

01146



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**USO DE EXPLOSIVOS EN VOLADURAS DE
ROCA.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA (CONSTRUCCIÓN)
P R E S E N T A E L
ING. CÉSAR LEONEL RAMOS RODRÍGUEZ

**DIRECTOR DE TESIS: M. I. FERNANDO FAVELA
LOZOYA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F.,

AGOSTO DE 2004



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.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el gran apoyo incondicional que me han brindado para poder llegar hasta donde estoy.

A Dios por haberme dado la fortaleza y salud para terminar esta tesis y mi maestría.

A mi director de tesis, M.I. Fernando Favela Lozoya por sus invaluable asesorías.

A todos los maestros de la sección de construcción por sus buenas enseñanzas

A los maestros sinodales por sus buenas correcciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Universidad Autónoma de Sinaloa; por la gran oportunidad que me brindaron.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1.- Generalidades.....	4
Referencias.....	10
Capítulo 2.- Los Explosivos.....	11
2.1 Antecedentes de los explosivos.....	11
2.2 ¿Qué son los explosivos?.....	14
2.3 Propiedades de los explosivos.....	15
2.4 Tipos de explosivos más usuales.....	19
2.5 Puntos importantes para la selección de un explosivo.....	21
Referencias.....	25
Capítulo 3.- Artificios y dispositivos de iniciación en voladuras.....	26
3.1 Iniciadores.....	26
3.2 Disparos convencionales.....	27
3.2.1 Mecha de seguridad.....	27
3.2.2 Fulminantes.....	29
3.2.3 Estopines Eléctricos.....	30
3.3 Cordón detonante.....	31
3.3.1 Primacord reforzado.....	32
3.3.2 Cordón detonante E-Cord.....	33
3.4 Velocidad de explosión.....	34
3.5 Voladuras con estopines eléctricos.....	35
3.5.1 Selección del circuito.....	36
3.5.2 Fuente de energía.....	36
3.5.3 Eliminación de riesgos eléctricos.....	38
3.5.3.1 El multímetro.....	39
3.5.3.2 Galvanómetro.....	39

3.5.3.3 Óhmetro.....	40
3.5.3.4 Reóstato.....	40
3.5.4 Balanceo y descripción del circuito.....	41
3.5.5 Circuitos en serie.....	42
3.5.6 Circuitos en paralelo.....	43
3.6 Seguridad.....	45
3.6.1 Personal.....	45
3.6.2 Regresando al área de voladura.....	47
3.6.3 Preparaciones en el área de voladura.....	50
Referencias.....	52
Capítulo 4.- Barrenación de roca.....	53
4.1 Equipos de barrenación.....	53
4.1.1 Perforadoras.....	53
4.1.2 Martillo perforador en el fondo.....	56
4.1.2 Útiles de perforación (Barras y brocas).....	56
4.2 Rectitud de los barrenos.....	56
4.3 Forma de trabajo de la perforación (impacto, avance y rotación).....	57
4.4 Rendimiento del equipo de barrenación.....	58
4.5 Compresores.....	59
Referencias.....	61
Capítulo 5.- Colocación y transporte del explosivo.....	62
5.1 Métodos de carga.....	62
5.1.1 Sólida.....	63
5.1.2 A Carril.....	64
5.1.3 Carga Dividida.....	64
5.1.4 Carga Separada.....	65
5.1.5 Secanteado.....	66
5.1.6 Taco, tapón o retaque.....	66
5.1.7 Cebos.....	67

5.2 Equipos usados para la carga de explosivos.....	67
5.2.1 Atacadores.....	67
5.2.2 Cartuchos Largos Rígidos.....	68
5.2.3 Inyección de los cartuchos con Aire Comprimido.....	68
5.2.4 Carga con Espaciadores.....	68
5.2.5 Carga para Voladuras Suaves.....	69
5.2.6 Cargadora Neumática de Cartuchos.....	69
5.2.7 Cargadora con Presión de Agua.....	71
5.2.8 Carga de Mezclas de Nitrato Amónico (NA).....	72
5.3 Transporte, Manejo y almacenamiento de los explosivos.....	75
5.3.1 Transporte de Explosivos.....	75
5.3.2 Manejo de Explosivos.....	76
5.3.3 Almacenamiento de Explosivos.....	77
5.4 Rendimientos.....	78
5.4.1 Rendimientos de personal.....	78
5.4.2 Consumo de explosivo.....	79
Referencias.....	80
Capítulo 6.- Diseño de una Voladura.....	81
6.1 Tipos de voladuras.....	82
6.2 Explotación de un banco de material.....	82
6.3 Distribución y diseño de la barrenación en una voladura.....	84
6.4 Distribución de los explosivos en el barreno.....	89
6.5 Relación de explosivos.....	90
6.6 Parámetros de voladuras.....	90
6.7 Retardos en voladuras.....	67
6.8 Calculo de plantilla de barrenación y explosivo para una voladura.....	96
6.9 Distribución de la carga de explosivo en el barreno.....	100
6.10 Diseño de amarres y distribución de tiempos.....	101
6.11 Ejemplo del análisis básico de una voladura.....	102
6.11.1 Costos incluidos en una voladura.....	103

6.11.2 Toma de decisiones.....	113
Referencias.....	114
Conclusiones.....	115
Bibliografía.....	117

INTRODUCCIÓN.

Uno de los principales problemas y de mayor importancia que se le presentan al ingeniero civil durante su ejercicio profesional, es el movimiento de grandes volúmenes de tierra o suelos. Gran parte de los suelos están formados por las rocas y su dureza es tan variable, que en muchos de los casos pueden ser movidos a mano o con maquinaria ligera, aumentando gradualmente hasta llegar a materiales cuyo movimiento no puede lograrse ni con las máquinas más grandes y pesadas.

En este momento es cuando se recurre al uso de explosivos, constituyendo estos, una de las principales herramientas con que cuenta el ingeniero civil y a la vez una de las más poderosas; sin embargo, utilizándolos de la manera correcta es lo suficientemente segura y controlable para que se puedan manejar y utilizar en cualquier parte, aún en los centros de población, utilizándose para trabajos de precisión.

Los explosivos son el resultado de una intensa investigación y gran cuidado de manufactura, sus usos están muy diversificados y pretender una lista detallada de ellos sería una tarea poco menos que imposible.

El objetivo de esta tesis es desarrollar una guía sobre el uso de explosivos en voladuras de roca, presentando una explicación de los diferentes métodos y explosivos utilizados hoy en día en esta área de la ingeniería, de manera que este trabajo será de utilidad para las dependencias, empresas y profesionales involucrados en el proyecto y realización de dichas voladuras, y puedan obtener el mayor provecho de dichos trabajos y sean lo mas seguros posibles.

Esta tesis busca contestar preguntas como:

¿Es técnicamente aceptable el uso de explosivos en la construcción?

¿Son seguros y económicos?

¿Cuáles son los mayores beneficios que ofrecen para el constructor o ingeniero?

La tesis se divide en 6 capítulos, de los cuales el primero trata sobre algunas generalidades de los diferentes tipos de roca y de algunos aspectos que se deben de tomar en cuenta para desplantar una estructura sobre roca.

El segundo capítulo da una explicación sobre los explosivos, su nacimiento y evolución, además de mencionar sus propiedades y algunos puntos importantes que se deben tomar en cuenta para su selección en algún trabajo específico.

El tercer capítulo presenta de una manera detallada los artificios y dispositivos de iniciación de voladuras; en el cuarto capítulo se hace mención sobre todo el equipo necesario para la barrenación, éste es un aspecto muy importante, pues determinar un buen método de barrenación puede bajar el costo de toda la operación de una manera muy significativa. El capítulo cinco presenta una explicación sobre algunos puntos que se deben de tomar en cuenta para el transporte y colocación del explosivo.

El capítulo seis expone de una manera muy detallada y de fácil comprensión todos los puntos necesarios para diseñar una voladura, posteriormente se estudia un problema en donde se analiza la explotación de dos bancos de material de diferentes tipos de roca, en este problema se ve desde la barrenación hasta la voladura y se toma la decisión más adecuada, dependiendo en que banco resulta más económica la explotación del material.

Para finalizar se dan una serie de conclusiones y recomendaciones para que el ingeniero utilice de la mejor manera todos los recursos que tiene a su disposición, para el mejor uso de explosivos.

La finalidad de este trabajo es dar al ingeniero civil o constructor una más amplia y mejor visión de los trabajos que puede llegar a realizar con el uso de explosivos, así como también crear en él una visión emprendedora, en donde busque siempre varias alternativas de solución para un mismo problema y seleccione la más económica y segura.

Siempre que el ingeniero tenga presentes estos dos aspectos de economía y seguridad, sus trabajos serán muy satisfactorios tanto para la empresa que trabaja como para las sociedad y los resultados serán los mejores para todos.

CAPITULO 1.- GENERALIDADES

El ingeniero civil o constructor se enfrenta en múltiples ocasiones a la necesidad de desplantar una estructura o a efectuar diversos trabajos de ingeniería en formaciones rocosas, o bien, de alojar elementos estructurales dentro de túneles o cavernas excavados en este tipo de formaciones. La necesidad y ubicación de un proyecto determina que no siempre es posible situar los elementos estructurales de manera que su cimentación quede alojada en lo que pudiéramos llamar roca sana, consecuentemente, el número infinito de formaciones rocosas que existe en la naturaleza nos obligan en cada caso particular, a estudiar las formaciones como masas o conjuntos, que deben trabajar armoniosamente con las estructuras que sobre ellas colocamos y no en relación a sus componentes aislados. Por lo que se debe poner especial atención al comportamiento que las rocas presenten ante las excavaciones que en ellas se tengan que ejecutar y a las cargas que se le impongan.

Dada la geología de nuestro país, el ingeniero mexicano encontrará con mucha frecuencia, que tiene que construir sobre o dentro de formaciones ígneas del tipo extrusivo, como son basaltos, andesitas, riolitas, etc. Ninguna de estas formaciones presenta en general características homogéneas, aún dentro de áreas relativamente pequeñas en los mantos que las forman. Diferencias morfológicas, agrietamientos, intrusiones de otras rocas e infinidad de accidentes, nos obligan a estudiar el comportamiento del manto en conjunto, dentro de las áreas de influencia de las estructuras impuestas.

Prácticamente en toda la altiplanicie del país, en vastas zonas del sur, así como en amplias zonas del norte, encontramos este tipo de formaciones y podemos asegurar que en general todas ellas están fracturadas. Este fracturamiento se puede deber a enfriamiento brusco de las lavas, pero también en forma importante por efectos sísmicos y de acomodo de la corteza terrestre. Estas circunstancias nos indican que no podemos establecer reglas generales para los procedimientos de excavación, sino que en cada caso particular debemos hacer un análisis del problema. A lo largo del Golfo de México y en otras muchas zonas, como lo son los estados de Morelos, Chiapas, Nuevo León y Sinaloa, entre otros, encontramos formaciones sedimentarias, principalmente calizas, que también presentan

dentro de sus cortes, diferencias muy marcadas. Algunas de dichas formaciones, debido a su composición mineralógica, son muy solubles y presentan en su interior, cavernas y oquedades que hacen muy difícil establecer sistemas generales de excavación.

La estratificación, la mineralización y la estructura son entre otros factores muy importantes, los que hacen cambiar el aspecto y comportamiento de este tipo de formaciones, ante el efecto de los explosivos.

En algunas regiones, estas formaciones sedimentarias se encuentran metamorfizadas y aunque del mismo origen que las anteriores, se comportan de diferente manera ante el ataque de explosivos u otros sistemas de excavación.

Por último, en la Costa del Pacífico encontramos zonas muy extensas formadas por rocas ígneas intrusivas, como lo son los granitos, dioritas, etc; superficial e interiormente presentan, al igual que las otras rocas, diferencias muy marcadas en su aspecto y comportamiento, causadas por efectos de intemperismo y agentes extraños. En su interior, producto de acción sísmica presentan agrietamientos, fisuras y fallas.

Éstos factores nos obligan al igual que en los otros tipos de roca descritos, a ser muy cuidadosos en nuestros análisis y diversos estudios para fijar los procedimientos adecuados de excavación.

En general, podemos decir que en México difícilmente encontraremos zonas rocosas amplias que tengan características homogéneas. Aún dentro de especímenes relativamente pequeños, encontraremos heterogeneidades muy marcadas. Esta característica, como ya se mencionó, puede ser morfológica, estructural o de composición y por lo tanto, no debemos basar nuestros estudios en el comportamiento de algunos de sus componentes básicos, que no pudiera ser representativo de su composición, sino en el comportamiento del conjunto influenciado por los agentes mecánicos o cargas a que va a estar expuesto (Ref. 1).

Dentro de estas características, debemos de distinguir claramente entre homogeneidad e isotropía. Se dice de un cuerpo, en sentido técnico, que es homogéneo cuando ésta constituido en todas sus partes en la misma forma y, por lo tanto, cada uno de sus puntos tiene las mismas características físicas. Se dice que un cuerpo es isótropo, cuando el material que lo compone tiene iguales características en todas sus direcciones del espacio bajo la misma intensidad y, consecuentemente, puede hablarse de un cuerpo homogéneo anisótropo, cuando se habla de permeabilidad o bien de resistencia a la compresión, o al corte.

Esta distinción es importante, ya que ayudará a determinar en cada caso la acción de los explosivos o de los procedimientos mecánicos para efectuar una excavación. Las características observadas obligarán en muchos casos a adoptar procedimientos especiales de excavación.

Es importante hacer notar que aunque la composición de dos cuerpos sea la misma, la distribución e intensidad de fisuras, en dichos cuerpos, pueden darnos características totalmente diferentes ante la acción de los explosivos.

En forma semejante, la humedad dentro de una formación rocosa puede determinar diferencias en su resistencia al ataque de elementos externos. Por ejemplo se puede mencionar el caso de las lutitas; estas rocas han estado durante siglos sujetas a ciertas condiciones de humedad, presentan características de resistencia al ataque muy diferentes cuando se varía la condición a la que han estado sujetas durante siglos. Este tipo de roca con sus contenidos normales de humedad, no puede ser excavada, sino mediante sistemas violentos y en cambio, al perder la humedad, se desmorona fácilmente ante el ataque de cualquier implemento mecánico por débil que éste sea (Ref. 1).

Estas características notables en algunas rocas, nos indican que en ocasiones debemos anteponer la conservación de estas condiciones naturales de resistencia al de la economía de la excavación, con el objeto de asegurar que las condiciones de resistencia de la roca excavada permanezcan semejantes a su estado natural (Ref.1).

Al pretender construir una estructura sobre cualquier tipo de suelo, es necesario conocer las condiciones de resistencia del mismo. Es de absoluta importancia que al preparar una excavación para cimentación, las características naturales de la formación no se alteren en lo posible.

La acción indebida de los explosivos o la exposición prolongada de una excavación abierta al intemperismo, pueden hacer cambiar las características de resistencia de una formación en una o varias direcciones; por lo tanto, debemos ser cuidadosos en los sistemas de excavación y fundamentalmente, cuando éstas deben hacerse a base de explosivos. En general, las formaciones de roca sana, debido a las fuerzas de cohesión tan tremendas que las mantienen en su estado natural, requieren de fuerzas externas muy intensas para excavarlas y de esta forma, adaptarlas a las necesidades de cimentación de las estructuras. Aún cuando en muchos casos se tiene la impresión de que una cimentación, en un manto de roca sana, es fácil de calcularse, el comportamiento de dicha roca puede ser diferente del previsto, ya que las características de la roca pueden cambiar notablemente dentro del área de soporte de la estructura, si no se han tomado las debidas precauciones. Consecuentemente, los cambios de comportamiento que se originan en una cimentación, por usos indebidos de los medios de ataque pueden modificar las condiciones simplistas de cálculo que se hayan adoptado.

El proyectista debe tomar en cuenta las condiciones de los estratos de roca, tanto en lo que respecta a fisuración, como del posible aumento de estas fisuras por causas de los explosivos, de estratificación, de pérdida de resistencia por intemperismo, así como las diferencias de resistencia que presentan las formaciones en diferentes planos.

Para que una estructura sea económica, debe trabajar en conjunto con la roca que la soporta. Para ello, es necesario que el ingeniero analice la resistencia del subsuelo en los planos de máximo esfuerzo que le imponen las cargas, y debe de adoptar los medios de excavación convenientes para alterar las condiciones naturales, lo menos posible.

Hasta aquí, sólo se han abordado generalidades en cuanto a las excavaciones necesarias para alojar una estructura, pero igualmente hay que asimilar a este mismo caso todas aquellas excavaciones necesarias para abrir una vía de comunicación. En este caso, la carga que vaya a soportar el camino no será definitiva en el procedimiento de excavación, pero sí podrá ser, por ejemplo, la estabilidad de los taludes. En la misma forma que se estudian todos los aspectos de estabilidad de taludes en cortes hechos en materiales cohesivos o granulares, deben estudiarse los problemas en cortes de formaciones rocosas, hay una variedad inmensa de factores que determinan dicha estabilidad, pero uno de los más importantes puede ser el sistema de excavación adoptado.

Los medios más usuales para excavar roca sana son muy variados; desde las herramientas más primitivas, como son picos, martillos, cinceles, explosivos; hasta las sierras más modernas de cantería. Naturalmente, el ingeniero debe tomar en cuenta el aspecto económico de una excavación y, por lo tanto, en la mayor parte de los casos, los procedimientos que pudieran denominarse de cantería fina, no pueden aplicarse a la ingeniería civil. El sistema corriente de excavación es el de hacer una serie de perforaciones o barrenos, e introducir en ellos cargas de dinamita debidamente calculadas. Mediante la detonación de las mismas, se producen gases que, debido a su fuerza de expansión, fragmentan la roca, facilitando así su remoción por medios mecánicos.

No obstante, hay casos de excavación, como son los dentellones en las presas, en donde se especifica con frecuencia que sólo se usan máquinas rompedoras para hacer la excavación, excluyendo cualquier uso de explosivos. El tipo de máquinas que se usan en estos casos, pueden llamarse cinceles mecánicos, que mediante percusiones a muy alta frecuencia, permiten ir conformando la excavación proyectada. En algunos otros casos se puede usar el sistema de perforaciones de costura, que son perforaciones hechas a distancias muy pequeñas una de la otra. En dichos barrenos se introducen cuñas que a medida que se hincan en los barrenos, ejercen fuerzas muy considerables contra las paredes, logrando, así, hacer fallar la roca por tensión entre barrenos.

En algunos casos, ciertas excavaciones deben hacerse mediante el rebote de masas metálicas que sujetas a un mástil, fracturan la roca por caída libre, obteniendo así, su conformación a las líneas aproximadas del proyecto. Naturalmente estos casos son muy especiales y en la mayor parte de los trabajos de ingeniería, en donde hay necesidad de remover grandes cantidades de roca, se requiere el uso de métodos más económicos y rápidos, entre los cuales hasta la fecha, han sido preferentemente los tipos de explosivos conocidos como explosivos para voladuras (Ref.1).

Existe una gran variedad de explosivos para estos fines, con aplicaciones específicas de cada uno de ellos. Cada fabricante marca en sus manuales las características principales de sus explosivos y las condiciones en que deben emplearse.

Es importante para el ingeniero civil, conocer las técnicas del uso de explosivos, así como las cargas y distribución de barrenos que debe emplearse según el caso, y de acuerdo con las condiciones del trabajo. Así, por ejemplo, el tubo de barrenación y los explosivos que pueden usarse en obras exteriores, son diferentes a los que se emplean en obras subterráneas o marítimas. En otros casos, el tipo de dinamita que se puede usar queda determinado por la toxicidad del gas que se desprende, como es el caso de voladuras subterráneas. En otros casos, la resistencia del explosivo a la humedad o al agua es la que determina el tipo de explosivo, y en otros muchos casos, la potencia del explosivo por unidad de peso.

Con esta información notamos que es de gran importancia para el ingeniero tener los conocimientos necesarios sobre explosivos y voladuras de roca, para que se pueda tomar una decisión correcta, en el momento en que se presente algún problema específico de explotación de un banco de roca, en los siguientes capítulos se presentará de una manera clara y sencilla los elementos que intervienen en una voladura, desde su inicio con el cálculo de plantilla y barrenación, hasta el disparo.

REFERENCIAS.

1.- BAROCIO MOLI. Alberto J. *Construcciones en Roca, Excavaciones en roca*. 16 edición. colegio de ingenieros civiles de México. México. 1965.

Pag. 279-308

CAPÍTULO 2.- LOS EXPLOSIVOS

Este capítulo tiene la finalidad de exponer de una manera clara y sencilla, qué son los explosivos, cuáles son sus propiedades y cómo podemos hacer la mejor selección de ellos.

2.1 ANTECEDENTES DE LOS EXPLOSIVOS.

El uso de explosivos se remonta a épocas muy antiguas, en donde la necesidad de encontrar nuevos métodos para la construcción de minas u otros tipos de trabajos de ingeniería, genero en el hombre la necesidad de darle nuevas y más seguras aplicaciones a los primeros explosivos que se conocían en aquellos tiempos.

La pólvora fue el primer explosivo que se empezó a utilizar, es muy probable que nunca se conozca a su inventor. Su primer uso se ha atribuido a los chinos, los hindúes y los árabes. Sin embargo, hay algunos escritos de Roger Bacon en Inglaterra, hechos durante el siglo XIII, que contienen instrucciones para la preparación de la pólvora negra.

Durante tres siglos después de Bacon, se dejo sin explorar la capacidad de la pólvora negra para efectuar trabajo útil. Se utilizo en armas de fuego, pero fue hasta el siglo XVII que se utilizo en la minería. Martín Weigal la propuso para uso en la minería, en Sajonia en 1613, pero aparentemente no fue muy exitosa. Ya en 1689, se utilizaba pólvora negra en los trabajos de minas de estaño en Cornwall, Inglaterra (Ref. 4).

El siglo XVIII y la primera mitad del siglo XIX vieron el descubrimiento de varios otros explosivos, pero la pólvora negra fue la única que subsistió en usos generales. Se producía en cantidades cada vez mayores a medida que se terminaba el siglo XIX y los Estados Unidos empezaban una rápida expansión. Se excavaron alrededor de treinta canales en ese país, entre 1790 y 1850, y alrededor de el mismo numero de ferrocarriles estaban bajo construcción entre 1830 y 1850 (Ref.4).

William Bickford dio en Inglaterra una notable contribución en 1830 con la invención de la mecha de seguridad y el establecimiento de una factoría en Cornwall, Inglaterra, para dar servicio a las minas de estaño de la región. Antes de este descubrimiento los métodos para iniciar la combustión de la pólvora negra habían sido inseguros e inciertos.

En 1802, Eleuthere Irene du Pont de Nemours comenzó la fabricación comercial de pólvora negra en un molino. En aquel tiempo, la fórmula era casi igual a la que se había utilizado hacía 120 años: aproximadamente 75% de nitrato de potasio, 15% de carbón y 10% de azufre. La producción continuó en estos molinos casi 120 años más después de la construcción del primer molino. En 1857, Lamot du Pont introdujo una mejora de gran importancia técnica y económica. En lugar del muy costoso nitrato de potasio, utilizó el nitrato de sodio chileno que era mucho más barato. La nueva fórmula Du Pont rápidamente reemplazó a la pólvora negra de nitrato de potasio en casi todos los usos, con algunas excepciones.

Aproximadamente al mismo tiempo que Lamot du Pont mejoraba la fórmula de pólvora negra en los Estados Unidos, Alfred Nobel y su padre, estaban tratando en Suecia de encontrar una aplicación técnica a las propiedades explosivas de la nitroglicerina. Sobrero, quien la descubrió en 1846, la había abandonado. En el curso de sus experimentos, Nobel diseñó el primer fulminante razonablemente seguro y eficiente, una cápsula de estaño (posteriormente cobre) llena con fulminato de mercurio.

En 1866 Alfred Nobel mezcló la nitroglicerina con un absorbente para formar una sustancia sólida sensible a la acción de un fulminante pero relativamente insensible a un golpe ordinario. El absorbente que utilizó era kieselguhr, y este explosivo sólido fue la dinamita.

En 1875, se efectuó otro descubrimiento de gran importancia, al disolver algodón colodión en la nitroglicerina. Esto dio como resultado una masa gelatinosa que era mucho más poderosa que la dinamita de su invención; ésta es esencialmente, nuestra actual Blasting Gelatin y la antecesora de todas las dinamitas gelatinas.

