1.3. Voladuras en hundimiento (Pozos o Tiros)	149
III.5.1.4. Técnica sueca de voladuras	150
III.5.1.5. Método de las cuñas en V	153
III.5.1.6. Método de las cuñas de Pirámide	153
III.5.1.7. Método de cuñas en barrenación paralela	154
III.5.1.8. Método de recorte	161
III.5.1.9. Método de precorte	163
CAPÍTULO IV. NORMATIVIDAD Y LEGISLACION PARA EL USO DE EXPLOSIVOS	167
IV.1 Reglamento para el uso y manejo de explosivos	167
IV.2. Manejo y uso de explosivos	173



INDICE



IV.3. Manejo de cargas no detonadas	190
CAPÍTULO V. CASO PRÁCTICO	194
V.1. Caso práctico	194
CONCLUSIONES	210
BIBLIOGRAFÍA	214
ANEXOS	216
Anexo 1. Puerta de acceso para polvorín (detalle)	216
Anexo 2. Características de los polvorines	217



INTRODUCCION

En los últimos años las estructuras subterráneas han presentado grandes cambios. La construcción de túneles, muchas veces considerada peligrosa, fue y será justificada como defensa y ataque en las guerras y producción (transportación) o tráfico.

Los túneles forman una parte importante de las estructuras subterráneas y estos pueden ser definidos como: pasajes subterráneos construidos para el tráfico directo o una conexión para transportación entre dos puntos. La definición simple de túnel es: "Pasaje subterráneo hecho mediante la remoción de roca y sólidos".

Dichos túneles son un gran reto para la ingeniería contemporánea, tanto por lo complejo del análisis durante el diseño, como por el hecho de interactuar el comportamiento natural del macizo rocoso con la presencia de una oquedad artificial. Esta interacción es necesaria para lograr la estabilidad de la estructura durante su vida útil, además de buscarse la máxima eficiencia cuando la obra entre en operación.

El objetivo del presente trabajo es mostrar las técnicas para el uso de explosivos las cuales están basadas en ciclos sucesivos de perforación, voladura, limpieza del frente y ademado del túnel, que se repiten hasta completar la realización de este, por lo que se describirá el manejo y uso de explosivos en la excavación, así como los estudios preliminares necesarios para la construcción, además de analizar la normatividad y legislación en el manejo de los explosivos.

Los criterios presentados son muy importantes para dar una idea de la técnica para el uso de explosivos a utilizar dentro de un macizo rocoso y así demostrar la hipótesis de que para cada aplicación hay un diámetro idóneo de perforación que, combinado con el explosivo mas adecuado, se logre el objetivo propuesto con una óptima eficacia lo cual llevará a una clara disminución de costos y aun sustancial incremento de la productividad.

En el capítulo I se muestra un breve desarrollo histórico, la descripción de los diferentes tipos de túneles y el estudio del macizo rocoso, el cual es muy importante para determinar la técnica a utilizar para el uso de explosivos.

En el capítulo II se mencionan los métodos de perforación en diversos tipos de terreno y el equipo a utilizar en la barrenación, también se explican los procesos de ventilación necesarios después de haber utilizado explosivos.

En el capítulo III se explican los diferentes tipos de explosivos, su funcionamiento y características, los dispositivos de disparo y sistemas de comprobación y de disparo. Además de algunas técnicas de voladuras apropiadas.

En el capítulo IV se explica la importancia de la normatividad y legislación del uso de los explosivos, así como la descripción del procedimiento para su uso, almacenaje y seguridad.



INTRODUCCIÓN



Finalmente en el capítulo V se expone un caso práctico donde se aplica la técnica del uso de explosivos en las galerías en el sitio de cortina del P.H. Zimapán Hidalgo.

Pero son únicamente las bases que debe seguir el proyectista para el diseño de la obra. Durante la ejecución de la misma, el criterio que debe seguir el ingeniero es el que considere más favorable para el correcto funcionamiento de la estructura final. Este criterio debe tomar en cuenta experiencias de otros proyectos y establecer ciertos parámetros que puedan servir en futuras solicitudes, ya que con esto se enriquecen los conocimientos con respecto a la construcción de túneles, favoreciendo el objetivo que tiene la ingeniería civil, a saber generar obras en beneficio de la humanidad.

El autor desea expresar su agradecimiento al Dr. José María Chávez Aguirre por su interés y colaboración continua durante la escritura de todo el manuscrito, al Ing. Magdaleno Martínez Govea y al Ing. Antonio Busqueta por sus observaciones durante la revisión y al Ing. Candelario Nevarez Vara junto con el Ing. Valeriano Mendoza González cuya ayuda fue especialmente valiosa en la planeación del tema.

México, DF.

T.M. ORTEGA



CAPÍTULO I:

CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES



I.1 GENERALIDADES

En obras públicas se plantea frecuentemente el problema de la construcción de túneles.

La necesidad de los túneles se impone en la construcción de carreteras, ferrocarriles y canales cuando es imposible la ejecución de una trinchera (para pasar una montaña) o cuando es demasiado costosa (sí la profundidad de la trinchera es tal que su excavación resulta más costosa que la de un túnel) o demasiado molesta (por ejemplo, en las ciudades).

Se utilizan para pasar por debajo de canales o ríos (carreteras, ferrocarriles), problema particularmente delicado. En el mismo orden de ideas puede estudiarse el paso de estrechos o brazos de mar.

Las obras hidroeléctricas exigen la ejecución en túnel de galerías de derivación y tuberías de carga o descarga de la central.

Las centrales subterráneas construidas han exigido la extracción de miles de metros cúbicos de tierras.

Las obras urbanas ofrecen numerosos ejemplos de túneles: alcantarillas, galerías para cables o tuberías, ferrocarriles metropolitanos, pasos subterráneos.

La obligación, impuesta por las necesidades de la guerra moderna, de construir refugios contra los bombardeos aéreos y contra los bombardeos atómicos, conduce también a la construcción de túneles, que también se emplean en gran escala en fortificación.

La construcción de túneles plantea una serie de problemas relacionados con las disposiciones a adoptar en las obras, o con el método de ejecución de éstas y el equipo de los tajos.

Las soluciones dependen especialmente de la naturaleza del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua.

Las obras subterráneas son semejantes, a las obras de cimentación en el sentido que exigen, serios estudios preliminares y constante prudencia.

Fuera del ámbito de las obras públicas propiamente dichas, las obras subterráneas son comunes en las explotaciones mineras, que exigen la perforación de galerías. Los métodos generales y los procedimientos de ejecución



apenas se diferencian en ambos casos y pueden lograrse importantes enseñanzas sobre el estudio del material y los métodos de trabajo usados en las minas.

Desde el punto de vista histórico, los túneles reservados a la circulación de viajeros y mercancías son relativamente recientes, ya que los primeros se sitúan hacia 1750. Por el contrario, los primeros túneles destinados a la exploración de los minerales se remontan a principios de los descubrimientos metalúrgicos a final de la Edad de Piedra.

Desde el punto de vista bibliográfico, parece que la primera obra técnica sobre la ejecución de túneles se remonta a 1556 y se debe a Georges Bauer, un alemán que la publicó bajo el nombre de Georg Agricola. El título del documento, impreso en latín, era <<De Re Metallica>>. Después se tradujo a varias lenguas y fue la autoridad máxima durante tres siglos, incluía trabajos relacionados con minas, túneles y metalurgia. Como dato curioso, en este documento se publica que el terreno rocoso debe disgregarse por el fuego encendiendo una hoguera contra el frente de ataque, regando después la roca al rojo con una mezcla de vinagre y agua.

Los materiales así disgregados se separaban del frente con pico y barra de mina.

Los ademes eran sensiblemente iguales a las que se utilizan hoy.

Las bombas y ventiladores eran de madera.

En lo que sigue veremos que actualmente se dispone de medios mucho más desarrollados como los explosivos.⁽¹⁾



I.2 DESARROLLO HISTÓRICO

La historia de la construcción de túneles se remonta a los tiempos de la prehistoria, cuando el hombre primitivo empezó a buscar refugio de las inclemencias del tiempo y de sus enemigos, excavando cavidades muy similares a las naturales o utilizando éstas y ampliándolas después.

Los primeros túneles, fueron construidos para el propósito de comunicación y fueron hechos de acuerdo al conocimiento de aquellas épocas. 4000 años atrás bajo el régimen del rey Semiramis (o mejor conocido como Nabucodonosor) se construyó un túnel en la antigua Babilonia, para pasar por debajo del río Eufrates y establecer una conexión bajo tierra entre el palacio real y el templo de Jove. La longitud de este túnel fue de 1 km y fue construido con una considerable sección transversal con dimensiones de 3.6 m por 4.5 m. El río Eufrates fue desviado de su cauce original durante el periodo de construcción. El camino del túnel consistió en un enladrillado tendido con mortero bituminoso y la sección fue cubierta por una bóveda en forma de arco. Este pudiera ser considerado como un gran proyecto de acuerdo a los estándares modernos para la construcción. El alcance y el grado de dificultad de este túnel indican que no era el primer túnel creado por los babilonios y que debieron haber adquirido experiencia con la construcción de otros. Hay que recordar que el siguiente túnel subacuático fue abierto cerca de 4000 años después, en 1843. Este fue el túnel bajo el río Támesis en Londres.⁽⁴⁾

Las minas de pedernal, como las de Grimes Graves , en Norfolk, se desarrollaron también en Bélgica, norte de Francia, Portugal y otros lugares, remontándose a más allá de 2000 a.C.; se utilizaban picos hechos de astas de ciervos, hachas de pedernal y palas de hueso. Haciendo mención de las minas de sal de Halstatt que son de 2500 a.C. y, alrededor de 1000 a.C., dichas minas proporcionaban su producto a comunidades muy prósperas de la Edad de Bronce y de principios de la Edad del Hierro. Al principio se utilizaron picos de bronce, mazos y palas de madera, pero luego se desarrolló el uso del hierro.

En el cuarto milenio a.C., los sumerios utilizaron no sólo el cobre nativo, sino el obtenido por reducción y fusión de los óxidos de minas de las montañas de Armenia. En algún momento de dicha era se excavaron galerías laterales en las faldas de las montañas a fin de seguir afloramientos. El Egipto de los faraones obtenía cobre del Sinaí y las áreas cercanas en el tercer milenio a.C. Se usaban herramientas de piedra y cuñas de madera expandidas por humedad para perforar hasta 50 metros de roca. Más tarde, Egipto obtenía el cobre de Armenia y Chipre, llamado así por su cobre, y extraían el oro de tiros profundos utilizando la mano de obra de esclavos y prisioneros, principalmente en el desierto de Nubia. Parece ser que se utilizaba el fuego en la extracción de rocas duras.

Los abastecimientos de agua proporcionan los primeros ejemplos de túneles, y quizá se pueda considerar que marcan el inicio de la construcción de túneles aparte de la minería. Los templos y las cámaras funerarias subterráneas, que se excavaron en la roca en muchas partes del mundo, presentan ejemplos de métodos y usos de la excavación subterránea.



En épocas pasadas, con el objeto de obtener abastecimiento de agua e irrigación, se construyeron extensos canales en la “Fértil Media Luna” (Egipto, Palestina, Siria, Iraq). Un canal tiene que seguir un curso con una suave pendiente y la necesidad de atravesar una sierra acarrea una larga desviación rodeando el extremo de la sierra, o un corte profundo, o un túnel que atravesase aquélla. A veces el túnel es la única solución posible si el agua de una montaña debe llevarse a una ciudad en la llanura. Cuando es limitado el abastecimiento de agua pura, se cuenta con una ventaja adicional al llevarlo por debajo del terreno, puesto que se reduce la evaporación y se le protege de la contaminación superficial. Otra de las razones para la construcción de túneles para agua era la defensa: mantener el abastecimiento de agua en una ciudad amurallada en estado de sitio.

Uno de los primeros ejemplos, procedente de Grecia, de un túnel a través de una serranía, lo constituye la obra de Eupalinus de Megara, en 687 a.C., en la isla de Samos. El túnel, que estaba revestido, tenía cerca de 1,000 m de largo y llevaba el agua por tuberías de barro colocadas en una zanja excavada en el piso.

Los “qanaats” de Irán y las áreas aledañas son pequeños túneles subterráneos que llevan el agua desde las fuentes en las colinas hasta los pueblos y aldeas. Se excavan normalmente con tiros separados unos 50 m; su recorrido a través del desierto está marcado por los montículos de desperdicios en los tiros. Algunos de estos tiros presentan una suave inclinación para proporcionar un fácil acceso y los qanaats pueden terminar en pozos profundos.

El túnel de Siloam en Jerusalén constituye un ejemplo típico de los antiguos acueductos estratégicos; fue excavado alrededor de 700 a.C. por el rey Ezequías, cuando se esperaba un sitio por los asirios. Los anales bíblicos en Reyes II, 20:20 dicen así, “y el resto de las obras de Ezequías, y todo su poderío, y cómo construyó un estanque y un acueducto, y trajo agua a la ciudad, ¿no están escritos en el Libro de las Crónicas de los Reyes de Judá?”.

Son numerosos los ejemplos de túneles construidos en el periodo clásico de Grecia y Roma, siendo en su mayoría para acueductos. En Roma, el abastecimiento de agua se llevaba a la ciudad desde las fuentes en las colinas circundantes; durante el periodo de 312 a.C. hasta el inicio de esta era, se construyeron 52 acueductos con un total de 350 km, casi todos en forma de túneles; el sistema estaba basado en el flujo por gravedad.

Los romanos utilizaron también los túneles para drenaje y como un medio para hacer útiles los pantanos y, ocasionalmente, para carreteras, siendo un ejemplo notable el túnel de Pausilippo construido en 36 a.C. entre Nápoles y Pozzuoli, que tenía unos 8 m de ancho X 10 m de alto X 1,740 m de longitud.

Después de la caída del imperio romano, pasaron varios siglos sin que se emprendieran obras importantes. La construcción de túneles en los tiempos medievales se convirtió en el arte de los zapadores para lograr románticos pasajes



CAPÍTULO I: NOCIONES DE LOS TÚNELES

subterráneos que existían en muchos castillos y monasterios. La ingeniería civil estuvo mucho tiempo inactiva hasta que se vio motivada por las necesidades de los constructores de canales, y posteriormente túneles para ferrocarriles.⁽⁵⁾



I.3 TIPOS DE TÚNELES

Las demandas por parte de pasajeros y el transporte de mercancía han aumentado con el inmenso crecimiento de la población. No así los obstáculos naturales adversos que pudieran acortar los trayectos. Los ríos, montañas y océanos no pudieron retrasar el transporte por mucho tiempo, ya que el esfuerzo del hombre los ha conquistado poco a poco. Los túneles ahora unen a la gente y territorios aislados, lo que antes sólo se podía hacer mediante los puentes que atraviesan ríos y montañas, dichos túneles van en aumento así como sus dimensiones, por lo que cada uno representa un lazo y una contribución hacia la unidad cultural de la humanidad.

El propósito de los túneles es asegurar el transporte directo de pasajeros o de mercancías sobre ciertos obstáculos. Dependiendo del obstáculo a ser superado y del tráfico, o del objetivo del transporte que se desee alcanzar, los túneles se pueden clasificar en varios grupos.

El obstáculo puede ser una montaña, un cuerpo de agua, áreas urbanas, o áreas industriales (tráfico, etc.). Los túneles pueden pasar por consiguiente debajo de las montañas, de los ríos, de los canales del mar, de las áreas urbanas, o industriales, de los edificios y de las rutas del tráfico. Su propósito puede ser llevar una vía de ferrocarril, un camino peatonal, o transportar el agua, la energía eléctrica, el gas, las aguas residuales, etc. o proporcionar el transporte en el interior de las plantas industriales. Los túneles se pueden clasificar así según su propósito, localización y situación geológica. Dependiendo de su propósito se pueden distinguir dos grupos principales de túneles:

Túneles de tráfico:

- Túneles ferroviarios
- Túneles para carreteras
- Túneles peatonales
- Túneles para la navegación
- Túneles para trenes subterráneos

Túneles de transporte:

- Túneles para centrales hidroeléctricas.
- Túneles para el abastecimiento de agua.
- Túneles para el conducto de servicios públicos.
- Túneles para la alcantarilla.
- Túneles para transporte en plantas industriales.



Además del propósito, los criterios importantes de la clasificación son localización, la posición concerniente al terreno y también la alineación, éstas tienen una influencia decisiva en la sección del túnel, el método de construcción y el diseño.

Los túneles de aquí en adelante serán entendidos como estructuras subterráneas, que aparte de responder a los propósitos antedichos, son construidos por métodos especiales, generalmente sin hacer disturbios en la superficie.⁽⁴⁾

El perfil transversal de los túneles dependerá de la función de la obra, que condiciona las dimensiones del *gálibo libre interior* que constituye su hueco, y de la naturaleza del terreno que determina el *revestimiento* necesario para proteger el vacío interior.

En principio, y salvo en terrenos rocosos compactos de excelente comportamiento, los túneles deben revestirse siempre. Incluso en estos terrenos, puede convenir revestir las galerías hidráulicas para disminuir la pérdida de carga debida a la rugosidad de la pared rocosa. El revestimiento debe ser de *mampostería o concreto* y, excepcionalmente, en los túneles subfluviales, de *metal*.

En los terrenos normales se aplica el revestimiento sobre el hueco a proteger (*bóveda*) y en los muros laterales (*laterales*). Eventualmente, los laterales se apoyan en una solera.

En los terrenos muy buenos puede suprimirse la solera y los muros laterales si se encuentra roca franca que se mantenga naturalmente, limitándose entonces a revestir la bóveda.

Por último, en las rocas excepcionalmente compactas, puede suprimirse también el revestimiento de la bóveda. A veces, basta con un simple revestimiento de gunita.

La naturaleza de los terrenos condiciona también el espesor del revestimiento, que debe ser tanto mayor cuanto más empuja el terreno y mayor es la sección del túnel. Esto plantea un problema técnico de cálculo de difícil resolución, para el que conviene estudiar las disposiciones adoptadas con éxito en obras análogas.

La determinación de las dimensiones del revestimiento de un túnel es importante no solamente por la seguridad de la obra, sino también por su precio de costo. Es necesario limitarse al mínimo, pero sin poner en peligro la seguridad de la obra.



Se deben, siempre estudiar los diversos perfiles correspondientes a los terrenos de diferente naturaleza que pueden encontrarse durante la excavación para adaptarse continuamente al terreno encontrado, realizando de esta forma el mínimo gasto con la máxima seguridad.⁽¹⁾

Túneles para carreteras y vías férreas:

El trazado y el perfil longitudinal son función esencialmente de la topografía del terreno, pero dependen también de las condiciones de ejecución de las obras.

Los *túneles rectilíneos* son más fáciles de construir que los curvos en lo que se refiere a la precisión del replanteo del eje, pero esto tiene poca importancia para los túneles de pequeña longitud.

El trazado de los *túneles cortos* puede ser recto o curvo, a ser posible de radio constante.

En cambio, para los *túneles largos* que se atacan siempre por ambos extremos a la vez, se adopta preferentemente el trazado en línea recta, que es el más económico y exacto en lo que se refiere a la coincidencia entre ambos ataques.

Sin embargo, hay una excepción a esta regla en los túneles de ferrocarril en terreno montañoso (fig. I.1).

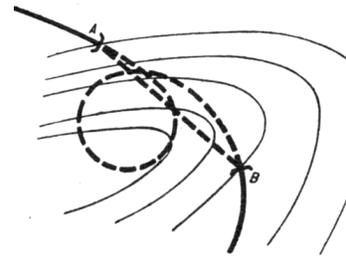


Fig. I.1 Túnel helicoidal⁽¹⁾

Si el trazado general exige la construcción de un túnel entre los puntos A (cota h_A) y B (cota h_B), el túnel tendría una pendiente:

$$(h_B - h_A) / (A * B)$$

si se trazara en línea recta.

Si esta pendiente es inferior a la admisible, se adopta el trazado rectilíneo, pero si es superior, hay que reducirla aumentando la longitud del túnel mediante un trazado en curva llegando hasta el trazado helicoidal formando un bucle completo.

En cuanto al *perfil longitudinal*, la solución no depende enteramente del proyectista, sino de la configuración del terreno y del papel que ha de desempeñar el túnel.



La construcción de túneles en pendiente no presenta dificultades particulares excepto la de *evacuación de las aguas subterráneas* si existen (fig. 1.2).

Desde este punto de vista es preferible construir los túneles *subiendo* desde aguas abajo hacia aguas arriba, con una pendiente que permita la libre eliminación de las aguas hacia la boca del túnel por cunetas dispuestas a este fin.

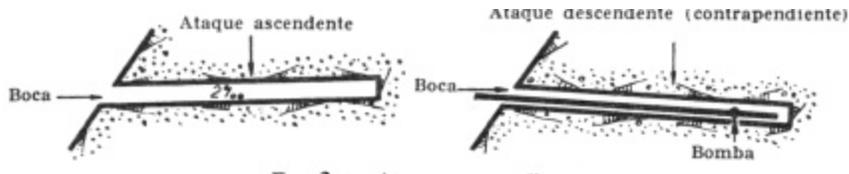


Fig. 1.2 Ataques en pendiente⁽¹⁾

Sin embargo, esta pendiente puede ser tal que haga fácil el empleo de palas cargadoras, pero que haga anormalmente costoso el transporte de los escombros.

En el caso contrario de *ataque en descenso (o contrapendiente)*, las aguas se concentran en el avance y es necesario evacuarlas por bombeo, lo que es costoso. Esto, por otra parte, puede convertirse en catastrófico si se encuentran bolsas de agua subterráneas que, en estas condiciones, pueden sumergir la obra.

El ataque horizontal no presenta mayor inconveniente, salvo el de imponer la obligación del bombeo para la evacuación de las aguas de filtración.

Por ello, siempre que se pueda, se intentará atacar los túneles subiendo, para que la eliminación de las aguas se realice normalmente. Si no es posible se emplearán bombas en el avance del ataque en contrapendiente.

Los afloramientos de agua, son uno de los mayores problemas a tener en cuenta durante la ejecución de túneles.

Cuando son previsible bombes en contrapendiente, se utilizan:

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



A menudo, cuando el túnel es largo hay que prever estaciones intermedias de bombeo.

En la proximidad del frente de ataque, las bombas son generalmente de aire comprimido.

Cuando el caudal de agua que aparece en el frente de ataque supera ciertos límites, no es posible trabajar más que con métodos especiales de los que hablaremos más adelante (escudo de aire comprimido, inyecciones en avance).

El terreno seco puede atacarse indiferentemente subiendo o bajando.

En los *túneles de contrafuertes para carreteras y vías férreas* debe conservarse una pendiente general ascendente en el sentido del valle.

Se adopta generalmente una pendiente única, que es la de la carretera, para los túneles de carretera, y la de la vía férrea reducida en un 10 a 20% para los túneles de ferrocarril, compensando esta pendiente la reducción de adherencia que produce la atmósfera húmeda del túnel.

Siendo estos túneles generalmente cortos, se atacan únicamente por el extremo inferior, subiendo (fig. I.3).

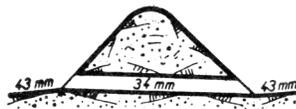


Fig. I.3 Túnel de contrafuertes para vías ferreas ⁽¹⁾

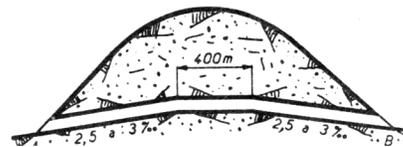


Fig. I.4 Túnel de Cumbre ⁽¹⁾

En los *túneles largos*, especialmente en los de cumbre, es conveniente tener pendiente a ambos lados para poder trabajar por ambos ataques, evacuando las aguas por gravedad.

Si ambas cabezas están sensiblemente al mismo nivel (fig. I.4) se adopta una pendiente y una contrapendiente de 2.5 a 3 mm, que permite una buena evacuación de las aguas.

Si las dos están a *niveles diferentes*, se prevén dos pendientes también diferentes. En la boca más alta se toma la pendiente mínima de 2 mm correspondiente a la fluencia crítica de las aguas. Por el contrario, en la más baja se adopta una pendiente fuerte para *equilibrar, si es posible, la longitud de ambos tramos*.



El esquema de la fig. 1.5 da el perfil longitudinal adoptado en el túnel del “Simplon”(que une a Suiza con Italia).

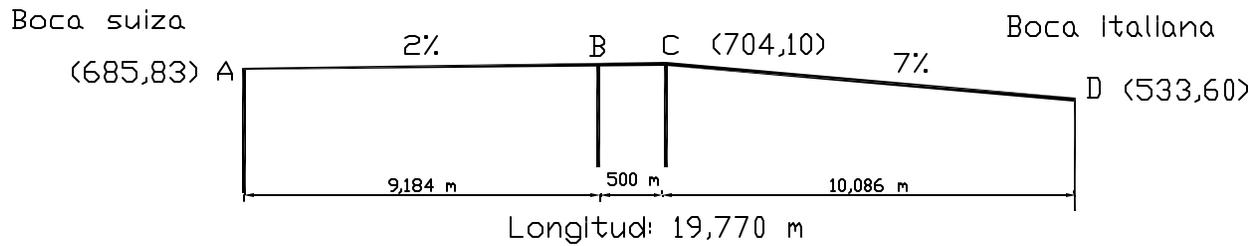


Fig. 1.5 Túnel del Simplon⁽¹⁾

En la zona más elevada de los túneles para vías férreas se prevé generalmente un tramo horizontal de 400 a 500 m.

En los *túneles subfluviales* (por ejemplo, las travesías del Sena por el Metropolitano en París), el problema se plantea de forma muy distinta ya que es forzoso ejecutar los túneles bajando.

Las aguas de las filtraciones se evacuan durante la obra mediante bombeo, siendo necesario también prever la evacuación del agua cuando el túnel está en servicio. Las aguas se reúnen en pozos de achique donde se evacuan generalmente por bombeo.⁽¹⁾

Secciones transversales para túneles de carreteras y vías férreas:

Vías férreas:

Para las vías férreas pueden utilizarse numerosas perfiles, según el tipo de vía y el terreno.

Los gálibos libres interiores son los siguientes para la vía normal en Francia (véase la fig. 1.6):

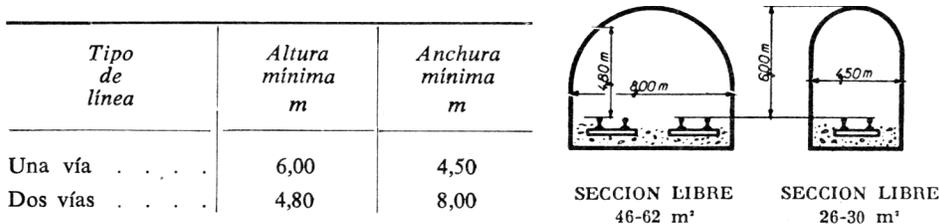


Fig. 1.6 Gálibo francés para vía normal.⁽¹⁾



Entre la superficie inferior de la bóveda y la parte superior de los carriles exteriores debe haber una altura libre mínima de 4.80 m. En curvas debe haber una distancia mínima de 20 cm entre la envolvente del gálibo y el revestimiento.

Las secciones transversales difieren según el terreno (fig. I.7).



Fig. I.7 Secciones transversales de túneles para vías férreas⁽¹⁾

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

En cambio, en las ciudades es frecuentemente forzoso, a causa de la falta de altura, rebajar las bóvedas aumentando su espesor, como ocurre en los túneles del metropolitano.

Las estaciones presentan, respecto a su anchura, una sección aún más rebajada (fig. I.8)

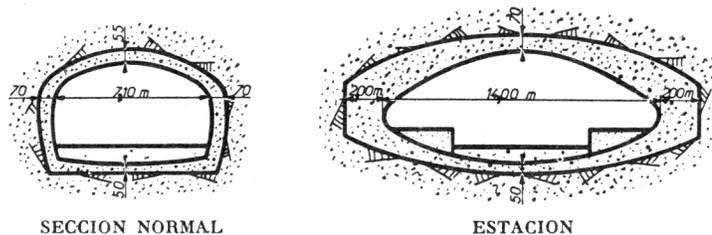


Fig. I.8 Sección de los túneles del metro de París.⁽¹⁾

El *espesor del revestimiento* depende de la naturaleza del terreno. Para las bóvedas en roca *compacta pero heladiza*, basta con un revestimiento delgado de mampostería o concreto trasdosado paralelamente:

Túnel de una vía: 35 – 50 cm.

Túnel de dos vías: 50 – 70 cm.



Si son de temer caídas de bloques, o si se trabaja en terreno poco consistente, se aumenta el espesor:

Túnel de una vía: 70 cm.

Túnel de dos vías: 90 cm.

Si se temen fuertes empujes se lleva el espesor en clave a 1 m o incluso 1.50 m, aumentando el espesor en arranques; la bóveda no se trasdosa paralelamente.

Los *muros laterales* tienen un espesor que varía de 0.70 a 1.50 m, según el terreno. En cuanto a la *solera*, puede bastar un espesor menor (50 a 70 cm).

Túneles de carretera:

Los túneles de carretera normales son un poco mayores que los de vía férrea para vía doble, pero cuando deben dar paso a más de dos vías de circulación es necesario ensancharlos dándoles un perfil transversal aplanado.

Entre los túneles de carretera de anchura excepcional, pueden citarse el de Saint – Cloud en la autopista del Oeste a la salida de París, que da paso a cinco vías de circulación (fig. 1.9).

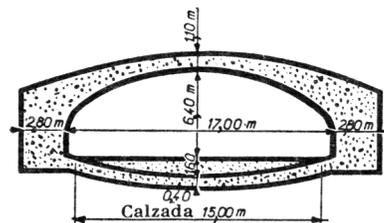


Fig 1.9 Túnel de carretera de Saint-Cloud, Francia⁽¹⁾

Su anchura es de 17 m. La bóveda tiene en clave un espesor de 1.10 m y los muros laterales miden 2.80 m.⁽¹⁾

Túneles Peatonales y para Ciclistas:

Los pasos a desnivel para peatones constituyen, por diversas razones, los túneles con menos restricciones, quizá sean también los más simples, debido a que el peatón es capaz de bajar y subir escaleras y pendientes muy empinadas, y doblar abruptamente las esquinas. Las limitaciones absolutas en lo que a los túneles se refiere son por consiguiente pocas, pero la mayoría de los modernos pasos a desnivel para peatones tienen por objeto ofrecer una atractiva alternativa



al uso de la superficie, como atravesar una calle y, por lo tanto, van más allá de las especificaciones mínimas. Los antiguos pasajes oscuros revestidos de ladrillos, húmedos y mal iluminados difieren considerablemente de los modernos pasajes subterráneos en el centro de la ciudad, espaciosos e iluminados, revestidos de decorativos azulejos y con rampas de fácil acceso.

Los pasajes subterráneos de poca profundidad se construirán probablemente por corte y relleno, a niveles más profundos, será necesaria la perforación de túneles. Las especificaciones mínimas de espacio serán: altura del piso al techo de aproximadamente 2.3 m, ancho libre para el paso cuando menos 2 m, preferiblemente mayor, y pendientes moderadas que deberán ser menores de un 10%. Donde sean aceptables los escalones, la pendiente puede ser tan pronunciada como 1 a 2, pero el ascenso total para cada tramo no deberá ser mayor de 3m.

Deberá haber drenaje adecuado para la peor tormenta, utilizando el almacenamiento y el bombeo si fuera necesario. Las emergencias, como las avenidas de mareas y la ruptura de las tuberías maestras de agua deberán examinarse y considerarse en la etapa de diseño, cuando menos en el grado necesario para prevenir grandes catástrofes.

La iluminación deberá ser de la mayor calidad posible y de construcción resistente y, si fuera posible, a prueba de vandalismo en los lugares expuestos.

La utilidad de un pasaje subterráneo se puede aumentar considerablemente con buenos acabados decorativos, que atraigan a los usuarios.

Por lo general, es importante que un pasadizo subterráneo sea tan poco profundo como sea posible para no desanimar al usuario con largas bajadas y subidas. Esto implica una mínima altura de techo y dificulta la incorporación de las luces de plafón.

Pasos a desnivel para ciclistas:

Existe en algunos sistemas de carreteras la necesidad de construir instalaciones necesarias para los ciclistas. Si los ciclistas utilizan los carriles principales puede ser peligroso y obstaculizar la circulación, se puede construir un pasaje subterráneo en los cruces de las calles, pero con pendientes no mayores de 1 a 10 y, por supuesto, sin escalones (Fig. I.10, ejemplo de túnel para peatones y ciclistas).⁽⁵⁾

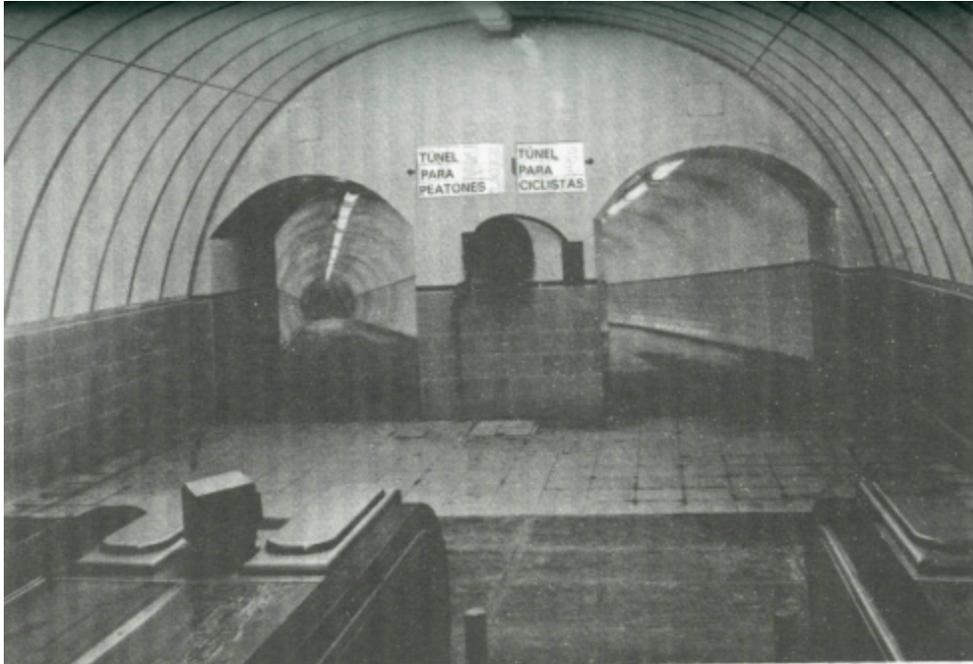


Fig. I.10 Túneles para peatones y ciclistas bajo el río Tyne.⁽⁵⁾

Túneles de navegación interior:

Los túneles de navegación interior que permiten el paso de canales son generalmente de grandes dimensiones.

Entre los túneles excepcionales puede citarse el de Rove, que da paso entre Marsella y el Lago de Berre, en una longitud de 7 Km, a la sección marítima del canal de Marsella al Ródano, y admite buques para navegación marítima de 4 m de calado (fig. I.11).

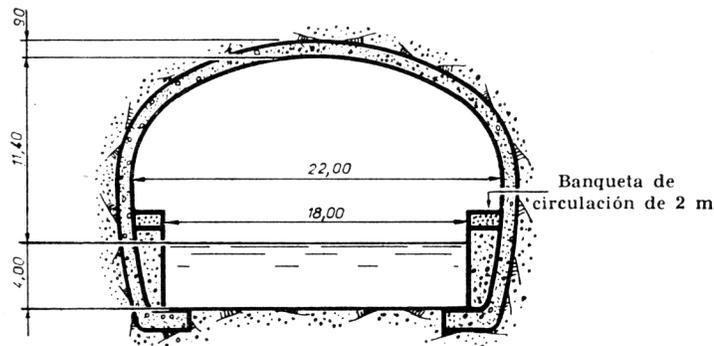


Fig. I.11 Túnel del Rove.⁽¹⁾

Este túnel, construido en caliza, tiene una anchura total de 22 m, dos paseos de 2 m y una altura sobre el nivel del agua de 11.40 m.⁽¹⁾



Túneles para trenes subterráneos:

Estos difieren significativamente en muchos aspectos de las líneas principales de los ferrocarriles. El túnel y el equipo rodante están diseñados con un sistema integrado, o deberían serlo, si es que es razonablemente autónomo. A veces es necesario adoptar la línea principal o el equipo rodante suburbano, pero es poco probable que esto lleve a una economía global a menos que la línea sea esencialmente una sección subterránea de un ferrocarril principal en la superficie.

Los túneles para el transporte subterráneo (tren subterráneo) son intrínsecamente urbanos, pero incluyen frecuentes secciones subacuáticas debido a que son pocas las grandes ciudades que no tienen ríos que cruzar, y muchas son puertos. También se encuentran, en menor escala, túneles construidos en colinas, pero no túneles montañosos en su amplia acepción. En general, los túneles para los trenes subterráneos son tan poco profundos como sea posible, debido a la importancia de un fácil y rápido acceso hasta la superficie y desde ella.

Muchas ciudades grandes están situadas a orillas de los ríos y están construidas en terrenos aluviales, lo que trae como consecuencia que si los túneles están muy cerca de la superficie deberán construirse en terrenos blandos y, generalmente, acuíferos. No obstante, en muchas otras ciudades, la roca está presente a muy poca profundidad o aflorando a la superficie en áreas accidentadas. Típicamente, los túneles para los trenes subterráneos presentan una amplia variedad de terreno y, generalmente, considerable variabilidad a lo largo de cualquier línea.

En cuanto a las pendientes de este tipo de túneles pueden ser más pronunciadas que en los túneles de las líneas principales, debido a que el sistema no tiene que conducir trenes cargados con mercancías pesadas, sino que se pueden equipar coches relativamente ligeros accionados por motores múltiples. En contraste con algunos túneles de las líneas principales, se consideran generalmente como esenciales los revestimientos impermeables; por consiguiente, los rieles están suficientemente secos para dar una buena adhesión.

A veces, es conveniente un deliberado perfil en zigzag, para que los trenes suban hasta las estaciones, que la pendiente ayude al frenado y que reabsorba la energía cinética, en tanto que un descenso con ayuda de la aceleración es útil para salir de las estaciones. Se podría obtener una ventaja adicional al hacer menos profunda la estación, pero no sería práctico una mayor profundidad de excavación por el método de corte y relleno entre las estaciones.

Al tratar de la forma, tamaño y estructura se encontrarán diferencias sustanciales según si la construcción ha sido por perforación del túnel o por corte y relleno. La selección del método es un asunto complicado, pero es probable que se prefiera el corte y relleno en los lugares que sea posible seguir una ruta subterránea poco profunda sin los obstáculos que causan las calles y servicios, mientras que la excavación de túneles más profundos se hace progresivamente más necesaria en zonas urbanas altamente congestionadas.⁽⁵⁾

Túneles para centrales hidroeléctricas:

El agua desviada para la utilización en estaciones hidroeléctricas se transporta de un depósito construido en un valle adyacente, a la central generadora, situada en una elevación más baja, los dos grupos principales de túneles para este propósito pueden ser distinguidos como:

Los que descargan con la sección completa directamente a las turbinas se conocen como túneles de presión debido a la diferencia considerable en la elevación que los somete a muchas presiones internas. En contraste, los túneles construidos para la función única de transportar el agua por gravedad normal a partir de un lado de una montaña al otro, o del punto de la desviación a la cabeza de la pendiente escarpada, se llaman *túneles de descarga*. (Fig. I.12).

Entre estos grupos existen diferencias significativas hasta en las cargas, las secciones transversales y la forma de los túneles, la presión está sujeta a una presión interna del agua la cual es con frecuencia excesiva por la presión de la roca externa y del agua subterránea. La resultante del esfuerzo tensionante se puede resistir lo más económicamente posible por una sección transversal circular. Los túneles con grandes presiones por lo tanto se construyen con una sección transversal circular o en forma de herradura, esta última puede ser más fácilmente adaptable para los métodos de perforación. Para resistir las fuerzas de tensión en estas secciones transversales se proporciona una guarnición por lo menos de concreto reforzado, pero las guarniciones de acero son también comunes. Estas guarniciones tienen también una función de sellado, puesto que el agua bajo alta presión es más probable que se escape a través de las fisuras y de las grietas en la roca.

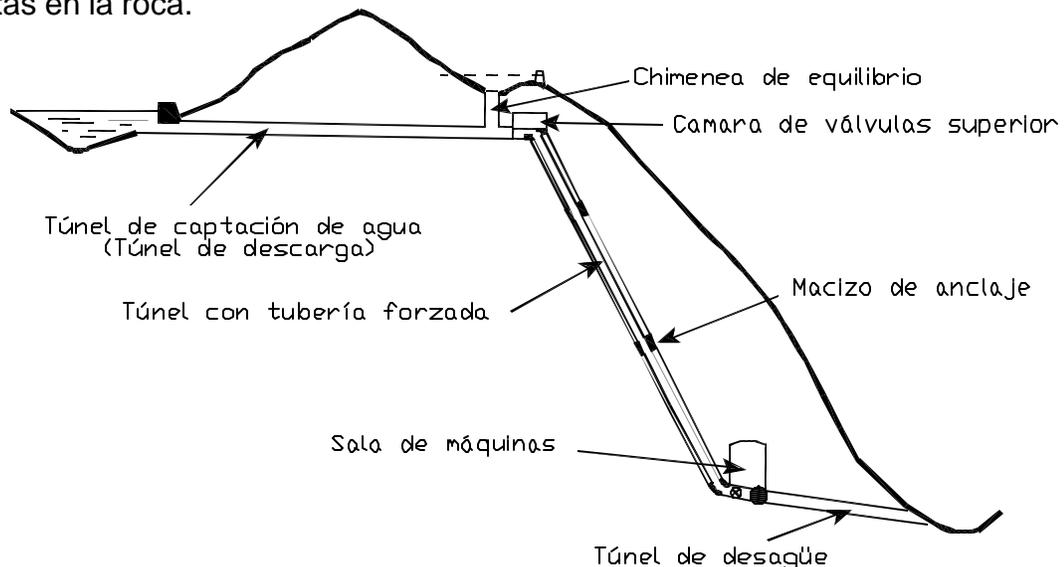


Fig. I-12 Esquema de los túneles hidráulicos en una central hidroeléctrica⁽⁹⁾

La descarga de un túnel, por otra parte, se diseña generalmente con una sección transversal en forma de herradura similar a la de túneles ferroviarios, la presión interna ejercida por el agua transportada es pequeña en comparación con la presión de la roca que actúa en el túnel, por lo que la sección de herradura con



una base invertida se ha encontrado más económica para los túneles de este tipo. Se ha observado que el uso de un cierre hidráulico interior confiable es esencial.⁽⁴⁾

Túneles para abastecimiento de agua

El abastecimiento de agua potable a las ciudades por medio de los acueductos es una necesidad que se remonta a tiempos muy antiguos, y que demanda a menudo la construcción de túneles. Los acueductos desde una presa hasta la ciudad pueden estar contruidos por tuberías aéreas o que corran sobre la superficie o en una zanja; pero los túneles son necesarios cuando es preciso cruzar crestas o cuando sean económicamente ventajosos, como en el caso del abastecimiento a la ciudad de Londres, donde existen numerosas obstrucciones y se dispone de una ruta conveniente a cierta profundidad en la arcilla. Por lo general, el agua no está a muy alta presión en dichos túneles, y pueden hasta fluir parcialmente llenos. Los principales requerimientos que deben cumplir los acueductos son: un gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo de acuerdo con el volumen y la velocidad del agua requeridos, una perforación lisa y sin obstrucción, y un revestimiento impermeable.

La fórmula de Manning, $v = k R^{2/3} S^{1/2}$ combina la velocidad del agua, la rugosidad del túnel (k), el radio hidráulico medio (R) y el gradiente hidráulico (S). k es el factor de rugosidad que varía desde un valor de 100 para un túnel de grandes dimensiones con paredes excepcionalmente lisas, hasta un valor extremadamente bajo de 25 para un túnel sin revestimiento perforado en la roca. Para un túnel revestido de concreto se tendrá que determinar el valor para un revestimiento liso, que se ajuste a condiciones especiales.

Aunque las pequeñas pérdidas de agua debidas a las fugas en un acueducto pequeño pueden carecer en sí de importancia a menos que se amplíen por la erosión, la pérdida acumulativa en un acueducto de gran longitud es excesiva y es necesario, por consiguiente, aplicar altas normas de calidad. La contaminación por infiltración es menos probable, excepto quizá en el caso en que falle el abastecimiento o se vacíe la tubería, pero se debe prevenir.

Se determinan las dimensiones de los túneles para conducir el volumen necesario, utilizando el gradiente disponible, y se especifican los tipos de revestimientos para que cumplan tres funciones principales: primera, cualquier soporte necesario del suelo excavado; segunda, que sea una perforación adecuadamente lisa; tercera, impermeabilidad en ambas direcciones. Como existe un diámetro práctico mínimo de aproximadamente 2 m para túneles que no sean los frentes más cortos, el tamaño del túnel será a veces mayor de lo necesario. Son fundamentales el control mediante tubos de alimentación y las instalaciones para la inspección y el mantenimiento; y tal vez sea necesario incluir pozos de alivio. Es probable que los gastos sean mucho más uniformes en el abastecimiento urbano que en los túneles hidroeléctricos.

Túneles de servicios:



Es cada vez mayor la utilización de túneles que llevan cables y servicios mediante tuberías, ya sea bajo los ríos o en las ciudades. Cuando los cables eléctricos llevan mucha energía producen necesariamente calor, el cual se debe disipar. En algunos casos es adecuado el enfriamiento por aire, pero puede ser necesario el enfriamiento por circulación de agua. Para los efectos producidos por el calor que generan las tuberías maestras que están instaladas en los túneles de las carreteras se necesitan instalaciones especiales.

Se ha considerado la operación de cables a temperaturas cercanas al cero absoluto (-373°C) para aprovechar la superconductividad que elimina toda la resistencia eléctrica y las consiguientes pérdidas de calor. Estos cables requieren instalaciones muy especiales para la refrigeración y una calidad muy alta de aislamiento térmico, lo que hace casi inevitable el transporte por medio de túneles.

Las redes telefónicas en las ciudades utilizan también los túneles a una escala adecuada, que permite el acceso para tender e inspeccionar, y espacio para la expansión, al igual que da protección contra los peligros de tener los ductos tendidos sobre el terreno.

Las tuberías de gas se acomodan fácilmente en túneles especialmente preparados para el servicio individual. Es necesario tomar precauciones contra las fugas y comprobar cualquier escape que pudiera provocar la formación de una atmósfera tóxica o explosiva. Se ha propuesto utilizar los túneles para el almacenamiento y suministro combinados a alta presión y baja temperatura. Un solo kilómetro en un túnel de 3 m podría proporcionar una gran capacidad de almacenamiento y reducir considerablemente la necesidad de almacenamiento superficial, y también de las grandes tuberías maestras que conducen gastos elevados.

Cabe preguntarse por qué se tiene que conducir cada servicio por separado, enterrados en zanjas bajo las avenidas, en lugar de que un solo túnel lleve la diversidad de servicios requeridos en una ciudad. Son muy pocos los túneles de este tipo que se han diseñado con tal fin. La respuesta se basa por un lado en el modo *ad hoc* en que se han desarrollado los pueblos y las ciudades y los mismos servicios; por otro, en las numerosas compañías y funcionarios que intervienen y, además en ciertas dificultades de ocupación y seguridad mutuas.⁽⁴⁾



I.4 ESTUDIOS DEL MACIZO ROCOSO

La Mecánica de las Rocas se ocupa de estudiar el comportamiento de las masas de roca bajo la acción de las fuerzas producidas ya sea por fenómenos naturales o como resultado de excavaciones o construcciones hechas por el hombre. Para lograr este fin se requiere determinar las propiedades mecánicas del macizo rocoso, mediante ensayos de campo o de laboratorio, cuyos resultados cuantitativos son utilizados en fórmulas matemáticas, en modelos mecánicos a escala o en correlaciones pertinentes en un problema específico.

Las masas de roca están constituidas por bloques de forma irregular cuyas propiedades varían no solo de una clase de roca a otra, sino también de un punto a otro dentro de una masa del mismo tipo. Frecuentemente, un macizo rocoso está formado por rocas de distinto origen geológico, con diferentes condiciones de fragmentación, grado de alteración variable y, a menudo, interrumpido por fallas tectónicas o cavernas. Además, los constantes movimientos de la corteza terrestre introducen estados de esfuerzos naturales muy variables en magnitud, dirección y sentido; tales esfuerzos influyen considerablemente en las propiedades mecánicas de las rocas. En suma, al utilizar las leyes de la mecánica para investigar el comportamiento de una masa de roca el ingeniero debe ser consciente de que está tratando con un medio discontinuo, heterogéneo, y anisótropo, cuyas características naturales no puede controlar a voluntad y debe estudiarlas en cada caso particular, a fin de conocer los límites de validez de la aplicación de las teorías.

De acuerdo con Enrique Tamez G. en el libro Construcciones en Roca, las características naturales de las rocas que interesan al ingeniero civil son las siguientes:

- Resistencia
- Deformabilidad.
- Permeabilidad.
- Fragmentación natural.
- Estado natural de esfuerzos.
- Dureza y abrasividad.
- Tenacidad.
- Alterabilidad.

La *resistencia y deformabilidad* de un macizo rocoso son propiedades mecánicas que dependen, por una parte, de la resistencia y compresibilidad del material pétreo que constituye los bloques del macizo y, por otra, del grado de fragmentación de éste. De estas consideraciones resulta obvio que la determinación de la resistencia y compresibilidad de un macizo rocoso debe hacerse fundamentalmente mediante pruebas de campo.



La *permeabilidad* de un macizo rocoso es función del grado de fragmentación y de la abertura de las fisuras, ya que la permeabilidad intrínseca de los bloques es despreciable.

Todo macizo rocoso natural se encuentra dividido en bloques irregulares, como consecuencia de los esfuerzos tectónicos o por planos físicos como los de estratificación, como ocurre en las rocas sedimentarias y metamórficas o bien, por enfriamiento de las masas de roca ígnea. El comportamiento de un macizo rocoso está influenciado de manera importante por la orientación de los planos de fisura que en ocasiones tiene direcciones preferentes y en otras, por el contrario, pueden tener orientación completamente al azar; la separación entre las fisuras y el tipo de material que las rellena, si es que existe, son características de la *fragmentación natural* que debe conocerse con detalle para prever el funcionamiento del macizo en cualquier obra de ingeniería.

Es importante conocer la magnitud, dirección y sentido de los esfuerzos que existen en el interior de una masa de roca, porque las propiedades de resistencia y deformabilidad dependen, según se ha podido demostrar experimentalmente, del nivel de esfuerzos a que los bloques se encuentran sometidos. Es conveniente agregar que los esfuerzos existentes en un punto del interior de una masa de roca no sólo dependen del peso del material que se encuentra sobre ese punto sino que también son función de los movimientos tectónicos que han actuado en el pasado sobre ese punto. Existen ya técnicas desarrolladas para medir dichos *esfuerzos en la naturaleza*.

Las características hasta aquí comentadas son de importancia común en los diseños de túneles; pero no de menor importancia son otras propiedades como la *dureza*, la *abrasividad* y la *tenacidad* de los bloques de roca, que tienen una influencia directa en las dificultades que pueden encontrarse en la ejecución de perforaciones y en los métodos de excavación.

Pero todas las rocas son susceptibles de ser atacadas por los agentes naturales del intemperismo en mayor o menor grado, el cual se define como su *alterabilidad*. Puesto que las obras de ingeniería deben tener una duración razonable, es importante conocer el grado de alterabilidad de las rocas en que se construya. Esta propiedad depende básicamente de la composición química de los minerales y del arreglo estructural o grado de agregación de sus partículas.

De esta descripción muy general del campo de actividades de la Mecánica de las Rocas podríamos establecer que al ingeniero le preocupa medir y expresar cuantitativamente las propiedades mecánicas de los macizos en sus obras. Pero hemos mencionado también que la utilización de tales valores numéricos requiere de un conocimiento íntimo y muy detallado de la estructura del macizo rocoso en cuestión. Es aquí, en este aspecto particular, en donde interviene de manera muy importante la Geología Estructural.



De acuerdo con la definición de la Enciclopedia Americana “La Geología Estructural es el estudio sistemático de los rasgos estructurales de las masas de roca... La palabra estructura se refiere al arreglo producido en la roca (1) por la presencia de fenómenos tales como capas, lentes o vetas, que se deben a diferencias en el material; (2) por la manera en la cual se apoyan unos cuerpos de roca contra otros y aún se intercalan; y (3) por grietas, zonas de cisallamiento, y venas rellenas de minerales que cruzan a través de ellos”.

“Muchas estructuras son impresas en las rocas en el curso de su formación. Tales son: (1) la estratificación tan característica de los sedimentos; (2) las grietas que se forman en los lodos y masas rocosas en estado de fusión cuando se contraen o al enfriarse; (3) la complicada intercalación que resulta cuando un sedimento más joven se deposita sobre la superficie erosionada y fuertemente disectada de un sedimento anterior. Estos rasgos estructurales se llaman primarios, en contraste a otros muchos que tienen lugar cuando los cuerpos rocosos son posteriormente sometidos a compactación, distorsión, fracturamiento y contracción, en el curso de los procesos de alabeo, y flexión que acompañan a los procesos orogénicos (formación de montañas). La descripción sistemática y análisis de estas estructuras secundarias en las rocas se llama tectónica...”⁽²⁾

Para conocer el comportamiento de las rocas y determinar sus propiedades, es necesario llevar a cabo ensayos de campo y ensayos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio, en el caso de las rocas tienen muchas limitaciones y solamente en casos muy simples se pueden establecer correlaciones entre los valores numéricos de alguna propiedad, determinados en el laboratorio, y los que se determinan en el campo. Esto se debe a que, en el muestreo de roca, normalmente se obtienen núcleos de pequeñas dimensiones, cuyas características y comportamiento difieren considerablemente de aquellas de los macizos rocosos que normalmente contienen juntas, fracturas, fallas y zonas intemperizadas y se encuentran sujetos a esfuerzos residuales y otras condiciones muy diferentes a las que se imponen a los especímenes durante los ensayos de laboratorio.

Las propiedades de las rocas que interesan al ingeniero civil son fundamentalmente permeabilidad, deformabilidad y resistencia. Estas propiedades se determinan normalmente mediante ensayos de campo. Sin embargo, con alguna frecuencia conviene llevar a cabo colateralmente ensayos de laboratorio.

En la tabla I.1, se comparan los valores de permeabilidad obtenidos en el laboratorio para 4 clases de roca y un concreto. Se observa que el valor de la permeabilidad de las rocas, medida en el laboratorio, es en términos generales mayor que aquella del concreto, aunque el orden de magnitud es el mismo. Se concluye que la permeabilidad de la roca sana determinada en el laboratorio es, para fines prácticos, semejante a la de un buen concreto, es decir, las rocas son prácticamente impermeables.



ROCA	K (DARCY)
GRANITO	7×10^{-11} a 2.5×10^{-10} cm/seg
MARMOL	8×10^{-10} a 2.5×10^{-8} cm/seg
CALIZA	8×10^{-10} a 1×10^{-6} cm/seg
ARENISCA	2×10^{-7} a 4×10^{-6} cm/seg
CONCRETO	1×10^{-11} a 1×10^{-9} cm/seg

Tabla I.1 Permeabilidad de algunas rocas determinada en el laboratorio⁽²⁾

$$Q = K \cdot A \cdot i$$

Q = gasto en cm³/seg

K = constante de Darcy (cm/seg)

A = Area en cm²

i = Gradiente hidráulico = h/t (adimensional)

h = Carga de agua en cm

t = Espesor en cm

En la Tabla I.2 se comparan los valores del módulo de elasticidad de 4 clases de roca con el correspondiente al concreto. Se observa que la roca sana, ensayada en el laboratorio, es en general menos deformable que el concreto, es decir posee un módulo de elasticidad mayor. Esto sucede con la generalidad de las rocas con excepción de alguna caliza porosa, algunas tobas y ciertas areniscas.

ROCA	MÓDULO DE ELASTICIDAD
GRANITO	4 a 6×10^5 kg/cm ²
GABRO	1 a 1×10^6 kg/cm ²
CALIZA	3 a 6×10^5 kg/cm ²
ARENISCA	1 a 3×10^5 kg/cm ²
CONCRETO	1.5 a 3×10^5 kg/cm ²

Tabla I.2 Módulo de elasticidad de algunas rocas determinado en el laboratorio⁽²⁾

En la Tabla I.3, se comparan los valores de resistencia a compresión simple de 7 clases de roca con la de los concretos convencionales. Se observa que, a pesar de la amplitud del intervalo de resultados, la tendencia es en general a que las rocas posean una mayor resistencia que el concreto, con excepción de algunas tobas, calizas y areniscas.



En conclusión, puede decirse que, si nos basáramos únicamente en los resultados de los ensayos del laboratorio, las rocas poseen mejores características deseables que un buen concreto. Es decir, si los macizos rocosos estuvieran constituidos por roca sana, no existirían problemas importantes de construcción puesto que siendo mayor la resistencia, menor la deformabilidad, e igual la impermeabilidad de la roca que la de un buen concreto, las estructuras que construyéramos, no serían mejores que la roca misma.

ROCAS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE
Granito	370 – 3790 Kg/cm ²
Basalto	1300 – 3500 Kg/cm ²
Toba	35 – 520 Kg/cm ²
Gneiss	810 – 3270 Kg/cm ²
Esquisto de Biotita	80 – 1200 Kg/cm ²
Caliza	60 – 3600 Kg/cm ²
Arenisca	110 – 2520 Kg/cm ²
Concreto	200 – 400 Kg/cm ²

Tabla I.3 Resistencia de algunas rocas determinada en el laboratorio⁽²⁾

Lo anterior viene a confirmar lo que al principio se decía en cuanto a que los resultados del laboratorio deben ser analizados cuidadosamente teniendo en cuenta todas sus limitaciones, con objeto de evitar conclusiones falsas respecto a las propiedades y comportamiento de las rocas. Por otro lado, se confirma que la única forma de conocer las propiedades mecánicas reales de la roca y prever su comportamiento es efectuando ensayos de campo en el sitio mismo de la obra.

La notable diferencia entre las propiedades de la roca determinadas se debe fundamentalmente a la presencia de: 1) Esfuerzos residuales; 2) Juntas y fallas; 3) Intemperismo y alteración y 4) Cavernas.

Los especímenes que se ensayan en el laboratorio provienen normalmente de núcleos extraídos mediante perforaciones y sondeos, o bien de bloques de roca labrados. Estos especímenes se encuentran libres de esfuerzos residuales, mientras que la roca en el sitio se encuentra normalmente sujeta a estados triaxiales de esfuerzos originados por la gravedad, movimientos tectónicos y plegamientos. El estado natural de esfuerzos en la roca altera considerablemente las tres propiedades fundamentales mencionadas: permeabilidad, resistencia y deformabilidad. El grado en que estas propiedades se ven afectadas dependerá del orden de magnitud de los esfuerzos residuales. Así por ejemplo la deformabilidad disminuye considerablemente a medida que aumentan los esfuerzos de compresión internos; la resistencia al cortante aumenta al aumentar los esfuerzos internos pero, debe tenerse en cuenta que las excavaciones



producen un alivio de esfuerzos en las paredes cortadas que origina un estado de esfuerzos más desfavorable que el inicial y por consiguiente una disminución en la resistencia.

Los estudios de laboratorio proporcionan un buen índice cualitativo del efecto, en la resistencia y la deformabilidad, del estado interno de esfuerzos en la roca. En ensayos triaxiales de laboratorio, se ve claramente el notable aumento en la resistencia de una roca al aplicársele una presión confinante. Se observa en estos ensayos un aumento considerable en los módulos de deformabilidad. Con relación a la permeabilidad puede decirse que en la roca sana el efecto del estado de esfuerzos es inapreciable, mientras que en la roca fracturada los esfuerzos pueden originar un cierre de fracturas que ocasiona una disminución en la permeabilidad.

Las juntas y fallas en la roca constituyen normalmente planos de debilidad cuya importancia puede ser muy pequeña, como en el caso de fracturas soldadas y microfisuras, o bien muy grande, como en el caso de fallas en las que han ocurrido desplazamientos tangenciales y se encuentran rellenas de materiales poco resistentes y muy deformables. Estos defectos estructurales pertenecen a dos clases fundamentales, las juntas que incluyen fisuras y fracturas en las que no ha ocurrido desplazamiento tangencial y las fallas que son fracturas por corte a lo largo de las cuales ha ocurrido un desplazamiento tangencial.

Las características de una junta, de interés para el estudio del comportamiento de un macizo rocoso son: 1) Su orientación, definida por el rumbo y echado; 2) Su espaciamiento, o sea la distancia centro a centro entre juntas paralelas adyacentes en un determinado sistema; 3) su ancho, o sea el espacio abierto entre los lados opuestos de una junta; 4) la regularidad de la superficie, definida por la rugosidad y la curvatura y 5) los materiales que rellenan la junta, tales como productos de intemperismo y alteración y minerales secundarios. En la Tabla 1.4 se indican algunos valores numéricos, definiciones y clasificación de estas características.



CAPÍTULO I: NOCIONES DE LOS TÚNELES



1) ORIENTACIÓN	{	RUMBO (Rumbo magnético de la intersección del plano de la junta con el horizonte) ECHADO (Angulo que forma el plano de la junta con el horizonte)										
2) ESPACIAMIENTO	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>MUY PRÓXIMAS</td> <td style="text-align: right;">5 cm.</td> </tr> <tr> <td>PRÓXIMAS</td> <td style="text-align: right;">5 - 30 cm.</td> </tr> <tr> <td>MODERADAMENTE PRÓXIMAS</td> <td style="text-align: right;">30 - 90 cm.</td> </tr> <tr> <td>SEPARADAS</td> <td style="text-align: right;">90 - 300 cm</td> </tr> <tr> <td>MUY SEPARADAS</td> <td style="text-align: right;">más de 300 cm</td> </tr> </table>	MUY PRÓXIMAS	5 cm.	PRÓXIMAS	5 - 30 cm.	MODERADAMENTE PRÓXIMAS	30 - 90 cm.	SEPARADAS	90 - 300 cm	MUY SEPARADAS	más de 300 cm
MUY PRÓXIMAS	5 cm.											
PRÓXIMAS	5 - 30 cm.											
MODERADAMENTE PRÓXIMAS	30 - 90 cm.											
SEPARADAS	90 - 300 cm											
MUY SEPARADAS	más de 300 cm											
3) ANCHO	{	CERRADAS ABIERTAS										
4) REGULARIDAD	{	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top;">GRANDE ESCALA</td> <td style="font-size: 3em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: top;">Plana Curva Irregular</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;">PEQUEÑA ESCALA</td> <td style="font-size: 3em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: top;">Lisa Rugosa</td> </tr> </table>	GRANDE ESCALA	{	Plana Curva Irregular	PEQUEÑA ESCALA	{	Lisa Rugosa				
GRANDE ESCALA	{	Plana Curva Irregular										
PEQUEÑA ESCALA	{	Lisa Rugosa										
5) MATERIALES DE RELLENO	{	PRODUCTOS DE INTEMPERISMO PRODUCTOS DE ALTERACIÓN HIDRÓTERMICA MINERALES SECUNDARIOS DEPOSITADOS POR AGUAS SUBTERRANEAS										

Tabla I.4 Principales características de una junta en un macizo rocoso.⁽²⁾

Las características de una falla son: 1) orientación, definida como en el caso de las juntas en términos del rumbo y echado; 2) el ancho, y 3) los materiales que constituyen la falla. Estos últimos pueden estar constituidos por rocas fragmentadas (brechas), rocas pulverizadas, materiales arcillosos, y materiales miloníticos.

En cuanto al efecto de las juntas y las fallas en las propiedades de la roca, puede decirse que la permeabilidad aumenta notablemente con la presencia de juntas y fallas, especialmente al disminuir el espaciamiento y aumentar el ancho de las primeras y debido a la presencia de materiales fragmentados permeables en las segundas y que puede disminuir cuando las juntas y las fallas se encuentran rellenas de materiales impermeables que, por otro lado, pueden ser arrasados o disueltos con la presencia de agua con el consiguiente aumento en la resistencia.

El intemperismo ocurre normalmente en las zonas de circulación activa de agua y es por lo tanto esencialmente un fenómeno sub-superficial. Sin embargo, algunas zonas altamente intemperizadas pueden encontrarse cubiertas por espesores considerables de roca del tipo lava o depósitos sedimentarios.



Las aguas termales subterráneas también producen alteraciones importantes a profundidades variables, conocidas como alteraciones hidrotérmicas. Los síntomas de descomposición química de la roca producida por el intemperismo son: pérdida del brillo natural, oxidación local, sonido apagado y tendencia a la desintegración al ser expuesta a la atmósfera.

La presencia del intemperismo y de las alteraciones hidrotérmicas aumenta considerablemente la permeabilidad de las rocas, aumenta también notablemente su deformidad y disminuye considerablemente su resistencia. En zonas alteradas estas tres propiedades básicas varían normalmente en forma muy errática.

Las cavernas de solución ocurren principalmente en calizas y dolomías, en las cuales la calcita es arrastrada en solución dejando cavidades abiertas. En algunas ocasiones existen acumulaciones de arcilla en las cavernas. Estas cavernas normalmente siguen trayectorias muy irregulares. Debido a su existencia, la permeabilidad puede incrementarse en forma muy considerable mientras que el aumento de deformabilidad y la disminución de resistencia ocurren solamente en la proximidad de estas cavidades.

A pesar de sus limitaciones, los ensayos del laboratorio se llevan a cabo frecuentemente con objeto de completar la información que se obtiene en el campo. Estos ensayos incluyen además de la determinación de la permeabilidad, deformabilidad y resistencia, otros como el análisis petrográfico, la determinación de las propiedades físicas, los ensayos de durabilidad, etc.⁽²⁾

Prueba de permeabilidad de las Masas Rocosas:

Mediante esta prueba se obtiene el grado de permeabilidad de los macizos rocosos y, es importante para:

Prever el flujo y los problemas de estabilidad que éste puede ocasionar a las excavaciones que se proyecten bajo el nivel freático.

Tomar medidas de tratamiento para garantizar un grado razonable de estanqueidad y estabilidad en presas y otras obras civiles.

Prueba Lugeon:

Esta prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación y se valora la permeabilidad de la masa rocosa localizada bajo el nivel freático. Fig. I.13. La prueba se realiza en tramos de 5 m, limitados en sus extremos por empaques neumáticos, mecánicos o de copas de cuero. La secuencia de presiones aplicadas debe ser 1, 2, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4, 2, 1, 1 kg/cm². Es preciso mantener cada incremento de presión durante un tiempo mínimo de 10 min., y verificar que, en ese intervalo, el gasto sea constante.

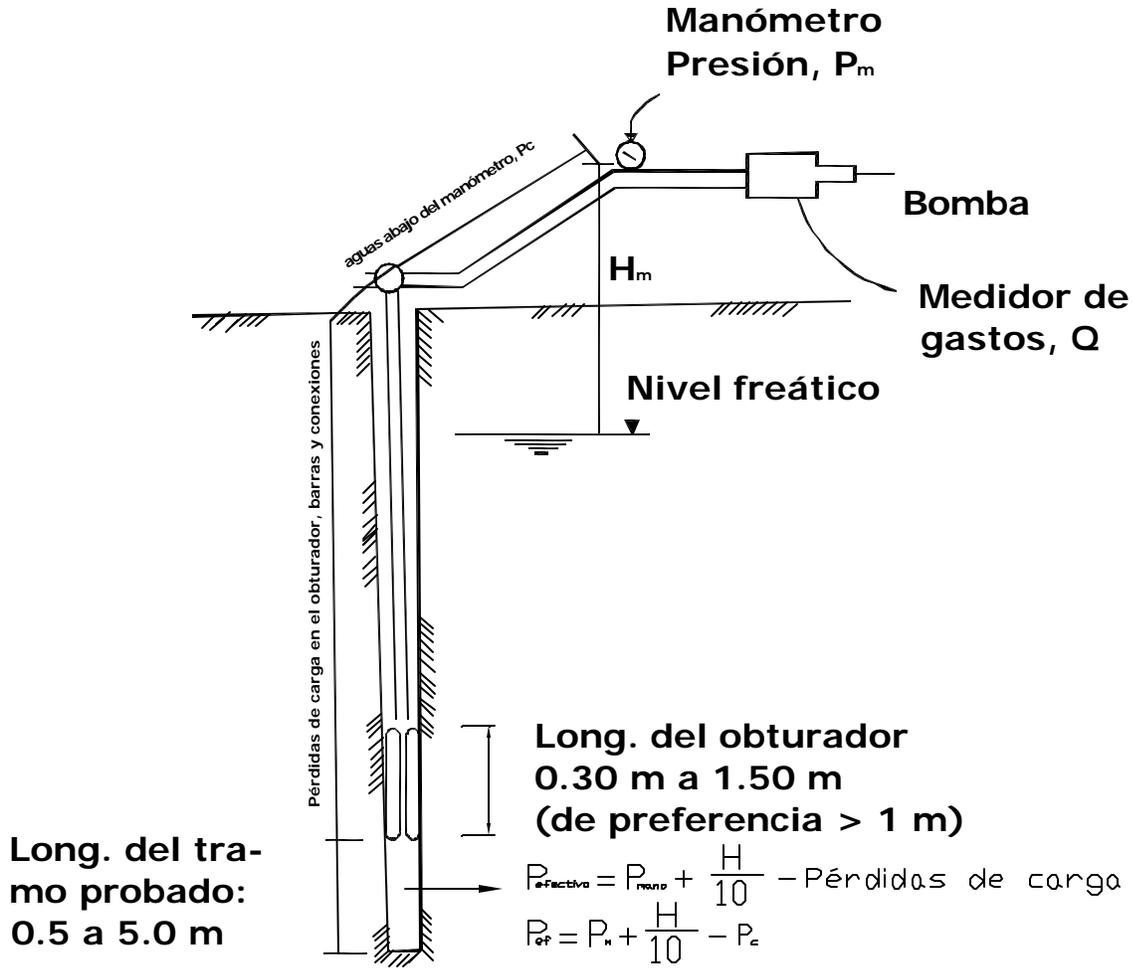


Fig. I.13 Prueba Lugeon⁽⁸⁾

Para medir el gasto de agua inyectada, se aconsejan medidores tipo Venturi. El agua de inyección debe estar exenta de sólidos para evitar taponamiento en las paredes del pozo. Fig. I.14

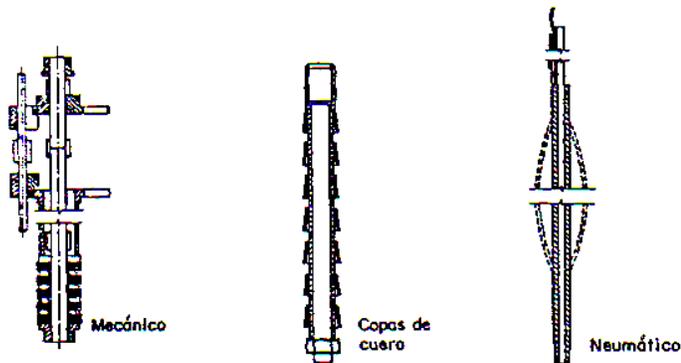


Fig. I.14 Principales tipos de obturadores⁽⁸⁾



Prueba Matsuo Akai:

Esta es utilizada para determinar el nivel freático en la zona donde se llevará a cabo la obra. La prueba se hace en zonas donde la roca se encuentra a una profundidad (Y).

