

17  
204



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"

USO DE LOS EXPLOSIVOS EN LA EXPLOTACION DE MATERIAL DE ENROCAMIENTO PARA LA CONSTRUCCION DE ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CIVIL PRESENTA: FERNANDO MENDOZA RIVAS



NAUCALPAN, EDO. DE MEXICO

1990

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

## I N D I C E

	Pág.
<b>INTRODUCCION.</b> . . . . .	1
<b>CAPITULO I. BARRENACION</b> . . . . .	4
1.1. Equipos para barrenación . . . . .	4
1.1.1. Perforadoras . . . . .	4
1.1.2. Barras y brocas. . . . .	10
1.1.3. Compresores. . . . .	10
1.2. Rectitud de los barrenos . . . . .	11
1.3. Impacto, avance y rotación . . . . .	12
<b>CAPITULO II. EXPLOSIVOS; TIPOS Y PROPIEDADES.</b> . . . . .	16
2.1. Bosquejo histórico del uso de los explosivos . . . . .	16
2.2. Introducción . . . . .	18
2.3. Propiedades de los explosivos. . . . .	18
2.4. Ingredientes de los explosivos . . . . .	22
2.5. Tipos de explosivos. . . . .	24
2.5.1. Pólvora negra. . . . .	24
2.5.2. Dinamitas. . . . .	25
2.5.3. Gelatinas. . . . .	29
2.5.4. Hidrogeles . . . . .	33
2.5.5. Agentes explosivos . . . . .	37
2.5.6. Otros explosivos . . . . .	42
<b>CAPITULO III. DISPOSITIVOS DE INICIACION Y SISTEMAS DE VOLADURAS</b> . . . . .	45
3.1. Dispositivos de iniciación . . . . .	45

	Pág.
3.1.1. Dispositivos de iniciación eléctricos . . .	45
3.1.2. Dispositivos de iniciación no-eléctricos .	49
3.1.3. Iniciadores y reforzadores . . . . .	52
3.2. Sistemas de detonación no-eléctricos . . . . .	53
3.2.1. Disparo con fulminante y mecha . . . . .	53
3.2.2. Iniciación y períodos de retardo con cuerda detonante . . . . .	60
3.3. Sistemas de detonación eléctricos . . . . .	63
3.3.1. Elementos y normas generales para integrar el sistema. . . . .	63
3.3.2. Requerimientos de corriente. . . . .	66
3.3.3. Líneas guía y líneas de conexión . . . . .	66
3.3.4. Verificación del circuito. . . . .	66
3.4. Voladuras de hileras múltiples con micro-retardo .	69
3.4.1. Patrones de perforación. . . . .	69
3.4.2. Distribución de retardos . . . . .	71
 <b>CAPITULO IV. USO DE LOS EXPLOSIVOS EN LA CONSTRUCCION DE</b>	
<b>ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS . . . . .</b>	<b>75</b>
4.1. Rompeolas y escolleras . . . . .	75
4.1.1. Rompeolas de talud . . . . .	78
4.1.2. Dimensionamiento de los rompeolas de talud . . . . .	80
4.2. Construcción de rompeolas y escolleras . . . . .	81
4.2.1. Materiales . . . . .	81
4.2.2. Obtención de materiales. . . . .	82

	Pág.
4.2.3. Transporte de materiales . . . . .	82
4.2.4. Ejecución . . . . .	83
4.3. Bancos de material de enrocamiento para rompeolas y escolleras. . . . .	84
4.4. Origen y clasificación de rocas . . . . .	84
4.4.1. Rocas ígneas. . . . .	85
4.4.2. Rocas sedimentarias . . . . .	86
4.4.3. Rocas metamórficas. . . . .	87
4.5. Exploración de bancos . . . . .	89
4.5.1. Reconocimiento. . . . .	89
4.5.2. Investigaciones detalladas. . . . .	91
4.6. Acondicionamiento del banco y vías de acceso. . . . .	92
4.7. Técnicas de explotación . . . . .	95
4.7.1. Generalidades . . . . .	95
4.7.2. Factores que determinan las características de la voladura. . . . .	102
4.7.3. Algunas consideraciones para el cálculo de la voladura. . . . .	120
4.7.4. Ejemplo . . . . .	128
 <b>CAPITULO V. TECNICAS DE VOLADURAS EMPLEADAS PARA EVITAR</b>	
<b>EL ROMPIMIENTO EXCESIVO. . . . .</b>	
5.1. Voladuras con barrenación en línea. . . . .	135
5.2. Voladuras amortiguadas. . . . .	139
5.3. Voladuras suaves. . . . .	146
5.4. Precorte. . . . .	146
5.5. Combinaciones . . . . .	151

	Pág.
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. . . . .</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFIA. . . . .</b>	<b>158</b>

## I N T R O D U C C I O N

Dado el modelo de desarrollo que sigue nuestro país, es necesario la construcción de un gran número de obras de infraestructura tales como: sistemas de riego, sistemas de conducción de aguas, sistemas carreteros, sistemas aeroportuarios y portuarios entre otros.