Ya se ha hecho mención del fulminante de Nobel fabricado con fulminato de mercurio; este estaba diseñado para disparar con mecha de seguridad. Se hicieron varios intentos durante muchos años para disparar los fulminantes mediante la electricidad. Estos estopines eléctricos originales se disparaban mediante una chispa que pasaba entre los extremos desnudos de dos alambres insertados en la carga de la cápsula. Ese tipo fue sustituido por estopines con alambres de puente o de baja tensión eléctrica; el primero de los que tuvo éxito fue producido por H. Julius Smith en 1876; también invento un estopín de retardo en 1895(Ref.4).

Durante los últimos 50 años, el Nitrato de Amonio ha desempeñado un papel cada vez más importante en los explosivos. Se usó primeramente como ingrediente de la dinamita y hace aproximadamente un cuarto de siglo, comenzó a emplearse en una sencilla y económica mezcla con el Diesel, que ha constituido una revolución en la industria de los explosivos y que hoy día, cubre aproximadamente el 80% de las necesidades de los explosivos.

También se ha desarrollado, en el último cuarto de siglo, los explosivos de geles de agua a base de nitrato de amonio. Los explosivos de geles de agua contienen sensibilizadores, tales como los nitratos de amina, el TNT y el aluminio, así como agentes de gelificación y otros materiales para alcanzar su grado de sensibilidad.

A diferencia de la mezcla de Nitrato de Amonio y diesel, los geles de agua son resistentes al agua y pueden prepararse según fórmulas de elevadas velocidades de detonación.

Ya que no contienen Nitroglicerina, los geles de agua son, inherentemente, menos peligrosos que la dinamita en su fabricación, transporte, manipulación y empleo. Y debido a su flexibilidad y reducido peligro, ha declinado el empleo de la dinamita.

Actualmente los explosivos se usan para la construcción de diversas obras civiles como presas, sistemas de riego, redes de conducción eléctrica, gasoductos, oleoductos, sistemas de drenaje, vías de comunicación, cimentaciones de estructuras, canales, túneles y muchas más.

Se puede notar que las principales finalidades de la excavación en roca para la construcción de las obras de Ingeniería Civil son: para alojar estructuras, eliminar obstáculos y obtener materiales para construcción.

2.2 ¿ QUÉ SON LOS EXPLOSIVOS ?

Los explosivos son sustancias químicas generalmente en estado sólido, cuya rápida transformación en gases a temperatura elevada da lugar a un considerable y rápido aumento de volumen y temperatura(Ref.2).

La presión que dicho aumento de volumen produce, se utiliza para demoler y fragmentar las rocas y minerales, en los trabajos de minería e ingeniería civil.

Los explosivos se transforman en gases de dos modos distintos:

1. A la velocidad de unos metros por segundo, a los que se les denomina **deflagración**.
2. A la velocidad de varios kilómetros por segundo denominándose como **detonación**.

Existen distintos y varios tipos de explosivos que se diferencian entre si por su potencia, sensibilidad, estabilidad, velocidad de detonación, densidad, resistencia a la humedad, plasticidad, temperatura de explosión, producción de gases nocivos, etc(Ref..

La selección del explosivo adecuado para un determinado trabajo depende de diversos factores:

- Trabajo en exterior o subterráneo.
- Existencia de atmósfera inflamable o explosiva.
- Presencia de agua o humedad.
- Tipo de roca o mineral a volar.
- Grado de fragmentación que se desea.
- Diámetro de los barrenos.

No siempre el explosivo de mas potencia es el mas adecuado. Hay que seleccionar el más conveniente según las distintas circunstancias.

Para provocar la reacción explosiva entre las diversas sustancias que componen un explosivo, es preciso partir de una pequeña detonación inicial, cuya onda explosiva actúa como cebo iniciador y da lugar a la explosión principal. Esto se consigue con los denominados detonadores, colocados convenientemente en un cartucho llamado cebo, o bien, adosados a cordón detonante. Al hacer la explosión el cartucho cebo o el cordón detonante en un barreno, lo sigue la demás carga de explosivo.

Las operaciones de perforación , carga con explosivo y disparo de los barrenos se denomina **pega o voladura**.

2.3 PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS.

Cada explosivo tiene características específicas definidas por sus propiedades, el conocimiento de estas propiedades es un factor muy importante para el buen diseño de voladuras, además permiten elegir el más adecuado de ellos para algún caso específico. A continuación se presentarán las propiedades más importantes de los explosivos.

Fuerza.

Nos indica la capacidad del explosivo para producir roturas mecánicas y consecuente arranque de la roca. La fuerza suele considerarse como la capacidad de trabajo útil de un explosivo. También suele llamarse potencia y se originó de los primeros métodos para clasificar los grados de las dinamitas(Ref.3).

Hay que recordar que dos explosivos no pueden tener exactamente el mismo desempeño, aunque sean del mismo tipo, debido a que también intervienen las características del material que es volado y el grado de compactación que tenga el explosivo al momento de ser colocado en el barreno.

Densidad de empaque.

Depende en gran parte de la granulometría de los componentes sólidos y materia prima utilizada en su fabricación. Por regla general los explosivos tipo goma y los hidrogeles (explosivos plásticos) son de alta densidad. Por el contrario, los pulverulentos y en grano, son mucho menos densos.

En barrenos largos es aconsejable que la carga de fondo sea efectuada con explosivo denso, mientras que el resto de la carga (de columna) requiere un explosivo de menor densidad. La densidad de empaque de los explosivos se expresa como el número de cartuchos por caja de 25 kilogramos, hay que tener en cuenta que el número de cartuchos es aproximado y puede haber una variación del 3%. Este dato es valioso pues permite dosificar los explosivos simplemente contando los cartuchos(Ref.1).

Densidad (Peso volumétrico).

Es el peso por unidad de volumen de un explosivo, normalmente expresada en gr/cm^3 . Kg/lit ó Kg/m^3 . Este dato nos permite determinar la cantidad de explosivo y su distribución en el barreno, además, se necesita al diseñar un barreno, esto para asegurar que el espacio destinado a los explosivos es suficiente para alojar los kilogramos de explosivo calculados(Ref.4).

Velocidad de detonación.

Es la velocidad expresada en metros por segundo, con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo, ya sea confinado en el barreno, en el cartucho o a granel. La velocidad puede ser afectada por el tipo de producto, su diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado. Las velocidades de detonación de los explosivos comerciales fluctúan desde cerca de 1,525 m/seg hasta más de 6,705 m/seg . Pero la mayor parte de los explosivos usados tienen velocidades que varían de 3,050 a 5,040 m/seg . Mientras mayor sea la rapidez de la explosión, mayor suele ser el efecto de fragmentación en la roca.

Existe el error generalizado de considerar más eficaz un explosivo cuanto mayor es su velocidad de detonación, lo que no se ajusta a la realidad. En rocas blandas (arcillas, yesos, etc.), dará mejor resultado un explosivo de baja velocidad. Por el contrario, en rocas muy compactas y cristalinas, como el granito, es aconsejable la utilización de explosivo de alta velocidad.

Sensibilidad.

Es la medida de la facilidad de iniciación de los explosivos, es decir, el mínimo de energía, presión o potencia que es necesaria para que ocurra la iniciación. Lo ideal de un explosivo es que sea sensible a la iniciación, mediante cebos para asegurar la detonación de toda la columna de explosivos, e insensible a la iniciación accidental durante su transporte, manejo y uso.

En la industria de los explosivos, la prueba más usada es la de la sensibilidad al fulminante. Con el uso de este fulminante se clasifican los productos explosivos, si estallan se les denomina explosivos, si sucede lo contrario se les llama agentes explosivos.

Resistencia al agua.

En forma general se define como la capacidad del explosivo para soportar la penetración del agua; más precisamente, la resistencia al agua es el número de horas que el explosivo puede hallarse cargado en agua y aún ser detonado(Ref.2).

Obviamente, en trabajos en seco esta propiedad no tiene importancia, pero si el explosivo va a estar expuesto al agua puede ser afectado en su eficiencia o desensibilizarse, al grado de no detonar, provocando una falla en la propagación de la detonación.

La resistencia del producto no sólo depende del empaque y de la capacidad inherente del explosivo para resistir el agua; la profundidad del agua (presión) y el estado de reposo o movimiento de la misma afectan el tiempo de resistencia al agua del explosivo.

Por consiguiente, deben de considerarse las características particulares de cada acción de voladura y tener en cuenta la resistencia al agua de los explosivos, proporcionada por el fabricante, para las diferentes condiciones de humedad en que se encontrará el explosivo en el barreno.

Los explosivos a base de nitrato amónico, en general son poco resistentes a la humedad. Por el contrario, los que contienen nitroglicerina, por su impermeabilidad, se comportan mejor en ambientes húmedos o con agua.

Resistencia a las bajas temperaturas.

Los explosivos que contienen nitroglicerina pueden congelarse a temperaturas inferiores a 8 °C. Para evitarlo, los fabricantes le añaden como aditivo una sustancia denominada nitroglicol, con la que disminuye considerablemente su punto de congelación hasta los -20°C.

No obstante y dada la peligrosidad de los explosivos helados, en temperaturas muy frías hay que prestar especial atención a los explosivos gelatinosos por ser propensos a la congelación, pues al bajar la temperatura aumentan su sensibilidad, que es una característica muy importante y que se debe tomar en cuenta en los explosivos(Ref.2).

Emisión de Gases Tóxicos.

En este medio se le denominan emanaciones a los gases tóxicos. Los gases que se originan de la detonación de explosivos principalmente bióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero también se forman en cualquier detonación, gases venenosos como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

En trabajos a cielo abierto las emanaciones se pueden dispersar rápidamente por el aire, por lo que provocan poca preocupación, pero en trabajos subterráneos deben considerarse detenidamente, ya que las emanaciones no se disipan fácilmente y en este caso la ventilación es de fundamental importancia

También hay que considerar que las emanaciones provocan, mientras se disipan, tiempos de espera para poder reanudar los trabajos.

Algunos de los factores que pueden incrementar los gases tóxicos son: fórmula pobre del producto, cebado inadecuado, falta de resistencia al agua, falta de confinamiento, reactividad del producto con la roca y reacción incompleta del producto.

Inflamabilidad.

Se define como la facilidad con la cual un explosivo o agente de voladura puede iniciarse por medio de llama o calor. En el caso de las dinamitas, la mayoría se incendian con facilidad y se consumen violentamente. Pero hay varios explosivos que requieren que se les aplique una flama exterior en forma directa y continua para que logren incendiarse(Ref.1).

Aptitud a la propagación

Define la facilidad de transmitir la detonación de un cartucho a otro, cuando están en contacto o si existe algún elemento que los separe. Cuando la detonación de un cartucho provoca la de los inmediatos, se dice que lo efectúa por simpatía(Ref.1).

2.4 TIPOS DE EXPLOSIVOS

Existe una gran variedad de explosivos, pero por su aspecto físico y presentación comercial se pueden clasificar en: **Gelatinosos, Pulverulentos, Anfos, Hidrogeles y Pólvoras.**

Por su composición química, existen otros tipos de denominaciones, tales como cloratos, amoniacales, dinamitas, etc., pero en la práctica se limita a los antes mencionados.

Existe otro tipo de explosivos, llamados multiplicadores, que se emplean en las voladuras para iniciar convenientemente a los explosivos de baja sensibilidad, como los Anfos y los Hidrogeles, con objeto de que estos alcancen su máxima velocidad de detonación y desarrollen toda su potencia. Los multiplicadores están fabricados con el explosivo denominado Hexolita, de alta potencia y elevada velocidad de detonación (7500m/s).

Gelatinosos.

Su componente primordial es la nitroglicerina, junto con otras sustancias de soporte; normalmente se les conoce con el nombre de goma. Por su potencia, son muy utilizados para la carga de fondo de barrenos, cuando hay agua o mucha humedad y en general para el arranque y fragmentación de roca muy duras y cristalinas. Su inconveniente principal es que son muy sensibles a los golpes y que se congelan con facilidad, siendo muy peligroso su manejo(Ref.1).

Pulverulentos.

Estos están compuestos por nitrato amónico, como base principal. Son bastante seguros a los golpes y choques. Son sensibles a la humedad, por lo que no se deben utilizar en barrenos con agua o mucha humedad, los mas utilizados son la Amonita y Ligamita.

Anfos.

Son una mezcla de nitrato amónico y un combustible líquido. Son muy insensibles a los golpes y precisan de otro explosivo (cordón detonante) para producir su explosión. Son muy sensibles a la humedad, por lo que nunca se pueden utilizar en barrenos con agua. Tampoco es recomendable utilizarlos en barrenos de diámetro inferior a los 4.5 cm(Ref.3).

Hidrogeles.

Se componen de un agente oxidante y un combustible, dispersos en agua, formando un gel. Son bastante seguros a la fricción y golpes, pudiéndose utilizar en barrenos con agua. Por

su plasticidad son muy adecuados para obtener alta densidad en la concentración de explosivo, al rellenar totalmente el hueco del barreno.

Pólvoras.

Son mezclas de azufre, carbón vegetal y nitrato de potasio. No detonan sino que deflagran. Para su explosión, estando confinadas, no necesitan detonador, siendo suficiente el fuego a través de una mecha. Su acción es de empuje, mas que rompedora, por lo que son muy aconsejables en el arranque de mármoles y rocas ornamentales en general, con objeto de evitar la rotura y rajamiento de los bloques.

2.5 PUNTOS IMPORTANTES PARA LA SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO.

De acuerdo con las características y propiedades de los distintos tipos de explosivos se eligira el más adecuado, de acuerdo con las siguientes condiciones básicas, sin olvidar claro que es indispensable tener en cuenta su costo. Deberá escogerse aquel que proporcione la mayor economía y los resultados deseados.

Tipo de roca a volar.

Deberá tenerse en cuenta la dureza y compacidad, así como la fisuración y estratificación. En una roca dura y compacta debemos emplear un explosivo de alto poder rompedor, al contrario que en las rocas blandas y elásticas , como las margas(Ref.2).

Tampoco es aconsejable utilizar en rocas blandas explosivo de alta velocidad de detonación. Aparte de su mayor costo, se obtendrán peores resultados que empleando uno de menos velocidad.

Fragmentación.

La clase de explosivo a utilizar dependerá del tipo de roca y de la fragmentación deseada. Si precisamos obtener grandes bloques con cortes limpios utilizaremos un explosivo antideflagrante, como la pólvora negra. Tal es el caso de la extracción del mármol.

Por el contrario, si se desea obtener un material, muy fragmentado, que haya que triturar posteriormente, caso de los áridos para la construcción, se utilizarán explosivos rompedores como las gomas o el Anfo.

Humedad de los barrenos.

Hay ocasiones en que por la condiciones del terreno los barrenos se encuentran muy húmedos y hasta llenos de agua. En tales casos es imprescindible la utilización de explosivos resistentes al agua (gomas e hidrogeles)

Toxicidad.

Hay que tener muy en cuenta dicha circunstancia cuando se emplean los explosivos en minas de interior y túneles, y en general en lugares cerrados y de escasa ventilación.

Atmósferas explosivas.

En minas de interior donde haya peligro de existencia de grisú o de polvo de carbón, se utilizarán explosivos denominados de seguridad.

Diámetro y profundidad de los barrenos.

En barrenos de un diámetro inferior a 40 mm se empleará un explosivo que tenga buena propagación, pues si no se toma en cuenta esto existe el riesgo de que no detone. Por ejemplo, la nagolita no debe utilizarse en barrenos de un diámetro inferior a los 45 mm.

Por otra parte, si los barrenos son profundos y verticales, y la carga se hace dejando descender libremente el explosivo (practica nada recomendable), si se utilizan cartuchos de explosivo muy sensible y con alto contenido de nitroglicerina, existe el riesgo de que se provoque la autodetonación por el golpe de caída (Ref. 2).

Carga de fondo y carga de columna.

En el arranque con explosivos, normalmente se precisa una mayor concentración de explosivos en el fondo del barreno pues en este punto se presenta una mayor resistencia a la

rotura. Por ello la carga en el fondo debe hacerse con un explosivo de alta densidad mientras que el resto de la carga permite un explosivo menos denso.

Después de tener bien definidas estas características, como orientación, se presenta la Tabla No. 1 con las propiedades de los explosivos y el uso sugerido para cada uno de ellos

Tipo	Agente Explosivo	Fuerza	Velocidad	Resistencia al agua	Emanaciones	Uso
Dinamita Nitroglicerina	Nitroglicerina	----	Alta	Buena	Exceso de gases	Trabajos a cielo abierto
Extra	Nitroglicerina y Amoniaco	20 a 60%	Alta	Regular	Exceso de gases	Trabajos a cielo abierto.
Granulada	Amoniaco	25 a 65%	Baja	Muy mala	Exceso de gases	Trabajos a cielo abierto(Canteras)
Gelatina	Amoniaco	30 a 75%	Muy alta	De buena a excelente	De muy pocos gases a nulos	Sismología, Trabajos submarinos y subterráneos
Anfo	Amoniaco	---	Alta	Ninguna	Muy pocos gases	Trabajos a cielo abierto y subterráneos
Hidrógeles	Amoniaco	40 a 75%	Muy alta	Excelente	Muy pocos gases	Trabajos a cielo abierto y subterráneos

Tabla No. 1 .- Selección y propiedades de los explosivos más comunes en construcción (Ref.1).

CONCLUSION CAPITULAR.

De lo anterior se puede concluir que es de gran importancia tener en cuenta las características de los explosivos, pues con ellas podemos mejorar la seguridad en el proyecto y también reducir los costos al emplear el explosivo adecuado para determinado proyecto.

REFERENCIAS:

- 1.- FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.
- 2.- RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988. Pags. 24-63
- 3.- SÁNCHEZ PULIDO, Pedro. *Explosivos*. Instituto de Capacitación de la Industria de la Construcción. 1990. Pags. 1-14
- 4.- TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988. Pags. 1-6

CAPITULO 3 .- ARTIFICIOS Y DISPOSITIVOS DE INICIACIÓN EN VOLADURAS.

En este capítulo se presentará de una manera detallada todos los dispositivos y artificios de iniciación en una voladura, los cuales son necesarios para provocar la detonación de un explosivo.

3.1 INICIADORES.

Son todos los artificios que en su mayoría están contruidos con explosivos primarios y se utilizan para detonar a los secundarios. Por lo general se introducen en los explosivos secundarios formando así el cartucho cebo (Ref. 5).

En cualquier operación de voladuras se obtendrán los mejores resultados si los dispositivos de iniciación se seleccionan tan cuidadosamente como el explosivo.

Los dispositivos para la iniciación son productos utilizados para:

1. Proporcionar o transmitir la flama para iniciar una explosión.
2. Llevar una onda de detonación de un punto a otro, o de una carga de explosivos a otra.
3. Iniciar las cargas de explosivos.

Aquí se estudiarán estos productos dividiéndolos en dos categorías, dispositivos eléctricos y dispositivos térmicos.

3.2 DISPAROS CONVENCIONALES (TERMICOS Y ELÉCTRICOS)

3.2.1 Mecha de seguridad, mecha para minas o cañuelas:

La mecha para minas es un artefacto en forma de cordón que tiene por objeto conducir el fuego a una velocidad continua y uniforme, a una carga explosiva, con el objeto de hacerla estallar, ya sea directamente si el explosivo es pólvora negra (granulada o en pella), o indirectamente, por medio de un fulminante, si el explosivo es dinamita o hidrogel (Ref. 2).

La mecha para minas consiste en un núcleo de pólvora negra a base de nitrato de potasio, envuelto firmemente en varias cubiertas de materiales textiles e impermeabilizantes. La pólvora es el elemento activo de la mecha y queda protegida contra la abrasión y la penetración de agua por las cubiertas de cintas e hilazas y las capas de materiales impermeabilizantes. Estas cubiertas tienen además el objetivo de evitar la propagación del fuego interior entre tramos continuos de mecha, y reducir al mínimo las posibilidades de que la carga explosiva sea encendida por chispas que salgan por los costados de la mecha, antes de que la combustión de la pólvora llegue hasta el extremo de la misma.

Es un medio para transmitir el fuego a una velocidad continua y uniforme de 132 seg/m. con un rango de error de 10 %.

Al almacenarse debe evitarse la humedad, el calor excesivo, los solventes y como siempre usar lo mas viejo primero.

Preparación de la mecha.

La unión de la mecha al fulminante es una de las tareas más importantes para el buen éxito de las voladuras.

El fulminante ordinario es un casquillo de aluminio que en su interior tiene dos pólvoras, una de ignición y otra de detonación.

Engargolado.

Unión del fulminante a la mecha, esto debe hacerse por medio de pinzas o máquinas especiales, nunca debe hacerse con los dientes y siempre debe vigilarse que la mecha sea cortada a 90° con relación a su eje, para que penetre hasta el fondo del fulminante y no haya falla en el encendido (Ref. 4).

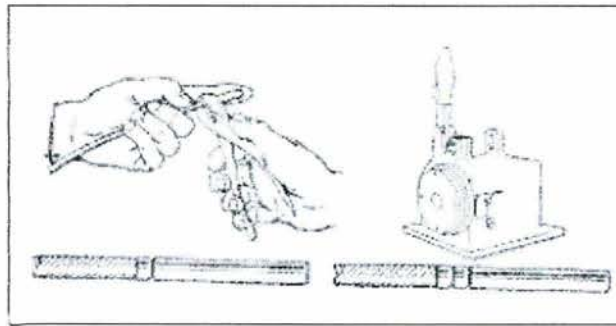


Fig. 3.1 .- Corrugadora manual y máquina corrugadora (Ref. 4).

Uno de los principales inconvenientes de la mecha fulminante es el de que no se puede tener retardos de milisegundos.

Para obtener estos retardos se usan dos accesorios:

1. Cordón de ignición o ignitacord.
2. Conectores de ignición.

El cordón de ignición tiene un diámetro aproximado de 1.5 mm y arde a una velocidad uniforme con una vigorosa flama exterior.

Este accesorio lo podemos encontrar comercialmente en tres diferentes velocidades :

Rápido	4 seg/pie	12.8 seg/m
Medio	8 seg/pie	25.6 seg/m
Lento	18 seg/pie	57.6 seg/m

Como regla se establece que el cordón de ignición sólo debe encenderse en un punto. Las mechas deben ser de igual longitud y la última en cada barrenación, debe estar encendida antes de detonar el primer barreno.

3.2.2 Fulminantes.

Los fulminantes son tubos o casquillos cerrados en un extremo que contienen una carga de uno o más explosivos de gran sensibilidad. Están hechos para detonar con las chispas de la mecha para minas. Los fulminantes que fabrica DuPont tienen en el fondo del casquillo una carga de tetrilo o algún otro explosivo de alta velocidad con una carga cebadora de azida de plomo y encima de todo ello la carga de ignición (Ref. 3).

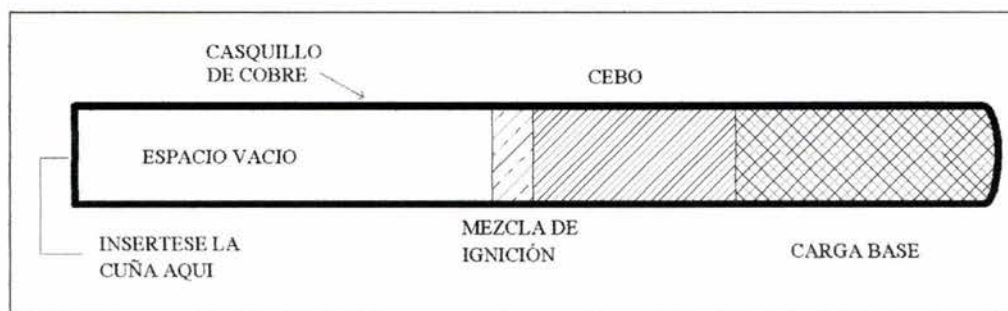


Fig. 3.2 .- Diagrama del fulminante (Ref. 5).

Los fulminantes se detonan siempre con mecha para minas. Se usan para disparar una sola carga, por ejemplo en trabajos de agricultura y canteras. No obstante, su uso más frecuente está en las voladuras de rotación, es decir, en aquellos cuya explosión es continuada una a otra. Esto puede lograrse en diversas formas, por ejemplo cortando la mecha a distintos tamaños o usando como explicamos anteriormente el cordón de encender Ignitacord. No es práctico disparar varias voladuras simultáneamente usando fulminantes y mecha, debido principalmente al tiempo que se tarda en prenderlas.