El equipo necesario para la realización de la prueba consiste en un sistema de control de niveles con buena aproximación y un medidor de gasto.

El procedimiento consiste en excavar una zanja rectangular en el manto donde se desea efectuar la medición de ancho B, profundidad H y con una longitud inicial aproximada de 2B. Llenar con agua y hacer que el nivel permanezca constante. El gasto necesario se anota (Q_1).

Excavar una longitud adicional L_a , con la misma sección y repetir el procedimiento midiendo el gasto (Q_2).

La diferencia entre los gastos obtenidos será igual al que pasa por la zona excavada;

$$Q = (Q_2 - Q_1) \text{ (Fig. I.15.)}$$

El coeficiente de permeabilidad se estima empleando las fórmulas siguientes:

$$k = \frac{(Q_2 - Q_1)}{L_a(B + 2H)} \quad \text{Si } \gamma < 3/2 (H+2B)$$

$$k = \frac{(Q_2 - Q_1)}{L_a(B - 2H)} \quad \text{Si } \gamma > 3/2 (H+2B)$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad (cm/seg.)

Q_1 y Q_2 = Gastos medios ($\text{cm}^3/\text{seg.}$)

H = Tirante de agua (cm)

B = Ancho de la sección, (cm)

L_a = Longitud adicional excavada, (cm)

γ = Profundidad del manto permeable, (cm)



Prueba Nasberg:

Esta es otra prueba para determinar el nivel freático en el subsuelo. El equipo necesario para la prueba consiste en una sonda eléctrica para medición de niveles de agua, ademe para medición de gasto y un tanque de suministro.

El procedimiento consiste en colocar el tubo de ademe dentro de la perforación y medir la profundidad total del pozo. Levantar el ademe una longitud L. Se establece un gasto tal que la carga hidráulica sobre el fondo, h, permanezca constante durante diez minutos. Se repite la operación anterior para diferentes cargas hidráulicas. (Fig. I.16)

El valor del coeficiente d permeabilidad se calcula por medio de:

$$k = \frac{0.423}{h_2} \times Q \log_{10} \frac{4h}{d} \quad \text{Si } 25 < \frac{h}{d} < 100$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg.)

h = Carga hidráulica (cm)

Q = Gasto (cm³/seg)

d = diámetro del ademe (cm)

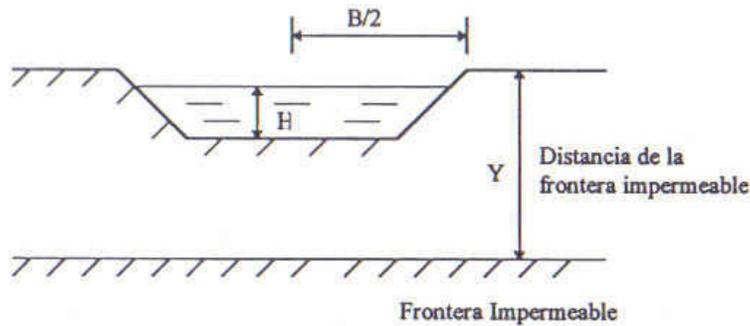


Fig. I.15 Corte de la zanja utilizada en la prueba tipo Matsuo⁽⁸⁾

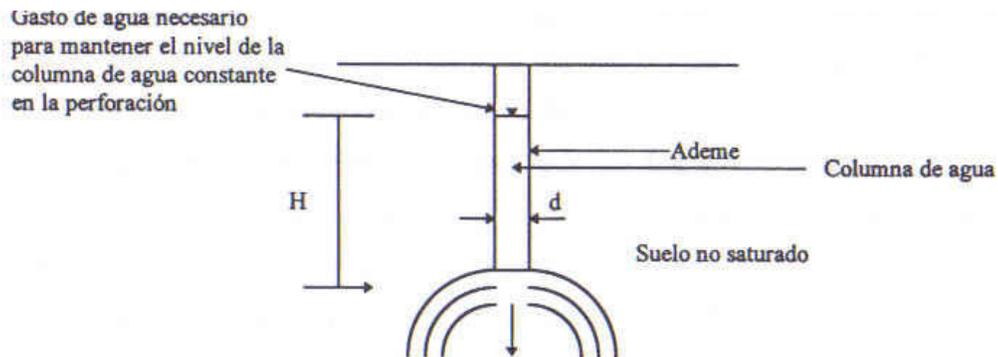


Fig. I.16 Esquema de la prueba Nasberg⁽⁸⁾



Piezómetros:

Con el uso de los piezómetros se busca lograr la medición de presiones de poro que es un dato necesario para analizar el flujo de agua a través de los suelos y es fundamental para estimar la resistencia de una masa de roca. La resistencia depende de los esfuerzos efectivos y por tanto, si las cargas externas no se alteran, la presión de poro se puede usar como un índice de la resistencia.

En las construcciones subterráneas, los piezómetros son utilizados para realizar observaciones del régimen de aguas subterráneas alrededor de la excavación para evaluar el impacto en la alteración del medio ambiente, y para el monitoreo de las presiones hidrostáticas en las juntas de la roca, como un indicador de la estabilidad de la masa de roca.

Los instrumentos empleados se agrupan en dos categorías generales: los pozos de observación para medición del nivel freático y los piezómetros para la medición de la presión de poro en una zona localizada del suelo, para esto el piezómetro debe permanecer sellado dentro de la zona en análisis.⁽⁸⁾

Ensayos de deformabilidad:

Los ensayos de deformabilidad y resistencia de la roca en el laboratorio se efectúan normalmente en dos clases de especímenes: 1) especímenes cilíndricos obtenidos de núcleos de barrenación con diamante, cortados y cabeceados según planos perpendiculares a las generatrices y 2) especímenes cúbicos o prismáticos cortados y labrados de bloques de roca. Estos especímenes normalmente no son representativos del estado real de la roca en el sitio pues no contiene las juntas, fracturas, zonas intemperizadas, etc., y son normalmente de pequeñas dimensiones.

Los ensayos de deformabilidad frecuentemente se llevan a cabo simultáneamente con los ensayos de resistencia. Los ensayos de compresión simple, que son los más comunes, se efectúan en forma muy semejante a los ensayos de concreto, mortero y cementos. Un refinamiento en el ensayo de las rocas son los llamados ensayos triaxiales en los que se aplican presiones confinantes muy elevadas y se determina la correspondiente resistente a la compresión axial. De esta forma se puede obtener una gama de combinaciones de esfuerzos confinantes y esfuerzos desviadores que hacen factible la obtención de la llamada curva envolvente o curva intrínseca de falla.



Fotografía . I.1 Equipo triaxial. Fuente: ELE Internacional Ltda., 1993.⁽¹²⁾

La figura I.17 muestra una sección transversal de la cámara triaxial empleada en la Universidad Católica de Valparaíso, en Chile y la fotografía I.1 el mismo equipo triaxial.

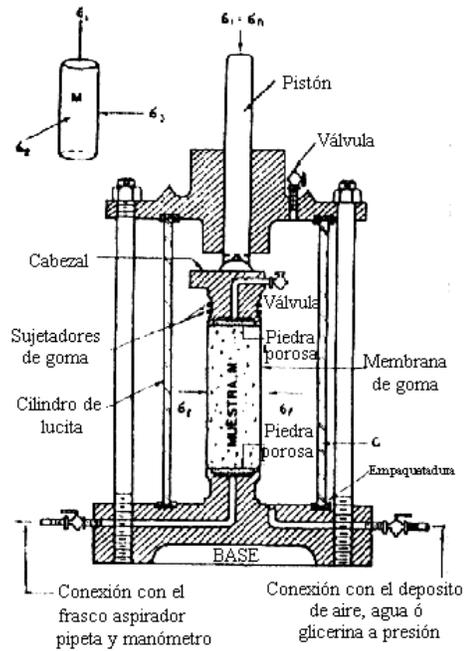


Fig. I.17 Sección típica equipo triaxial (Valle Rodas R., 1982).⁽¹²⁾

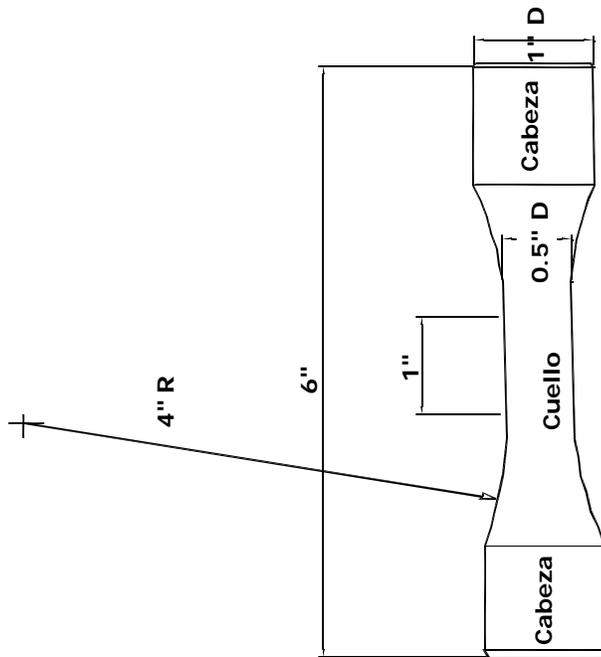


Fig. I.18 Especímenes de Roca para ensayos triaxiales⁽²⁾

En la figura I.18 se muestra la forma y dimensiones de los especímenes empleados en estos ensayos. La figura I.19 muestra una gráfica típica esfuerzo – deformación. La figura I.20 muestra la variación del módulo elástico con la presión confinante para 4 clases de roca. La figura I.21 muestra los círculos de falla y la curva intrínseca durante los ensayos en una diabasa.



La figura 1.22 muestra una curva envolvente de falla para un granito, obtenida por Serafim del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa, Portugal (LNEC), empleando especímenes cilíndricos de 5 cm. de diámetro y 12 cm de altura. En la figura 1.23 se muestra el efecto de la presión confinante en la deformabilidad de la roca. Estas curvas también fueron obtenidas por Serafim del LNEC.⁽²⁾

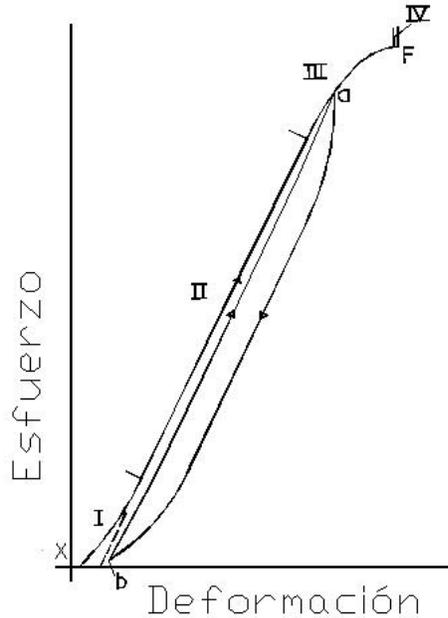


Fig. 1.19 Curva esfuerzo- deformación de un espécimen de roca en un ensayo triaxial⁽²⁾

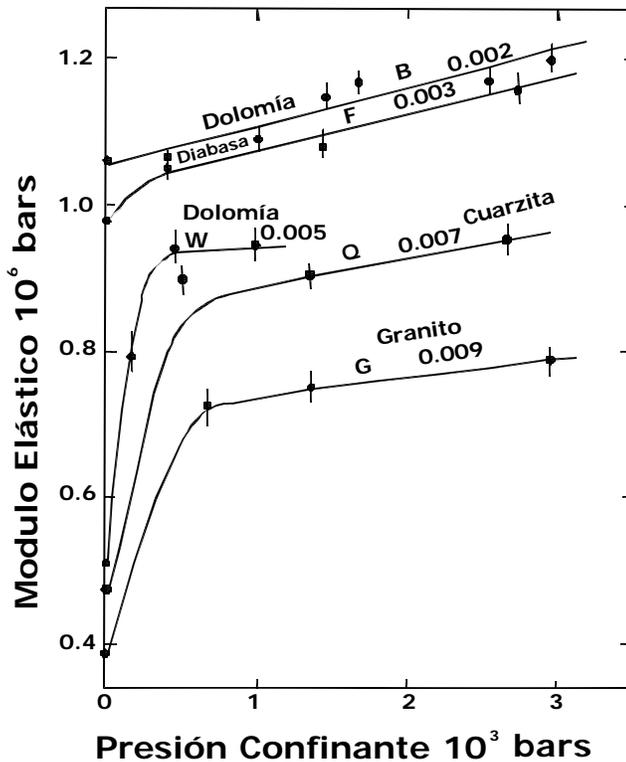


Fig. 1.20 Variación del módulo elástico con la presión confinante⁽²⁾

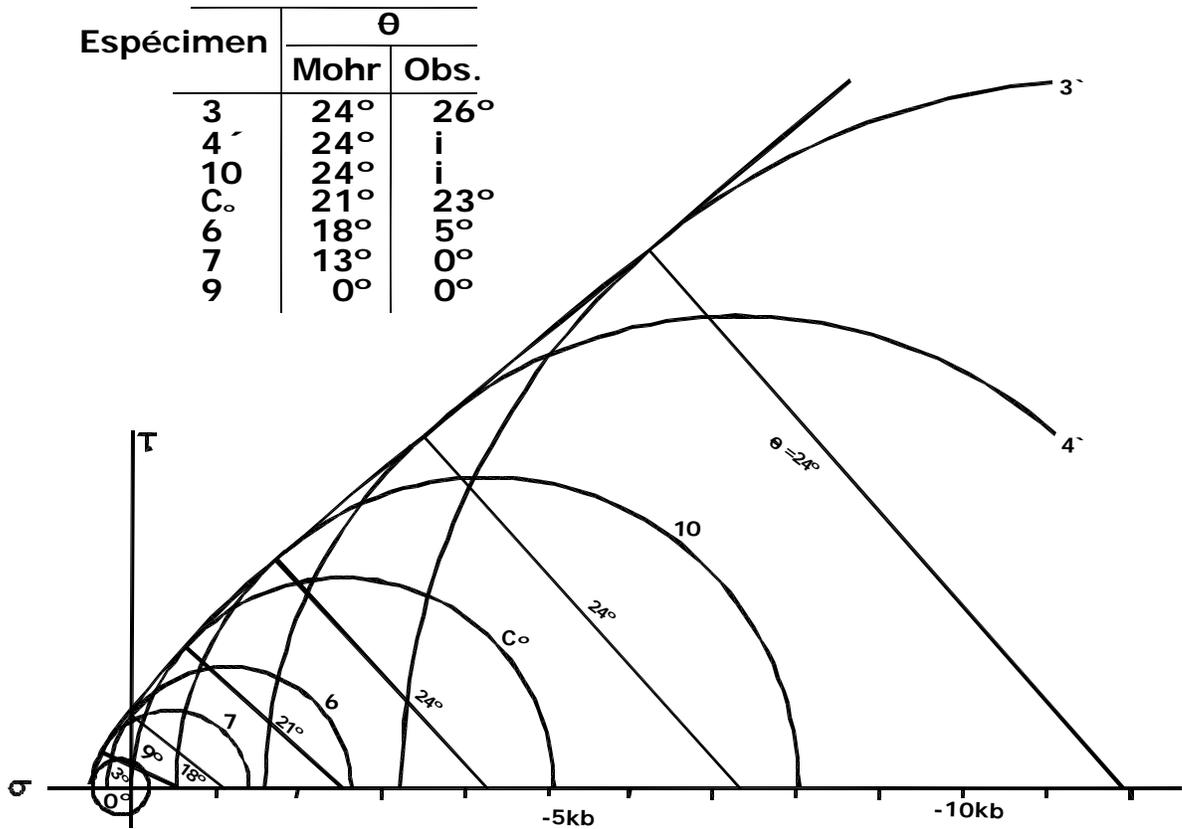


Fig. I.21 Envolvente de Mohr para una diabasa⁽²⁾

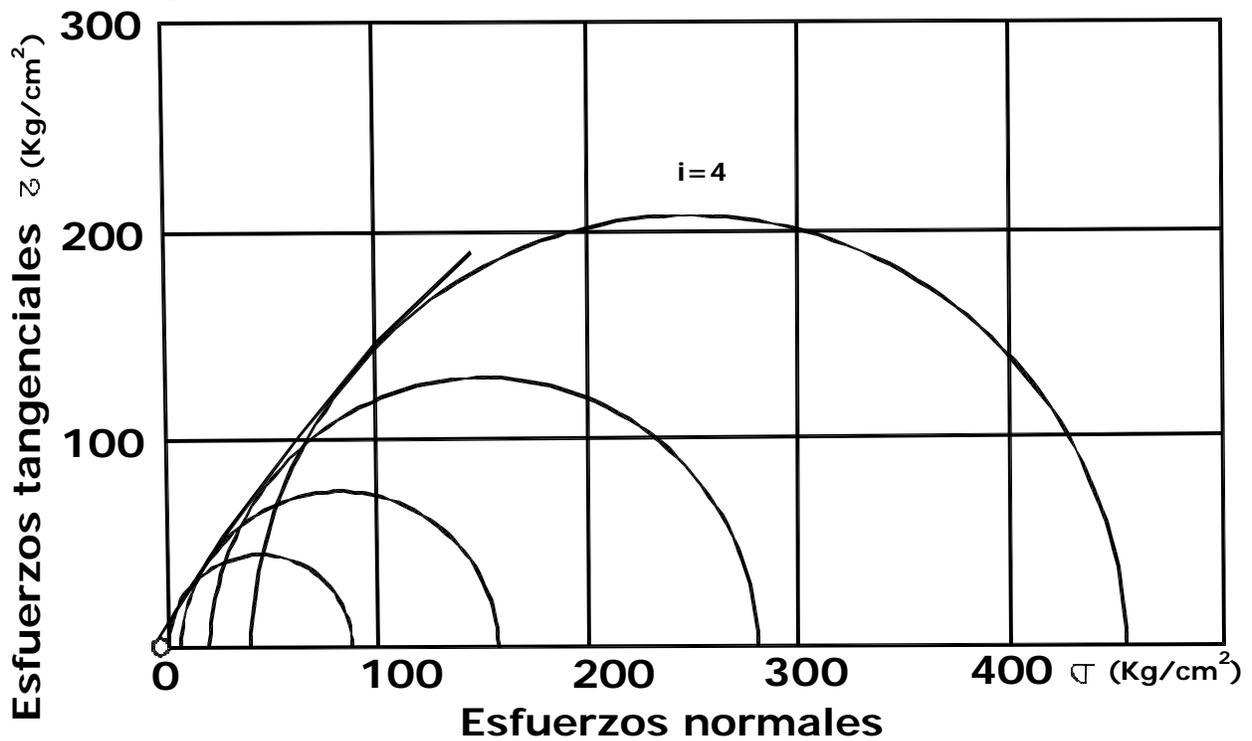


Fig. I.22 Envolvente de Mohr para granito⁽²⁾

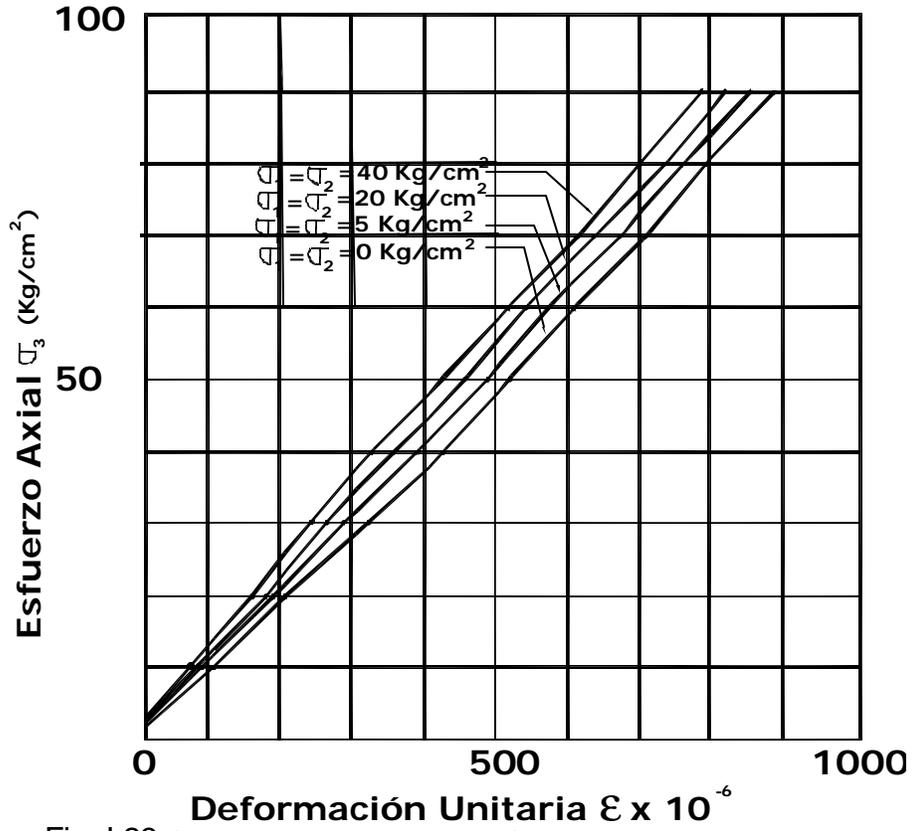


Fig. I.23 Curvas esfuerzo – deformación para diversas presiones confinantes⁽²⁾



IV.5 ENSAYOS DE CAMPO

Ensayos de deformabilidad (en campo):

Los ensayos de deformabilidad, empleando gatos hidráulicos y placas de distribución que aplican cargas directamente contra las paredes de una galería, son indiscutiblemente los más utilizados en investigaciones de campo. Existen muchas variantes de este ensayo siendo la principal la relacionada con las placas de distribución y los sistemas de medición y control de presiones y desplazamientos. La placa de distribución es casi siempre circular y de diámetro tal que distribuye la carga en aproximadamente 1 m² de superficie. Esta placa puede ser rígida o flexible; en cualquier caso el cálculo de los módulos de elasticidad se efectúa asumiendo que el macizo rocoso es un sólido infinito, elástico, homogéneo e isótropo.

Los desplazamientos de las paredes normalmente se miden en el centro de la aplicación de la carga, para lo cual la placa de apoyo tiene un agujero central; aunque en ocasiones también se miden desplazamientos en otros puntos a lo largo de un diámetro y aún fuera del área de aplicación de los esfuerzos. Cuando se usa placa rígida, esta puede ser de acero o de concreto; cuando se emplea placa flexible, normalmente se utilizan gatos planos tipo Freyssinet o colchones de hule duro. Normalmente se cargan en forma enteramente igual las dos paredes opuestas de una galería y se miden las deformaciones en ambos lados. El ensayo puede efectuarse en dirección horizontal y en dirección vertical.

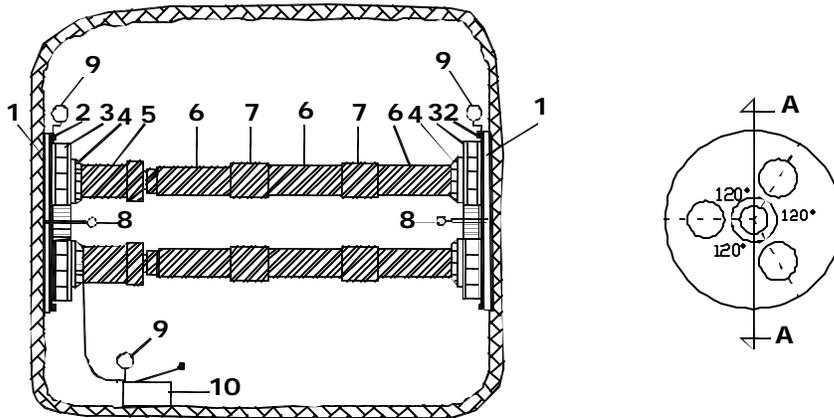
Los esfuerzos que se aplican a la roca en la superficie circular, llegan a alcanzar valores hasta de 60 kg/cm². Este valor máximo se alcanza normalmente después de varios ciclos de carga y descarga a presiones inferiores ascendentes. Se acostumbra también mantener presión constante durante intervalos considerables con objeto de observar deformaciones diferidas en la roca.

El laboratorio de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad emplea como placas de distribución, para estos ensayos, colchones metálicos flexibles llenos de aceite hidráulico, tipo gato plano, de 1.17 m de diámetro exterior y agujero central de 20 cm. de diámetro. Para la aplicación de la carga, se emplean tres gatos hidráulicos de pistón de 200 Ton. de capacidad cada uno. Se utilizan extensiones metálicas tubulares con cuerda tipo cople y niple, con objeto de transmitir la carga de pared a pared de una galería, y ajustar las dimensiones a la separación entre paredes opuestas. La medición de los desplazamientos se efectúa en ambas paredes utilizando extensómetros mecánicos de carátula con precisión de 0.01 mm.

La figura 1.24 muestra los dispositivos para ensayos de deformabilidad del tipo descrito empleados por LOC-CFE. Las fotografías 2 y 3 muestran los dispositivos de carga y medición en un ensayo de deformabilidad efectuado en una de las galerías de inyección y drenaje de la Planta Hidroeléctrica Malpaso,



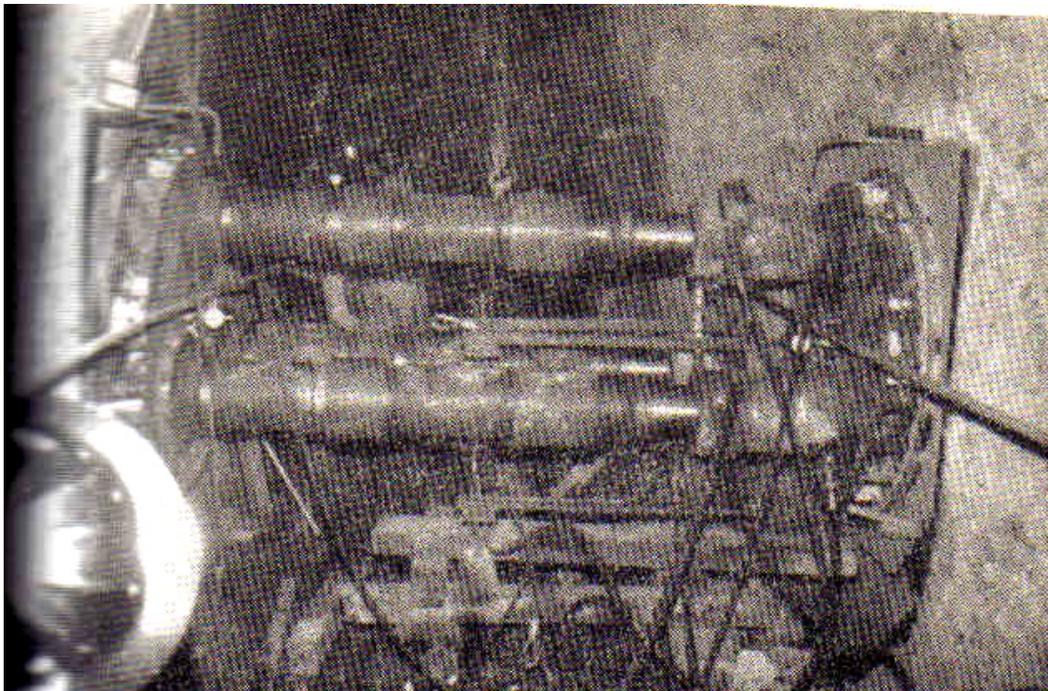
Chis. En la figura I.25 se muestra una curva típica presión – desplazamiento durante las pruebas descritas.⁽²⁾



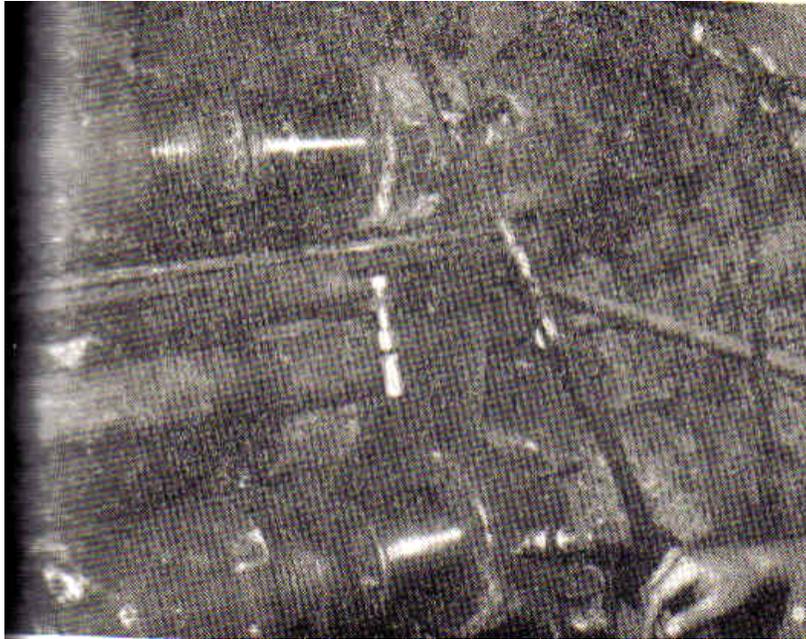
SECCION A - A

- 1 - Relleno de mortero
- 2 - Gato plano
- 3 - Rodaja de acero
- 4 - Zapatas de acero
- 5 - Gato hidráulico de pistón (200 ton.)
- 6 - Niple de acero
- 7 - Cople de acero
- 8 - Extensómetro de carátula (0.01 mm)
- 9 - Manómetro
- 10 - Bomba hidráulica

Fig I.24 Ensayo de deformabilidad de la roca(LOC – CFE)⁽²⁾



Fotografía I.2⁽²⁾



Fotografía I.3⁽²⁾

Las fotografías I.2 y I.3 muestran los dispositivos de carga y medición de deformabilidad.

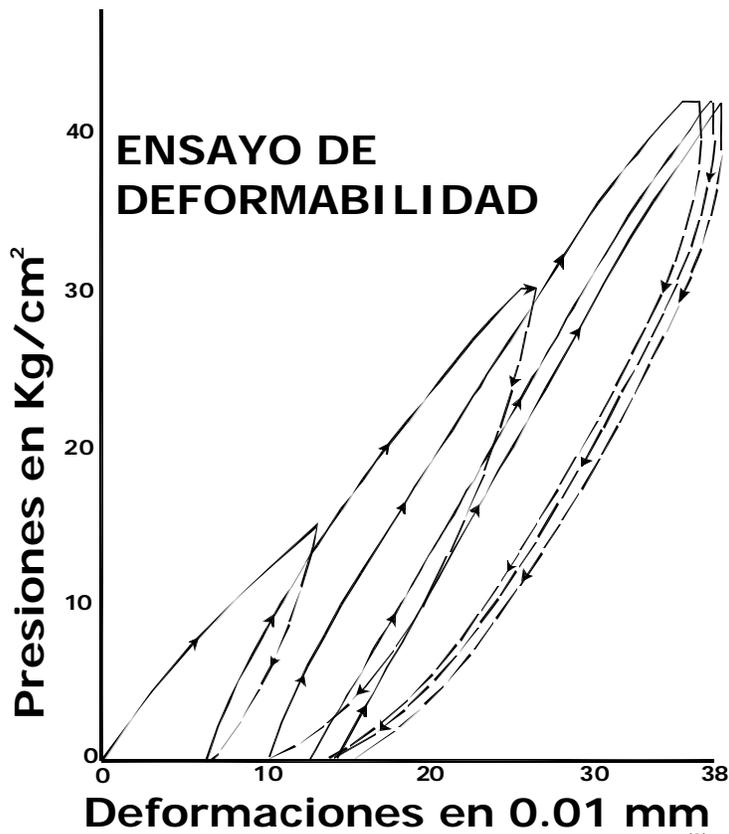


Figura I.25 Curva típica presión – desplazamiento⁽²⁾

Ensayos de Resistencia en Roca (en campo):

Estos ensayos pueden llevarse a cabo dentro de galerías o socavones, labrando en el piso con herramientas de mano, bloques de roca normalmente de 70 x 70 cm. de sección transversal y 35 cm. de peralte. Estos bloques se sujetan a un estado biaxial de esfuerzos mediante la aplicación de una carga vertical y una carga ligeramente inclinada con respecto a la horizontal. Para diversos valores del esfuerzo vertical se determina el esfuerzo cortante horizontal que produce la falla y se mide mediante el empleo de extensómetros, tanto los desplazamientos horizontales como verticales del bloque, la figura 1.26 muestra el arreglo de gatos hidráulicos, soportes, extensómetros, etc. en un ensayo de corte directo.⁽²⁾

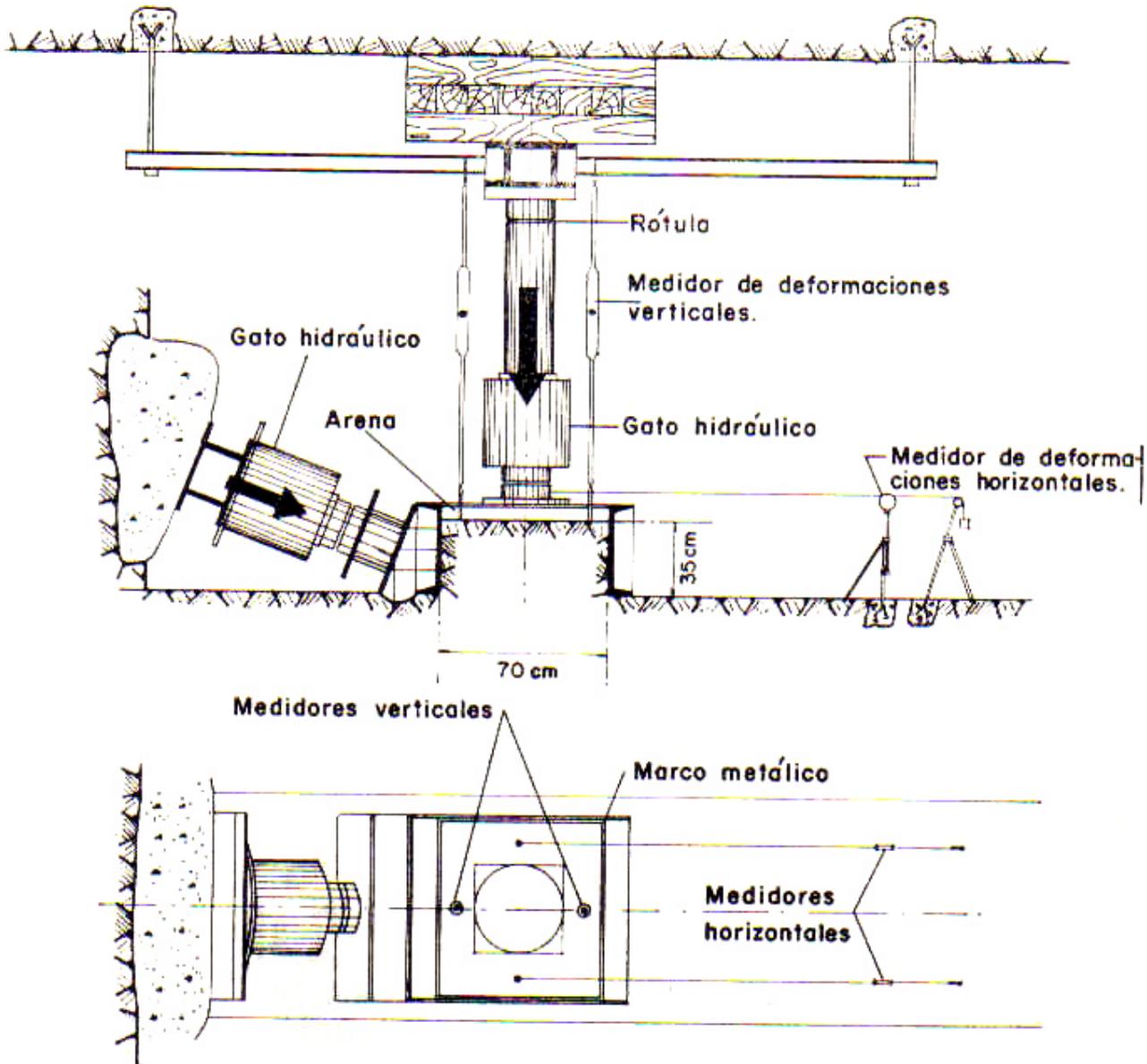


Figura 1.26 Ensayo de cortante en la Roca⁽²⁾



CAPÍTULO II:

TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

II. 1 GENERALIDADES

La construcción de los túneles ordinarios plantea dos problemas principales: la perforación, es decir, la ejecución de la excavación, y el revestimiento.

Estos trabajos se efectúan avanzando a partir de un número restringido de frentes de ataque.

Los tajos de excavación y revestimiento se escalonan detrás de cada frente de ataque, y la duración de realización de la obra depende del número de bocas de ataque que puedan utilizarse simultáneamente. Evidentemente, para ir de prisa conviene multiplicar los frentes de ataque.

Un túnel largo se ataca siempre por los dos extremos y, frecuentemente, no es posible atacarlo por más puntos.

Si la altura del obstáculo sobre el túnel lo permite, pueden crearse ataques intermedios descendiendo por pozos hasta la plataforma del túnel, avanzando en galerías a uno y otro lado del fondo de estos pozos que se utilizan para la evacuación de los escombros. (Fig. II.1)

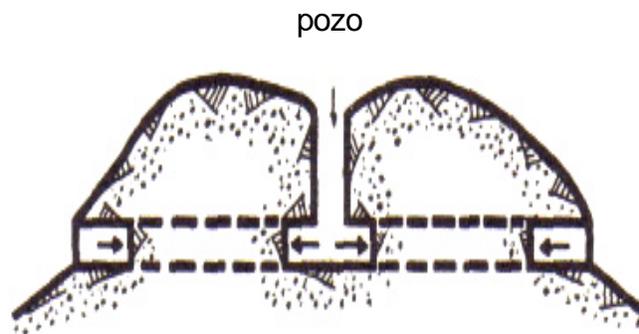


Figura II.1 Túnel con cuatro frentes de ataque⁽¹⁾

En obras de montaña, este método se ha utilizado con pozos muy profundos (varios centenares de metros). El suplemento de gastos ocasionados por la construcción de los pozos es compensado a veces por la ventaja de una mayor rapidez de ejecución.



Por otro lado, estos pozos pueden utilizarse después como pozos de ventilación.

Para la ejecución de túneles que sirven de galerías de conducción en las instalaciones hidroeléctricas, pueden crearse ataques intermedios mediante ventanas en puntos juiciosamente elegidos en los que el trazado de la galería se aproxima a gargantas naturales (fig. II.2).

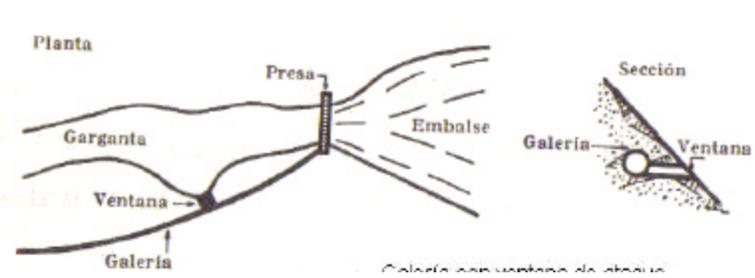


Fig II.2 Galería con ventana de ataque⁽¹⁾

Estos accesos horizontales al túnel se obturan y se les pone concreto una vez terminada la obra. A veces, se cierran estas ventanas mediante puertas impermeables que permiten la realización de visitas o de obras de conservación. ⁽¹⁾

Es por eso que es muy importante determinar el tipo de terreno con el que trabajaremos para así seleccionar el mejor método y equipo de perforación y por lo tanto la obra sea rentable y fiable.



II.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS PARA EL EMPLEO DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN.

CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ROCAS:

LAS ROCAS son agregados naturales (sistemas homogéneos) que se presentan en nuestro planeta en masas de grandes dimensiones. Están formadas por uno o más minerales o mineraloides.

LOS TIPOS DE ROCAS:

Los diferentes tipos de rocas se pueden dividir, según su origen, en tres grandes grupos:

ROCAS IGNEAS:

Las rocas que se forman a partir del enfriamiento de los masa rocosa fundida. Estas rocas son muy comunes y se dividen en tres tipos diferentes: plutónicas, volcánicas y filonianas.

Rocas plutónicas, se forman cuando el magma solidifica en el interior de la Tierra. Como en el interior las temperaturas son elevadas, el enfriamiento de los magmas es muy lento. En estas condiciones los minerales disponen de mucho tiempo para crecer, por lo que estas rocas presentan cristales relativamente grandes (se ven bien a simple vista).

Como la presión del interior es también muy elevada, los minerales crecen estrechamente unidos formando rocas densas y sin huecos.

Los granitos (Fig. II.3 y II.4) son las rocas plutónicas más comunes. Están compuestos por una mezcla de los minerales cuarzo, feldespatos y micas.

El gabro (Fig. II.5) es otra roca plutónica muy común, se reconoce por la ausencia de cuarzo y sus tonos oscuros.

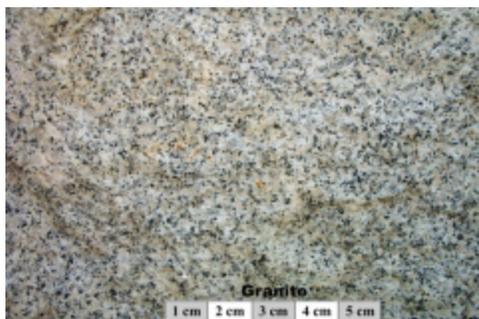


FIG II.3 Granito⁽¹³⁾



FIG. II.4 Granito rosa⁽¹³⁾



FIG II.5 Gabro⁽¹³⁾

Rocas volcánicas se originan cuando los magmas enfrían en la superficie terrestre, a temperaturas y presiones bajas.

En estas condiciones el enfriamiento es muy rápido con lo que los cristales disponen de muy poco tiempo para formarse y crecer. El resultado son rocas constituidas por una masa de cristales de pequeño tamaño o bien materia amorfa sin cristalizar (vidrio).

Al originarse en la superficie, donde la presión es baja, pueden adquirir un aspecto esponjoso.

Es común clasificar las rocas volcánicas en función de su composición química. Una roca muy frecuente y fácil de reconocer por sus tonos oscuros es el basalto (Fig. II.6). La riolita, por el contrario, presenta tonos claros.

Independientemente de su composición, podemos agrupar los materiales volcánicos en:

- Volátiles (gases)
- Piroclastos, fragmentos rocosos . Se trata del material fundido que es lanzado al aire durante la actividad volcánica y que enfría al caer en forma de lluvia.
 - Los trozos de pequeño tamaño son las cenizas volcánicas
 - Llamamos a los de mayor tamaño escorias (son parecidas a las de los hornos de carbón). Cuando adquieren aspecto redondeado se llaman bombas volcánicas.
- Coladas, materiales más o menos continuos formados tras el enfriamiento de la lava que fluye desde la boca de erupción. En ocasiones la lava se retuerce mientras se enfría originando las lavas cordadas (Fig. II.7).



- La piedra pómez (Fig. II.8) es una variedad de lava particularmente esponjosa (es tan ligera que flota en el agua).

El vidrio volcánico se llama obsidiana (Fig. II.9). Tiene color oscuro y un brillo vítreo característico.

Los magmas también pueden cristalizar en el interior de grietas o fracturas en las que las presiones y temperaturas no son tan elevadas como las que soportan las rocas plutónicas durante su formación, ni tan bajas como las de las rocas volcánicas. En este caso las rocas resultantes se denominan "rocas filonianas". Se llaman pórfidos a las rocas que presentan grandes cristales de un mineral envueltos en una "pasta" de pequeños cristales de otros minerales. Las pegmatitas (Fig. II.10) se reconocen fácilmente por presentar grandes cristales de cuarzo, feldespatos y micas.



FIG II.6 Basalto⁽¹³⁾



FIG II.7 Lavas cordadas⁽¹³⁾



Fig. II.8 Piedra pómez⁽¹³⁾

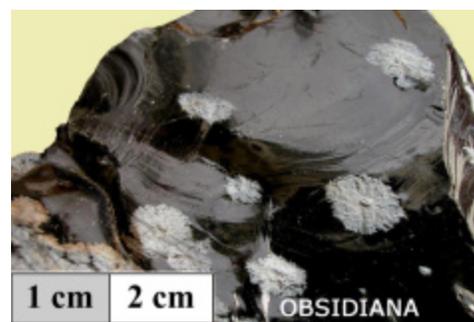


Fig. II.9 Obsidiana⁽¹³⁾



Fig. II.10 Pegmatita⁽¹³⁾

ROCAS METAMÓRFICAS

Cualquier roca, cuando se somete a intensas presiones y temperaturas, sufre cambios en sus minerales y se transforma en un nuevo tipo que llamamos “roca metamorfica”.

El proceso metamórfico se realiza en estado sólido, es decir las transformaciones se producen sin que la roca llegue a fundirse. La mayoría de las rocas metamórficas se caracterizan por un aplastamiento general de sus minerales que hace que se presenten alineados. Esta estructura característica que denominamos foliación se ve muy bien en rocas como las pizarras, los esquistos y los gneises.

Las pizarras (Fig. II. 11) son arcillas metamorfizadas. Presentan foliación muy recta, paralela y próxima. Generalmente son oscuras y con frecuencia contienen fósiles.

Los esquistos (Fig. II.12) son rocas que han sufrido un metamorfismo más intenso. Presentan foliación algo deformada y los fósiles que pudiera haber en la roca original desaparecen durante el proceso metamórfico.

El gneis (Fig. II.13) es una roca que ha sufrido un metamorfismo muy intenso. Sus principales minerales son el cuarzo, los feldespatos y las micas (como el granito) pero se presentan orientados en bandas claras y oscuras.

Otras rocas metamórficas muy comunes son:

El mármol (Fig. II.14): se trata de rocas carbonatadas (como las calizas) que han sufrido metamorfismo y presentan un aspecto cristalino característico.



La cuarcita: son areniscas ricas en cuarzo metamorfizadas.

El metamorfismo puede ocurrir en diferentes ambientes terrestres, por ejemplo a ciertas profundidades las rocas sufren cambios debidos al peso de los materiales que hay por encima y a las grandes temperaturas. También se produce metamorfismo en los bordes de las placas tectónicas debido fundamentalmente a las grandes presiones que actúan y también en los alrededores de los magmas gracias a las grandes temperaturas reinantes.

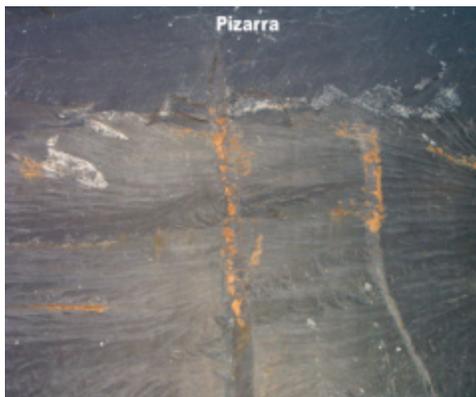


Fig. II.11 Pizarra⁽¹³⁾

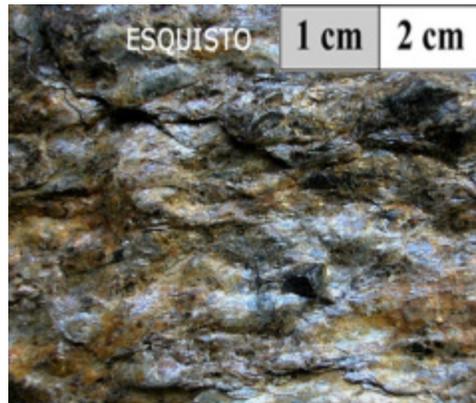


Fig. II.12 Esquisto⁽¹³⁾

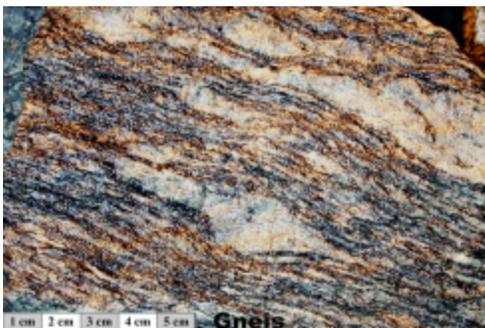


Fig. II.13 Gneis⁽¹³⁾

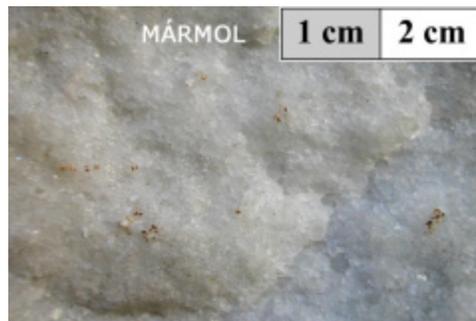


Fig. II.14 Mármol⁽¹³⁾



ROCAS SEDIMENTARIAS:

Las rocas originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos, se denominan ROCAS SEDIMENTARIAS.

- *rocas sedimentarias detríticas* son las formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte. La clasificación de estas rocas se basa en los tamaños de los trozos que las componen. Las constituidas por fragmentos de tamaño grande son los conglomerados (Fig. II.15), las areniscas (Fig. II.16) poseen granos de tamaño intermedio y los limos y arcillas (Fig. II.17) poseen partículas muy pequeñas.

- *rocas sedimentarias químicas y orgánicas* son las formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas o bien por acumulación de sustancias de origen orgánico. Un tipo muy común es la roca caliza (Fig. II.18), formada en su mayor parte por restos de organismos como corales, algas, etc. aunque también puede originarse por precipitación de cementos calcáreos. Las tobas calcáreas son rocas muy porosas y con abundantes restos vegetales que se originan en los ríos cuando el carbonato de calcio precipita sobre la vegetación.

Los carbones y petróleos son rocas sedimentarias orgánicas originadas a partir de la acumulación de restos de materia orgánica. Poseen un enorme interés económico.⁽¹³⁾



Fig. II.15 Conglomerado⁽¹³⁾



Fig. II.16 Arenisca⁽¹³⁾



Fig. II.17 Arcilla⁽¹³⁾



Fig. II.18 Caliza con fosiles⁽¹³⁾

Según la naturaleza del terreno, puede atacarse la perforación con una superficie más o menos grande.

En ciertos macizos rocosos, puede atacarse a plena sección incluso en el de las bóvedas de gran luz (20 m y más) de las centrales hidroeléctricas subterráneas.

En los terrenos sin cohesión (arenas secas, gravas) será necesario, por el contrario, limitarse a una galería elemental de 4 a 5 m² para poder avanzar con una soporte adecuada.

Si se trata de arenas finas saturadas de agua a presión (arenas fluidas), de dos, arcillas o terrenos en los que se presentan importantes afloramientos de agua, será necesario incluso recurrir a procedimientos especiales como el de aire comprimido o las inyecciones de avance.

Si el terreno contiene anhidrita, en ciertos casos los empujes pueden ser considerables cuando este material está saturado de agua, debiendo utilizar en tal caso, durante la construcción, una robusta soporte metálica.

Sin embargo, los estudios del Laboratorio de Mineralogía de la Facultad de Ciencias de Toulouse han demostrado que puede obtenerse una autoconsolidación de la anhidrita por hidratación acelerada sin aparición de grandes empujes.

De hecho, en las galerías hidráulicas de Isere-Arc, de Arc-dans-Tignes y en la galería en carga de Roselend, se han atravesado zonas de anhidrita sin precauciones particularmente onerosas.



TIPOS DE TERRENOS ROCOSOS POR SU DIFICULTAD DE PERFORACIÓN

Se estima cómodo clasificar los terrenos en cuanto al empleo de los métodos de perforación en categorías, cuya definición ha de ser forzosamente bastante imprecisa.

Esta clasificación no pretende más que jerarquizar las dificultades, especialmente en cuanto a apuntalar, indicando los métodos de perforación correspondientes.

Primera categoría. Roca que exige el empleo de explosivos. Esta categoría va desde la roca dura e intacta que permite el ataque a gran sección sin soporte, a la roca inestable que hace necesaria ésta.

Segunda categoría. Buen terreno extraído sin explosivos, que permite la ejecución de 1 a 3 m de galería de sección adecuada sin soporte.

Entran en esta categoría las arcillas duras, las tierras compactas, las areniscas, las arenas y gravas aglomeradas y granzón. (Obsérvese que el estado de consolidación de ciertos granzones puede exigir el empleo de explosivos. Tal ha sido el caso en la galería de Oraison (Francia)).

Tercera categoría. Terreno medio o mediocre, en el que el techo de una galería de sección adecuada puede mantenerse algunos minutos y los laterales y el frente de ataque una hora aproximadamente. Tal es el caso de las arcillas consistentes, la tierra seca, la arena y grava aglomeradas y ciertas rocas dislocadas.

Cuarta categoría. Mal terreno, en el que el techo de las galerías de sección adecuada debe apuntalarse a medida que se avanza, resistiendo los laterales algunos minutos. Tal es el caso de las arcillas blandas o que se expanden al aire, las arenas húmedas, gravas o tierras vegetales sin gran cohesión, roca descompuesta o gravas.

Quinta categoría. Terrenos sueltos, como arenas o gravas secas en los que no se puede progresar en sección pequeña más que al abrigo de blindaje continuo tanto en el frente como en el techo y muros laterales. Cuando se trata de arenas finas saturadas de agua, de arcillas blandas o de avenidas de agua importantes, se imponen métodos especiales (escudo, inyecciones).⁽¹⁾



II.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO Y EQUIPO DE PERFORACIÓN.

En vista de que el tema principal es el uso de explosivos en la construcción de túneles solo se explican de una manera breve los diferentes métodos de excavación utilizados en obra:

Método de ataque a plena sección o método inglés.

Suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²), o en muy buen terreno en secciones mayores, y por supuesto en roca.

Una solución para terrenos de inferior calidad es utilizar el ataque a plena sección pero con varios escalones de ataque. La excavación se realiza por franjas horizontales comenzando por la de la bóveda, con el inconveniente de que la evacuación del material requiere varias actuaciones hasta llegar al nivel donde se instala el sistema de transporte al exterior.

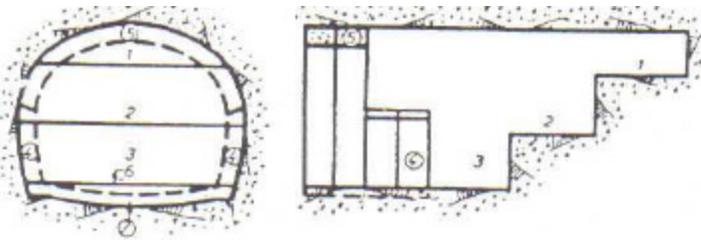


FIG. II.19 Ataque a plena sección con varios pisos⁽⁹⁾

En el esquema que indica el proceso de actuación se numeran las etapas por orden de ejecución y se redondea con un círculo la fase de sostenimiento.

Método de la galería en clave o método belga

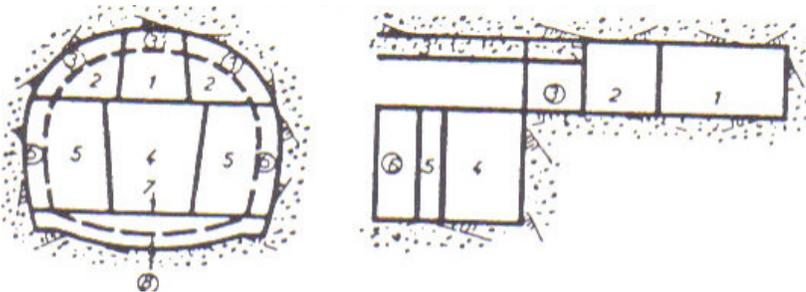


FIG. II.20 Galería en clave⁽⁹⁾

Es uno de los métodos más utilizados (fig. II.20). Tiene la característica de ejecutar primeramente la excavación de la bóveda (es lo que se llama avance en bóveda), incluido el sostenimiento que descansa directamente sobre el terreno, pues de esta manera se protege la obra por encima. Después se realiza la excavación de la parte inferior llamada destroza, comenzando por la zona central y siguiendo, en



cortos tramos alternativos, por la cara lateral, que una vez excavados se revisten; de esta manera se compromete la seguridad de la bóveda que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya construidos. Se termina por la construcción de la superficie de fondo cuando es necesaria.

Tiene el inconveniente de que necesita vías de evacuación de escombros a diferentes niveles, con el consiguiente transvase de un nivel al inferior.

Método de las dos galerías o método austriaco

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, donde se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra (Fig. II.21)

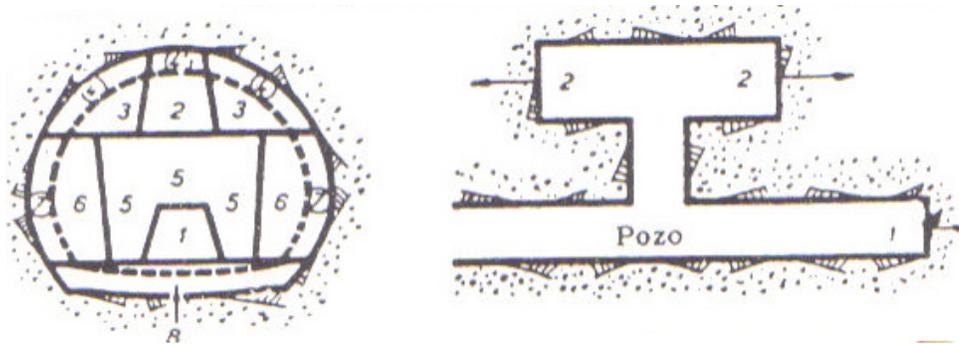


FIG. II.21 Método austriaco⁽⁹⁾

Cuando la galería ha avanzado cierta longitud se perfora un pozo hacia arriba y se excava en los dos sentidos una segunda galería. Una vez perforada la galería superior se sigue como en el método belga. Tiene la ventaja de que el transvase de los escombros a la galería inferior se hace por los pozos y sin modificaciones desde su situación original. También, que los múltiples frentes de ataque aceleran la construcción del túnel.

Método de las tres galerías o método alemán

Se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la finalización del sostenimiento de la bóveda y los hastiales. Se utiliza en secciones superiores a los 50 m².

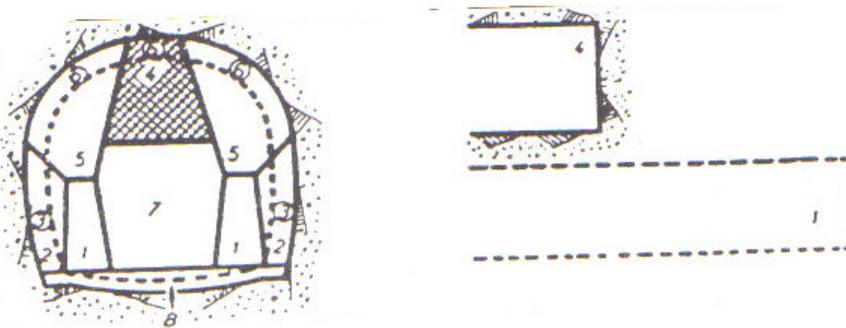


FIG. II.22 Método Alemán⁽⁹⁾



Se excavan dos galerías en la base y a derecha e izquierda del eje (fig. II.22); se ensanchan y se construyen las caras laterales. Más atrás se ataca una galería de coronación que a continuación se ensancha hasta construir la bóveda que descansará sobre las caras laterales. Por último se excava la destroza, y si es necesario se excava y se reviste la superficie de fondo.⁽⁹⁾

Comparación de los diferentes métodos.

Es raro poder utilizar el método inglés con ataque a plena sección en túneles de grandes dimensiones, pero cuando es posible emplearlo, este método que no exige el trabajo en galerías de sección reducida, es el más económico y rápido.

El método belga que no exige más que una galería de coronación, y el austriaco que exige además una galería de base cómoda para la evacuación de los escombros, pueden utilizarse en la mayoría de los terrenos.

El método austriaco es más costoso que el belga, pero es más rápido, pues permite utilizarse en la mayoría de los terrenos.

El método alemán, con sus tres galerías de avance, es aún más costoso, pero es seguro en mal terreno.

Por último, hay que observar que si se encuentran en un túnel tramos malos entre otros mejores, el método austriaco permite pasar fácilmente al método alemán desdoblado la galería de avance al pasar por el terreno malo, prestándose pues a una flexibilidad de ejecución.

Los principales túneles de montaña para vía ferrea notables por su longitud y su dificultad de ejecución, han sido construidos por el método austriaco. Citaremos los siguientes por orden cronológico:

1857 – 1871	Mont Cenis	(12,233 m)
1880 – 1884	Arlberg	(10,246 m)
1898 – 1907	Simplon	(19,726 m)
1906 – 1911	Lötschberg	(14,536 m)
1996 – 1999	Young Dong	(16,300 m)

El túnel de San Gotardo (14, 290 m) se construyó (1872-1881) con el método belga, pero este método no es recomendable en tales casos, pues los transportes, que son importantes en un túnel largo de gran sección, resultan difíciles por la obligación de colocar las vías a diferentes niveles y enlazarlas mediante rampas que deben modificarse constantemente. Además, la eliminación del agua se realiza en malas condiciones y, por último, si se encuentra en mal terreno, el método de galería de clave no da seguridad completa.

En cambio, el método belga se utiliza mucho en los túneles cortos, en los que la evacuación y el transporte de los escombros no es problema importante como en los largos túneles de montaña. Es el método clásico de ejecución de los túneles del metro de París.

En numerosos túneles para aprovechamientos hidroeléctricos hechos en Francia, cuyas secciones y dimensiones son más reducidas que las de los túneles



para vías férreas y que casi siempre se ejecutan en terrenos que exigen poco soporte, el método más utilizado es el método inglés de ataque a plena sección.⁽¹⁾

BARRENADO DE ROCAS

Para poder excavar sobre roca, es necesario romperla o fraccionarla primero para que pueda ser manejada con los equipos de excavación. El fraccionado se lleva a cabo barrenando hasta cierta profundidad, y colocando explosivos dentro de la perforación, para hacerlos detonar.

Se utilizan varios tipos de equipos de perforación para barrenar, dependiendo la selección del tipo y del tamaño de la obra, de la naturaleza del terreno, de la clase de roca, de la profundidad y tamaño de los agujeros. Más adelante, se proporcionan informes más detallados sobre la selección de los equipos de perforación.

Definiciones de términos. Los términos que comúnmente se utilizan en la descripción de los equipos de perforación y en los procedimientos de ésta, se dan a continuación como guía para el lector.

Barreno abrasivo. Este barreno muele la roca en partículas pequeñas por medio del efecto abrasivo de una broca que gira en el agujero.

Detritos. Los detritos son las partículas de roca desintegrada que se sacan del barreno.

Martillo o perforador. Este dispositivo es un barreno neumático del tipo de percusión, lo suficientemente pequeño para ser operado por un hombre.

Perforadora. Es un barreno neumático del tipo de percusión, semejante a un martillo, pero tan grande que requiere un montaje mecánico.

Barreno de vagoneta. Perforadora montada sobre un mástil soportado por dos o más ruedas.

Perforadora de barrenos verticales. Es un barreno neumático del tipo de percusión, semejante a la perforadora que se utiliza para hacer los barrenos sobre cabeza, en los túneles.

Barreno de impacto. Éste es un barreno del tipo de percusión. Tiene una larga broca de acero que se levanta y se deja caer mecánicamente para desintegrar la roca. Se utiliza para barrenar agujeros profundos, por lo general de 6 pulgadas de diámetro, o mayores.

Barreno giratorio. Con un vástago perforador de tubo de acero cuyo extremo inferior es una barrena de rodillos que desintegra la roca a medida que gira sobre ella. Los detritos se sacan por medio de una corriente de aire comprimido.

Barreno abrasivo. Giratorio, del tipo abrasivo cuya barrena consiste de una sección de tubo de acero con una superficie rugosa en la parte inferior. A medida que se hace girar la barrena bajo el efecto de una presión, se suministra acero fundido en coquilla debajo de la barrena para llevar a cabo la desintegración de la roca. Los detritos se sacan por medio de agua.



Barreno de diamante. Éste es un barreno giratorio del tipo abrasivo cuya barrena consiste en una matriz de metal en la que están incrustados gran cantidad de diamantes. A medida que gira el barreno, los diamantes desintegran la roca. Este barreno es ampliamente utilizado para obtener muestras.

Barreno seco. Utiliza aire comprimido para sacar los detritos del agujero.

Barreno húmedo. Utiliza agua para sacar los detritos del agujero.

Perforación con extracción. Este método se utiliza para la obtención de corazones de la roca a partir del barreno, para fines de exploración. Para la perforación de extracción de corazones se utilizan los barrenos de diamante y los abrasivos.

Profundidad por barrena. Es la profundidad de un agujero que puede barrenarse con una barrena antes de que tenga que ser reemplazada.

Velocidad de perforación. Es el número de metros que pueden barrenarse por hora de perforación.

Cara. Superficie aproximadamente vertical que se extiende hacia arriba desde el piso de un banco hasta el nivel en donde se está perforando.

Recargo. Distancia horizontal desde la cara hasta la primera fila de barrenos.

Traza de perforación. Es el espaciamiento de los barrenos. En la figura II-23 se ilustra la terminología de las dimensiones que frecuentemente se usa en las obras de perforación.

Broca. Es la parte del barreno que hace contacto con la roca para desintegrarla. Se utilizan muchos tipos:

Brocas desmontables o móviles. Son aquéllas que pueden ponerse o quitarse a las barrenas o varillas de perforación.

Broca forjada. Es barrena que se forja sobre acero de broca.

Broca de carburo de tungsteno. Ésta es una broca desmontable cuyas aristas cortantes son de carburo de tungsteno incrustado en una base de acero más suave.

Broca de diamante. Es una broca móvil cuyos elementos cortantes se componen de pedacerías de diamantes incrustados en una matriz de metal.

La broca es la parte esencial de los barrenos, puesto que entra en contacto directo con la roca para desintegrarla. El éxito de una operación de barrenado depende de la capacidad de la broca para permanecer afilada bajo el impacto del barreno.

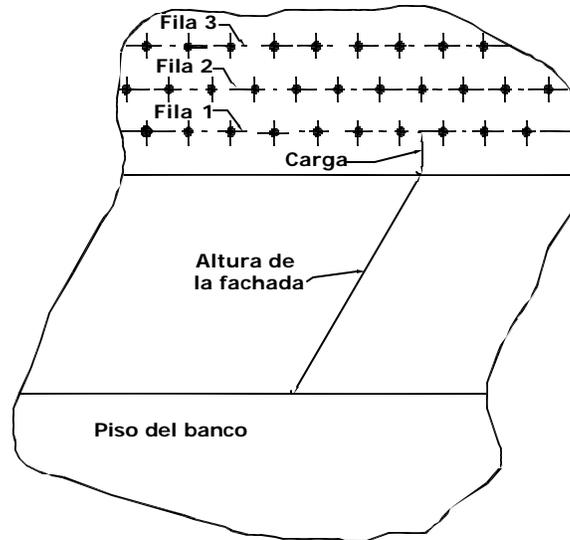


Fig. II-23. Terminología dimensional para barrenar en roca⁽⁶⁾

Hasta hace algunos años las brocas de los martillos neumáticos y de las perforadoras se forjaban en un extremo de la barra perforadora. Esta práctica se ha descontinuado en favor de las brocas removibles, que se le atornillan a la barra perforadora y que tienen muchas ventajas en comparación con las brocas forjadas. Se pueden quitar con gran facilidad, existen en diversos tamaños, formas y durezas y son relativamente baratas. Por lo general se afilan con un esmeril.