Obras que indiscutiblemente corresponden a una necesidad económica, que exige la realización de cada una de ellas.

Generalmenté en las obras que necesita nuestro país, se requiere el rompimiento de grandes masas de roca para ser utilizadas como materia prima, formar secciones por donde pasar carreteras, abrir extensos canales, túneles, zanjas y muchos otros trabajos de excavación.

El común denominador en la realización de este tipo de obras es la remoción de grandes volúmenes de materiales, de entre los cuales una gran mayoría son rocas. Para ello el constructor cuenta con máquinas y técnicas especializadas que en combinación con su habilidad le permiten realizar este tipo de actividades.

Ya sea por la dureza de las rocas o por razones económicas el ingeniero civil emplea los explosivos como herramientas

de trabajo en la disgregación de estos materiales.

Actualmente las técnicas de voladuras y la diversidad de productos explosivos comerciales, nos ofrecen un alto grado de precisión en la fragmentación de la roca, así como en la protección de las paredes que limitan la excavación deseada, seguridad, eficiencia y rapidez en los trabajos.

Particularmente el uso de los explosivos tienen una gran aplicación e importancia en la construcción de las obras marítimas que necesita nuestro País, esto es debido a que México es uno de los pocos países privilegiados, que cuenta con costas bañadas por los dos océanos más importantes del mundo, desde el punto de vista de la navegación y comercio marítimo, sin embargo por cuestiones económicas y socio-culturales, no ha sido posible explotar de manera óptima esta importante situación en la que se encuentra.

Cuenta con aproximadamente 11,600 km de costas, que exigen aprovechamiento racional, lo que significa ubicar y distribuir en forma estratégica terminales portuarias y marítimas a lo largo de éstas y toca a los ingenieros constructores vencer obstáculos y aplicar sus conocimientos para crearlas y mantenerlas. Por otra parte, las costas del País son también regiones potenciales para la explotación pesquera, acuícola, e industrial que requiere igualmente de la aplicación de tecnolo

gía constructora adecuada.

En la construcción de estructuras marítimas tales como rompeolas y escolleras, se presenta una situación particularmente importante en la explotación del banco de roca, el cual desde la etapa de proyecto, es determinado y estudiado cuidadosamente, pues si el material que constituye la "coraza" es a base de piedra natural, el banco debe garantizar la obtención de rocas grandes con el peso mínimo especificado, además debe cumplir con los requisitos de tenacidad, inmunidad química, etc.

La proposición del presente trabajo corresponde a la necesidad que tienen los ingenieros y técnicos mexicanos de disponer de información fácilmente accesible, práctica y detallada sobre el proceso de explotación de rocas de gran tamaño mediante el uso de explosivos.

El objetivo de esta tesis es proporcionar un panorama general del uso de los explosivos dentro del proceso de explotación de material de enrocamiento para la construcción de rompeolas y escolleras.

## CAPITULO I

### BARRENACION

La barrenación es una de las etapas fundamentales del proceso de excavación mediante el uso de explosivos, por tanto se le deberá tratar con atención pues en muchas ocasiones el costo de la barrenación será decisiva en la selección del explosivo por usar y del método de voladura elegido.

Los equipos de barrenación que son de uso común en las obras de ingeniería, están representados por las perforadoras de rotación percusión, tanto en su tipo manual como las acondicionadas sobre columnas de mayor alcance y movidas con sistemas de autoimpulso.

#### 1.1.- EQUIPOS PARA BARRENACION

##### 1.1.1.- PERFORADORAS

Las perforadoras de uso cotidiano para barrenos de diámetro máximo de 1 1/2" y 6 m de profundidad, son las manuales cuyos pesos varían entre 25 y 65 lb . 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, el movimiento es reciprocante 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 en el zanco.

Sobre la roca se recibe un golpe con la broca que trabaja como un cincel, produciendo 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 broca 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. Fig. 1.1.

En la perforación usual para la gran mayoría de las obras de ingeniería, los diámetros requeridos varían entre 3/4" y 4 1/2".