3.2.3 ESTOPINES ELÉCTRICOS.(Fulminantes Eléctricos o Espoleta)

Como su nombre lo indica, son fulminantes elaborados de tal manera que pueden detonarse con corriente eléctrica. En su construcción son semejantes a los fulminantes, variando únicamente su forma de encendido ya que en éstos, encima de la carga de ignición, tienen un puente formado por un alambre que une los extremos de los alambres de conexión del detonador. Al aplicar la corriente eléctrica, el puente se pone incandescente haciendo detonar el estopón (Ref. 5).

Los estopines eléctricos tienen una aplicación muy amplia en todas las obras de ingeniería civil, pues con ellos pueden iniciarse simultáneamente grandes cargas de explosivos colocados en diferentes barrenos, los estopines van conectados en serie o en paralelo a los alambres conductores de la energía que puede proceder de un explosor o de cualquier otra fuente adecuada.

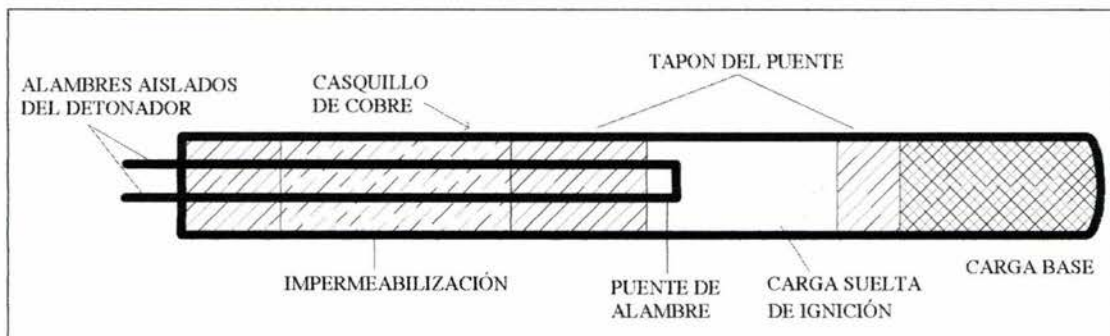


Fig. 3.3 .- Estopin eléctrico o Espoleta (Ref. 5).

Estos elementos iniciadores de disparo se fabrican con alambres de conexión de varias longitudes desde 2 m a 20 m., están forrados con aislamiento que por lo general es de dos colores, esto facilita la conexión.

Existen principalmente cuatro tipos de detonadores eléctricos:

- 1) Instantáneos.
- 2) De retardo

- 3) Regulares de tiempo (hasta 10 períodos de 1 a 2 seg.)
- 4) De tiempo tipo MS (con retardo de 25 milisegundos).

El uso de los estopines con retardos de milisegundos, aunado a otros progresos obtenidos, ha revolucionado la técnica de voladuras que lo han situado positivamente ya en una ciencia que revoluciona día con día y siempre para mejoras de la ingeniería (Ref. 6).

Los sistemas de voladuras de barrenos múltiples usando detonadores de retardo del tipo MS, constituye toda una técnica especializada, pero podemos asegurar que con esta técnica obtenemos las siguientes ventajas:

- 1.- Mejor fragmentación.
- 2.- Menor sacudimiento y vibraciones.
- 3.- Control de lanzamiento de material.
- 4.- Disminución de explosivo por metro cúbico.
- 5.- Reducción de barrenos robados.

Con el uso de estopines de tiempo, podemos hacer cualquier combinación, controlando siempre la dirección del disparo, la fractura y las vibraciones que producirá.

3.3 CORDON DETONANTE

Primacord. El primacord es un cordón detonante(explosivo), formado en su interior de un núcleo que contiene un explosivo violento insensible, tetranitrato de pentaeritritol, que para abreviarlo le llaman PETN, (en México se utiliza el tetranitrato de pentaeritritol, PENTITRA), rodeado por una envoltura protectora (Ref. 2).

Cuando se inicia la explosión del primacord con un fulminante, esta se propaga a lo largo del cordón a una velocidad de 7200m/seg. Y detona cualquier explosivo, con cápsulas sensitivas con las cuales esté en contacto.

Usualmente los tipos comunes tienen 25 y 50 granos por pie. Los de grado menores, con 25 granos, se usan principalmente para voladuras secundarias y voladuras poco profundas en condiciones secas. Las más altas, con 100 a 400 granos por pie, se usan para la iniciación de columnas continuas de mezclas de nitrato de amonio con diesel (AN-FO) o cortadas en tramos cortos para usarse como cebos (Ref. 2).

$$1 \text{ grano} = 0.0648 \text{ gramos.}$$

Aquí en México se manejan solo dos tipos el Primacord Reforzado y E-Cord

3.3.1 Primacord Reforzado

En este tipo de cordón el núcleo explosivo está envuelto en cubiertas textiles de alta tenacidad, seguidas de una capa tubular de plástico y dos entorchados cerrados textiles, cruzados, con un cabo rojo en el exterior. El acabado final es de cera amarilla (Ref. 2).

PRIMACORD REFORZADO



Fig. 3.4 .- Dibujo del primacord reforzado (Ref. 2).

Núcleo	Gramos por metro (nominales)	Diámetro Exterior Mm.	Resistencia en Tensión promedio	Peso de embarque 500 mts.
Pentrita	10.6	5.15 +/- 0.40	90 Kg.	11.5 Kg.

Fig. 3.5.- Tabla de características del primacord reforzado (Ref. 2).

Este tipo se recomienda para líneas troncales o descendentes excepto para las condiciones más severas o más críticas. Tiene una excelente resistencia a la penetración lateral del agua o combustible líquido, buena flexibilidad, es de fácil manejo a casi cualquier temperatura y es fácil de anudar

3.3.2 CORDON DETONANTE TIPO E-CORD

En este tipo de cordón el núcleo explosivo está envuelto en cubiertas textiles de alta tensión, seguidas de una capa tubular de plástico y dos entorchados cerrados textiles cruzados, con cuatro cabos rojos y seis blancos en el exterior. El acabado final es de cera amarilla (Ref. 2).

El E-Cord es un cordón detonante de tipo económico, de alta calidad y construcción de primera. Se distingue del Primacord Reforzado por su menor contenido de explosivo. La fuerza iniciadora del E-Cord, aunque proporcionalmente menor, es más que suficiente para detonar las dinamitas sensibles a los fulminantes. Además puede detonar o ser detonado por Primacord tipo reforzado, con la condición que se hagan las conexiones con nudos, en las formas recomendadas por el fabricante.



Fig. 3.6.- Dibujo del Ecord (Ref. 2).

Núcleo	Gramos por metro (nominales)	Diámetro Exterior Mm.	Resistencia en Tensión promedio	Peso de embarque 500 mts.
Pentrita	5.3	4.0 +/- 0.20	63 Kg.	7.8 Kg.

Fig. 3.7.- Tabla de características del Ecord (Ref. 2).

Este cordón se recomienda para cuando menos en los siguientes usos:

- 1) Para toda clase de moneo (voladuras secundarias), ya sea en tajo abierto o en tajo subterráneo.
- 2) En voladuras subterráneas de pared grande.
- 3) Como líneas descendentes y troncales en voladuras de barrenos de diámetro pequeño, mediano o grande con la condición que se use dinamita u otros cebos adecuados y que las condiciones de carga no sean críticas, como lo serían la presencia de agua u otras condiciones que afectaran adversamente la sensibilidad del cebo.
- 4) Para líneas troncales ya sea que las descendentes sean de E-Cord o de Primacord Reforzado.

Ambos tipos de cordón detonante producidos en México se surten en carretes conteniendo 500 metros cada uno, envasados en cajas individuales de cartón corrugados. Las cabeceras de los carretes tienen agujeros centrales a través de los cuales se puede pasar una varilla para sostener el carrete y facilitar el desenrollo de la cantidad deseada.

3.4 VELOCIDAD DE EXPLOSIÓN.

Existen tres tipos de velocidad en relación con el disparo de explosivos. Existe la combustión lenta de una mecha, la combustión rápida de los altos explosivos y el movimiento prácticamente instantáneo de la electricidad a través del alambre (Ref. 6).

El punto de ignición de una columna larga de pólvora negra tendrá un efecto definitivo en su trabajo. La velocidad de combustión está entre los 300 m y los 1000 m/seg. así que tomará de 1/5 a 1/15 de segundos el disparo de un barreno de 60 m. Si se enciende en la parte superior, la roca de arriba podrá moverse una distancia considerable antes de que el

fondo se dispare. En un sentido, esto actuará aligerando el volumen de roca de fondo y ayudara a romperla, pero también puede servir para descorchar el barreno y permitir que el fondo de la carga vuele hacia arriba más bien que horizontalmente. Por otra parte, la fuerza de la porción superior de la explosión, reaccionando contra un volumen pesado de roca, podrá presionar hacia abajo con gran fuerza sobre la carga, sin explotar, sellándola.

Si la columna fuera disparada desde el fondo con electricidad, el pie podrá ser perfectamente desalojado antes de que la explosión alcance la parte superior. Si en la columna se colocaron varios estopines de tiempo y son disparados simultáneamente, el volumen total de roca será desalojado aproximadamente al mismo tiempo. La diferencia de tiempo con la que se produce la detonación en las distintas partes de un barreno, depende de la velocidad del explosivo y de los puntos donde estén colocados los detonantes.

Por ejemplo: Una columna de 60 m. con dinamita de 40% y una velocidad de 3500 m/seg. que se dispare de la parte superior, explotará en el fondo 1/50 seg. posteriormente. Si se usara primacord con velocidad de 7000 m/seg. en toda la longitud, la detonación tomaría 1/100 seg., si se usaran estopines arriba y en el fondo, el tiempo en el fondo sería aproximadamente de 1/5000000 seg. después del de la parte superior, pero el retardo en el centro sería de 1/100 seg.

3.5 VOLADURAS CON ESTOPINES ELÉCTRICOS.

Para garantizar el éxito de una voladura cuando ésta se hace con estopines, es indispensable tener sumo cuidado con cuatro elementos que son básicos.

El primero esta íntimamente ligado con la selección y trazado del circuito.

El segundo se refiere al cuidado necesario para determinar la fuente adecuada de energía.

El reconocimiento y la eliminación de los riesgos eléctricos constituyen la tercera.

Finalmente, debemos asegurarnos de haber programado un correcto balance del circuito, chequeando las conexiones para estar seguro de que fueron bien hechas y haber probado el circuito terminado.

3.5.1 SELECCIÓN DEL CIRCUITO.

Esta parte es una de las más importantes y depende del número de estopines que se pretenda detonar, pudiendo usarse circuitos en serie cuando se tengan un máximo de 50 estopines.

3.5.2 FUENTE DE ENERGÍA.

Sabemos que para iniciar una voladura pueden usarse diversas fuentes de energía como son baterías de automóviles, corriente eléctrica de 110 y 220 volts y algunas otras; sin embargo, ninguna es recomendable, salvo en caso de urgencia y por el personal experto.

La más recomendable, es el uso de una máquina explosora especialmente diseñada para ello, pues estas suministran la corriente necesaria para disparar los estopines eléctricos. Estas son de dos tipos básicos: de "generador" y de "descarga de condensador".

Explosoras de Generador

Estas máquinas han sido las más usadas 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 (Ref. 4).

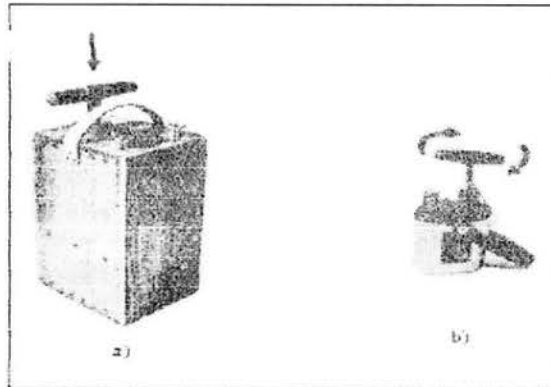


Fig. 3.8.- En la figura "a" se muestra la máquina explosora de cremallera y en la "b" la de giro o vuelta (Ref. 4).

Explosora de descarga de Condensador

Estas máquinas utilizan pilas secas para cargar un banco de condensadores que alimenta una corriente directa y de duración corta a los dispositivos de disparo eléctrico.

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".

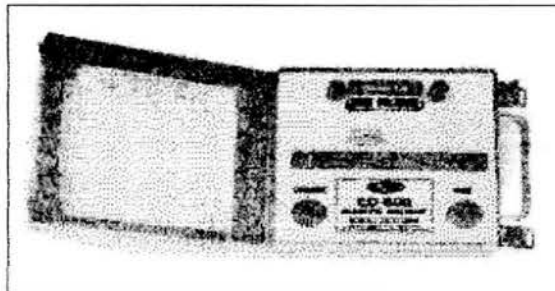


Fig. 3.9.- Explosora de descarga de condensador (Ref. 4).

Esta explosora no dispara a menos que ambos botones, el de "carga" y el de "disparo" ("charge" y "fire" respectivamente) sean accionados conjuntamente.

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 como estopines de tiempo, disparados con máquinas explosoras convencionales.

Otra característica de la 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.

3.5.3 ELIMINACIÓN DE RIESGOS ELÉCTRICOS.

Ésta debería ser la primera actividad que se debe desarrollar, inclusive antes de diseñar el circuito. debe explorarse toda la zona de trabajo en busca de fuentes de corrientes erráticas, y en caso de que las haya eliminarlas para garantizar la seguridad necesaria durante las voladuras, para ello se utilizan algunos aparatos especiales para detectar fallas electricas en el circuito, entre ellos tenemos el multímetro, galvanómetro, el óhmetro y el reóstato.

3.5.3.1 EL MULTÍMETRO

El multímetro 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 (Ref. 5).

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.

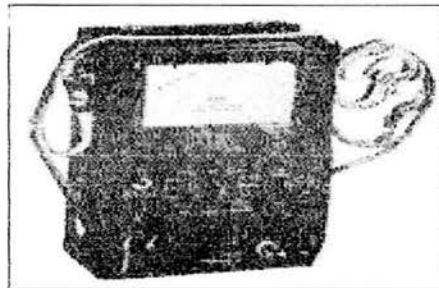


Fig. 3.10.- Multímetro para voladuras (Ref. 5).

3.5.3.2 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

3.5.3.3 ÓHMETRO

Si se requiere mayor exactitud que la que proporciona un galvanómetro, se puede usar un óhmetro. 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 (Ref. 1).



Fig. 3.11.- Ohmetro para voladuras (Ref. 1).

3.5.3.4 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.

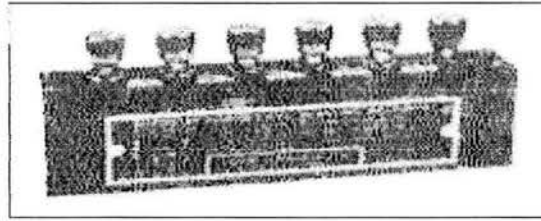


Fig. 3.12.- Reóstato para prueba de máquinas explosoras (Ref. 1).

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, 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 es que puede probarse la explosora detonando únicamente unos pocos estopines en cada prueba.

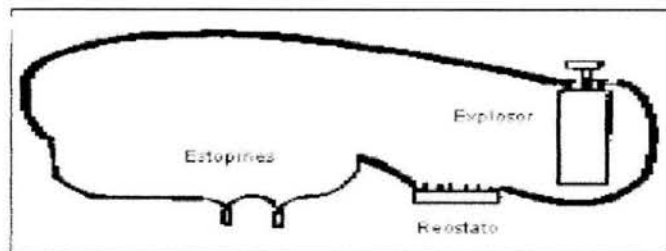


Fig. 3.13.- Uso del reóstato (Ref. 4).

3.5.4 BALANCEO Y DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO.

Todas las series que se pretendan detonar deben ser balanceadas, es decir diseñarlas de tal forma que cada una detone el mismo número de barrenos pudiendo variar este en más

menos un barreno, para garantizar el éxito se debe comprobar que las conexiones fueron bien ajustadas, limpias y sobre todo que siempre estén aisladas del suelo, recordar que siempre debe colocarse y probarse todo el circuito incluyendo las líneas (Ref. 5).

Cualquier circuito está formado por cuatro elementos que son:

- 1) Los estopines que van a detonarse.
- 2) Alambres de conexión, van de los circuitos de estopines a las líneas guía y deben ser de alambres cuyos calibres varían entre 16 y 20.
- 3) Líneas guía: unen los alambres de conexión con la explosora, su calibre debe estar entre 10 y 14.
- 4) Maquina Explosora.

3.5.5 CIRCUITOS EN SERIE.

Cuando se prepara un circuito debe calcularse, para tener la seguridad del éxito, su resistencia total, debe ser igual a la resistencia de cada estopín multiplicado por su número y agregarle la resistencia de los alambres de conexión y de las líneas guía.

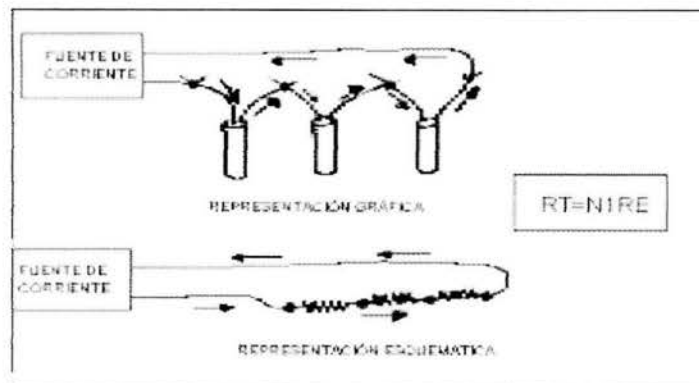


Fig. 3.14.- Representación de estopines conectados en serie (Ref. 4).

EJEMPLO: Un circuito con 25 estopines de retardo MS que tengan alambres de 10 metros, 30 metros de alambre de conexión calibre 20 y líneas guía de calibre 14 y de 200 metros.

La resistencia total será:

1.- La resistencia del circuito de estopines

$$25 \text{ pzas.} \times 3.14 \text{ ohms c/u} = 78.50 \text{ ohms}$$

2.- Resistencia del alambre de conexión.

$$2 \text{ pzas. de } 30 \text{ m} \times 34 \text{ ohms/1000 m} = 2.04 \text{ ohms}$$

3.- Resistencia de las líneas guía.

$$2 \text{ pzas. de } 200 \text{ m} \times 8.4 \text{ ohms/1000m} = 3.36 \text{ ohms}$$

$$\textbf{Resistencia Total} = \textbf{83.90 ohms}$$

3.5.6 CIRCUITOS EN PARALELO

Cuando los estopines se conectan lado a lado, la corriente se divide, pues cada estopín provee un camino diferente para el flujo de corriente, pasando una parte de la corriente total por cada uno de los estopines, como se muestra en la siguiente figura.

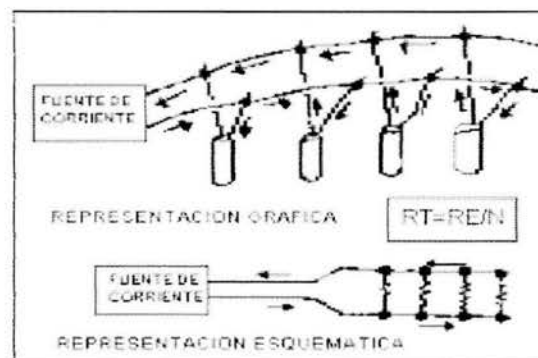


Fig. 3.15.- Representación de estopines conectados en paralelo (Ref.4).

EJEMPLO: Se supone una voladura de 300 estopines de retardo MS con alambres de cobre de 5 m., conectados en paralelo de 50 estopines cada una. Alambre de conexión de 40 m. calibre 18 y líneas guía de 225 m. calibre 14 (Ref. 6).

Empezamos por calcular la resistencia del circuito.

$$R-1 \text{ Resistencia de una serie/ \# de series} = 50 \times 2.18 \text{ ohms} / 6 = 18.17 \text{ ohms.}$$

$$R-2 \text{ Resistencia del alambre de conexión} = 2 \text{ pzas} \times 40 \text{ m} \times 21.4 \text{ ohms} / 1000 \text{ m} = 1.71 \text{ ohms}$$

$$R-3 \text{ Resistencia de las líneas guía} = 2 \text{ pzas} \times 225 \text{ m} \times 8.14 \text{ ohms} / 1000 \text{ m} = 3.7 \text{ ohms}$$

$$R-T \text{ Resistencia Total} = 23.66 \text{ ohms}$$

Ya con la resistencia total del circuito aplicamos la Ley de Ohm para obtener el voltaje y la potencia requerida.

$$V = RI \quad ; \quad I = V/R \quad ; \quad R = V/I$$

En donde: I = Corriente en amperes

V = Voltaje en volts

R = Resistencia en ohms

Potencia electrica $P = I V$: $P = I^2 R$ en watts

Ejemplo de la serie de 25 estopines.

$$V = 1.5 \text{ ohms} \times 83.90 \text{ ohms} = 125.85 \text{ volts.}$$

Determinamos la potencia requerida.

$$P = (1.5)^2 \times 83.90 \text{ ohms} = 188.8 \text{ watts}$$

Ejemplo de las series en paralelo de 300 estopines.

$$V = (1.5 \text{ ohms} \times 6 \text{ series})^2 \times 23.66 = 213.94 \text{ watts}$$

Determinamos la potencia requerida

$$P = 9^2 \times 23.66 \text{ ohms} = 1916.46 \text{ watts.}$$

3.6 SEGURIDAD

La prevención en accidentes causados por explosivos depende de la cuidadosa planeación y fiel observación de las practicas de voladura adecuadas. El menor abuso o dirección equivocada de los explosivos puede causar serias lesiones e incluso causar la muerte de los trabajadores y otras personas.

3.6.1 PERSONAL.

Pueden considerarse dos principios generales referentes a la seguridad y al uso de explosivos:

- 1) Todo usuario de explosivos, deberá considerar la seguridad como su responsabilidad más grande;
- 2) La seguridad en toda operación de voladura, depende de su gente.

Los explosivos por si solos no causan accidentes. Los accidentes son causados por la falta de cuidado o actos sin pensar de la gente. El ingrediente más importante en un programa de seguridad, es la calidad de la gente y la calidad de su entrenamiento. Las siguientes guías deberán considerarse en la selección del personal que utilizará explosivos (Ref. 7).

Tipo de personal. El personal designado para manejar materiales explosivos deberá tener inteligencia, sentido común y estar entrenado en el uso de explosivos. La gente deberá saber qué es seguro en el trabajo y qué no lo es.

La mayoría de las personas que utilizan explosivos, están entrenados para manejarlos y utilizan sus habilidades con discreción y buen juicio. Una pequeña minoría, sin embargo, nunca tendrán la debida actitud para volverse usuarios seguros y eficientes, no importa cuanto se les entrene o qué tan bien aprendan los aspectos técnicos de las voladuras.

Entrenamiento del Personal. Un novato debe ser entrenado en la seguridad de voladuras, reglamentos gubernamentales y los aspectos más importantes antes de manejar explosivos. Todo entrenamiento en el trabajo deberá estar supervisado por personas experimentadas y

cuidadosas, hasta que el personal en entrenamiento demuestre ser capaz de proseguir sin una supervisión tan estrecha.

Los buenos programas de seguridad en voladuras requieren tiempo, esfuerzo y una planeación cuidadosa, si es que intentan lograr la meta que se deben de poner, que es cero accidentes.

Algunos de los elementos que deben considerarse al planear un programa completo son:

- 3) Repetición.
- 4) Contacto con el personal.
- 5) Juntas de seguridad.
- 6) Retroalimentación.
- 7) Anuncios

Reglas de seguridad y regulaciones. Estas deberán explicarse a todo el personal, exponiendo las razones por las que existe cada una de ellas y deben ser aplicadas sin excepción. La acción disciplinaria debe llevarse a cabo en base justa y de igualdad. En forma contraria las contribuciones sobresalientes y desempeños en seguridad, deberán reconocerse públicamente y recompensarse de tal forma que expongan ampliamente el énfasis y la importancia unidos a la seguridad.

Los explosivos deberán ser usados únicamente por personas bien entrenadas, con experiencia y diestras, que estén ligadas al uso diario de explosivos. La tecnología de los explosivos se ha movido tan rápidamente en la última década que el conocimiento de hace algunos años, puede no únicamente ser obsoleto sino también peligroso.