En la figura, II -24 se ilustran las brocas de los martillos neumáticos y de las perforadoras. Pueden encontrarse en tamaños desde 2.54 cm hasta 11.43 cm, variando en su medida cada 0.32 cm. Estas brocas pueden afilarse de dos a seis veces.

La profundidad de barrenación con una broca de acero variará desde unos cuantos centímetros hasta 12 metros, o más, dependiendo del tipo de roca.

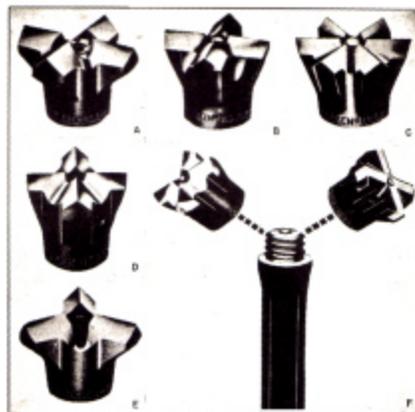


Fig. II-24. Brocas para barrenar en roca. (Timken Roller Bearing Co.)⁽⁶⁾



Brocas de carburo de tungsteno. Algunos tipos de roca son tan abrasivos que tienen que cambiarse las brocas después de haber taladrado unos cuantos centímetros. El costo de las brocas y del tiempo que se pierde en cambiarlas es tan grande que usualmente será económico utilizar brocas de carburo de tungsteno. Esta broca está ilustrada en la figura II-25. La punta de perforación es de carburo de tungsteno, un metal muy duro, incrustado en el acero. Aunque estas brocas son considerablemente más caras que las de acero, la mayor velocidad de perforación y profundidad del agujero por broca, proporcionará una economía total cuando se esté barrenando en roca.

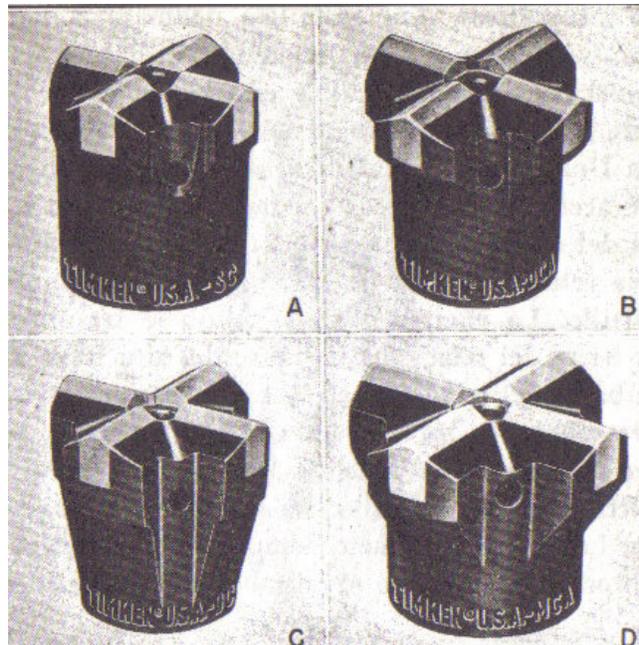


Fig. II-25. Brocas con inserción de carburo de tungsteno. (Timken Roller Bearing Co.)⁽⁶⁾

Martillos neumáticos. Son barrenos de percusión que se sostienen con la mano, utilizados principalmente para la barrenación de agujeros. Por esta razón se les llama con frecuencia perforadores. Se clasifican de acuerdo con su peso, por ejemplo: de 20.41 ó 25 kg. Una unidad de barreno completa consiste en un martillo, una barra de acero y una broca. A medida que el aire comprimido fluye a través del martillo, causa el movimiento parecido a un pistón que a una velocidad hasta de 2,200 golpes por minuto, produce el efecto de martillo. La energía de este pistón se transmite a la broca a través de la barra del barreno. Una parte del aire fluye a través de un agujero en la barra del barreno, y en la broca, para sacar los detritos del orificio y para enfriar la broca. Para barrenos húmedos, se utiliza agua en vez de aire para sacar los detritos del agujero. En la figura II-26 se muestra la sección de un martillo, señalando todas sus piezas, en la figura II-27 derivadores taladrando agujeros horizontales y en la Tabla II.1 se muestran algunas especificaciones representativas de estos. El vastago o barra se hace girar lentamente después de cada golpe para que las puntas de la broca no peguen en el mismo lugar todo el tiempo.



ESPECIFICACIONES REPRESENTATIVAS DE LOS MARTILLOS

Modelo	S33	S55	S73
longitud total, cm	51.12	59.37	63.5
Cilindro, cm	6.03	6.67	6.98
Peso, Kg	14.06	25.63	30.39
Tamaño de barra recomendado, cm	2.22	2.22 - 2.54	2.22 - 3.18
Tam. de manguera recomendado, cm	1.9	1.9 - 2.54	1.9 - 2.54
Tam. de manguera de agua recom, cm	1.27	1.27	1.27

TABLA II-1 Especificaciones representativas de algunos martillos⁽⁶⁾

Aunque los martillos pueden emplearse para barrenar agujeros de más de 6 m de profundidad, muy rara vez se utilizan en barrenos de más de 3 m. Los martillos más pesados pueden barrenar agujeros hasta de 6.35 cm. de diámetro. Por lo general, la barra del barreno se suministra en longitudes de 60 cm. de variación, pero existen longitudes mayores.

Perforadoras. Se asemejan a los martillos en su operación, pero son más grandes y se utilizan como herramientas montadas para barrenar hacia abajo, en dirección horizontal o hacia arriba. Varían en peso desde 34 hasta 118 kg. y son capaces de barrenar agujeros de 11.43 centímetros de diámetro. Estas herramientas se utilizan extensamente para trabajos de minería y de túneles. Puede utilizarse ya sea agua o aire comprimido para sacar los detritos del agujero, algunas especificaciones de estas se encuentran en la tabla II.2.

Cuando se utilizan para perforar agujeros en dirección horizontal, o hacia arriba, la presión de alimentación se suministra por medio de un tornillo operado a mano, o por un pistón neumático o hidráulico (figura II-28).

El peso es lo suficientemente grande para proporcionar la presión necesaria al barrenar hacia abajo. Las barras o vástagos pueden obtenerse en longitud de 60, 76, 91, 122 y 152 cm.

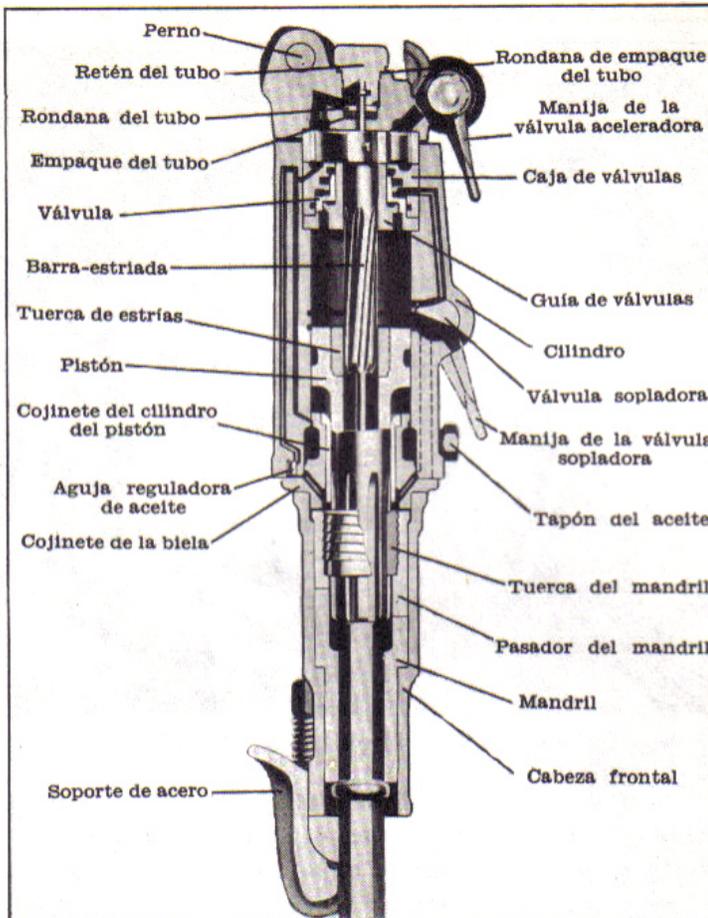


FIG II-26 Sección de un martillo (Ingersoll-Rand Co.)⁽⁶⁾

ESPECIFICACIONES REPRESENTATIVAS PARA LAS PERFORADORAS DE ALIMENTACIÓN AUTOMÁTICA

Modelo	79	89	93	99
Cilindro, cm	7.62	8.89	8.89	10.16
Tamaño de alimentador disp., cm	2.22 - 3.18	2.22 - 3.18	2.22 - 3.18	2.22 - 3.81
Tamaño de la mang., de aire, cm	2.54	2.54	2.54	2.54
Tamaño de la mang., de agua, cm	1.27	1.27	1.27	1.27
Peso del barreno, menos montura, Kg	50.35	60.78	63.5	82.1
Longitud total, cm	80.65	86.36	88.9	89.22

TABLA II – 2 Especificaciones representativas para las perforadoras de alimentación automática⁽⁶⁾

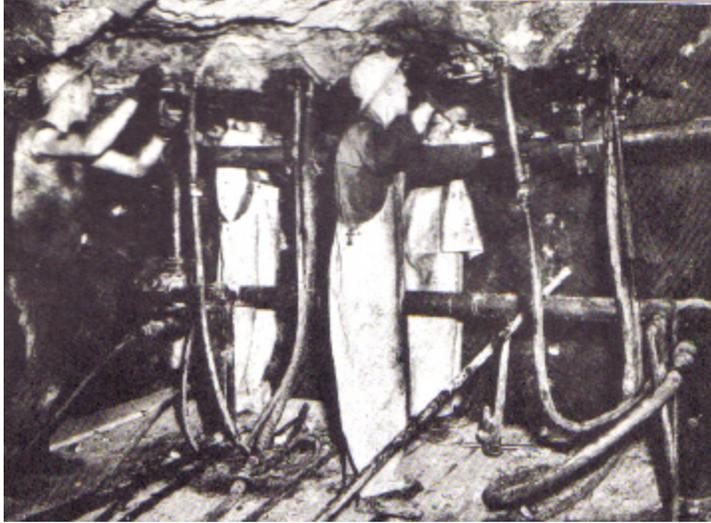


FIG II-27 Derivadores barrenando agujeros horizontales.⁽⁶⁾

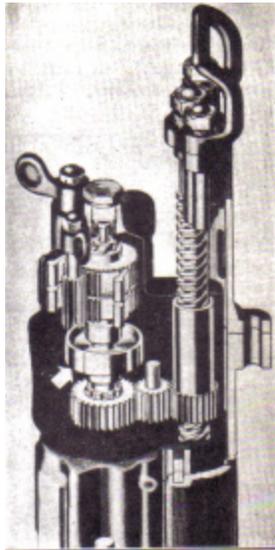


FIG. II-28 Piezas del motor de alimentación continua de un derivador (Gardner – Denver Co.)⁽⁶⁾

Barrenos de vagoneta. Son perforadoras montadas sobre columnas que a su vez están montadas sobre ruedas para hacerlas móviles (figura II-29). Se usan extensamente para barrenar agujeros hasta de 11.43 cm de diámetro y de 9 m o más de profundidad. Tienen un mejor rendimiento que los martillos cuando se utilizan en terrenos en donde les es posible operar. Pueden utilizarse para barrenar a cualquier ángulo desde el vertical hacia abajo hasta ligeramente arriba de la horizontal. La longitud del vástago puede ser de 1.83, 3.05 ó 4.57 m, o más, dependiendo de la longitud de alimentación del barreno, algunas especificaciones de estos se muestra en la tabla II-3.



CAPÍTULO II: TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES



ESPECIFICACIONES REPRESENTATIVAS PARA LOS BARRENOS DE VAGONETA

Modelo	73	89	599
Altura total	3.10 mts	3.10 mts	4.50 mts
Ancho total	1.52 mts	1.70 mts	1.85 mts
Longitud total	1.88 mts	2.18 mts	3.00 mts
Recorrido máximo de alimentación	2.18 mts	2.41 mts	2.24 mts
Longitud del vástago del barreno, mts	1.83	1.83	3.05
Cilindro del barreno, cm	6.98	8.89	10.16
Vástago del barreno recomendado, cm	3.18	3.18	3.18
Tamaño de mangera de aire, cm	2.54	3.18	3.18
Peso de toda la unidad, Kg	368.78	696.28	732.56

TABLA II-3 Especificaciones representativas para los barrenos de vagoneta⁽⁶⁾



FIG II-29 Barreno de vagoneta (Gardner-Neve Co.)⁽⁶⁾

Barrenos de impacto. Consiste de: una broca de acero, adherida a un pesado vástago de barrenar, que se levanta y deja caer repetidamente, por medio de un cable de acero, dentro del agujero que se está taladrando. Las brocas se encuentran en diámetros variables desde aproximadamente 15.24 cm hasta 30.48 cm. Los



barrenos de impacto pueden utilizarse para barrenar las rocas que tengan cualquier grado de dureza (figura II-30).

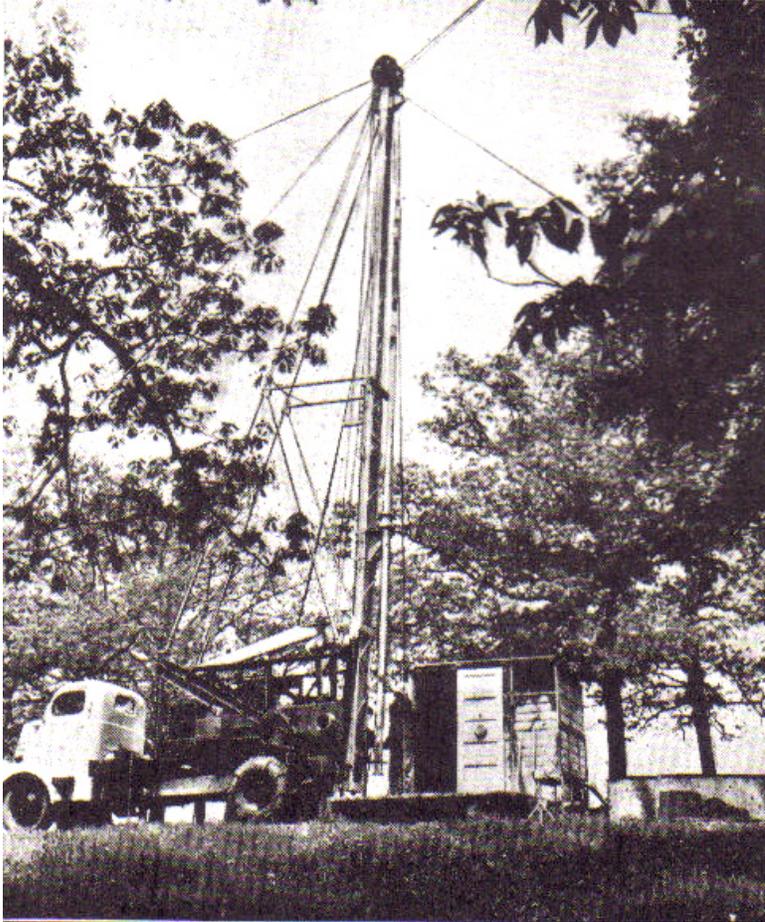


FIG II-30 Barreno de impacto (Bucyrus-Eric Co.)⁽⁶⁾

Se vierte agua en el agujero hasta la profundidad deseada, luego se levanta y se deja caer el vastago o barra que tiene un peso hasta de 2268 kg, repitiendo la operación hasta que se forma un lodo espeso. Se saca la barra y se mete en el agujero un achicador, con una válvula de talón para sacar el lodo. La broca debe afilarse con frecuencia para darle de nuevo su diámetro.

Debido a los tamaños relativamente grandes de los agujeros que se taladran, el espaciamiento entre uno y otro será de 9.14 m, o más.

Al barrenar caliza para la producción de agregado para la presa Bluestone, en West Virginia EUA, se utilizaron brocas de 22.86 cm para perforar 70 m de profundidad. Los agujeros se espaciaron cada 9 m, en una línea a 6 m de distancia de la cara del banco.



Los barrenos en caliza para la presa Bull Shoals EUA, se barrenaron a una profundidad de 26 m con brocas de 22.86 cm. Los agujeros se espaciaron cada 10 m, en filas alternadas cuyo espaciamiento fue de 9 m. La velocidad de perforación varió de 1.22 a 1.52 m por hora. Las brocas se afilaron después de 12.20 m de barrenación.

Barrenos de pistón. Entre los equipos de perforación, existe el barreno de pistón Ingersoll-Rand (figura II-31), cuya marca de fábrica es "Quarrymaster". La acción de este barreno es semejante a uno de vagoneta, excepto que la barra del barreno, que es un tubo hueco con un diámetro exterior de 9.53 cm, está unida al pistón y tiene un movimiento parecido con él. Las barras de extensión son de 10.67 m de largo. La altura de la columna es de 15.24 m. El barreno suministra aproximadamente 200 golpes por minuto. La carrera y el movimiento giratorio del pistón son reguladas para rendir el mejor comportamiento en todos los tipos de roca.



FIG II-31 Barreno de Pistón (Ingersoll-Rand Co.)⁽⁶⁾

El diámetro de la broca removible de carburo de tungsteno varía de 13.34 cm a 15.24 cm. Se experimenta muy poca pérdida de diámetro durante la perforación. Si se afila la broca al final de cada jornada de trabajo, es posible operar con una sola broca. Los detritos se sacan por medio de aire comprimido, como en los barrenos de vagoneta. En el barreno se monta un compresor de 500 hp, el cual está autoimpulsado.

Este barreno tiene un límite de profundidad práctico de aproximadamente 21.34 m, lo cual puede restringir su empleo en algunas obras.

El barreno, cuyo peso es de 16,329.6 Kg, está montado sobre orugas.

En la construcción de la presa Des Joachims, en el Canadá, el contratista empleó Quarrymasters de 13.97 cm para perforar agujeros de 6 a 12.20 m de



profundidad en una combinación de rocas de granito y gneiss. En esta obra el rendimiento de un Quarrymaster fue igual al promedio de 2 a 4 barrenos de impacto o al de 4 a 6 barrenos de vagoneta.

Barrenos barrenadores. Es un barreno auto-impulsado, montado sobre un camión, o sobre orugas (figura II-32). La barrenación se lleva a cabo por medio de una broca de tres conos, del tipo rodillo, atornillada en la parte inferior de un tubo de perforación (figura II-33). A medida que gira la broca en el agujero, se hace fluir hacia abajo un chorro continuo de aire comprimido para sacar los detritos y enfriar la broca. Existen barrenos para perforar agujeros de diferentes diámetros, con profundidades hasta de 91.44 m.

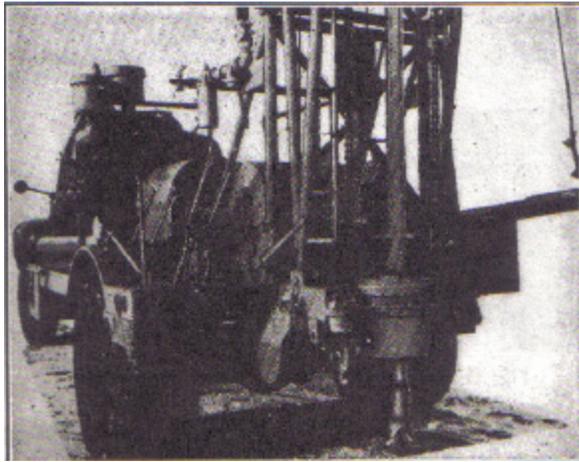


FIG II-32 Barreno barrenador (Davey Compresor Co.)⁽⁶⁾

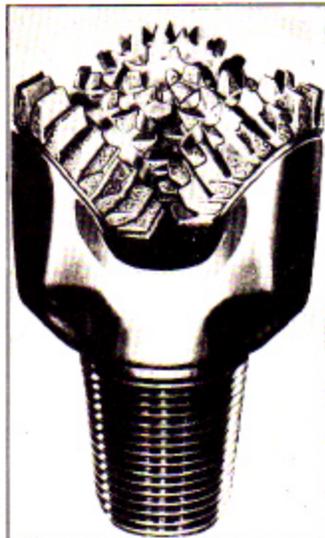


FIG II-33 Broca para un barreno barrenador⁽⁶⁾



CAPÍTULO II : TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES



Este barreno es adecuado para hacer perforaciones en roca suaves o semiduras, tales como dolomía o caliza, pero no es adecuado para barrenar en las duras rocas igneas.

El barreno desarrollado por la Joy Manufacturing Company está equipado con gatos niveladores. La columna normal es de 9.14 m de longitud, para manejar tubos de 6.09 m de largo. Pero puede utilizarse una de 12.20 m, para manejar tubos de 9.14 m de largo. Es impulsado con un motor diesel o eléctrico. Está equipado con un colector de polvo para sacar la piedra desintegrada a medida que sale del agujero.

En algunas obras, las velocidades de perforación han variado de 46cm por hora, en dolomía dura, a 15.24 m por hora en caliza. La velocidad de perforación se regula por medio de la presión que se suministra a través de dos cilindros hidráulicos de alimentación.

ESPECIFICACIONES PARA LOS BARRENADORES JOY

	Peso mediano	Peso pesado
Tamaño del agujero, cm	14.59 - 15.87	15.87 - 18.73
Peso, Kg	15876	20865 - 22680
Motor del compresor, hp	75	75 - 125
Motor giratorio, hp	30	50
Motor del colector de polvo, hp	5	5
Capacidad del compresor, cfm	370	370 - 550
Diám, de los cilindros de alimentacion, cm	10.16	15.24
Longitud de alimentación, cm	76.2	124.46
Velocidad de tracción, Km/h	1.61 - 11.27	1.61 - 8.05
Altura de la columna, abajo	3.28 mts	4.04 mts
Altura de la columna, elevada, mts	6.71	8.23

TABLA II-4 Especificaciones para los barrenadores JOY⁽⁶⁾



Barrenos abrasivos. Es una herramienta que depende del efecto abrasivo de perdigones de acero para penetrar la roca. Las partes esenciales incluyen una broca de perdigones, un tubo de perforación, un tubo para lodos, una barra de barreno, una bomba de agua y una unidad giratoria. La broca consiste en una sección de tubo de acero, con un extremo inferior dentado. A medida que se hace girar la broca, se alimentan perdigones al extremo inferior a través de la barra del barreno. Bajo la presión del barreno estos perdigones erosionan la roca para formar un espacio libre entre ella y el tubo de la broca, quedando dentro del tubo un corazón. El agua, que se suministra a través de la barra del barreno, hace subir los fragmentos de roca por afuera del barreno, en donde se sedimentan en un barril de lodos, para sacarlos al extraer toda la unidad del agujero. Periódicamente es necesario romper el corazón y sacarlo del agujero para poder continuar con la perforación.

En la figura 11-34 se ilustra un tipo de barreno abrasivo que ha sido ampliamente utilizado. La figura 11-35 ilustra la unidad de perforación que se utiliza para hacer girar la broca. La impulsión se efectúa por medio del rotor que se extiende debajo de la cabeza del barreno.

Los barrenos abrasivos normales son capaces de perforar agujeros hasta de 182.88 m, o más, con diámetros que varían entre 6.35 cm y 50.80 cm. Se han empleado equipos especiales para perforar agujeros hasta de 1.83 m de diámetro con profundidades mayores de 304.8 m. Puede barrenarse en roca de cualquier grado de dureza.

Aunque los agujeros grandes son costosos, permiten la entrada de un hombre para examinar los diferentes estratos en su lugar. Con este objeto algunas veces se perforan pozos de 76 o más centímetros de diámetro. Los agujeros más pequeños proporcionan corazones continuos para el examen estructural de las formaciones geológicas.

La velocidad de perforación con un barreno abrasivo es relativamente baja, algunas veces menor de 40 cm por hora, dependiendo del tamaño del barreno y de la dureza de la roca.

Barrenos de diamante. Se utilizan principalmente en las perforaciones de exploración, en donde se desea obtener corazones de la roca con el objeto de estudiar su estructura. La Diamond Core Drill Manufacturer's Association cataloga cuatro tamaños como normales, 3.81, 4.76, 6.03 y 7.62 cm. Pueden encontrarse tamaños mayores, pero la inversión en diamantes se incrementa rápidamente al aumentar el tamaño, que los barrenos abrasivos resultan más económicos en agujeros grandes (figuras II-36 y 37).

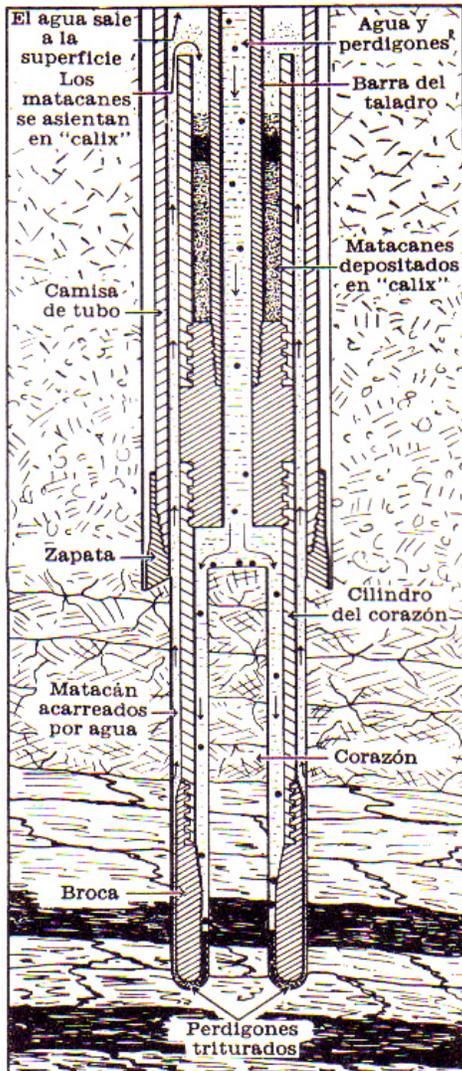


Fig. II.34 Barreno de perdigones⁽⁶⁾

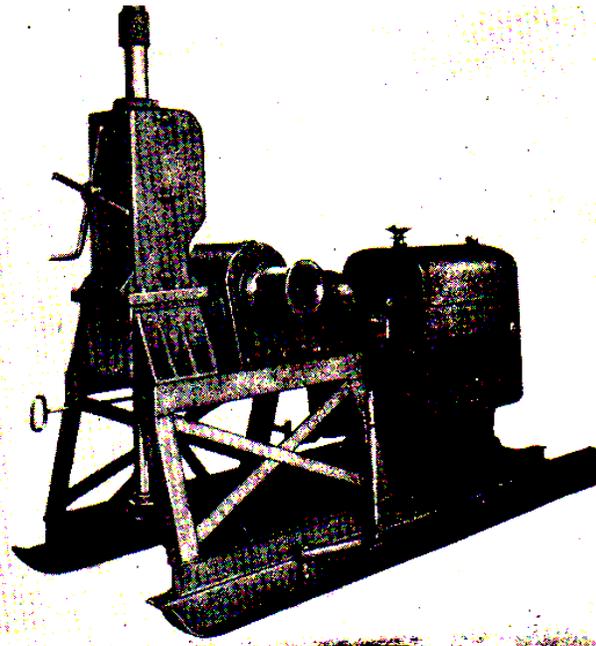


Fig. II.35 Unidad motriz para barreno de perdigones⁽⁶⁾

El barreno consiste de una broca de diamante, unida a un tubo para corazones, sobre un tubo de hincado, y en una cabeza giratoria para suministrar el par de impulsos. Se bombea agua a través del tubo de hincado para sacar los detritos. La presión sobre la broca se regula por medio de un tornillo o de una cabeza oscilante con alimentación hidráulica.



CAPACIDADES REPRESENTATIVAS DE LOS
BARRENOS ABRASIVOS*

Tamaño nominal de la broca, cm	Diámetro del corazón, cm	Profundidad, mts
6.35	4.45	182.88
8.89	6.68	152.4
11.43	9.21	106.68
13.97	11.75	91.44
16.51	14.29	60.96
45.72	43.5	12.192

TABLA II.5 Capacidades representativas de los barrenos abrasivos* Cortesía de Acker Drill Co.⁽⁶⁾

Los tubos para los centros se encuentran en longitudes variables de 1.52 a 4.57 m. Cuando la broca avanza a una profundidad igual a la longitud del tubo del corazón. Este se rompe y se saca del barreno del agujero. Los barrenos de diamante pueden perforar en cualquier dirección que se quiera desde la vertical hacia abajo, a la vertical hacia arriba.

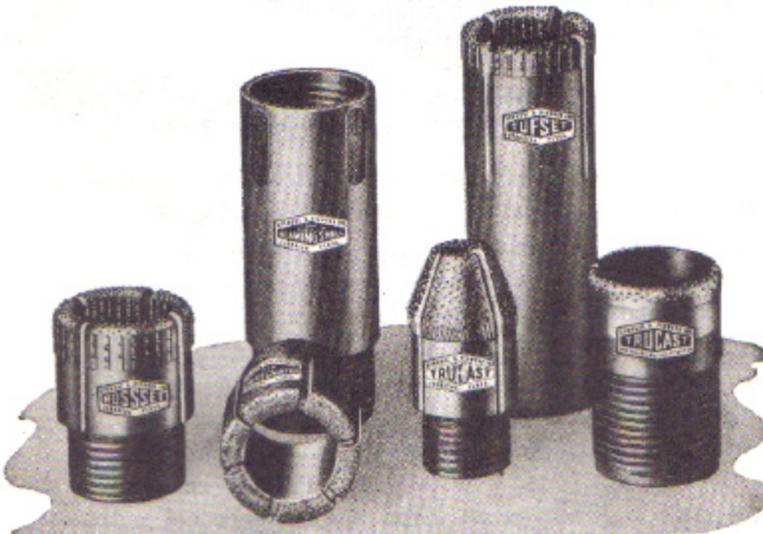


Fig. II-36 Brocas de diamante (Sprague & Henwood, Inc.)⁽⁶⁾



CAPÍTULO II : TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES



La selección del tamaño de los diamantes depende de la naturaleza de la formación que se va a perforar. Se prefieren los diamantes grandes para las formaciones suaves y los pequeños para las formaciones duras de grano fino.

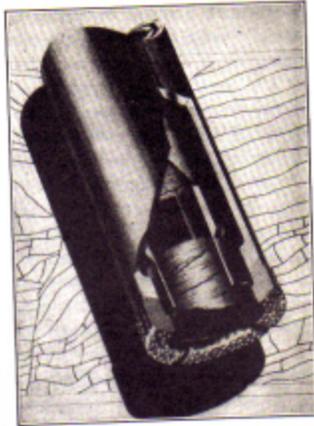


FIG II – 37 Broca de diamante para extraer corazones y cilindros de tubo doble⁽⁶⁾

Los barrenos de diamante son capaces de perforar a profundidades mayores de 304.8 m. Las velocidades de la broca pueden variar entre 200 y 1,200 rpm. La velocidad de perforación variará desde menos de 40 cm hasta varios metros por hora, dependiendo del tipo de roca.

Horadación por fusión. Esta es producida quemando una mezcla de oxígeno y un combustible que tenga un fundente, como el querosén, por ejemplo, con un soplete. Cuando se dirige la flama contra la roca, la alta temperatura, como de 2,200 °C, produce el desmoronamiento de algunas rocas. El fundente del combustible ocasiona la fusión de otros tipos de roca. Un rociado de agua, que se dirige sobre la parte caliente, empapa y desmorona la roca en fragmentos, que son obligados a salir del agujero debido a la expansión del vapor. Este proceso fue desarrollado por la Linde Air Products Company.

En pruebas de campo efectuadas, en el Mesabi Iron Range EUA, se perforaron agujeros de 15.24 cm de diámetro por 9.15 m de profundidad, a una velocidad aproximada de 3.048 m por hora, en comparación con la velocidad de 30.48 cm por hora de otros métodos de perforación.

Al barrenar pozos de 22.86 cm de diámetro en roca granítica de grano grueso, la velocidad de perforación fue como de 6.096 m por hora.

La velocidad de perforación en roca diabásica dura, para agujeros de 8.89cm, fue de 4.57 m por hora.⁽⁶⁾



II.4 PERFORACIÓN DE TÚNELES EN TERRENO BLANDO

En la excavación de túneles, el término terreno blando comprende en general las gravas, arenas, limos, arcillas y depósitos aluviales. Basándose en su comportamiento, Terzaghi clasificó dichos terrenos en categorías: compacto, desmoronado, deslizante, no compacto con roca alterada, y esponjoso. Las propiedades y comportamientos dependerán en un alto grado del contenido y el movimiento del agua, cuyo manejo constituye un aspecto vital de una operación segura y eficiente.

En terrenos blandos, con cualquier categoría que no sea el compacto, siempre será necesaria alguna forma de soporte inmediato, mediante ademado, escudos, revestimientos permanentes o una combinación de ellos. El manejo del agua se puede llevar a cabo de diversas maneras: bombeo, abatiendo el agua del suelo, congelación, inyección de selladores y aire a presión.

Suelos granulares

La grava o la arena, a menos que estén naturalmente cementadas o que se les haya inyectado algún producto, tenderán a resbalar en cualquier frente expuesto hasta alcanzar su ángulo de reposo; es probable que cualquier flujo de agua arrastre la arena fina. Esta clase de movimiento no es conveniente en cualquier escala que no sea la más pequeña, y es necesario el ademado en el frente para impedir su inicio. Por supuesto que la corona del túnel es particularmente vulnerable al flujo de la grava, por lo que es necesario utilizar maderos de apuntalamiento para soportar la parte superior a menos que sean efectivos un escudo de campana o un tratamiento adecuado del terreno. El soporte en el frente con grava o arena compacta se utiliza más bien para impedir el inicio del movimiento que para resistir un considerable empuje, debido a que en un material granular compacto, si no está alterado, la acción de arco se desarrollará rápidamente adelante del frente. No hay resistencia a la tensión ni cohesión y, si la hay, es poca en dichos suelos, por lo que se deberá asegurar cualquier cavidad, aun si es pequeña, para impedir el desprendimiento de un gran volumen. Un ademe ajustado del frente, con maderos angostos horizontales que se colocan uno por uno desde arriba hasta abajo, mantiene a un mínimo el riesgo de deslizamiento del terreno expuesto.

El agua que fluye en el frente puede arrastrar los finos y aflojar el suelo. Esto hace resaltar la importancia de utilizar maderos que se ajusten bien, pero también de abatir el nivel del agua en el frente con desagüe subterráneo tan cerca del piso como sea posible.

Para realizar lo anterior se puede utilizar un pozo filtrante en el piso, excavar desde la superficie fuera del túnel o un drenaje de alivio en la sección revestida del túnel donde ya está asegurado el terreno. En casos especiales se podrá usar el aire a presión o la inyección de lechada de cemento. Si existe la posibilidad de encontrar un gran tramo de grava o arena acuíferas, el escudo de bentonita es la mejor solución.



Limo

El limo tiene el grano más fino y exige todavía mayor cuidado, especialmente en presencia de agua. Sus propiedades cohesivas son muy sensibles al contenido de agua. Es característica de los limos la existencia de un rango de humedad muy pequeño entre el límite plástico y el límite líquido. Si se dejan secar, los limos se hacen frágiles y se desmoronan con facilidad; si se humedecen, se vuelven rápidamente fluidos. Su permeabilidad es más baja que la de las arenas, pero suficientemente elevada para que el agua se absorba o se descargue con mucha facilidad. El aire a presión constituye un medio valioso para excavar túneles en limos. Es esencial que el ademado quede bien ajustado, a menos que las condiciones sean especialmente favorables: alto contenido de arcilla en el limo, sin exceso de agua y rápido progreso de la excavación. Por lo general, la inyección de cementantes no es satisfactoria en los limos debido a la incapacidad de penetrar a través de la fina estructura de los poros, a menos que se utilicen lechadas de productos químicos muy costosos y con baja viscosidad. Las capas finas de limo inter estratificadas con arena y grava inhiben la inyección efectiva. En tales condiciones, la congelación ha demostrado ser satisfactoria.

Suelos orgánicos

Se deben mencionar también los limos y arcillas orgánicos, en los cuales la materia vegetal descompuesta es un constituyente típico. Las propiedades físicas difieren apreciablemente de las de suelos inorgánicos, su permeabilidad es baja y tienen alta compresibilidad. El contenido orgánico origina frecuentemente gases nocivos y los más típicos son: bióxido de carbono, ácido sulfhídrico o metano. Si se encuentran durante la construcción del túnel, es necesaria la ventilación adecuada y el control de la incidencia.

Arcilla

La arcilla posee propiedades cohesivas y plásticas muy valiosas que pueden proporcionar un excelente medio para la construcción de un túnel, excepto cuando es demasiado blanda o esté muy agrietada.

Su permeabilidad es baja y, excepto cuando está agrietada, presenta un sello contra la entrada del agua. No obstante, puede expandirse lentamente cuando está expuesta en una excavación y ejercer una creciente presión activa sobre cualquier soporte o revestimiento. Esto hace que el tiempo para un ciclo de operaciones sea determinante.

La plasticidad de la arcilla le permite deformarse bajo un cambio de carga y deslizarse por el frente, lentamente en la arcilla compacta y aún más lento en la arcilla blanda; se debe mantener la deformación dentro de estrechos límites si se tiene que restringir la alteración del terreno y su estructura de esfuerzos. Es



necesario utilizar un ademado fuerte en el caso de un frente grande, pero con los tablones no muy cercanos entre sí.

El agua que entra a lo largo de las grietas puede arrastrar el material y ampliar el paso del agua; también puede reblandecer la arcilla. Por lo tanto, se deberá considerar cualquier mancha de humedad presente en la arcilla del frente como señal de filtraciones. Esto es mucho más probable cuando el túnel está cerca de la parte superior del estrato de arcilla y el estrato sobre ésta es arena o grava acuíferas.

La expansión de las arcillas es atribuible generalmente a que el agua de los poros se desplaza al espacio donde se ha relajado el esfuerzo, debido a la excavación que existía previamente. El agua de los poros se mueve con lentitud hacia adentro desde el terreno circundante y no hacia afuera, como se cree a veces, desde la superficie expuesta. El fenómeno es muy importante en arcillas sobre-consolidadas, las que han estado sometidas durante un largo periodo a cargas pesadas que han expulsado gran parte del agua de los poros.

En un caso extremo, la arcilla o el limo pueden ser tan blandos y plásticos que se puede avanzar un escudo con el frente cerrado, o con pequeñas aberturas equipadas con persianas por las que se fuerza a pasar hacia el túnel tanto material como sea necesario. Por otra parte, la arcilla puede ser tan compacta y sólida que, en un túnel pequeño, no se requieran soportes inmediatos (Fig. II-38).

Herramientas

Las herramientas básicas para la excavación cuando no se utilizan explosivos son el pico y la pala, pero con equipo mecánico auxiliar. En la excavación en arcilla, la pala para arcilla operada neumáticamente junto con el pico son las herramientas más utilizadas en las excavaciones para romper y perfilar el frente. Si las dimensiones del túnel y otras condiciones lo permiten, la operación se puede mecanizar aún más utilizando una máquina del tipo que va sobre rieles guía, la que excava al hacer girar una cabeza de picos múltiples sobre un brazo operado hidráulicamente. La excavación continua se puede llevar a cabo por medio de una excavadora de tambor o por una máquina con cabeza giratoria de sección completa o por cabezas cortadoras oscilantes. El escudo de Greathead puede también funcionar como una herramienta excavadora o, con mayor precisión, como una herramienta perfiladora.



Fig. II-38 Excavación sin ademe para revestimientos de hierro colado en arcilla compacta⁽⁵⁾
FRENTE ADEMADOS

Las características fundamentales de la excavación en terrenos blandos se tratarán mejor explicando algunos ejemplos: primero un frente ademado en arcilla, seguido por los procedimientos más elaborados necesarios en un frente piloteado en suelos deslizables.

Frentes en arcilla

Se pueden utilizar frentes de este tipo para preparar el acceso de una excavación ascendente en un túnel mayor, tender una tubería de drenaje o de otro tipo, o construir muros preliminares a la excavación y el techado de un pasaje o cámara. También pueden funcionar como pilotos de guía en un túnel de mayores dimensiones para avanzar y soportar la corona, en la construcción de sillares de arranque del arco, en las cimentaciones de los muros o en el tratamiento del suelo mediante la inyección de lechadas de cementantes.

Las figuras II-39 (a) y (b) muestran un frente aproximadamente de 1.5 m X 2 m de sección que se avanza por tramos de 1.2 m en arcilla compacta. Para que el frente avance un tramo:

1. Se excava la parte superior en un tramo del ancho de dos o más tablonés.
2. El ademe de techo se pasa sobre el cabezal o travesaño anterior, y se apuntala temporalmente en el frente o cerca de él. Estos puntales se deberán fijar en la base, descansando sobre calzas con el frente de la arcilla apuntalado contra la falla por cortante.
3. Se excava progresivamente todo el ancho de la parte superior y el resto de la excavación.
4. Se fija un travesaño superior en su lugar para que soporte la carga del ademe de techo.

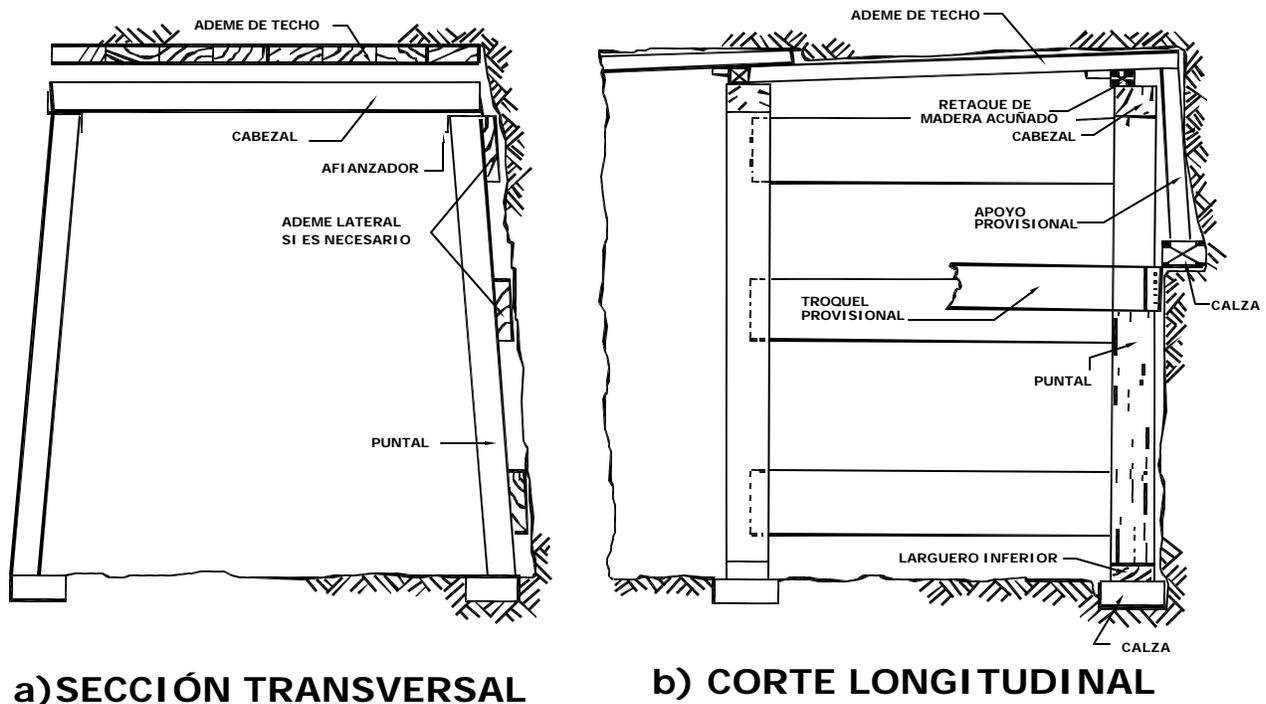
5. Los puntales acuñaos hasta el extremo del cabezal se fijan en la parte superior por medio de afianzadores, que son placas de acero dobladas que descansan en la base sobre calzas. Se colocan con "cuñas" en cantidades de 1 a 12 ó más, de tal manera que cualquier carga lateral procedente del terreno los apriete.

6. Puede ser necesario el ademe lateral.

7. Se quitan los puntales temporales del frente, todo se acuña bien hasta que quede ajustado, y después todo está listo para otro tramo.

Postes de avance

Los postes son necesarios en terrenos inestables, como las arenas o limos acuíferos o en roca fragmentada o alterada, donde quiera que sea peligroso exponer durante un corto tiempo aun partes pequeñas; de hecho, donde el tiempo de auto-soporte sea tan corto que el apoyo se debe fijar antes de la excavación. Se utilizan los postes de avance de madera o de acero como pilotes horizontales clavados previamente en el frente del túnel, antes de su apertura. El escudo de campana incorpora este principio, pero en ciertas condiciones la inyección de la lechada de cementantes o la congelación pueden ofrecer alternativas.



a) SECCIÓN TRANSVERSAL

b) CORTE LONGITUDINAL

Fig. II-39. Frente ademado en arcilla a) sección transversal b) corte longitudinal⁽⁵⁾

Un frente sobre pilotes de dimensiones similares al que ya se ha descrito sirve para ejemplificar los principios, pero es probable que se varíen los detalles para ajustarse al terreno. Es esencial el soporte del frente en esta clase de terreno por medio de tabloncillos colocados muy cerca entre sí y apuntalados adecuadamente en todas las etapas. La figura II-40 ilustra la descripción.

El estrecho ademe superior se corta biselado en el borde frontal y se clava en el terreno a través del último tramo terminado. Tiene que inclinarse hacia arriba a aproximadamente una inclinación de 1 a 6 de manera que pase por encima de donde está el siguiente cabezal con suficiente espacio libre para el siguiente tramo de tablonos que se deben clavar por debajo de ellos y por encima del cabezal. La pendiente hacia arriba podrá ser mayor que este espacio libre porque puede estar determinada por el tablón cuya parte posterior tiene que estar bajo el cabezal o travesaño que se encuentra antes.

En el caso más simple, el ademe de techo se clava primeramente en toda su longitud, comenzando por el centro, y el lateral se clava de manera similar, inclinándolo hacia afuera. Se puede ahora retirar el ademe frontal superior, lo que permite escarbar aproximadamente la mitad de la longitud del ademe de techo. Se avanza el ademe frontal superior y se vuelve a fijar en esta nueva posición apuntalándolo desde atrás. Se avanza todo el frente hasta la mitad de la longitud, tablón por tablón, trabajando hacia abajo hasta que se puedan completar un cabezal, un puntal y una superficie de fondo, lo que constituye una estructura intermedia que soporta el ademe de techo, el lateral y frontal. Éstos se acuñan firmemente en la armazón, que también se apuntala contra la estructura de atrás. Se avanza de nuevo la excavación, tablón por tablón, hasta la longitud total del tramo, donde se fija similarmente una estructura permanente, pero con piezas de puenteo y empaques que soportan el ademe de techo y el lateral, los cuales se empaican también para que se inserte el siguiente tramo de ademe.

Se podrá retirar la estructura intermedia si los tablonos son suficientemente fuertes o, si fuera necesario, se pueden dejar en su lugar.

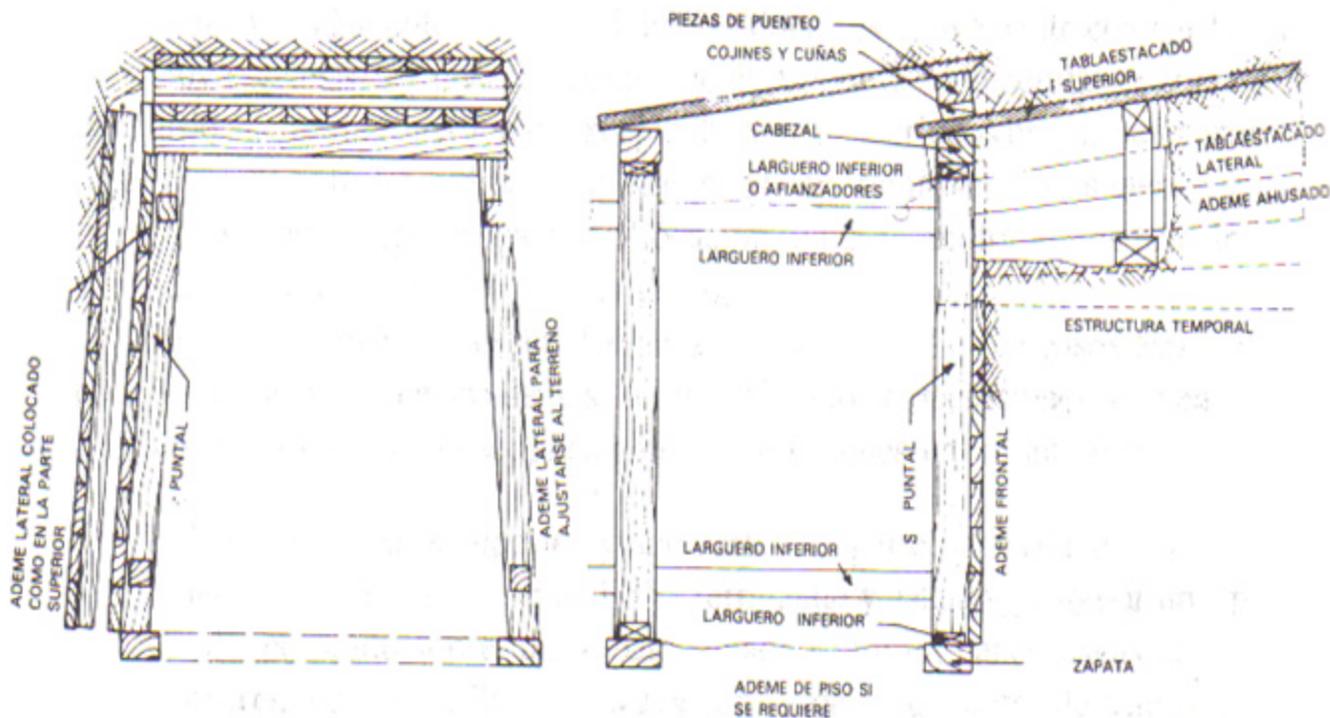


Fig. II-40. Frente con pilotes.⁽⁵⁾



Como sucede siempre en la construcción de túneles, el procedimiento exacto y los detalles estarán regidos por el comportamiento real del terreno, las dimensiones del frente, las dimensiones de los tablonos que se utilicen y la habilidad y rapidez de los obreros y las máquinas. La pendiente necesaria hacia arriba de ademe de techo y la inclinación hacia afuera del ademe lateral dejan expuesto el ángulo entre la parte superior y los lados, a menos que se utilice un ademe ahusado cuidadosamente clavado. Cualquier área del terreno que quede expuesta deberá cubrirse con tablonos cortos, mientras que los pequeños espacios se pueden rellenar con sacos, paja, etc.

En algunos terrenos no es práctico clavar los postes en toda su longitud, puede ser necesario clavarlos poco más de la mitad, excavar un poco, poner ademe temporal, colocar cuñas y volver a clavar postes hasta que quede listo para excavar la otra mitad.

El meollo de toda la operación está en la mano de obra cuidadosamente planeada para tener la seguridad de que ningún área importante del terreno quede sin soportes, y que cada una de las piezas de madera se coloque en forma segura y se fije con las cuñas necesarias en todo momento, excepto cuando haya que moverla.

REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS EN UN TÚNEL CIRCULAR

En el caso de un túnel con revestimiento por segmentos excavado en terreno blando sin utilizar escudo, se requiere un ademado en la parte superior y en el frente

La resistencia estructural y los espaciamientos entre los maderos del ademe se determinarán por la naturaleza del terreno, el tiempo durante el cual es necesario el soporte y la importancia de proteger la capa superpuesta del terreno contra todo asentamiento. En la figura II-41 se muestra un caso típico de un pequeño túnel de aproximadamente 3.5 m de diámetro donde es conveniente colocar las tablas muy cercanas. Es poco probable que este tipo de ademado tan cerrado sea necesario en arcilla consistente, excepto durante los periodos en que se interrumpa el trabajo, pero los principios aplicables al soporte de la parte superior y de frente, deben estar seguidos por la colocación, en cada anillo, de los principales elementos estructurales del sistema de soporte.

En el caso ilustrado, el túnel avanza anillo por anillo (en casos especiales podría ser posible una etapa de dos anillos). El ciclo de operaciones, comenzando después de la colocación y aplicación de inyecciones en un anillo es:

1. Excavar la parte superior y ademarla. La parte posterior del ademe de techo descansa sobre el anillo ya terminado y está apoyado por un "puntal" colocado sobre una zapata situada sobre un banco excavado sobre el frente de la arcilla. La excavación va desde el centro de trabajo hacia afuera por ambos lados hasta que el banco superior (de



aproximadamente 1 m a 1.5 m de profundidad) ha avanzado la distancia de un anillo.

2. Excavar un segundo banco. Es probable que sea necesario ademar el perímetro. Se supone que se necesitará ademe frontal y vigas mdrinas. Las zapatas de los puntales superiores no se deben ranurar y el frente del terreno donde se asientan deberá mantenerse apuntalado para asegurarlo contra las fallas por cortante.

3. Excavar hasta el piso conformándolo cuidadosamente de manera que se puedan colocar con exactitud los segmentos en su lugar.

4. Se colocan los segmentos desde el piso hasta la clave, verificando la precisión en la colocación de cada segmento. A menos que el terreno no ofrezca seguridad, las cuñas superiores se pueden recuperar según se colocan los segmentos.

5. Empacar el frente del anillo y rellenar con una lechada de cemento.

6. Los tablonces se mueven progresivamente hasta el anillo siguiente.

Cuando el frente completo de un túnel de grandes dimensiones debe ademarse en su totalidad, se requiere experiencia y mano de obra de muy alto nivel; la figura II-42 muestra un frente de este tipo.

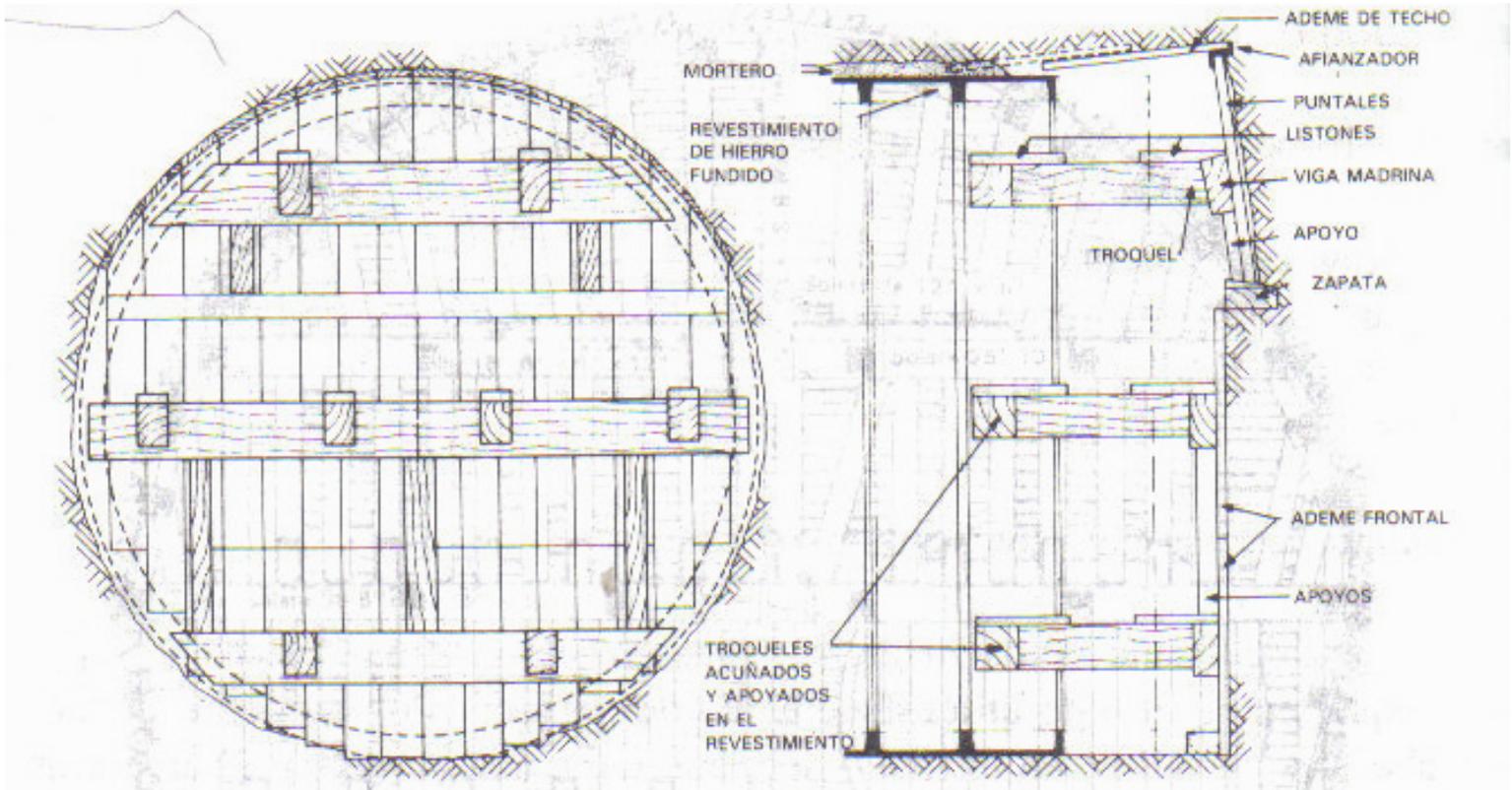


FIG. II-41 Ademe en un túnel pequeño. ⁽⁵⁾

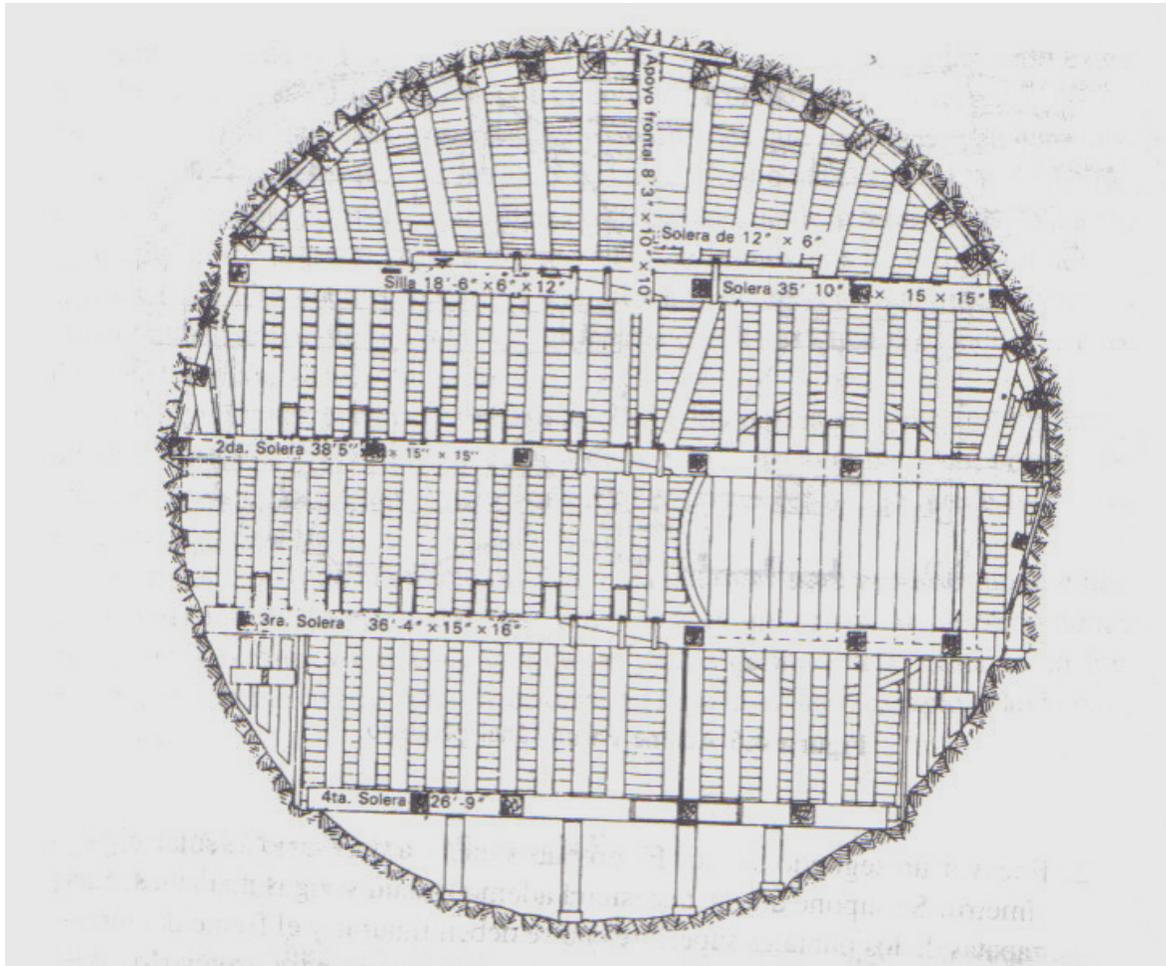


FIG II-42 Ademe del frente de 11 m en la ampliación del tren subterráneo del sur de Londres⁽⁵⁾

II.4.1. ESCUDO GREATHEAD

El escudo Greathead, proyectado originalmente para la excavación de túneles en arcilla bajo el Támesis, es principalmente un dispositivo que proporciona soporte continuo del terreno. También puede funcionar en menor grado como un dispositivo de corte y perfilado. El escudo está formado por un casco cilíndrico de acero rigidizado mediante nervaduras y diafragmas, y provisto de gatos hidráulicos para impulsarlo hacia adelante. Además de estos elementos básicos, se pueden incorporar o fijar al escudo dispositivos auxiliares (Figura II-43).

Las operaciones fundamentales que han de seguirse al usar este escudo serán:

1. Excavar hacia adelante, ademando el frente según sea necesario.
2. Empujar hacia adelante el escudo una distancia igual al espesor de un anillo, accionando con gatos desde el revestimiento terminado. Se



CAPÍTULO II: TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

podrá utilizar el escudo para perfilar cuidadosamente la excavación siempre y cuando no se requiera un empuje excesivo.

3. Retirar los arietes de empuje y armar el revestimiento por segmentos en el espacio libre detrás del escudo.
4. Aplicar inyecciones de cementantes en todos los espacios vacíos entre los segmentos y el terreno.

Repetir el ciclo de las operaciones.

Equipo auxiliar

Entre los dispositivos auxiliares que se utilizan están:

- Diafragma del frente
- Vigas rigidizantes verticales y horizontales
- Campana
- Reborde
- Faldón
- Equipo de izaje para los segmentos

El diafragma del frente ayuda a rigidizar el casco, pero permite en primer lugar cerrar aquél en el caso de un deslizamiento del terreno. Por supuesto, deberá tener abertura de acceso en el frente de manera que los obreros puedan entrar y salir para excavarlo y ademararlo. En un escudo pequeño es conveniente tener una puerta deslizante, o ranuras para las vigas de cierre. Es innecesario el cierre total del frente, pero es preciso utilizar una trampa para el material excavado. En este caso, el diafragma constará de dos partes, la parte frontal cubre la mitad superior del frente con un margen por abajo del eje, mientras que la parte trasera del diafragma cubre la mitad inferior y un margen por encima del eje. En un escudo grande (de 9 m de diámetro), como el utilizado en el primer túnel de Dartford en Londres, pueden localizarse tres de estas trampas para el material excavado, situadas a diferentes niveles de la plataforma. Una sola trampa de este tipo podrá funcionar en una emergencia como una trampa de agua, si el túnel se excava con aire a presión.

En general, el ademado del frente se fijará enfrente del diafragma si la excavación es de arriba hacia abajo, pero se han utilizado algunos dispositivos especiales. En el túnel de Blackwall, Gran Bretaña, el escudo estaba provisto con dos diafragmas completos, equipados con esclusas neumáticas destinadas a permitir el uso de una presión más alta en el frente de los diafragmas que en el resto del túnel. Tenía también un sistema de contraventanas de acero en el frente, las cuales sustituían el ademado, que podían deslizarse dentro del escudo por medio del control de tornillos de guía durante el empuje de los arietes principales. La utilización de la presión diferencial del aire nunca fue práctica.



En limo suave, el caso extremo es el de excavar el túnel por desplazamiento, en donde el escudo se empuja hacia adelante sin ninguna abertura o solamente con una muy pequeña. Esta técnica se utilizó en el lecho del Hudson, EUA para el túnel original de ferrocarril y, también, en la construcción de los túneles para carretera de Holland, EUA y Lincoln, EUA. De este último, con aberturas en el escudo de sólo el 0.5% del área de la cara, sólo se excavó el 30% del terreno y un 70% se gastó en "empuje ascendente". El limo blando, en estado plástico, fue forzado a pasar por el escudo para obtener cortes angostos. Se adoptó una técnica similar en la construcción del ferrocarril subterráneo de Chicago, EUA, descrita en detalle por Terzaghi, en la cual la apertura en un escudo de 7.6m y 17m de revestimiento se varió entre un 4% y un 20%, en un intento de controlar el empuje ascendente. De hecho, el empuje por delante del escudo variaba entre 0.03 y 0.10 m y le seguía un asentamiento de casi 0.15 m.

Serán necesarias vigas maestras verticales y horizontales para rigidizar el escudo y el diafragma. También pueden servir como plataformas de trabajo a diferentes niveles y para dividir el frente en compartimientos de trabajo.

Dichas vigas pueden llevar un sistema de gatos en el frente que sirvan también de apoyo al ademado del mismo y que se puedan diseñar para mantener la presión en el frente durante el empuje y, sin embargo, permitir que el escudo en conjunto se mueva hacia adelante dentro de dicho frente sin aplastar la madera. A veces se prefieren los "troqueles de candelerero" a la complejidad hidráulica de los gatos; en estos dispositivos se restringe el movimiento hacia adentro por medio de la fricción de rampas atornilladas.

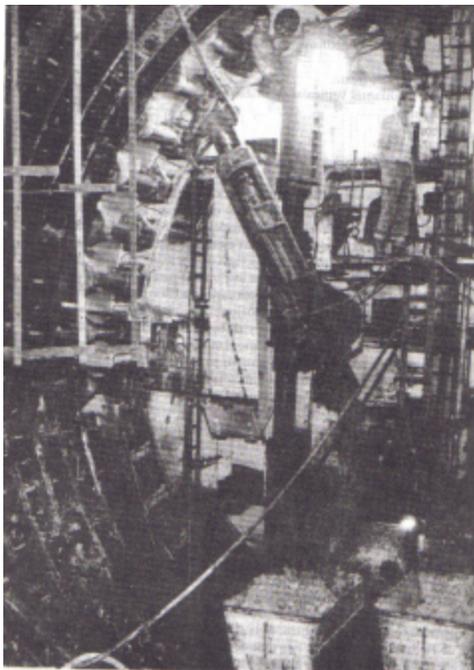


FIG. II-43 Vista posterior del escudo Greathead en un túnel.⁽⁵⁾



Campana o "cachucha": ésta es una proyección de la cuchilla de corte en la mitad superior del escudo, la cual actúa como los postes de avance y se mantiene enterrada en el terreno para asegurar el techo en todo momento. En grava, donde la fuerza necesaria para accionar este borde cortante es excesiva y podría originar una peligrosa alteración, se puede utilizar el procedimiento de las bolsas de arcilla, pero sólo como un último recurso. En esta operación, se hace manualmente un agujero en el terreno adelante del borde cortante el cual se rellena con arcilla amasada; se repite la operación en todo el derredor de la "cachucha" hasta que se obtenga un anillo parcial de arcilla preparada en el que se pueda empujar el escudo; la arcilla sirve tanto para proporcionar un sello de agua como para lubricar el paso del escudo.

Reborde: el radio de la cuchilla de corte se incrementa con frecuencia en uno o dos centímetros sobre el de la cubierta del escudo añadiendo un reborde. Esto se hace con el fin de reducir la fricción entre el terreno y la cubierta del escudo cuando éste se empuja hacia adelante, y para reducir los esfuerzos en el escudo (y en el terreno) cuando se requieran pequeños cambios direccionales. Los rebordes no siempre se extienden alrededor del piso del escudo. Obviamente, los rebordes pueden contribuir al asentamiento del terreno y de las estructuras que estén sobre la perforación del túnel.

Faldón: se necesita una extensión de la cubierta del escudo para formar el "faldón", a menos que el terreno sea tan confiable como para que permanezca sin apoyos durante la colocación del revestimiento y la inyección en el mismo. Normalmente, el revestimiento se monta bajo la protección del faldón que todavía se traslapa una pequeña cantidad después de haber sido empujado en la excavación. Los depósitos de lechada tienden a acumularse sobre la cubierta del faldón y, quizá, sea necesario suspender la operación y arrancarlos.