Este objetivo se logra con las máquinas descritas y otras que como ya se ha mencionado anteriormente, son de mayor

peso y alcance; y por ello, vienen montadas en columnas de donde son accionadas por cadenas, la máquina es completada por un chasis y sistema de tránsito. Este último se encuentra en presentaciones de llantas neumáticas (Wagon Drill), o sobre orugas (Track Drill). Con este tipo de perforadoras se logran diámetros de 1 1/2" a 4 1/2" y penetraciones económicas hasta de 12 m o más. Fig. 1.2 y 1.3.

Estas máquinas podemos describirlas en una tabla como la siguiente:

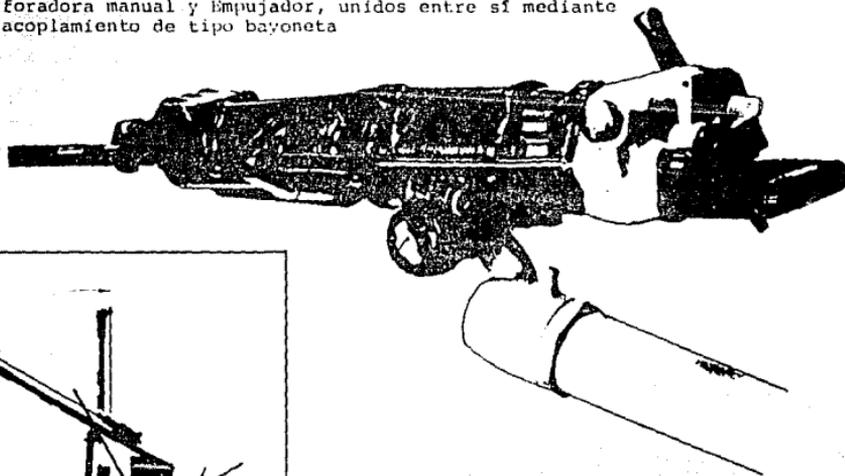
EQUIPOS PARA PERFORACION

P E R C U C I O N	PERFORADORAS MANUALES (PISTOLAS)	<p>ALCANCE 0 a 6 m RECOMENDABLE 0 a 4 m # 3/4" a 1 1/2" PESOS 25 a 65 lb CONSUMOS DE AIRE 130 pcm</p> <p>LONGITUD DE SERIE 0.6 m BARRAS. 10 pzas ACERO INTE- SERIE 0.8 m GRAL. 8 pzas</p>
	Y	
R O T A C I O N	PERFORADORA DE COLUMNA	<p>WAGON DRILL SOBRE CARRO NEUMATICO</p> <p>MONTADA SOBRE NEUMATICOS ALCANCE 0 a 10 m RECOMENDABLE 4 a 8 m # 1 1/2" a 3" CONSUMO DE AIRE 305 pcm ACERO SECCIONAL; BROCAS CON INSERCIÓN DE TUNGSTENO</p> <p>SOBRE ORUGAS O TRACK DRILL</p> <p>MONTADA SOBRE ORUGAS ALCANCE DE 0 a 20 m RECOMENDABLE 6 a 15 m # 2 1/2" a 4 1/2" CONSUMO DE AIRE 357 pcm ACERO SECCIONAL; BROCAS CON INSERCIÓN DE TUNGSTENO</p>
	A	
R	COMPRESORES PARA ALIMENTAR A LAS PERFORADORAS	<p>170 pcm (A.C) 185 pcm (G.D) 250 pcm (A.C) 325 pcm (G.D) 350 pcm (A.C) 600 pcm (G.D) 750 pcm (G.D)</p> <p>DE PISTONES DE TORNILLOS DE ASPAS</p>
E		

A.C. ALLIS CHALMERS  
G.D. GARDNER DENVER

Fig. 1.1

Perforadora manual y Empujador, unidos entre sí mediante un acoplamiento de tipo bayoneta



Perforadora manual montada sobre el vagón perforador

El Empujador es un sistema que sostiene y empuja a la perforadora mientras que ésta trabaja. Sistema empleado para barrenos horizontales.

Fig. 1.2 WAGON DRILL

Perforadora montada sobre carro,  
sirve para trabajar en todas las  
posiciones mediante gatos hidrá  
licos.