Tamaño de la brigada de voladura. Esta deberá ser siempre lo más pequeña posible. Operarios eventuales deberán utilizarse únicamente cuando se encuentren bajo una supervisión directa y constante de alguien con experiencia.

3.6.2 REGRESANDO AL ÁREA DE VOLADURA.

En toda operación de voladura, el supervisor deberá asegurarse que la voladura previa no produjo ningún peligro nuevo o imprevisto. Antes de regresar el equipo y personal al área recientemente volada, el personal responsable encargado deberá (Ref. 7):

1. Esperar hasta que los humos y gases producidos por la voladura se encuentren a un nivel seguro.
2. Inspeccionar los resultados de la voladura en busca de explosivos sin detonar, especialmente en la roca quebrada o bien en barrenos que hayan quedado sin disparar.
3. Reconocer y corregir condiciones peligrosas de roca que pueda caer, especialmente en operaciones subterráneas.

Gases, humo y polvo.- Los sitios de voladura no deberán reocuparse después de un disparo, hasta que la concentración de gases, humo y polvo se hayan reducido a los límites de seguridad.

El humo y polvo pueden oscurecer la visión a tal grado que el personal sea incapaz de reconocer condiciones peligrosas, del techo o roca que pueda caer, así como peligros de resbalones.

Los gases tóxicos pueden estar presentes en concentraciones suficientes para dañar al personal que regresa al área de voladuras demasiado pronto. Es de particular importancia, en operaciones bajo tierra los niveles de gases deben medirse y los trabajadores deberán esperar lapsos seguros de tiempo antes de regresar al área de disparo.

Aún cuando los productos de voladura generalmente se disipan más rápidamente en operaciones de superficie, siguen presentando un riesgo. Los gases de superficie no son

menos peligrosos que los gases subterráneos. Los gases se incrementan por cualquiera de las siguientes circunstancias:

- Uso de productos que no brindan una adecuada resistencia al agua.
- Confinamiento insuficiente
- Uso de explosivos cebados inadecuadamente, dañados o deteriorados.

Existen tantos tipos diferentes de voladuras que es imposible dar instrucciones precisas para manejarlos. El usuario deberá guiarse por las condiciones locales, teniendo en mente que el trabajo en el lugar o cercano a un barreno “quedado” es una operación de lo más peligroso. Barrenar o excavar en material que contiene explosivos sin detonar es extremadamente peligroso.

Si una falla ocurre, los siguientes pasos y precauciones generales deberán seguirse:

1. No se deberá permitir a personal innecesario el regreso al área de voladura.
2. No deberá iniciar ningún trabajo en el área de la falla, excepto el que se realice para controlar el peligro.
3. Se deberá investigar y corregir las fallas con personal experimentado, al que se le permita trabajar de una manera metódica y sin ninguna interferencia.
4. Examinar cuidadosamente los barrenos quedados y el área que los rodea, para determinar cuantos barrenos y cuanto explosivo fallo.
5. En la mayoría de las condiciones, la forma más segura es disparar un barreno quedado si existe suficiente bordo rodeándolo, para prevenir riesgos de roca en vuelo. Si los barrenos quedados que se van a disparar están cebados con estopines eléctricos, asegúrese que las líneas se hayan desconectado de la fuente de poder y del circuito de voladura. Si los alambres del estopín están accesibles, pruebe el estopín con un galvanómetro o multímetro de voladuras. Si existe circuito en la lectura del aparato, conéctelo e intente dispararlo de la manera usual. Los estopines eléctricos detonaran si la falla fue causada por una mala conexión o falta de poder. Nunca jale los alambres del estopín, pues el jalarlos fuertemente puede causar la detonación.

6. Si el estopín eléctrico falla nuevamente, si sus alambres no se pueden alcanzar, o si se están utilizando iniciadores no eléctricos, dispare el barreno con un cebo nuevo. Si el taco debe ser removido, debe tenerse mucho cuidado para prevenir accidentes. El mejor método es retirar el taco con un chorro de agua o aire a presión, a través de una manguera de plástico o hule rígido. Es peligroso utilizar una herramienta metálica, una cuchara o un taladro para excavar el taco.
7. Cuando el taco haya sido removido, y no es posible remover los explosivos, inserte un cebo nuevo y dispare la carga.
8. No se deberá regresar al área de la voladura por lo menos en una hora. Al retirar el taco, la carga original de explosivos puede haberse saturado con agua, a tal grado que no detonará ni con el impacto de un nuevo cebo. Sin embargo, este cebo puede generar suficiente calor para hacer que la carga original se quemé, lo cual producirá un incendio interno muy peligroso. Si se utilizaron mecha y fulminante en la falla originalmente, la mecha puede ser reencendida y disparar la carga original varios minutos después de haberse disparado el cebo de recarga.
9. En el caso de que no se pueda volver a cebar y disparar la falla, el método menos peligroso es retirar el explosivo del barreno con un chorro de agua a presión.

Una investigación muy detallada de la falla en el disparo generalmente determina su causa. Algunas de las razones más frecuentes son:

- 1) Cebos preparados inadecuadamente.
- 2) Uso de explosivos no resistentes al agua en trabajos húmedos.
- 3) Cargado inadecuado.
- 4) Daño a los alambres de conexión de los estopines eléctricos o de la mecha durante la carga.
- 5) Falla al encender la mecha o conectar el fulminante eléctrico o no eléctrico al circuito de voladura.

- 6) Inadecuada conexión eléctrica.
- 7) Insuficiente corriente eléctrica.

3.6.3 PREPARACIONES EN EL ÁREA DE VOLADURA.

Barrenación. Barrenar sobre explosivos es una de las causas más frecuentes de accidentes en voladura. Patrones de disparo perforados deficientemente pueden también causar cortes, roca en vuelo y resultados malos. Una buena barrenación no es solamente esencial para obtener buenos resultados en una voladura, sino que también es necesaria para conducir en forma segura una operación de voladura. (Ref. 7)

La mejor manera de eliminar accidentes en barrenación, que tengan que ver con explosivos, es asegurándose de que todos los explosivos cargados en la voladura anterior detonaron exitosamente. Sin embargo, si ocurrieron fallas o cortes, el explosivo sin detonar debe localizarse y manejarse adecuadamente antes de hacer regresar al personal o al equipo al área de disparo.

Explosivos sin detonar. Después de toda voladura, el área deberá ser inspeccionada minuciosamente en busca de explosivos que no hayan detonado. Desafortunadamente, el explosivo sin detonar no puede siempre detectarse fácilmente. Algunas indicaciones de fallas o cortes en voladuras de cantera son:

1. Mala fragmentación y poco movimiento en ciertas áreas del disparo.
2. Explosivos sobre o dentro de la rezaga.
3. Dificultad para el cargado del material quebrado, particularmente en la parte inferior de la cara o pata.

Cargado de explosivos. La mayoría de los accidentes de explosivos que ocurren durante la carga fueron causados por un abuso excesivo de los mismos.

- 1) No deberá usar acero de perforación o golpear excesivamente los explosivos para forzar su paso dentro de barrenos bloqueados.
- 2) No se atacará directamente el cartucho-cebo.
- 3) No usarán barras de metal como atacadores.
- 4) No deberá utilizar cualquier otra práctica o técnica para generar calor, fricción, corriente galvánica o impacto que pueda iniciar la carga explosiva.

CONCLUSIÓN CAPITULAR.

Con esto se puede observar que es muy importante la selección de los artificios y dispositivos de iniciación, pues sin ellos los explosivos no pueden detonar adecuadamente y por consecuencia no llevar a cabo su trabajo, además pueden provocar accidentes.

REFERENCIAS.

- 1.- ALCARAZ LOZANO, Federico. *Los Explosivos en la Construcción*. Primera edición. Fundación para la enseñanza de la construcción, A.C. México. 1990. Pags. 14-47
- 2.- COMPAÑÍA MEXICANA DE MECHA PARA MINAS, S.A. DE C.V. *El Cordón Detonante Primacord*. Gomez Palacio, Durango. Pags. 7-20
- 3.- DUPONT. *Manual para el uso de Explosivos de Dupont*. México. 1987. Pags. 38-50
- 4.- FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.
- 5.- RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988. Pags.70-87
- 6.- SÁNCHEZ PULIDO, Pedro. *Explosivos*. Instituto de Capacitación de la Industria de la Construcción. 1990. Pags. 15-20
- 7.- TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988. Pags. 9-40

CAPITULO 4.- BARRENACION DE ROCA

En el uso práctico de equipos de barrenación, solamente se consideraran aquellos que son de uso constante en las obras de ingeniería y están representados por las perforadoras de rotación- percusión, tanto en su tipo manual como en aquel en que para obtener mayores resultados se manejan sobre columnas de mayor alcance, moviéndolas con sistemas de autoimpulso, a continuación se describirán los equipos mas utilizados en la perforación.

4.1 EQUIPOS DE BARRENACION

4.1.1 PERFORADORAS

Las perforadoras de uso cotidiano para barrenos de diámetro máximo de 1 ½" y 6 mts. de profundidad, son las manuales, cuyos pesos varían entre 25 y 65 lbs. Estas máquinas trabajan con energía neumática por lo cual siempre están alimentadas por compresores para aire comprimido. En estas máquinas la percusión se obtiene por medio de un pistón o martillo que golpea la barra de perforación a través de un yunque, y lo obtiene por medio de una válvula "auto-actuante", que admite el aire comprimido en el momento adecuado, primero en un extremo del cilindro y luego en el otro. La rotación de la barra se logra mediante un mecanismo interno que hace girar el portabarra, el cual arrastra consigo en su giro a la barra de perforación, que se encuentra montada por el zanco (Ref. 2).

Sobre la roca se recibe un golpe con la broca que trabaja como cincel, produce un pequeño esquirlado de la misma, la rotación produce este golpe de cincel a distancias pequeñas que hacen que en cada vuelta completa se rompa una capa de roca igual al de la profundidad que logra la roca por golpe, los polvos y esquirlas del barreno se extraen por medio de un soplado que se logra porque a lo largo de la barra tiene una perforación para este objeto, en algunas perforadoras en lugar del soplado se introduce agua a presión para que arrastre los detritus producidos por la roca.

En la perforación usual para la gran mayoría de nuestras obras, los diámetros requeridos varían entre $\frac{3}{4}$ " y $4\frac{1}{2}$ ".

Este objetivo se logra con las maquinas descritas y otras que como se dijo anteriormente, son de mayor peso y alcance, por ello vienen montadas sobre columnas de donde son accionadas por cadenas, la maquina es completada por un chasis y un sistema de transito que están en presentaciones de llantas neumáticas (wagon drills) o sobre orugas (track drills) lográndose con éstas, los diámetros de $1\frac{1}{2}$ " a $4\frac{1}{2}$ " y penetraciones económicas hasta de 12 mts. o más.

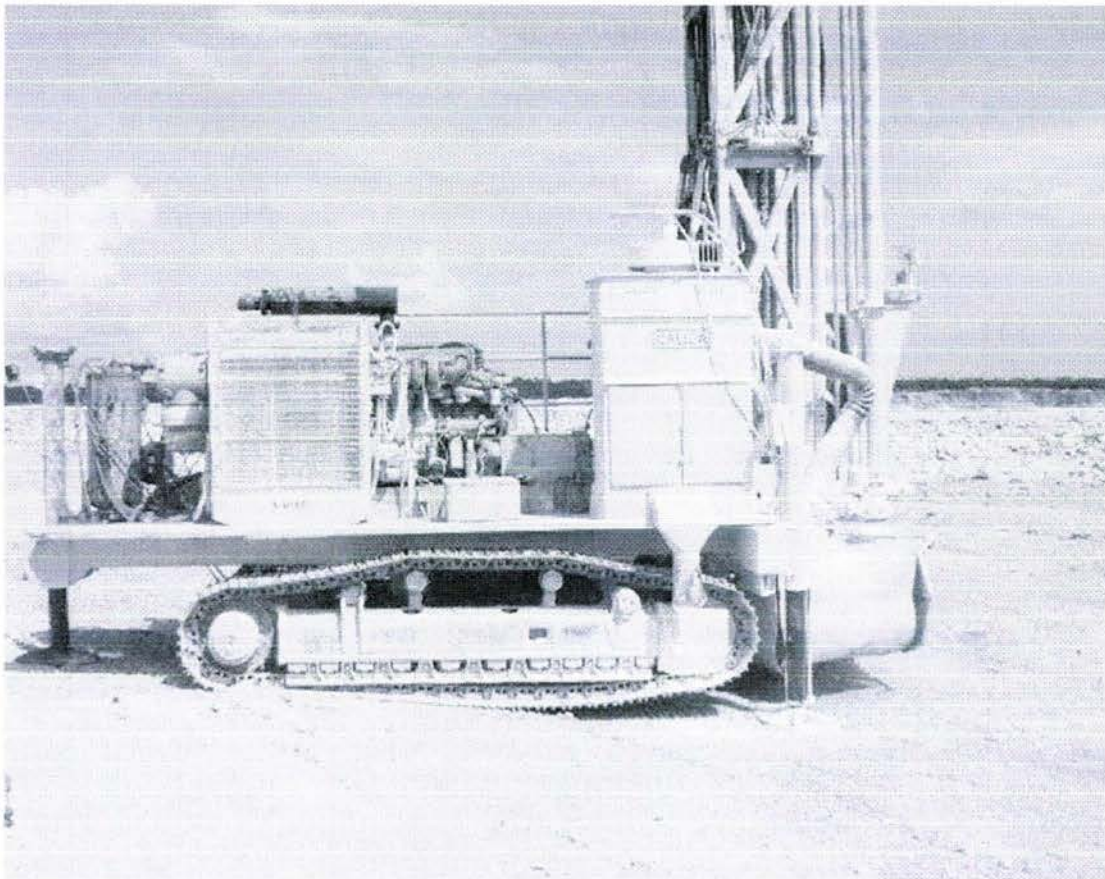
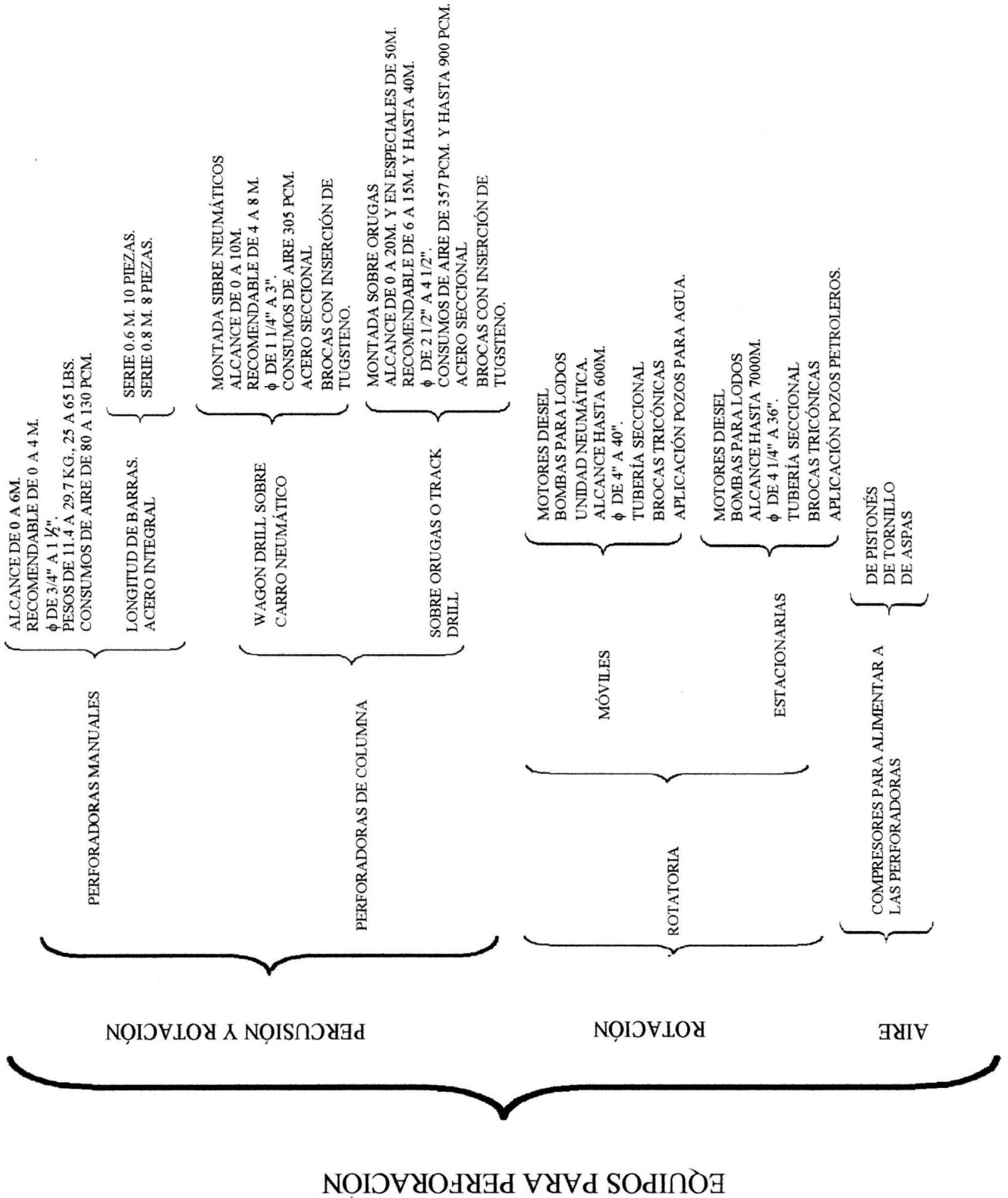


Fig. 4.1.- Fotografía de Track Drill

CUADRO SINOPTICO DE EQUIPOS PARA PERFORACIÓN



4.1.2 MARTILLO PERFORADOR EN EL FONDO.

Como consecuencia de la pérdida de eficiencia de las perforadoras de percusión-rotación cuando trabajan a profundidades mayores de 25 m., se ideó y diseñó un martillo cuyo trabajo se ejecuta en el fondo del barreno, alimentándolo por medio de tubería de perforación que proporciona el movimiento rotatorio de toda la columna, dejando al martillo el trabajo de percusión (Ref. 1).

El martillo está construido en su parte interna en forma muy semejante al de una perforadora manual, que es accionada por aire a presión y en el cual sus partes efectúan un golpeo en el extremo de la broca, y que permite el fracturamiento de la roca.

4.1.3 UTILES DE PERFORACIÓN (barras y brocas).

En las perforadoras de mano casi siempre se usan barras de perforación, cuyo extremo cortante tiene una inserción de carburo de tungsteno que las hace más durables.

Las perforadoras de mayor peso, que dan mayores diámetros, trabajan con barras de acero de extensión, en cuyo extremo final se acopla la broca, cuyo filo cortador es también de carburo de tungsteno, casi siempre tienen forma de cruz (de "x"), o de botones, su aplicación es variable en función de la roca que se va a barrenar.

Con estos equipos perforadores se logran velocidades de perforación variables de 4 a 20 m. por hora, dependiendo del diámetro de la broca, profundidad del barreno y dureza de la roca.

4.2 RECTITUD DE LOS BARRENOS

Para que el resultado de la voladura se ajuste a lo calculado es muy importante que los fondos de barreno estén ubicados de acuerdo al proyecto.

Para asegurarse de que esto sucede, los barrenos deben estar correctamente colocados de acuerdo con la plantilla y ser lo más perfectamente rectos que sea posible. La desviación tiende a aumentar rápidamente en función de la profundidad. Cuando esta desviación se presenta, es aconsejable aumentar la barrenación específica, para lo cual se perfora con un bordo (B) y espaciamiento (E) menores de lo que teóricamente se calcularon, para obtener la fragmentación propuesta (Ref. 4).

La forma principal de minimizar la desviación es usando barras rígidas con plena sección y perfectamente roscadas con sus coples.

Cuando se trabaja en banco de altura mayor de 12 m., es aconsejable el uso de barrenos horizontales que se perforan a nivel del piso del banco, esto garantiza el acabado y controla la voladura en el fondo del barreno.

4.3 FORMA DE TRABAJO DE LA PERFORACIÓN (Impacto, Avance y Rotación).

La mejor forma de aprovechar la energía de impacto es manteniendo la fuerza de avance en la forma más constante posible, cuidando de que este no sea perjudicial a la rotación.

Cuando se perforan rocas duras es muy frecuente que se aprovechen al máximo la rotación, el avance y la energía de impacto, algo muy deseable en la técnica de barrenación. Para los equipos de extensión, las barras carborizadas de rosca tandem son la solución más recomendable(Ref. 4).

Si se trabaja en roca de fácil penetración los equipos modernos dan un gran avance, en estos casos hay que reducir la energía de impacto para tener tiempo de retirar los fragmentos de roca molida con el barrido de aire, y es necesario adaptar el avance a la potencia de los golpes. Cuando se tengan estas condiciones, es aconsejable el uso de barrenas con temple de alta frecuencia, ya que son menos sensibles al calor que se pueda desarrollar.

Las barras de perforación que se utilizan en trabajos de construcción pesada pueden ser integrales o de extensión. Las primeras tienen forjado en la última barra el zanco, (culata) y la punta de ataque, esta última siempre protegida con inserción de carburo de tungsteno (que forman lo que se llamaría la broca). Las segundas, barras de extensión, están roscadas en sus dos extremos en tal forma que permiten la unión entre culata y barra, entre barra y barra y entre barra y broca.

Las brocas como ya se mencionó tienen forma de cruz, o de botones. Las de cruz están protegidas en sus filos, con inserciones de carburo de tungsteno que permite mayor duración y penetración por la resistencia de este en sus filos. La de botones, tiene en su superficie de ataque una serie de botones de carburo de tungsteno que las hacen más resistentes al desgaste.

En la perforación de rocas blandas, medias y semiduras es aconsejable el uso de brocas de cruz y “de x”, considerando más efectiva para rocas duras las brocas de botones, las cuales a su vez requieren de menor número de afiladas.

4.4 RENDIMIENTO DEL EQUIPO DE BARRENACIÓN

Hasta estos días se han desarrollado sistemas y métodos muy sofisticados para determinar los rendimientos de la perforación mecánica por el sistema de percusión rotación, para dar un método sencillo y práctico se deben considerar los elementos que a continuación se mencionan.

1. Energía y potencia consumida.
2. Velocidad de penetración.
3. Desgaste de la broca.

De estas se considera que las más importantes son:

Velocidad de penetración y desgaste de la broca.

Cuando se trabaja en obras a cielo abierto se debe considerar y determinar por observación directa, los tiempos requeridos para la perforación y el desgaste de la broca, los cuales están sujetos a variaciones considerables en función de la dureza de la roca, de sus componentes geológicos, de la profundidad del barreno y del diámetro de la perforación. Como puede deducirse, para cada caso se tendrán diferentes rendimientos, por lo que los más exactos deben obtenerse por observación directa, que permitirá compilar datos estadísticos para aplicación posterior en trabajos similares (Ref. 5).

4.5 COMPRESORES

Se llamará Compresores a aquellas máquinas que fueron diseñadas para producir y almacenar aire a presión, elemento que utilizan para trabajar todos los equipos de percusión-rotación.

Casi siempre están montadas en un chasis rígido de 2 a 4 llantas para su fácil movimiento de tiro; se componen principalmente de un motor que produce la energía, un compresor cuyo objeto es comprimir el aire y un sistema de almacenamiento en donde se acumula para entregas de trabajo, está provisto de sistemas de seguridad que limitan la cantidad de aire comprimido y la presión máxima a que se puede almacenar.

Se fabrican en diferentes capacidades, indicándose estas en p.c.m. (pies cúbicos por minuto), que permite seleccionarlos en función del consumo que se requiera para la o las perforadoras que puedan alimentar. La equivalencia de p.c.m. a m^3/min . es la siguiente.

$$1 \text{ p.c.m.} = 0.02832 \text{ m}^3/\text{min}.$$

Los compresores de uso común disponibles en el mercado y cuyas medidas los hacen manejables, se fabrican desde 75 p.c.m. hasta 1000 p.c.m.; su elección se hará en función de la demanda requerida por el equipo de barrenación (Ref. 3).

CONCLUSIÓN CAPITULAR.

Como se puede observar en este capítulo, existen diferentes equipos utilizados para la perforación de roca, cada uno de ellos con diferentes características que se pueden aprovechar para realizar diversos trabajos.