Equipo de izaje para los segmentos: en cualquier túnel, con excepción de los más pequeños, la colocación de los segmentos precolados requiere un equipo mecánico de izaje. Los problemas del manejo y colocación determinan el diseño y dimensionamiento de los segmentos. Un escudo de gran tamaño está generalmente equipado con uno o dos brazos radiales en el faldón; este equipo puede alzar y colocar los segmentos. El brazo, operado hidráulicamente, pivotea cerca del eje del túnel y es extensible, con una cabeza diseñada para tomar los segmentos en el punto de entrega en el piso y elevarlos y colocarlos en posición para que sean empernados.

Otros equipos

El excavador de tambor y otros escudos excavadores se han obtenido a partir del escudo Greathead, ideando cabezas rotatorias para cortar el frente según avanza el escudo. Este tipo es adecuado sólo en terrenos con un tiempo apropiado de autosoporte en donde se pueda prescindir del ademado. También se ha hecho que los revestimientos sean parte del mismo sistema, introduciendo directamente las cuñas del revestimiento en el terreno excavado, en lugar de utilizar pernos de anclaje e inyección de cementantes y selladores.



Es probable que el escudo de bentonita, especial para los acuíferos granulares, sea el último avance del escudo cerrado. Tiene un completo diafragma cerrado; cualquier espacio vacío adelante de dicho diafragma está cargado con lodo de bentonita. Existe una cabeza cortadora que gira en un círculo completo y el material excavado, suspendido en el lodo de bentonita, pasa hacia atrás a través de un dispositivo especial instalado en el diafragma y que funciona como una válvula. Por consiguiente, todo el frente está sometido a una elevada presión y la excavación y la eliminación del material excavado son completamente automáticos.

Dirección y guía

El control de un escudo para mantenerlo en línea y a nivel no resulta un problema fácil. Se necesitan levantamientos precisos para verificar el avance y, además, debe controlarse y registrarse precisamente la posición del escudo las veces que sea necesario y práctico, así como su posición en términos de la "desviación, con respecto a la horizontal", "desviación con respecto a la vertical" y "giro". Los errores se deberán corregir tan pronto como sea posible, normalmente, mediante el uso selectivo y controlado de los arietes de empuje. Se deberá también asegurar la exactitud del último anillo terminado.

Al controlar un escudo, la relación entre la longitud y el diámetro reviste una gran importancia. Si esta relación es mucho mayor de aproximadamente 1 a 1, resultará difícil corregir los errores de dirección; el túnel va excavando un pasaje a través del terreno que deja poco espacio para dar vuelta.⁽⁵⁾



II.5 PERFORACIÓN DE TÚNELES EN ROCA

La perforación de túneles es lo más común en operaciones subterráneas ya que forma parte importante de la construcción de cámaras de roca etc. y normalmente es una parte íntegra del funcionamiento minero. Los túneles pueden ser divididos en tres categorías en base al tamaño de sus secciones transversales:

- Túneles de pequeña sección, 4–20 m².
- Túneles de tamaño medio, 20–60 m².
- Túneles grandes, más de 100 m²,

Túneles de pequeña sección:

La sección transversal de un túnel de pequeña sección puede ser alrededor de 4 m² (Fig. II-44). Esta área proporciona espacio para poder instalar la tubería de ventilación y el uso de equipos pequeños de excavación.



Fig. II-44 Túnel de Pequeña sección⁽¹⁵⁾

Túneles de sección 4 a 6 m²:

En este tipo de sección normalmente se puede utilizar perforadoras manuales neumáticas con empujadores. Atlas Copco fábrica tres máquinas para diferentes características de rocas:

- Puma BBC 16 W (Fig. II-45). Esta perforadora es muy eficaz para la perforación frontal en todo tipo de roca. Está diseñada con un control centralizado tanto para la perforación como para controlar la fuerza de avancedel empujador.



Fig. II-45 Perforadora (puma BBC 16W)⁽¹⁵⁾



- Puma BBC 34 W (Fig. II-46). Perforadora para trabajar en todo tipo de roca, con un sistema de rotación apropiado para barrenos largos. Está diseñada con un control centralizado tanto para la perforación como para controlar la fuerza de avance del empujador.



Fig. II-46 Perforadora (puma BBC 34W)⁽¹⁵⁾

- Puma BBC 94 W (Fig. II-47). Perforadora semi pesada para trabajar en todo tipo de roca, con un sistema de rotación apropiado para barrenos largos. Está diseñada con un control centralizado tanto para la perforación como para controlar la fuerza de avance del empujador.



FIG II-47 Perforadora (puma BBC 94W)⁽¹⁵⁾

Para perforaciones de gran tamaño de barrenos paralelos, las perforaciones grandes se escarian a 64 ó 76 mm.

El diagrama de perforación para un túnel tan pequeño comprende perforaciones de corte y contorno y el número de ellas puede ser del orden de 26 + 1 perforación de escariado, si la periferia es cargada con explosivo amortiguado o liviano. Si la periferia no es cargada con explosivos amortiguados, el número de perforaciones es de 21 + 1. (Fig. II-48)

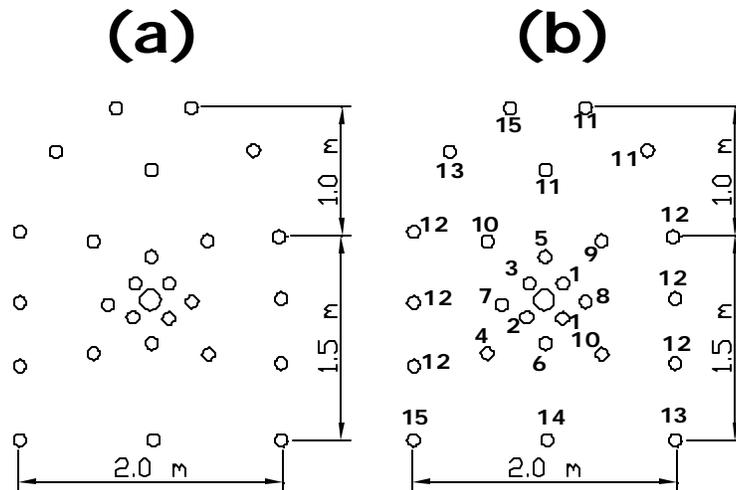


Fig II-48 (a) Patrón de perforación y (b) Patrón de detonación⁽¹⁵⁾

Explosivos apropiados: Dinamita encartuchada o emulsión en tiros de corte y destroza.

Explosivo amortiguado o liviano con un diámetro de 17mm en tiros de contorno, o 40 a 80 gramos por metro en cordón detonante (detonadores no eléctricos tipo NONEL).

Túneles de mediana sección:

Túneles de sección 6 - 20 m²: Cuando aumenta la sección transversal de una galería es posible usar un equipo de perforación más eficiente. Atlas Copco provee tres poderosos equipos de perforación para túneles pequeños:

- Rocket Boomer H 104-38 COP 1238 (Fig. II-49). de un brazo, equipo pequeño para áreas de túneles de 6 a 20 m².



Fig. II-49 Rocket Boomer H 104-38 COP 1238⁽¹⁵⁾



- Boomer H 281-38 COP 1238 (Fig. II-50). de un brazo, equipo de alta capacidad para áreas de túneles de 6 a 31 m².



Fig. II-50 Rocket Boomer H 281-38 COP 1238⁽¹⁵⁾

- Boomer H 282-38 COP 1238 (Fig. II-51). De dos brazos, equipo de alta capacidad para áreas de túneles de 8 a 45 m².



Fig. II-51 Rocket Boomer H 282-38 COP 1238⁽¹⁵⁾



El equipo puede ser suministrado mediante traslado por vía férrea o sobre carretera, con ruedas de goma. (Fig. II-52)

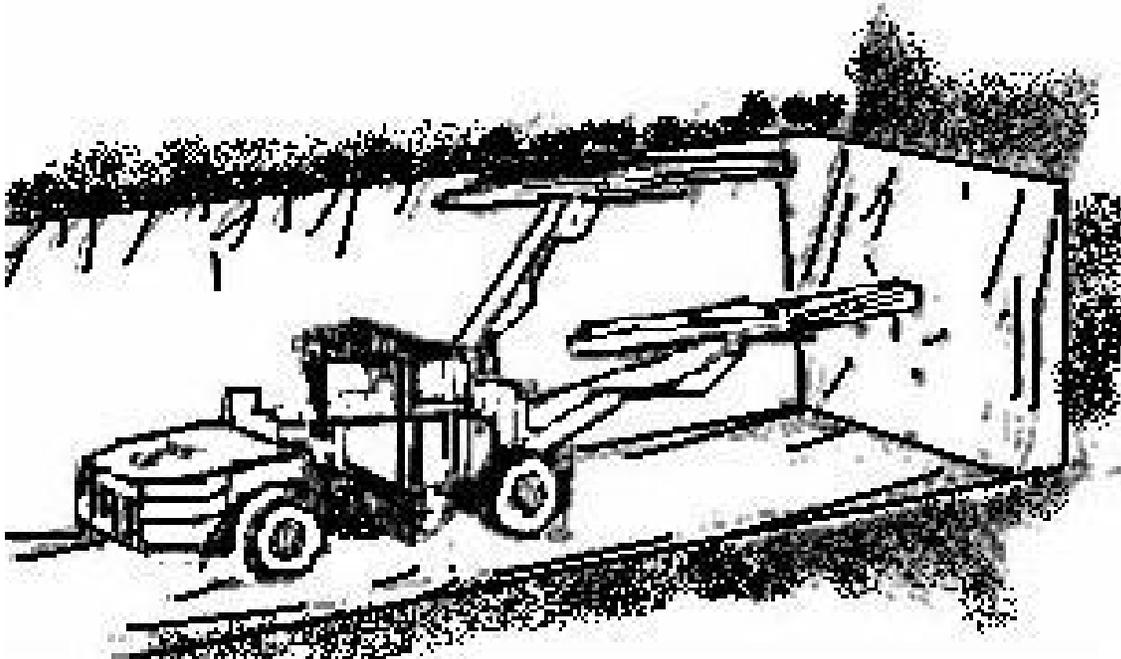
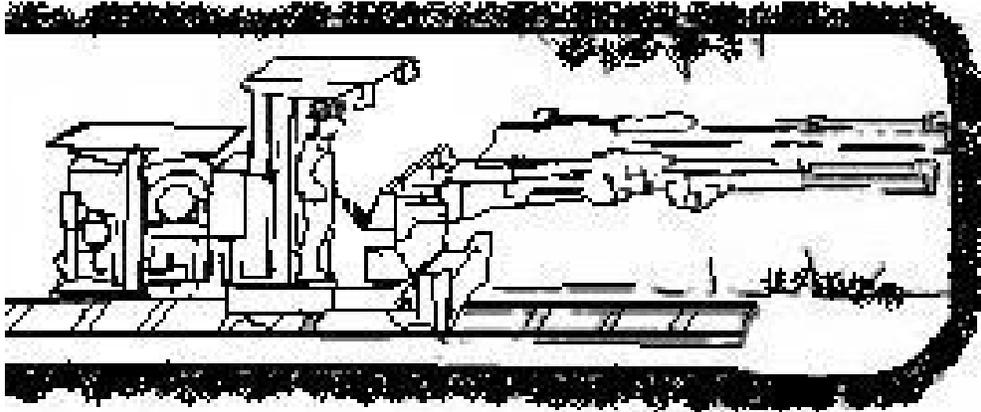


Fig. II-52 Traslado por vía férrea o con ruedas de goma⁽¹⁵⁾

En el diagrama de perforación para un corte de barreno paralelo. Se sugiere que el diámetro del barreno sea de 48 mm y la profundidad de perforación 3,30 m usando una barra con hilo R32 con una longitud de 3,66 m. El diámetro de la perforación del escariador se sugiere que sea de 76 mm.

Secuencia de disparo:

El diagrama de perforación en un área de túnel de 16,2 m² se muestra en la fig II-53. El número de perforaciones puede ser del orden 45 + 1 perforación de escariado si las paredes y el techo son cargadas con explosivo amortiguado o liviano. Para voladuras normales sin contorno amortiguado, el número de perforaciones es de 37 + 1 perforación de escariado.



CAPÍTULO II: TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

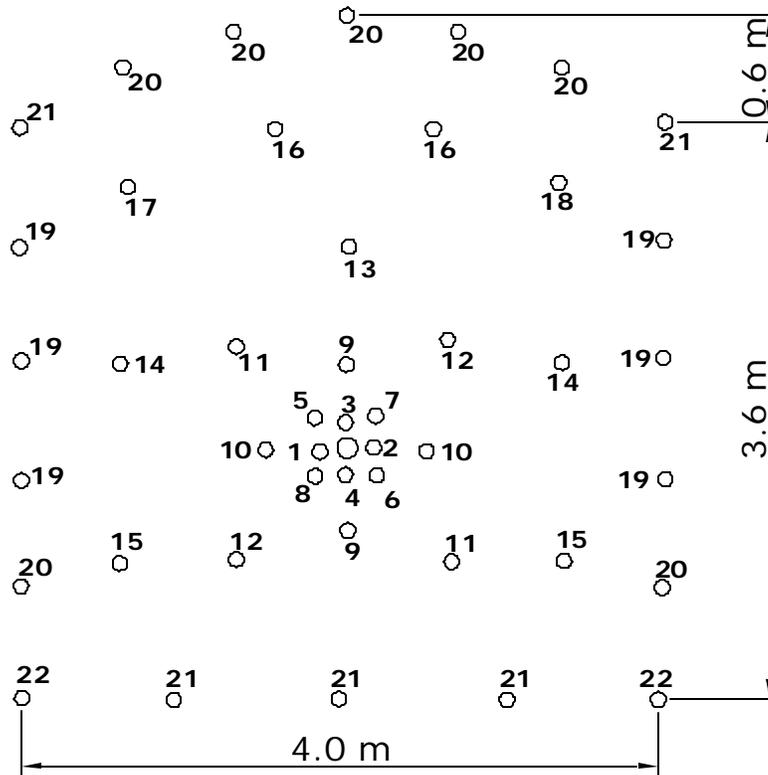


Fig. II 53 Secuencia de disparo.⁽¹⁵⁾

Explosivos apropiados:

Dinamita, emulsión o explosivos acuosos encartuchados. Para trabajos de carga más eficientes, se puede usar ANFO o emulsión bombeable.

Túneles de mediana sección: Los túneles de sección entre 20 a 60 m² son comúnmente empleados en la construcción de plantas hidroeléctricas, caminos, ferrocarriles, minería, cavernas o depósitos subterráneos, etc.

Atlas Copco provee una amplia gama de equipos de perforación para el desarrollo de túneles de mediana sección.

- Rocket Boomer 282 (Fig. II-51), equipo de perforación electro hidráulico con dos brazos paralelos para secciones de túneles de 8 - 45 m².

- Rocket Boomer M2 (Fig. II-54), equipo de perforación electro hidráulico de alta potencia con dos brazos paralelos para secciones de túneles hasta de 45m².



Fig. II-54 Rocket Boomer M2⁽¹⁵⁾

- Rocket Boomer L2 (Fig. II-55), equipo de perforación electro hidráulico de alta potencia para áreas de túneles hasta de 90 m².



Fig. II-55 Rocket Boomer L2⁽¹⁵⁾

Perforación y secuencia de disparo.

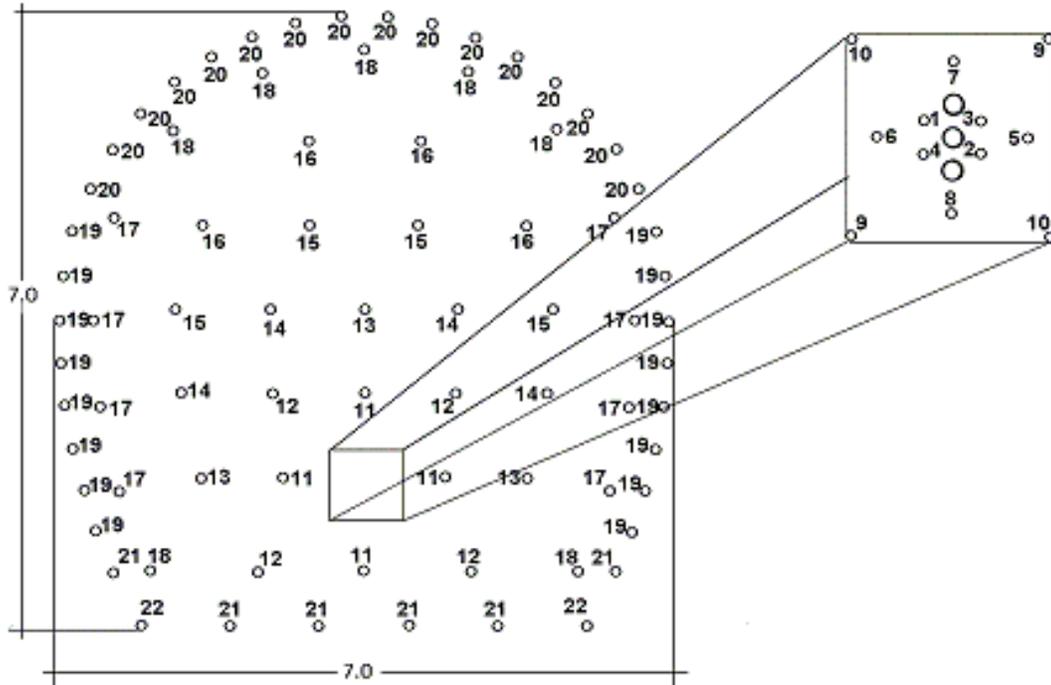


Fig. II-56 Diagrama de perforación y secuencia de disparo. ⁽¹⁵⁾

El diámetro sugerido para los barrenos escariados es de 89 mm con dos barrenos en el cuele.

El área del túnel es de 59 m² y el número de barrenos a tronar es de 82 tiros (Fig. II-56).

Explosivos apropiados: ANFO o explosivos de emulsión bombeables del tipo SSE (Explosivos Sensibles en el Sitio) en el cuele y tiros de destroza. Las paredes y techo deben volarse cuidadosamente a fin de evitar un exceso de rotura (sobre excavación).



Taladrado y modelo de encendido para un túnel en forma de herradura. (Fig. II-57)

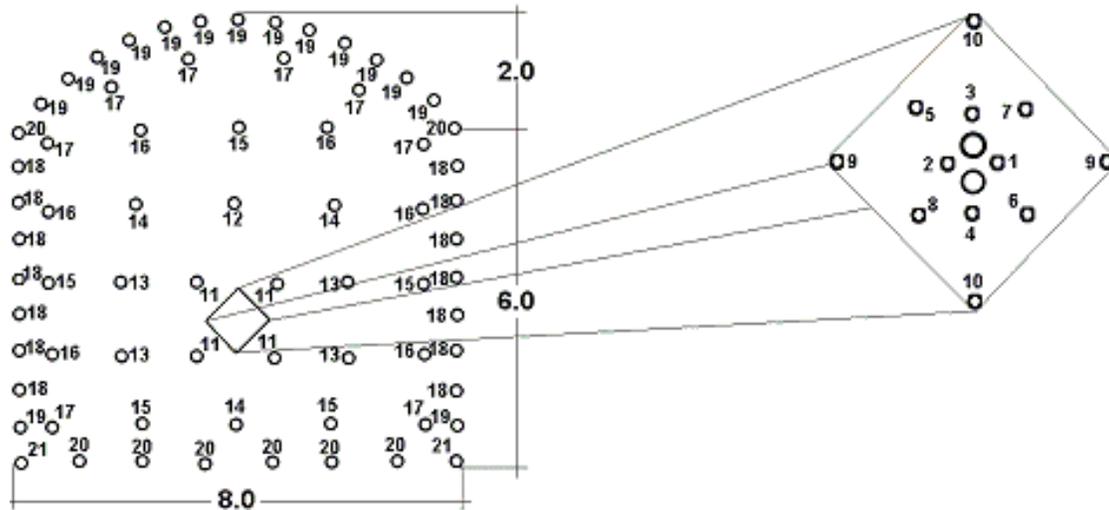


FIG II-57 Diagrama de perforación y secuencia de disparo para túnel en forma de herradura⁽¹⁵⁾

Los explosivos apropiados son cargas de tubos de 17 mm o cordón detonante de 40-80 gr /m con equipo de perforación de alta eficiencia, la carga de la voladura también debe ser eficiente para disminuir el tiempo del ciclo de trabajo. Los explosivos SSE poseen la ventaja de que no son explosivos hasta que sean bombeados dentro del barreno. La concentración de la carga se puede cambiar durante la carga del barreno de manera que no se requiere ningún explosivo especial para las perforaciones del contorno. Para un trabajo de carga eficiente con el camión de carga de SSE, la plataforma de servicio del equipo de perforación se puede usar junto con el equipo de carga del camión de SSE.

Explosivos apropiados: ANFO o explosivos de emulsión bombeables del tipo SSE (Explosivos Sensibles en el Sitio) en el cuele o tiros de destroza. Las paredes y techo deben volarse cuidadosamente a fin de evitar una rotura excesiva (sobre excavación). Los explosivos apropiados son cargas de tubos de 17 mm o cordón de detonación de 40 - 80 gr /m con equipo de perforación de alta eficiencia, la carga de la voladura también debe ser eficiente a fin de disminuir el tiempo del ciclo de trabajo. Los explosivos SSE poseen la ventaja de no ser explosivos hasta que se bombeen dentro del barreno.

La concentración de la carga se puede cambiar durante la carga del barreno, de manera que no se requiere ningún explosivo especial en los barrenos del contorno. Para un trabajo de carga eficiente con el camión de carga SSE, la plataforma de servicio del equipo de perforación se puede usar junto con el equipo de carga del camión SSE.



Túneles de gran sección:

Los túneles gran sección sobre 60m^2 son comúnmente empleados para la construcción de caminos, líneas férreas, plantas hidroeléctricas, galerías de avance, cavernas de almacenamiento subterráneo etc. La cobertura mayor que es posible perforar en sección completa es de 168m^2 , pero normalmente a ningún túnel de dicho tamaño se le vuela la sección completa debido a otros factores que limitan el área práctica, uno de los factores a considerar es el número de períodos de los sistemas de iniciación existentes. Los sistemas eléctricos normalmente poseen 12 períodos mientras que los sistemas con cargas de tubos o cordón detonante alcanzan 25. La sección práctica de un túnel de tamaño grande es alrededor de 100m^2 .

Los métodos de perforaciones y voladuras para túneles de gran sección son iguales a los métodos para túneles de mediana sección.

En secciones transversales mayores, es práctico efectuar más de una voladura para llegar a la sección total. Si el túnel es demasiado ancho para una perforación y voladura de sección completa, la sección transversal se puede dividir en un túnel piloto y barrenos laterales al ancho deseado (Fig. II-58).

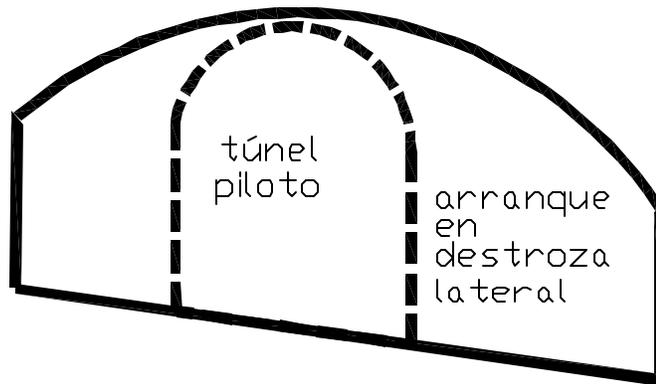


FIG II-58 Túnel piloto y barrenos laterales⁽¹⁵⁾

Si el túnel es alto, se puede volar primero una galería piloto y después un banco horizontal y banqueo vertical hasta que se obtenga la altura deseada (Fig. II-59). La razón del banqueo horizontal después de la galería es que normalmente no hay espacio para que el equipo pueda perforar en la galería. En el banqueo horizontal se puede usar el mismo equipo usado para perforar la galería.

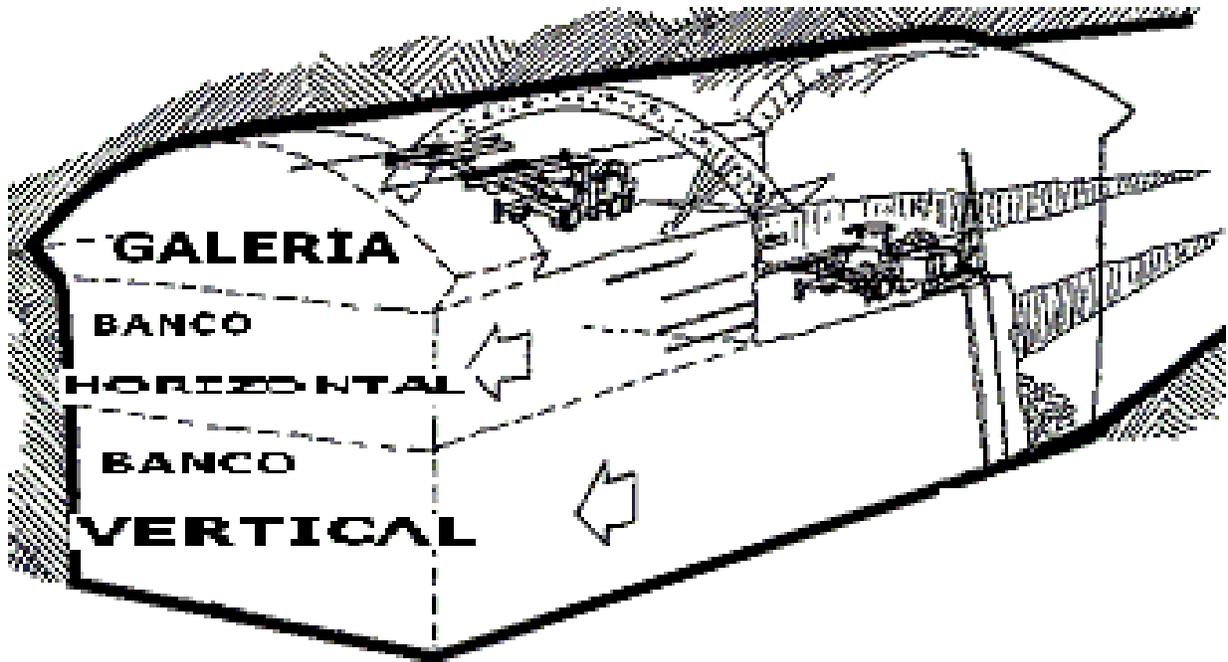


Fig. II-59 Galería piloto con banco horizontal y vertical⁽¹⁵⁾

Aunque es posible perforar túneles hasta de 168 m² de sección completa, las limitaciones en los sistemas de iniciación hacen que sea más práctico dividir la sección transversal en una galería y banco horizontal. En el ejemplo siguiente un túnel con una altura de 15 m y 12 m se divide en una galería de 7,5 m de altura y un banco horizontal con una altura de 4,5 m (Fig. II-60).

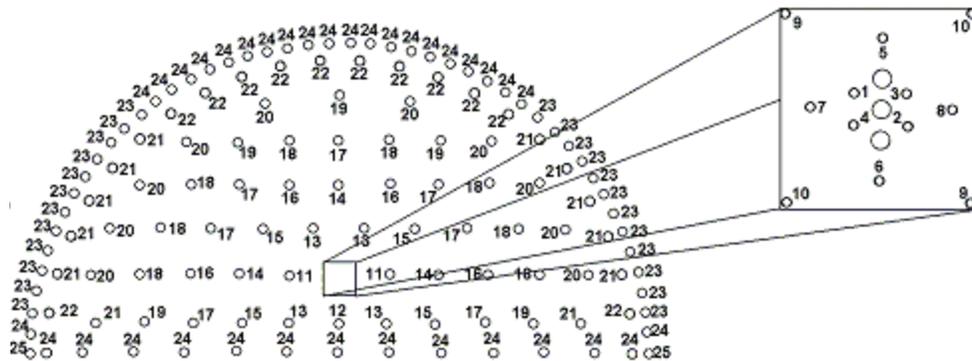


Fig. II-60 Diagrama de perforación y secuencia de disparo.⁽¹⁵⁾

Explosivos apropiados: Los mismos utilizados para túneles pequeños

Secuencia de disparo: El mismo tipo de explosivos y sistemas de iniciación se recomiendan para el banqueo horizontal. Para instalar estaciones de energía hidroeléctrica y cavernas para el almacenamiento de aceite, etc.

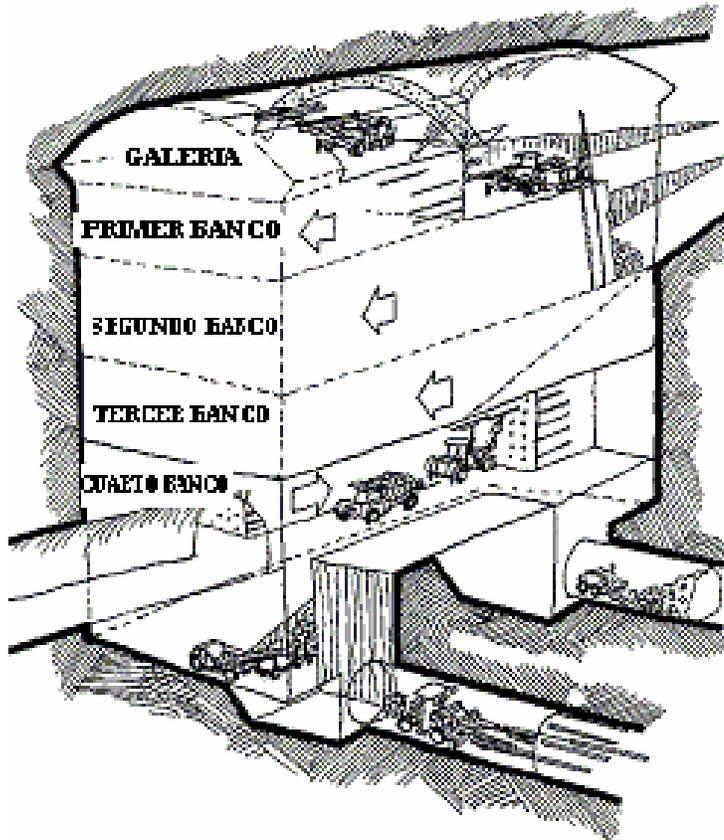


Fig II-61 Túnel piloto, banqueo horizontal y vertical en secciones grandes⁽¹⁵⁾

El banqueo vertical se puede aplicar cuando existe suficiente altura para el equipo de perforación. El diagrama de perforación para los bancos verticales depende del diámetro de los barrenos. En el banqueo vertical los barrenos de mayor tamaño se pueden usar para economizar la operación. Como en otras operaciones, se deben usar explosivos eficaces en función de los costos como ANFO y SSE (Emulsiones Sensitivas al Terreno).

Preferentemente se debe usar un sistema de tubos de impacto no eléctrico.

El túnel piloto se puede colocar en cualquier lugar de la sección del túnel pero tal vez sea práctico colocarlo lo más bajo posible a fin de que la excavación hacia el túnel piloto sea lo más fácil posible (Fig. II-61).⁽¹⁵⁾



II.6 VENTILACIÓN DE TÚNELES

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

Gases de escape

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

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

Los motores diesel pueden contener el 0,2 % de este gas a plena potencia y del 1 al 2 % con funcionamiento defectuoso.

Si observamos que un motor de 50 Caballos de Vapor da un caudal de gases de escape del orden de 3 m³/minuto, vemos que pueden presentarse rápidamente contenidos importantes de este gas en los túneles largos y de pequeña sección.

Generalmente, se admite que el contenido de CO₂ tolerable en el ambiente para una jornada de trabajo de ocho horas es del orden del 1/10000 en volumen. Los hidrocarburos no quemados son más molestos que peligrosos. Es desagradable respirarlos. Algunos higienistas argumentan que pueden producir cáncer de pulmón.

Los aldehídos provocan, con el anhídrido sulfuroso, el olor característico de los gases de escape. Con su concentración habitual no son peligrosos, pero, sin embargo, ejercen una acción irritante sobre los ojos y las vías respiratorias.

El gas carbónico (CO₂) no constituye propiamente un producto tóxico, pero su presencia resulta perjudicial cuando reduce anormalmente la cantidad de oxígeno respirable.

De todo esto resulta la necesidad de la ventilación para obtener una dilución conveniente de estos gases. Puede estimarse muy groseramente, que son necesarios 5 m³/minuto de aire por Caballo de Vapor. Sin embargo, puede reducirse esta cifra mediante el empleo de depuradores de los gases de escape.

Los más eficaces parecen ser los depuradores de oxidación catalítica, que eliminan los productos no quemados dando gas carbónico y agua.

En ciertos tipos, el agente catalítico está constituido por barritas de cerámica revestidas de una fina película de aluminio y platino. Es necesaria una temperatura del orden de los 250°C, que se consigue mediante los gases de escape.

Debe instalarse en el aparato una toma de aire para aportar el oxígeno necesario.

En otro sistema se inyecta oxígeno en el escape.

Gases resultantes de las voladuras

La explosión de 1 kg de dinamita produce aproximadamente 1 m³ de gas con el 5 % de óxido de carbono, o sea, 50 litros de este gas. Para rebajar al 1/10000 el contenido de este gas en el ambiente en cabeza de túnel, debería precederse a la adición de 500 m³ de aire, lo que conduciría a ventiladores desproporcionados respecto a los que son necesarios para la ventilación normal.

La práctica demuestra que, limitándose a hacer circular después de cada explosión un volumen de aire equivalente al de 300 m³ de galería, se rechaza el tapón gaseoso a un centenar de metros tras al frente de ataque. Los obreros pueden atravesarlo rápidamente sin peligro llegando al frente de ataque en el que el aire es puro. Esta ventilación es compatible con la potencia de los aparatos de ventilación normales trabajando de 15 a 30 minutos.

Esta ventilación es precedida por una aspiración destinada a desplazar el tapón de gas. Esta aspiración previa puede obtenerse mediante ventiladores reversibles o invirtiendo el circuito de aire, según el esquema de la figura II-62, con un ventilador ordinario.

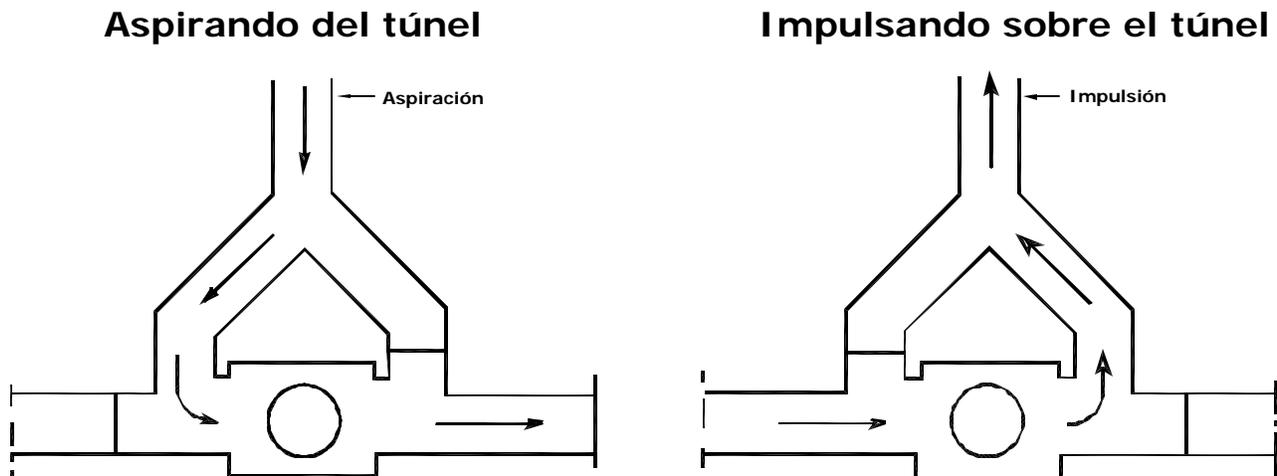


Fig. II-62 Dispositivo de inversión de ventilación⁽¹⁾

Los ventiladores están instalados al aire libre. El aire se hace circular por conducciones de chapa de diámetro que varía de 30 a 100 cm.

Incidentalmente el espacio que ocupan los ventiladores en la galería plantea problemas para respetar el gálibo necesario para las máquinas de perforación de hormigonado y transporte.

Para acelerar la separación del tapón de gas del frente de ataque, puede utilizarse el «Coanda Flow», que es un eyector de gran potencia.

Mediante un sistema de tuberías adecuadamente dispuestas, este dispositivo logra, utilizando aire comprimido a 7 kg/cm², aspirar aire tras la zona de la voladura,

proyectándolo sobre el frente de ataque a una velocidad que se aproxima a los 60 m/seg. Los gases removidos por esta inyección de aire son evacuados por las tuberías de ventilación de 1,00 m de diámetro, como indica el esquema de la figura II-63.

Uno de estos aparatos se ha utilizado en el túnel de Mont Blanc, Francia.

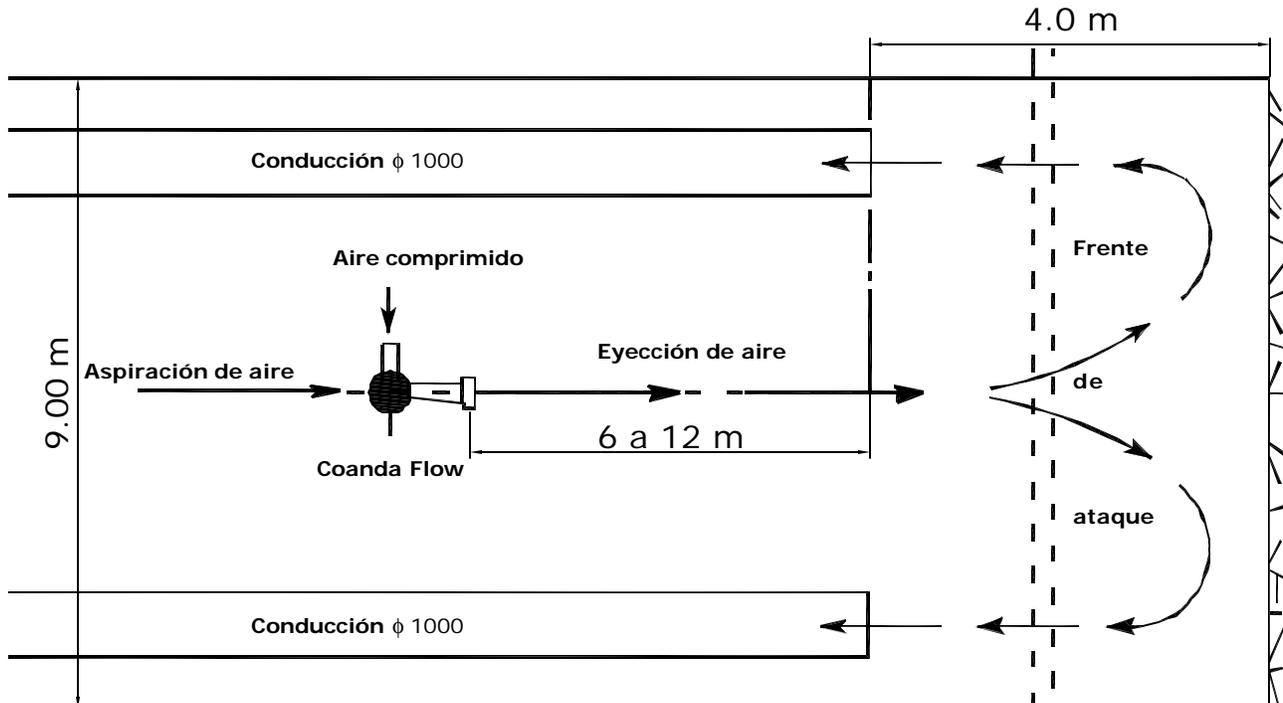


FIG II-63 Evaluación de los humos después de la voladura⁽¹⁾

Temperatura en los túneles

A medida que se aumenta la profundidad de los túneles se comprueba una elevación de temperatura.

Se llama grado geométrico la profundidad de avance en el suelo que produce un aumento de temperatura de un grado. Esta profundidad es variable según la naturaleza de las rocas y su estratificación. Observemos que, en el momento de la ejecución de los revestimientos, la elevación de la temperatura es acentuada por las reacciones exotérmicas de fraguado de los hormigones.

En el Mont Genis Francia, la temperatura llegó a 28,9° (a 6000 m de la boca sur y 1370 m de profundidad), en el San Gotardo, Suiza 30,2° (a 7640 m de las bocas y 1600 m de profundidad) y en el Simplón, Suiza 54,5° (a 9000 m de la cabeza norte y 2135 m de profundidad).

En el Mont Blanc, Francia, la temperatura de la roca era de 30,5° a 3500 m de la boca y a una profundidad de 2000 m.

Cuando la temperatura sobrepasa los 25° resulta molesta para el trabajo, y debe combatirse mediante una ventilación enérgica cuyo efecto puede completarse

mediante pulverizaciones de agua fría en el aire sobre la boca e instalando refrigeradores.

En el túnel del Mont Blanc, Francia, los grupos refrigeradores de aire estaban dispuestos en el tajo de avance y en el de hormigonado. En el tajo de avance los grupos estaban situados lateralmente sobre la estructura del jumbo (fig. II-64).

Cada grupo está constituido por tres partes: un ventilador, un lavador Solivore y un separador de agua. El ventilador helicoidal está acoplado directamente a un motor eléctrico con una potencia de 20 CV y aspira del interior del túnel el aire caliente cargado de polvo. El lavador está equipado con pulverizadores de láminas de agua fría que provienen de un torrente alimentado por los glaciares y conducido por las tuberías a lo largo del túnel. La alimentación de los pulverizadores comprende dos tomas de agua separadas que permiten utilizar caudales de 15 m³/hora ó 30 m³/hora de agua fría, según el enfriamiento deseado.

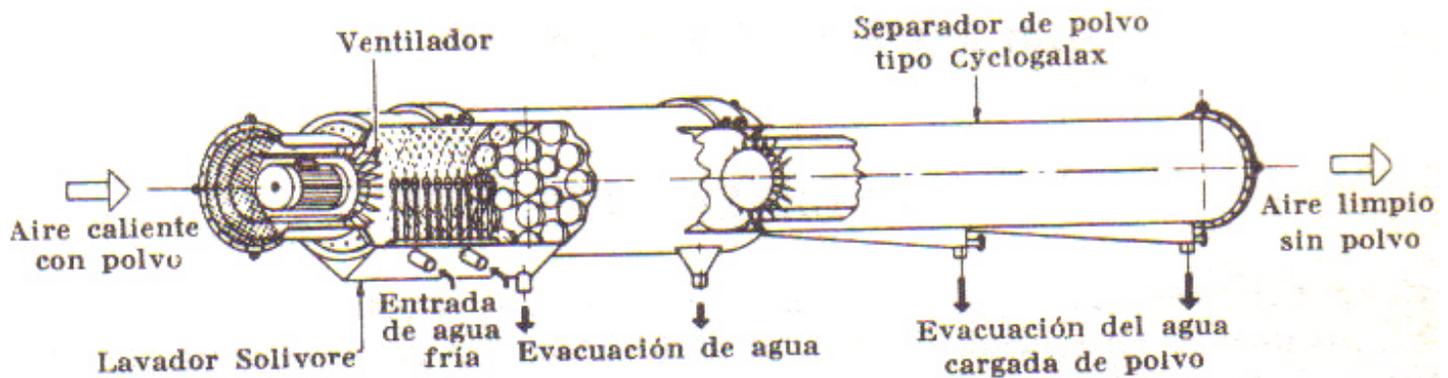


FIG II-64 Instalación frigorífica del Mont Blanc.⁽¹⁾

El lavador está seguido por un separador axial de gotas de pequeñas dimensiones, patentado, llamado «Cyclogalax», fundado en el principio del ciclón de alto rendimiento y pequeña pérdida de carga.

Las partículas de polvo mojado sometidas a la fuerza centrífuga se separan de la trayectoria del aire, se dirigen hacia la periferia y caen a las tolvas de evacuación.

El aire depurado y enfriado escapa axialmente a gran velocidad por la tubería central.⁽¹⁾



CAPÍTULO III:

ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL USO DE EXPLOSIVOS



Objetivo: En este capítulo se describirán los estudios necesarios para la construcción de túneles mediante el uso de explosivos, para así determinar las técnicas de voladura apropiadas.

III.I GENERALIDADES

Es muy importante dentro de los estudios preliminares determinar los defectos físicos de las rocas, así como los trazos de perforación, ya que de esto dependerá en gran manera el tipo de explosivo a utilizar así como la técnica de voladura .

El empleo de los explosivos que hasta hace pocos años era sólo un trabajo denominado por lo general por los pobladores, cabos y sobrestantes prácticos en su manejo, gracias a las investigaciones y observaciones estadísticas se ha convertido en una verdadera ciencia que día a día se formaliza notoriamente.

El uso de los explosivos tiene muchas aplicaciones, variantes y modalidades, que para cubrirlas se requeriría de un verdadero tratado. El uso, propiamente dicho, constituye ya una actividad que queda dentro del marco del procedimiento de construcción.

Con el incremento de los grandes proyectos de ingeniería cada vez aumenta el empleo de explosivos, los que a su vez constantemente se han venido perfeccionando y de la experiencia de su empleo durante muchos años se han aprendido ciertas reglas y principios generales aplicables, para una correcta selección de acuerdo con los fines específicos a que en cada caso se dirigen.⁽³⁾

El trabajo de excavación de roca es un proceso que requiere una preplaneación detallada para obtener resultados económicos. En grandes excavaciones un pequeño error en costos unitarios (por ejemplo en el costo del metro cúbico) se convertirá en una gran pérdida a lo largo del trabajo. La situación se vuelve crítica a medida que el costo, mal estimado generalmente, no puede ser corregido durante el trabajo, en el momento mismo que la excavación se vuelve un proceso repetitivo sin alternativas de cambio y en el que, el mejor método posible, así como la maquinaria, habrán sido ya escogidos durante la etapa de planeación. Debido a ello, es imperativo planear en forma correcta desde el principio.

El método más económico de excavación así como su costo unitario correspondiente incluyendo todos los factores que lo conforman, se presenta en la figura III.1 del proceso de planeación.⁽¹¹⁾

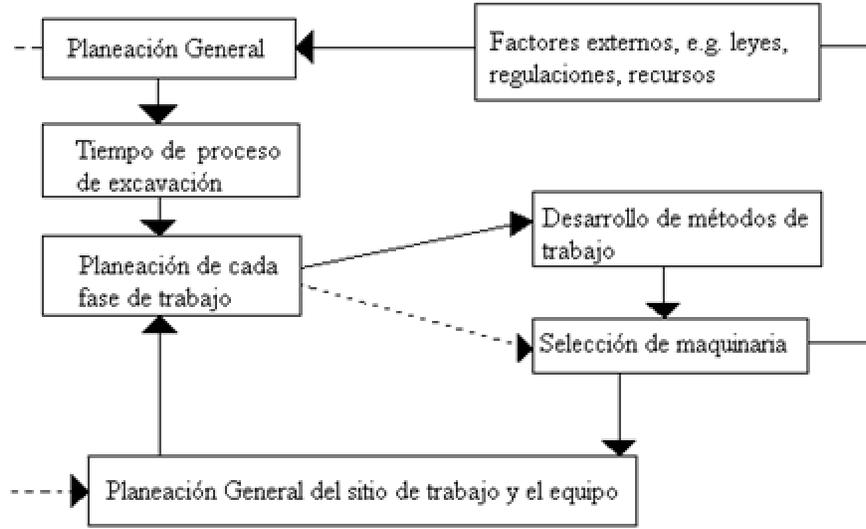


FIG III. 1 Planeación del proceso del trabajo de excavación de roca⁽¹¹⁾



III.2 DEFORMACIÓN TECTÓNICA DE LAS ROCAS

Todas las rocas, independientemente de su tipo, tienen deformaciones tectónicas o estructurales que ejercen una considerable influencia en las operaciones de perforación de túneles. Estas deformaciones consisten en fracturas, cuyas magnitudes y espaciamiento varían considerablemente. Las fracturas simples se definen como juntas, mientras que las fracturas mayores, asociadas con desplazamientos relativamente grandes, se definen como fallas.

Grietas. Son las superficies de fallas físicas o separaciones con muy poco o ningún desplazamiento entre las componentes de la roca en lados opuestos de la grieta. Estas pueden existir en dos o tres planos aproximadamente ortogonales entre sí.

Al perforar un túnel en una formación rocosa, la existencia de juntas afectará la cantidad de ademe que tenga que ponérsele al domo durante las operaciones de perforación del túnel. También, las juntas proporcionan un pasaje por donde puede filtrarse el agua subterránea al túnel.

Fallas. Es una zona en una formación de roca en donde ha ocurrido un gran desplazamiento a lo largo del plano de falla. El desplazamiento puede ser horizontal, vertical, o una combinación de los dos. Por lo general, una falla constituye un peligro indeseable en la perforación de un túnel. Debido a las enormes fuerzas que produce la falla, la formación de roca en la zona de la falla estará muy quebrada. El material triturado puede variar en tamaño desde arenas finas hasta grandes bloques que tienden a caerse hacia adentro del túnel al estarlo perforando a través de la zona de falla. Si existe agua freática en la formación, el material triturado dentro de la zona de falla proporcionará un excelente pasaje por el cual podrá fluir el agua al túnel a no ser que se tomen pasos correctivos antes de excavar en esa zona. Podrá llegar a ser necesario inyectarle concreto a la formación antes de perforar el túnel para eliminar el peligro del agua subterránea.⁽⁶⁾

Fallas, zonas de falla y zonas de cizalla: definiendo conceptos fundamentales

Existen tres conceptos fundamentales relacionados entre sí: falla, zona de falla y zona de cizalla, utilizados a veces de manera indistinta y de manera incorrecta. Una **falla**, como anteriormente se dio su definición, es una fractura frágil a lo largo de la cual ha ocurrido un desplazamiento visible, en general paralelo a la superficie de la misma. Por su parte una **zona de falla** se encuentra compuesta por innumerables superficies de falla frágiles, subparalelas e interconectadas, estrechamente espaciadas conteniendo zonas de brecha o fault gouge. La **zona de cizalla** (Fig. III.2) corresponde a una ancha zona de deformación generada bajo condiciones dúctiles a dúctiles-frágiles. Digamos además que una zona de cizalla grada hacia arriba hacia una zona de falla. Las rocas son deformadas frágilmente en los niveles superiores de la corteza terrestre y dúctilmente en los inferiores. La profundidad a la que la



deformación pasa de frágil a dúctil es conocida como la **transición dúctil-frágil** y generalmente se encuentra a unos 10-15 km bajo la superficie (e.g., Sibson, 1990) (Fig. III.2). En dicha transición se desarrollan ambos tipos de deformación, mientras que por encima o por debajo la importancia relativa de una de estas disminuye progresivamente. De cualquier manera los 10-15 km antes mencionados deben ser solamente considerados como un referente general, ya que zonas de deformación dúctil pueden desarrollarse a profundidades menores bajo condiciones de un gradiente geotérmico anómalamente alto (e.g., magmatismo activo, actividad hidrotermal de alta temperatura generalizada, etc), y también pueden darse deformaciones frágiles en profundidad como respuesta a movimientos sísmicos bruscos.⁽¹⁴⁾

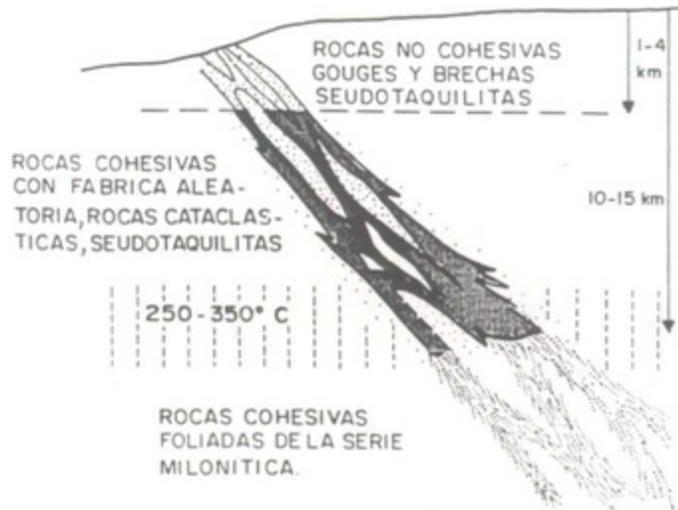


Fig. III.2 Esquema de una gran zona de cizalla y rocas asociadas. Transición dúctil-frágil en líneas verticales.⁽¹⁴⁾

Discontinuidad. Es el término utilizado para designar cualquier plano de discontinuidad mecánica o de origen en un macizo rocoso con una resistencia a la tracción muy baja o nula.

La presencia de discontinuidades de diversos tipos confieren al macizo rocoso un comportamiento discontinuo con propiedades geomecánicas heterogéneas y carácter anisótropo, dependiendo fundamentalmente de la orientación y frecuencia de los planos de discontinuidad.

También la propia matriz rocosa presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral.

En un macizo rocoso la resistencia de los materiales depende de las discontinuidades. La intersección de discontinuidades es desfavorable para la seguridad. La resistencia resulta de la suma de la resistencia de la matriz y la del macizo.⁽⁷⁾



III.3 TRAZO TOPOGRÁFICO PREVIO A LA PERFORACIÓN DEL TÚNEL

Hay circunstancias en las que es necesaria la realización de un levantamiento topográfico subterráneo como ocurre en el caso de ampliación o mejora de túneles, ya sea de carreteras, de ferrocarril, de canales, o de Metro y alcantarillado en las grandes ciudades.

En principio los trabajos subterráneos siguen las mismas pautas que los realizados en el exterior aunque con características especiales debidas a las condiciones mismas del trabajo bajo tierra.

La falta de luz natural obliga a utilizar aparatos con iluminación interior así como a iluminar los puntos a observar.

En ocasiones las galerías son estrechas y los aparatos no se podrán estacionar sobre trípode para no obstaculizar el paso de maquinaria y personal. También suelen ser sinuosas, con lo que el trabajo será lento. Incluso se han ideado aparatos para facilitar este tipo de trabajos.

Otros inconvenientes serán la humedad, los fuertes ruidos cuando hay maquinaria trabajando, o el gran silencio, la falta de ventilación..., características del trabajo a las que el topógrafo deberá habituarse. ^{Ana Tapia 99}

Instrumentos

Antiguamente se distinguían los teodolitos empleados en el interior de los túneles de los usados en el exterior por su pequeño tamaño y porque los limbos iban protegidos del polvo y de la humedad.

Hoy en día los teodolitos que hay en el mercado sirven igual para el interior que para el exterior por ser blindados y protegidos con pinturas especiales a base de siliconas para evitar la corrosión. Además están dispuestos para que se les incorpore el equipo de iluminación de retículo y limbos.

La apreciación angular debe ser por lo menos de medio minuto centesimal si se trata de un levantamiento para toma de avances en minería o similar; tampoco es necesario que sea superior, dado el error de dirección que ha de cometerse. Pero para trabajos subterráneos de precisión, como levantamientos de comprobación y para el control de las deformaciones, el teodolito de 1^s resulta más apropiado.

Para anular el error de dirección algunas casas de aparatos suministran equipos de poligonación que consisten en un juego compuesto de un teodolito, tres trípodes y dos seriales que se fijan al trípode; tienen una plataforma con tornillos nivelantes, idéntica a la del teodolito. Las señales son translúcidas, también llevan incorporados equipos de iluminación (Fig. III.3).



Para medir el ángulo se estaciona el teodolito en un vértice y las señales en los vértices extremos. Terminada la operación de medir el ángulo se quita el trípode de atrás con su señal y se sitúa en el nuevo vértice. Se permuta la otra señal con el teodolito, sin mover los trípodes y bases nivelantes de ambos (posición análoga a la de empezar la operación).

También existe otro tipo de señales de puntería, utilizadas para la observación a corta distancia. Son las señales esféricas de Taylor-Hobson, propias de la metrología industrial, y aplicables a los trabajos topográficos de alta precisión, como por ejemplo el control de deformaciones subterráneas en los que sea necesario realizar itinerarios de lados muy cortos (20 o 40 m).

La observación angular se realiza sacando la tangente de los dos extremos de la esfera. Se pueden utilizar sobre bases nivelantes, intercambiándose la señal con el aparato a igual que en los equipos de poligonación.



- *Señales de puntería de precisión para mediciones de ángulo de gran exactitud a corta distancia
- *Figura de puntería para puntería óptima
- *Iluminable con reflector de iluminación e iluminación atornillable



- *Reflector con iluminación atornillable, fijación sobre la señal de puntería GZT 1
- *Resistente a la inclemencias del tiempo
- *Duración en servicio con baterías alcalinas, unas 8 horas

Fig. III.3 Señales translucidas . Cortesía de Leica .⁽⁹⁾

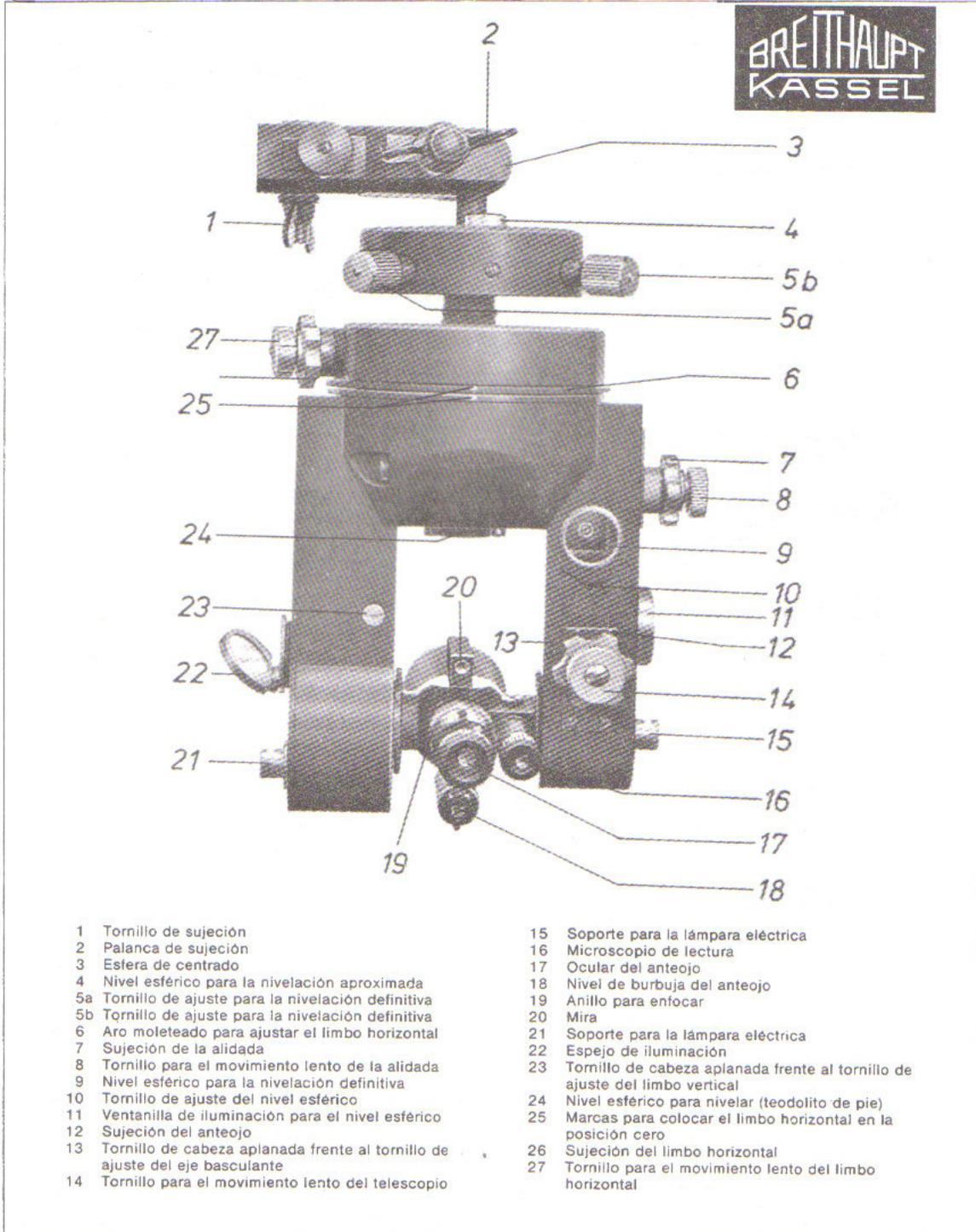


Fig. 5.29

Fig. III.4 Equipo de poligonación⁽⁹⁾



Estacionamientos singulares

La única diferencia con el exterior a la hora de poner en estación el teodolito es que el eje general de éste se centra por arriba, ya que generalmente la señal se habrá materializado en el techo.

Cuando se centra el teodolito debajo de una plomada suspendida del techo, el anteojo debe tener una marca del centro en la parte superior. Cuando se usa esa marca el centrado del instrumento será correcto sólo si el aparato está bien nivelado y el anteojo horizontal, en esta posición, girando la alidada alrededor del eje principal la plomada debe permanecer sobre la marca. Aplicando esta regla es fácil materializar la señal si no la lleva. No obstante existe el visor cenital, accesorio del teodolito, que montado sobre el anteojo actúa como una plomada óptica dirigida hacia el cenit.

Sin embargo, cuando el levantamiento requiere mayor precisión, son recomendables las plomadas ópticas cenit-nadir colocadas en el mismo trípode y base nivelante que ha de sustentar el aparato o las tablillas del equipo de poligonación.

Según indicamos antes, no siempre podrán utilizarse trípodes, debido principalmente a que muchas veces impedirían el tránsito de vagonetas y maquinaria, quedando interrumpidos los trabajos de excavación o de extracción.

En estos casos están indicados los taquímetros o teodolitos suspendidos de un brazo que ha de clavarse en la pared. El equipo consta de 10 brazos normales de suspensión y de dos señales plomada que se sitúan en el brazo anterior y en el siguiente al que soporta el taquímetro, el hilo de la plomada queda situado exactamente en la posición que ocupaba o que ha de ocupar, respectivamente el eje vertical del instrumento, con lo que se anula el error de dirección del mismo modo que con el equipo de poligonación (Fig. III.4 y Fig. III.5).

Antes de utilizar taquímetros ordinarios sin equipo de poligonación, será preferible utilizar la brújula-teodolito, especialmente si conocemos la variación de la declinación a distintas horas del día, o si trabajamos tan sólo en las horas centrales en las que tiene poca variación; ya que el error cometido con brújula en un itinerario se localiza, mientras que el de taquímetro se transmite, haciéndole girar.

A veces es ventajoso construir una plataforma elevada para colocar el aparato en una posición semipermanente sobre el tráfico, o construir un pequeño pilar de concreto a un lado del túnel, cuándo se prevé una duración de varias jornadas de las labores topográficas (solución más aplicada en el caso de replanteos). También existen trípodes colgantes utilizados en circunstancias especiales, como el de la Fig. III.6.



Fig. III.5 Nivel del equipo de poligonación⁽⁹⁾

Métodos

Como en todo itinerario se reducen los métodos a la medida de los ángulos y de los ejes.

Respecto a la medida de los ángulos, las lecturas acimutales conviene hacerlas con el instrumento orientado como en cualquier itinerario, con la ventaja de poder conocer el error de cierre inmediatamente en un itinerario cerrado.



Fig. III.6 Trípode Colgante⁽⁹⁾

Para la medida de los ejes en general se utilizan métodos directos, con cinta si los tramos son de corta longitud, o con distanciómetros de mayor o menor precisión según las necesidades.

Siempre que sea posible el itinerario tiene que ir encuadrado entre dos puntos de apoyo. En el caso de existir una sola comunicación con el exterior, el itinerario debe ser cerrado.



En estos itinerarios de ida y vuelta, será aconsejable que en el regreso se utilicen distintas estaciones que en la ida. Debido a la dificultad que esto supone, aunque nunca sea recomendable, entra en lo posible estacionar en los mismos puntos a la ida y a la vuelta: aún sería peor el efectuar simultáneamente el itinerario de ida y de regreso midiendo dos veces consecutivas los ángulos y las distancias; pero lo que nunca será admisible es dejar el itinerario colgado sin ningún cierre.

Itinerarios secundarios

En el caso de ramificaciones de las galerías será preciso recurrir a los itinerarios secundarios, que se apoyarán en los puntos poligonómicos de los itinerarios principales.

Para el levantamiento de estas redes podrán utilizarse los mismos aparatos que se usaron en el itinerario principal. Sin embargo en minería, en las estrechas ramificaciones de galerías, son más usuales las brújulas ligeras suspendidas de un hilo denominadas brújulas de minero.

Para su empleo es preciso materializar el itinerario por medio de un hilo tenso que pase por el orificio de las señales clavadas en la pared, de este modo cada tramo del hilo representa un eje del itinerario.

La brújula va montada sobre un sistema Cardan que garantiza su horizontalidad. Colgándola en el centro de cada tramo obtendremos su rumbo y, corregido de la declinación nos dará el acimut. Es conveniente que la última alineación del itinerario principal sea la primera de la brújula colgada, ya que la repetición de la medida angular nos sirve para declinar la brújula.

Puesto que las brújulas suelen estar divididas en medios grados, obtendremos el cuarto de grado de apreciación si tomamos la media de las lecturas leídas con los dos extremos de la aguja imantada.

La medida de los ejes se efectuará con cinta metálica, y hallaremos la distancia entre los hilos de las plumadas, utilizando el método de resaltos horizontales o banqueo: se materializarán los tramos con plumadas suspendidas de los clavos, se tenderá la cinta entre los hilos de éstas y se percibirá la horizontalidad por obtener, en esta posición, la lectura mínima.

El itinerario así levantado equivale al que conocemos con el nombre de estaciones alternas, puesto que el rumbo de cada eje lo determinamos una sola vez, por eso es inexcusable repetir el itinerario en sentido inverso.

Una buena norma para trabajar es obtener dos veces el rumbo de cada eje, tanto en el itinerario de ida como en el de vuelta. Para ello colocaremos la brújula en los dos extremos de la cuerda. De este modo, no sólo tendremos mayor precisión hallando el promedio de los dos rumbos, sino que localizaremos cualquier perturbación magnética que pudiera existir.

Como ya indicamos anteriormente, aunque las brújulas son de uso rápido y cómodo, no siempre son utilizables debido a las perturbaciones magnéticas que pueden sufrir no sólo por los materiales magnéticos que suelen



abundar en los túneles, sino por los carriles, las vagonetas, las herramientas metálicas, etc.

Estudios realizados sobre la influencia de los rieles en la brújula permiten llegar a la conclusión de que la acción sobre la brújula de un riel continuo situado a más de 4 m es prácticamente despreciable.

Levantamiento de los detalles.

El fin de todos los trabajos topográficos, no es otro que el de servir de apoyo al levantamiento de los detalles que constituyen el verdadero plano.

Las necesidades dependerán del tipo de obra o control a realizar. Si lo que se pretende es encajar una vía o el paquete de firme de una carretera en un túnel ya construido, los detalles que interesarán serán los que aseguren el gálibo suficiente para los vehículos que han de circular.

Para ello se tomarán las partes más críticas de la sección, y que normalmente para el encaje en planta será la zona de los riñones y del pie de los hastiales, así como la contra bóveda para adaptar la rasante (Fig. III.7). También se tomarán los puntos de inflexión de las paredes.

La toma de estos puntos generalmente se realizará con teodolito más distanciómetro (o estaciones totales), y en ocasiones teodolito más cinta.

En el primer caso se deberá tener en cuenta el espesor de la carcasa del prisma así como la situación de eje de la señal de puntería, variable según su posición con respecto al eje del aparato. Es adecuado tomar primeramente los datos angulares, visando a una señal apropiada situada en la pared del túnel, para posteriormente medir la distancia al prisma, e incrementar en su caso la magnitud del espesor de la carcasa.

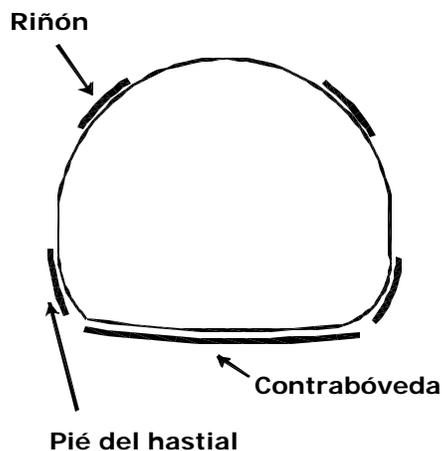


Fig. III.7 Partes críticas en una sección de túnel.⁽⁹⁾



Altimetría

Geométrica

Cualquiera que sea la naturaleza de los trabajos subterráneos, requieren una nivelación de precisión para dar a las rasantes las pendientes proyectadas, incluso en las minas, tanto para el estudio de los desagües como para el de los transportes: muchas veces las vagonetas cargadas se deslizan por su propio peso desde los lugares de carga hasta los pozos de salida, utilizando la tracción para el regreso (a esta pendiente se le suele llamar pendiente de igual resistencia).

Lo anteriormente expuesto nos exige efectuar una nivelación por alturas utilizando niveles de línea o automáticos.

Las miras suelen ser de 2 m, en vez de los 4 m utilizados en el exterior. También se emplean miras extensibles. Hay miras reflejantes que se iluminan fácilmente debido a un barniz reflectante que las recubre, y que hace que se perciban sus divisiones con una claridad muy superior a las miras ordinarias. Otras miras llevan iluminación interior incorporada.

Si los ejes de los itinerarios son cortos, pueden iluminarse las miras desde el propio nivel que lleva incorporada una linterna eléctrica sobre el antejo y que concentra los rayos de luz en la zona de mira que se observa.