REFERENCIAS:

- 1.- DÍAZ DEL RIO, Manuel. *Manual de Maquinaria de Construcción*. primera edición. McGraw Hill. España. 2001. Pags. 255-332
- 2.- FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.
- 3.- RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988. Pags. 8-24
- 4.- SÁNCHEZ PULIDO, Pedro. *Explosivos*. Instituto de Capacitación de la Industria de la Construcción. 1990. Pags. 60-87
- 5.- TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988. Pags. 26-29

CAPÍTULO 5.- COLOCACIÓN Y TRANSPORTE DEL EXPLOSIVO.

Para llevar a cabo la colocación y el transporte del explosivo es necesario tener en cuenta algunos aspectos de seguridad muy importantes, además de contar con los permisos necesarios que expide la Secretaría de la Defensa Nacional. A continuación se describirán algunos de estos aspectos.

5.1 MÉTODOS DE CARGA

El cargado abarca la operación completa de colocar una carga en la forma deseada con uno o más cebos y dejarlos listos para el disparo. Las cargas se colocan, por lo regular, en los barrenos y se confinan con un taco (relleno de la parte superior que tapa el barreno), haciendo esto posible que los explosivos desarrollen su máxima eficiencia al efectuar trabajo útil en el rompimiento del material adyacente. En algunos tipos de voladura es mejor, por razones de seguridad y rapidez en la operación, simplemente colocar la carga en contacto próximo con el material u objeto que va a dispararse. Este método se conoce como **plasteo** y utiliza solo una porción relativamente pequeña de la energía de los explosivos (Ref. 5).

El cargado de los barrenos de una voladura debe efectuarse siempre por alguien que tenga suficiente experiencia y conocimiento de todas las fases del procedimiento, especialmente las precauciones de seguridad que deben observarse, no solo durante el proceso de carga, sino también antes de iniciar el trabajo.

Las voladuras a cielo abierto, han tenido un incremento muy notable en los últimos años. A su vez en el campo de acción del ingeniero civil ha aumentado grandemente la necesidad de usar estos métodos de voladuras en trabajos tales como tajos abiertos, canteras, construcción, presas, carreteras, puertos, etc.

Para estas operaciones, el uso de barrenación de gran diámetro, es lo mas usual y recomendable (se entiende por diámetros grandes, los barrenos de 2 ½" a 9" o mayores).

Al hacer un análisis de estas operaciones, resaltan las siguientes necesidades.

- a) Barrenos de diámetro mayores de 2.5".
- b) Utilizar al máximo la energía explosiva que se coloque en el hueco útil del barreno.
- c) Producir el mayor número posible de metro cúbicos o toneladas de roca por metro lineal de barreno, para reducir los costos de barrenación.
- d) Obtener la máxima fragmentación del producto de la voladura, para que el equipo de carga de la rezaga, transporte y trituración, trabajen con la mayor eficiencia.

Los barrenos pueden cargarse de varias maneras, estas se clasifican como sólida, a carril, dividida, separada y secanteada.

5.1.1 Sólida.

En este método de carga se coloca tanto explosivo dentro del agujero, como sea posible. Se vierte dentro del agujero un explosivo que corra libremente con o sin retacadura. Los cartuchos se colocan en los costados en dos o cuatro partes de modo que se expandan.

El atacador deberá ser de madera, redondo, de un diámetro ligeramente menor que el diámetro del agujero.

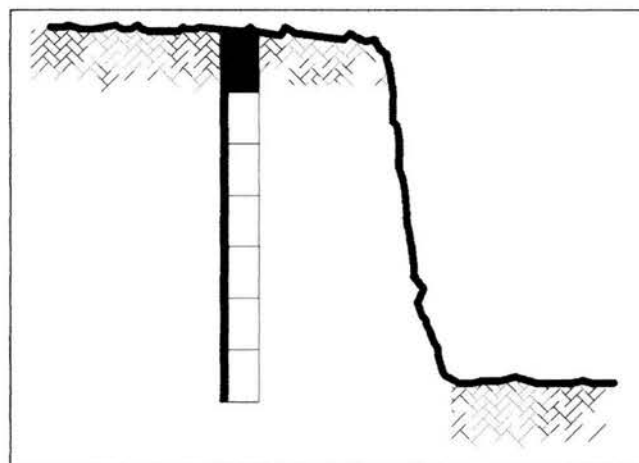


Fig. 5.1.- Carga solida.

Los cartuchos pueden dejarse caer dentro de agujeros poco profundos o dentro de los profundos y lisos. Si el agujero es profundo e irregular y existe la posibilidad de que se atore en el trayecto, deben ser bajados. Si el agujero es desigual o con derrumbes, de manera que no sea práctico cargarlo con cartuchos, puede introducirse un explosivo que corra libremente y que pueda ser fácilmente retacado.

5.1.2 A Carril.

Si el barreno tiene agua, de tal modo que la dinamita con hendeduras o desenvuelta, se heche a perder, pueden dejarse caer cartuchos algo menores que el barreno, uno después de otro sin retacar o después de haber retacado 2 ó 3 del fondo. Este es un método fácil para cargar también y es satisfactorio para voladuras pequeñas u ocasionales. Sin embargo, no es muy eficiente. Se debe perforar más roca que la necesaria para contener la carga que se usa, parte de la fuerza del explosivo se desperdicia en el colchón de aire de su alrededor.

5.1.3 Carga Dividida.

Para este procedimiento, deben usarse separadores para colocar los cartuchos a lo largo de un agujero que no va a cargarse completamente. Estos separadores pueden ser de madera, barro, concreto pobre o cartón enrollado; usualmente se hacen con anticipación en longitudes de 20 a 30cm., deberá haber suficiente espacio de aire alrededor de ellos, para permitir que los cartuchos se exploten unos a otros por propagación, o cebar cada tramo como cuando se usan hidrogeles (Ref. 2).

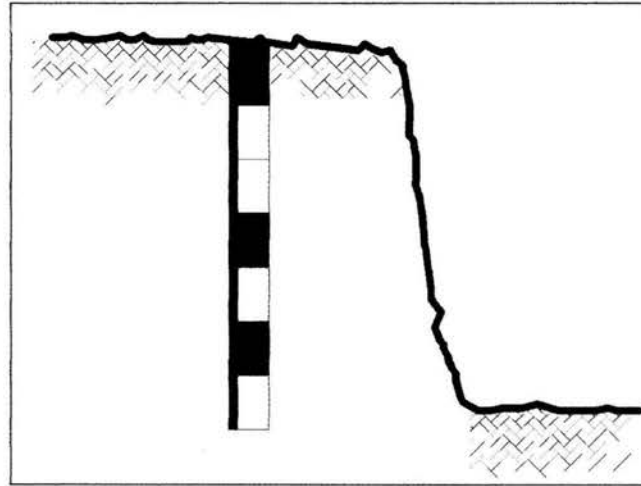


Fig. 5.2.- Carga dividida.

Los separadores pueden alternarse con cartuchos o con pares de cartuchos en las porciones de barreno que no van a cargarse completamente. Un cartucho de cebado, deberá tener cuando menos otro adicional en contacto con él.

5.1.4 Carga Separada.

Los barrenos grandes, cuyas cargas tienen que extenderse, usualmente son separadas por tapones sólidos de arena o de otro material de atacadura y cada sección de la carga, debe ser cebada separadamente, a menos que se dispense con primacord u otro cordón detonante.

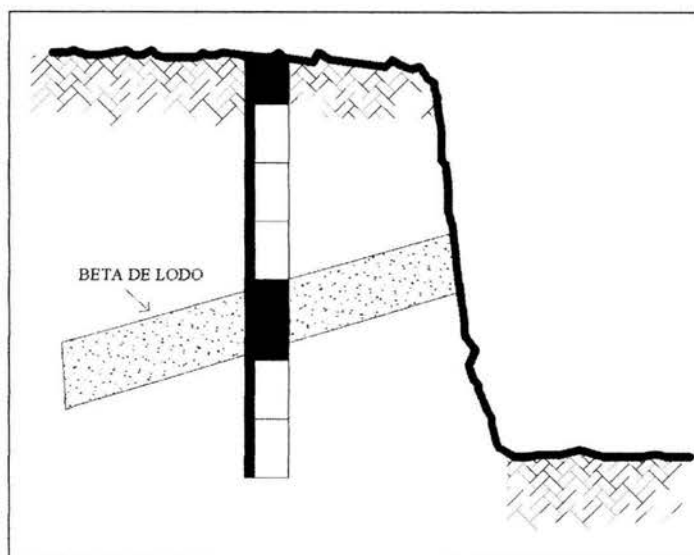


Fig. 5.3.- Carga separada.

5.1.5 Secanteado.

Si la fuerza de una voladura se va a concentrar en el fondo a través de un barreno, puede ser necesario hacer una cámara para contener explosivo adicional. Esto se hace explotando una pequeña cantidad de explosivo de uno o más cartuchos para barrenos de diámetro pequeño, en el fondo. El agujero debe dejarse abierto o ligeramente atacado con arena, se usa explosivo de acción rápida. La carga no debe ser suficientemente grande para volar el frente(Ref. 5).

El secanteado produce una cavidad por fracturación de la roca circundante, volando la fuerza del barreno. Dos o más, voladuras de tamaño cada vez mayor, pueden hacerse necesarias para formar una cámara suficientemente grande.

Los barrenos secanteados no son aconsejables donde el volumen de roca sea ligero, o la roca tienda a fracturarse fácilmente a lo largo de juntas o planos de estratificación. Los barrenos no deben secantarse cuando están próximos a barrenos cargados para evitar la propagación. El secanteado está volviéndose anticuado, ya que es laborioso, peligroso e ineficaz.

5.1.6 Taco, tapón o retaque.

El taco, debe ser de un material inerte tal como tierra, arena o roca finamente triturada, que se usa para llenar las partes de un barreno que no contiene explosivo en el tapón superior; se usa principalmente para taponar los barrenos verticales, desde la parte superior del explosivo hasta la superficie. Su uso mejora la fracturación, ya que confina la fuerza de la explosión y aumenta la seguridad, previniendo la ignición accidental de la carga antes de su disparo. A partir de ensayos realizados en los últimos años, se ha llegado a la conclusión de que el mejor taco se hace de agua contenida en un tubo de polietileno muy delgado que al colocarlo en el barreno se ajusta a las paredes sin romperse.

5.1.7 Cebos

Un cebo es un cartucho de explosivo que contiene una cápsula detonante; o cualquier otro explosivo violento, que ha sido adaptado a un dispositivo para explotario.

En virtud de que los cebos combinan la potencia del explosivo con la mayor parte de la sensibilidad del detonador, deberán manejarse con mayor cuidado que cualesquier otra unidad de explosivo.

Lo esencial de un buen cebo es que el detonador sea suficientemente potente para producir la detonación, que exista un íntimo contacto entre el detonador y el explosivo; éstos deben estar sujetos entre sí, de tal manera que no se separen mientras que están siendo colocados; el detonador deberá estar protegido contra choque o fricción y los alambres o la mecha no deberán estar enredados ni tensos.

5.2 EQUIPOS USADOS PARA LA CARGA DE EXPLOSIVOS.

5.2.1 Atacadores

Para los explosivos encartuchados se emplea como norma el atacador, que es un sistema rudimentario y por experiencia se sabe que el grado de retacado que se obtiene es relativamente bajo. Para mejorarlo, se usan cartuchos con envoltura perforada que se rompe cuando se comprime, otro método consiste en cortar dicha envoltura mediante dos incisiones longitudinales diametralmente opuestas. Sin embargo, no es aconsejable hacer esto en rocas fisuradas en las que suele ocurrir que los cartuchos se atasquen en el barreno. Si se desea obtener un grado de retacado próximo a la densidad del explosivo encartuchado, se debe introducir y comprimir en el barreno un solo cartucho de cada vez (Ref. 4).

5.2.2 Cartuchos Largos Rígidos

Para facilitar la carga de los barrenos de gran longitud, a veces se utilizan unos cartuchos largos que pueden empujarse en el barreno sin deformación. El grado máximo de retacado no es particularmente elevado, debido en parte al espesor de la envoltura rígida y en parte a la diferencia que debe existir entre el diámetro de los barrenos y el de los cartuchos. Si éste es demasiado pequeño, existirá el riesgo de que los cartuchos se atasquen al introducirlos en el barreno.

Según algunas normas canadienses, los cartuchos de 1 1/8" pueden utilizarse en barrenos de 1 1/4", los de 1 1/4" en los de 1 1/2" y los de 1 3/4" en los de 2", lo que corresponde a una diferencia en diámetros de 3 mm para 1 1/4" y de 6 mm para 1 1/2" y 2".

5.2.3 Inyección de los cartuchos con aire comprimido.

Este es un método que consiste en la inyección de los cartuchos con aire comprimido a través de un tubo metálico que se introduce en el barreno; los cartuchos adquieren una gran velocidad y se rompen cuando chocan contra el fondo, aunque originalmente se empleaba este método para cargar barrenos en lo que se había ensanchado el fondo, en los últimos años se ha adoptado este método para cargar barrenos profundos, especialmente en roca fisurada. Como el incremento del grado de retacado se obtiene a costa del incremento de la velocidad de introducción de los cartuchos, el margen de seguridad es bastante pequeño, pues las velocidades que se le aplican a los cartuchos van de 50 m/s hasta los 60 m/s dependiendo del tipo de explosivo y hay algunos que detonan a un impacto de 88 m/s y otros hasta los 103 m/s.

5.2.4 Carga con espaciadores.

En casos como voladuras en zanjas, etc., en las que solamente se desea una concentración de 0.25 kg/m, aun los cartuchos de 7/8" colocados en el barreno sin atacador dan una cantidad excesiva de explosivo. Si no existen cartuchos especiales para la concentración

deseada, ésta puede reducirse mediante la llamada carga con espaciadores. Con una goma del 35% NGI encartuchada en 7/8" se obtienen concentraciones de hasta 0.25 kg/m cuando se colocan separadores de madera entre los cartuchos de la misma longitud que éstos. Este sistema ha de utilizarse siempre con explosivos de alta sensibilidad y buena aptitud de propagación.

5.2.5 Cargas para voladuras suaves.

Se han diseñado unas cargas especiales para voladuras perimétricas, que consisten en tubos de unos 0.5 m de longitud, cargados con un explosivo especial de gurita. Para obtener la longitud deseada se unen las cargas mediante acoplamiento cuyo diámetro exterior es de 18.5 mm. Las cargas de gurita constituyen una herramienta completa para toda clase de recortes de techos y paredes en los túneles; utilizándolas, está asegurado un tratamiento suave de la cara definitiva de la roca.

También pueden obtenerse cargas para precorte, cortando longitudinalmente cartuchos de dinamita ordinaria y colocándolos en una caña de madera. Usando estos medios cartuchos de 25 mm separados 5 ó 10 cm, se obtiene una concentración menor de 0.25 kg/m.

5.2.6 CARGADORA NEUMÁTICA DE CARTUCHOS.

Esta ha llegado a ser indispensable en voladuras bajo el agua, en aquellas que se efectúan sin desmontar el recubrimiento y en las de barrenos largos. Se utiliza también mucho en túneles y en otras clases de voladuras.

Utilizando esta cargadora se aprovecha totalmente el volumen del barreno, con lo que el costo de perforación se reduce a un mínimo.

En algunos casos de voladuras bajo el agua, puede efectuarse la carga desde la superficie, no teniendo el buzo más que colocar el tubo dentro del barreno, los buzos manejan el tubo de carga desde el fondo, no necesitando colocar los cartuchos en los barrenos y dichos

cartuchos se insertan desde la superficie mediante el tubo de carga. Cuando se utiliza esta máquina en rocas agrietadas, se tiene la ventaja de poderse conocer si el barreno está obstruido antes de empezar la carga.

Durante la carga se introduce el tubo de carga hasta el fondo del barreno. El aire comprimido pasa a través del tubo y empuja hacia delante a los cartuchos, cuyo diámetro es aproximadamente menor un milímetro menor que el diámetro interior del tubo. Tan pronto como el cartucho llega al inyector, que tiene su mismo diámetro, se impide el escape del aire y aumenta la presión en el tubo. El cartucho es, entonces, expulsado a muy baja velocidad y el papel queda cortado por las tres cuchillas de la boquilla. Si el tubo cargador es manipulado lentamente, con ligeros y repetidos movimientos de avance y retroceso, los cartuchos expulsados quedarán retacados con una densidad alta.

También si se usa una recámara semiautomática y un cargador robot, se carga mucho más fácil y rápido, este aparato lo maneja un solo hombre, únicamente tiene que poner los cartuchos en la recámara.

El robot cargador consta de un cilindro neumático en el que corre un pistón a través del cual se inserta el tubo de carga en el barreno. Al pistón tubular está conectado un empujador neumático, que es una mano que acciona por fricción al tubo con un movimiento alternativo de avance y retroceso de 10 – 15 cm de amplitud. Si el movimiento de avance del tubo es impedido por los cartuchos expulsados, el tubo resbala de la mano y comprime dichos cartuchos con una fuerza igual a la fricción del deslizamiento. En el retroceso, el tubo sigue a la mordaza y pasan nuevos cartuchos a través del inyector. El grado de retacado depende de la presión de aire en el empujador. De esta manera, es posible obtener un grado de retacado máximo en el fondo y una baja densidad en la columna de carga bajando simplemente la presión de aire en el empujador.

5.2.7 CARGADORA CON PRESIÓN DE AGUA

Para la carga bajo agua, se han obtenido buenos resultados, empleando en lugar de aire comprimido, agua a presión. La fuerza ascensional del aire que llena el tubo es un tanto molesta, especialmente cuando la carga es hecha por buzos. También es un gran inconveniente la tendencia del aire de escape a remover el fango del fondo, obstruyendo completamente la visión de los buzos.

La energía potencial del medio comprimido puede despreciarse a causa de la ligera compresibilidad del agua; por lo tanto, los cartuchos no pueden acelerarse hasta velocidades altas por un descenso rápido de la presión. Sin embargo, la presión de carga debe ser moderada, para que la capacidad de detonación del explosivo no se vea perjudicada, aunque, desde luego, dicho explosivo debe ser adecuado para voladuras submarinas.

Estas cargadoras están construidas, en principio, sobre las mismas bases que las neumáticas, aunque todos sus elementos se han diseñado con mayores superficies de flujo. Entre la recámara y el tubo de plástico existe otro tubo intermedio que es desaguado cuando se introducen los cartuchos. En su parte inferior tiene un grifo de salida y en frente de la recámara hay una válvula; ambas son manejadas conjuntamente con el pie del operador, abriéndose una cuando la otra está cerrada e inversamente.

Se debe tener cuidado si la carga del barreno se efectúa con facilidad. En caso contrario, el operador puede no notar el lanzamiento de los cartuchos, y de esta forma puede que lleguen a formarse en la columna explosiva intercalaciones de agua. Si un cartucho se atasca en el tubo, puede aumentarse la presión del agua hasta deshacer el tapón sin tener necesidad de sacar el tubo. El manómetro de la recámara indica cuando se han expulsado todos los cartuchos.

5.2.8 CARGA DE MEZCLAS DE NITRATO AMONICO (NA) Y OTROS EXPLOSIVOS PULVERULENTOS.

En los barrenos descendentes de diámetro superior a 7.5 cm, las mezclas corren libremente, pudiendo verterse sencillamente a través de un embudo. Cuando se trata de grandes voladuras y barrenos de $\phi = 10 - 25$ cm, pueden llenarse directamente los barrenos desde un deposito situado sobre un camión, o desde un camión tanque. Entonces, es factible disponer el trabajo de modo que el nitrato y el aceite se mezclen automáticamente cuando se les vierte en los barrenos.

Para barrenos horizontales y ascendentes se emplean cargadoras especiales, que consisten en un depósito de aire comprimido desde el que se lanza el explosivo al barreno a través de una manguera. Algunas cargadoras están preparadas para mezclar el NA de este mineral y cargarlo inmediatamente después.

Es importante que el deposito esté diseñado de modo que no se formen canales en la mezcla, de forma tal que llegue a soplar aire en el barreno sin que arrastre explosivo. Otro problema es la dimensión de la manguera y el ajustar la cantidad de aire para que se cargue el explosivo sin que se formen tapones o ráfagas de aire.

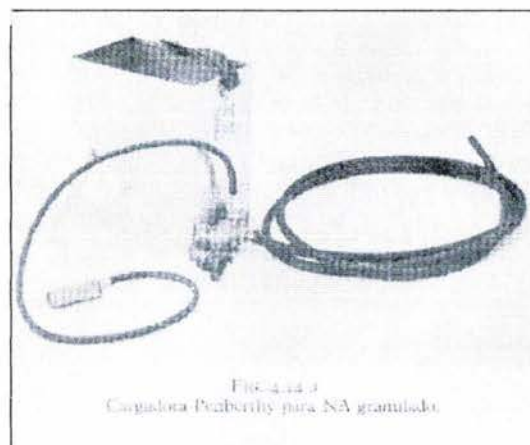


Fig. 5.4.- Cargadora Penberthy para NA granulada

En la figura se ve una cargadora Penberthy Anoloader, que consiste en un tanque abierto y un inyector en el fondo. El NA-aceite fluye por gravedad al interior del inyector y es lanzado a través de una abertura de 5/8", con un anillo de chorros de aire. Este aparato se ha empleado en trabajos subterráneos para cargar barrenos de hasta 4 m de profundidad. Generalmente se usa para NA granulado y da un ritmo de carga de 2 a 4 kg/min. Con NA cristalizado, el ritmo de la carga es mayor, como también lo es el porcentaje de NA que vuelve atrás con el aire de escape(Ref. 4).

Para que el explosivo desperdiciado por el empuje del aire en el barreno durante la carga sea pequeño, estas cargadoras generalmente trabajan con baja velocidad de aire. La longitud de manguera no debe exceder de 9 a 12 m cuando el diámetro interior es de 15 a 25 mm y de 15 a 20 m si es de 30 mm.

En las voladuras de banco, que son el principal campo de aplicación de los explosivos NA fabricados in situ o prefabricados, las condiciones varían con el diámetro de la perforación. Para barrenos de gran calibre, la máxima velocidad de carga se consigue vertiendo el explosivo directamente en los barrenos.

Para barrenos con diámetro = 7.5 cm, se obtiene una capacidad de carga de 75 kg/h en barrenos de profundidad $H = 10\text{m}$ y de 150 kg/h por hombre en los de $H = 15\text{m}$., estas cifras corresponden a un tipo de explosivo NA prefabricado que está especialmente tratado para que fluya libremente por el barreno.

Cargando directamente desde camiones tanque con mezcladoras automáticas de NA-aceite, se ha conseguido, en barrenos de 20 cm, una capacidad de carga de 90 kg/min, pudiendo cargarse con dos hombres en un relevo una voladura de 8000 kg, lo que corresponde aproximadamente a 500 kg/h por hombre en barrenos de profundidad $H = 15\text{m}$.



Fig. 5.5.- Fotografía de camión tanque con mezcladora automática de NA-aceite

5.3 TRANSPORTE, MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE LOS EXPLOSIVOS.

A continuación se presentan una serie de puntos que se deben de tomar en cuenta cuando se tenga la necesidad de transportar, manejar o almacenar explosivos en nuestros trabajos

5.3.1 TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS

1.- Cualquier vehículo que esté transportando explosivos, deberá estar marcado o pintado o tener un letrero en la parte delantera, a ambos lados y en la parte trasera con la palabra “explosivos”, en letras de no menos de 4 pulgadas de altura en colores que hagan contraste con los de fondo; o bien llevar en un lugar visible una bandera roja de no menos de 24" de lado con la palabra “explosivos” en letras rojas de cuando menos 3" de altura o la palabra “peligro” en letras de 6" de altura (Ref. 6).

2.- Los vehículos no deberán llevar cápsulas detonadoras fulminantes cuando estén transportando otros explosivos; ni metales, herramientas metálicas, aceite, cerillos, armas de fuego, ácidos, sustancias inflamables, o materiales semejantes.

3.- Los vehículos que transportan explosivos no deberán estar sobrecargados y en ningún caso se apilarán las cajas o latas de explosivos a una altura mayor que la de la carrocería. Cualquier vehículo de caja abierta deberá llevar una lona para cubrir las cajas o latas de explosivos(Ref. 3).

4.- Todos los vehículos, cuando estén transportando explosivos, deberán inspeccionarse para determinar si: los frenos y el mecanismo de la dirección están en buenas condiciones; si los alambres eléctricos están bien aislados y firmemente asegurados; si la carrocería y el chasis están limpios y libres de acumulaciones de aceite y grasas; si el tanque de combustible y la línea de alimentación están seguros, y sin fugas; si se ha proporcionado dos extinguidores de incendio, localizados cerca del asiento del chofer; y en general, si el vehículo está en condiciones adecuadas para el transporte de explosivos.

5.- El piso de los vehículos deberá estar perfectamente empalmado y ajustado. Cuaiquier pieza metálica que esté expuesta en el interior del vehículo y que pueda entrar en contacto con algún paquete de explosivos deberá ser cubierta o protegida con madera o algún material no metálico.

6.- Los explosivos no deberán de trasportarse en remolques. Así mismo, a los vehículos que transporten explosivos no deberá enganchárseles ningún tipo de remolque.

7.- Los vehículos que transportan explosivos no deben llevar pasajeros ni personas no autorizadas para viajar en ellos. No debe permitirse fumar ni llevar cerillos.

8.- Los paquetes o cajas de explosivos no deben aventarse o dejarlos caer al estarlos cargando, descargando o acarreando, sino que deben depositarse cuidadosamente y almacenarse o colocarse de tal manera que no se deslicen, caigan o muevan.

9.- Los motores de los vehículos que transportan explosivos deberán estar parados antes de cargar o descargar los explosivos.

5.3.2 MANEJO DE EXPLOSIVOS.

1.- Las cajas que contengan explosivos deberán levantarse y bajarse cuidadosamente sin deslizarlos unos sobre otros, o dejarlos caer de un nivel al siguiente, ni manejarse bruscamente(Ref. 1).

2.- Las cajas o paquetes de explosivos no deben abrirse dentro de un almacén de explosivos o arsenal, ni siquiera en un radio de 50 pies del almacén.

3.- Deben emplearse herramientas fabricadas con madera o con algún otro material no metálico, para abrir las cajas o barriles o cualesquiera otra vasija en que se encuentre contenido un explosivo. Nunca deben emplearse herramientas metálicas.

4.- Los explosivos y detonantes que se den a los obreros, deberán colocarse en receptáculos aislados independientemente, equipados con tapas construidas y sujetas, de tal manera que no se puedan abrir accidentalmente durante el transporte.

5.- No deberá permitirse a ninguna persona, excepto al operario, viajar con los explosivos o detonantes cuando estén siendo transportados en un tiro, túnel, o cualquier otra obra subterránea.

5.3.3 ALMACENAMIENTO DE EXPLOSIVOS.

Los explosivos y detonantes deben depositarse separadamente en almacenes independientes, secos, ventilados, a prueba de balas y resistentes al fuego, alejados de otros edificios, vías de ferrocarril y carreteras. La Tabla Americana de Distancias proporciona estas distancias de separación dependiendo del tipo y cantidad de explosivo que se almacenaran en el lugar(Ref. 1).

Una bodega para el almacenamiento de explosivos debe estar construida de tal manera que se evite el congelamiento del explosivo durante largos períodos de tiempo en climas fríos. Si el explosivo se congela, deberá descongelarse antes de utilizarlo, ya que el peligro de que explote prematuramente es mucho mayor cuando está congelada.

5.4 RENDIMIENTOS

5.4.1 RENDIMIENTO DE PERSONAL

Rendimiento de un poblador, 2 cargadores y 2 ayudantes en carga de barrenos (Ref. 5).

Personal	Trabajo por ejecutar	Conceptos
1 Poblador	1.- Poblado	Trazo de cuadrícula y ubicación de los barrenos.
	2.- Cebado	Un cebo o más por barreno
2 Cargadores	3.- Carga	300 gr/m ³ promedio
	4.- Retaque	Confinación del explosivo
	5.- Conexiones	2 por barreno mínimo
2 Ayudantes	6.- Prueba.	Por circuitos
	7.- Disparo	Con explosor.

Suponiendo 10 barrenos de 10 metros y 11 m³ roca/m

No. De barrenos	Rendimientos
10x10x11m = 110m x 300 gr/expl.	330 kg carga
10 barrenos	10 a 20 cebos
10 barrenos	520 kg. De retaque
10 barrenos	20 conexiones
10 barrenos	10 pruebas promedio

5.4.2 CONSUMO DE EXPLOSIVOS

Dependiendo del terreno y suponiendo voladuras con estopines con retardo de milisegundos, se sugieren los consumos promedio de explosivos siguientes(Ref. 3):

Profundidad	Carga específica
1.0 m	390 gr/m ³
2.0 m	300 gr/m ³
4.0 m	280 gr/m ³
6.0 m	250 gr/m ³
8.0 m	240 gr/m ³
10.0 m	230 gr/m ³
12.0 m	220 gr/m ³
15.0 m	210 gr/m ³
En adelante	200 gr/m ³

CONCLUSIÓN CAPITULAR

Es de gran importancia el poner atención a los diferentes métodos de carga de los barrenos pues de estos depende el éxito de la voladura, además se deben seguir al pie de la letra los reglamentos que la Secretaria de la Defensa Nacional establece para manejar y transportar explosivos.

REFERENCIAS:

- 1.- DUPONT. *Manual para el uso de Explosivos de Dupont*. México. 1987. Pags. 489-503
- 2.- FUNDACIÓN ICA, A.C. . *Uso de Explosivos en Obras de Ingeniería Civil*. primera edición. FUNDACIÓN ICA, A.C. México. D.F. 1997. Pgas. 83-100
- 3.- FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.
- 4.- LANGEFORS U., KIHLMSTROM B. *Técnica Moderna de Voladura de Rocas*. Urmo, S.A. de Ediciones. España. 1976. Pags. 95-125
- 5.- RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988. Pags. 240-252.
- 6.- TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988. Pags. 56-58

CAPITULO 6.- DISEÑO DE UNA VOLADURA

En este capítulo se presentarán de una manera clara los elementos que intervienen en una voladura y los principios básicos para hacer un diseño de ésta.

Primero se definirá el concepto de voladura, se entiende por voladura cualquier dispositivo que permite la rotura brusca de la roca, mediante explosivos (Ref. 1).

La técnica de voladura de rocas se ha desarrollado enormemente en los últimos años, y de una mera ocupación manual en la que fueron fundamentales la experiencia, la habilidad personal y la intuición, se ha pasado a la creación de una tecnología en la que los conceptos básicos, aunque más desarrollados, pueden fácilmente transmitirse a las diferentes personas que tengan necesidad de usar estas técnicas.

Las canteras y bancos a cielo abierto producen la mayor parte de la roca requerida para la construcción e industrias del país. El termino tajo abierto generalmente se refiere a una operación de minado de un material específico, que es extraído de una formación donadora, de donde (con excepción de empaques de material ajeno al requerido), se aprovecha la totalidad del producto. Dependiendo de la topografía del área, una cantera se desarrollará como una ladera de montaña o como un tajo (Ref. 7).

En donde el área es montañosa y la roca sobresale, la cantera se desarrollará abriendo una cara en uno de los lados de la montaña. El punto de entrada es generalmente en el fondo del yacimiento. Un punto conveniente se escoge para proporcionar un nivel casi al ras del piso con tan solo el suficiente desnivel para drenaje natural.

Cuando el terreno es casi plano, es necesario crear rampas hacia abajo, hasta llegar al yacimiento, formando un tajo que estará totalmente por debajo de la superficie del terreno circundante.

6.1 TIPOS DE VOLADURAS.

Hay dos tipos fundamentales de voladuras: la de frente libre (también llamada de cantera) y la voladura de galería.

Las voladuras de frente libre se dividen a su vez: de fondo fijo o de fondo libre, según exista o no, una limitación a la voladura en su fondo (Ref. 2).

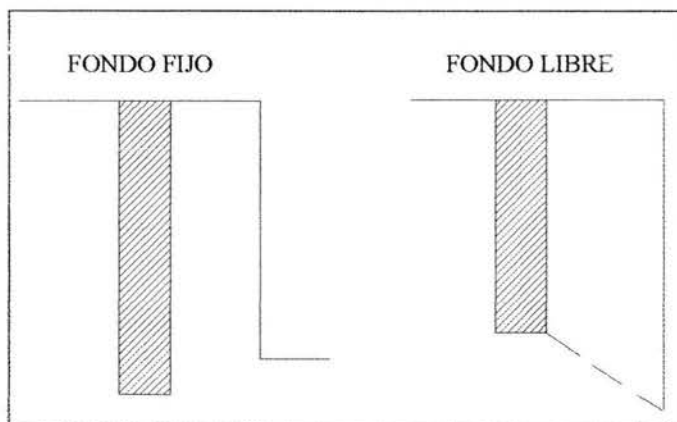


Fig. 6.1.- Voladuras con Frente Libre

En este capítulo nos enfocaremos solamente en describir las voladuras de frente libre o a cielo abierto, que es la que se utiliza para la explotación de voladuras de roca caliza, puesto que la voladura de galería es la que se utiliza en trabajos de minería, para abrir un túnel por ejemplo.

6.2 EXPLOTACIÓN DE UN BANCO DE MATERIAL.

Es de suma importancia al planear la explotación de un banco de material, tomar en cuenta los factores siguientes:

1.- TIPO DE ROCA.

El comportamiento de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca. La propagación de la onda es mas rápida en una roca dura que en una roca blanda. La composición de la roca tiene gran influencia en la fragmentación de la misma y muchas rocas duras se rompen con mayor facilidad que una roca suave(Ref. 3).

2.- TIPO DE EXPLOSIVO.

Cada explosivo cuenta con características propias como lo son: densidad, velocidad de detonación, resistencia al agua, energía disponible, etc., son de suma importancia para decidir que explosivo se va a utilizar para determinado trabajo.

3.- FACTOR DE CARGA.

Se define como la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca y se expresa en gr/m^3 .

El factor de carga a utilizar varía de acuerdo al tipo de roca, pero aún en casos donde se explota un mismo tipo de roca dicho factor puede cambiar, dependiendo del grado de intemperismo, la geología del yacimiento o la capacidad del equipo de acarreo y trituración con que se cuente. Al inicio de una operación es recomendable utilizar un factor más bien alto, que corresponda al tipo de roca y se deberá ajustar conforme se observen los resultados, ya que como se mencionó, con anterioridad, un mismo tipo de roca puede responder de manera diferente, aunque dentro de un intervalo determinado(Ref. 5).

4.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

La geología del material a fragmentar es el factor más importante al determinarse el diseño total de una voladura. Hay muchas teorías que relacionan la velocidad sónica y la dureza

de la roca, utilizadas para determinar la cantidad de explosivo requerida para quebrar el material.

Para determinar estos factores es necesario efectuar pruebas de campo. En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos se basan en la suposición de que el material a quebrar es homogéneo y los resultados de estas pruebas pueden servir de parámetro para ayudar a determinar la plantilla de barrenación a seleccionar, la cantidad y el tipo de explosivo a utilizar; pero la experiencia es la mejor pauta para determinar el factor adecuado.

Las estructuras geológicas tales como las fisuras, oquedades, fallas y posición de los estratos juegan un factor muy importante en los resultados de una voladura, por lo tanto se deben tomar las precauciones pertinentes para optimizar los resultados.

En rocas fisuradas las voladuras deben ser planeadas cuidadosamente, tomando en cuenta la magnitud de las fisuras; normalmente los patrones de barrenación no deben ser muy amplios y se deberá usar explosivos de baja velocidad de detonación y de alta producción de gases, como es el caso de los agentes explosivos. Cuando se utilizan diferentes tipos de explosivos conviene señalar que las unidades de energía por unidades de peso deben considerarse para comparar sus efectos.

En rocas estratificadas las voladuras deben planearse tomando en cuenta la dirección de la estratificación, esto se logra atravesando con la barrenación los planos de contacto de los estratos, para optimizar así el funcionamiento de los explosivos.

6.3 DISTRIBUCIÓN Y DISEÑO DE LA BARRENACIÓN EN UNA VOLADURA.

Dentro de este renglón los factores a considerar son el diámetro, la profundidad, el paralelismo, las plantillas de barrenación y la sub-barrenación.

La selección del diámetro de barrenación está estrechamente ligada al tamaño de la fragmentación requerida, la altura del banco de material y las economías en conjunto, como

la inversión inicial y los costos de operación, aunque es común el uso de diámetros entre 6.35 y 8.89 cm para frentes de explotaciones no mayores a 12 m de altura y de 10.16 a 30.48 cm de diámetro para explotaciones mayores y de volúmenes muy grandes de extracción. Para determinar la altura del banco hay que tomar en cuenta el equipo de rezagado disponible, ya que las voladuras deberán contemplar el mayor ahorro posible de trabajo en todos los aspectos, aunque la altura del banco puede determinarse también por el espesor de la formación; sin embargo, dado que la mayoría de las formaciones exceden los límites prácticos de espesor operable, el factor determinante en la selección de la altura de los bancos, generalmente esta basado en la seguridad. La estabilidad inherente de la formación es el factor controlante de la seguridad en la selección de la altura de los bancos, es decir, que no se debe de operar a mayor altura que la permisible por los intervalos de estabilidad del material a explotar.

El paralelismo entre los barrenos, así como la simetría del patrón de barrenación, son factores que intervienen en la homogeneidad de la fragmentación de una voladura. Cuando no se tiene en cuenta este factor los resultados obtenidos no son homogéneos, pudiéndose presentar en algunos lugares como excelentes y en otros malos, dentro de una misma voladura, debido a concentraciones diferentes de carga explosiva provocadas por la desviación de los barrenos(Ref. 4).

De la plantilla de barrenación depende el buen resultado de una voladura, ya que la distribución de los barrenos dentro del área a volar es fundamental para lograr que la roca se fragmente adecuadamente y la distribución del explosivo en toda la voladura sea el pertinente. Las plantillas de barrenación más comunes son tres: **cuadrada o reticular, rectangular y en tresbolillo**(Ref. 3).

La plantilla cuadrada tiene igual bordo y espaciamiento y los barrenos en cada fila están directamente alineados detrás de los barrenos de la línea del frente.

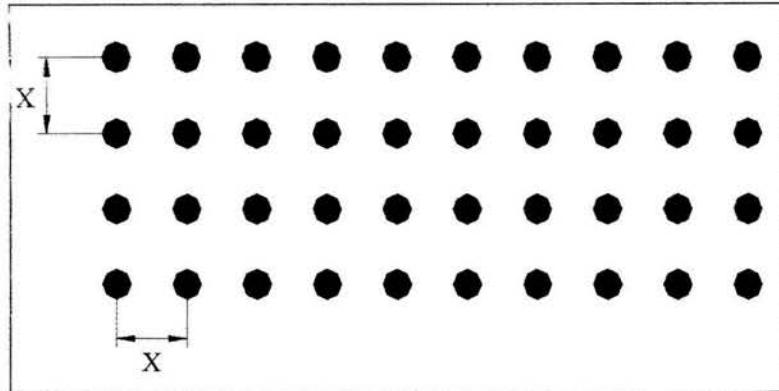


FIG. 6.2 Arreglo de la plantilla cuadrada

La plantilla rectangular tiene bordo menor que el espaciamiento. Y como en la cuadrada, también los barrenos están alineados detrás de los de la línea del frente.

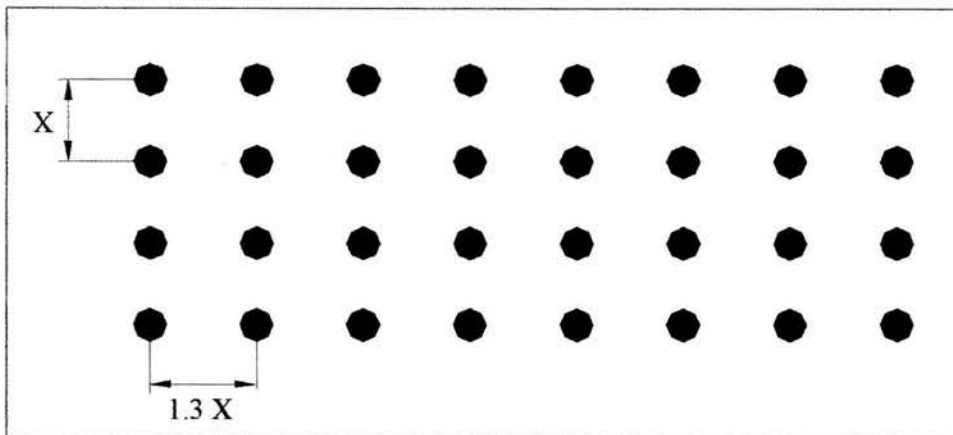


FIG. 6.3 Arreglo de la plantilla rectangular.

La plantilla en tresbolillo puede tener la misma distancia de bordo y espaciamiento, pero es más común encontrar mayor distancia en el espaciamiento que en el bordo; un intervalo confiable de espaciamiento es de 1.3 a 1.5 veces el bordo.

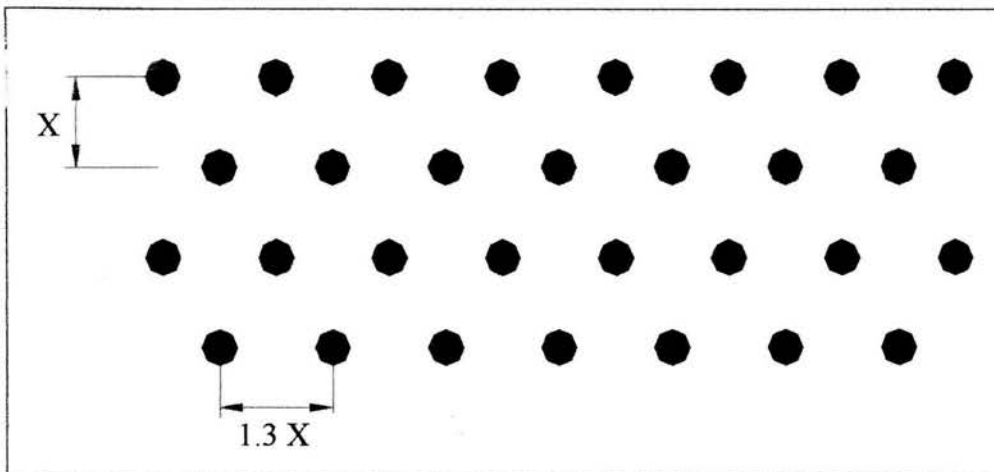


FIG. 6.4 Arreglo de la plantilla en tresbolillo.

Sobre la superficie del banco las áreas fracturadas alrededor de los barrenos pueden representarse como círculos. Es lógico asumir, que todos los puntos superficiales deben caer dentro de uno de los círculos para que ocurra una fragmentación efectiva.

En la figura 6.4 se muestra lo que sucede cuando la plantilla es rectangular y los barrenos están dispuestos uno detrás del otro, la relación borde espaciamento es de 1:1.25, comparado con lo que sucede en una plantilla de barrenación con los barrenos dispuestos en tresbolillo.

Este tipo de plantilla produce una mejor distribución del círculo de fracturas, por lo tanto habrá mayor fragmentación en la rezaga utilizando un mismo factor de carga. Teóricamente el punto óptimo se obtiene cuando los barrenos forman un triángulo equilátero.

En este patrón de barrenación reticular se notan áreas entre los círculos de influencia del explosivo que no se cubren y otras con sobrerompimiento.

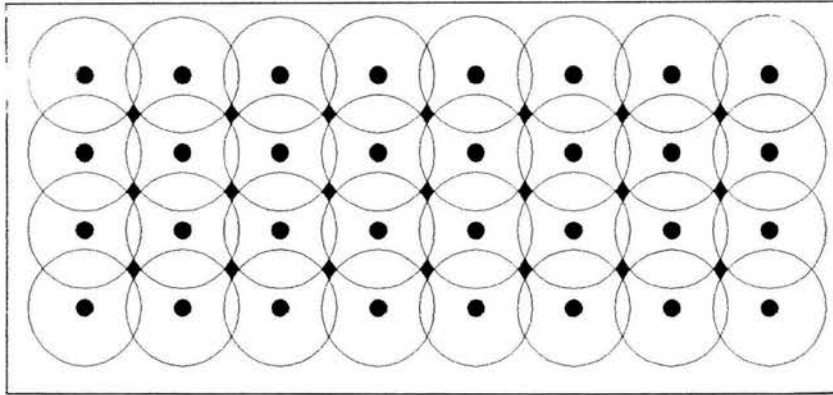


FIG. 6.5 Patrón de barrenación reticular.

En el patrón de barrenación en tresbolillo se aprecia una cobertura más homogénea de la influencia del explosivo.

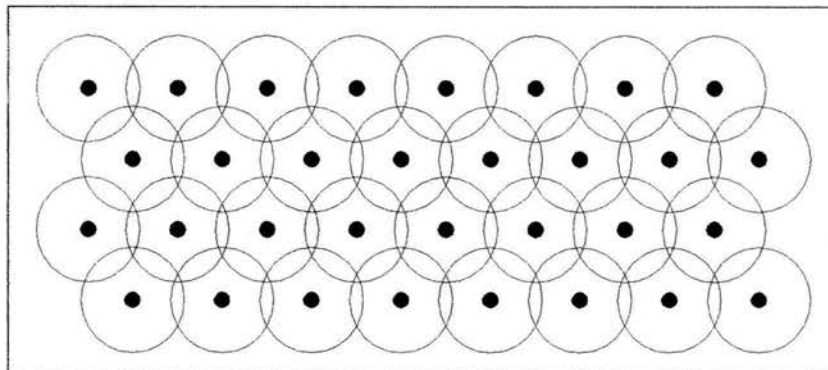


FIG. 6.6 Patrón de barrenación en tresbolillo.

Como en lo anteriormente expuesto, la sub-barrenación se determinará de acuerdo a la geología del terreno, la plantilla de barrenación y el número de hileras que se pretendan disparar; esta consiste en darle a la longitud de la barrenación una sobre-longitud que no deberá ser menor a un tercio del bordo y a medida que las hileras se incrementen se deberá aumentar esta sobre-longitud (comúnmente llamada sub-barrenación). Esto es necesario dado que el área reducida para el movimiento de roca opone mayor resistencia conforme a la longitud hacia el bordo.

6.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS EXPLOSIVOS EN EL BARRENO.

Este es generalmente el factor más importante para la fragmentación adecuada del material, está controlado por el diámetro de los barrenos y por la plantilla de barrenación utilizada, sin embargo, la distribución individual del explosivo en el barreno es otro factor importante.

En la mayoría de las formaciones, el fondo del barreno presenta la mayor resistencia en el movimiento del material a explotar, por lo tanto se utiliza una regla de campo que muchas personas encargadas de colocar explosivos conocen, y consiste en diseñar la carga dentro del barreno, de tal forma que la mitad del total del alto explosivo se encuentre localizada en el primer tercio del barreno. Esta es tan sólo una regla empírica y la distribución del explosivo debe determinarse de acuerdo a las condiciones geológicas y a la dureza del material que se esté explotando(Ref. 6).

Debe tomarse en cuenta que la máxima energía deberá localizarse en el fondo del barreno, decreciendo gradualmente a medida que la columna de explosivo se eleve hasta una profundidad preestablecida para el taco.

El cebado adecuado es de vital importancia para obtener una reacción completa del explosivo que se está detonando, esto es tanto en cantidad como en calidad del producto cebante. Se debe considerar que la presión de detonación del cebo deberá ser superior a la presión de detonación del producto cebado, con el fin de obtener un iniciado eficaz.

Los cebos son más efectivos cuando se colocan de tal manera que la onda de detonación de los iniciadores y de la carga cebo, viajen hacia el explosivo a cebar y en dirección hacia donde se desplazará la onda de detonación.

6.5 RELACIÓN DE EXPLOSIVOS.

La relación de explosivos se determina de acuerdo a las condiciones del banco como son: geología estructural, humedad, dureza, etc; pero puede variar en condiciones normales en una relación de alto explosivo-agente explosivo dentro de un intervalo de 30-70 hasta 10-90 de porcentaje en peso. Es decir, que si en un barreno el total del explosivo a cargar es de 10 kg, tomando la primera relación, 3 kg correspondería al alto explosivo y 7 kg al agente explosivo.

6.6 PARÁMETROS DE VOLADURAS.

Es importante para adentrarse en el manejo y cálculo de voladuras conocer los parámetros que se manejan en ella (Ref. 3).