En el caso de túneles en los que el acceso es directo por ambas bocas, a las que se puede dar cota enlazándolas entre sí por el exterior, bastará con una nivelación de precisión por el interior del túnel encuadrada entre los citados puntos. Pero en el caso en que la cota se transmita a través de pozos, sólo se tomará la de uno de ellos como punto altimétrico fundamental. La cota de las restantes comunicaciones con el exterior no deberá utilizarse para compensar, entre ellas, el itinerario altimétrico, ya que la precisión obtenida en éste es superior a la transmitida desde el exterior.

Trigonometría

En algunos casos, cuando no se trate de replanteos, podrá bastar con la nivelación por pendientes efectuada con taquímetros simultáneamente a la observación de los itinerarios primarios. En este caso convendrá que las plomadas utilizadas como señales planimétricas estén suspendidas del vértice una distancia igual que la del aparato con respecto del suyo.

También en el levantamiento de los detalles por métodos taquimétricos suele ser suficiente la precisión de la cota obtenida trigonométricamente.

Con eclímetros suspendidos

Son utilizados en igual forma que las brújulas de minero en los itinerarios de relleno propios de la minería; el eclímetro sirve para medir los ángulos verticales y, con la magnitud de la distancia inclinada medida entre los dos vértices, poder obtener la distancia horizontal y el desnivel entre éstos.



El eclímetro lleva, como la brújula colgada, dos pinzas en los extremos de un semicírculo graduado. Colgado del centro de éste lleva una plomada cuyo hilo nos sirve de índice para hacer las lecturas y así obtener la magnitud de los ángulos verticales.

Una vez materializado el eje por medio de un hilo, colgamos en él el eclímetro a un metro de cada uno de sus extremos para hallar la media aritmética de las dos lecturas.

Los eclímetros suelen estar divididos en cuartos de grado, y miden ángulos de inclinación, o sea, que el hilo de la plomada coincide con el cero del eclímetro cuando está suspendido de una cuerda horizontal; por lo tanto, habrá que indicar en cada caso si la alineación es ascendente o descendente.

En los itinerarios de relleno las cotas irán encuadradas, lo mismo que en la planimetría, entre los puntos poligonómicos con que enlacen.

Proyecto de un túnel

Antes de que un túnel se pueda plantear en líneas generales y diseñar en detalle, se deberá reunir información sobre los aspectos físicos del proyecto. Se deberá contar con la topografía del área en cuestión, así como con los datos geológicos y geotécnicos. En el proyecto de un túnel la necesidad de una detallada y extensa investigación es probablemente mayor que para la mayoría de los otros tipos de construcción

Al proyecto general de las posibles rutas y rasantes basadas en la topografía del terreno, le sigue un examen detallado de las posibles alternativas, cuya finalidad es la mejor elección de la alineación. El primer enfoque del proyecto de un túnel se realiza utilizando la cartografía existente, a la mayor escala posible y con curvas de nivel. Aún en una etapa se puede cambiar considerablemente la rasante o la alineación, cuando por ejemplo se localiza una roca más conveniente o un terreno más adecuado para el equipo que se utiliza.

Plano topográfico base

Desde las primeras rutas del túnel que se proyectan sobre el mapa se hace evidente la necesidad de un levantamiento topográfico más detallado.

Una obra del tipo túnel se puede realizar en espacio abierto, montañoso, en un centro urbano, en una zona suburbana, o industrial; por lo tanto la toma de datos del levantamiento debe adecuarse a cada caso. Por ejemplo, en una zona urbana será de vital importancia la exacta localización de los túneles de todo tipo ya existentes, ya sea para evitar la interferencia o para unirlos entre sí. También se deberán tomar en cuenta las fachadas de las calles y los



sótanos, construcciones que posiblemente habrá que controlar durante la construcción del túnel si se prevén posibles asentamientos.

Por lo que respecta a la localización de las construcciones subterráneas, las oficinas de servicios públicos disponen de planos en los que normalmente se representa el servicio acotado planimétricamente respecto a líneas de fachadas y esquinas, y altimétricamente respecto al nivel de la acera. Estos planos raras veces poseen la precisión requerida, ya sea porque haya habido modificaciones posteriores que no están representadas o por cambios en el nivel de la calle y de las edificaciones. No obstante, con la ayuda de estos planos, la inspección de los pozos de registro y de válvulas y la excavación de pozos (*catas*), se localizarán y situarán de una manera precisa en el levantamiento.

Si el levantamiento se va a realizar por fotogrametría son útiles los puntos de apoyo situados en lo alto de los edificios, aunque hay que tener en cuenta que los edificios muy altos se pueden mover por los cambios de temperatura y los fuertes vientos, aparte que es difícil bajar con precisión los puntos al nivel del suelo.

Por otro lado, el levantamiento topográfico abarca generalmente un área limitada en la que se puede considerar despreciable la curvatura de la tierra así como la convergencia de meridianos. No obstante, en el caso de túneles muy largos, los aspectos de la curvatura podrán ser significativos para el control altimétrico, del mismo modo la convergencia de meridianos se deberá tener en cuenta en lo que se refiere al control planimétrico, si es que trabajamos con el norte verdadero.

El proyecto de un túnel, como cualquier proyecto de construcción, consta de distintos documentos necesarios para la realización de la obra, estos son:

- Memoria y anexos: la memoria es la exposición detallada del proyecto. Los anexos son el complemento justificativo de cualquier afirmación emitida en la memoria.
- Planos: son la representación gráfica y numérica del proyecto.
- Pliego de condiciones: es el conjunto de especificaciones (constructivas, de calidad, de medición, etc.) que se deben cumplir.
- Presupuestos: es el apartado donde se valora el coste total de la obra. En él se incluyen desde las mediciones y cubicaciones hasta el presupuesto general, pasando por la justificación de precios y los presupuestos parciales.

Desde el punto de vista topográfico, en el documento de planos es donde encontraremos más peculiaridades con respecto a otros proyectos de obras lineales.



Los planos que definen el proyecto de un túnel son diversos, y a continuación se enumeran:

- Planta de situación y emplazamiento: muestra la ubicación de la obra en relación con su entorno. Suele ser de escala pequeña.
- Topografía y replanteo: plano topográfico de la zona con curvas de nivel, en el que se sitúa el emplazamiento de la obra por coordenadas, y se marcan los puntos de las poligonales y triangulaciones efectuadas. Las coordenadas de estos puntos suelen venir en recuadros junto a los planos.
- Geología y geotecnia: suelen ser planos en planta y cortes en alzado con la estructura geológica del terreno detallada. Se marcan, en la planta, los puntos donde se han realizado sondeos.
- Planta general: indica a escala reducida el proyecto completo.
- Plantas: de zonas específicas de la obra.
- Alzados: se representan las caras exteriores de la figura proyectada.
- Secciones: son cortes verticales. La *sección tipo* es la representación de una forma que se repite en casi toda la obra.
- Perfil longitudinal: es una sección paralela al alzado de mayor sección. Se representa con escalas distintas en horizontal y vertical, y con una información suplementaria al pie del perfil, llamada guitarra.
- Detalles: la escala será mayor que la de cualquier planta o sección, y representarán lo que en otros planos, por su escala, no se ve con claridad.⁽⁹⁾



III. 4 TIPOS DE EXPLOSIVOS UTILIZADOS

III.4.1 BREVE HISTORIA DEL USO DE EXPLOSIVOS

A lo largo de la historia se han destacado personajes tales como Roger Bacon que escribió la fórmula de la Pólvora negra en 1242, Ascanio Sobrero que descubrió la Nitroglicerina en 1846, Alfredo Nobel, J.R. quien descubrió la dinamita y otros más como Glauber, el Dr. Watson, William Bickfordy y Eleuthere Irenee Dupont.

Fue en el siglo XVII cuando se realizaron los primeros trabajos verificados para voladuras de roca en las minas reales de Shcemnitz en Ober-Biberstollen, Hungría, y a pesar de las limitaciones existentes por el equipo deficiente de esa época, los altos costos de la pólvora y la mala calidad del producto, el uso de la pólvora negra en minería se extendió a las minas de Cornwall, Inglaterra.

Posteriormente se desarrollaron importantes avances tecnológicos tanto en países europeos como en los del nuevo mundo.

En la actualidad el procedimiento para aplicar las voladuras se ha transformado en una técnica basada en principios científicos, surgidos del conocimiento de las acciones ejercidas por los explosivos, de los mecanismos de rotura y de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos. Las aplicaciones se desarrollaron a partir del primitivo invento de la pólvora negra, pasaron los días de apogeo de la utilización de las dinamitas, hasta culminar en la era moderna con el uso extensivo de explosivos nuevos y más seguros.

Cronología de los explosivos:

Siglo XIII primera mención del salitre en los escritos de Abd – Allah quien lo llamó “nieve china”.

1627: Se desarrolló la primera prueba documental del uso de la pólvora negra en las minas reales de Shcemnitz en Ober-Biberstollen, Hungría.

1689: Se comenzó a utilizar la pólvora negra en las minas del estado de Cornwall, Inglaterra.

1696: Empleo de la pólvora negra en el sector de la construcción de caminos en Albula, Suiza.

1745: El Dr. Watson, de la Sociedad Real de Inglaterra, hizo explotar pólvora negra mediante una chispa eléctrica.



- 1750: Benjamín Franklin mejoró la demostración de Watson, comprimiendo la pólvora negra en un recipiente.
- 1804: Eleuthere Irenee DuPont inicia la producción comercial de la pólvora negra en Wilmington, Delaware, USA.
- 1830: El Dr. Robert Hare efectuó trabajos para provocar explosiones con mezcla de gases, para ello usó electricidad, conectando alambres incandescentes a una batería de alto amperaje que llamó “deflagrador”, considerándose ésta como la primera máquina explosora.
- 1831: William Bickfor enterado de estos métodos inseguros y peligrosos desarrolló y patentó “ la mecha de seguridad de mineros”, ésta consistía en un corazón continuo de pólvora negra fina envuelto en yute acordonado fuertemente y sumergido en barniz caliente para que quedara a prueba de agua.
- 1846: Ascanio Sobrero, profesor de la Universidad de Turín, Italia, descubre la “nitroglicerina”, en esa misma época Cristian Frederick Schoenbein, un profesor de la Universidad de Basel en Suiza, produjo un nitroalgodón pólvora.
- La nitroglicerina causó mucha sorpresa, ya que este explosivo podía hacer mejor el trabajo de la pólvora negra, no sólo porque movía a la roca sino también la rompía.
- 1866: Alfredo Nobel mezcló nitroglicerina con diatomita para hacer dinamita. Un año más tarde, en 1867, él mismo no podía iniciar la dinamita en forma confiable con la mecha de seguridad de la pólvora negra, por lo que después de realizar varios experimentos, Nobel resolvió el problema obteniendo el fulminato de mercurio en cápsulas de estaño (más tarde de cobre); logrando así un paso importante para el desarrollo de los explosivos modernos.
- 1867: Las propiedades explosivas del *nitrate de amonio* fueron formalmente utilizadas como “agente explosivo”, su aplicación inicial fue la de reemplazar una porción de nitroglicerina para concluirse como un ingrediente en la dinamita.
- 1875: Alfredo Nobel: descubre la “gelatina para voladura” al disolver nitrocelulosa en nitroglicerina, e introdujo la “dinamita gelatina”.
- 1895: H. Julios Smith introdujo un tramo corto de mecha entre la carga de ignición del fulminante de la pólvora negra y la carga base. Este fue el origen de los estopines eléctricos de retardo.



1935: El nitrato de amonio con un sensibilizador era empacado en latas de metal para resistir el agua, un cebo de iniciación sensibilizado con TNT especial fue necesario para iniciar este producto relativamente insensible, pero con características de seguridad en el manejo, al no producir dolores de cabeza, así como su bajo costo.

1940: Con las investigaciones que realizó DuPont se generó un explosivo con nitrato de amonio, que no contenía nitroglicerina y consistía básicamente en nitrato de amonio – agua, un espesador y un sensibilizador. Estos productos no tuvieron auge inicialmente porque el mercado de entonces requería en su mayoría de productos de diámetro pequeño y no se contaba con sensibilizador económico.

Dos explosiones desastrosas de buques cargados con nitrato de amonio, una en Grest, Francia y otra en Texas City, Texas, confirmaron su potencial explosivo, esto fomentó posteriormente el desarrollo de nuevas técnicas, principalmente en el proceso de fabricación de pequeñas bolitas de nitrato de amonio que proporcionarían un producto de fácil manejo a granel.

Ya para los años 50, los combustibles usados al principio como el carbón fueron reemplazados por aceite, dando origen al moderno anfo.

1950: Con el desarrollo de equipo de perforación de diámetro grande, el requerimiento de sensibilidad para los hidrogeles no fue tan riguroso, de esta manera se abrió el camino para el desarrollo comercial de estos productos.

Las principales ventajas de los hidrogeles eran su economía, alta densidad de carga y desempeño, baja sensibilidad al impacto, ausencia de ingredientes que causaran dolores de cabeza, y también su resistencia al agua.

En 1958, DuPont empieza la fabricación de hidrogeles empacados en bolsas, las primeras formulaciones no eran sensibles a fulminantes regulares y no se propagarían seguramente en barrenos de diámetro pequeño sin el uso de sensibilizadores explosivos.

Es en este mismo año cuando, en Mesabi Range, Minnesota, dicho producto es bombeado dentro de barrenos de diámetro grande usando camiones a granel.

Asimismo, se desarrollan conectores de retardo para cordón detonante, que proporcionan una demora bastante precisa del cordón detonante.

1969: DuPont patentó el sensibilizador que proporcionaría a los hidrogeles la sensibilidad requerida para ser iniciados con un fulminante de potencia 6, en cartuchos de 2.22 cm (7/8") de diámetro, a temperaturas normales.



1976: Se introducen fulminantes de retardo no eléctrico, los cuales proporcionaron mejoras en la regulación del orden de encendido y también redujeron en forma considerable los niveles de ruido, es en ésta época cuando se desarrollan también los explosivos emulsionados.

En el mercado actual de los explosivos no sólo se realizan amplias investigaciones, orientadas a obtener poderosas cargas de energía, que sirvan para construir un mundo moderno, con reglamentos gubernamentales más estrictos, inquietud pública en el ámbito de seguridad, ruido y vibraciones, sino también se investiga en productos que van siendo perfeccionados día a día en sus composiciones tanto químicas como físicas, con el objetivo primordial de encontrar la excelencia, en el renglón de seguridad, en el manejo y uso de explosivos, para todos y cada uno de los protagonistas en el desarrollo de las actividades constructivas y extractivas de un país como México.⁽¹⁰⁾

III.4.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS EXPLOSIVOS

Para algunos usuarios de explosivos no es importante el tener conocimientos profundos sobre la química y física de los explosivos, no obstante, una revisión sobre estos temas nos ayudará a comprender como trabajan los explosivos en los materiales donde se usan.

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de compuestos (unos combustibles y otros oxidantes), que iniciados debidamente, dan lugar a una reacción muy rápida y a una gran producción de calor (reacción explosiva).

En la reacción se producen gases a temperaturas y presiones muy altas. Dependiendo del tipo de explosivo, su composición será diferente, y por tanto sus propiedades finales; ello conlleva a que para cada tipo de aplicación se deberá escoger el explosivo más idóneo.

Los principales componentes que reaccionarán en un explosivo son combustibles y oxidantes, en la siguiente lista se observan algunos de estos componentes:

Combustibles:

- Aceites
- Carbón
- Aluminio
- TNT
- Nitrato de amina
- Nitroglicerina



Oxidantes:

- Nitrato de amonio
- Nitrato de sodio
- Nitrato de calcio

Para que un explosivo brinde su máxima energía y no produzca gases nocivos, es necesario que su balance de oxígeno sea cero, y esto se da cuando un explosivo contiene el suficiente oxígeno para oxidar completamente todos los combustibles, en teoría, si esto se logra, los productos finales después de la detonación serán H₂O, CO₂ y N₂.

En la práctica normalmente se obtienen otro tipo de gases, en algunos casos tóxicos como el CO, NO₂ y el N₂O; sin embargo, en la mayoría de los trabajos de ingeniería civil el uso de los explosivos es a cielo abierto, y en el caso de los trabajos en túneles dichos gases se desechan con ventilación, usándose tubería a alta presión para provocar su salida al exterior.

Para un correcto dimensionamiento de las cargas, se debe tomar en cuenta que la carga detonante actúa en el medio circundante en dos fases. La primera fase del efecto de choque de la explosión, produce en el material un esfuerzo por la onda, con una presión inicial del orden de 10⁵ a 10⁶ kg/cm², lo que en un medio cerrado produce que dicha carga exceda la resistencia a la compresión del material. Debido a que la energía de la onda disminuye rápidamente en la distancia con respecto al lugar de colocación de la carga, ésta pierde rápidamente el efecto de compresión en el material, por lo que sólo el esfuerzo cortante y el esfuerzo de tensión tienen efecto; en una onda de choque las ondas de esfuerzo son reflejadas y regresan en forma de onda de tensión, si la energía (que depende del tamaño de la carga) es suficiente para sobrepasar la resistencia a la tensión del material, ocurrirá la desintegración del material (Fig. III.8)

En la segunda fase, la presión de los gases de los explosivos (del orden de 10⁴ Kg / cm²) empuja al material hacia fuera del cráter ocasionando una segunda desintegración del material.

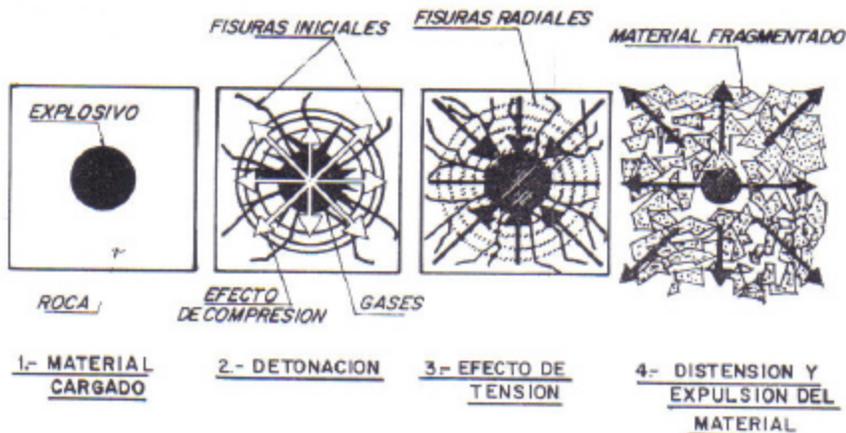


Fig III.8 Fases de la fragmentación generada por el efecto del explosivo en la roca.⁽¹⁰⁾



En conclusión, una gran presión ejercida por los gases a altas temperaturas después de la detonación, es lo que rompe el medio que contiene al explosivo. Esto se efectúa en dos pasos, el primero debido a la presión de la detonación ejercida en un principio por el iniciador y el segundo por la presión de explosión, siendo esta última la más importante en el rompimiento de los materiales.

III.4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS.

Las características individuales que tienen los explosivos, por sí solas, son muy importantes para entender la utilidad potencial de un explosivo específico para un uso en especial.

Las siguientes características son las más significativas:

Densidad o gravedad Específica

Es el peso por unidad de volumen de un explosivo, expresada usualmente en gramos por centímetro cúbico. Esta característica permitirá determinar la cantidad de explosivo y su distribución por barreno.

Velocidad de detonación (VOD)

Se define como la velocidad en la que la reacción de detonación se extiende a través de una columna de explosivo, ya sea confinado en el barreno, en cartucho o a granel. Para que un explosivo sea de utilidad, esta velocidad deberá ser igual o mayor a la velocidad sónica de la roca a explotar. Al incrementarse la velocidad, el explosivo fragmentará en grado mayor a la roca.

Presión de detonación

Es considerada como la presión en la zona de choque delante de la zona de reacción. La presión que se crea repentinamente fragmentará por su condición al material en vez de sólo desplazarlo y a esta capacidad se le denomina "efecto brisance". La presión de detonación de un explosivo aumentará dependiendo del grado de confinación en que se encuentre, es por eso que será necesario evitar al máximo los huecos dentro del barreno.

Presión de explosión

Es la presión que ejercen los gases como producto de la explosión inicial y se contempla como un 45% de presión de detonación.



Energía

Es la particularidad potencial del explosivo para realizar un trabajo.

Potencia

Es el trabajo útil que realiza un explosivo, comparado con el trabajo útil que realiza un agente explosivo convencional referido a un 100%.

Sensibilidad

Es la propiedad de la onda explosiva de propagarse de cartucho en cartucho o de continuar a través de una columna.

Diámetro crítico

Es el diámetro mínimo al cual un explosivo puede ser detonado.

Sensitividad

Es la propiedad que poseen los explosivos para ser detonados por iniciadores convencionales, ya sean cordones detonantes, fulminantes, Primadet, etc.

Gases

Son aquellos materiales desprendidos después de la detonación de los explosivos y deberán pertenecer al grado de los inocuos; cuando un explosivo produce gases tóxicos limita su uso a explotaciones a cielo abierto.

Estabilidad

Es la propiedad de los explosivos para mantenerse en condiciones de uso durante un período determinado de tiempo, conservando sus características inalterables.

Resistencia al agua

Dentro de los explosivos es la propiedad más determinante por la versatilidad de su uso o limitación de este. Ya que deberán conservar todas sus



demás características, aún en contacto directo con el agua, durante un lapso determinado.

Flamabilidad

Es la propiedad que tienen los explosivos a la facilidad de incendiarse por temperatura, fricción, contacto directo con la flama o cualquier otro medio, que le resta seguridad en el manejo.

Eficiencia

Es el porcentaje real de energía que genera un explosivo en el momento de su detonación.

Compresión

Es la capacidad de un explosivo a ser comprimido manteniendo o aumentando sus características de eficiencia, velocidad de detonación, sensibilidad, sensibilidad, etc.

III.4.4 CLASES DE EXPLOSIVOS

En la actualidad los explosivos se clasifican en tres tipos: químicos, mecánicos y nucleares. Nos referimos a los primeros dado que en ellos radica la gama de explosivos utilizados en las aplicaciones constructivas y mineras, que son el mayor interés de nuestro trabajo.

Los explosivos químicos se dividen en deflagrantes y detonantes, los deflagrantes son aquellos que tienen intervalos de descomposición menores a 1000 m/s, como ejemplo tenemos a la pólvora negra que, como ya se mencionó, está prácticamente en desuso.

Los explosivos detonantes son aquellos que tienen una velocidad de descomposición mayor de 1000 m/s, y se dividen en primarios y secundarios. Los primarios son aquellos que pueden detonar por medio de una chispa, flama o impacto y son usados normalmente en los iniciadores; los secundarios requieren de una onda de presión de gran magnitud para iniciar su detonación.

Dentro de los explosivos químicos se encuentran los tácticos (o militares) y los industriales (o comerciales), como es obvio nos referiremos a los industriales, ya que los tácticos se encuentran restringidos a las fuerzas armadas, además, su uso resulta muy costoso comparado con el uso de los explosivos industriales.



Tipos de explosivos y artificios.

Dinamitas

Es el término genérico que cubre a los explosivos sensibilizados con nitroglicerina, es el tipo más sensible de los productos comerciales y se dejó de fabricar en México hace más de 25 años.

A continuación se presentan algunos tipos y se menciona la aplicación a la que se han dirigido:

TIPO	USO
Dinamita pura	Trabajos superficiales
Dinamita amoniaca	Canteras
Dinamita gelatinizada	Exploración sismográfica
Semigelatina	Líneas subterráneas
Permisibles	Minas de carbón

Hidrogeles

Un hidrogel es una mezcla de gelatinizador, un sensibilizador explosivo o no explosivo, nitrato de amonio, nitrato de sodio y agua. Existe en varios diámetros y es el sustituto de las dinamitas en el mundo, ya que realiza el mismo trabajo, sin riesgos y sin molestias ocasionadas por la nitroglicerina.

Los hidrogeles se empezaron a desarrollar en 1940; sin embargo, no se comercializaron porque los barrenos usados eran en su mayoría inferiores a 10 cm de diámetro. Su verdadero desarrollo empezó desde los años cincuenta hasta la actualidad.

Emulsiones

Las emulsiones explosivas constituyen un paso más en el avance de los hidrogeles. Al igual que estos, las emulsiones están formadas por productos que intrínsecamente no son sustancias explosivas, pero que, mezclados adecuadamente y con una iniciación correcta, reaccionan como explosivos de considerable confiabilidad.

Las formulaciones que se pueden fabricar en esta familia son diversas, desde emulsiones encartuchadas de diámetro pequeño, sensibles al cápsul 6, hasta emulsiones no sensitivas, ya sea encartuchadas o bombeables .



Dadas las características de potencia y la sencillez de su fabricación, podrían compararse con un agente explosivo emulsificado resistente al agua y de mayor velocidad de detonación. Salvo que las emulsiones contienen además nitrato de sodio o calcio y un emulsificante (glicerina o parafina) en su mezcla.

“Slurries” (hidrogeles de nueva generación)

Ya apareció en el mercado nacional un tipo de alto explosivo que revoluciona el concepto de los explosivos por su desarrollo en el campo. Este nuevo producto combina las mejores propiedades tanto de los hidrogeles como de las emulsiones.

Los “slurries” son compuestos que no llevan en su formulación ningún producto que sea de por sí explosivo; estos productos, únicamente reaccionan de forma explosiva en el momento en que se inician con el detonador, cordón detonante o cualquier iniciador.

El conjunto del explosivo va disuelto en una masa acuosa, la cual confiere al producto las características que posee, entre ellas se encuentra su excelente resistencia al agua y a la presión hidrostática, su gran seguridad en el manejo y transporte; no produce dolores de cabeza, y por último los gases emanados de su detonación no representan peligro alguno para la salud, debido a sus ínfimos niveles de toxicidad. Dan por resultado un producto superior tanto en energía como en velocidad de detonación, reduciendo al usuario por los costos más bajos, no sólo en la explotación de rocas sino también en los procesos de fragmentación. Este explosivo se comercializa en el mercado bajo el nombre de emulgel.

Agentes explosivos (anfós)

El nitrato de amonio mezclado con materiales combustibles fue patentado en 1955 por HB Lee y RL Akre, dando origen al anfo (ammonium nitrate – fuel oil).

El agente explosivo es el de uso más generalizado en el mundo y si no fuera por su alto grado higroscópico (o alta captación de humedad), acapararía virtualmente la totalidad del uso en el mercado, utilizándose en la mayoría de los casos al alto explosivo como iniciador únicamente ya que el agua, además de volver insensible a los agentes explosivos, los deshace, es decir, produce la desintegración del pellet o grano de anfo.

Como su nombre lo indica, el anfo, es una mezcla de nitrato de amonio (grado industrial) en un 94.3% en peso y aceite combustible (diesel) en un 5.7% en peso. Cuando el porcentaje de aceite combustible varía, positiva o negativamente, hay un efecto de pérdida de energía y generación de gases



nocivos, por lo tanto es de suma importancia utilizarlo en la proporción adecuada.

Heavy anfos (anfos pesados)

En nuestro país, en los últimos años, se han venido aplicando en grandes explotaciones a cielo abierto mezclas «in situ» de emulsiones a granel y agentes explosivos, llamados comúnmente heavy anfos.

Dependiendo de las proporciones de la mezcla, las características del mismo las acercarian ya sea a un alto explosivo o a un agente explosivo, pudiéndose fabricar en formulaciones mezcladas en camiones y bombeables, o encartuchadas y descargables por gravedad. Una característica importante es que entre más elevado sea el porcentaje del agente explosivo utilizado en la mezcla, menor será la resistencia al agua.

Tipos y clases de explosivos

Primero se definen los explosivos y después se clasifican de acuerdo a su función.

Explosiva – Es toda sustancia susceptible de proporcionar, con una descomposición química y en un lapso de tiempo muy corto, una gran cantidad de gases a altas temperaturas y presión, los cuales producen cuatro efectos básicos:

- Fragmentación de la roca.
- Desplazamiento de la roca.
- Vibración del suelo
- Golpe de aire

Todo explosivo por norma requerirá de un dispositivo de disparo, para que se ubique dentro de la clasificación de explosivos, por sus características detonantes (Tabla III.1)



**C
L
A
S
I
F
I
C
A
C
I
Ó
N

D
E

L
O
S

E
X
P
L
O
S
I
V
O
S**

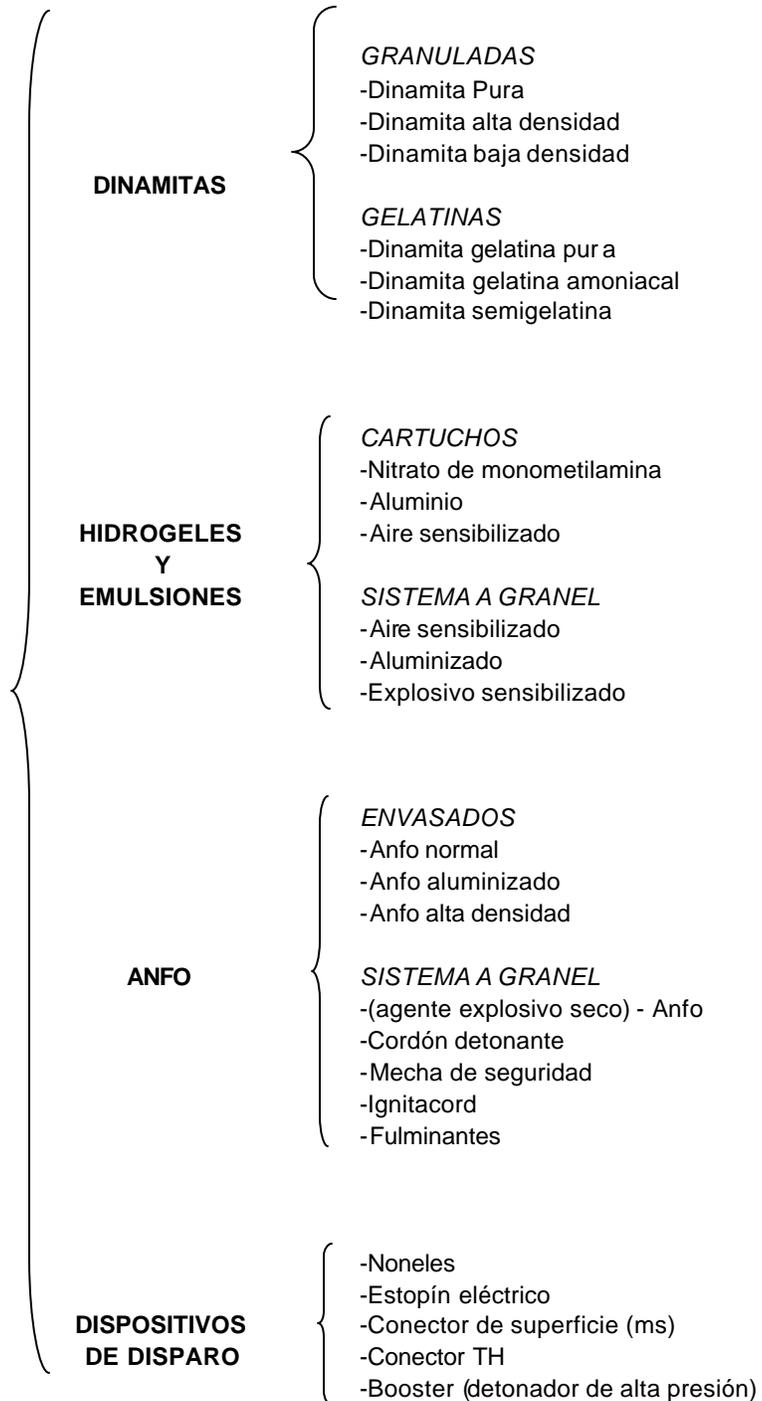


Tabla. III.1 Clasificación de los explosivos⁽¹⁰⁾



Dinamitas

Dinamita pura

Consiste de nitroglicerina, nitrato de sodio, antiácidos, aceites combustibles y ocasionalmente azufre. Su uso es limitado por ser costosa y de alta sensibilidad al choque y a la fricción.

Dinamita alta densidad

Comúnmente es llamada dinamita extra, se diferencia de la anterior por sustituir parte de la nitroglicerina y el nitrato de sodio por nitrato de amonio, lo que la hace menos sensitiva a la fricción y al choque, su uso también es limitado.

Dinamita baja densidad

Su composición es similar a la de "alta densidad", excepto porque la mayoría de la nitroglicerina está sustituida por nitrato de amonio, es de uso limitado.

Gelatinas

Dinamita gelatina pura

Gelatina especial o extra compuesta por nitroglicerina, nitrocelulosa y nitrato de sodio, existen proporciones que casi la asemejan a la dinamita pura; se usa básicamente en barrenos profundos o faltos de confinamiento, pueden afectar su velocidad.

Dinamita gelatina amoniaca

Se llama gelatina extra, pero difiere de la anterior por reemplazar a la nitroglicerina y al nitrato de sodio por nitrato de amonio, se usa en condiciones húmedas y como carga de fondo en barrenos de diámetro pequeño, a veces dependiendo de su formulación sirve como indicador del agente explosivo.

Dinamita semigelatina



Con formulación de 30 a 60% de nitroglicerina y diferente densidad en sus ingredientes, se usa en trabajos donde existe poca agua y los barrenos son de diámetro pequeño, tiene tan buena consistencia que se puede cargar barreno hacia arriba.

Hidrogeles y emulsiones

Hidrogeles

Son una mezcla de nitrato de amonio, nitrato de sodio, sensibilizador, gelatinizador y diferentes cantidades de agua, que se fabrican en diversos diámetros; fueron los primeros sustitutos de la dinamita por ser más manejables y seguros en su transporte.

Emulsiones

Se producen en una mezcla de agua - aceite, donde al someterse a una adecuada agitación y a un agente emulsificante quedan unidas, y posteriormente se le adicionan los elementos sensibilizadores que cada compañía ha patentado (microesferas, gas, ácidos especiales, parafinas especiales, etc.). Las emulsiones han tenido buena aceptación en el mercado nacional y ha mejorado su técnica y uso directo en el campo hasta llegar a implementarse su utilización en el sistema a granel, generando ahorros tanto en la barrenación como en la cantidad de explosivo, es aplicable por lo general en grandes operaciones.

Agentes explosivos secos (anfo)

En un principio fueron fabricados con carbón y aceites combustibles combinados con nitrato de amonio en diversas proporciones, pero basados en la experiencia, el nitrato de amonio puro, mezclado con diesel proporcionó óptimos resultados, produciéndose lo que se denomina comúnmente anfo (ammonium nitrate and fuel oil), fabricado con un 94.3% de nitrato de amonio y un 5.7% de diesel, la dosificación debe ser exacta para evitar pérdidas de energía y que afecte lo que deseamos fragmentar o demoler.

Como se puede ver en la tabla III.1 se pueden tener envasados y a granel; en los envasados se adiciona aluminio para incrementar su energía, pero también aumenta su costo; ya granel mediante un camión mezclador se suministra el nitrato con su proporción de diesel directamente en el barreno.⁽¹⁰⁾



III.4.5 DISPOSITIVOS DE DISPARO

Son los dispositivos o productos empleados para cebar cargas explosivas, suministrar o transmitir una llama que inicie la explosión, llevar una onda detonadora de un punto a otro o de una carga explosiva a otra y los necesarios para probar las conexiones y disparar los explosivos para que pueda llevarse a cabo una voladura.

Métodos de encendido.

Para obtener los mejores resultados en las voladuras, se debe seleccionar los accesorios tan cuidadosamente como los explosivos.

Iniciadores.

Los iniciadores son productos que dan principio o inician una explosión como la mecha de seguridad, el ignitacord y el cordón detonante.

Mecha de seguridad.

Es el medio a través del cual es transmitida la flama a una velocidad continua y uniforme, para hacer estallar al fulminante o a una carga explosiva.

Está formada por un núcleo de pólvora negra, cubierto por varias capas de materiales textiles, asfálticos, plásticos e impermeabilizantes, los cuales le proporcionan protección contra la abrasión, el maltrato y la contaminación por humedad. Es obvio que cualquier manejo que destruya o dañe el recubrimiento de protección o que permita que el agua u otras sustancias lleguen a la pólvora, ocasionará que la mecha no cumpla con su objetivo y tenga un funcionamiento defectuoso.

Cuando se inicia la mecha, emerge de ella un flamazo inicial (Fig. III.9), el cual comprueba al usuario que el núcleo de pólvora ha sido encendido y que la mecha está ardiendo. El no reconocer el flamazo inicial puede provocar incertidumbre respecto a la ignición de la pólvora y ocasionar accidentes al tratar de encender una mecha que ya fue encendida.

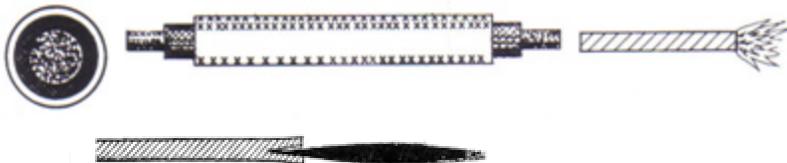


Fig. III.9 Esquema de una mecha de seguridad mostrando el flamazo inicial⁽¹¹⁾



La velocidad de combustión de una mecha generalmente es de 128 a 135 segundos por metro, sin embargo se fabrican mechas de diferentes velocidades de combustión. Los fabricantes señalan que dichas velocidades podrán tener una variación permisible del 10% en más o menos que la determinada en la fábrica y que después de salir de ella no garantizan que se cumplan a causa de las diversas condiciones y circunstancias en las que se puede encontrar la mecha. Ante esta situación es conveniente medir con exactitud el tiempo de combustión de una muestra de cada rollo de mecha antes de usarla.

La mecha usada en México se denomina Clover y puede conseguirse en carretes de 1000 metros o en rollos de 50 metros.

La mecha de seguridad también se conoce como mecha para minas o como cañuela.

Ignitacord.

El ignitacord es un cordón incendiario que arde a una velocidad uniforme con una vigorosa flama exterior. Tiene un diámetro muy pequeño, 1.5 milímetros, y consiste de un núcleo de termita en polvo (mezcla que produce elevadas temperaturas) recubierto de entorchados textiles (Fig. III.10).

Este producto permite encender una serie de mechas de seguridad en un orden determinado, proporcionando a la persona que inicie el encendido el mismo tiempo para colocarse en un lugar seguro que tendría si estuviera encendiendo una sola mecha. Para unir las mechas con el ignitacord se usan conectores especiales (Fig. III.11).

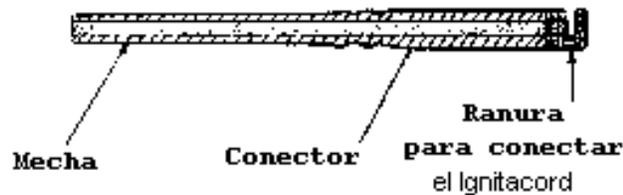


Fig. III.10 Corte longitudinal de una mecha y un conector.⁽¹¹⁾

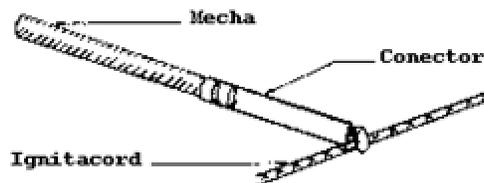


Fig. III.11 Unión de la mecha con el ignitacord por medio del conector.⁽¹¹⁾

Existen en el mercado tres tipos de ignitacord de acuerdo a su velocidad de combustión nominal e identificable por su color (Tabla III. 2).



El ignitacord se puede adquirir en carretes de 30 metros (aproximadamente 100 pies) y en rollos de 10.15 metros (33 1/3 pies).

TIPO	VELOCIDAD DE COMBUSTION	COLOR
A	Intermedia.- (8 segundos por 30.48 cm.)	Verde
B	Lenta.- (18 segundos por 30.48 cm.)	Rojo
C	Rápida.- (4 segundos por 30.48 cm.)	Negro

Tabla III. 2 Velocidad de combustión y color de los diferentes ignitacord.⁽¹¹⁾

Cordón detonante.

Se puede describir como una cuerda flexible, formada por varias capas protectoras y un núcleo del explosivo conocido como pentrita, que es muy difícil de encender pero tiene la sensibilidad suficiente para iniciar la explosión con detonadores (fulminantes o estopines), o por medio de la energía detonadora de algún explosivo de alta potencia.

Su velocidad de detonación es de 6,700 metros por segundo. La fuerza con que estalla es suficiente para hacer detonar explosivos violentos continuos dentro de un barreno, de modo que, si se coloca en el barreno, actúa como agente iniciador a lo largo de la carga explosiva como lo muestra la figura III.12.

El cordón detonante se usa para disparar múltiples barrenos grandes en la superficie, ya sea verticales u horizontales, siendo ilimitado el número de barrenos que pueden dispararse de esta forma.

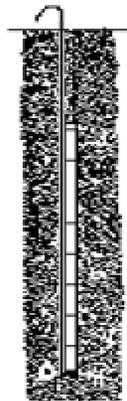


Fig. III.12 Cordón detonante colocado en el barreno, su función es iniciar la columna de explosivos.⁽¹¹⁾

En México los cordones detonantes más usados son el Primacord (Fig. III.13) y el E-cord (Fig. III.14), sus principales diferencias son los gramos de



pentrita y su grado de protección. El primacord se usa dentro del barreno para asegurar la detonación del explosivo, y el E-cord en la superficie para hacer detonar los tramos de Primacord de los barrenos. Esto se hace por ser más barato el E-cord.

PRIMACORD REFORZADO



Fig. III.13 Primacord⁽¹¹⁾

"E-CORD"



Fig. III.14 E-cord⁽¹¹⁾

Las características de los cordones detonantes Primacord y E-cord se muestran en la Tabla III.3

Cordón detonante	Núcleo	Gramos por metro (nominales)	Diámetro exterior mm.	Resistencia en Tensión, Promedio	Peso de Embarque 500 mts.
Primacord	Pentrita	10.6	5.15 ± 0.40	90 Kg.	11.5 Kg.
E-cord	Pentrita	5.3	4.0 ± 0.20	63 Kg.	7.8 Kg.

Tabla III.3 Características de los cordones detonantes.⁽¹¹⁾

Tanto el Primacord como el E-cord se pueden adquirir en rollos de 500 metros.⁽¹¹⁾

Detacord

Debido a su menor contenido de PETN en el núcleo tiene menor poder de iniciación y produce menos ruido que los otros cordones. No se recomienda para iniciar directamente explosivos. Puede ser utilizado como línea descendente y troncal para iniciar Primadets. Recibe y transmite la onda de detonación de otros cordones. En condiciones críticas, como barrenos llenos de agua u otras condiciones que afecte adversamente la sensibilidad del cebo o que impidan el contacto necesario del E-Cord al mismo, la energía iniciadora pudiera no ser suficiente por lo que sería conveniente usar reforzado.

Primadets

En la actualidad la utilidad del cordón detonante, está limitada debido al efecto negativo que tiene sobre algunos explosivos, al ruido indeseable que produce, etc. Cuando se usan detonadores eléctricos, se debe tener mucho cuidado para asegurar el buen contacto eléctrico con los cables del detonador.



El riesgo de detonación accidental prematura de una voladura por corrientes dispersas, señales intensas de radio o radar, o relámpagos o rayos es siempre posible.

En las operaciones de minado es cada vez más común utilizar el equipo electro – hidráulico para barrenación, equipo eléctrico de carga y acarreo, etc. Como consecuencia de lo anterior la demanda de iniciadores no eléctricos también se ha incrementado.

Primadet es un sistema de iniciación no eléctrico, silencioso, que transmite confiablemente la señal de iniciación a través de un tubo conductor, sin afectar al explosivo con el que esté en contacto en el barreno, hasta el fulminante con un preciso retardo pirotécnico integrado.

El sistema Primadet puede ser iniciado por un “detonador de impacto”, cordón detonante o mecha y fulminante ordinario.

Tipos

Existen actualmente en México cinco tipos de Primadets:

1. Primadet MS con retardos en fracciones de milisegundo. Se utiliza, por lo general, en donde existen dos caras libres como rebajes, bancos, etc. El color del tubo conductor es naranja.
2. Primadet LP con retardos en fracciones de segundo. Se utilizan, por lo general, en minería subterránea, en donde existe una cara libre como frente, contrapozos, etc. El color del tubo conductor es amarillo
3. Conectores MS Bidireccionales, para proporcionar tiempos de retardo del orden de milisegundos entre barrenos conectados con cordón detonante.
4. Primadet EZDet es una unidad, con retardo de fondo y superficie en milisegundos, diseñada para utilizarse en voladuras en la construcción tanto de superficie como subterráneas. Son especialmente adecuados para emplearse en lugares en donde se requiere disminuir los niveles de vibración y ruido ya que no se utiliza cordón detonante.
5. Primadet EZTL es una línea de retardo troncal que es el complemento ideal de los EZDet. Debido a que tampoco requieren el empleo del cordón detonante, sus retardos son en milisegundos.

Los iniciadores con retardo tipo MS y LP constan de cuatro componentes principales que son:

- Una etiqueta de color codificada que indica el número del período de que se trata, así como su tiempo nominal de detonación.
- Un gancho “J” de plástico inerte que facilita la conexión del tubo conductor con la línea troncal de cordón detonante.
- Un tubo conductor y
- Un fulminante o detonador con retardo integrado.

El tubo conductor es de diámetro pequeño, de plástico laminado, cubierto por una pequeña capa de material reactivo, se utiliza únicamente 454 gr por cada 30.48 m de tubo. Cuando éste es iniciado, transmite una señal de baja energía a una velocidad de 2,000 m/s. Esta señal es en forma de ondas de choque a



través del aire, en el interior del tubo, soportada por la reacción química del material reactivo mediante calentamiento y la expansión de los productos gaseosos de la reacción. Esta reacción se propaga a través de dobleces agudos, nudos o torceduras en el tubo conductor, dejando intacta la superficie exterior del tubo, por lo que no deflagrará ningún tipo de explosivo comercialmente disponible con el que esté en contacto. La señal es silenciosa.

El diámetro exterior del tubo es de 0.30 cm y tiene una resistencia mínima a la tensión de 20 Kg y una elongación mínima de 300%.

El tubo no puede ser iniciado por transmisiones de radio de alta frecuencia, energía estática o errática, flama, calor o impacto generado en las operaciones normales de minado. Sin embargo, el detonador es por mucho más sensitivo a esas condiciones. El tubo conductor requiere de una mezcla de calor e impacto para ser iniciado, que puede proporcionarse por cualquier detonador comercial disponible. Se utiliza el cordón detonante Primario tipos E-Cord o Detacord para iniciar los tubos conductores debido a que poseen, en toda su longitud, energía iniciadora que actúa como un fulminante continuo y debido a su alta velocidad se considera, para propósitos prácticos, como un iniciador instantáneo de los tubos.⁽¹⁰⁾

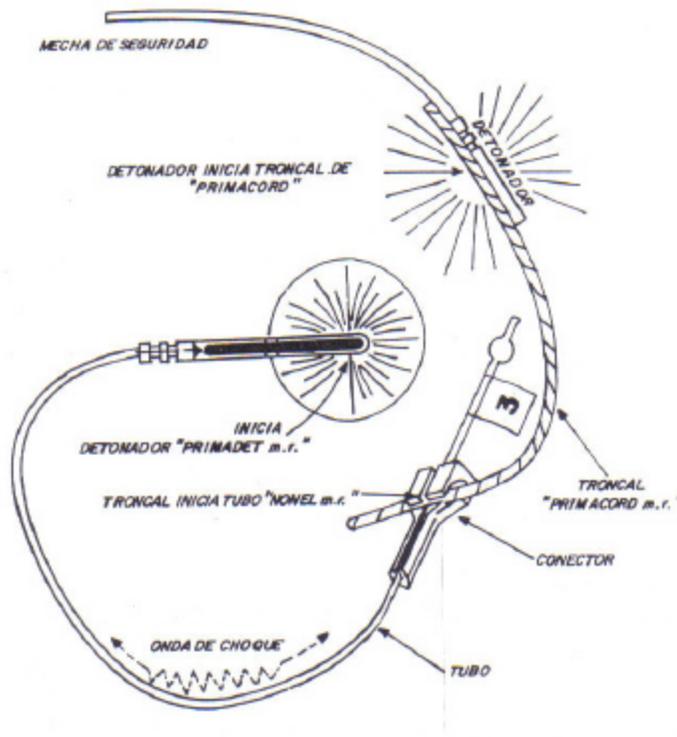


Fig. III.15 Iniciación del sistema Primadet.⁽¹⁰⁾



Dispositivos de iniciación: No eléctricos, eléctricos.

Detonadores.

Los detonadores son dispositivos que sirven para disparar una carga explosiva. Pueden ser eléctricos y no eléctricos (estopines y fulminantes respectivamente) Fig. III.16.

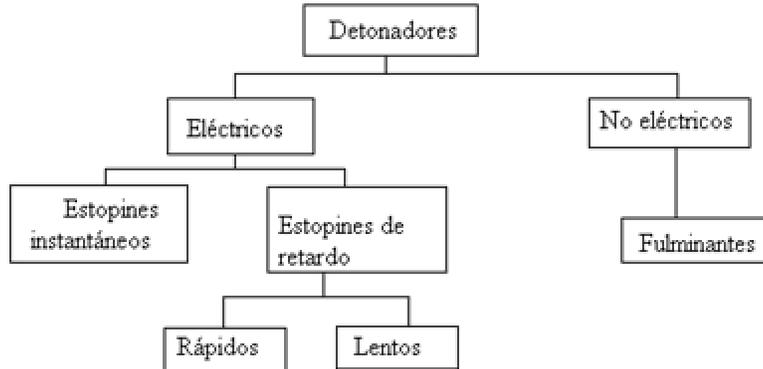


Fig. III.16 Clasificación de los detonadores.⁽¹¹⁾

Fulminantes.

Los fulminantes o cápsulas detonadoras son casquillos metálicos cerrados en un extremo en el cual contienen una carga explosiva de gran sensibilidad, por ejemplo fulminato de mercurio. Están hechos para detonar con las chispas del tren de fuego de la mecha de seguridad. En la figura III.17 se muestra una mecha ensamblada a un fulminante.

Los fulminantes que se fabrican son del número 6 ya que son lo suficientemente potentes, pero si se requieren de otra potencia se conseguirán en un pedido especial.

Los fulminantes los surten por ciento o por millar. Su empleo en construcción generalmente está limitado a pequeñas voladuras y moneo (volver a tronar rocas que encs la primera voladura resultaron de tamaño mayor que el especificado). El moneo es antieconómico por lo que debe de evitarse tratando de obtener toda la roca al tamaño especificado desde la primera voladura.⁽¹¹⁾

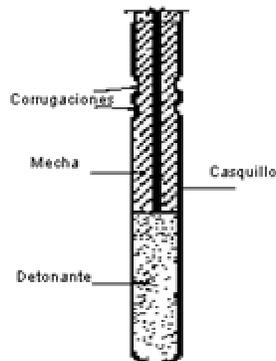


Fig. III.17 Estructura de un fulminante⁽¹¹⁾



Noneles

Es un iniciador clasificado dentro de los estopines, aunque no eléctrico, de donde proviene su nombre (NON – Electric). Consiste en un tubo plástico laminado de diámetro chico con un sello ultrasónico en la punta, su interior está revestido de una capa muy delgada de material reactivo (Fig III.18).

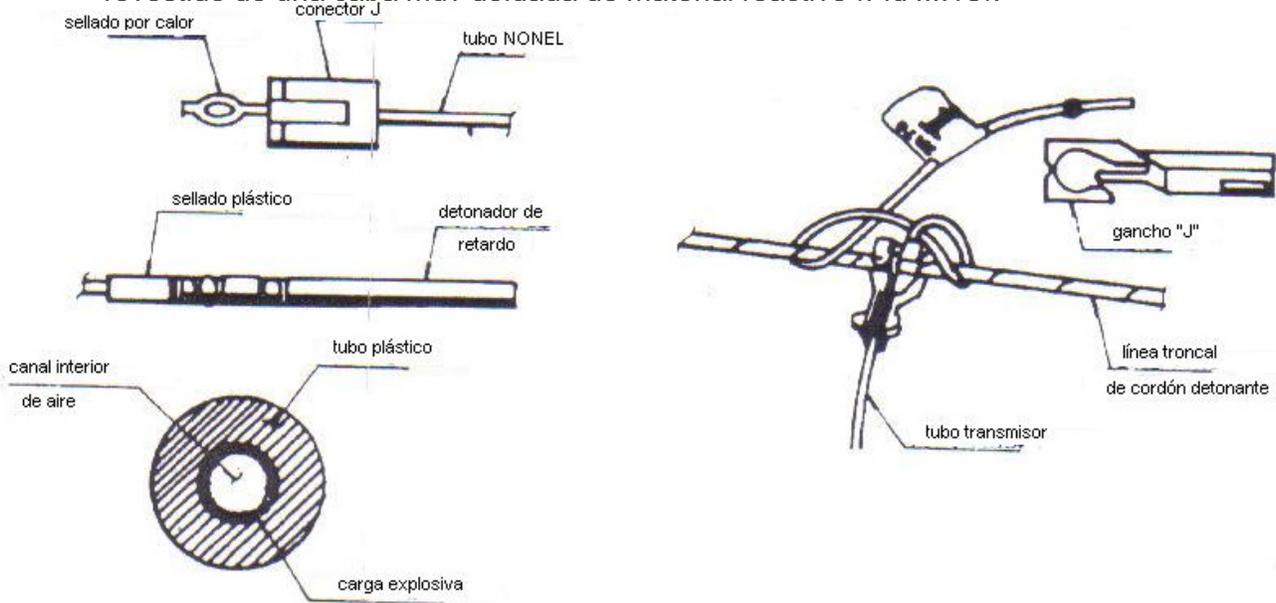


Fig. III.18 Esquema que muestra la estructura de los Noneles⁽¹⁰⁾

Fulminante de retardo

Los componentes de un fulminante Primat se muestran en la Fig. III.19. Donde se observa que la onda de choque que viaja a través del tubo conductor perfora el tazón antiestático, iniciando a los compuestos pirotécnicos que conforman el tren de retardo, posteriormente inicia a la carga primaria que es hecha de plomo y ésta a su vez detona la carga secundaria, PETN, que continúa con la cadena de iniciación, el iniciar al explosivo con que está en contacto.⁽¹⁰⁾

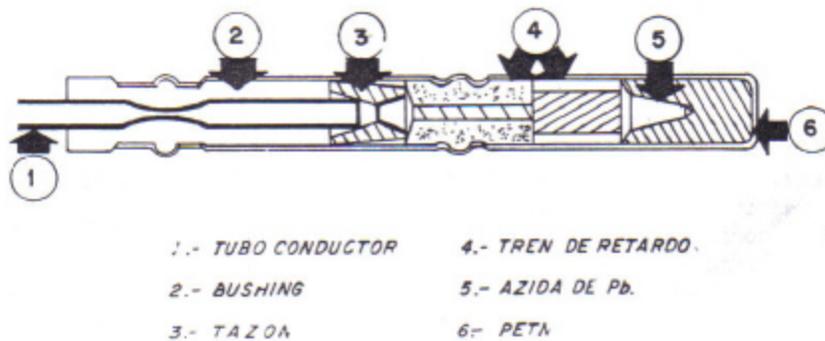


Fig. III.19 Fulminante Primadet⁽¹⁰⁾

Estopines eléctricos.

Los estopines eléctricos son fulminantes elaborados de tal manera que pueden hacerse detonar con corriente eléctrica (Fig. III.20). Con ellos pueden



iniciarse al mismo tiempo varias cargas de explosivos de gran potencia, y se puede controlar con precisión el momento de la explosión, lo que no sucede con los fulminantes por la variación de la velocidad de combustión de la mecha.



Fig. III.20 Estopines eléctricos ⁽¹¹⁾

Un estopín eléctrico está formado por un casco metálico cilíndrico que contiene varias cargas de explosivos. La energía eléctrica es llevada hacia este mediante alambres de metal con aislamiento de plástico, los cuales se introducen a través de un tapón de hule o plástico. El tapón colocado en el extremo abierto del casco forma un cierre hermético resistente al agua. Los extremos de los alambres son unidos dentro del fulminante por un alambre de corta longitud y diámetro muy pequeño llamado filamento, el cual queda en contacto con la carga de ignición del estopín. Cuando se aplica corriente eléctrica se pone incandescente el filamento lo cual provoca que detone.

Los estopines que tienen más alta potencia son los que tienen mayor cantidad de carga detonante. Generalmente los más usados son del No. 6, y raramente del No. 8.

Estopines eléctricos instantáneos.

Los estopines eléctricos instantáneos tienen una carga de ignición, una carga primaria y una detonante (Fig. III.21).

Su casquillo es de aluminio y tienen dos alambres de cobre calibre 20 ó 22, generalmente uno rojo y el otro amarillo. Estos dos colores distintos son de gran ayuda al hacer las conexiones.

Los estopines instantáneos se pueden conseguir sueltos o en cajas cuyo contenido es el siguiente:

- 50 piezas para alambre de 2 a 6 metros.
- 40 piezas para alambre de 7 metros y
- 30 piezas para alambre de 9 y 10 metros

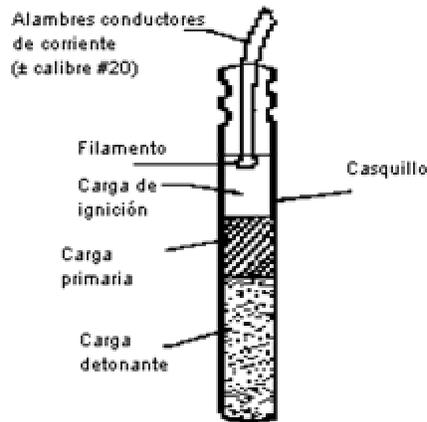


Fig. III.21 Estructura de estopín instantáneo⁽¹¹⁾

Estopines eléctricos de retardo.

Los estopines eléctricos de retardo, también llamados de tiempo, son similares a los instantáneos, con la diferencia que tienen colocados entre el filamento y la carga de detonación un elemento de retardo el cual contiene pólvora lenta (Fig. III.22).

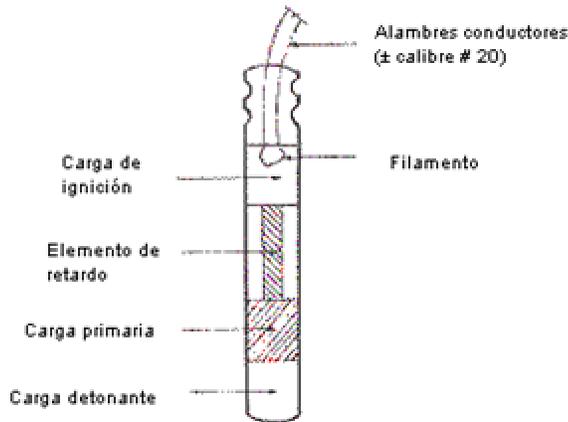


Fig. III.22 Estructura de un estopín de tiempo⁽¹¹⁾

Estos estopines tienen una etiqueta de color que muestra el número de período de retardo y que sirve para su identificación. El disparo con estopines de retardo tiene por objeto mejorar la fragmentación y el desplazamiento de la roca, así como proporcionar mayor control de vibraciones, ruido y proyecciones. Si se usan adecuadamente pueden reducir los costos.

Los estopines de retardo tienen alambre de cobre calibre 24 forrado cada uno de distinto color, generalmente uno azul y amarillo el otro.

Los estopines eléctricos tienen una corriente mínima y otra de diseño, la primera es aquella a partir de la cual puede ser suficiente para detonar el estopín, y la segunda la corriente con la que se asegura la detonación del mismo (Tabla III.4).



ESTOPINES	CORRIENTE MÍNIMA	CORRIENTE PARA DISEÑO
INSTANTÁNEOS	0.3 A	2.0 A
DE TIEMPO:	0.4 A	2.0 A

Tabla III.4 Corriente de disparo mínima y de diseño.⁽¹¹⁾

Los estopines de retardo pueden ser de milisegundos "MS" o los llamados Mark V.

Estopines de retardo "MS".

Son los más ampliamente usados en canteras, trabajos a cielo abierto y proyectos de construcción. Se pueden obtener en diez períodos, cuyos números indican el tiempo en milésimas de segundo que tarda en producirse un disparo, a continuación se mencionan: MS-25, MS-50, MS-75, MS-100, MS-125, MS-150, MS-175, MS-200, MS-250, y MS-300.

Estopines de retardo Mark V.

Se utilizan principalmente en trabajos subterráneos como túneles, galerías, pozos, etc. Se fabrican en diez períodos regulares de retardo: 0-25MS, 1-500MS, 2-1000MS, 3-1500MS, 4-2000MS, 5-3000MS, 6-3800MS, 7-4600MS, 8-5500MS Y 9-6400MS.

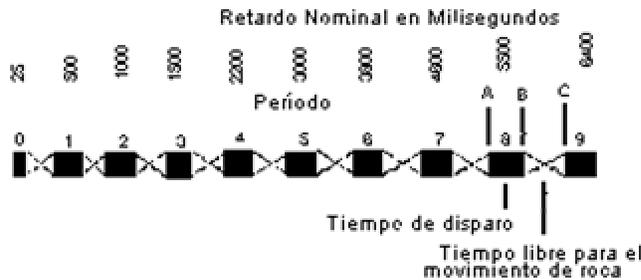


Fig. III.23 Indica los tiempos de disparo y los de movimiento de la roca entre períodos consecutivos.⁽¹¹⁾

En la figura III.23 se señala que todos los estopines de un mismo período de retardo disparan dentro de los límites de tiempo representados por las áreas negras correspondientes a ese período. Por ejemplo todos los estopines del 8º período disparan en el tiempo representado entre las líneas A y B. Antes de que cualquier estopín del 9º período se dispare, deberá transcurrir el tiempo indicado entre las líneas B y C. Este intervalo es el tiempo que queda libre entre los períodos 8º y 9º para el movimiento de la roca. Esto no quiere decir que todos los estopines 8 disparen simultáneamente, estallarán unos después de otros, pero todos en el intervalo A-B.⁽¹¹⁾



Conector plástico de retardo

Las unidades Primadet EZDet y EZTL tienen componentes comunes, como son la etiqueta de retardo, el gancho "J", el tubo conductor y el fulminante.

El componente común de ambas unidades y que aún no se ha descrito, es un preciso retardo de superficie alojado en un conector plástico que es capaz de iniciar de 1 a 6 tubos conductores, propiamente conectados, en ambas direcciones (Fig. III.24).⁽¹⁰⁾

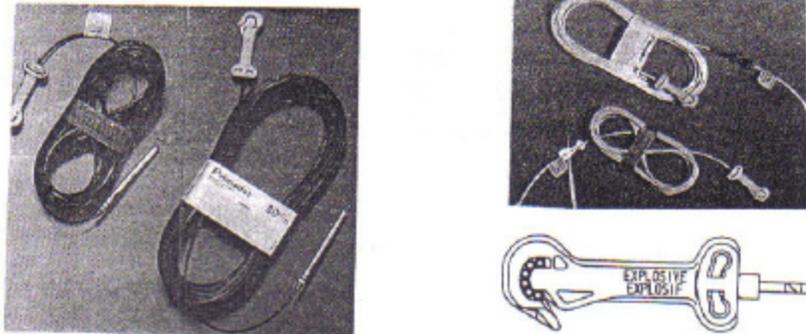


Fig. III.24 Primadets EZDet y EZTL ⁽¹⁰⁾

Corrugadoras para fulminantes.

Hay dos tipos de corrugadoras: las pinzas corrugadoras y las máquinas corrugadoras. Con ambas se pueden hacer hendiduras a los casquillos del fulminante cerca del extremo abierto de éste, logrando una unión firme e impermeable entre la mecha y el fulminante.

En la figura III.25 se muestra a la izquierda, la corrugadora manual para una hendidura y a la derecha una máquina cortadora y corrugadora de hendidura doble. También con la corrugadora manual se pueden hacer dos hendiduras.

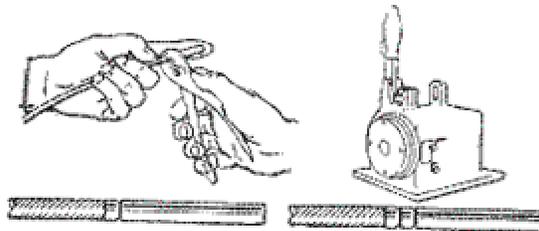


Fig. III.25: Corrugadora manual y máquina corrugadora. ⁽¹¹⁾

La compra de la máquina corrugadora sólo se justifica para operaciones donde diariamente se fija una gran cantidad de fulminantes o donde hay puestos centrales para hacer este trabajo. ⁽¹¹⁾



III.4.6 RETAQUES

Una vez que se llena un barrenos con un explosivo hasta la profundidad requerida, el resto del agujero deberá llenarse con retakes. El retake puede consistir en trocitos de roca o de algún otro material inerte adecuado, confinando así la energía y aumentando la efectividad del explosivo. Si no se requiere una carga continua de explosivo desde el fondo hasta la parte superior de la carga, pueden colocarse retakes entre estas a intervalos predeterminados. Cuando se separan con retakes, deberá proporcionarse un purgador separado para cada una de las cargas. La figura III.26 ilustra varios métodos para preparar los barrenos que se harán detonar con cápsulas detonantes eléctricas.⁽⁶⁾

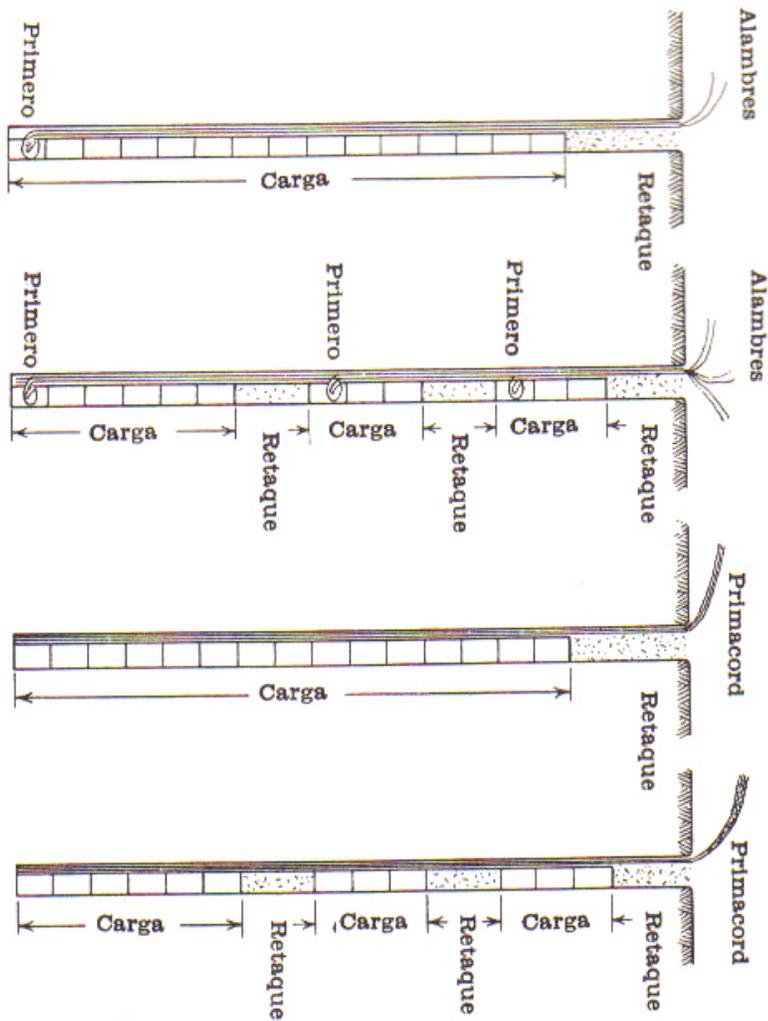


Fig. III.26 Métodos para cargar los barrenos con explosivos⁽⁶⁾



III.4.7 SISTEMAS DE COMPROBACIÓN Y DE DISPARO.

Máquinas Explosoras.

Suministran la corriente necesaria para disparar los estopines eléctricos. Estas son de dos tipos básicos: de "generador" y de "descarga de condensador". Ambos tipos son de una construcción robusta y soportan servicio duro por periodos prolongados.

De "generador"

Estas explosoras han sido las convencionales durante muchos años. Se basan en un generador modificado que suministra una corriente directa pulsativa. Son de dos tipos: de "giro o vuelta" y de "cremallera". Están diseñadas de tal manera que no producen corriente alguna hasta que el giro o el desplazamiento hacia abajo de la cremallera lleguen al final de su recorrido; instante en que la corriente es liberada hacia las líneas de disparo en magnitud muy cercana a su máximo amperaje y voltaje (Fig. III.27).

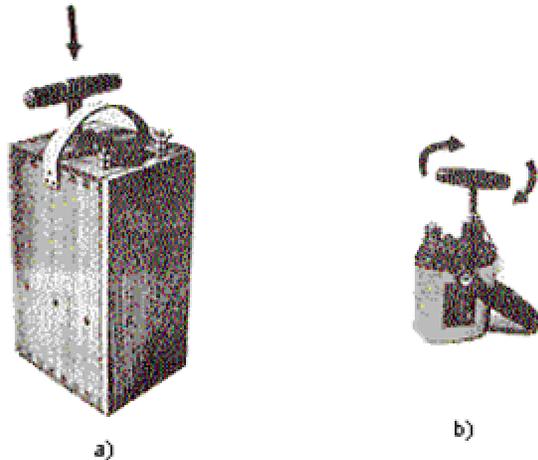


Fig. III.27: En el caso "a" se muestra la máquina explosora de cremallera y en el "b" la de giro o vuelta. Las flechas señalan el movimiento de la manivela.⁽¹¹⁾

De "descarga de condensador"

Estas máquinas explosoras utilizan pilas secas para cargar un banco de condensadores que alimenta una corriente directa y de duración corta a los dispositivos de disparo eléctrico (Fig. III.28).