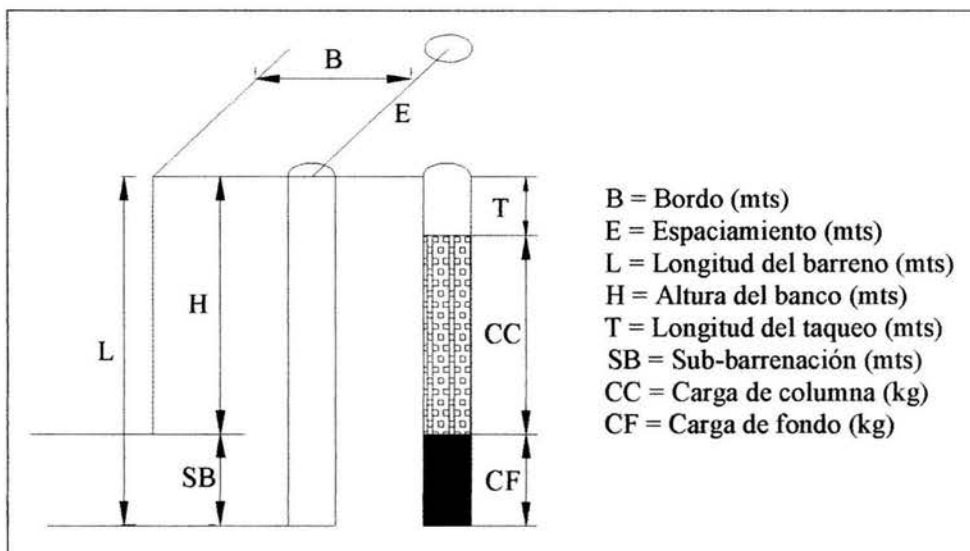


FIG.6.7 Parámetros que intervienen en una voladura(Ref. 3).

TACO

El taco se define como la longitud que hay entre la terminación de la carga explosiva dentro de un barreno y el borde de éste, longitud que está cubierta por material (de preferencia gravilla) con el propósito de evitar el escape de energía y la presión del explosivo al momento de la detonación. La distancia entre la columna de explosivo y la boca del barreno (este tramo relleno con material de atacamiento), es un factor primordial para el control de roca en vuelo(Ref. 4).

Podría, hasta cierto punto, ser riesgoso sugerir la longitud del taco para determinar la longitud de barrenación, este taco se selecciona tomando en cuenta la cantidad de explosivo a utilizar, la dureza del material a explotar y la cantidad de roca en vuelo que pueda tolerarse además de buen juicio y experiencia.

El taqueo deberá efectuarse con el mismo cuidado con el que se realiza el cargado de explosivo en el barreno, teniéndose especial cuidado para no dañar los dispositivos de iniciación. El posible daño que pudiera causarse al sistema de iniciación al intentar retacar de sobremanera el barreno, es demasiado grande para justificar la ligera ventaja que se puede lograr con la compactación.

6.7 RETARDOS EN VOLADURAS.

Aunque se cuente con dos vías de desalojo del material en una explotación de tajo (el frente y la parte superior), la velocidad de la roca al volarse con explosivos es un factor muy importante a considerar. Esto es más importante en voladuras de varias hileras de barrenos. Para una cantera típica, con espaciamientos de 3.00 m, el movimiento inicial en la cara libre ocurre de 10 a 12 milisegundos, pero el bordo únicamente se mueve como 15 cm en 10 milisegundos, esto da como resultado que conforme se detonen las líneas posteriores, el vuelo de las rocas producto de esas líneas, tenderá a la vertical

Esto es causado por la baja velocidad de la roca quebrada, reduciendo consecuentemente el alivio hacia la cara del banco. Y puede contribuir a producir un fondo apretado así como bastante roca en vuelo.

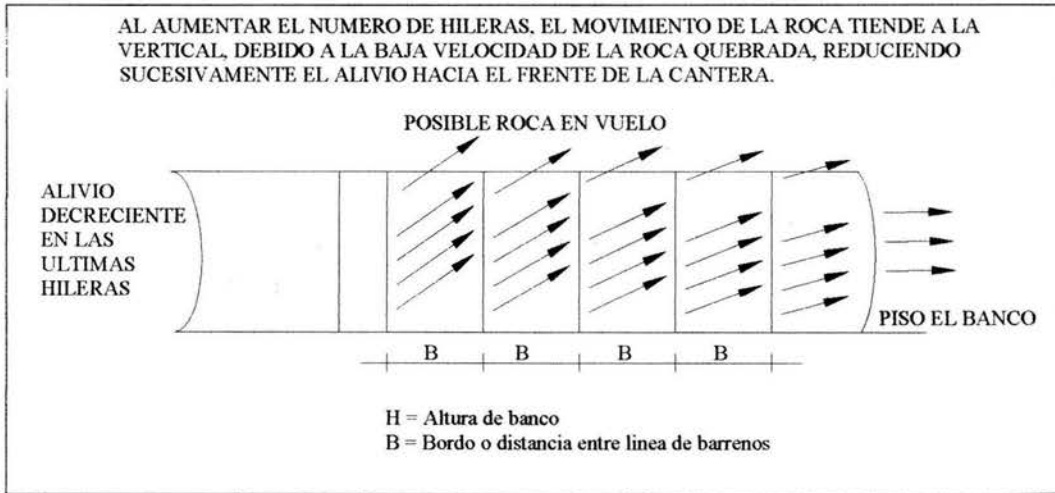


FIG. 6.8 Retardos en voladuras.

Al aumentar el número de hileras, el movimiento de la roca tiende a la vertical, debido a la baja velocidad de la roca quebrada, reduciendo sucesivamente el alivio hacia el frente de la cantera.

En la figura 6.9 se muestran dos hileras de barrenos conectados en un sistema troncal de primacord y líneas transversales con retardadores MS en tres lugares. La primera hilera de barrenos es disparada instantáneamente y la segunda se retarda un periodo. La letra X indica la colocación de los retardadores MS. La voladura puede iniciarse en cualquiera de los barrenos del frente utilizándose generalmente mecha y fulminante(Ref. 3).

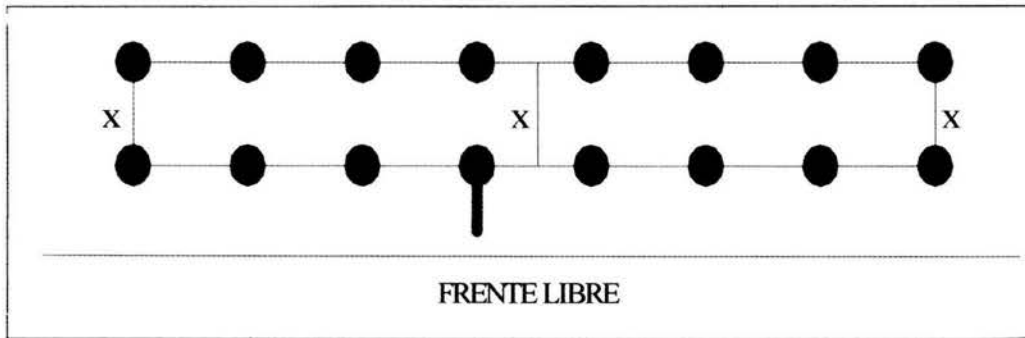


FIG. 6.9 Colocación de los retardadores en dos hileras de barrenos conectados en un sistema troncal.

En la figura 6.10 se observan tres hileras de barrenos conectados por medio de un sistema múltiple de líneas troncales; el barreno del centro de la primera línea troncal disparará instantáneamente y los demás serán retardados progresivamente de acuerdo con los tiempos escogidos, representados en la figura por medio de la letra X, nótese que en este dibujo como el anterior, cada barreno tiene dos rutas por donde puede llegar la onda explosiva retardada, para mayor seguridad.

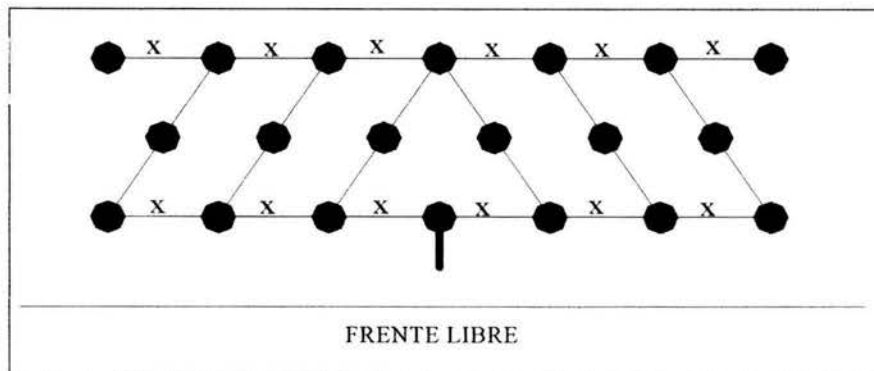


FIG. 6.10 Colocación de los retardadores en tres hileras de barrenos conectados en un sistema múltiple

La utilización de retardos entre línea y línea de barrenos, da la oportunidad de provocar el desahogo necesario y la roca presenta dos ventajas; la primera, es que se reduce la roca en vuelo hasta niveles mínimos y la segunda, se tiene el control de la roca al rezagar, ya que con una adecuada distribución de los tiempos, se puede dirigir la voladura de tal manera que se apile hacia el centro del frente de la voladura o en todo el ancho del mismo.

La práctica mas común en la actualidad para el retardo de las voladuras se realiza con conectores MS (retardos de superficie) y/o primadet (retardos de fondo), mismos que se utilizan conjuntamente con cordón detonante.

En los casos donde se utilizan retardos de superficie, se pueden elegir entre usar retardos de un mismo tiempo o combinar dos o más. Muchos pobladores utilizan un tiempo más largo en la última línea de barrenos, con el propósito de incrementar el alivio en esta hilera, ya que así se evita el agrietamiento de la nueva cara del banco al momento de la voladura.

La secuencia de tiempos con este tipo de retardos de superficie es prácticamente ilimitada, ya que el retardo es acumulativo de línea en línea; como ya se mencionó, estos retardos se comercializan en tiempo que van desde 9, 17, 25, 35 y 65 milisegundos.

En el caso de los iniciadores no-eléctricos o primadet, por sus características, proporcionan resultados impresionantemente buenos, ya que permiten retardar cada uno de los barrenos con bastante seguridad y diseñar la voladura para salidas alternativas a la misma, pudiendo superar la limitante de los tiempos disponibles, (de 0 al 14) con la combinación de conectores MS de superficie, traduciéndose a una infinita posibilidad de tiempos.

Otra ventaja para el mejor aprovechamiento de los retardos lo representa la forma de amarre del cordón detonante con respecto a los barrenos, y el método más usado es el de echelon abierto o cerrado, como se presenta en las siguientes figuras.

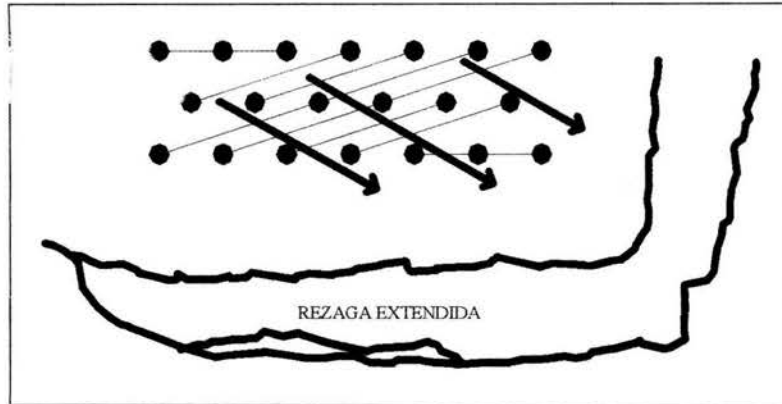


FIG. 6.11 Amarre del cordón detonante con el método de echelon abierto(Ref. 3).

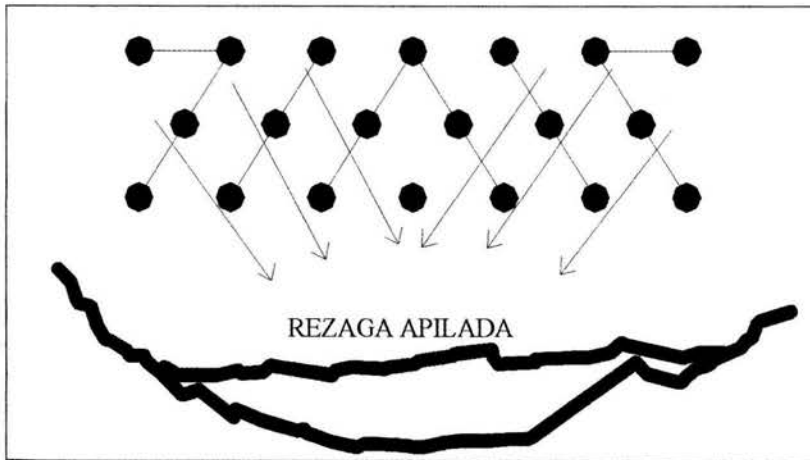


FIG. 6.12 Amarre del cordón detonante con el método de echelon cerrado(Ref. 3).

6.8 CÁLCULO DE PLANTILLA DE BARRENACIÓN Y EXPLOSIVO PARA UNA VOLADURA TIPO, EN BANCO DE PIEDRA O EXPLOTACIÓN DE UN TAJO.

Para el cálculo se tomará como ejemplo un banco de roca riolítica, en el cual se utiliza un diámetro de barrenación de 3" (7.62 cm) para producir agregados.

Tipo de roca a explotar: riolita

Densidad de la roca: 2.5 gr/cm³.

Velocidad sónica: 3700 a 3500 m/s.

Resistencia máxima a la compresión: 3000 kg/cm².

Resistencia máxima a la tensión: 300 kg/cm².

Diámetro de barrenación disponible: 7.65 cm (3")

Altura de banco: 8.00 m.

Es de uso generalizado en el diseño de una plantilla de barrenación, tomar como punto de partida las siguientes relaciones:

Bordo = 30 veces el diámetro de la barrenación, entonces:

$$\text{Bordo} = 30 \times 7.65 \text{ cm.} = 228 \text{ cm.} = 2.30 \text{ m.}$$

Espaciamiento = Bordo x 1.2

$$\text{Espaciamiento} = 2.30 \times 1.2 = 2.80 \text{ m.}$$

Sub-barrenación = Bordo x 0.3

$$\text{Sub-barrenación} = 2.30 \times 0.3 = 0.69 = 0.70 \text{ m.}$$

Taco = Bordo x 0.9 m

$$\text{Taco} = 2.30 \times 0.9 = 2.07 = 2.10 \text{ m.}$$

Entonces la plantilla resultante será:

2.30 x 2.80 (bordo / espaciamento), con una profundidad de barrenación de 8.70 m, taco de 2.10 m. y una Sub-barrenación de 0.70 m.

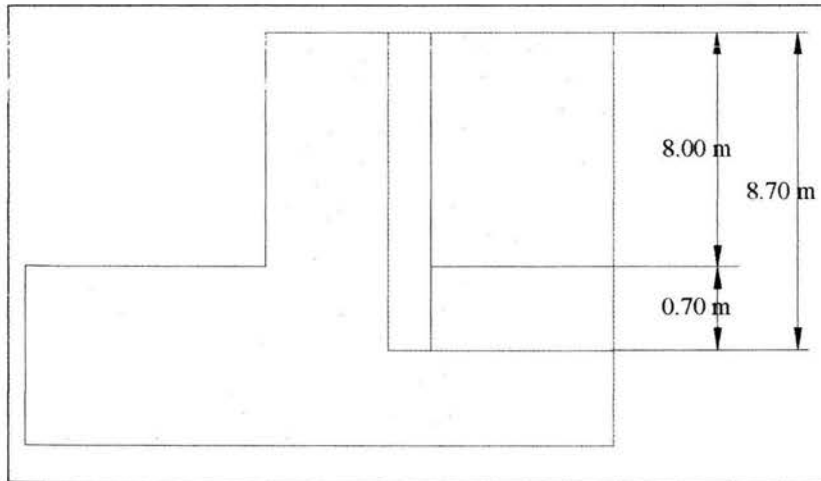


Fig. 6.13.- Profundidad de barrenación y sub-barrenación.

Para este tipo de explotación se usará una plantilla a tresbolillo, ya que se ha demostrado que es la más efectiva dentro de las actuales.

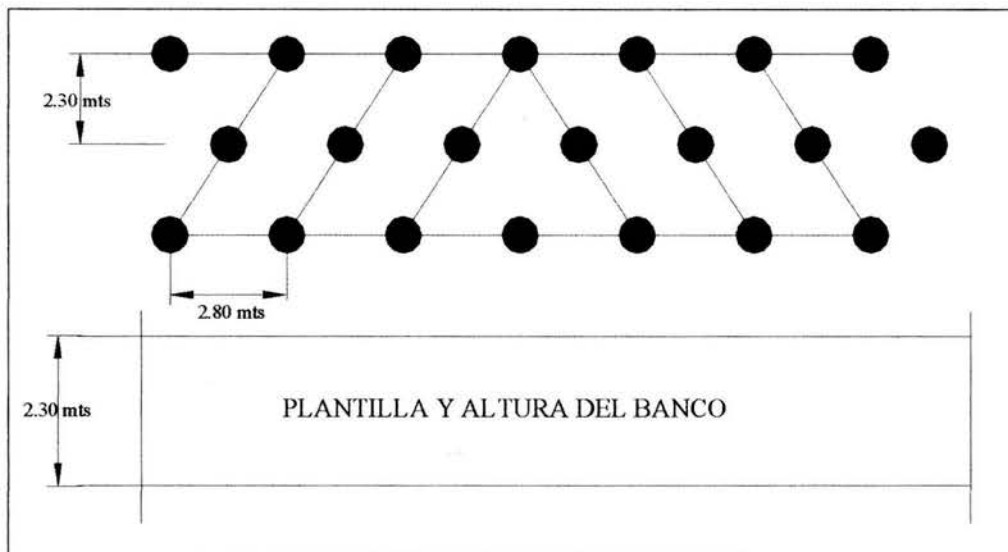


Fig. 6.14.- Plantilla a tresbolillo que muestra la altura del banco.

Ahora se determinara el volumen de roca por barreno.

Vol = bordo x espaciamiento x altura de banco (no incluir sub-barrenación)

$$\text{Vol} = 2.30 \times 2.80 \times 8.00 = 51.52 \text{ m}^3.$$

Para el cálculo del factor de carga se tiene que determinar la **longitud efectiva del barreno (LEC)**, que se puede cargar de explosivos y esto lo obtenemos restando la longitud del taco (T), de la profundidad de barrenación (PB, incluyendo la sub-barrenación).

$$\text{LEC} = \text{PB} - \text{T}$$

$$\text{LEC} = 8.70 \text{ m} - 2.10 \text{ m} = 6.60 \text{ m}.$$

Para un diámetro de 7.62 cm la carga de explosivo por metro (CE/m, en explosivos de densidad 1.0 gr/cm³) es de 3.55 kg/m., para este caso los explosivos comerciales que se utilizarán son:

Alto explosivo: Emulgel 2000 (5.08 x 40.64 cm y densidad de 1.2 gr/cm³)

Agente explosivo : dinitramex (a granel y densidad de 0.85 gr/cm³)

Es necesario determinar la proporción del alto explosivo y el agente explosivo (ANFO) que se usarán en este cálculo, que confiablemente sería una proporción de 20% de alto explosivo y 80% de agente explosivo, con el propósito de eficientarlo después de observarse los primeros resultados. Para efectos de cálculo, es muy común utilizar el criterio del factor de densidad (FD), que nos proporciona un parámetro bastante confiable del promedio de las densidades, de acuerdo a una relación de carga determinada. Es así como se obtiene la carga total de explosivo por barreno y las cargas correspondientes de alto explosivo y agente explosivo, el procedimiento es el siguiente:

Densidad () Emulgel 2000 1.20 gr/cm³

Densidad () Anfo Emulgel C 0.86 gr/cm³

Relación de carga 20% Alto Explosivo 80 % Agente Explosivo.

$$\text{Factor de densidad (FD)} = (\text{Emulgel 2000} \times 20\%) + (\text{Dinitramex} \times 80\%)$$

$$\text{FD} = 0.928 \text{ gr/cm}^3.$$

Ahora se obtendrá la carga de explosivo (CE) por m., para un factor de densidad de 0.928 gr/cm³, y un diámetro de barrenación de 7.62 cm (3").

$$\text{Carga de explosivo por m (CE/m)} = \pi \times r^2 \times 100 \times \text{FD}$$

$$\text{CE/m} = 3.1416 \times (3.81)^2 \times 100 \times 0.928$$

$$\text{CE/m} = 4230 \text{ gr/m} = 4.230 \text{ kg/m}.$$

Para obtener la carga total de explosivo por barreno (TEB) y la correspondiente al alto explosivo (ALEB) y al agente explosivo (AGEB), se procederá de la siguiente manera:

$$\text{Carga total de explosivo por barreno (TEB)} = \text{LEC} \times (\text{CE/m})$$

$$\text{TEB} = 6.60 \text{ m} \times 4.230 \text{ kg/m}$$

$$\text{TEB} = 27.91 \text{ kg}.$$

$$\text{Total de kg de alto explosivo por barreno (ALEB)} = \text{TEB} \times 20\%$$

$$\text{ALEB} = 27.91 \times 0.20$$

$$\text{ALEB} = 5.580 \text{ kg} = 5.500 \text{ kg}.$$

Como los cartuchos de emulgel 2000 en medida de 5.08 x 40.64 cm., tienen un peso de 1.000 kg, se ajustará la cantidad a 5.5 kg para así utilizar 5.5 pzas. de cartuchos y facilitar la operación.

$$\text{Total de kg de agente explosivo por barreno (AGEB)} = \text{TEB} - \text{ALEB}$$

$$\text{AGEB} = 27.910 - 5.500$$

$$\text{AGEB} = 22.410 \text{ kg}.$$

Después de haber obtenido tanto el volumen de roca a explotar por barreno (VOL), como el total de kilogramos de explosivo por barreno (TEB), podemos determinar el factor de carga FC que resulte para este caso.

$$\text{Factor de carga (FC)} = \text{TEB} / \text{VOL}.$$

$$\text{FC} = 27.91 \text{ kg} / 51.52 \text{ m}^3.$$

$$\text{FC} = 0.541 \text{ kg/m}^3.$$

El factor de carga obtenido es bueno para iniciar la explotación del banco en cuestión, aunque la aplicación y los resultados obtenidos marcarán la pauta para aumentar o disminuir el factor, ya sea que como se ha venido insistiendo, cada explotación es un caso especial que se deberá considerar particularmente, para realizar las adecuaciones necesarias que generen los resultados óptimos.

6.9 DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EN EL BARRENO.

Como se sabe la mayor resistencia dentro de un barreno se encuentra al pie del mismo y por eso es recomendable que la carga del alto explosivo (comúnmente llamado cebo) deba situarse en esta zona con un doble propósito; el primero consiste en iniciar confiablemente la columna de explosivo y el segundo en abatir la resistencia que se tiene al pie del barreno, en algunos casos especiales se utilizan cargas intermedias de alto explosivo, pero un porcentaje aproximado de alto explosivo a utilizar como cebo será del 40 al 50% del total y el demás explosivo se distribuirá a distancias iguales entre la carga del agente explosivo.

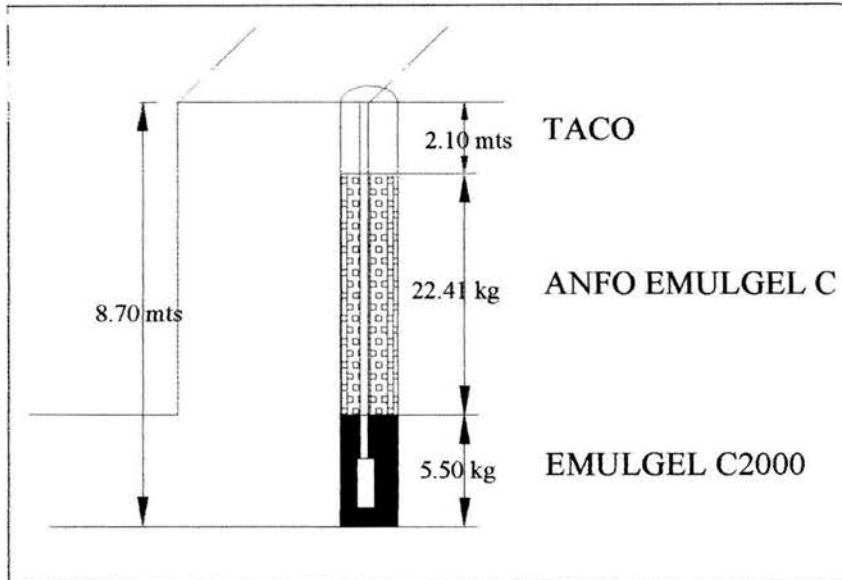


Fig. 6.15.- Distribución de la carga explosiva en el barreno

6.10 DISEÑO DE AMARRES Y DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS.

Para un ejemplo dado como el que a continuación se presenta en este cálculo, se decidió utilizar el sistema de amarre de echelon cerrado; porque se pretende que la carga quede apilada hacia el centro del banco y en lo que respecta al tiempo de retardo se utilizarán iniciadores no eléctricos o primadets, debido a que es un banco de riolita muy consolidado y se pretende tener el menor grado de vibraciones.