Para operarlas se conectan sus terminales a las líneas conductoras provenientes del circuito de la voladura y después se oprime el interruptor de "carga", cuando el foco piloto (rojo) enciende se oprime el interruptor de "disparo" manteniendo siempre oprimido el interruptor de "carga".

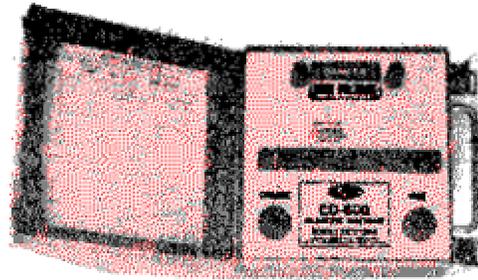


Fig. III.28: La explosora de descarga de condensador no dispara a menos que ambos botones, el de "carga" y el de "disparo" ("charge" y "fire" respectivamente), sean accionados conjuntamente.⁽¹¹⁾

Estas explosoras se consideran como las máquinas más eficientes y confiables para el encendido en voladuras. Sus principales características son:

- Poseen una capacidad de detonación de estopines extremadamente alta.
- Proporcionan gran seguridad ya que no disparan hasta alcanzar su voltaje de diseño, el cual es señalado por la luz del foco piloto.
- Los botones de carga y disparo así como los condensadores quedan en "corto circuito" hasta que se necesiten.
- La ausencia de partes dotadas de movimiento y la eliminación del factor humano que interviene en las explosoras mecánicas.

Existen también máquinas explosoras de descarga de condensador capaces de dar energía a múltiples circuitos de voladura en una secuencia de tiempo programada, comúnmente a estas máquinas se les denomina "explosoras secuenciales". La distribución de tiempo proporciona un mayor número de retardos de los que se pueden tener con estopines de tiempo disparados con máquinas explosoras convencionales.

Otra característica de las explosoras secuenciales es que permiten aumentar el tamaño total del disparo sin incrementar los efectos de ruidos y vibraciones, así como mejorar la fragmentación y el control de proyecciones de roca.

Instrumentos de prueba.

Son instrumentos diseñados para medir las características eléctricas de los circuitos de voladura, así como del área circundante para asegurar que la operación sea eficiente y segura. Estos aparatos, además de ahorrar tiempo, permiten incrementar grandemente la seguridad de cualquier operación de voladura, reduciendo la posibilidad de disparos quedados o de detonación accidental.



Galvanómetro.

Este aparato tiene una pila que proporciona la corriente necesaria para mover una manecilla en una escala graduada. Las pilas y las partes mecánicas están encerradas en una caja metálica, la cual está provista en su parte superior de dos bornes de contacto. Sirve para probar cada uno de los estopines eléctricos y también para determinar si un circuito de voladura está cerrado o no y si está en condiciones para el disparo; además sirve para localizar alambres rotos, conexiones defectuosas y cortos circuitos, así como para medir la resistencia aproximada del circuito.

Si se requiere mayor exactitud que la que proporciona un galvanómetro, se puede usar un óhmetro (Fig. III.29). Estos dos aparatos son similares sólo que el óhmetro posee dos escalas de resistencia, una baja (de 0 a 100 ohms) y otra alta (de 0 a 1000 ohms), con lo cual se amplía el alcance de medición de resistencias.



Fig. III.29: Ohmetro para voladuras.⁽¹¹⁾

Multímetro.

El multímetro (Fig. III.30), es un aparato diseñado para medir resistencias, voltajes y corrientes en operaciones de voladuras eléctricas. Su sensibilidad es muy alta, por lo que tiene un amplio alcance en sus mediciones.

Sus principales usos son:

- a) Examinar los sitios de voladura para localizar corrientes extrañas.
- b) Analizar las resistencias de los circuitos.
- c) Ejecutar pruebas de resistencia en la determinación de riesgos por electricidad estática.
- d) Probar líneas de conducción.
- e) Probar la continuidad y la resistencia de estopines y circuitos eléctricos.
- f) Medir voltajes
- g) Como galvanómetro.

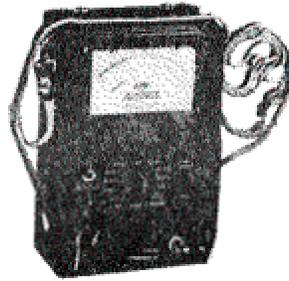


Fig. III.30: Multímetro para voladuras.⁽¹¹⁾

Reóstato.

Este instrumento se utiliza para probar la eficiencia de una máquina explosora de tipo generador. Está formado por una serie de bobinas de resistencia variable. Cada resistencia tiene una placa que indica su valor en ohms y su número equivalente de estopines eléctricos (Fig. III.31).

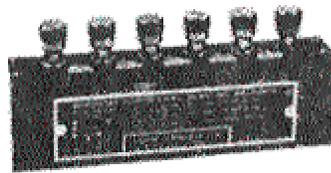


Fig. III.31: Reóstato para prueba de máquinas explosoras.⁽¹¹⁾

Para usar el reóstato, primeramente se conectan dos o cuatro estopines en serie con las resistencias del condensador de manera que la resistencia total se ajuste a la que tendría el número total de estopines para los que la máquina fue diseñada para disparar, en seguida se conecta el circuito a la máquina explosora y se dispara, si detonan los estopines puede concluirse que la explosora está en condiciones adecuadas para la operación de voladuras. Al hacer la prueba debemos protegernos de la explosión de los estopines.

La ventaja del uso del reóstato (Fig. III.32) es que puede probarse la explosora detonando únicamente unos pocos estopines en cada prueba.

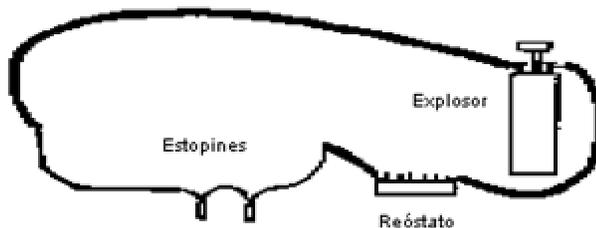


Fig. III.32: Uso del reóstato.⁽¹¹⁾



Mallas o redes.

Las mallas pueden ser de alambre o alambón y se utilizan para cubrir la voladura antes de efectuar el disparo, para captar los fragmentos de roca procedente de la voladura e impedir que vuelen al aire con grandes proyecciones. Debe tenerse cuidado al colocar las mallas, porque pueden hacerse cortos circuitos si hay conexiones descubiertas del circuito de disparo que estén en contacto con la malla.⁽¹¹⁾

III.4.8 CEBADO, CARGADO Y CONEXIÓN.

Cebado

La preparación correcta de los cebos es de importancia primordial para el funcionamiento eficaz de una voladura. Lo anterior es esencial al ensamblar cebos cuando las cargas principales son de explosivos o de agentes explosivos no sensitivos a los fulminantes. Sea cual fuere el explosivo que se emplee, es conveniente que el cordón llegue al fondo del barreno. Por esta razón es necesario asegurarlo debidamente al primer cartucho o cebo mediante varias vueltas, con cordón bien apretado a lo largo del cartucho.

Se recomienda, para facilitar su manejo, utilizar un portacarretes que permitirá desenrollar el cordón detonante sin que se formen “cocas” al bajarlo al interior del barreno. Antes de cortar la línea descendente del carrete, es necesario medirla para asegurarse de que el cartucho cebado efectivamente haya llegado al fondo del barreno y de que no se haya atorado en el camino.

Cargado

Después de que el cebo esté en su posición y antes de seguir adelante en el proceso de cargar el barreno, deberá cortarse del carrete la línea descendente del cordón. Cuando menos un tramo de cordón de 60 cm a un metro, que deberá quedar fuera de la boca del barreno, dicho tramo será de utilidad por si el barreno llega a asentarse y para hacer conexiones a la troncal. El extremo de la línea descendente deberá asegurarse firmemente y conservarse tirante mediante una roca.

La carga de columna puede ahora bajarse al interior del barreno, si se utiliza ANFO deberá tenerse en cuenta el efecto del cordón detonante sobre éste. Si toda la carga de la columna es de explosivo sensible al fulminante, puede asegurarse la detonación total de la carga introduciendo el cordón a través del eje longitudinal de cada cartucho, pero debe tenerse en cuenta que la iniciación será desde arriba y no del fondo.

Aplicaciones

A continuación se describen las operaciones básicas para trabajos subterráneos:

Cargado

Inserte el fulminante Primadet MS o LP, con el período de retardo seleccionado, dentro del cebo por el orificio hecho con un punzón de



material antichispa. Como el efecto del fulminante es direccional se deberá apuntar en la dirección de la carga principal, centrado y rodeado de la masa explosiva en el interior del cebo (Fig. III.33).

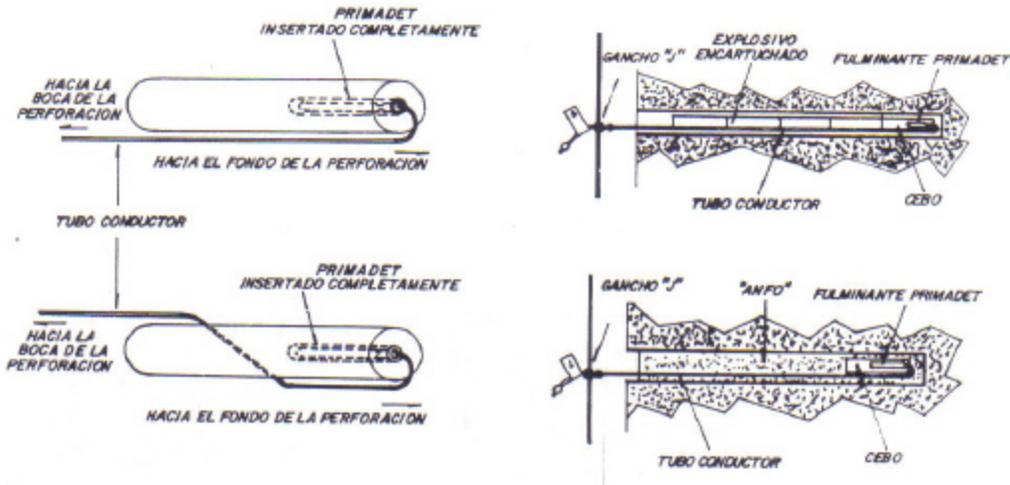


Fig. III.33 Cebado recomendado en aplicaciones subterráneas⁽¹⁰⁾
Conexión

La conexión a la línea troncal de cordón detonante (Detacord o E – Cord) se realiza mediante el gancho “J”, que permite una conexión rápida y ayuda a formar un ángulo recto entre el tubo conductor y la línea troncal, lo que impedirá la posibilidad de un corte ocasionado por la potencia del cordón detonante (Fig. III.34).

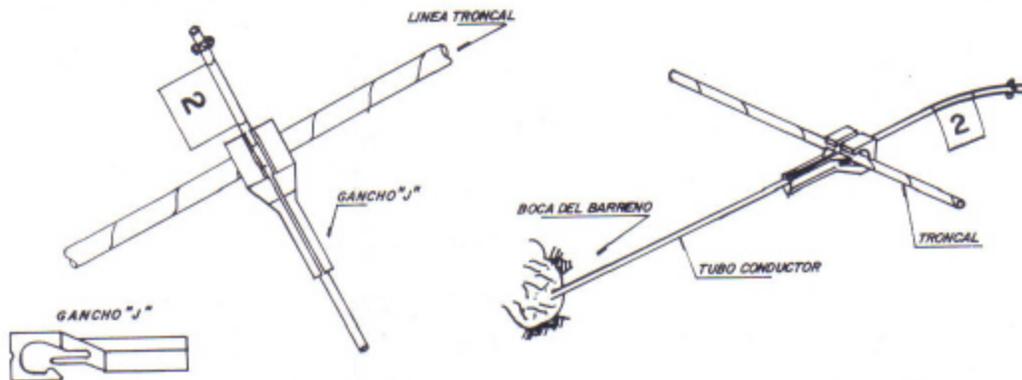


Fig. III.34 Conexión del Primadet MS a la línea troncal utilizando el gancho “J”⁽¹⁰⁾



La figura III.35(a) muestra una plantilla en un túnel. La línea troncal de cordón detonante está sujeta con el gancho "J", a la boca de varios barrenos alrededor de la cara en convenientes localizaciones (Fig. III.35(b)) , de manera que los tubos restantes pueden ser sujetos fácilmente (Fig. III.35(c)).

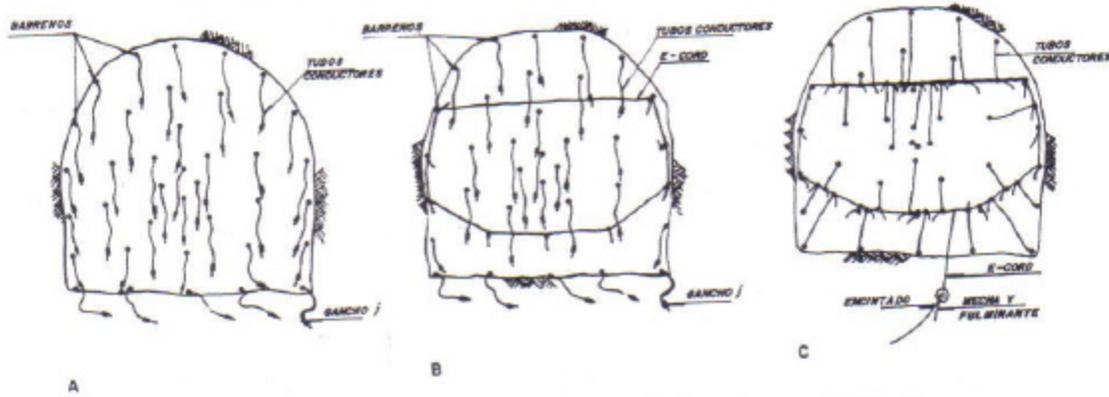


Fig. III.35 Conexión de Primadets a la línea troncal en túneles .⁽¹⁰⁾



III.5 DISEÑO DE VOLADURAS

En este caso nos enfocaremos a las voladuras subterráneas:

Cuando es necesario romper y desplazar la roca para llevar a cabo un proyecto de construcción, se utilizan técnicas de voladura para este fin, el tamaño y alcance de alguno de estos proyectos pueden ser enormes, tales como los proyectos hidroeléctricos o sistemas de transporte como el Metro. Cada proyecto es único, por lo que se requiere tomar importantes consideraciones tanto en el diseño de las voladuras como en la aplicación de los explosivos, tomando en cuenta las condiciones locales del terreno, las restricciones y cuidados que requiere el proyecto. El reto de los responsables de las voladuras es obtener la fragmentación y el desplazamiento deseados, manteniendo los niveles de vibración y golpe de aire bajo control, de acuerdo a las restricciones permitidas. El tipo de explosivo, así como la cantidad, geometría y distribución de los mismos, dentro de una masa rocosa, pueden ser factores manejables. La geología y las condiciones del medio ambiente local de las voladuras pueden ser variables muy difíciles, pero algunas veces son posibles de manejar por los expertos en voladuras.

La construcción de túneles, pozos o lumbreras, son trabajos altamente especializados que requieren un entrenamiento único. Los túneles y pozos pueden variar en intervalos de tamaño, las técnicas para su construcción se han desarrollado en forma impresionante en los últimos años. Los equipos hidráulicos de alta capacidad y los utilizados para bombear la emulsión han mejorado, aumentando rápidamente las tasas de rendimiento en la producción. Los diámetros de perforación varían de 3.81 a 8.89 cm, los factores de carga de explosivo son altos, del orden de 1.75 a 4.75 Kg/m³ y los factores de energía de 5617 a 15173 kj/m³.

Es de suma importancia que los barrenos sean dados en la posición y orientación correcta. El marcaje de los barrenos en la cara, antes de ser perforados, debe hacerse con gran exactitud, los errores en la perforación tienen un efecto muy significativo, sobre todo en las operaciones subterráneas de voladuras.

La principal diferencia entre las voladuras en túneles, pozos y voladuras de banco, es que en las primeras solamente tenemos una cara libre, mientras que en las de banco se tienen dos o más caras libres.

En las voladuras de túneles y pozos es necesario crear una segunda cara libre (cuña), hacia donde la roca pueda quebrarse y desplazarse. La segunda cara libre se produce por la localización y orientación de los barrenos en la frente y disparados en predeterminado orden, antes del resto de la voladura. Después de que se hace el corte, el resto de los barrenos se disparan hacia la cara libre, de acuerdo al diseño de retardos. El diseño de los barrenos restantes en el disparo se pueden comparar a una voladura en banco, en el entendido que las desviaciones de la



perforación producen efectos muy importantes en los resultados y que se utilizan altos factores de energía debido a lo encajonado de la voladura. Los barrenos a lo largo del contorno de los límites de excavación del túnel, al igual que los barrenos de cielo (techo), los de costilla (pared) y de piso, tienen que ser con cierto ángulo hacia fuera de los parámetros de diseño de la excavación, estos barrenos permitirán el acomodo del equipo de perforación en el siguiente disparo.

III.5.1. MÉTODOS DE VOLADURAS :

III.5.1.1. MÉTODO DE FRENTE COMPLETA

Es usual en túneles de pequeño y mediano tamaño. En este método se dispara la sección completa y el éxito de su aplicación depende no solamente de la eficiencia de la perforación, sino también del ciclo de la operación. La secuencia ideal consiste en: perforación, voladura y rezagado completo del material acumulado por el disparo. El patrón de perforación, la profundidad, el número de barrenos, el equipo de perforación, el rezagado, la ventilación, etc., deben ser por lo tanto bien seleccionados para llevar a cabo el ciclo completo.

III.5.1.2. MÉTODO DE ATAQUE SUPERIOR Y BANCO.

Posiblemente es el método más utilizado, y consiste en abrir un túnel a lo largo del techo de la sección, consiguiéndose acceso para sanear y reforzar la roca en dicha zona. El resto de la sección se remueve con uno o más bancos. Este método se aplica en túneles de más de 10 metros de diámetro y sirve para reducir costos de perforación y voladura. Esta última, en este tipo de operación normalmente se realiza en forma muy confinada, aun cuando parte del banco tenga dos caras libres. Para permitir un mejor resultado se recomienda rezagar el material de la voladura anterior. En la sección de banqueo las cargas de explosivos se calculan como en las de banco. Si los disparos se hacen con material al frente, las cargas deben calcularse para permitir el abundamiento; sin embargo, esto produce mayores niveles de vibración.

III.5.1.3. VOLADURAS EN HUNDIMIENTO (POZOS O TIROS)

Los principios utilizados en estas obras son básicamente los mismos que en la apertura de túneles, ya que sólo cuentan con una cara libre y es necesario provocar una segunda cara libre mediante una cuña al igual que en las voladuras de túneles; sin embargo, estas pueden modificarse por circunstancias especiales. Durante la apertura de tiros normalmente se trabaja con condiciones excesivas de humedad, por lo tanto comúnmente se abre una cuña que también puede servir como colector de agua o bien se lleva la explotación en dos fases, para permitir que el agua escurra hasta el colector desde donde puede ser bombeada.



El patrón de perforación deberá diseñarse de tal forma que si un barreno falla en la secuencia del disparo para romper y establecer una cara libre, el barreno adyacente detonará ayudando a romper y a desplazar el material del barreno fallado; de esta manera se minimizarán los efectos. Si esto no se realiza, puede haber barrenos congelados que repercutirán en pérdida de tiempo.

En algunos pozos (tiros) se ha encontrado, cuando se está trabajando en una zona de estratos con muy pronunciada inclinación, que la roca de la voladura tiende a apilarse en la parte más baja de los estratos inclinados, pero con la introducción de un período de extra retardo en los barrenos de amortiguamiento o en el lado del pozo donde esto ocurre, es posible dirigir la roca quebrada hacia el centro del pozo.⁽¹⁰⁾

III.5.1.4. TÉCNICA SUECA DE VOLADURAS.

Calculo de cargas:

En este método al calcular la alineación y la carga de los barrenos se utiliza un esquema de perforación adecuado al área de que se trate.

La única superficie libre en estas voladuras es el frente de ataque del túnel, lo que significa que las pegas se efectúan en condiciones de gran confinamiento. Cuanto más pequeña sea el área del frente, más confinada está la roca, y esto implica que la carga específica aumenta al disminuir el área.

El principio de la técnica de voladuras reside en la apertura de una cavidad inicial mediante un cuele (corte), y la subsiguiente destroza de la totalidad de la sección rompiendo hacia dicha cavidad.

El área que requieren los barrenos de destroza para tener rotura libre hacia dicha abertura es de 1.4 x 1.4 m y en el caso de grandes diámetros de barreno puede ser de hasta 2 x 2 m (Fig. III.36). La rotura libre en este caso puede ser calculada como 0.7 x anchura de la abertura. Todos los barrenos del contorno, como los de techo, hastiales y piso, han de ser orientados de modo que proporcionen un margen para emboquille de la pega siguiente, con objeto de mantener la sección del túnel de acuerdo con la proyectada. Este margen implica que se da a los barrenos una inclinación que los hace llegar más allá del contorno; el ángulo utilizado depende del espacio necesario para emboquille, lo cual a su vez es función del equipo de perforación que se emplee.

En ciertos tipos de cuele, como el cuele en abanico, por ejemplo, los barrenos del mismo más los de contracuele comprenden la mayor parte de la sección del túnel.

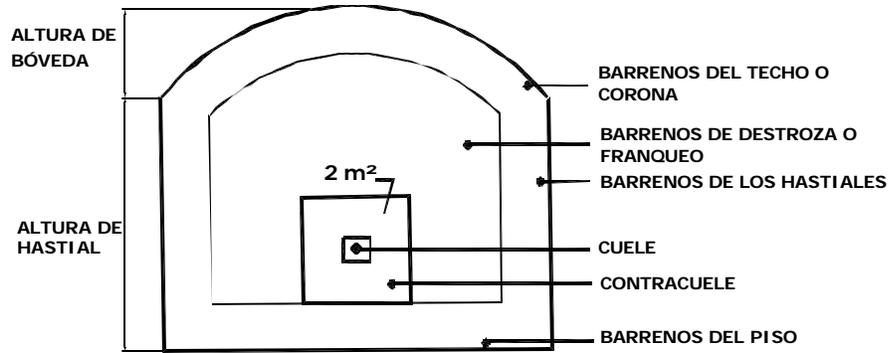


Fig. III.36 Área de los barrenos en las diferentes secciones de un túnel⁽¹⁸⁾

Cueles de tiros paralelos y calculo de la carga en los barrenos de contracuele: En este tipo de cuele todos los barrenos son paralelos entre sí. La rotura tiene lugar en dirección a un barreno sin carga que sirve de abertura inicial. Los primeros barrenos adyacentes al barreno vacío requieren una gran precisión en la perforación y en la carga.

En la figura III.37 se muestran los espaciamientos alrededor del barreno.

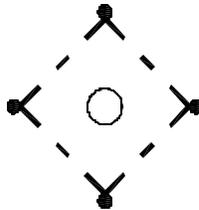


Fig. III.37 Espaciamientos alrededor de un barreno sin carga⁽¹⁸⁾

Como el barreno vacío es normalmente de un diámetro mayor que los del resto de la pega, los cueles de tiros paralelos son denominados algunas veces cueles de gran diámetro.

La perforación del barreno central de gran diámetro y de los barrenos adyacentes, así como su carga, ha de efectuarse con precisión. Para diferentes valores de estos diámetros, se requieren también diferentes espaciamientos; las características de la roca y la voladura pueden también hacer preciso un reajuste de los espaciamientos y las cargas a fin de obtener una satisfactoria rotura. Si la carga empleada fuera demasiado pequeña, el cuele no rompería correctamente, y si fuera demasiado grande, la roca podría sinterizarse y el cuele se malograría.

Una regla sencilla para el cálculo de la *pie* entre el barreno de gran diámetro y el más próximo a él es la siguiente:

$$Pie = 0.7 \times \text{Diámetro barreno central}$$

$$V = 0.7 \times d_{\text{central}}$$

En el caso de dos barrenos de gran diámetro, esta última relación se modifica en la forma:



$$V=0.7 \times 2d_{\text{central}}$$

La relación puede ser también utilizada para los barrenos del contracuele, correspondiendo la anchura de la superficie libre al diámetro del barreno central, según la relación:

$$V=0.7 \times B$$

La zona de roca desprendida ha de ser de anchura suficiente para que los barrenos de destroza tengan la posibilidad de romper en ángulo recto, lo que implica $2 \times V_{\text{barr destroza}}$

La *pedra* de los barrenos del cuele no ha de ser confundida con la distancia entre centros de los mismos normalmente utilizada. La tabla III.5 puede servir de guía:

Diámetro del barreno grande	Diámetro barrenos pequeños	Piedra	Distancia entre centros
mm	mm	mm	mm
57	32	40	85
76	32	53	107
76	45	53	113
2 X 57	32	80	125
2 X 57	45	80	131
2 X 76	32	106	160
2 X 76	45	106	167

Tabla.III.5 Relación de distancia entre *pedra* de los barrenos y entre centros de los mismos.⁽¹⁸⁾

En el caso de roca fácilmente volable, puede ser preciso aumentar la distancia entre centros.

La experiencia permite asignar, para los barrenos del cuele más próximos al central las cargas siguientes (Tabla III.6):

Diámetro barrenos	Concentración de carga	Diámetro adecuado para el barreno grande
mm	kg/m	mm
32	0.25*	57 - 2 x 76
35	0.30*	76 - 2 x 76
38	0.36 ¹	76 - 2 x 76
45	0.45	2 x 76 - 125
48	0.55	2 x 76 - 125
51	0.55	2 x 76 - 125

Tabla III.6 Asignación de cargas para los barrenos⁽¹⁸⁾

¹ Normalmente puede usarse Nabit de de 22 mm, aunque corresponde a una carga de Dynamex de 0.38 kg/m.



Por otra parte, con el objeto de mantener la concentración de carga dentro de unos valores necesariamente bajos, pueden usarse separadores de madera entre los cartuchos.

Puede ser preciso ajustar las cargas en razón de las características de la roca. En el caso de una roca que se aglomere con facilidad, el cálculo preciso de la carga se hace especialmente necesario.⁽¹⁸⁾

III.5.1.5. MÉTODO DE LAS CUÑAS EN V.- Consisten en pares de barrenos inclinados hasta casi juntarse en el centro, con dos líneas paralelas de barrenos, y además paralelas a los ejes del pozo. La cuña se coloca usualmente al centro de la excavación y es por lo general la más profunda que el resto de los barrenos, con el propósito de proporcionar un hueco para coleccionar el agua después del disparo, permitiendo la perforación y la carga del explosivo en el siguiente disparo. En pozos de gran dimensión, algunos ingenieros colocan la cuña fuera del centro de la excavación cerca de una de las paredes. Esta práctica facilita el despeje de la rezaga en el lado opuesto cuando se utilizan los tiempos adecuados de retardo.

III.5.1.6. MÉTODO DE LA CUÑA DE PIRÁMIDE.- En su diseño se emplean círculos concéntricos de barrenos inclinados, de tal forma que en el fondo queden cercanos unos a otros, la cuña normalmente consiste de cinco a ocho barrenos debidamente espaciados con un ángulo de aproximadamente 30° y por lo general más profundos que el resto de los barrenos, con el objetivo de proporcionar un colector de agua para el siguiente ciclo de minado (fig. III.38). En algunas rocas masivas se agrega un par de barrenos guía al centro de la pirámide para ayudar a romper algunas rocas producidas por los barrenos iniciales en la cuña.

En estos tipos de cuñas, si los barrenos se llegan a cruzar, el avance que se obtiene es inferior al de diseño. Si los barrenos en el fondo están separados mas de 30 cm el avance será también inferior al de diseño.

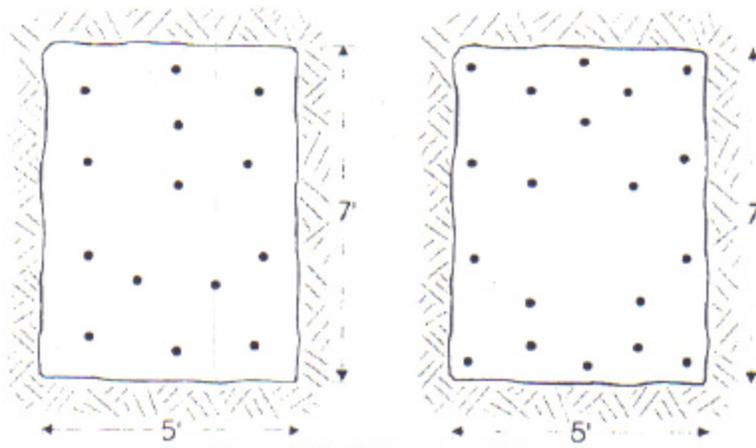


Fig. III.38 Cuñas piramidales⁽¹⁰⁾



El ángulo entre los barrenos de cuña deberá ser de 60° ó más, para minimizar la pérdida de barrenos. En algunas operaciones se provee a los perforistas de escantillones para asegurar la separación y ángulos entre los barrenos.

La sección de una cuña específica de ángulo está en función de la roca, el equipo de perforación utilizado, la filosofía de la Gerencia de la mina y de cada perforista.

Una conjunción entre la experiencia y una serie de operaciones prueba-error son normalmente comunes para determinar la mejor cuña de ángulo en determinada operación. En operaciones pequeñas con mucha frecuencia es imposible colocar los barrenos con el ángulo adecuado. En este caso se recomienda utilizar cuñas con barrenos paralelos.⁽¹⁷⁾

III.5.1.7. MÉTODO DE CUÑAS EN BARRENACIÓN PARALELA (SIMILAR A LA TÉCNICA SUECA)

Se utilizan principalmente en la apertura de túneles y pueden ser de diferentes tipos y tamaños, dependiendo del tipo de roca a romper. A este tipo de cuña se le puede denominar también cuña quemada y esta formada por barrenos en paralelo de igual o diferente diámetro, con la salvedad de que algunos barrenos de la cuña no se cargan porque servirán de alivio a la roca fragmentada para empujarla de la voladura. Para el funcionamiento de estas cuñas, es necesario un alineamiento y espaciamiento adecuado entre los barrenos, con el fin de obtener el avance diseñado para la voladura.

Las cuñas paralelas normalmente requieren de mayor número de barrenos que las cuñas en ángulo, debido a que los barrenos rompen un volumen de roca muy pequeño, por lo tanto el espaciamiento deberá ser mayor.

Sin embargo, este tipo de cuñas tiene la ventaja de que es muy fácil la perforación, ya que los barrenos son paralelos. Existen muchos tipos de cuñas quemadas con barrenación paralela que difieren principalmente por la localización, la cantidad y diámetro de los barrenos vacíos en una cuña. Generalmente el volumen de los espacios vacíos permite que con la profundidad del cuele pueda ser desplazado hacia fuera con éxito. Este avance está limitado a 91.44 cm por cada 2.54 cm de diámetro del barreno quemado.

Otro factor importante a considerar en la planeación de la distancia entre los barrenos vacíos y cargados, es el tipo de rompimiento y movimiento que puede ocurrir.

Pueden variar los resultados cuando un barreno cargado se coloca a una distancia de varias veces el diámetro de un barreno vacío. En general es mucho más fácil romper a plena profundidad una roca suave o porosa



que una roca sana quebradiza. Para obtener resultados satisfactorios, se deberán realizar voladuras que permitan un factor de abundamiento de por lo menos un 60%, preferiblemente 100%, tomando en consideración la distancia más grande que puede permitirse en los cálculos para cada barreno. Una secuencia adecuada de disparo para cada patrón de perforación en particular, tendrá que determinarse por el tipo de roca y la exactitud de la perforación que está siendo usada, la primera consideración es un buen diseño del patrón de retardos que puedan permitir suficiente tiempo y secuencia, sin el cual la roca pueda taponearse y congelarse en el lugar.

Para minimizar el congelamiento de las cuñas quemadas se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Utilizar barrenos vacíos adicionales o de mayor diámetro, para proporcionar áreas de vacíos adicionales en factores de abundamiento mayores de la roca.
- Dejar un taco razonable para evitar que el rompimiento de un barreno anterior pueda dañar a otro o provocar una iniciación prematura.
- Seleccionar un diámetro pequeño de explosivo para reducir la cantidad de estos por cada 30.48 cm.
- Cambiar el espaciamiento de los barrenos quemados de la cuña.
- Cambiar el patrón de retardos para permitir más tiempo entre los barrenos.

Las cuñas quemadas se clasifican en cuñas en línea y cuñas de caja, generalmente las primeras se usan en frentes pequeños donde se utilizan máquinas de pierna y las segundas son más comunes en frentes de mayor dimensión donde se utilizan jumbos.

En ocasiones, cuando una frente fue barrenada, cargada y retardada adecuadamente, pueden existir fallas debido a los cambios geológicos importantes del terreno. Cuando se utilizan algunos explosivos como las dinamitas, una onda de propagación puede ocurrir y detonar el explosivo del barreno adyacente, eliminando la secuencia de retardo y congelando la cuña, esto se puede minimizar con los siguientes pasos:

- Un cuidadoso alineamiento de los barrenos.
- Incrementar el espacio de vacío proporcionado por los barrenos quemados.
- Con un espaciamiento ligeramente más grande.
- Cuando se usan hidrogeles el movimiento de la roca puede provocar que en algunos barrenos aún no detonados, el explosivo dentro de ellos puede hacerse tan delgado que llega a su diámetro crítico y provoca que se haga insensible. También la onda de detonación de un barreno inicial puede producir un incremento en la densidad del explosivo y provocar la falla conocida como falla del producto por insensibilidad o falla por precompresión. Los barrenos guía son perforados



más cerca del barreno quemado que de los barrenos en una cuña normal y estos son disparados instantáneamente.

En la tabla III.7 se da un estimado de barrenos de 4.13 cm de diámetro, requerido con un correspondiente factor de potencia cuando se usan cartuchos de 3.17 cm de diámetro o anfo cargado neumáticamente para diferentes áreas en un frente, o cuando se utilizan las cuñas quemadas de caja en granito (un barreno de alivio de 7.62 cm).

Cuando se da una cuña quemada en línea con barrenos de diámetro pequeño, se requiere agregar de tres a cinco barrenos como los indicados en la tabla III.5.

AREA DE LA FRENTE m ²	No DE BARRENOS	FACTOR DE POTENCIA Kg/m ³
2.78	23	4.33
4.64	27	3.98
5.57	30	3.8
6.5	33	3.56
7.43	35	3.38
8.36	37	3.15
9.29	40	2.97
18.58	57	1.78
27.86	66	1.37
37.16	73	1.19

Tabla III.7 Guía de perforación y carga para frentes de diferente superficie.⁽¹⁰⁾

Selección de explosivos

En las operaciones de túneles o pozos (tiros), se requieren tiempos de ciclo cortos con un máximo de avance por cada disparo, por lo que la selección de explosivos es un factor muy importante. Como complemento a esto, los explosivos deben tener alto contenido de energía y ser productos de fácil manejo para una iniciación rápida y segura. Además, algo de vital importancia es el usar explosivos clase I, es decir, con características para ser utilizados en operaciones subterráneas, ya que el usar productos con altos contenidos de gases tóxicos es muy peligroso, además de estar prohibido su uso. De cualquier forma, todo el personal deberá esperar después de la voladura hasta que los frentes de disparo hayan sido ventilados ademadamente y los gases tóxicos hayan sido removidos, para poder regresar a los frentes de trabajo.

Cálculo de cargas explosivas y patrones de perforación.

A continuación ejemplificaremos el cálculo de plantilla de barrenación de una frente con las siguientes características:

Datos:

- Diámetro de perforación = 4.76 cm
- Sección de frente = 4.0 X 4.0 m
- Tipo de roca = Roca dura (granito)
- Densidad de la roca = 3.3 gr/cm³
- Profundidad de barreno = 3.0 m



Taco (por antecedente)	=	0.50 m
Factor de carga	=	1.0 kg/ton
Carga de fondo	=	emulsión 1" X 8" (0.120)
Carga de columna	=	Anfomex Subterráneo

1. Selección de la cuña.

Conociendo las características de la roca se selecciona la cuña. En este sistema se consideró utilizar una cuña de cinco de oros con un barreno de alivio al centro del 7.62 cm de diámetro.

2. Cálculo de la superficie de la frente.

Sección rectangular:

$$A = B \times H = 4.0 \times 2.0 = 8.0 \text{ m}^2$$

Sección circular:

$$A = r^2 = (2)^2 = 6.28 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie total} = 14.28 \text{ m}^2$$

3. Cálculo del volumen y tonelaje de roca a tumbar con explosivo.

$$v = 14.28 \text{ m}^2 \times 3.00 \text{ m} = 42.84 \text{ m}^3$$

$$T = 42.84 \text{ m}^3 \times 3.3 \text{ ton/m}^3 = 141.37 \text{ tons.}$$

4. Cálculo de la carga total de explosivo por barreno considerando un taco de 0.50 m

Emulsión 1" X 8" (Densidad específica = 1.20 gr/cm³). Se necesitan 2.148 kg de emulsión para llenar un metro de columna en un diámetro de 4.76 cm.

Por lo tanto:

$$2.149 \text{ kg.} - 1.0 \text{ m}$$

$$0.120 \text{ Kg.} - x = 0.558 \text{ m}$$

Anfo subterráneo (Densidad=0.85 gr/cm³) cargado neumáticamente.

Se necesitan 1.52 Kg de Anfo confinado para llenar un metro de columna en un diámetro de 4.76 cm.

Por lo tanto:

$$1.52 \text{ Kg.} - 1.0 \text{ m}$$

$$X - 2.44 \text{ m, } x = 3.715 \text{ kg.}$$

$$\text{Carga total / barreno} = \text{ANFO} + \text{EMULSIÓN}$$

$$\text{Carga total / barreno} = 3.715 + 1120 = 3.835 \text{ Kg.}$$

5. Cálculo de explosivo total utilizado en la frente considerada en este ejemplo:

$$\text{Kg de explosivo} = (\text{factor de carga}) (\text{Toneladas Tumbadas})$$

$$\text{Kg de explosivo} = (1.0 \text{ Kg./ton}) (141.37 \text{ ton})$$

$$\text{Kg de explosivo} = 141.37 \text{ Kg.}$$

6. Cálculo del número de barrenos necesarios en la frente:



$$\begin{aligned} \text{No. de barrenos} &= \frac{\text{Kg de explosivo / frente}}{\text{Kg de explosivo / barreno}} \\ \text{No. de barrenos} &= \frac{141.37 \text{ kg}}{3.835 \text{ kg}} = 36.86 \\ \text{No. de barrenos} &= 37 \end{aligned}$$

7. Se procede a ubicar proporcionalmente los 37 barrenos cargados (incluyendo los de cuña en la frente mencionada).
- Ubicar barrenos de cuña y ayudantes de cuña.
 - El resto de los barrenos se distribuyen en la superficie restante en forma proporcional.

En la tabla III.8 se muestran los espaciamientos típicos para diferentes cuñas quemadas

DIÁMETRO DE BARRENO mm	DIÁMETRO Y NÚMERO DE BARRENO DE ALIVIO mm	ESPACIAMIENTO TÍPICO ENTRE CENTROS DE BARRENOS mm
38	76 (x1)	125
38	76 (x1)	150
45	76 (x1)	125
45	76 (x1)	150
45	76 (x1)	200
45	100 (x1)	150
45	100 (x1)	200
51	76 (x1)	210
51	100 (x1)	230
51	125 (x1)	190
51	125 (x1)	280

Tabla III.8 Espaciamientos típicos para diferentes cuñas quemadas ⁽¹⁰⁾

Todos los tipos de roca se expanden al quebrarse y el factor de expansión se incrementa de acuerdo al grado de fragmentación. En algunas rocas, el factor de abundamiento o expansión de la roca quebrada puede ser suficiente para congelar la cuña, causando una pérdida completa del disparo. Para minimizar el riesgo de congelamiento de la cuña se requiere:

- Proveer de uno o más barrenos vacíos para permitir la expansión de la roca, incrementando el porcentaje de área vacía del 15% ó 20%.
- Asegurar que la columna de explosivo en cada barreno de la cuña tenga un taco de por lo menos 10 veces el diámetro de la carga.
- Reducir la energía por metro de barreno en la cuña, esto se puede hacer usando cartuchos de explosivo de menor densidad.
- Alinear cuidadosamente los barrenos de cuña, asegurándose que estos sean paralelos.
- Hacer cambios apropiados en el patrón de perforación y en el espaciamiento de los barrenos de cuña, ajustando los cambios de acuerdo a las condiciones del terreno.
- Ajustar apropiadamente los tiempos al diseño de la cuña con la orientación de los estratos.



- No detonar los barrenos de cada cuña en forma simultánea; la eyección de la roca fragmentada en la cuña toma un cierto período de tiempo y es conveniente no detonar otro barreno durante este, se recomienda un período mayor a 100 ms (milisegundos).

Secuencia y tiempo de disparo

En las cuñas quemadas, los primeros barrenos en detonar deberán estar por lo general muy cerca de los que están vacíos. La secuencia de detonación para el resto de estos en la cuña deberá asegurar que tengan un mínimo de bordo y un amplio ángulo de rompimiento para desarrollar una cara libre. La roca fragmentada por los dos primeros barrenos en la cuña es empujada hacia los que están sin carga, antes de ser proyectada hacia fuera de la cara. En longitudes mayores de 3 m el tiempo tomado, para que la roca sea eyectada completamente fuera de la cuña, es mayor de 100 ms. Por lo tanto los retardos entre detonaciones consecutivas deberán exceder los 100 ms.

Normalmente se utilizan tiempos de retardo de período largo (LP), el mayor tiempo entre intervalos de retardo proporciona el tiempo adecuado para que la roca sea eyectada del área de la cuña. Después los barrenos pueden ser iniciados en secuencia por tiempos consecutivos de retardo.

Donde las cargas son disparadas en números consecutivos de ms de retardo, no se lleva un progresivo alivio del bordo y hay un riesgo muy alto de congelamiento de la cuña. Donde se utilizan los retardos de ms en la cuña, se deberán disparar cargas consecutivas en cada cuarto o quinto número de retardo.

Cuando los retardos entre barrenos sucesivos se incrementan, se generan los siguientes beneficios:

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

Barrenos de producción

El bordo de los barrenos deberá permitir romper y empujar, no es posible compensar en barrenos con excesivo bordo con cargas adicionales de explosivos.

El espaciamiento de los barrenos de producción fuera del área de la cuña depende de muchos factores, se incluyen:

- El tipo de roca.
- Diámetro del barreno.
- La sección de la frente.
- Fragmentación requerida por el equipo de rezagado.

En todas las frentes el patrón de perforación está completamente afectado por el diámetro de perforación y el tipo de roca,. Se deberá desarrollar y seguir un patrón sistemático de perforación. En el cuele de



túneles no es muy común que se utilicen barrenos mayores a 45 mm; el diseño de bordos y espaciamentos aproximados son distintos para diferentes diámetros de perforación, en una roca de dureza media. Rocas más suaves o más duras requerirán menores o mayores bordos, respectivamente (Tabla III.9).

Cuando la longitud del cuele por disparo es muy grande, se deberá reducir el bordo para disminuir el volumen de roca que debe eyectarse por cada barreno disparado.

Bordo y espaciamentos típicos

DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (mm)	BORDO MÁXIMO (B) (m)	ESPACIAMIENTO MÁXIMO (S) (m)
32	0.60	0.75
38	0.75	0.80
45	0.90	1.00
51	1.00	1.10
57	1.00	1.20
64	1.20	1.30

Tabla III.9 Bordo y espaciamentos típicos⁽¹⁰⁾

Secuencia de iniciación

Diseño de patrones de retardo:

Con el sistema típico de encendido para frentes, cruceros y contrapozos se puede obtener el máximo avance, eliminando el riesgo de pérdida de barrenos.

Control de sobre rompimiento.

En rocas competentes pudiera no ser necesario el uso de técnicas especiales para obtener paredes y perfiles satisfactorios. Sin embargo, el espaciamento entre barrenos perimetrales y de alivio deberá ser reducido.

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

Las voladuras perimetrales tienen importantes ventajas para proporcionar paredes y perfiles que son firmes y bien cortados. Sobre todo cuando se utiliza un diseño adecuado de voladura para este fin.⁽¹⁰⁾



III.5.1.8. MÉTODO DE RECORTE.

El objetivo de este método es proteger la superficie de la roca remanente alrededor de la pega; se trata no solamente de obtener una superficie lisa, sino también de proteger la roca del agrietamiento, pues la eliminación de las fisuras lleva consigo muchas ventajas.

Se realiza mediante el empleo de un explosivo con una reducida concentración de carga por metro y otras características que se traducen en un efecto más suave. En las zonas de roca en las que se va a efectuar el recorte, el esquema de perforación es considerablemente más denso de lo normal.

El recorte es un método estandarizado para las voladuras en túneles y proporciona ventajas como:

- Mayor resistencia de la roca circundante.
- Menor necesidad de refuerzo.
- Zona agrietada más reducida alrededor del contorno final.
- Menor necesidad de concreto para inyecciones.
- Menor sobre excavación.
- Trabajo de saneo más fácil.

En el caso de roca de baja resistencia, sobre todo, el recorte tiene una gran importancia de cara al resultado final, y ejerce una influencia favorable en el aspecto económico de la voladura.

En los trabajos en túneles, es preciso prestar una especial atención a que la alineación y emboquille de los barrenos del contorno final se haga con la máxima precisión. Con el objeto de evitar que la sección del túnel vaya haciéndose progresivamente menor con los sucesivos avances, es preciso dar un margen para emboquille a los barrenos del contorno final; ello implica una irregularidad del contorno de roca, y debe ser de una cuantía lo más pequeña posible. El mínimo margen para emboquille depende de las necesidades de espacio del equipo de perforación utilizado. En la práctica, un nivel de precisión aceptable puede ser el mínimo margen de emboquille +3 cm/m de barreno. La concentración de carga en los barrenos del contorno debe ser la más pequeña posible.

Una vez situados los barrenos en la pega, se incluye el margen para emboquille en la prolongación de los barrenos de recorte.

El esquema de encendido debe proyectarse de tal forma que los barrenos de recorte tengan rotura libre en el momento de su detonación.

En el ejemplo de la figura III.39 se muestra el esquema de un recorte con $V_1 = 0.80$ m y un margen para emboquille de 20 cm.

El empleo de unas cargas potentes en los barrenos de franqueo inmediatos a las zonas de recorte puede ejercer una influencia desfavorable sobre el resultado de dicho recorte. En el caso de roca de mala calidad puede ser especialmente recomendable reajustar la perforación y carga de estos barrenos de franqueo de modo que pueda obtenerse otra hilera de recorte, pero con una carga más potente.



En túneles de gran sección, estos barrenos no se encuentran generalmente en condiciones de una construcción tan grande, por lo que no son tan difíciles de volar.

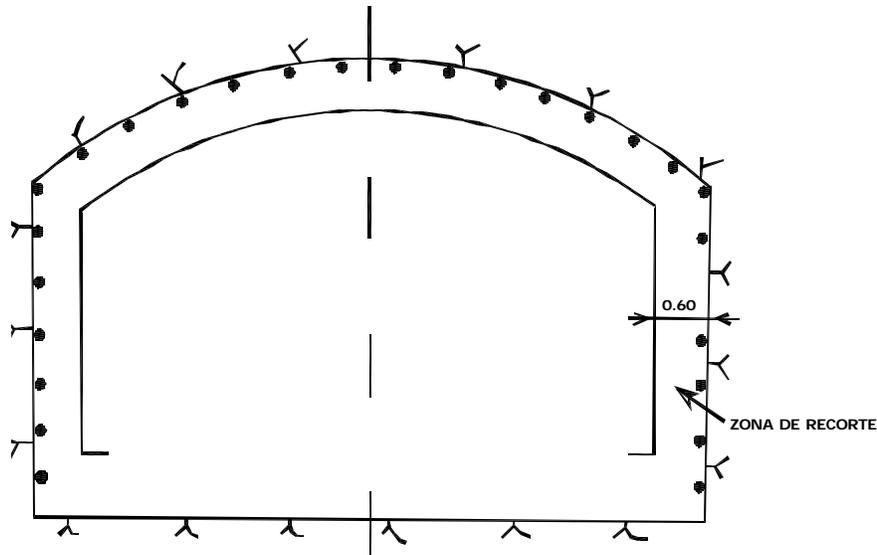


Fig. III.39 Esquema de perforación en el método de recorte. ⁽¹⁸⁾

La penetración del agua a los túneles, con la consiguiente necesidad de inyecciones, se ha convertido en uno de los problemas más importantes en las voladuras en túneles bajo zonas edificadas. Es por eso que debe prestar atención a la necesidad de una voladura más controlada en los barrenos del piso; como estos barrenos llevan normalmente cargas mayores que el resto de la pega, ello se ha traducido en agrietamientos que conllevan la penetración al túnel de agua procedente de las capas inferiores. El subsiguiente y necesario trabajo de impermeabilización ha sido de más difícil ejecución que en el techo y los hastiales. Así pues, siempre que se desee reducir lo más posible la entrada de agua al túnel, los barrenos del piso deberán perforarse y cargarse de forma controlada.

El plan de encendido se proyecta de tal modo que los barrenos del piso tengan pronta rotura libre, disminuyendo así la carga necesaria para levantar la roca desprendida que hay sobre ellos. El empleo de cargas rígidas (cargas alargadas) disminuye el riesgo de un innecesario exceso de carga. Debe hacerse notar que el control de la voladura se consigue en este caso disminuyendo la carga concentrada en el fondo y la concentración de carga en la columna. La carga específica, por otro lado, muestra la tendencia a aumentar. El espaciamiento denso contribuye también a regular la formación de gritas en la dirección deseada.

El encendido no puede hacerse normalmente con micro retardos, aunque es posible aplicarlo en los casos en que el recorte vaya a hacerse por separado después del resto de la pega, alcanzándose entonces unos mejores resultados; sin embargo, tal procedimiento es dificultoso desde el punto de vista técnico. No obstante, en roca de mala calidad, pueden existir motivos suficientes para proceder así.

Puede lograrse un resultado aproximadamente igual si se perforan los barrenos de recorte de modo que la zona de recorte quede 0.5 m detrás



del resto de la pega; los fondos de los barrenos poseen entonces rotura libre, lo que disminuye el grado de confinamiento y mejora los resultados.

El precorte no ha sido utilizado tan ampliamente en las voladuras en túneles ya que el método puede ser factible, pero se precisa un mayor desarrollo del mismo.

Unas cargas excesivamente concentradas en los cueles o en los barrenos de una pega no resultan demasiado convenientes desde el punto de vista de la ingeniería. Puede ser recomendable rebajar el nivel técnico para obtener unos métodos de operar más racionales pero con un resultado final que, en conjunto, sea más deficiente.⁽¹⁸⁾

En estas voladuras, el sobre rompimiento o afectación de la roca son minimizados por:

- Reducción de la energía del explosivo por metro en los barrenos perimetrales.
- Reducción del espaciamiento entre barrenos perimetrales, usualmente $\frac{3}{4}$ del espaciamiento normal.
- Asegurar que el desplazamiento de los barrenos de perímetro sea de 0.6 a 0.75 veces el bordo.
- Disparar los barrenos perimetrales en el último retardo, una vez que el resto de los barrenos haya creado una cara libre efectiva.
- Cargar los barrenos de pared con cargas desacopladas o con productos de menor energía.⁽¹⁰⁾

III.5.1.9. MÉTODO DE PRECORTE

El objetivo de este método es conseguir las mismas ventajas que con el de recorte, pero, a diferencia de éste, en el precorte se hacen detonar primero los barrenos del contorno, antes de encender la pega propiamente dicha. El precorte produce una grieta entre los barrenos de contorno; en la subsiguiente voladura en banco, la roca se desprende a lo largo de esta grieta. Como los barrenos están muy próximos entre sí, las grietas se forman siguiendo las hileras de barrenos, y los mismos barrenos constituyen el inicio del agrietamiento. Esto significa que la inclusión de barrenos vacíos entre los cargados, puede hacer mejorar los resultados cuando sea preciso (Fig. III.40).

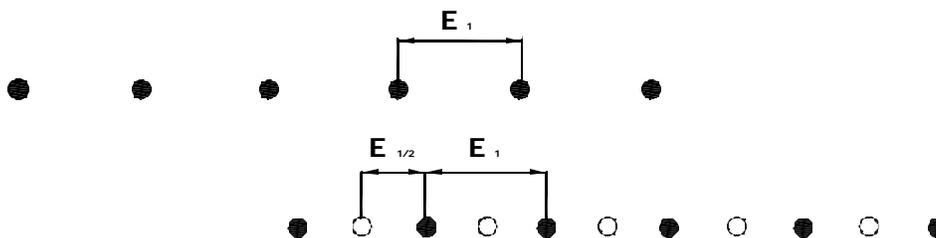


Fig. III.40. Esquema de inclusión de barrenos vacíos entre los cargados

Es extremadamente importante en el precorte emplear los espaciamientos y cargas correctas para el tipo de roca de que se trate. Las



características de la roca tienen una mayor influencia sobre los resultados que en la mayoría de los demás métodos de voladura.

La orientación de los estratos puede implicar que la roca se fracture fácilmente según la estratificación, pero perpendicularmente a esta dirección, los barrenos habrán de estar considerablemente más juntos para la misma carga. A pesar de la homogeneidad de la roca, el material puede comportarse de modo completamente diferente cuando ha de figurarse en distintas direcciones. En un precorte puede apreciarse que, en los barrenos más exteriores, las grietas se desvían de la dirección señalada por los barrenos para seguir la dirección natural de fisuras de la roca; si se perforan los barrenos lo suficientemente próximos entre sí, esta tendencia puede ser contrarrestada y forzar la formación de grietas según las líneas de barrenos.

Los barrenos se cargan aproximadamente hasta un 75% de su profundidad total. En roca muy fisurada, puede reducirse la carga hasta el 55%. Si en el curso de la perforación se descubre una diaclasa claramente marcada, puede resultar ventajoso alojar la carga más allá de la diaclasa.

El único material de retacado empleado consiste en los tapones para evitar el lanzamiento al exterior de las cargas del explosivo, dispositivos que pueden ser necesarios en el caso de iniciación con microrretardos.

La precisión de la perforación es de gran importancia para el resultado del precorte. El encendido puede tener también una gran influencia.

Si no hay impedimentos que no permitan vibraciones del terreno, se utiliza el encendido instantáneo. Los ensayos realizados con cordón detonante han demostrado un aumento del efecto de precorte de las cargas, lo que ha hecho posible el uso de espaciamientos más grandes.

Si ha de tenerse cuidado con las vibraciones del terreno, se hace preciso el encendido con microrretardos. La formación de grietas es algo más deficiente que en el caso de iniciación instantánea, a menos que se reduzca el espaciamiento de los barrenos. Si se usan detonadores de microrretardo, deben ser de un tipo que tenga tiempos de retardo y de ignición mínimos; si el tiempo de restardo es excesivamente grande, no se consigue ningún precorte.

La iniciación con microrretardos puede hacerse de diversas formas. Con base a la carga admitida para el caso de detonación instantánea, se elegirá un margen de números de retardo tal que la carga por retardo no sea demasiado grande (Fig.III.4 1).



Fig. III.41 Ejemplo de un diagrama de iniciación con microrretardos (en milisegundos).

También puede hacerse la subdivisión de la carga total mediante una combinación de encendido con microrretardos y con cordón detonante (Fig. III.42). Se conectan entre sí los barrenos con cordón detonante formando varios grupos, los cuales son iniciados mediante detonadores de microrretardo con números sucesivos. La carga por grupo ha de adaptarse



a las variaciones del terreno permisibles, pues detona instantáneamente. Mediante el uso de cargas instantáneas distribuidas en grupos y gracias a la acción del cordón detonante, este procedimiento da generalmente buenos resultados. Las cargas son iniciadas en este caso desde arriba.

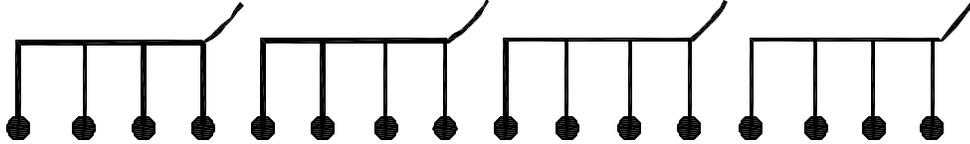


Fig. III.42 Combinación de encendido con microrretardos y con cordón detonante.

El explosivo se conecta al cordón detonante en toda su longitud, para asegurar un buen encendido. En el caso de iniciación eléctrica instantánea, los detonadores se sitúan generalmente en el fondo del barreno. En el precorte se utiliza una cierta carga de fondo que influye también sobre los resultados obtenidos.

Antes de hacer las perforaciones de precorte para una longitud grande, puede ser conveniente realizar una voladura de muestra a lo largo de una distancia más corta y normalmente es posible examinar el resultado del precorte después de la voladura. Al evaluar el resultado de la carga de prueba, recuérdese que la fisura es más marcada cuando la voladura abarca una longitud grande que en el caso de una distancia más corta. Esto significa que la voladura de muestra debe cubrir una longitud de unos 5 metros; si el agrietamiento resulta demasiado pobre, normalmente queda la posibilidad de cargar de nuevo los barrenos. ⁽¹⁸⁾

En precortes, los barrenos perimetrales son disparados en forma simultánea, antes que el resto de los barrenos de la voladura, debido a que los barrenos de producción deben estar muy cerca de la línea de precorte (de 0.25 a 0.50 m), la detonación de las cargas de precorte puede dislocar las cargas explosivas adyacentes. Esto incrementa la posibilidad de encontrar cargas no detonadas en la rezaga. Por tal razón el precorte de perímetros con frecuencia necesita ser llevado como una operación por separado. Si lo comparamos con las voladuras perimetrales, las de precorte tienen las siguientes desventajas:

- El máximo y práctico espaciamiento para las voladuras de precorte es menor que para las perimetrales.
- Las cargas de precorte crean una fractura entre barrenos, pero no contribuyen significativamente al rompimiento de la roca, sin el diseño del perímetro.
- Para un peso de carga dado, por número de retardo, las voladuras de precorte producen altos niveles de vibración.
- El precorte es efectivo solamente en rocas muy competentes.

Por esta razón, las voladuras perimetrales son por lo general preferidas a las de precorte; sin embargo, el precorte se utiliza ocasionalmente para crear perfiles lisos para portales de túneles y en las paredes de grandes cámaras subterráneas.



Exactitud de la perforación.

La exactitud de la perforación es crucial para un efectivo control del perímetro. Una perforación inexacta puede causar sobre rompimiento por:

- Barrenos perimetrales yendo más allá del perfil del túnel.
- Resultan irregularidades en la frente de las voladuras previas.
- La desviación de la perforación como resultado de la inclinación de los estratos.
- Técnicas de perforación o
- Una excesiva longitud de los barrenos.

Explosivos.

Para llevar a cabo los efectos requeridos, es necesario cargar los barrenos perimetrales a lo largo de las paredes con un explosivo de relativa baja energía por metro.

En la tabla III.8 se pueden ver las cargas de explosivo recomendadas, para diferentes diámetros de perforación y en la tabla III.9 se muestran los bordos y espaciamientos recomendados para los diferentes sistemas de control de sobre rompimiento.

Taco.

Usualmente es necesario el taqueo de los barrenos perimetrales con materia inerte. Esto mejora la eficiencia y distribuye mejor la energía dentro del barreno. Si no se coloca el taco, las cargas pueden ser expulsadas del barreno. Cuando se usan cargas desacopladas y estas están muy cerca de la boca del barreno, el rompimiento de la misma puede afectar parte de la carga de otro barreno o iniciarla antes de tiempo.

Iniciación.

Es usual utilizar un “primer” en el fondo de los barrenos de perímetro para permitir el rompimiento adecuado. Los barrenos perimetrales deben ser disparados en el mismo tiempo de retardo para obtener resultados óptimos.⁽¹⁰⁾



CAPÍTULO IV:

NORMATIVIDAD Y LEGISLACIÓN DEL USO DE EXPLOSIVOS



Objetivo: En este capítulo se explicará el procedimiento para la obtención del permiso para el uso y almacenaje de explosivos.

IV. 1 REGLAMENTO PARA EL USO Y MANEJO DE EXPLOSIVOS

LEY FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS.

La Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos (Ley) fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1972. Sus disposiciones se consideran de interés público.

La aplicación de la Ley corresponde a:

- a) El Presidente de la República;
- b) La Secretaría de Gobernación;
- c) La Secretaría de la Defensa Nacional y
- d) A las demás Autoridades Federales en los casos de su competencia.

La Ley consigna que las autoridades de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios tendrán la intervención que la Ley y su Reglamento señalen.

El control y vigilancia de las actividades y operaciones industriales y comerciales que se realicen con explosivos, artificios y sustancias químicas, será hecho por la Secretaría de la Defensa Nacional.

Por lo que se refiere a los explosivos, la Ley establece tres tipos de permisos:

- a) Generales;
- b) Ordinarios; y
- c) Extraordinarios.

Los tres tipos de permisos son de naturaleza intransferible. La Secretaría de la Defensa Nacional tiene la facultad discrecional de negar, suspender o cancelar los permisos mencionados, cuando a su juicio las actividades amparadas puedan causar peligro a las personas, a las instalaciones o alterar la tranquilidad de la población.

Los Permisos Generales se concederán a personas que se dediquen de manera permanente a las actividades reguladas por la Ley, tendrán vigencia durante el año en que se expidan y podrán ser revalidados a juicio de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Los Permisos Ordinarios se otorgarán en cada caso para realizar operaciones mercantiles con personas que tengan permiso general vigente o con comerciantes de otros países.

Los Permisos Extraordinarios se otorgarán a personas que eventualmente se dediquen a alguna de las actividades reguladas por la Ley.



Las sociedades que pretendan dedicarse a la fabricación y comercialización de explosivos, podrán permitir en su capital una participación de hasta el 49% de inversión extranjera, en los términos que establece la Ley de Inversión Extranjera.

Este porcentaje de inversión extranjera no incluye a las sociedades que adquieran y utilicen explosivos para actividades industriales y extractivas.

La Secretaría de la Defensa Nacional, tiene la facultad de practicar visitas de inspección a las negociaciones que se dediquen a las actividades reguladas por la Ley y a solicitar los informes necesarios respecto de estas actividades.

Las negociaciones tienen la obligación de prestar todas las facilidades a las autoridades militares para la práctica de las visitas de inspección.

La Ley considera como sanciones la fabricación, almacenamiento, transporte, comercialización, entre otros, sin el permiso correspondiente.

PERMISOS DE EXPLOSIVOS

Información general:

Si se requiere el uso de explosivos para romper roca en cualquier obra, será necesario la obtención del permiso correspondiente de acuerdo a los requerimientos de la Dirección de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Detalle del procedimiento:

Polvorines.

El constructor que requiera el uso de productos explosivos por necesidad de su operación, deberá construir polvorines que reúnan las características solicitadas por la Secretaría de la Defensa Nacional a través de la Dirección de Armas de Fuego y Explosivos, siendo éstas las siguientes:

Lugar.

Los polvorines deberán ser colocados de acuerdo a la tabla de Seguridad de Distancia-Cantidad que viene en el reglamento de Armas de Fuego y Explosivos de los Secretaría de la Defensa Nacional, la cual se puede observar en la tabla IV.1.



DESCRIPCION DEL MATERIAL	DISTANCIAS EN METROS PARA POLVORINES CON PROTECCIÓN						
	Kilogramos		Edificios	Vías	Caminos	Líneas de Alta	Entre
	DE	A	Habitados	Férreas	Carreteros	Tensión	Polvorines
	0	500	126	100	100	100	11
	500	750	146	100	100	100	13
	750	1,000	160	100	100	100	14
1.- Altos Explosivos, Agentes	1,000	1,250	170	100	100	100	15
Explosivos, Pólvora Negra.	1,250	1,500	180	100	100	100	17
	1,500	2,000	200	100	100	100	18
	2,000	3,000	230	100	100	100	20
	3,000	4,000	250	100	100	100	23
	4,000	5,000	260	100	100	100	25
	5,000	6,000	270	117	100	100	26
	6,000	7,000	275	122	100	100	27
2.- Artificios (Capsúl ó, iniciadores	7,000	8,000	285	127	100	100	28
Eléctricos y No eléctricos,	8,000	9,000	295	132	100	100	30
conectores, Cordones							
Encendedores	9,000	10,000	305	137	100	100	31
, etc)	10,000	12,000	330	146	100	100	33
	12,000	14,000	350	154	105	103	35
	14,000	16,000	370	160	110	105	36
	16,000	18,000	390	168	116	112	38
Por lo que respecta a Artificios	18,000	20,000	405	173	121	118	39
únicamente se autoriza el	20,000	25,000	445	185	135	130	43
almacenamiento en cada polvorín	25,000	30,000	480	200	145	140	46
del equivalente a 4 ton.	30,000	35,000	510	208	155	150	49
	35,000	40,000	535	218	160	155	53
	40,000	45,000	550	226	166	162	56
	45,000	50,000	565	240	169	166	63
	50,000	60,000	575	250	171	168	66
	60,000	70,000	585	262	175	172	73
	70,000	80,000	605	274	182	178	80
	80,000	90,000	620	284	186	183	86
	90,000	100,000	635	294	191	188	93
	100,000	125,000	675	378	210	208	117

Tabla IV.1 Distancia-Cantidad tomada de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.⁽¹⁰⁾



Capacidad.

La capacidad de los polvorines deberá estar en función de las necesidades del usuario y a la autorización de la Secretaría de la Defensa Nacional.

En este caso se recomienda que la capacidad deba ser calculada de acuerdo a los consumos diarios de explosivos, al tiempo que se requiera para la obtención de los permisos para compra. Se debe tomar en cuenta la ubicación de la Zona Militar a cuya jurisdicción corresponda la obra.

Otro concepto que se debe tomar en cuenta es la ubicación de los proveedores y el tiempo de entrega de los productos una vez que se cuente con el permiso para compra de los mismos.

Todo lo antes mencionado es con el propósito de que el usuario tenga en sus polvorines la cantidad de inventarios que le permitan mantenerse en operación evitando paros por falta de productos explosivos. Estos inventarios pueden ser para la operación de una semana, dos semanas o en algunos casos para un mes normal de operación.

Almacenamiento.

Antes de iniciar el almacenamiento de explosivos en un polvorín, se debe obtener el permiso correspondiente de parte de la Secretaría de la Defensa Nacional.

El almacenamiento de productos explosivos deberá ser de acuerdo a la tabla de compatibilidad para materiales empacados o envasados que viene en el Manual de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional la cual se puede ver en la tabla IV.2.

Ejemplo

Agente explosivo = Alto explosivo (godyne, emulsión, etc.)
(anfós)
Estopín eléctrico = Fulminantes
Mecha Clover = Cordones detonantes

Construcción

Es recomendable hacer la construcción de los polvorines de la siguiente manera:

Cimentación: De mam postería (piedra braza)

Muros: Tabicón cemento-arena o tabique, reforzado con castillos a cada tres metros de distancia, de 15 x 15 cm de concreto armado.

Puertas: Deberán ser de madera de 10.16 cm (4") de grueso con bastidor de metal (tanto en la base del soporte como en todo el perímetro de la puerta). En el Anexo 1 se ve el detalle de una puerta.



LA "X" INDICA QUE EL MATERIAL DE LA LINEA HORIZONTAL PUEDE ALMACENARSE CON EL ARTICULO DE LA COLUMNA VERTICAL	Pólvora	Ácido picrico	Dinitrotolueno	Nitroalmidones	Nitroglicerina	Nitrocelulosa	Nitroguanidina	Tetritl	Pulminato de mercurio	Nitruros de plomo, plata y cobre	Estifanato de plomo	Cloratos, percloratos y peróxidos	Sodio metálico	Magnesio en polvo	Aluminio en polvo negro u opaco	Fósforo	P.E.T.N.	T.N.T.	Dinamita y amatoles	Nitrocarbonitratos húmedos	Nitrocarbonitratos secos	Nitrocarbonitratos ácidos	Fosgeno	Ciclonita (rdx)	Iniciadores de alta presión detonantes	Detonantes (estopines, cápsulas)	Mechas de seguridad	Cordones detonantes	Cordones encendedores de mecha	Conectores detonantes	Conectores encendedores	Artifícios pirotécnicos	Cargas industriales			
Pólvora	X																																			
Ácido picrico		X																																		
Dinitrotolueno			X																																	
Nitroalmidones				X																																
Nitroglicerina					X																															
Nitrocelulosa						X																														
Nitroguanidina							X																													
Tetritl								X																												
Pulminato de mercurio									X																											
Nitruros de plomo, plata y cobre										X																										
Estifanato de plomo											X																									
Cloratos, percloratos y peróxidos												X																								
Sodio metálico													X																							
Magnesio en polvo														X																						
Aluminio en polvo negro u opaco															X																					
Fósforo																X																				
P.E.T.N.																	X			X	X	X			XX		XX									
T.N.T.																		X		X	X	X			XX		XX									
Dinamita y amatoles																		X		X	X	X			XX		XX									
Nitrocarbonitratos húmedos																	X		X	X	X			XX		XX										
Nitrocarbonitratos secos																	X		X	X	X			XX		XX										
Nitrocarbonitratos ácidos																						X														
Fosgeno																								X												
Ciclonita (rdx)																	X							XX		XX		XX								
Iniciadores de alta presión detonantes																	X		X	X	X			XX		XX		XX								
Detonantes (estopines, cápsulas)																									XX		X				XX	XX				
Mechas de seguridad																	X		X	X	X			XX		XX		XX	XX	XX	XX					
Cordones detonantes																	X		X	X	X			XX		XX		XX								
Cordones encendedores de mecha																									XX		XX		XX	XX	XX					
Conectores detonantes																										XX		X								
Conectores encendedores																											X				XX	XX				
Artifícios pirotécnicos																																				X
Cargas industriales																																				X

Tabla IV.2 Compatibilidad de materiales empacados o envasados⁽¹⁰⁾

Techo

Altura máxima de 4 m, altura mínima a las orillas de 2,70 m, dejando respiradero entre la pared y el techo de 20 cm, el cual deberá ser protegido con algún tipo de malla metálica, para evitar que animales pequeños se introduzcan al polvorín. El material utilizado deberá ser de lámina de asbesto.

La parte más baja entre el techo y el piso deberá ser de 2,7 m de altura como se muestra en el Anexo 2. Los polvorines podrán tener un techo a una o dos aguas.

Farallón

El polvorín deberá estar rodeado por la corteza de algún cerro o en su defecto deberá contar con un farallón de tres metros de altura y 15 m de largo hasta terminar a flor de tierra y teniendo entre el frente del polvorín al farallón cinco o seis metros como mínimo.



Características que deben reunir los polvorines

En general deberán cumplir con las especificaciones complementarias que se muestran en el Anexo 2.

En el caso de la construcción de polvorines se sugiere hacer el diseño de acuerdo a las necesidades de su operación, asesorándose con personal experimentado en este campo.

Una vez que se cuenta con los polvorines, contruidos de acuerdo a las tablas de distancias de seguridad de la Secretaría de la Defensa Nacional, es necesario conseguir las autorizaciones por parte de las autoridades correspondientes como son:

1. Certificado del lugar de consumo expedido por la primera autoridad administrativa, Presidente Municipal o Delegado Político en el Distrito Federal.
2. Opinión favorable del Gobernador del Estado o del Jefe del Departamento del Distrito Federal firmada por el titular. Esta opinión se debe solicitar por escrito acompañada por el certificado del lugar de consumo expedido por la primera autoridad administrativa (Punto 1).
3. Cuando se cuente con las autorizaciones antes mencionadas, los documentos originales se deben adjuntar a la siguiente documentación que deberá ser presentada en los módulos correspondientes en el edificio de la Secretaría de la Defensa Nacional, en Lomas de Sotelo, D.F.:
 - Solicitud, modelo anexo que se proporciona gratuitamente.
 - Referencias del lugar de consumo.
 - Para personas físicas, copia certificada del Registro Civil del Acta de Nacimiento del solicitante.
 - Para personas morales, Acta Constitutiva de la empresa.

Plano de conjunto a 1 000 metros alrededor del lugar de consumo y a escala de 1:4000, en la que figuran en su caso; instalaciones militares, vías de comunicación, líneas eléctricas, telefónicas, telegráficas, acueductos, gasoductos, construcciones para casa-habitación, obras de arte, zonas arqueológicas, históricas o instalaciones industriales, que pudieran ser afectadas, con los principales accidentes topográficos.

Plano circunstanciado a escala adecuada para la localización de sus instalaciones con especificaciones. Si la solicitud incluye almacenamiento.

Certificado de seguridad y referencia de los polvorines.

Se recomienda adquirir el Manual de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional.



IV. 2 MANEJO Y USO DE EXPLOSIVOS

Transporte de materiales explosivos

La transportación de explosivos en México está regulada por la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); a nivel mundial un comité de expertos es el que se encarga de normatizar las regulaciones, estandarizando la clasificación, el etiquetado, la colocación de carteles y la descripción de documentos. La organización intergubernamental de consulta marítima (IMCO) cubre la transportación en mar para el sistema de las Naciones Unidas en el código de productos peligrosos. Los vehículos de motor son los más comúnmente utilizados para el transporte de explosivos, aun cuando embarques por barco o avión se utilizan en algunas ocasiones. Todo embarque de explosivos debe efectuarse en un vehículo que tenga las siguientes características:

- ✓ Mantenimiento óptimo
- ✓ Piso firme que no produzca chispas
- ✓ Todas las partes en contacto con el explosivo deberán ser recubiertas con material antichispa.
- ✓ Deben mostrar cartelones y señalización de acuerdo al reglamento.
- ✓ Estar equipado con dos o más extinguidores.
- ✓ Permiso de SEDENA Y SCT

Antes de transportar materiales explosivos, el vehículo debe inspeccionarse cuidadosamente, con objeto de asegurar que funcione correctamente y debe presentar todas las características antes descritas. Algunas de las medidas principales que se deben adoptar durante el transporte en vehículo de motor son las siguientes:

- ✓ No permitir fumar dentro o alrededor del vehículo.
- ✓ No abastecerse de combustible con el vehículo cargado dentro de la ruta.
- ✓ No llevar metales o herramientas que produzcan chispas tales como cerillos, armas de fuego, substancias inflamables, ácidos o materiales oxidantes.
- ✓ Apegarse a las medidas de compatibilidad de los explosivos.
- ✓ Excepto en emergencias, ningún vehículo cargado deberá estacionarse en calles públicas adyacentes o cercanas a un puente, túnel, vivienda o lugar donde se reúna la gente.
- ✓ Deberá evitar la circulación por zonas congestionadas.

Para el transporte interno de la obra, ya sea de construcción o minera, se deberá apegar a los lineamientos anteriormente descritos, ya que es frecuente observar que el personal encargado de esta actividad los omite o no cuenta con los recursos materiales necesarios para realizar un trabajo seguro. En la Tabla IV.3 se muestra la compatibilidad para el transporte de los materiales explosivos.



	tovex	super mexamon *d	mexamon*	iniciador de alta presión	fulminantes regulares	estopines eléctricos	detonadores o iniciadores no eléctricos	mecha de seguridad	cordón detonante	ignitacord (cordón encendedor)	conectores ignitacord	conector p/cordon detonantes
tovex	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.
super mexamon *d	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.
mexamon*	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.
iniciador de alta presión	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.
fulminantes regulares	.	.	.	.	X	X	X	.	.	X	X	X
estopines no eléctricos	.	.	.	.	X	X	X	.	.	X	X	X
detonadores o iniciadores no eléctricos	.	.	.	.	X	X	X	.	.	X	X	X
mecha de seguridad	X	X	X	X	.	.	X	X	X	X	X	X
cordón detonante	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.
ignitacord (cordón encendedor)	.	.	.	.	X	X	X	X	.	.	.	.
conectores ignitacord	.	.	.	.	X	X	X	X	.	.	.	.
conector p/cordon detonantes	.	.	.	.	X	X	X	X	.	.	.	.

Tabla IV.3 Compatibilidad para el transporte de los materiales explosivos.⁽¹⁰⁾

Almacenamiento de explosivos

Las condiciones de almacenamiento de los explosivos tienen una relación con la seguridad en su uso mucho más profunda de lo que se piensa. Un almacenamiento inadecuado de los explosivos, de las mechas y de los demás artificios puede conducir a fallas tales como barrenos sin detonar y a explosivos en la rezaga. El manejo de barrenos quedados y la existencia de barrenos sin detectar, constituyen dos de las fuentes principales de accidentes con los explosivos. Por lo tanto, las medidas que se tomen para evitar barrenos quedados son fundamentales para la seguridad del trabajador.

Una ventilación inadecuada en los polvorines puede conducir, de modo indirecto, a accidentes, a menos que el aire circule libremente por todo el polvorín. Las variaciones extremas de temperatura pueden generar una rápida descomposición y deterioro de los explosivos y accesorios.

Para controlar un poco los factores ambientales es recomendable proporcionar la ventilación adecuada y pintar el exterior con colores blanco o gris y el techo con material reflejante.



Tipos de polvorines :

Tipo 1.- Es un edificio permanente para materiales sensibles al disparo de una bala, que pueden detonar en masa. Es a prueba de balas y robo. Además es resistente a las condiciones climatológicas.

Tipo 2.- Es un polvorín portátil o móvil usado interior o exteriormente para almacenar materiales explosivos sensibles al disparo de una bala, que puedan detonar en masa. Está construido de la misma forma que el tipo 1, con la excepción de que el polvorín interno no requiere ser resistente a balas.

Tipo 3.- Es un polvorín portátil para almacenar explosivos que estén siendo manejados, tales como las cajas de carga a los sitios de voladura. Es a prueba de balas, resistente al fuego, al robo y a las condiciones climatológicas.

Tipo 4.- Es un polvorín portátil, móvil o permanente para almacenar materiales no sensibles al impacto de bala y que no detonarán en forma masiva. Es resistente al fuego, al robo y a las condiciones climatológicas.

Tipo 5.- Es un polvorín permanente, portátil o móvil, y sirve para almacenar materiales explosivos que no son sensibles al disparo de una bala, es a prueba de robo y resistente a las condiciones climatológicas. Este tipo puede ser un edificio, un tanque, trailers, camiones o tolvas utilizadas para almacenar altos explosivos y agentes explosivos.

Localización de un polvorín:

Al seleccionar la localización de un polvorín se debe considerar la seguridad pública, la del acceso al sitio de trabajo o de las áreas donde va a utilizarse el explosivo.

La tabla IV. 1 de distancia-cantidad contenida en la ley federal de armas de fuego y explosivos, especifica las distancias mínimas de acuerdo a los volúmenes de almacenamiento con respecto a diferentes estructuras como son: edificios habitados, carreteras, vías de ferrocarril, polvorines, líneas eléctricas, etc.

La capacidad total de explosivos que pudiera resguardarse en cada uno de los polvorines, se determina de acuerdo a sus dimensiones interiores y exteriores. A estas últimas deben descontarse los pasillos de tránsito y las capacidades se indican en kilogramos.

Los productos del mismo tipo y clase deberán almacenarse juntos, de tal manera que sea fácil identificarlos. Esto simplificará el conteo y la revisión de la antigüedad de los productos que se tengan almacenados.

Si requiere iluminación artificial, utilice exclusivamente una linterna de seguridad. Nunca deberá entrar en el polvorín con cerillos, encendedores o cualquier otra fuente de ignición. El interior del polvorín deberá mantenerse limpio, así como el área que lo rodea, la cual deberá estar libre de hojas, pasto, maleza seca, basura o cualquier tipo de desperdicio, esto para prevenir incendios.

Se debe dar un mantenimiento regular a los polvorines, con el fin de evitar goteras y daños en las paredes o muros. Se debe mantener el color de las paredes y puertas. Nunca se deberá permitir a personas no autorizadas el



acceso o cercanía al polvorín. La puerta del polvorín deberá permanecer siempre cerrada, excepto cuando se realicen movimientos de materiales.

Deben tenerse muy en cuenta los materiales que se almacenan en cada uno de los polvorines, ya que una omisión en el cuidado puede ocasionar un accidente.

En el polvorín de explosivos sólo se almacenarán altos explosivos, agentes explosivos y cordones detonantes (estas indicaciones vienen especificadas en el permiso general que extiende la Secretaría de la Defensa Nacional, así como en la tabla de compatibilidad contenida en la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos).

En el polvorín de artificios deben almacenarse únicamente accesorios de voladuras tales como: fulminantes, estopines eléctricos, mechas de seguridad y demás accesorios de iniciación. No deberán almacenarse herramientas o implementos metálicos que pudieran producir chispas. Los polvorines de accesorios son de mínimas dimensiones.

A continuación se describirá una serie de condiciones de seguridad conocidas como «siempre y nunca»:

Siempre:

Siempre deberán almacenarse los explosivos de acuerdo con las disposiciones de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Siempre deberán ubicarse los polvorines en los lugares más aislados y estratégicos, respetando las cantidades y las distancias del reglamento de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Siempre deberán manejarse con cuidado las cajas que contengan accesorios, evitando dejarlas caer o aventarlas, así como evitar hacerlas deslizar sobre el piso o sobre otras cajas.

Siempre se observarán las leyes y reglamentos federales, estatales o municipales para el almacenamiento de los explosivos.

Siempre se guardarán los explosivos en lugares limpios, secos y frescos, bien ventilados y debidamente ubicados, además deberá ser sólida la construcción, resistente a balas y fuego, y deberá contener cerraduras adecuadas.

Siempre se manejarán los explosivos con la debida precaución dada su naturaleza.

Siempre verifique el sistema o las condiciones de ventilación.

Siempre utilice los explosivos que tengan más tiempo de fabricación y almacenaje.

Siempre tenga mucho cuidado al abrir y cerrar las cajas de fulminantes e iniciadores.



Nuncas:

Nunca deberán emplearse herramientas metálicas capaces de producir chispas para abrir o cerrar cajas de accesorios. Se pueden utilizar navajas para abrir cajas de cartón, siempre y cuando estas navajas no entren en contacto con los sujetadores metálicos de las cajas. Tampoco deben tenerse fulminantes o estopines eléctricos sueltos dentro del polvorín.

Nunca se almacenarán fulminantes comunes, iniciadores o cebos con otros explosivos en la misma caja, receptáculo o polvorín. El cordón detonante nunca deberá ser almacenado junto con fulminantes o iniciadores.

Nunca se almacenarán explosivos, mechas o encendedores de mecha en lugares húmedos o mojados, ni cerca de aceites, gasolinas o fluidos para limpiar, calentadores, tubería de vapor, estufas u otra fuente de calor.

Nunca se almacenará en un polvorín ningún metal que produzca chispa, ni herramientas hechas de tales metales.

Nunca se deberá fumar, ni llevar fósforos, luces descubiertas u otra forma de fuego o llama dentro de un polvorín, ni cerca de él.

Nunca se permitirá la acumulación de hojas, hierbas, matorrales o basura en un radio de 7,5 m alrededor del polvorín.

Nunca se dispararán armas de fuego hacia los polvorines o explosivos, ni tampoco en las cercanías de éstos.

Nunca se colocarán los explosivos en lugares donde estén expuestos a llamas, calor excesivo, a las chispas o a los golpes.

Nunca deberán llevarse explosivos en los bolsillos de la ropa ni en otra parte del cuerpo.

Nunca se permitirá la presencia de niños, de personas no autorizadas o innecesarias en el área donde se manejen explosivos.

Materiales y dimensiones de construcción

Para la construcción de polvorines es muy recomendable edificar muros de materiales como el adobe, tabique de barro, tabicón, etc. así como columnas de concreto, en el caso de los pisos se recomienda una plantilla de cemento de 10 cm de espesor, los techos deben ser ligeros, de material reflejante o pintados con colores muy reflejantes, ya sea de lámina de asbesto o madera. Se recomienda que sean a dos aguas, con altura al centro de 4 metros y en los extremos alturas inferiores a 2,70 m, dejando respiraderos entre muro y techo de 0,20 m. Las puertas deberán ser de madera, con recubrimiento exterior de lámina de acero y porta candados cubierto.

Los polvorines deben cumplir con los requisitos de impermeabilidad a fin de mantener los productos en perfecto estado.

Los muros deben estar reforzados a cada 6 m con castillos de 0,45 m x 0,45 m, con alma de 4 varillas de 2,54 cm de diámetro. Las puertas deben ser de madera de 10,16 cm de grueso, con bastidor de metal y deberán tener cerradura de seguridad con doble pasador de 15 ó 20 cm. Los cimientos deben



ser de mampostería. El objetivo esencial de esta construcción es que en caso de explosión no se fragmente en bloques grandes, sino que el material prácticamente se pulverice. La altura mínima del polvorín debe ser de 2,50 m. Los respiraderos o ventanillas para ventilación deben tener una cubierta de malla de acero resistente a los roedores.

El polvorín debe estar resguardado con malla ciclónica ubicada a 3 m de distancia de las paredes con altura mínima de 3,0 m.

La capacidad será de acuerdo con las necesidades del usuario y la autorización de la Secretaría de la Defensa Nacional.

La seguridad de los polvorines involucra la colocación, cerca a la puerta de cada polvorín, de cuando menos un extinguidor tipo ABC (mismo que sólo se utilizará para casos de incendios fuera de polvorines), y en la colocación, en zonas de fácil acceso, de tambos de 200 litros, unos conteniendo agua y otros arena. Además es necesario colocar palas, zapapicos en caso de siniestro y cubetas para utilizarse, de ser necesario, para manipular la arena y el agua de los tambos en caso de siniestro.

Se deben colocar letreros de advertencia, los cuales contendrán mensajes como: no fumar, estrictamente prohibida la entrada, peligro explosivos, etc.

Se debe instalar en cada polvorín un pararrayos, que servirá para protegerlos de corrientes eléctricas naturales, y una placa aterrizada mediante una barra de cobre para evitar corrientes estáticas, misma que debe ser tocada por el personal que ingrese a polvorines.

Los polvorines deberán estar permanentemente vigilados por personal capacitado, dado que las disposiciones de la Secretaría de la Defensa Nacional exigen dos vigilantes por turno las 24 hrs.

Es recomendable efectuar revisiones periódicas de las condiciones de los polvorines (independientemente de las realizadas por la SEDENA.), a fin de solucionar oportunamente cualquier anomalía que se detecte. Se sugiere proporcionar al personal responsable del almacenamiento las reglas correspondientes a los procedimientos de seguridad, para que sean del dominio completo en caso de contingencias.

Por último y antes de iniciar cualquier construcción, se recomienda solicitar la asesoría de la zona militar correspondiente en cuestiones de explosivos, con el fin de cumplir con todos los requisitos que marca la ley.

Seguridad en el uso y manejo de explosivos

Personal responsable

Cada persona involucrada en la aplicación de explosivos tiene responsabilidad consigo mismo y con los demás, por eso cuando alguien dentro de un equipo de trabajo deja de observar las medidas de seguridad, ya sea por negligencia, o descuido, los demás deberán recordarle la importancia del hecho y si esto persiste, la persona deberá ser removida de los lugares donde se manejen explosivos, ya que cuando alguien le ha perdido el respeto a los explosivos es tiempo de cambiar de actividad.



Con respecto al personal involucrado en la aplicación de los explosivos, se recomienda que cuando se introduzca personal nuevo se tome en cuenta lo siguiente:

- ✓ Capacitarlo y adiestrarlo en el manejo y uso de los explosivos.
- ✓ Este personal deberá tener una clara conciencia de lo que debe y no debe hacer con el explosivo.
- ✓ Que se encuentre física y mentalmente preparado para el manejo de explosivos.
- ✓ Que obedezca las normas de seguridad establecidas.
- ✓ Deberá ser personal con sentido común, que reconozca que la seguridad de él y de sus compañeros de trabajo es su responsabilidad.

Dentro de cada operación existen diferentes estructuras organizacionales, donde cada uno de los involucrados tiene su propia responsabilidad dentro de un equipo o grupo de trabajo, para la prevención de accidentes.

A continuación se mencionan algunas de las principales responsabilidades, de varios puestos involucrados en operaciones de minería, obras de ingeniería civil, canteras, etc., en donde se utilizan explosivos:

Superintendente o responsable de la operación

Es su responsabilidad que exista un reglamento de seguridad y de que sean perfectamente bien observadas las medidas de seguridad para la prevención de accidentes.

Supervisor de producción / Supervisor de obra

- ✓ De común acuerdo con el supervisor de voladuras, deberá calcular la carga explosiva para las voladuras en función de la perforación existente.
- ✓ Deberá revisar y autorizar el vale de salida de los explosivos.
- ✓ Verificar los movimientos de entrada y salida de los explosivos, así como su uso correcto y asegurarse que los consumos estén contenidos en los límites establecidos dentro del plan de uso de explosivos.
- ✓ Pasar diariamente los vales definitivos para la autorización por el responsable del área.
- ✓ Llevar al día las hojas del control mensual de consumo de explosivos y artificios.
- ✓ Asegurar que las voladuras se efectúen dentro del tiempo programado.
- ✓ Supervisar que se realice oportunamente la devolución de los explosivos y artificios sobrantes a los polvorines.



Supervisor de voladuras

- ✓ Debe asegurarse que el personal a su cargo tenga una clara conciencia de la seguridad, para garantizar una operación sin riesgos innecesarios.
- ✓ Es responsable de la seguridad de su personal y de las áreas circunvecinas.
- ✓ Debe calcular las cargas explosivas por barreno de acuerdo al diseño y circunstancias de la perforación, hacer el vale por los explosivos y solicitar el producto al almacén.
- ✓ Es responsable de que el personal nuevo en el área de carga de los explosivos reciba la inducción adecuada, además de ponerlos bajo la supervisión directa del personal con mayor experiencia, pero asegurándose que sólo realicen tareas donde no se corra ningún riesgo.
- ✓ Es el responsable de realizar las voladuras bajo las reglas de seguridad establecidas.
- ✓ Debe hacer las devoluciones de explosivos y artificios sobrantes al polvorín por conducto del almacenista.

Aspectos recomendados en el manejo de explosivos

Consideraciones en el manejo de los productos explosivos y accesorios de la voladura.

Altos explosivos

- A) Aun cuando los altos explosivos sean cada día más seguros, se deberá evitar forzar la entrada de los fulminantes en el cartucho. Los productos explosivos deberán tratarse con cuidado para evitar daños en el empaque o al producto.
- B) Evitar llevar cantidades excesivas de productos explosivos a los lugares de trabajo.
- C) Jamás se debe transportar explosivos y sistemas de iniciación en el mismo vehículo.
- D) Evitar golpear el cartucho cebado, este debe ser deslizado o empujado suavemente a través de un barreno.
- E) Antes de que el explosivo sea cargado en los barrenos, deben revisarse para prevenir cargar explosivos en barrenos obstruidos o con cavernas.
- F) En la preparación del cebo se requiere hacer un orificio en el cartucho con un material que no produzca chispa y que sea de dimensión suficiente para albergar la cápsula o fulminante, sin tener que presionar para insertarlo por la fuerza.

En los barrenos verticales, cuando se va a cargar con cebos menores de 5 kg, los cartuchos pueden deslizarse suavemente por la línea descendente. En barrenos de diámetro grande y usando cartuchos pesados, se recomienda bajar el primero con un cable de carga para prevenir un rompimiento de la línea descendente. Cuando se usan cebos muy pequeños, de 0,15 a 2,5 kg, en barrenos de diámetro grande, se recomienda meter primero un cartucho grande de explosivo o una cantidad razonable de anfo en el barreno, para evitar que el



cebo sea sepultado en lodo, que su posición sea contaminada con roca del recorte y pueda ser separado de la carga principal. En barrenos verticales los cebos deben protegerse, evitando dejar caer cartuchos de explosivos directamente sobre el mismo, esto se logra colocando explosivo en pequeñas cantidades sobre el cebo, antes de dejar caer un cartucho completo.

Los barrenos horizontales deben ser sopleteados para limpiarlos de posibles fragmentos de roca y lodos, que pudieran taparlos o acortarlos. El siguiente paso es empujar el cartucho cebado hasta el fondo del barreno con un fainero de madera, esta operación se debe hacer con mucho cuidado para evitar que la línea de encendido pueda romperse. No es recomendable meter cartuchos como colchón antes del cebo. Una regla de seguridad muy importante es que el cartucho cebado nunca debe ser golpeado, ni tratar de empujarlo o deformarlo, si el explosivo se tiene que retacar para confinarlo en el barreno, se debe poner uno o dos cartuchos después del cebo para amortiguar esta acción, además se deberá hacer con mucho cuidado para evitar el rompimiento de la línea de encendido.

Después de que el cartucho cebo ha sido cargado, la línea descendente debe asegurarse con una estaca de madera en la boca del barreno, permitiendo una tensión adecuada, y así asegurarse que la línea se ubica cerca de una de las paredes del barreno. Cuando se usa cordón detonante, la línea descendente debe cortarse del carrete y asegurarse con una estaca de madera fuera del barreno, retirándola del resto de cualquier material explosivo, esta práctica es para evitar detonaciones prematuras en el barreno, al propagarse por la línea descendente del cordón detonante e iniciar los materiales explosivos en la superficie.

Durante la operación de carga, la columna de explosivos deberá revisarse periódicamente con una cinta, para estar seguros que el explosivo esté siendo cargado de acuerdo a lo planeado, esto es importante para evitar que pudiera haber concentraciones de explosivo en pequeñas o grandes cavernas y/o fisuras en la roca y que pudieran provocar excesivo lanzamiento de material desde la voladura conocida como roca en vuelo.

Con las actuales perforadoras rotarias normalmente los barrenos se realizan con paredes bien definidas, que permiten bajar los cartuchos de alto explosivo y los agentes explosivos sin ningún problema. Sin embargo, muchas veces la perforación se hace a través de rocas fracturadas, o a través de algunos estratos de arcilla, los cuales tienden a forzar y a reducir el diámetro del barreno. Cuando esto sucede se recomienda utilizar cable para bajar los cartuchos de alto explosivo y así evitar el taponamiento. Cuando hay taponamiento se debe empujar con faineros telescópicos que se utilizan especialmente para estos casos.

Bajo ninguna circunstancia se deberá utilizar el equipo de perforación para empujar un cartucho atorado o rebarrenar sobre el mismo. Por ningún motivo deberán utilizarse piezas de acero o pieza pesadas de algún otro material para tratar de empujar los cartucho atorados.

En algunos casos donde hay estratos de arcilla y los cartuchos se llegan a atorar, es muy común descargar agua sobre el cartucho atorado, para que la arcilla se reblandezca y con el peso que adquiera empuje al cartucho a través del barreno constreñido.



Quando se dejan caer cartuchos de emulsión hidrogel a través de barrenos con agua, desde cierta altura, es muy común que los cartuchos tomen la apariencia de un hongo y pueden bloquear el barreno cuando golpean con el agua. En este caso se recomienda bajarlos suavemente con un cable y gancho apropiados, y esperar el tiempo suficiente para permitir que bajen por sí mismos, también se recomienda que el explosivo tenga una densidad que le ayude a bajar más rápidamente.

En ciertas ocasiones, debido a la falta de bordo, material débil, cavernas, estratos arcillosos, la carga completa de toda la columna con explosivos puede resultar en una sobrecarga que produzca roca en vuelo y golpe de aire. Para estos casos se recomienda el uso de tacos intermedios colocados en los puntos de mayor debilidad en las cavernas o fisuras, que pudieran concentrar una mayor cantidad de explosivo. Cuando se colocan los tacos intermedios es necesario cebar adecuadamente cada carga por separado y de acuerdo al diseño de la voladura.

Agente explosivo (Anfo)

Se mencionan algunas reglas recomendadas para la utilización del Anfo:

- Requiere de un cebo para ser iniciado.
- No introducir Anfo en el agua o barrenos húmedos, debido a que es un producto que se disuelve fácilmente en el agua y pierde sus características explosivas.
- No quemar, friccionar o golpear objetos que produzcan chispas en los lugares donde se almacena o maneja este producto.

Contenido de gases nocivos

- El contenido de gases nocivos no debe rebasar los límites permitidos, que están estipulados en el Código Nacional.
- De acuerdo a la Ley en México, para considerar un explosivo como clase I no debe exceder en los siguientes contenidos de gases tóxicos en el aire del ambiente:

Co	-	100ppm
No	-	5 ppm
So	-	5 ppm

Seguridad con los iniciadores

Los iniciadores modernos están diseñados bajo las más estrictas especificaciones de seguridad y son fabricados con las normas más rígidas de calidad. Aun cuando los detonadores disfrutan de un excelente récord de seguridad, debemos recordar siempre que estos contienen explosivos primarios y pirotécnicos sumamente sensibles. Todos los tipos de detonadores son sensitivos a iniciaciones accidentales causadas por calor fricción o impacto. Es por lo tanto imperativo que los iniciadores sean protegidos de estos riesgos. Todas las operaciones de voladura deberán suspenderse cuando exista alguna tormenta eléctrica y el personal deberá trasladarse a un lugar seguro.



Los iniciadores que han sido llevados al área de la voladura deberán mantenerse en su empaque original o colocarse en un contenedor específicamente diseñado para este fin, manteniéndolos alejados de los explosivos. De preferencia los iniciadores deben transportarse al lugar de la voladura hasta el momento en que serán utilizados.

Los patrones de retardo y la forma en que los circuitos de voladura serán conectados son parte del diseño de la voladura.

El responsable de la voladura debe conocer todos los aspectos de seguridad y precauciones a tomar con respecto a los detonadores y los componentes de los sistemas de iniciación asociados, antes de iniciar la carga. Todos los sistemas de iniciación deben usarse de acuerdo con los métodos y recomendaciones de los fabricantes.

Para prevenir posibles cortes en los barrenos y evitar explosivos sin detonar, debido a los movimientos de la roca, es una práctica muy común que en barrenos de cierta profundidad se utilicen dos detonadores. Comúnmente un detonador es colocado al fondo del barreno para proporcionar la detonación al fondo. El otro detonador deberá colocarse en la parte media superior del barreno con un período de retardo mayor.

Seguridad con detonadores eléctricos (Estopines eléctricos)

Los detonadores eléctricos deberán revisarse con un instrumento apropiado antes de que se inserten en los cartuchos cebo. Para asegurar que los detonadores no fueron dañados durante la carga, deberán inspeccionarse antes de la colocación del taco.

Si durante la carga existe la sospecha de que los cables del detonador fueron dañados, los procedimientos de seguridad recomiendan que el detonador debe volver a verificarse, de tal manera que se pueda utilizar otro de reemplazo si es necesario.

Los detonadores eléctricos, desde que son diseñados para ser iniciados con un impulso de energía eléctrica, son susceptibles de una iniciación accidental por una corriente extraña de electricidad, electricidad estática, energía de radio frecuencia, tormentas eléctricas, líneas de alto voltaje, etc. Como resultado, se deben hacer consideraciones muy importantes debido al riesgo potencial que existe por corrientes extrañas cuando se utilizan estopines eléctricos, algunas de éstas son las siguientes:

- No utilizar estopines eléctricos cerca de lugares que contengan electricidad estática.
- No utilizar estopines en las cercanías de transmisores de radiofrecuencia.
- El circuito de disparo debe estar aislado de alambres descubiertos, rieles, tuberías.
- No colocar alambres o cables eléctricos cerca de fulminantes eléctricos u otros explosivos, sino hasta el momento de preparar el disparo.
- Mantener en corto circuito los alambres de los estopines hasta que la voladura esté lista y sea necesario hacer las conexiones.



Seguridad con detonadores no eléctricos

Los sistemas no eléctricos deben usarse con los métodos recomendados por los fabricantes. El supervisor de voladuras es el responsable de todos los aspectos de seguridad y del uso de sistemas no eléctricos de disparo, además deberá estar familiarizado con todos los componentes y su compatibilidad con los explosivos y otros sistemas de iniciación.

Los sistemas no eléctricos de disparo son por lo general menos susceptibles que los sistemas eléctricos a una detonación prematura, ocasionada por corrientes extrañas o energía de radio frecuencia; todos los iniciadores tienen cargas primarias de explosivos pirotécnicos, por lo que es posible que pudiera ocurrir una iniciación accidental por un rayo, electricidad estática o campos eléctricos. Debido a la fuerte energía liberada por los rayos, durante una tormenta eléctrica, se recomienda suspender la carga de explosivos y retirar al personal a un lugar seguro, bloqueando los accesos a la zona de trabajo hasta que la tormenta pase y el riesgo desaparezca, sin importar el sistema de iniciación utilizado.

Mechas de seguridad:

Precauciones

La mecha para minas deberá usarse con explosivos comerciales, únicamente por o bajo la dirección de una persona con experiencia en el manejo y uso de explosivos. La mecha para minas se conoce también como mecha de seguridad, pero ambos nombres son sólo genéricos, y quien la use deberá comprender que todo trabajo donde se requiera el uso de explosivos es peligroso. Es necesario tener siempre la certeza que, en condiciones específicas de cada trabajo, las mechas empleadas sean de la longitud adecuada y le proporcionen al trabajador todo el tiempo necesario para llegar a un lugar seguro después de haberlas encendido; en caso de duda, deberán usarse mechas más largas para proporcionar un margen adicional de seguridad.

Reglas y precauciones para encender mechas de seguridad

Ya sea que la voladura consista de uno o muchos barrenos, y si se enciende a mano o con ignitacord, invariablemente se deberán observar las reglas y precauciones siguientes:

No intentar usar mecha, a menos que quien lo haga sea un operario conocedor y experimentado, o que lo haga bajo la supervisión directa de una persona con conocimientos y experiencia. Un operario con experiencia es aquel que ha sido responsable de trabajos de explosivo día tras día y ha empleado la mecha por un período de cuando menos un mes. Además debe conocer y entender todas las recomendaciones y precauciones enumeradas en este capítulo.

Cuando falte poco tiempo para encender una o más mechas, se deberá establecer comunicación positiva con todas las personas que pudieran estar presentes en el lugar de la voladura o cerca de él. Los mineros y demás operarios, ubicados en lugares cercanos o intercomunicados, deberán ser protegidos por algún sistema eficaz de señales o comunicaciones, para eliminar la posibilidad de que cualquiera de ellos llegue a exponerse a una



voladura a cargo de uno de sus compañeros de trabajo. Además, toda persona que no esté participando directa y personalmente en las voladuras, deberá ser retirada a un lugar seguro, incluyendo el público, en su caso.

Las cuadrillas deben consistir de dos hombres, y deberán planearse y discutirse con anticipación todos los detalles relacionados con cada voladura, incluyendo la preparación de las mechas para facilitar su encendido, así como el tiempo necesario para encenderlas.

Si la mecha se enciende a mano, un operario deberá encenderla y el otro llevará la cuenta del tiempo transcurrido, desde el momento en que inicio el encendido de la primera mecha. De preferencia, deberá usarse una mecha de control de tiempo en la forma descrita anteriormente.

Si el encendido es con ignitacord, el minero lo encenderá en un lugar adecuado y deberá retirarse inmediatamente. No hay razón para observar cómo progresa el encendido del cordón.

Seguridad en el uso de la mechas de seguridad o cañuela negra

Causas de accidentes en el uso de explosivos.

La mecha para minas tiene un historial comprobado de funcionamiento seguro y confiable y proporciona el método más económico para disparar voladuras en túneles y socavones con profundidades de hasta 4 metros.

Han ocurrido accidentes al usar cualquiera de los dispositivos y métodos existentes diseñados para iniciar voladuras en minas subterráneas. Al investigar el origen de los accidentes se comprobó que invariablemente ocurrieron por una o más de las siguientes causas básicas:

- 1) *Falta de experiencia del operario.* El operario no tenía la preparación necesaria ni entendía los principios de la técnica del uso de la mecha, y violó una o más reglas fundamentales de dicha técnica.
- 2) *Las comunicaciones inadecuadas.* La exposición de una o más personas a las consecuencias de una voladura, debido a comunicación inadecuada entre mineros en lugares de trabajo vecinos y cercanos, o entre el pegador y otras personas, dando lugar a la presencia inadvertida e inoportuna de personas extrañas a la voladura en la zona de peligro.
- 3) *La presencia prolongada en el lugar de trabajo.* Recuerde que una vez encendida una mecha cebada, inicia una serie de sucesos que culminarán con la detonación de la carga explosiva de un barreno. El tiempo perdido en la frente (o la planificación defectuosa de la tarea) durante la operación de encendido, así como la falta de preparación de las mechas antes de empezar a encenderlas, multiplica la posibilidad de que el operario se exponga a ser lastimado seria o fatalmente por el primer barreno que detone.

La persona que maneja explosivos deberá conocer y observar todas las reglas de seguridad correspondientes. A continuación damos algunas de estas reglas respecto al uso de mecha.



NUNCA almacene explosivos, mecha o encendedores de mecha en un lugar o ambiente húmedo, ni cerca de petróleo, aceite, gasolina o disolventes, ni cerca de radiadores, calefactores, líneas de vapor, estufa u otras fuentes de calor.

NUNCA se usan explosivos o accesorios que obviamente estén deteriorados o dañados.

NUNCA intentar recuperar, usar mecha, fulminantes, estopines, o cualquier otro explosivo que se haya empapado, aún después de haberse secado, consulte al fabricante.

SIEMPRE maneje la mecha con cuidado, evitando maltratar su cubierta. En lugares fríos, caliéntela ligeramente antes de usarla para evitar agrietar las capas impermeabilizantes.

NUNCA use tramos cortos de mecha. Conozca usted la velocidad de su mecha y asegúrese de tener el tiempo necesario para llegar a un lugar seguro. Nunca use menos de un metro.

SIEMPRE corte la mecha inmediatamente antes de insertarla en un fulminante. Corte de 3 a 5 centímetros para asegurarse que el extremo esté seco. Córtaela con herramienta cuya hoja esté limpia y filosa. Asegúrese que el extremo quede en contacto con el explosivo del fulminante, pero no la haga girar cuando ya esté en su lugar.

SIEMPRE encienda la mecha con un dispositivo especial diseñado para este fin. Si se usan cerillos hay que hundir el extremo de la mecha, sostener la cabeza del cerillo dentro de la hendidura y en contacto con la pólvora de la misma y tallar la cabeza del cerillo con la superficie abrasiva de la caja para encender la mecha.

NUNCA retenga el explosivo en la mano al estar encendida la mecha.

Sí después de leer todas las instrucciones y advertencias tiene alguna duda sobre la forma correcta de usar la mecha para minas con toda seguridad, solicite de inmediato el consejo de una persona calificada y con experiencia en el uso de la misma. Desde luego que cuando se están usando explosivos, es necesario tener la certeza de que conoce, comprende y observa todas las medidas de seguridad correspondientes, y no únicamente las que se refieren a la mecha. Recuerde también que no debe usarse la mecha para minas en dispositivos pirotécnicos, ni en contravención con los ordenamientos oficiales.

Cordón detonante primacord tipo reforzado, tipo E-Cord

Advertencias

SIEMPRE transporte el cordón detonante de acuerdo con todas las leyes y reglamento federales, estatales y municipales correspondientes.

SIEMPRE haga que los demás explosivos, incluyendo el cordón detonante, se separen de los fulminantes, y/o los estopines eléctricos cuando sea permitido su transporte en el mismo vehículo.



SIEMPRE almacene el cordón detonante de acuerdo con las leyes y reglamentos federales, estatales y municipales.

NUNCA almacene el cordón detonante con fulminantes eléctricos.

SIEMPRE almacene el cordón detonante en un polvorín que esté limpio, seco, bien ventilado, razonablemente fresco, debidamente ubicado, de construcción sólida, resistente a las balas y al fuego, cerrado y con seguridad.

SIEMPRE use y maneje cordón detonante con el mismo respeto y cuidado que se le dan a otros productos explosivos.

SIEMPRE prepare cebos efectivos de acuerdo con los métodos recomendados y comprobados.

SIEMPRE corra del carrete la línea descendente, colocada en un barreno, antes de cargar éste con explosivos.

SIEMPRE maneje y use el cordón detonante con cuidado para evitar cortarlo o dañarlo durante la carga de los barrenos o al hacer las conexiones.

SIEMPRE haga conexiones positivas y apretadas usando exclusivamente los métodos recomendados y comprobados. Los nudos u otras conexiones de un tramo a otro deben hacerse solamente cuando el núcleo explosivo está seco. Cuando el explosivo del cordón detonante esté húmedo solamente debe detonarse con intensificadores especiales, usando cebado terminal. Consulte al fabricante o a su proveedor.

SIEMPRE evite vueltas y/o dobleces en ángulo que dirijan el cordón detonante hacia atrás o hacia el punto original de detonación.

SIEMPRE conecte los fulminantes a los estopines eléctricos empleando únicamente los métodos recomendados por el fabricante. Los fulminantes o estopines deberán apuntar en la dirección deseada de detonación.

NUNCA deje por el suelo el cordón detonante o pedazos del mismo, al alcance de niños o personas no autorizadas.

SIEMPRE destruya sobrantes de cordón detonante siguiendo rigurosamente los procedimientos aprobados. En caso de duda consulte al fabricante o a su proveedor.

Seguridad en el área de voladuras

Personal responsable

Existen dos versiones acerca de seguridad y voladuras: (1) La responsabilidad más grande del encargado de la voladura es la seguridad; y (2) la seguridad de todas las voladuras depende de que cada persona maneje sus propias responsabilidades en forma profesional.

Reglas, regulaciones y aun el cuidado en la seguridad por parte del encargado de voladuras, no pueden prevenir accidentes, cada persona es responsable por su seguridad personal y la de sus compañeros de trabajo.



Antes de la voladura

Los planes predeterminados deben ser completamente coordinados entre las personas encargadas de las voladuras, empleados, dueños o gerentes de proyecto, así como asegurar que todos los señalamientos y la comunicación sean completamente claros para todos los involucrados. El primer paso para desarrollar un plan de seguridad en voladuras, es observar todo tipo sujeto a posible exposición alrededor del área de voladuras. El área de voladura se define como "el área en donde el golpe de aire, roca en vuelo o gases ocasionados por una detonación de explosivos pueden causar lesiones a personas o dañar propiedades", áreas públicas, carreteras, estructuras u otras construcciones en el área y carreteras de transporte de particular importancia.

Una vez analizadas las explosiones circundantes, se deben determinar los requerimientos de seguridad de un área de voladuras. Posteriormente las personas responsables especificarán que tipo de señalamientos y procedimientos se deben seguir. Si es usted nuevo en un área, asegúrese de conocer todos los requerimientos de seguridad.

Señales de precaución o advertencia

Se deben colocar barras o señales de precaución o advertencia, mostrando que es zona de voladuras, en todos los lugares circundantes al área afectada. Estas señales indicarán peligro donde se encuentren los barrenos con explosivos, deben ser claras y se colocarán en lugares visibles.

Evacuando el área

Se debe elaborar un plan estratégico para evacuar, del área de voladuras, a la gente y equipo. Es responsabilidad del encargado de voladuras, programar el horario de detonación y de comunicarlo a todos los empleados y a los residentes locales para asegurar la operación. Ninguna maniobra como carga y acarreo debe permitirse en el área donde los explosivos están siendo cargados. Los equipos y herramientas deben despejarse por lo menos a 15,23 m (50 pies) de la distancia de las operaciones de cargado. Se debe dar atención especial a todo el equipo, el cual deberá alejarse del área de voladura antes del disparo.

La seguridad se debe reforzar especialmente para la protección del personal involucrado en voladuras y en general de todas las personas. Nunca debe suponerse que el área de voladuras es totalmente segura. Será necesario asegurar completamente que el área esté totalmente despejada en todas direcciones. La mayoría de las lesiones provocadas por los explosivos se ocasionan porque la zona de voladuras no fue despejada apropiadamente del área de rocas en vuelo.

Señales auditivas de advertencia (Sirena de alarma)

La señal de advertencia deberá escucharse en por lo menos 1 kilómetro de distancia, como condición obligatoria. El procedimiento de advertencia debe ser reconocido por todo el personal que trabaja en la voladura y el ubicado en áreas circunvecinas de la misma, además se deben colocar señales notorias alrededor del área. Esta señal debe dar un margen de tiempo entre el inicio del sonido y el punto de disparo.



Custodiando el área de voladura

Personal responsable deberá bloquear todos los accesos al área de la voladura. Asegurándose que se haya dejado suficiente distancia del área de voladura, para estar afuera de la zona de roca en vuelo. Los guardias deberán estar completamente informados del momento en que deben detener el tráfico sin ninguna excepción. Los salvaguardias deben tener un medio de comunicación con el coordinador de la voladura.

Refugios

Se deberá estar seguro de que la persona que realiza el disparo, está en un lugar seguro y alejado de la voladura. La(s) persona(s) no sólo debe estar protegida de la roca en vuelo, sino también de las rebotadas, desprendimientos y piedras rodadas. Jamás se debe permitir que alguien se encuentre frente a la voladura. Las rutinas de voladura que se consideran seguras, son conocidas por estar alejadas de la zona de disparo, varias veces la distancia normal conocida de alcance de roca en vuelo.

Regresando al área de la voladura

En cada operación el responsable de voladuras debe asegurarse que el disparo no produjo algún peligro imprevisto. Una inspección del área y del material de rezaga se debe realizar por personal calificado o por el supervisor para determinar si las cargas han sido totalmente detonadas. Después del disparo todo el personal debe mantenerse en sus posiciones hasta que toda el área sea revisada y autorizada para que equipo y personal regresen al área recién detonada.



IV.3 MANEJO DE CARGAS NO DETONADAS

Si se encuentra algún problema, por fallas, el supervisor de las voladuras debe proporcionar personal capacitado para alejar a los empleados de área de peligro. Ningún otro trabajo deberá ser realizado excepto el de eliminar el peligro y las fallas, y sólo los empleados necesarios para el trabajo podrán permanecer en el área de peligro.

Cuando existen barrenos quedados se deben hacer las siguientes acciones:

- Identifique la cantidad y localización de los barrenos quedados.
- Lave con agua sus barrenos y saque con cuidado el cebo, con extrema precaución.
- Si no lo puede sacar, detónelo con otro cebo, tomando las precauciones necesarias.
- No barre nunca en barrenos quedados.

Destrucción de explosivos y dispositivos de disparo

Dentro de las operaciones mineras o de construcción es necesario destruir explosivos, agentes explosivos y sus dispositivos de disparo, que estén deteriorados por varias razones como:

- A) Exceso de humedad y temperatura
- B) Caducidad
- C) Recipiente o empaque roto.
- D) Barrenos sin detonar o quedados.

Los explosivos dañados, deflagrados o deteriorados en ocasiones pueden ser más peligrosos que aquellos que conservan sus características de fabricación, por tanto requieren del manejo de una persona capacitada, para que su destrucción sea lo más segura posible y evitar daños a terceros.

Altos explosivos

Los altos explosivos como gelatinas, emulsiones encartuchadas e hidrogeles, pueden destruirse por quema abierta, aunque tardan más por su consistencia líquida, las emulsiones también se consideran dentro de este método.

Para su quema no deben mezclarse dinamitas, hidrogeles o emulsiones, ya que estos productos tienen diferente sensibilidad y diferente característica al quemarse.

Primero, se busca un macizo rocoso o terreno compacto, que esté libre de piedras sueltas y material que pueda arder como pasto o ramas, y debe ubicarse lo suficientemente lejos de las áreas habitadas.

Se debe determinar y remarcar el área para que ningún curioso o personal ajeno al manejo de este tipo de material ingrese al área, evitándole así un posible accidente. Estos sitios deben tener las siguientes características:



- A) Guardias en caminos de acceso.
- B) Banderolas y señalamientos preventivos.
- C) Vallas o barricadas.
- D) En la entrada, pizarrón con horario de la quema.

No se deben quemar más de 5 Kg por ocasión, cuando se deban quemar más, debe consultarse a la fabrica de explosivos correspondiente, para informarse de probables riesgos, o en su caso recibir el apoyo técnico que se requiera.

Debemos sacar el explosivo de su caja o empaque, es decir, no debe estar confinado. Se extiende sobre una cama de papel o viruta de madera, se le vierte encima diesel o diáfano sobre la cama con el explosivo.

Se debe revisar bien el explosivo a quemar para comprobar que no lleve fulminantes, o cápsula de nonel o estopín eléctrico.

Para encender el montículo o cama ya preparada, colocamos como mínimo un metro de mecha de seguridad (Figura IV.1), efectivamente sin fulminante, después de iniciada la mecha nos alejamos a un lugar protegido y seguro hasta que se haya quemado en su totalidad.

Se revisan las cenizas para verificar que no existan remanentes de explosivos, y en caso de que existan, se repite el procedimiento.

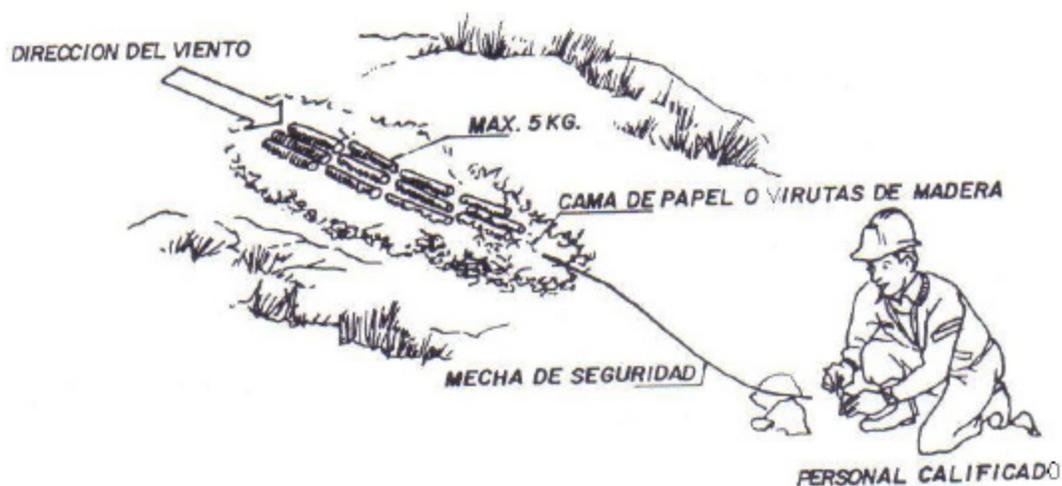


Fig. IV.1 Destrucción de explosivos a quema abierta⁽¹⁰⁾

Cordón detonante y mecha de seguridad:

La destrucción del cordón detonante, mecha de seguridad e ignitacord, se efectúa con el mismo método que para el alto explosivo, por quema abierta; aunque cuando se presente la ocasión de quemar alto explosivo y este tipo de cordones, debe siempre hacerse por separado.

Fulminantes, cápsul nonel, cápsul estopín eléctrico:

La destrucción de estos detonadores se lleva a cabo, primero cortando el tubo nonel o los alambres del estopín eléctrico y posteriormente bajándolos a un barreno echándoles una estopa prendida con diesel.

Dicho barreno debe ubicarse alejado de zonas habitadas e instalaciones de cualquier tipo. Los fulminantes sencillos sin engargolar no deben dejarse caer en barrenos con arena u otras impurezas que puedan introducirse dentro de ellos y evite su detonación.

La mejor manera para su destrucción es introducirlos en un cebo ya elaborado con un buen iniciador, y bajarlo en un barreno. (Figura IV.2)

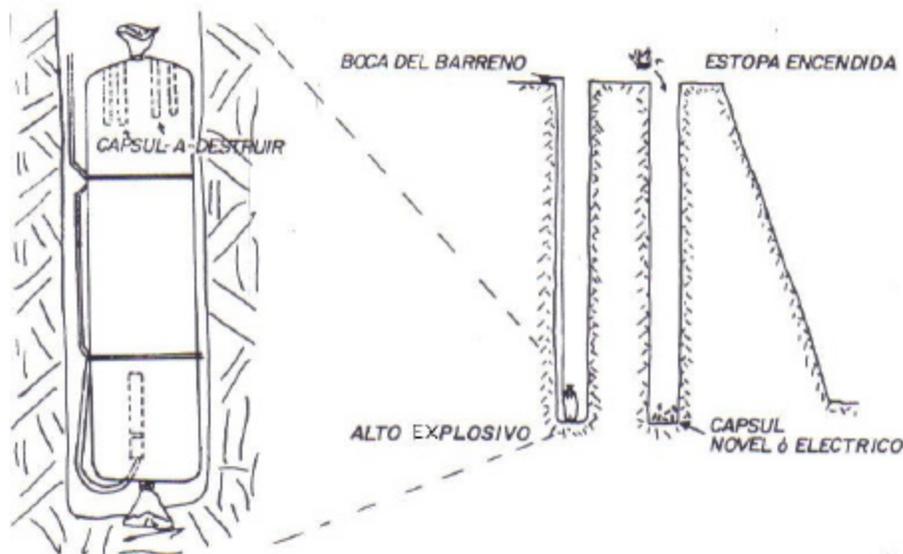


Fig. IV.2 Destrucción en barreno.⁽¹⁰⁾

Agentes explosivos pulverulentos

Este tipo de explosivo por lo general está elaborado con nitrato de amonio y diesel, y su relación en peso es de 94,3% y 5,7%, y las características particulares del nitrato de amonio es de ser hidroscópico o sea, absorbe muy fácilmente el agua diluyéndolo.

Para la destrucción de bs sacos rotos y nitratos a granel sucios o contaminados, se recomienda introducirlos en tambos con agua y agitar hasta ver diluido el granulado o prill, efectuado esto se desecha el agua.

Para barrenos quedados se recomienda "lavar" el barreno tratando de que esté en contacto con el agente explosivo una gran cantidad de agua, inundando totalmente el barreno, permitiendo que fluya y circule el agua para su pronta dilución (Figura IV.3).⁽¹⁰⁾

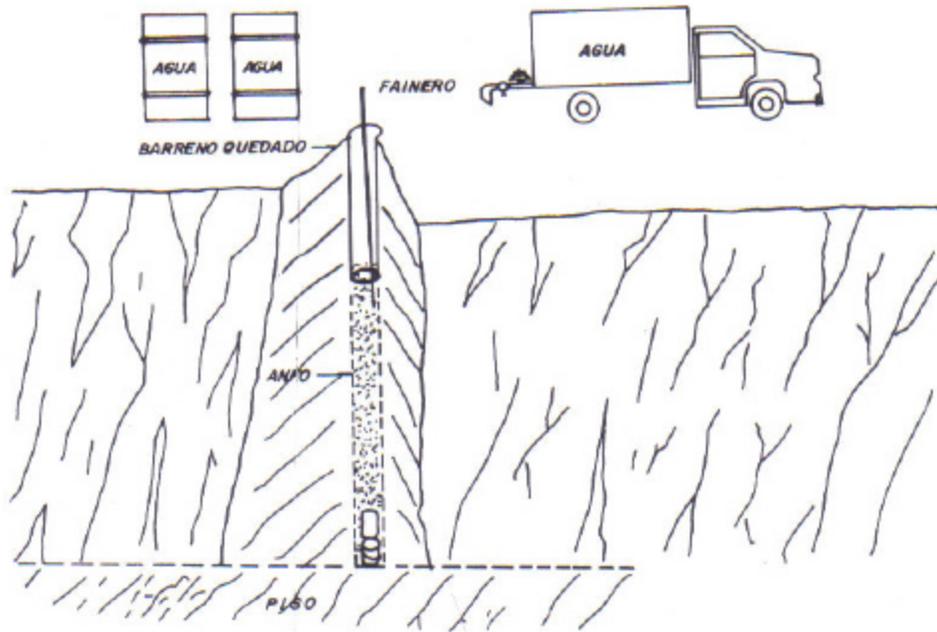


Fig. IV.3 Destrucción de los agentes explosivos pulverulentos.⁽¹⁰⁾



CAPÍTULO V:

CASO PRÁCTICO



V. CASO PRÁCTICO

PROCESO DE EXCAVACIÓN DE LAS GALERÍAS DE INYECCIÓN, DRENAJE E INSPECCIÓN EN EL SITIO DE CORTINA DE LA PRESA HIDROELÉCTRICA ZIMAPÁN, HGO (CFE)

El sitio de cortina del P.H. Zimapán, lugar en donde se excavaron las galerías de inyección, drenaje e inspección, se localiza aproximadamente 300 m aguas abajo de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, sobre el río Moctezuma.

El proyecto se localiza en la cuenca del río Moctezuma, en el sistema hidrológico Pánuco, dentro de la Región Golfo.

El Cañón del Infiernillo, en donde se excavaron las galerías, está constituido por rocas dolomíticas, calizas y dolomías brechoides de la Formación El Doctor de edad cretácica inferior cuya disposición es casi horizontal.

Tales rocas corresponden en orden de importancia a dolomías, calizas y dolomías brechoides todas de buena calidad (velocidades sísmicas superiores a 5000 m/seg, recuperaciones de 90% y RQD superiores al 80%), con la ocurrencia subordinada de horizontes arcillosos entre estratos de caliza.

La figura V.1 siguiente muestra en forma esquemática la disposición geológica de la zona, por medio de una sección en el sitio de cortina. En ella se puede apreciar, que a unos 40 m de profundidad por debajo de la zona de cimentación (elevación 1362 msnm), se localizó por contacto tectónico (cabalgadura El Doctor), a las lutitas, calizas arcillosas y areniscas de la Formación Soyotal de edad Cretácico Superior.

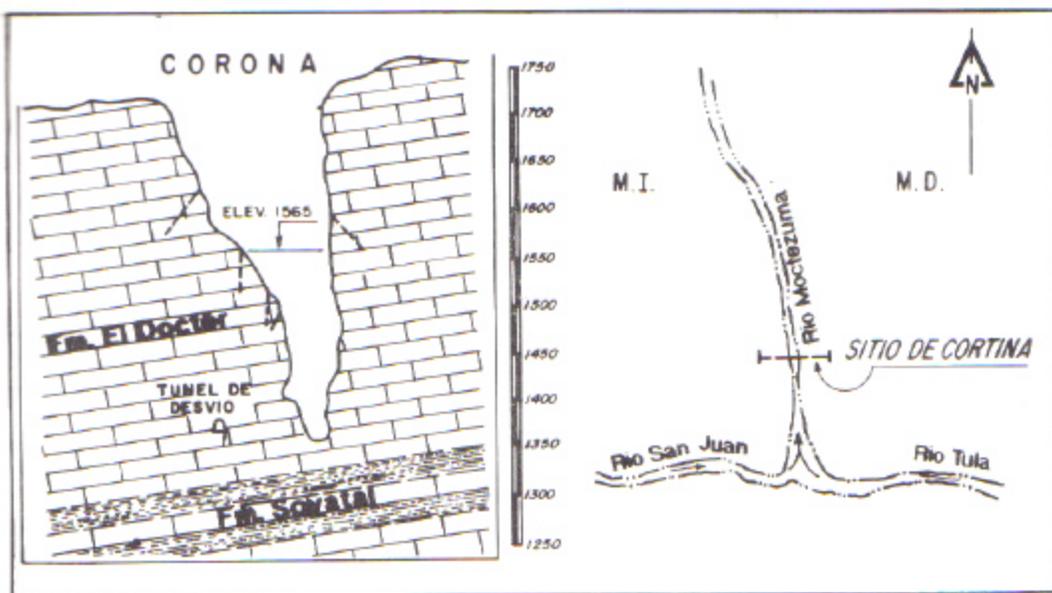


Fig. V.1 Esquema geológico del sitio de cortina⁽¹⁶⁾



En resumen, puede afirmarse que la geología no tuvo implicaciones negativas importantes en lo que se refiere a la excavación de las galerías; sin embargo, en lo que concierne a las excavaciones de ambas laderas para formación del empotramiento, sí se presentaron algunos problemas sobre todo en la margen derecha, por la formación de diedros con salida al cañón dada la componente en ese sentido que tiene la estratificación y su conjunción con los sistemas de fracturamiento presentes en la zona.

Como todo macizo rocoso, la zona de boquilla del proyecto tiene fracturamiento, sobre todo de los tipos de relajamiento y decompresión por la cercanía del cañón. Además, es notoria en el área la presencia de innumerables imbrincaduras producidas como efecto secundario a los efectos de cabalgadura de la Napa de El Doctor.

A continuación se explica el proceso de excavación de las galerías:

Diseño de la plantilla general de barrenación y voladura

El proceso de excavación empleado fue el denominado *convencional para túneles en roca*, es decir por medio del uso de explosivos.

La galería fue diseñada en base a una sección tipo herradura de 3.6 m de altura y 2.8 y 3.3 m de ancho en el piso y el hombro respectivamente fig V. 2

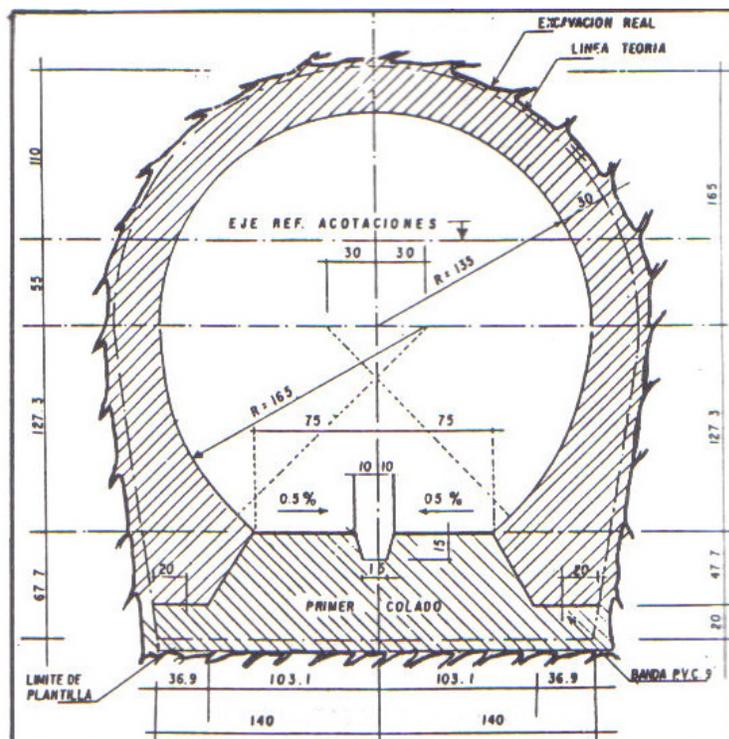


Fig. V.2 Sección Herradura.⁽¹⁶⁾

Los datos primarios de los que se partió para el análisis son los que se presentan:

* Corrimientos por compresión entre capas.



- Área de excavación = 10.23 m²
- Volumen teórico a excavar = 23.53 m³
- Diámetro de barrenación = 38 mm
- Longitud de barrenación = 2.3 m
- Alto explosivo = emulsión de 20 cm y 2.5 cm
- Densidad alto explosivo = 1.2 gr/cm³
- Bajo explosivo = ANFO
- Densidad (vaciado) bajo explosivo = 0.85 gr/cm³
- Concentración de carga del bajo = l₁ = 1000 gr/m³
(considerando diámetro de perforación = 39 mm) si v/metro = 1194 cm³

De los datos primarios destacan el volumen teórico a excavar que es el producto de la sección teórica por la longitud de barrenación. La longitud y diámetro de barrenación, se seleccionó en barras de 2.3 m de longitud de acero integral con pastilla cincel de 38 mm, porque es un acero apropiado para los frentes.

El alto explosivo utilizado fue emulsión debido a sus características de velocidad de detonación superior a 5000 m/seg, lo cual era apropiado dada la similitud con la velocidad de propagación de las ondas sísmicas compresionales de la roca a excavar; su alta resistencia al agua y su sensibilidad y sensibilidad adecuadas entre otras muchas características. La presentación seleccionada fue en bombillos de 8" X 1" debido a que en esa longitud se podía dosificar en el barreno según lo requerido por el análisis que enseguida veremos.

Aunque en la actualidad la tendencia es prescindir en excavación de túneles del uso de explosivos tipo ANFO (Ammonium Nitrate and Fuel Oil) dada su formación de gases tóxicos, se decidió su uso debido a la facilidad de colocación y su baja densidad, lo que evitaba la introducción de separadores en los barrenos con la consecuente economía de tiempo. La concentración de carga de este explosivo en el tipo de barrenación (l₁) que se utilizó se analiza en la figura V.3

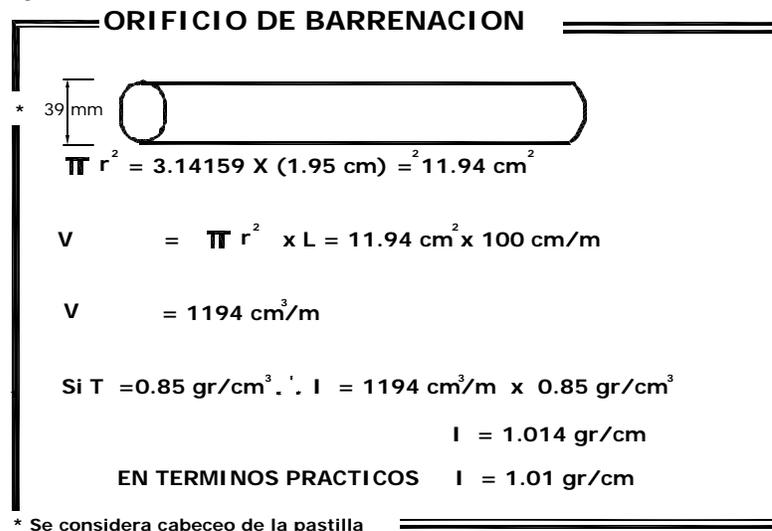


Fig. V.3 Orificio de barrenación y concentración de carga de columna utilizando ANFO⁽¹⁶⁾

Para obtener una idea de la densidad de carga de la voladura nos basaremos en la gráfica siguiente (figura V.4) en donde veremos que para una



superficie de excavación de 10.23 m² como el ejemplo, una cifra adecuada es de 2.7 kg/m³ si se usa acero de barrenación de 38 mm.

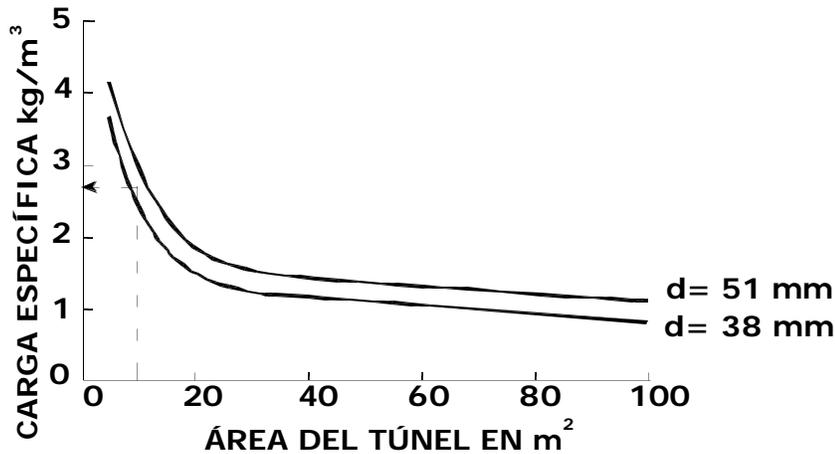


Fig. V.4 Carga específica para diferentes áreas de túneles⁽¹⁶⁾

Puesto que por sentido práctico no se contaba con barrenación de gran diámetro en el frente de excavación, y por lo tanto no se pudo contar con una cuña quemada de gran diámetro, se habilitó una cuña quemada de barrenos paralelos como sigue:

D = diámetro de cuña quemada ficticia

d = diámetro de barrenación

n = N° barrenos vacíos

$$D = d\sqrt{n}$$

$$D = 38\text{mm}\sqrt{6}$$

$$D = 38\text{mm}*(2.45)$$

$$D = 93.1\text{mm}$$

En lo sucesivo usaremos este valor de **D** como el diámetro de la cuña quemada ficticia de gran diámetro.

De acuerdo a la tabla que sigue (figura V.5), si se considera una cuña quemada de 93.1 mm y una profundidad de barrenación de 2.3 m es justo esperar un avance del 95% de lo perforado, por lo tanto avances de 2.18 m serán aceptables.

Continuando con el cálculo de la cuña primaria, tenemos que:

$$a = 1.5 D$$

$$a = 1.5 \times 93.1 \text{ mm}$$

$$a = 13.96 \text{ cm}$$

En donde **a** es la distancia entre centros de barrenos, y **D** es el barreno de gran diámetro o diámetro ficticio de barreno de gran diámetro. En términos prácticos **a** = 15 cm.

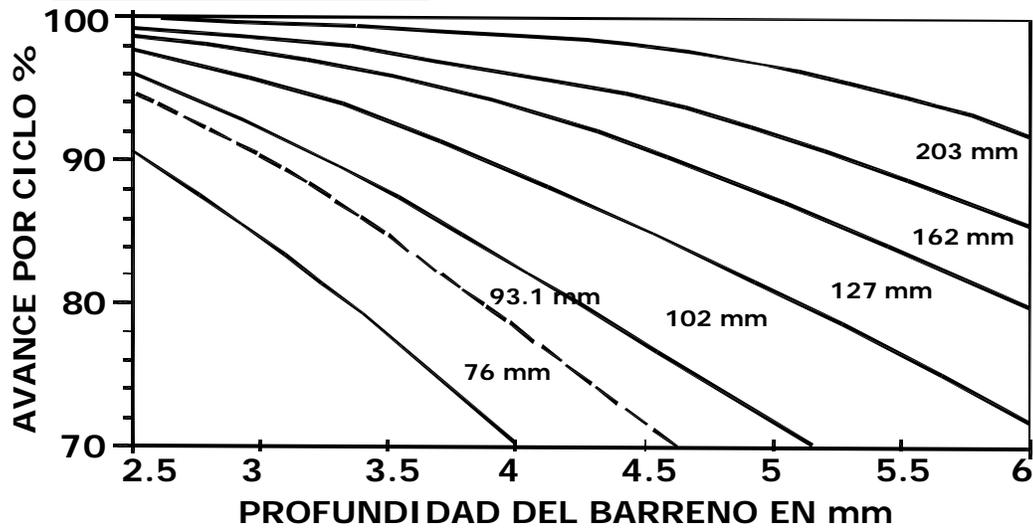


Fig. V.5. Relación entre el avance en porcentaje de la profundidad de barrenación y diferentes diámetros de cuñas quemadas⁽¹⁶⁾

Antes de proseguir, debemos decir que se entiende por *cuña* aquel espacio vacío o hueco que se forma por la explosión del o de los primeros artificios detonantes colocados en alguna parte del frente en excavación, con el afán de que las detonaciones que la prosigan en el frente tiendan a desplazar el material quebrado por tensión hacia él.