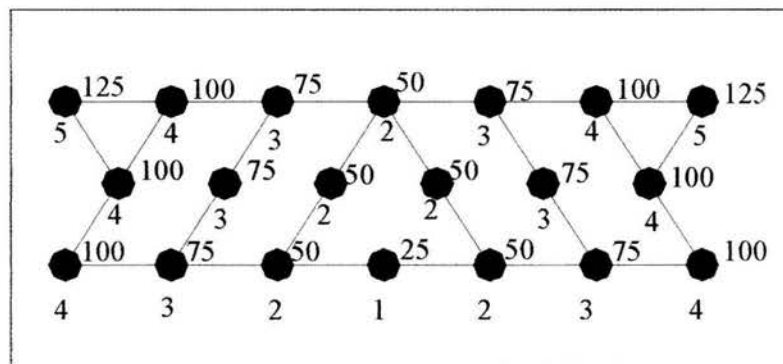


Fig. 6.16.- Detalle del diseño de amarres (amarre de echelon cerrado)

La numeración, en la figura antes mencionada, de la parte inferior de cada línea corresponde a la nomenclatura adoptada por el fabricante y muestra la secuencia de detonación de cada barreno.

La numeración de la parte superior de cada línea corresponde al tiempo de retardo en la voladura de cada uno de los barrenos.

6.11.- EJEMPLO DEL ANÁLISIS BASICO DE UNA VOLADURA

A continuación se ejemplifica la solución de un problema en donde se analizan dos posibles soluciones de las muy diversas que puede haber, con estos dos ejemplos se tratara de encontrar y seleccionar la forma mas económica de explotar la roca. Los precios de los insumos utilizados en este ejemplo corresponden a enero de 1995(datos obtenidos en Ref.4), pues debido a que son productos regulados por la Secretaría de la Defensa Nacional, las empresas que se dedican a la venta de estos productos no dan ninguna información a menos que sea alguna empresa bien establecida y con un proyecto definido la que esta solicitando dicha información, por lo que para calcular un caso real deberá presentarse el proyecto ante la empresa que vende explosivos y cumplir con una serie de requisitos para poder obtener los precios actuales además de otra información necesaria, y así poder obtener un presupuesto real de una voladura. La secuencia de los cálculos utilizados en estos ejemplos es lo importante.

Para estos ejemplos se han utilizado algunas simplificaciones para hacer el ejemplo más sencillo, también se debe tener muy presente que en una voladura el consumo de explosivos puede variar de acuerdo a diferentes factores, como el tipo de roca, la fragmentación deseada o diferentes irregularidades que pueden presentarse ya en la practica.

Los precios de los salarios mínimos y el costo del dólar fueron tomados en mayo del 2004 para cualquier proyecto solo hay que conseguir los precios actuales y sustituir los datos en el siguiente ejemplo y obtener así un costo real.

6.11.1 COSTOS INCLUIDOS EN UNA VOLADURA

CONCEPTO: Barrenación, carga y voladura utilizando explosivos apropiados para obtener la fragmentación requerida de la roca, con la tolerancia de peso a que debe sujetarse.

DATOS GENERALES DE EXPLOTACIÓN DEL BANCO.

CONCEPTO	Unidad	Equipo utilizado para barrenación	
		T4-WH	TRACK DRILL
A) Diámetro del barreno	cm	16.51	7.62
	pulg	6.5	3
Plantilla de barrenación:			
B) Bordo	m	5.6	2.8
C) Espaciamiento	m	7.0	3.5
D) Longitud de barrenación	m	22	9.0
E) Altura del banco	m	20	8.15
F) Volumen de material por barreno (B x C x E)	m ³	784	79.87
G) Barrenación específica (D÷F)	m/m ³	0.028	0.1127
H) Carga de fondo (Tovex)	m	4.4	1.93
	kg	130.7	10.83
I) Carga de columna (Supermexamón)	m	12.0	4.27
	kg	205.5	15.58
J) Taco = Bordo	m	5.6	2.8
K) Carga específica Puntos (H+I)/F	kg/m ³	0.43	0.33
L) Tipo de perforadora	I.R.	T4-WH	CM-350
M) Velocidad de barrenación (Gross)	m/hr	20	14

A) ANÁLISIS DE LOS COSTOS DE UNA VOLADURA UTILIZANDO TRACK DRILL PARA LA BARRENACIÓN.

A continuación se calculará el costo de la barrenación con track drill

1.- Barrenación

a).- Equipo

Perforadora CM-350	\$ 78.46/hr
Compresor 600 PCM	<u>\$ 55.05/hr</u>
	\$133.51/hr
Barrenación específica = 0.1127 m/m ³ en banco	
Velocidad de barrenación = 14 m/hr	

$$\text{Costo Equipo} = (\$133.51/h \times 0.1127\text{m/m}^3) / 14\text{m/h} = \$ 1.07/\text{m}^3$$

$$\text{Costo Equipo} = \$ 1.07/\text{m}^3$$

b).- Operación (turnos de 10 horas)

Compresorista	\$ 67.05/t
Operador de Perforadora	\$ 65.14/t
Ayudante	<u>\$ 45.24/t</u>
	\$ 177.43/t
Herr. Y Eq. De Seg. (2%)	<u>\$ 3.54/t</u>
	\$ 180.97/t

$$\text{Costo por operación} = \frac{\$ 180.97/t \times 0.1127 \text{ m/m}^3}{10 \text{ hr/t} \times 0.75 \times 14 \text{ m/hr}} = \$ 0.19/\text{m}^3$$

$$\text{Costo por operación} = \$ 0.19/\text{m}^3$$

c).- Acero de barrenación

	1	2	3	4
	COSTO/UNID	IMPORTE	VIDA	(2 / 3) X 0.1127
3 Barras de ext.	\$729.47	\$2,188.47	1,800	\$0.14/m ³
3 Coples	\$162.11	\$ 486.33	900	\$0.06/m ³
1 Zanco	\$547.93	\$ 547.93	2,100	\$0.03/m ³
1 Broca	\$302.58	\$ 302.58	450	\$0.08/m ³
			Total	\$0.31/m ³

Costo por Acero de barrenación = \$ 0.31/m³

CARGO TOTAL POR BARRENACIÓN = Cost. Eq. + Cost. Op. + Ac. Barr = \$1.62/m³

2.- EXPLOSIVOS

A continuación se calculará el costo de los explosivos y de su colocación

a) Materiales

Carga específica = 0.33 kg/m³

Carga = 26.41 kg/barreno

1).- Cargo de fondo = 10.83 kg de tovox 700

Costo del tovox 700 = \$14.12/kg

$$\text{Costo} = \frac{\$14.12/\text{kg} \times 10.83 \text{ kg/barr}}{79.87 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 1.91 / \text{m}^3$$

2).- Carga por columna = 15.58 kg

Supermexamón \$3.40/kg

$$\text{Costo} = \frac{\$3.40/\text{kg} \times 15.58 \text{ kg/barr}}{79.87 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.66 / \text{m}^3$$

3).- Estopines MS=\$9.54/pza

$$\text{Costo} = \frac{\$9.54/ \text{pza.} \times 1\text{pza} / \text{barr}}{79.87 \text{ m}^3/ \text{barr}} = \$ 0.12 / \text{m}^3$$

4).- Alambre TW-20 = \$0.21/m

$$\text{Costo} = \frac{2 (11 \text{ m} - 5 \text{ m}) \times \$0.21/\text{m}}{79.87 \text{ m}^3/ \text{barr}} = \$ 0.03 / \text{m}^3$$

Costo total de materiales = \$2.72/m³

b).- Mano de Obra (turnos de 10 horas)

Cuadrilla para poblado y tronado:

1 Poblador	\$ 58.79/t
2 Cargadores X \$65.14	\$ 130.28/t
2 Ayudantes X \$45.24	<u>\$ 90.48/t</u>
	\$ 279.55/t
Herr. Y Eq. De Seg. (2%)	<u>\$ 5.59/t</u>
	\$ 285.14/t

$$\text{Costo} = \frac{\$285.47/\text{t}}{45 \text{ barr} / \text{t} \times 79.87 \text{ m}^3/ \text{barr}} = \$ 0.08 / \text{m}^3$$

Costo total de mano de obra = \$ 0.08 / m³

c).- Equipo para sopleteado de la barrenación:

Compresor 600 PCM \$ 55.05/hr

$$\text{Operador} = \frac{\$67.05 / \text{t} \times 1.02}{10 \text{ hr/t} \times 0.75} = \frac{\$ 9.12 / \text{hr}}{\$ 64.17/\text{hr}}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$64.17/\text{hr} \times 6 \text{ min/barr}}{45 \text{ min/hr} \times 79.87 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.11 / \text{m}^3$$

Costo total por equipo para sopleteado del barreno = \$ 0.11/m³

CARGO POR EXPLOSIVOS \$2.91/m³

CARGO TOTAL CON TRACK DRILL = \$ 4.53/m³

B) ANÁLISIS DE LOS COSTOS DE UNA VOLADURA UTILIZANDO T4-WH PARA LA BARRENACIÓN.

A continuación se calculará el costo de la barrenación con maquina rotatoria T4-WH

1.- Barrenación

a).- Equipo

Perforadora T4-WH	\$ 224.15/hr
Compresor Alta Presión	<u>\$ 63.76/hr</u>
	\$ 287.91/hr

Barrenación específica = 0.028 m/m³

Velocidad de barrenación = 20 m/hr

$$\text{Costo} = \frac{\$287.91/\text{hr} \times 0.028\text{m}/\text{m}^3}{20 \text{ m/hr}} = \$ 0.40 / \text{m}^3$$

Costo por equipo = \$ 0.40 / m³

b).- Mano de Obra

0.5 Cabo x \$ 62.12/t	\$ 31.06/t
1 Perforista	\$ 65.14/t
1 Ayudante	\$ 45.24/t
1 Compresorista	<u>\$ 67.05/t</u>
	\$ 208.49/t
Herr. Y Eq. De Seg. (2%)	<u>\$ 4.17/t</u>
	\$ 212.66/t

$$\text{Costo} = \frac{\$212.66/t \times 0.028 \text{ m/m}^3}{10\text{hr/t} \times 0.75 \times 20 \text{ m /hr}} = \$ 0.04 / \text{m}^3$$

Costo por mano de obra = \$ 0.04 /m³

c).- Acero de Barrenación.

Acero de Barrenación	No. de piezas	Costo Unitario U. S.	Costo Total U. S.
Tubería 5 ½" ø	3	1,045.00	\$ 3,135.00
Sustituto de 5 ½" ø	3	766.00	\$ 2,298.00
Portabarrena de 5 ½" ø	1	919.00	<u>\$ 919.00</u>
		U.S.	\$ 6,352.00

Vida Útil = 6,000 horas

$$\frac{\text{US } 6352.00 \times \$11.24/\text{US} \times 1.15}{6000 \text{ hr}} = \$ 13.68 / \text{hr}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$13.68/\text{hr} \times 0.028 \text{ m/m}^3}{20 \text{ m /hr}} = \$ 0.02 / \text{m}^3$$

Martillo.

$$\frac{\text{US } 4160.00 \times \$11.24/\text{US} \times 1.15 \times 1.4}{6000 \text{ hr}} = \$ 12.55 / \text{hr}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$12.55/\text{hr} \times 0.028 \text{ m}^3}{20 \text{ m/hr}} = \$ 0.02 / \text{m}^3$$

Broca de 6 1/2" ø :

$$\frac{\text{US } 640.00 \times \$11.24/\text{US} \times 1.15 \times 0.028 \text{ m}^3}{350 \text{ m}} = \$ 0.66 / \text{m}^3$$

Cargo por acero de barrenación = \$ 0.70 / m³

CARGO TOTAL POR BARRENACIÓN = \$ 1.14/m³

2.- EXPLOSIVOS.

a).- Materiales

1).- Carga específica = 0.44 kg/m³

Cargo de fondo = 130.7 Kg de Tovex Extra

Costo del Tovex Extra = \$14.12/kg

$$\text{Costo} = \frac{\$14.12/\text{kg} \times 130.7 \text{ kg/barr}}{783 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 2.35 / \text{m}^3$$

2).- Carga de columna 205.5 kg de Anfomex

Costo del Anfomex = \$2.40/kg

$$\text{Costo} = \frac{\$2.40 \text{ kg} \times 205.5 \text{ kg/barr}}{784 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.63 / \text{m}^3$$

3).- Iniciador Detomex No. 1

Uno es el fondo + 2 a cada 7 m Igual a 3 piezas

$$\text{Costo} = \frac{\$20.10/\text{pza.} \times 3 \text{ pzas./barr}}{784 \text{ m}^3/\text{barreno}} = \$ 0.08 / \text{m}^3$$

4).- Estopines MS \$9.50/pza

$$\text{Costo} = \frac{\$9.50/\text{pza.} \times 1 \text{ pza./barr}}{784 \text{ m}^3/\text{barreno}} = \$ 0.01 / \text{m}^3$$

5).- Primacord Reforzado.

22 metros / barreno

$$\text{Costo} = \frac{\$1.67/\text{m} \times 22 \text{ m/barr}}{784 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.05 / \text{m}^3$$

6).- Alambre TW-20 \$ 0.21/m

$$\text{Costo} = \frac{\$40.5/\text{m} \times \$ 0.21/\text{m}}{784 \text{ m}^3/\text{barreno}} = \$ 0.01 / \text{m}^3$$

7).- Guía TW-14

$$\text{Costo} = \frac{1 \text{ m/barreno} \times \$0.70/\text{m}}{784 \text{ m}^3/\text{barreno}} = \$ 0.00 / \text{m}^3$$

8).- Explosor, Galvanómetro, etc. = \$0.15/m³

Costo por materiales = \$ 3.28 /m³

b).- Mano de Obra

Cuadrilla para poblado y tronado:

1 Poblador	\$ 58.79/t
2 Cargadores X \$65.14/t	\$ 130.28/t
2 Ayudantes X \$45.24/t	\$ 90.48/t
	\$ 279.55/t
Herr. Y Eq. De Seg. (2%)	\$ 5.59/t
	\$ 285.14/t

$$\text{Costo} = \frac{\$ 285.14/t}{12.5 \text{ barr/t} \times 784 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.03 / \text{m}^3$$

Costo por mano de obra = \$ 0.03 /m³

c).- Equipo para sopleteado de la barrenación:

Compresor 600 PCM \$ 55.05/hr

$$\text{Operador} = \frac{\$67.05 / \text{hr} \times 1.02}{10 \text{ hr/t} \times 0.75} = \$ 9.12 / \text{hr}$$

$$\$ 64.17 / \text{hr}$$

$$\text{Costo} = \frac{\$64.17/\text{hr} \times 10 \text{ min/barr}}{45 \text{ min/hr} \times 784 \text{ m}^3/\text{barr}} = \$ 0.02 / \text{m}^3$$

Costo total por equipo para sopleteado del barreno = \$ 0.02/m³**CARGO TOTAL POR EXPLOSIVOS \$ 3.33/m³****CARGO TOTAL CON PERFORADORA T4-WH = \$ 4.47/m³**

RESUMEN DEL CARGO POR BARRENACIÓN, CARGA DE EXPLOSIVOS Y VOLADURA

BARRENACIÓN	TRACK-DRILL \$/m ³ -banco	T4-WH \$/m ³ -banco
Equipo	\$ 1.07	\$ 0.40
Mano de Obra	\$ 0.19	\$ 0.04
Acero de Barrenación	\$ 0.31	\$ 0.70
Costo total de barenación	\$ 1.62	\$ 1.14
CARGO DE EXPLOSIVOS		
Materiales	\$ 2.72	\$ 3.28
Mano de Obra	\$ 0.08	\$ 0.03
Equipo	\$ 0.11	\$ 0.02
Costo total de explosivos	\$ 2.91	\$ 3.33
COSTO POR m³-BANCO	\$ 4.53	\$ 4.47

6.11.2 TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones tanto para voladuras como para cualquier proyecto es el punto más importante, pues se puede tener varias alternativas de solución para resolver un mismo problema y si lo resolvemos por la primera impresión o idea que se nos venga en mente, puede no ser la mejor opción y con ello se perdería mucho tiempo y dinero en el proyecto por esta mala decisión. Por ejemplo, en lo estudiado anteriormente nos podemos dar cuenta que los diferentes métodos de barrenación influyen de manera muy significativa en el costo del proyecto y no solamente los costo de explosivos como se piensa al inicio del proyecto, por eso es importante tomar muy en cuenta todos esos aspectos en el proyecto para tratar de hacerlo lo mas económico posible.

CONCLUSIÓN CAPITULAR.

Después de haber estudiado este capítulo se puede observar que en el diseño de una voladura se deben tomar en cuenta diferentes factores que afectan directamente a ésta, y que también repercuten en el costo del proyecto. Con esto se concluye que la toma de decisiones juega un papel muy importante en cualquier tipo de proyecto, por lo que es necesario que la persona encargada de tomar este tipo de decisiones cuente con la experiencia suficiente para que pueda elegir la alternativa más económica y técnicamente factible.

REFERENCIAS:

- 1.- ALCARAZ LOZANO, Federico. *Los Explosivos en la Construcción*. Primera edición. Fundación para la enseñanza de la construcción, A.C. México. 1990. Pags. 48-124
- 2.- DÍAZ DEL RIO, Manuel. *Manual de Maquinaria de Construcción*. primera edición. McGraw Hill. España. 2001. Pags. 333-338
- 3.- FUNDACIÓN ICA, A.C. . *Uso de Explosivos en Obras de Ingeniería Civil*. primera edición. FUNDACIÓN ICA, A.C. México. D.F. 1997. Pags. 109-146
- 4.- FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.
- 5.- LANGEFORS U., KIHLMSTROM B. *Técnica Moderna de Voladura de Rocas*. Urmo, S.A. de Ediciones. España. 1976. Pags. 127-148
- 6.- RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988. Pags. 114-184
- 7.- TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988. Pags. 35-40

CONCLUSIONES

- 1.- Los explosivos son una fuente de energía concentrada que el ingenio del hombre puede permitir aprovecharlos de diferentes maneras para su propio beneficio.
- 2.- En la mayoría de las excavaciones en roca, los explosivos constituyen el medio más económico y eficaz, pues permite realizar el trabajo con mayor rapidez y facilidad que cualquier otro medio mecánico.
- 3.- El uso de los explosivos en la industria de la construcción es muy amplio y cada vez ha ido en aumento, lo cual es fundamental para el desarrollo de la civilización actual!
- 4.- La adquisición y uso de los explosivos están regidos en nuestro país por disposiciones y reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional.
- 5.- Como resultado de la investigación y constante evolución en la tecnología de los explosivos se tienen nuevos productos, accesorios y técnicas de voladura.
- 6.- Para el éxito de una voladura es necesario seleccionar correctamente el explosivo tomando en cuenta sus propiedades, así como los dispositivos de iniciación, los accesorios y técnicas existentes.
- 7.- En los explosivos encartuchados a menor diámetro se tiene una mayor sensibilidad y velocidad de detonación.
- 8.- Antes de usar cualquier explosivo o accesorio es conveniente hacer pruebas, ya que las características que proporcionan los fabricantes pueden verse afectados por los diferentes factores externos a los que están sometidos.
- 9.- Se debe procurar hacer una buena distribución en la plantilla de barrenación; con esto se consigue una salida libre de la roca, una mejor fragmentación, una rezaga concentrada y menores proyecciones, vibraciones y ruido.
- 10.- Ya que se realizó la plantilla de barrenación se debe tener un cuidado especial en los retardos que se darán en los diferentes barrenos para tratar de que la roca volada quede lo más libre posible y los equipos de carga puedan moverla fácilmente.
- 11.- En una voladura es imprescindible conocer la roca y el estado en que se encuentre, es decir el grado de agrietamiento, fallas, intemperismo, etc., pues estos factores pueden hacer variar en gran medida los resultados obtenidos.
- 12.- La granulometría de la roca está íntimamente ligada al uso al que se le va a destinar. No siempre lo más recomendable es la fragmentación más pequeña como suele creerse, pues puede incrementar los costos y además debe tomarse en cuenta cual será el uso que se le dará a la roca explotada.

13.- La voladura de rocas no es un arte sino una técnica basada en principios lógicos y razonables.

14.- La base teórica para el cálculo de la carga en el diseño de voladuras se fundamenta en valores empíricos proporcionados por las pruebas y los resultados prácticos que se han ido acumulando, sin embargo esta cifras son sólo el punto de partida debiéndose hacer las pruebas correspondientes para cada caso específico.

15.- En las pruebas para ajustar el diseño de la voladura al banco, deberá observarse el tamaño de la roca obtenida, las proyecciones, el ángulo del montón, etc.

16.- La buena selección del tipo y diámetro de barrenación es un aspecto muy importante, generalmente es aquí donde se pueden reducir de una manera muy significativa los costos de todo el proceso de voladura de roca.

17.- Debido a que la barrenación es un factor muy importante desde el punto de vista económico, deberá procurarse desde el diseño, utilizar al máximo el volumen del barreno para la carga de explosivos.

18.- Todos los explosivos son peligrosos si se hace mal uso de ellos, por eso deberán ser manejados por personas experimentadas y que conozcan las normas y medidas de seguridad establecidas.

19.- Se deberá acudir a los distribuidores de explosivos, pues estos tienen gran experiencia en el uso de estos productos, y su ayuda puede ser de gran importancia a la hora de hacer nuestro calculo de la voladura y ayudarnos ha realizar toda la operación de una manera mas económica y con mejores resultados.

20.- Los resultados obtenidos en la presente tesis, resuelve de manera acertada los planteamientos iniciales, así como finalmente se advierte que el uso de explosivos puede producir grandes cantidades de polvo, contaminar con ruido las áreas aledañas a donde fueron usados y generar grandes daños a estructuras vecinas o cambiar el ecosistema, si se usa en la extracción de roca en zonas despobladas.

BIBLIOGRAFÍA.

ALCARAZ LOZANO, Federico. *Los Explosivos en la Construcción*. Primera edición. Fundación para la enseñanza de la construcción, A.C. México. 1990.

BAROCIO MOLI, Alberto J. *Construcciones en Roca, Excavaciones en roca*. 16 edición. colegio de ingenieros civiles de México. México. 1965.

COMPAÑÍA MEXICANA DE MECHA PARA MINAS, S.A. DE C.V. *El Cordón Detonante Primacord*. Gomez Palacio, Durango

DUPONT. *Manual para el uso de Explosivos de Dupont*. México. 1987.

DÍAZ DEL RIO, Manuel. *Manual de Maquinaria de Construcción*. primera edición. McGraw Hill. España. 2001.

FUNDACIÓN ICA, A.C. . *Uso de Explosivos en Obras de Ingeniería Civil*. primera edición. FUNDACIÓN ICA, A.C. México. D.F. 1997.

FAVELA LOZOYA, Fernando. 2004. *Curso de Excavaciones y Terracerías*. Maestría en Ingeniería (construcción). UNAM.

LANGEFORS U., KIHSTROM B. *Técnica Moderna de Voladura de Rocas*. Urmo, S.A. de Ediciones. España. 1976.

RICCI CHACON, Francisco. *Explosivos y Voladuras aplicados a las Obras de Ingeniería Civil*. Tercera edición. Instituto Tecnológico de la Construcción. México D.F. 1988.

SÁNCHEZ PULIDO, Pedro. *Explosivos*. Instituto de Capacitación de la Industria de la Construcción. 1990.

TUÑÓN SUÁREZ, Carlos. *Manual de Uso de Explosivos en Minas, Canteras e Ingeniería Civil*. primera edición. Ediciones Omega, S.A. España. 1988.