Cabe destacar que la cuña puede ir en cualquier parte del frente. En este caso se utilizó la parte central del frente como sitio para colocar los barrenos (9) que integraron la cuña quemada ficticia.

Se le denomina ficticia por que no es un hueco realizado por un solo barreno, sino que son varios, pero con un volumen tal que hagan las veces de aquella eficientemente.

Por otra parte, diremos que *bordo* es la distancia creada temporalmente que existe entre el límite de los barrenos recién disparados y los próximos a dispararse en una voladura. En el análisis siguiente se denotarán los bordos con las letras B's.

La geometría de la cuña primaria que se usa (figura V.6), nulifica la necesidad de la cuña secundaria propuesta por la literatura, se utilizó la distribución de los barrenos ayudantes a la 3ª ronda de cuña (fig V.7).

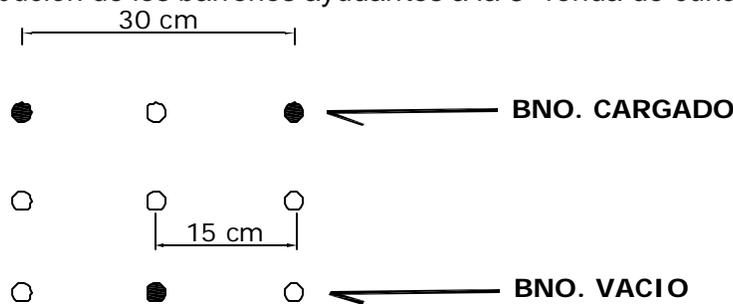


Fig. V.6 Cuña ficticia de barrenos paralela empleada⁽¹⁶⁾

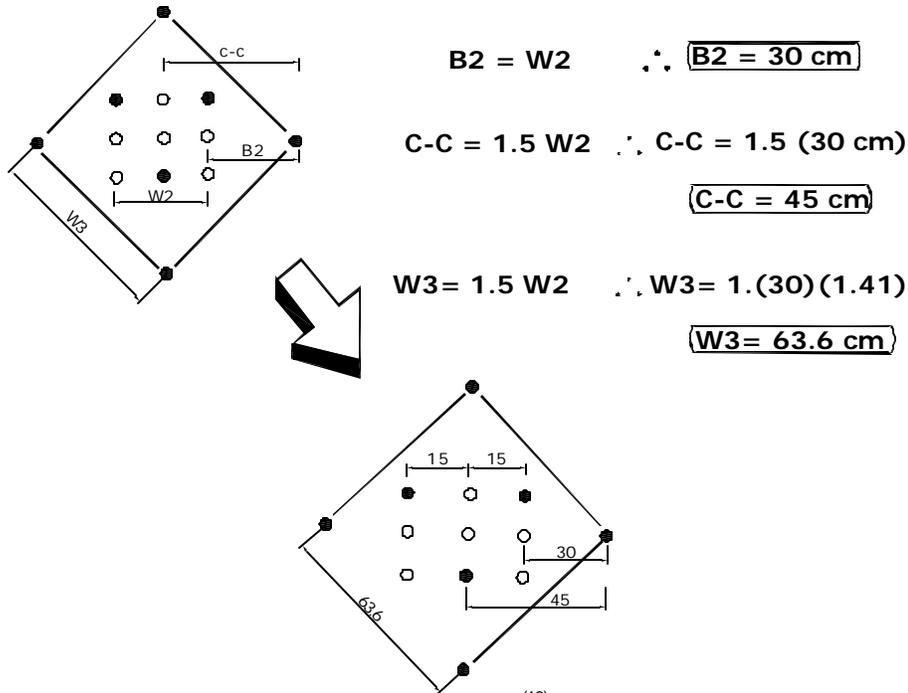


Fig. V.7 Barrenos ayudantes de cuña.⁽¹⁶⁾

En el lenguaje minero es común nombrar a las 2^{as} y 3^{as} de la cuña como barrenos ayudante y contraayudantes respectivamente. Estos términos aparecen en la figura V.8 en donde se analiza la separación que debe haber entre los barrenos contraayudantes y de éstos al centro de la cuña primaria.

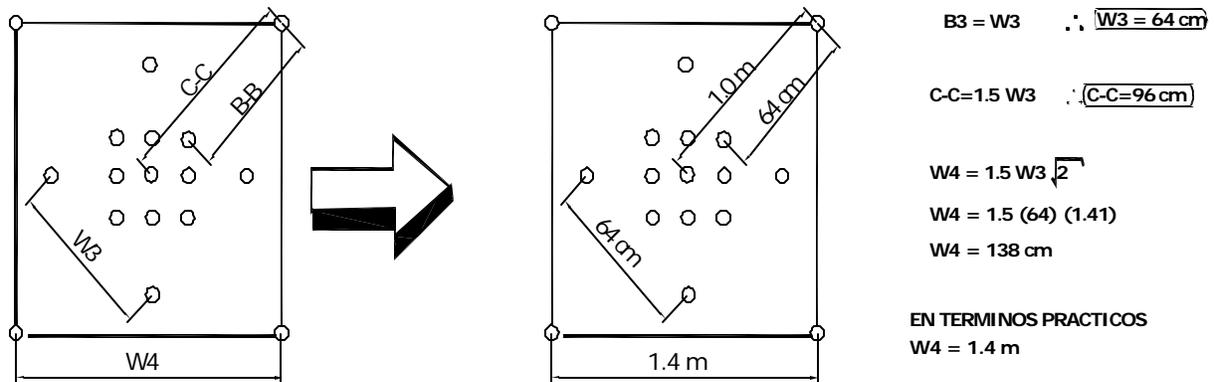


Fig. V.8. Barrenos contraayudantes de cuña.⁽¹⁶⁾

Por lo que respecta a las concentraciones de carga de columna a utilizar, en la gráfica que sigue figura V.9, se aprecia que para la cuña primaria se debe usar $Q_c = 0.4 \text{ kg/m}$.

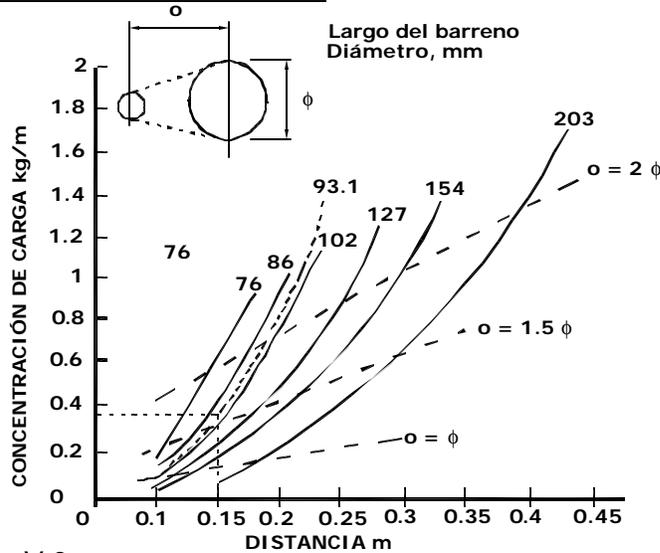


Fig. V.9 Concentración de carga mínima requerida y máxima separación de barrenos en la cuña.⁽¹⁶⁾

Por otra parte, para determinar las cargas de las dos rondas siguientes de la cuña, se utiliza la gráfica siguiente (figura V.10), donde podemos observar que para los barrenos ayudantes con $B = 30$ cm se recomienda una concentración de carga mínima de $Q_c = 0.4$ kg/m y en el caso de los barrenos contraayudantes con $B = 65$ cm, la concentración de carga requerida es de $Q_c = 0.7$ kg/m.

En el fondo del barreno la roca presenta un mayor grado de confinamiento, por lo tanto, es de esperarse que en esta parte requiera una mayor concentración de carga y no así en la parte cercana a la cara libre, debido a lo anterior en cada barreno cargado se pueden definir tres zonas: el fondo con una carga alta, la columna con una carga media y una zona sin cargar denominada taco (fig V.11).

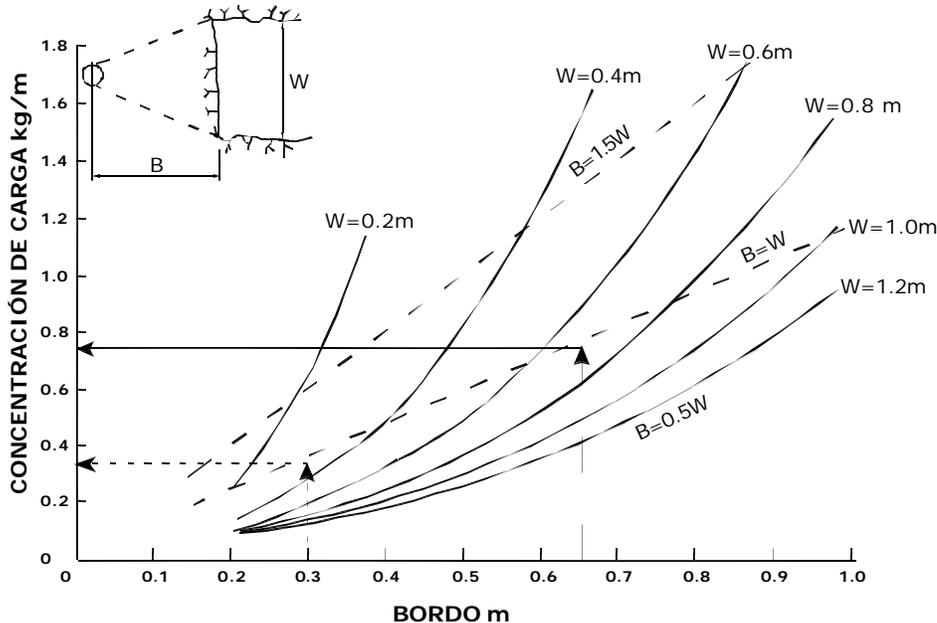


Fig. V.10 Concentración de carga requerida en barrenos ayudantes y contraayudantes.⁽¹⁶⁾

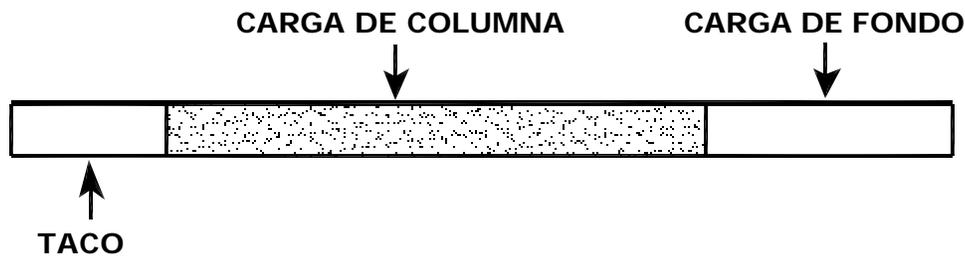


Fig. V.11. Distribución de cargas en el barreno.⁽¹⁶⁾

Las concentraciones de carga calculadas a partir de las gráficas anteriores, corresponden a las cargas de columna (Q_c), para obtener las cargas de fondo (Q_f), se duplica el valor de la carga de columna, la longitud de la carga de columna (F) está dada por $(1.5 \times B)$, siendo B el bordo libre, mientras que la longitud de la zona sin cargar (T) se define como $(0.5 \times B)$.

Por lo anterior se determina que:

Si $F = 1.5 \times B$ y $T = 0.5 \times B$, excepto en la cuña primaria donde $F = 45$ cm y $T = a = 15$ cm.

Para los barrenos ayudantes con $B = 30$ cm.
 $F = 45$ cm, $Q_f = 0.8$ kg/m y $T = 15$ cm.

Para los barrenos contraayudantes con $B = 65$ cm.
 $F = 100$ cm, $Q_f = 1.4$ kg/m y $T = 30$ cm.

Destrosa. Cuando los barrenos de la cuña se han calculado, es posible realizar el cálculo para los barrenos restantes. La destrosa puede ser dividida en barrenos de:

- Piso
- Pared
- Techo
- Destrosa con rompimiento hacia arriba y horizontal
- Destrosa con rompimiento hacia abajo.

La figura V.12 indica que para un diámetro de barrenación de 38 mm y un alto explosivo con densidad de 1.2 g/cm^3 , la concentración de la carga de fondo $Q_f = 1.35$ kg/m y un bordo de 98 cm, el cual se consideró por razones prácticas $B = 1.0$ m.

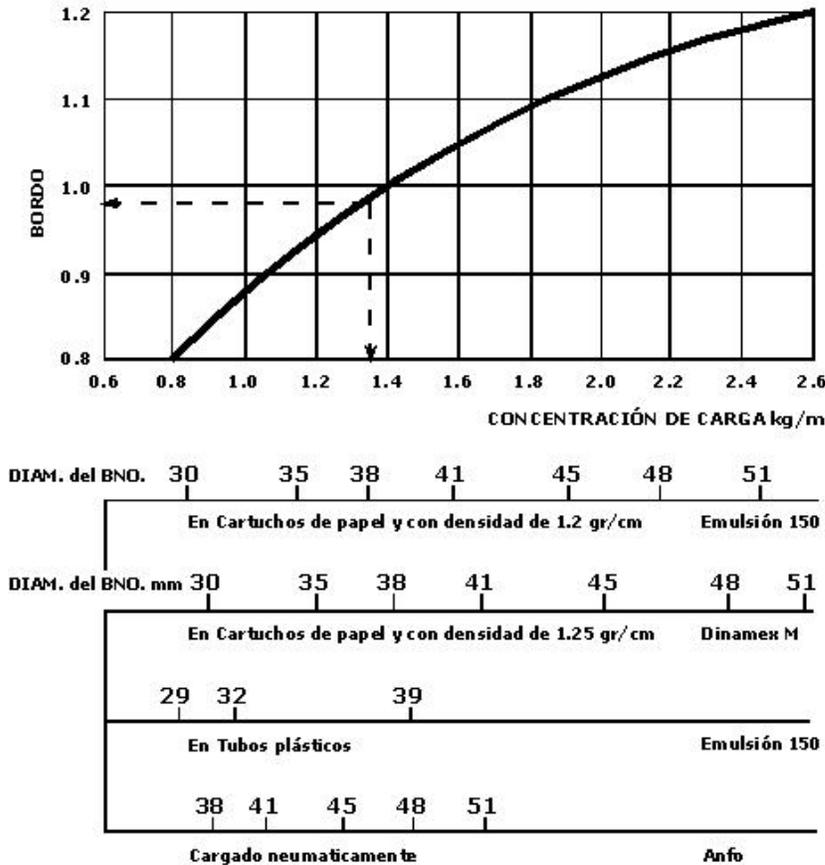


Fig. V.12 Bordos en relación a la carga de fondo o alto explosivo para diferentes productos y diámetros de barrenos.⁽¹⁶⁾

Para determinar los parámetros de cada tipo de barreno, se utilizan las fórmulas incluidas en la tabla V.1.

BARRENO EN	BORDO (m)	ESPACIAMIENTO (m)	LONGITUD C. FONDO (m)	CONCENTRACIÓN DE CARGA		TACO (m)
				FONDO kg/m	COLUMNA kg/m	
PISO	1 x B 1.0 m	1.1 x B 1.1 m	1/3 x H 0.8 m	Qf 1.35 kg/m	1 x Qf 1.35 kg/m	0.2 x B 0.2 m
PARED	0.9 x B 0.9 m	1.1 x B 1.1 m	1/6 x H 0.38 m	Qf 1.35 kg/m	0.4 x Qf 0.54 kg/m	0.5 x B 0.5 m
TECHO	0.9 x B 0.9 m	1.1 x B 1.1 m (0.32)*	1/6 x H 0.38 m	Qf 1.35 kg/m	0.3 x Qf 0.40 kg/m	0.5 x B 0.5 m
DESTROSA H. ARRIBA	1 x B 1.0 m	1.1 x B 1.1 m	1/3 x H 0.8 m	Qf 1.35 kg/m	0.5 x Qf 0.68 kg/m	0.5 x B 0.5 m
DESTROSA HORIZONTAL	1 x B 1.0 m	1.1 x B 1.1 m	1/3 x H 0.8 m	Qf 1.35 kg/m	0.5 x Qf 0.68 kg/m	0.5 x B 0.5 m
DESTROSA H. ABAJO	1 x B 1.0 m	1.2 x B 1.2 m	1/3 x H 0.8 m	Qf 1.35 kg/m	0.5 x Qf 0.68 kg/m	0.5 x B 0.5 m

Tabla V.1. Concentraciones de carga en barrenos de destrosa.⁽¹⁶⁾

De la tabla V.2 se pueden observar algunos detalles, los cuales pueden depurarse para obtener los valores reales de las cargas.



BARRENOS EN	CONCENTRACIÓN DE CARGA		LONGITUD CARGADA		TACO (m)	CARGA POR BARRENO (kg)	Nº BROS	CARGA TOTAL (kg)
	FONDO (kg/m)	COLUMNA (kg/m)	FONDO (m)	COLUMNA (m)				
CUÑA PRIMARIA	0.80	0.40	0.45	1.70	0.15	1.04	3	3.12
AYUDANTES	0.80	0.40	0.45	1.70	0.15	1.04	4	4.16
CONTRA-AYUDANTES	1.40	0.70	1.00	1.00	0.30	2.10	4	8.40
PISO	1.35	1.35	0.80	1.30	0.20	2.84	4	11.34
PARED	1.35	0.54	0.38	1.42	0.50	1.28	6	7.60
TECHO	1.35	0.40	0.38	1.42	0.50	1.08	7	7.57
DESTROSA	1.35	0.68	0.80	1.00	0.50	1.76	10	17.60
TOTALES							38	59.87

Tabla V.2. Principales datos teóricos de la plantilla.⁽¹⁶⁾

1. Los valores de concentración de carga en la columna son muy bajos si se considera que el agente explosivo utilizado (ANFO), tiene una concentración de carga de 1 kg/m. Por lo tanto es necesario ajustar algunos valores como por ejemplo la longitud del taco, con el fin de que baje la carga del barreno, siempre y cuando no afecte en forma adversa el cálculo.
2. El alto explosivo utilizado se presenta en cartuchos de 2.54 X 20 cm, por otra parte el diámetro de barrenación real es de 39 mm. Dadas estas dimensiones, al introducir el cartucho en el barreno queda un espacio entre ellos, el cual se rellena posteriormente con ANFO, para tener presente esta carga extra se calculó un factor que equivale al peso del ANFO extra y es de (0.12 kg), éste se adiciona al peso del bombillo (0.11 Kg) y se obtiene un total de 0.23 kg/bombillo.
3. Otro factor por considerar es que, a los barrenos ubicados en el techo se les debe reducir la carga normal en aproximadamente 50%.

Haciendo válidas las observaciones anteriores se procede a calcular las cargas finales reales que se usaron para la excavación de las galerías tabla V.3.



BARRENOS EN	CANTIDAD BÑOS CARGADOS	LONGITUD CARGA DE FONDO (m)	ALTO EXPL. POR BÑO (kg)	ANFO EXTRA (kg)	LONGITUD CARGA DE COLUMNA (m)	BAJO EXPL. POR BÑO (kg)	LONG. TACO (m)	CARGA POR BÑO (kg)	CARGA TOTAL (kg)	CANTIDAD BÑOS SIN CARGA	CANTIDAD TOTAL BÑOS.
CUÑA PRIMARIA	3	0.40	0.23	0.24	1.60	1.60	0.30	2.07	6.21	6	9
AYUDANTES	4	0.40	0.23	0.24	1.40	1.40	0.30	1.87	7.48	0	4
CONTRA AYUDANTES	4	0.40	0.23	0.24	1.30	1.30	0.60	1.77	7.08	0	4
PISO	4	0.60	0.35	0.36	1.20	1.20	0.50	1.91	7.64	0	4
PARED	6	0.40	0.23	0.24	1.30	1.30	0.60	1.77	10.62	0	6
TECHO	7	0.20	0.11	0.12	0.50	0.50	1.60	0.73	5.11	8	15
DESTROSA	10	0.40	0.23	0.24	1.00	1.00	0.90	1.47	14.70	0	10
TOTALES	36								38.84	14	52

Tabla V.3. Cargas finales reales.⁽¹⁶⁾

Cabe aclarar que los términos concentrados de carga de fondo y la columna en el caso que nos ocupó, fue válido tomar como sinónimos las palabras alto explosivo (emulsión) y bajo explosivo o agente explosivo (ANFO); mientras que por taco, queremos decir, la distancia de la boca de cada barreno a donde inicia la carga de ANFO y que es un espacio vacío en la perforación y que será variable para cada parte del frente a excavar.

Como existía una tolerancia para sobreexcavaciones de 20 cm solamente y además, es importante dar la forma semicircular a la bóveda de las galerías, se hizo necesario cerrar un poco más los barrenos de esa parte, entonces, utilizando el criterio de Hoek y Brown 1980, en donde se señala que el espaciamiento de barrenos de contorno controlado es de 15 a 16 veces el diámetro de los mismos, de donde tenemos que usar un diámetro de 38 mm, el espaciamiento entre ellos deberá ser de entre 57 y 61 cm por lo que en términos prácticos se dejó en 60 cm y no en 1.1 m como señalaba la tabla anterior, haciéndose necesarios 9 barrenos de techo cargados, pero se decidió incluir 8 más intercalados entre ellos sin cargar para conformar aún más la bóveda.

Como se puede observar los resultados de las dos tablas anteriores, la teórica y la práctica, son muy similares (tablas IV.5. y IV.6.).

Con el fin de comprobar los resultados del análisis anterior, considerando un volumen teórico a excavar de 23.53 m³, y con la carga total real se puede obtener la densidad de carga.

$$\text{Densidad de carga} = 58.84 \text{ kg} / 23.53 \text{ m}^3 = 2.5 \text{ kg/m}^3$$

De lo anterior, se desprende que serían necesarios 52 barrenos, de los cuales 38 son cargados y 14 de corte o de cuña (vacíos) y su disposición se puede ver en la figura V.13.

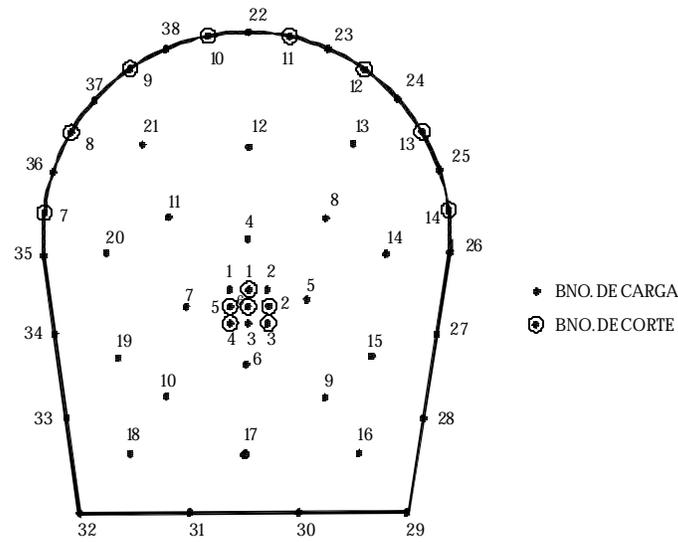


Figura V.13 Numeración de barrenos⁽¹⁶⁾

Sus espaciamientos prácticos y que fueron finalmente los que se estandarizaron en las voladeras de galerías, se muestran esquemáticamente en la figura V.14

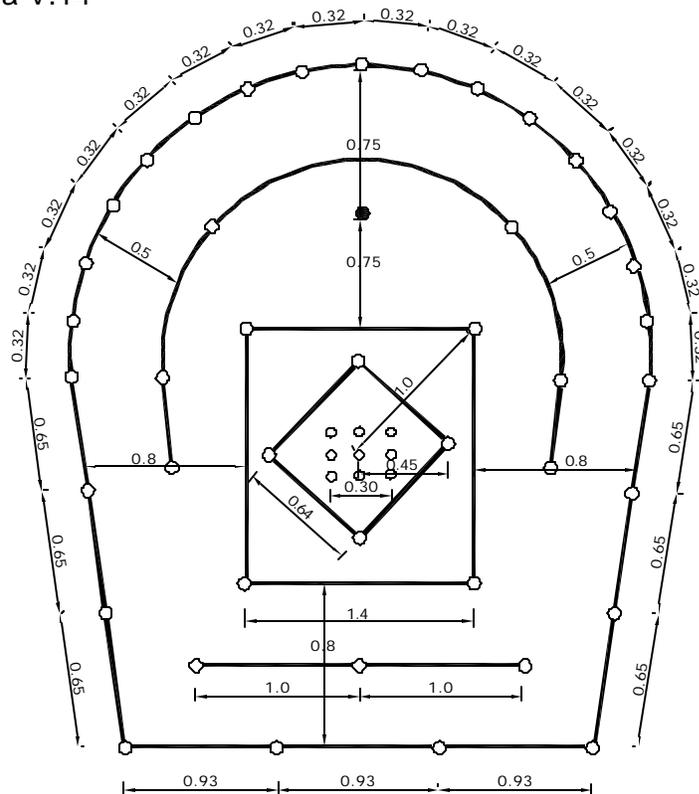


Fig. I.14 Distribución practica de barrenos.⁽¹⁶⁾

Por último, el orden de encendido fue el que se muestra en la figura V.15 y en general, se basó en el uso de estopines no eléctricos de retardo largo. Se utilizaron 15 tiempos comenzando los 3 primeros en la cuña, después los



ayudantes, contraayudantes, producción lateral, producción de gravedad, tablas, techo y por último piso. La distribución de barrenos por retardo se ajustó también a la norma particular de la obra de que sólo se permitiría 7 kg de explosivo máximo por retardo en una voladura de galería.

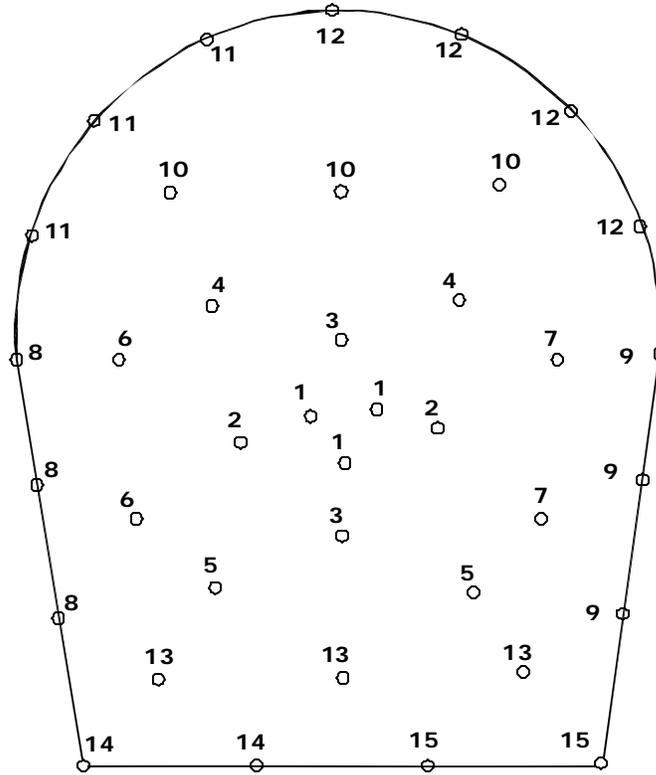


Fig. V.15. Orden de encendido.⁽¹⁶⁾

Carga de barrenos.

Los pasos que integran el proceso de carga manual de barrenos, constó de las etapas siguientes:

- *Soplado o limpieza de barrenos.* Esta actividad se realizó introduciendo una boquilla metálica de ½" de grueso y de aproximadamente 2.5 m de largo. Esta boquilla o soplador, como se le conoce en términos de excavación subterránea y minería, se conectó a la línea de aire (1") que se utilizó para las perforadoras. Esta actividad pretendió limpiar el fondo del barreno, sobre todo de las partículas de roca y lodo del proceso de perforación, así como del agua que pudiera haber existido en el orificio. Esto con la finalidad de garantizar que el explosivo a introducir alcanzara perfectamente el fondo de la perforación y que no existiera agua en el mismo que fuera capaz de demeritar las propiedades de los explosivos que ahí se alojaban.



- **Introducción de alto explosivo.** En esta parte del proceso, se introdujo en el orificio el alto explosivo, cebo o espoleta, que tiene la función de propagar al agente explosivo la detonación de cada barreno. A él, debe ir conectado algún artefacto de inicio, que en este caso, se trató de estopines no eléctricos de retardo largo. Cabe destacar, que este dispositivo de inicio se debe colocar en la parte más profunda del orificio es decir, introducirse en el primer bombillo si fuera el caso en que en un barreno dado hubiera que introducir varios de ellos, tal cual fue el caso. La ubicación correcta del iniciador dentro del primer bombillo de alto explosivo es como ilustra la figura V.16.

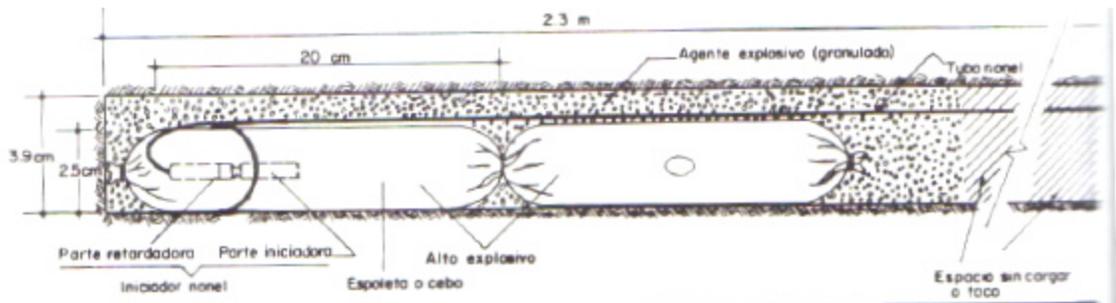


Fig. V.16 Ubicación del explosivo dentro de un barreno⁽¹⁶⁾

- **Introducción del bajo explosivo.** Posterior a la introducción del alto explosivo, que como hemos dicho puede estar constituido de uno o varios cartuchos, se procedió a la carga del bajo explosivo o agente explosivo. En este caso, se utilizó explosivo granulado tipo ANFO. Este explosivo, se cargo por medio de un dispositivo de sifón neumático con el que se permitió cargar al agente dentro del barreno, tomándolo por una manguera desde los sacos tal cual es su presentación como se muestra en la figura V.17. Cabe destacar, que las mangueras, al menos las de lanzado, debieron ser de plástico antiestático con el fin de no producir descargas por fricción en el interior del barreno. La longitud de carga es variable para cada zona del frente, es decir, la longitud que queda vacía entre la parte del barreno relleno y la boca del mismo, llamada taco, variara según la zona en que se localice el barreno en el frente.

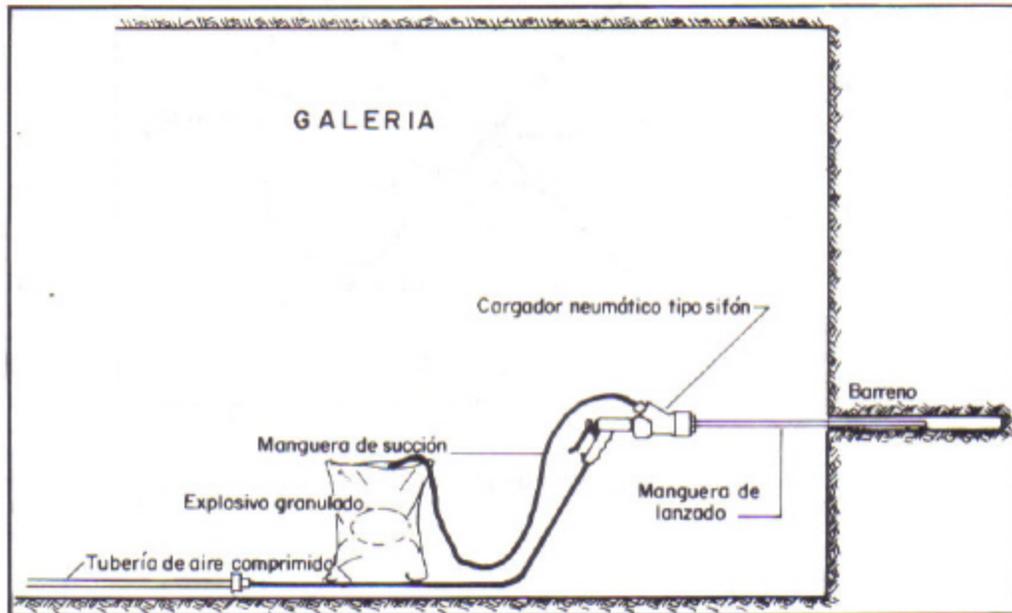


Fig. V.17 Proceso de carga de un explosivo granulado⁽¹⁶⁾

- **Conectado.** Este es el último paso y se lleva a cabo, por medio de unir todos los conectores de los estopines no eléctricos a un trozo de cordón detonante, al cual a su vez, se amarra un estopín eléctrico de cualquier tiempo de retardo. La figura V.18 esquematiza lo anterior.

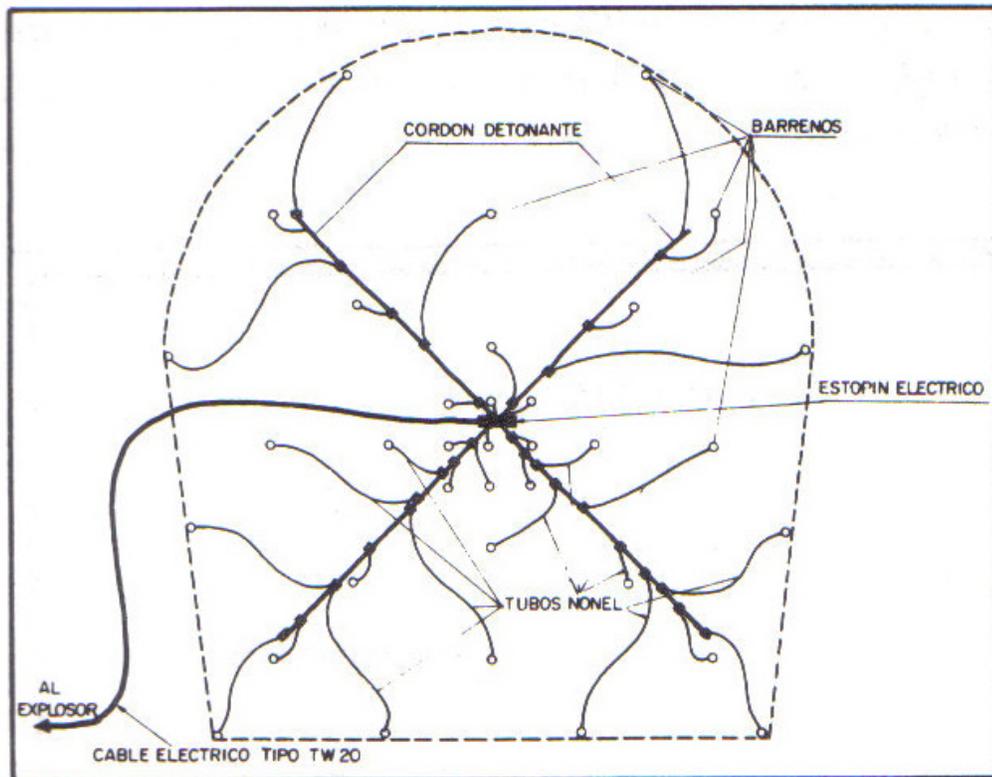


Fig V.18 Esquema de conectado para la voladura⁽¹⁶⁾



Voladura

Una vez conectados todos los barrenos del frente a la línea de voladura, se procedió a desalojar las áreas cercanas implicadas, se hicieron las advertencias necesarias por medio de sirenas y se procedió a realizar la voladura.

Ya que el personal desalojo la zona de la galería a detonarse, se tomo el cable eléctrico de voladura, se conecto a un explosor eléctrico y se activó la voladura desde superficie como lo muestra la figura V.19.

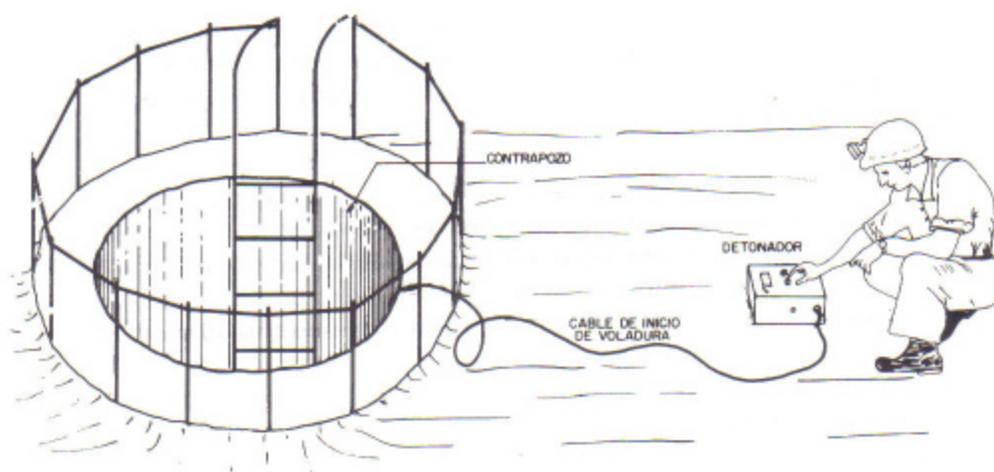


Fig. V.19 Activación de la voladura⁽¹⁶⁾

Se debe recordar que con el explosor eléctrico se detona el único estopín eléctrico colocado en el frente y éste a su vez induce la detonación al cordón detonante propagándose así el encendido de cada barreno. Ya en cada barreno, se acciona la cápsula de retardo de cada tiempo respectivo en que corresponde a cada sitio del frente, realizándose entonces la voladura en los microintervalos programados.



CONCLUSIONES

La ingeniería de túneles abarca muchos temas considerables, es por eso que en este trabajo de tesis cumple con el objetivo de analizar el tema en particular del uso de explosivos y las técnicas para voladuras en túneles y se concluye que:

En la realización de cualquier obra de ingeniería, el ingeniero busca combinar los factores de seguridad, funcionalidad y economía. Por ello en la construcción de túneles deben estudiarse a fondo las características del medio natural en que han de realizarse, determinando el método a seguir así como los posibles beneficios o perjuicios de su aplicación además de elegir alternativas de solución viables.

Es por eso que ningún método de cálculo puede pretender ser totalmente aplicable a todas las condiciones, pero cuanto mayor sea el número de factores implicados en el problema, mayor será el campo de aplicabilidad de dicho método.

Dentro de los análisis preliminares los estudios topográficos resultan ser de capital importancia en el diseño y economía del proyecto, ya que de estos depende que los trazos de perforación sean exactos.

Los estudios del macizo rocoso, proporcionan información valiosa sobre las propiedades y el comportamiento de este. Sin embargo, el reconocimiento geológico es insuficiente por sí solo y debe acompañarse de una clasificación de tipo mecánico en el caso de la información necesaria para los criterios de diseño. Ya que para los estudios definitivos y la construcción del túnel, los estudios geológicos son de suma importancia tanto para la proyección de la obra como para la orientación final que deberá tener el túnel con respecto a la estratificación que guarda la masa de roca.

Los ensayos de campo son otra de las partes importantes de los estudios preliminares ya que son básicos en el criterio de diseño, para el análisis de esfuerzos alrededor de la excavación, mediante los cuales se genera la información necesaria sobre el comportamiento del macizo rocoso en presencia de la oquedad artificial.

Con respecto a los métodos de excavación de túneles dependen en primer lugar, y de forma fundamental, del tipo de terreno a atravesar, tomando en cuenta la distribución de fallas o fisuras, el echado de los mantos, la composición de la formación, etc. De este modo cabe hablar por separado de la excavación de túneles en roca y de la excavación de túneles en suelos o terrenos blandos. En el presente trabajo de tesis nos enfocamos siempre a la excavación en roca debido a que en este tipo de excavaciones es común el uso de explosivos.

La excavación de túneles en roca se divide en dos partes básicamente:

- 1) La perforación y voladura, mediante el uso de explosivos
- 2) La excavación mecánica, mediante tuneladoras o topes (TBM), diseñados especialmente para este fin.

De estas dos partes la perforación y voladura es lo más utilizado para túneles en roca y el único posible cuando la roca es muy abrasiva, muy resistente o se encuentra en estado masivo. Básicamente consiste en efectuar



unos barrenos en el frente de la excavación, cargándolos con explosivos y haciéndolos detonar. La reacción explosiva genera energía en forma de presión de gases y energía de vibración, capaz de quebrantar la estructura de la roca.

Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de este sistema son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
- Perforación de los barrenos.
- Carga de los barrenos con explosivo.
- Voladura y ventilación.
- Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

Cabe señalar que el esquema de tiro es la disposición en el frente del túnel de los barrenos que se van a perforar, la carga de explosivo que se va introducir en cada uno y el orden en que se van a hacer detonar.

Quizás el ingeniero no tenga conocimientos profundos sobre la química y física de los explosivos no obstante, debido a que la evolución de estos en México está íntimamente ligada a la ingeniería civil y su desarrollo está basado en la observación de los resultados y métodos específicos aplicados a las condiciones geológicas del subsuelo mexicano debe comprender el funcionamiento, los tipos y clases de explosivos.

Dentro del funcionamiento de los explosivos se reconoce que estos son sustancias o compuestos químicos y que precisamente mediante una reacción química se convierten en gases liberando presión y calor muy altos, en todas las direcciones y en vista de que no todos los explosivos tienen las mismas propiedades como por ejemplo la velocidad de detonación se debe tener un cuidado especial al momento de seleccionar el tipo de explosivo a utilizar.

En cuanto a los tipos de explosivos, en el pasado, la pólvora negra se utilizó en la construcción de túneles; después, ésta fue desplazada por la dinamita, hoy en día y después de una serie de perfeccionamientos, los explosivos del tipo hidrogel y los granulados de nitrato de amonio, tienen múltiples aplicaciones; recientemente, las innovaciones tecnológicas han permitido el desarrollo de un nuevo tipo de explosivos: las emulsiones, ensanchándose así las aplicaciones de los explosivos en México.

Con respecto al diseño de voladuras se debe elegir el método que de mejores resultados debido a que es extremadamente importante que la roca circundante quede libre de fisuras, pues en caso contrario pierde la totalidad o una parte de sus propiedades de autosostenimiento.

Un factor muy importante en cualquier método de voladura es la elección del diámetro de los barrenos. En este caso el factor de limitación reside en su sección. Una parte considerable de ésta se emplea para los cueles y barrenos del contracuele, y estos barrenos no pueden perforarse en general mucho más separados entre sí cuando son barrenos pequeños de unos 30 mm comprobando así la hipótesis que para cada aplicación existe un diámetro idóneo de perforación.

En el caso del método de frente completa es usado comúnmente en túneles de pequeño y mediano tamaño, mientras que el método de ataque superior y banco se aplica en túneles de más de 10 metros de diámetro reduciendo así costos en la perforación y voladura. Las voladuras en



CONCLUSIONES



hundimiento como su nombre lo indica se utiliza para la construcción de pozos o tiros y en estos caso generalmente se trabaja con condiciones de humedad excesiva y es aquí donde se pueden utilizar ciertos de tipos de explosivos capaces de soportar dicha humedad.

De las técnicas más usadas es la sueca debido a sus ventajas ya que solo reside en la apertura de una cavidad inicial y la subsiguiente destroza de la totalidad de la sección rompiendo hacia dicha cavidad adecuándose al área de que se trate, la única desventaja es que cuanto más pequeña sea el área del frente, mas confinada está la roca, y esto implica que la carga específica aumenta al disminuir el área.

Los métodos de las cuñas en V, las cuñas de Pirámide y en barrenación paralela, son variaciones de la técnica sueca de voladura y se utilizan de acuerdo al tipo de roca y sus características como ya se ha mencionado en el trabajo.

El método de recorte es estandarizado para las voladuras en túneles debido a que el empleo del explosivo con una reducida concentración de carga por metro provoca menor sobre excavación entre otras ventajas. Además de la perforación y carga de los barrenos de contorno, el encendido es también un factor de importancia. En túneles, frecuentemente es necesario utilizar el número alto de retardo de la pega en los barrenos de contorno, lo que implica que, si se usan detonadores de retardo (de medio segundo), hay un lapso considerable de tiempo entre la iniciación de los barrenos de recorte que resulta inconveniente.

En casos especialmente sensibles, se han detonado los barrenos del recorte por separado, después de la pega principal, haciendo así posible el empleo de detonadores de microrretardo.

Solo se hace una aclaración con respecto al método de recorte, las voladuras en que los barrenos de contorno llevan los mismos retardos, y son iniciados al mismo tiempo que el resto de la pega, no pueden ser considerados como verdaderos recortes, excepto en el caso de una voladura subterránea.

En cuanto al método de precorte este ha tenido una menor utilización subterránea, no obstante, se han obtenido buenos resultados en pozos verticales.

Se ha demostrado que es muy posible realizar el precorte del contorno de un túnel. En los túneles se emplea un procedimiento de voladura diferente al que se usa a cielo abierto, con objeto de evitar que el trabajo de perforación aumente excesivamente. Las voladuras de ensayo con barrenos provistos de cargas potentes, en una pega con capacidad para arrancar la roca a lo largo de la cara de precorte han demostrado ser una posible dirección de desarrollo del método.

Con el fin de demostrar que el uso correcto de los explosivos y el diseño adecuado de los métodos de voladuras se pueden traducir en obras seguras y viables en el último capítulo se plasma el proceso de excavación de las galerías de inyección, drenaje e inspección en el sitio de cortina de la presa hidroeléctrica Zimapán en el estado de Hidalgo y llevada a cabo por la Comisión Federal de Electricidad, es aquí donde se explica en base a que se determino el procedimiento a seguir.



CONCLUSIONES



Otras muestras de construcción de túneles en México son: el de la Loma Larga de Monterrey; el Maxitúnel, Los Querendes, Agua de Obispo y Tierra Colorada, de la autopista del Sol; la Venta e Ibero, de la México – Toluca; Gemelos, Contadero, de la carretera Contadero – San Jerónimo; y Xicotepac II, de las Pirámides – Tulancingo – Tuxpan.

Cabe recalcar que para lograr que una obra cumpla con las expectativas que de ella se esperan, es muy importante que en la seguridad, funcionalidad y economía se ponga un especial empeño por mantener un nivel de calidad adecuado, para lograr la calidad total deben ser cubiertas cada una de las etapas del proceso, involucrando una actitud que promueva la ejecución de cada actividad con responsabilidad profesional.

En la etapa del proyecto se tienen que aplicar los conceptos que den resultados que optimicen el aspecto económico y el técnico, siendo responsabilidad del proyectista estar informado sobre los últimos adelantos tecnológicos en el ramo de la ingeniería cuya aplicación en la obra sea factible. El conocimiento de las características del medio en que se realizará la obra, nos ofrecerá la base para el diseño de cada uno de los elementos del túnel, además de prever los posibles factores que influirán de manera desfavorable en el desarrollo de la obra. Por ello, es de gran importancia conocer bien el lugar donde se realizará la construcción, para ver que problemas presenta dicho sitio y que tratamiento es el más adecuado para afrontarlos. Para lograr este fin es necesario realizar exploraciones y obtener muestras representativas del terreno.

La etapa de la programación, debe llevarse a cabo con estricto apego a las condiciones de la obra basándose en experiencias de obras similares, procurando siempre que su ejecución sea posible y manteniendo además un grado de holgura aceptable.

Por último, el ejecutor de la construcción debe cumplir las especificaciones del proyecto, además de respetar el programa de ejecución de la obra, para evitar trastornos que podrían alterar la disponibilidad de recursos en cierta etapa de la misma, teniéndose como consecuencia retrasos con respecto al programa que podrían ser irrecuperables.

En la medida que se cumplan todas las etapas al pie de la letra y que exista un flujo de información continuo y consecutivo y que cada uno asuma sus responsabilidades, será posible el surgimiento de una nueva forma de pensar y de actuar que son ya indispensables para elevar el nivel de competencia de la industria de la construcción en México.



BIBLIOGRAFÍA

1	Galabru, P., (1977) Cimentaciones y Túneles Editorial: Reverté, España.
2	Colegio de Ingenieros Civiles de México, (1966) Construcciones en Roca , Editorial: CRUMAR, México.
3	Mendoza González V., (1992) Perofracción, uso y manejo de explosivos en la construcción de la autopista Guadalajara-Tepic. Tramo: Magdalena- Santo Tomás. , Tesis profesional de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Puebla, México.
4	Széchy k., (1973), The art of tunnelling , Editorial: AKADÉMIAKIADÓ, Budapest. Hungría.
5	Megaw T.M., (1988) Túneles, planeación, diseño y construcción , Editorial: Limusa S.A. de C.V. México.
6	Peurifoy R.L., (1975) Métodos, planeamiento y equipos de construcción , Editorial: Diana, México
7	Rosales Hernández M.D., (2004) Sellado de filtraciones en túneles a base de inyecciones de silicatos dentro de un macizo rocoso de origen ígneo. , Tesis profesional de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, México.
8	Calderon Gómez A., (1999) Criterios de ubicación de tuberías forzadas dentro de los macizos rocosos. , Tesis profesional de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, México.
9	Tapia Gómez A., (1999) Topografía Subterránea , Editorial: Alfaomega, México.
10	Martínez Govea M. (1997), Uso de explosivos en obras de ingeniería civil , Editorial: FUNDACIÓN ICA, México
11	Favela Lozoya F., (2001) Excavaciones y terracerías , Internet: http://www.unam.mx/terracerias/
12	Espinace Aba rzúa R., (2004), Grupo de Geotecnia , Internet: http://icc.ucv.cl/geotecnia
13	Morcillo J.G., Pérez Porlables T. (2001) Tipos de rocas , Internet: http://www.ucm.es/info/diciex/programas/las-rocas/tiposderocas/principal1.html
14	Oyarzum R., Doblás M., (2005) Fallas y zonas de cizalla (parte 1): Aspectos generales , Internet: http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/fallas/FallasPrimeraParte.htm
15	Grupo Atlas Copco, (2003) Construcción y Minería , Internet: http://www.atlascopco.com/GETONBOARD/NASA/mx_onboard.nsf/framebuilder
16	Davila Serrano M., Arvizu Lara G., (1993) Excavación de las galerías de inyección, drenaje e inspección en el sitio de cortina del P.H. Zimapán Hgo. , Editorial: CFE, México.
17	Langefors U., (1976) Técnica moderna de voladuras de rocas. , Editorial: URMO, S.A., España.
18	Gustafsson R., (1977) Técnica sueca de voladuras , Editorial: SPI. Nora, Suecia.



BIBLIOGRAFÍA



NUMERO DE PAGINAS	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
1, 2, 7-13, 15, 41, 42, 49, 50, 53, 95-98	1
20-27, 31-40	2
99	3
3, 6, 7, 17, 18-19	4
3-5, 13-16, 70-82	5
54-69, 101, 140	6
102	7
27-31	8
51-53, 103-113	9
114-127, 131-133, 135, 139, 154-160, 163, 165-193	10
99, 100, 128-131, 134-139, 141-150	11
33	12
43-49	13
101, 102	14
83-94	15
194-209	16
153, 154	17
150-153, 161-165	18

FIGURA O FOTOGRAFIA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
I.1 A I.9, I.11, II.1, II.2, II.62 A II.64	1
I.18 A I.26, FOTOGRAFÍAS I.2 Y I.3	2
I.10, II.38 A II.43	5
II.23 A II.37, III.26	6
I.13 A I.16	8
I.12, II.19 A II.22, III.3 A III.7	9
III.8, III.15, III.18, III.19, III.24, III.33 A III.35, III.38, IV.1 A IV.3	10
III.1, III.9 A III.14, III.16, III.17, III.20 A III.23, III.25, III.27 A III.32	11
I.17 Y FOTOGRAFIA I.1	12
II.3 A II.18	13
III.2	14
II.44 A II.61	15
V.1 A V.19	16
III.36, III.37, III.39, III.40, III.41, III.42	18

TABLA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
I.1 A I.4	2
II.1 A II.5	6
III.1, III.7 A III.9, IV.1 A IV.3	10
III.2 A III.4,	11
V.1 A V.3	16
III.5 A III.7	18



A N E X O S

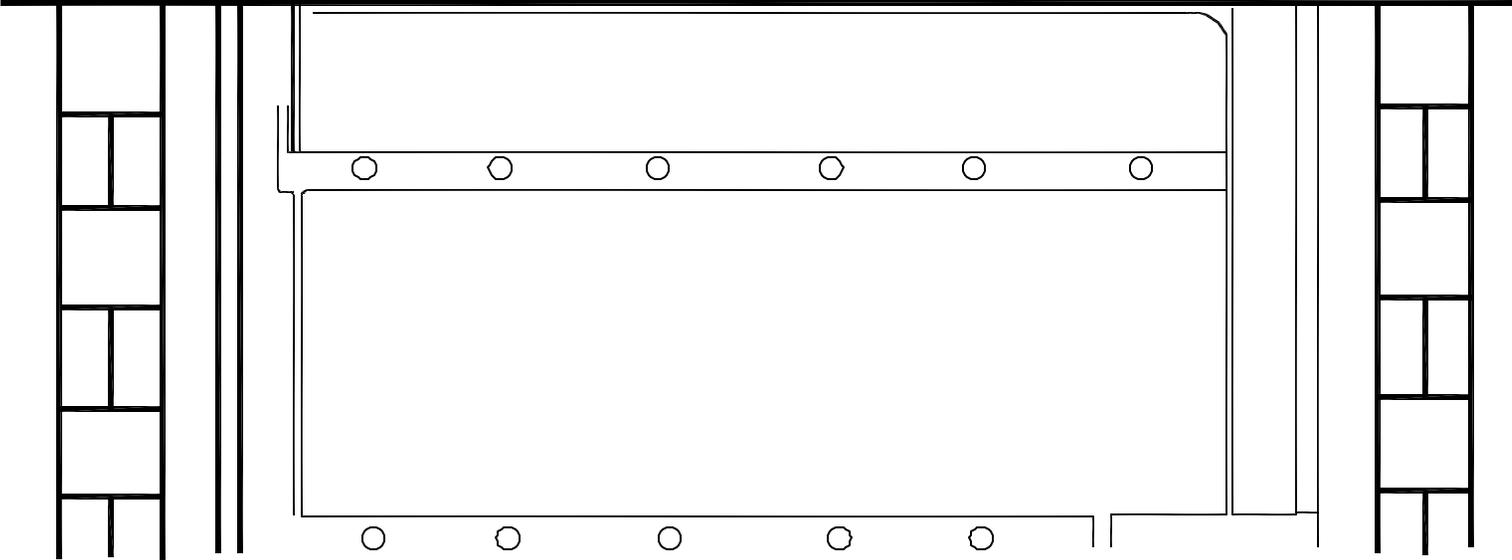


15.5

**PUERTA DE ACCESO
DETALLE**



**MARCO DE PUERTA
POLIN DE MADERA
2 PZAS DE 4" x 8"**



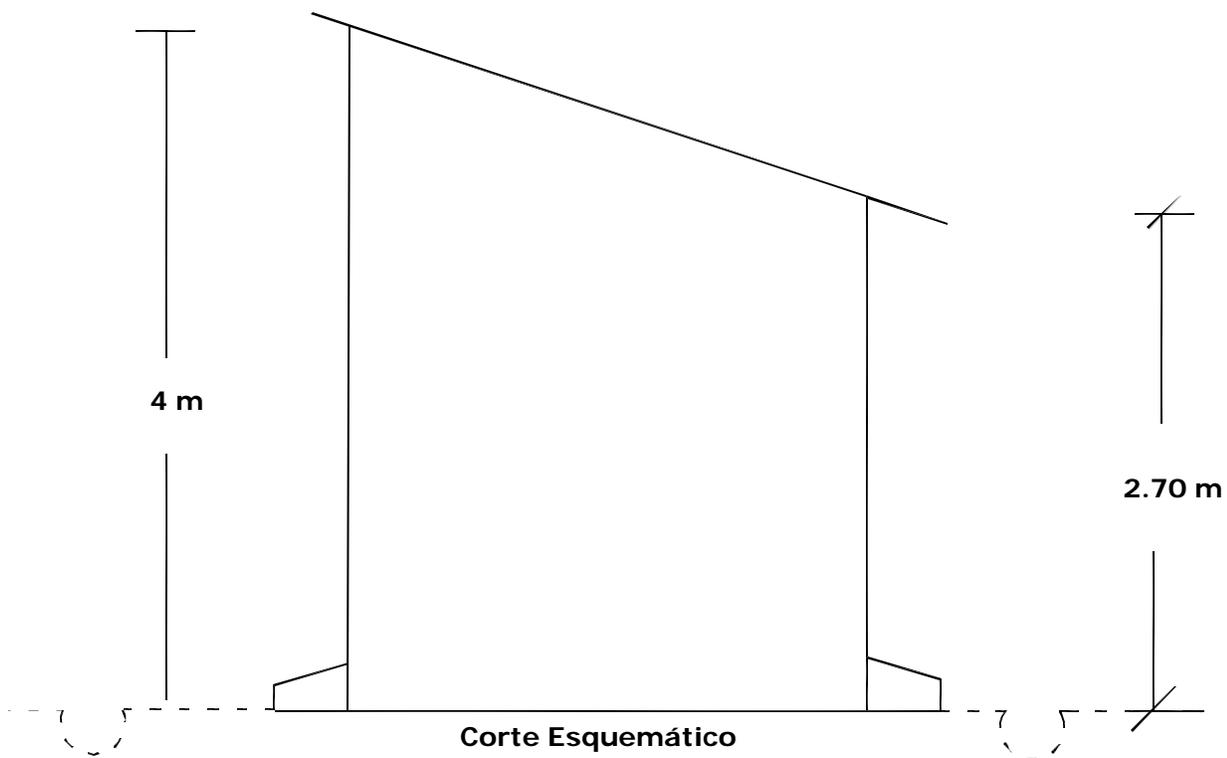
ANEXO N° 1

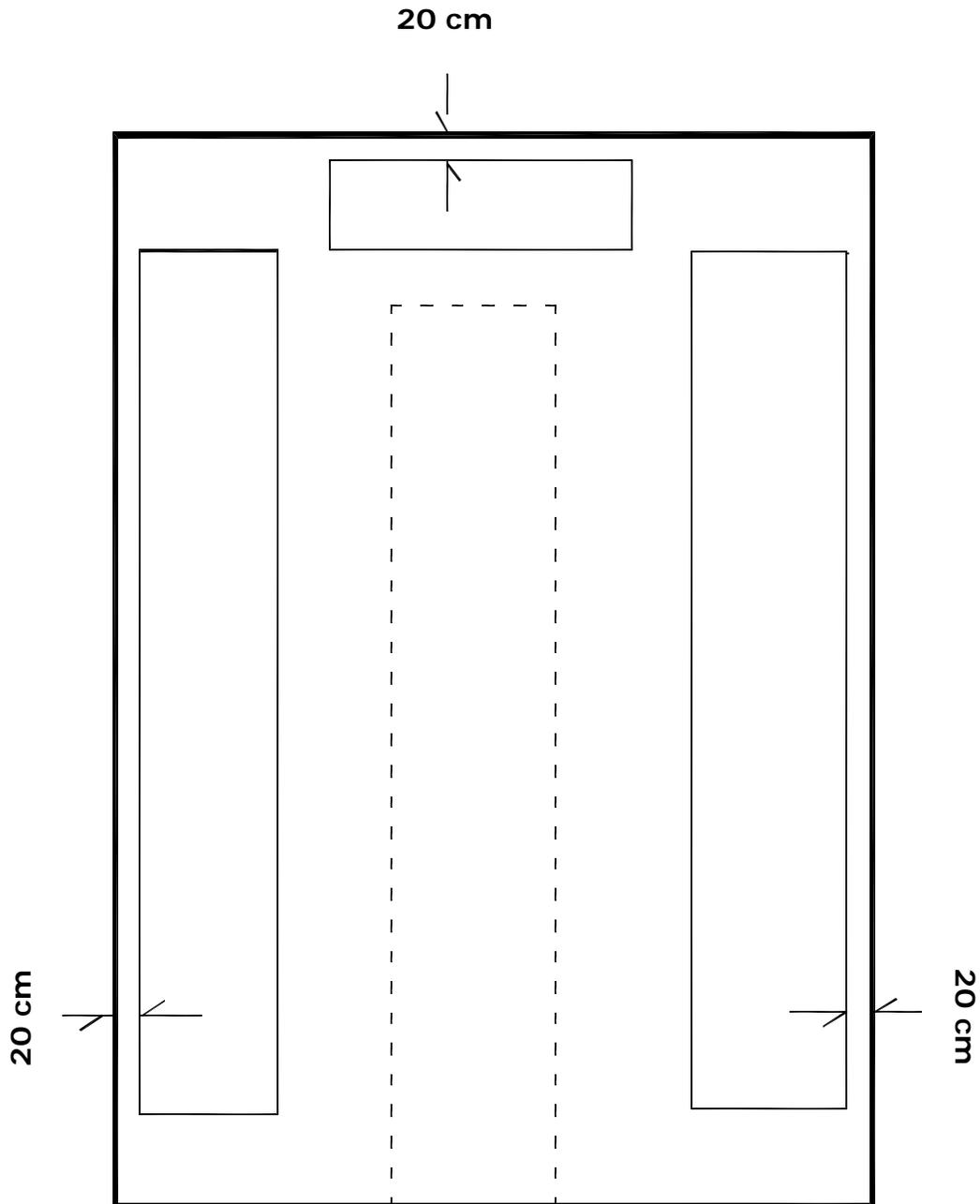


ANEXO N° 2

CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVORINES

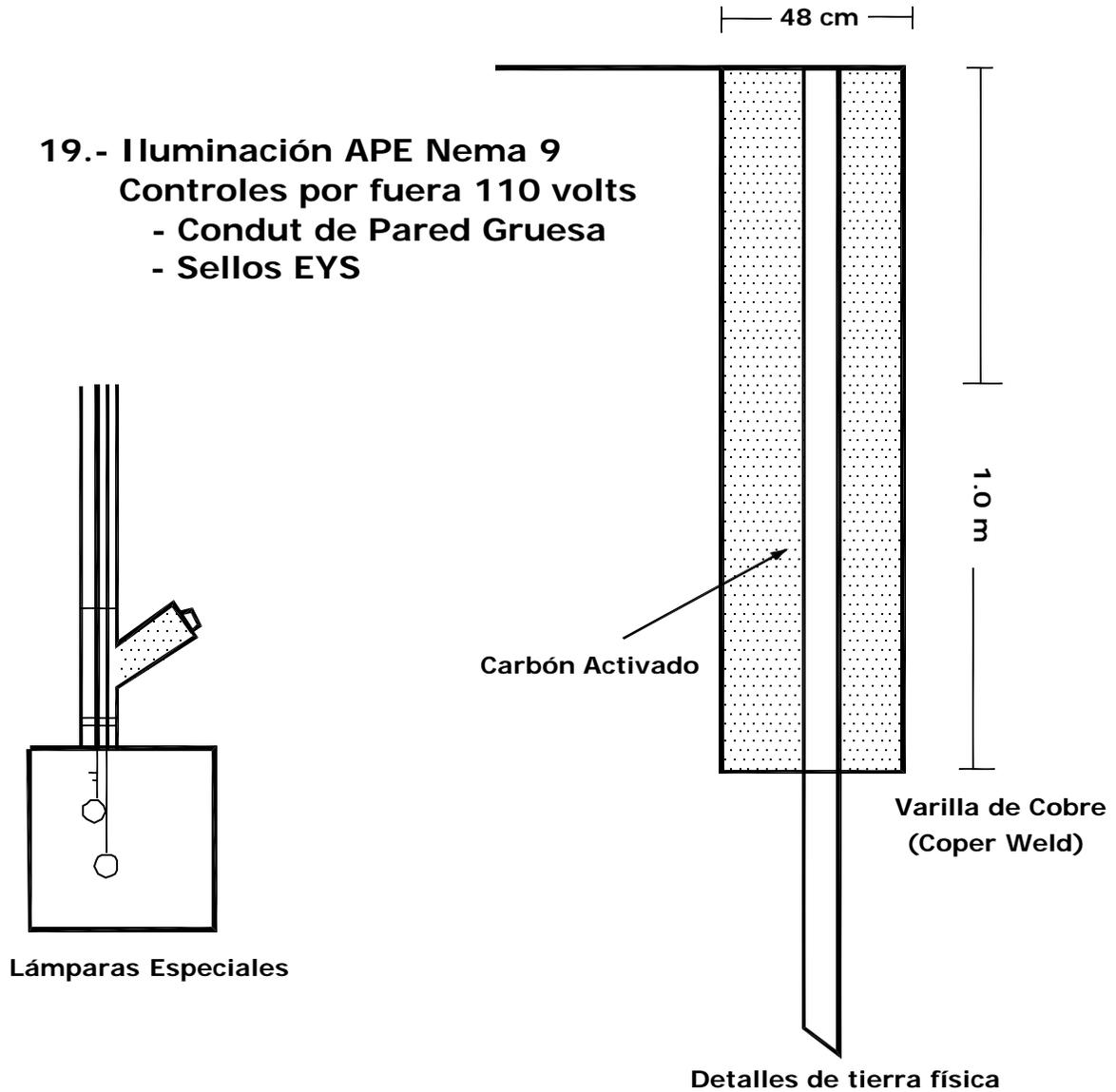
- 1.- Pendiente en Banqueta
- 2.- Dren Perimetral
- 3.- Pala y Pico disponibles
- 4.- Bote de Arena
- 5.- Extintidores (2)
- 6.- Puerta de Acero y Madera con Chapa y Candado
- 7.- Tierra Física
- 8.- Rejilla de ventilación con protección antirroedor
- 9.- Libre de Humedad
- 10.- Pisos pulidos y líneas de accesos





Planta Polvorín

- 11.- Separar estibas de paredes
- 12.- VIGILANCIA (24 Horas)
- 13.- Cercado
- 14.- Pararrayos
- 15.- Aplanado y Pintura
- 16.- Tarima de madera
- 17.- 20 m libre de materia orgánica alrededor
- 18.- Talud o protección natural



20.- Libro de registro de entradas y salidas

21.- Copia en cuadro del permiso

22.- Límite máximo de personas (letrero)

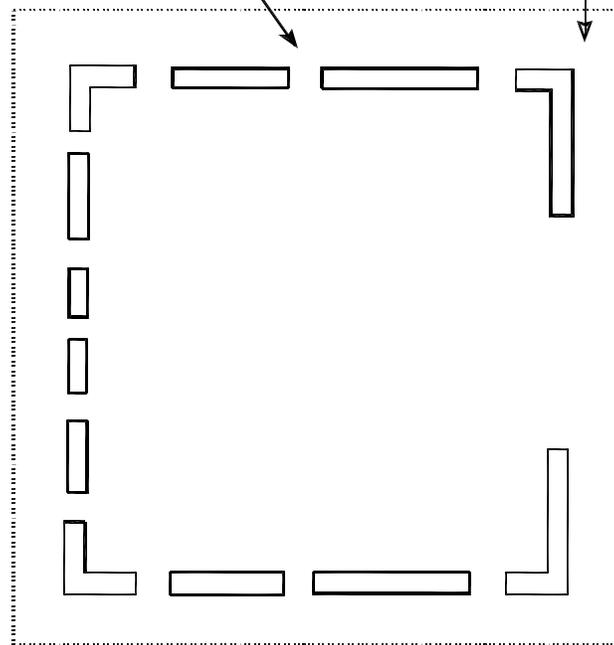
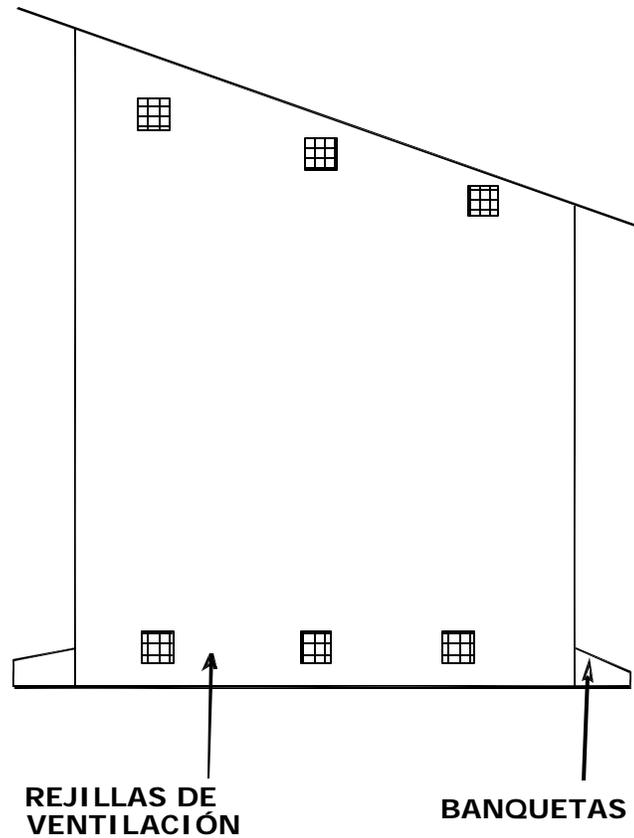
23.- Anuncios:

Polvorín No.

Peligro Explosivos

Prohibido Fumar

24.- Tambores de 200 l con agua



CROQUIS SIN ESCALA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS REJILLAS DE VENTILACIÓN