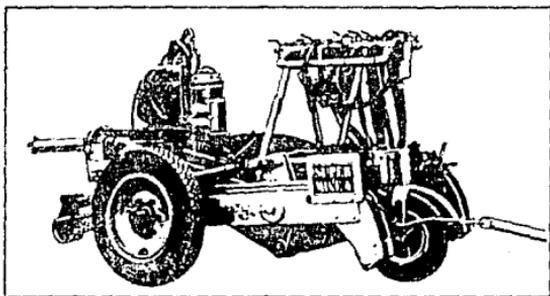
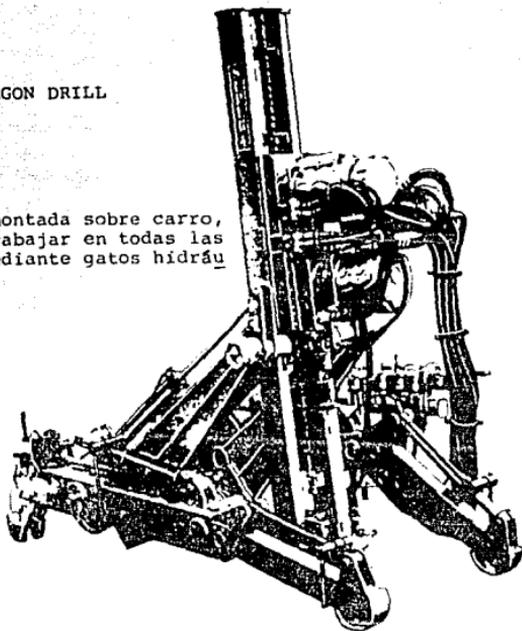
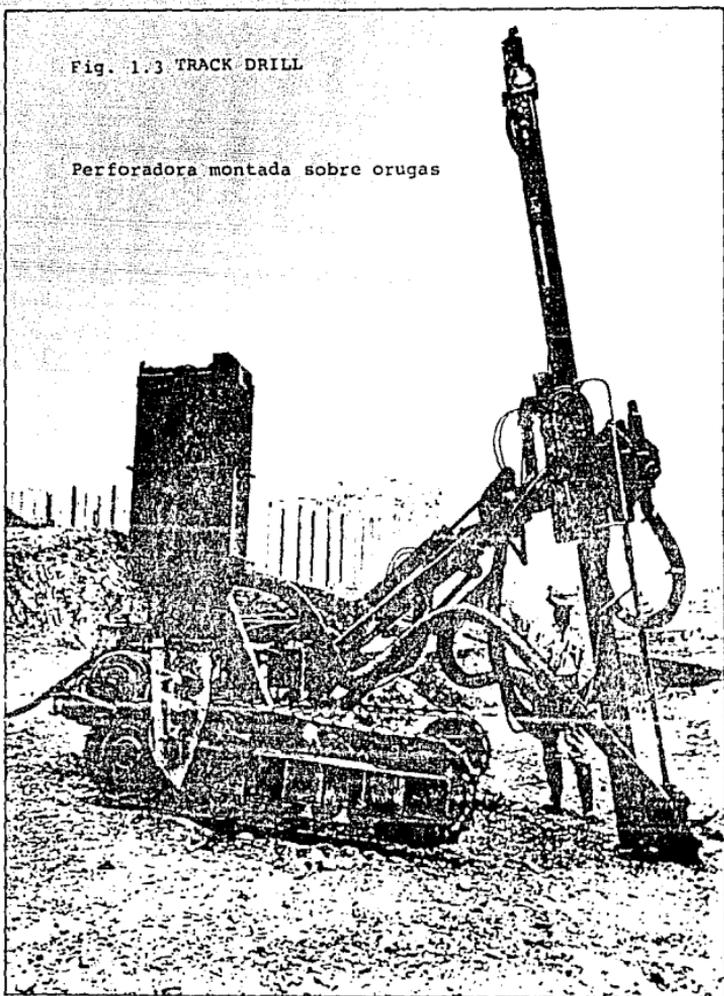


Fig. 1.3 TRACK DRILL

Perforadora montada sobre orugas



### 1.1.2.- BARRAS Y BROCAS

En las perforadoras de mano casi siempre se usan barras de perforación cuyo extremo cortante es una inserción de carburo de tungsteno que la hacen más durable.

Las perforadoras de mayor peso 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 tiene forma de cruz o de "x", su aplicación es variable en función de la roca que se va a barrenar. Fig. 1.4.

Con los equipos perforadores ya antes mencionados, logramos velocidades de perforación variables de 4 a 20 m por hora dependiendo del diámetro de la broca, profundidad del barrenado y dureza de la roca.

### 1.1.3.- COMPRESORES

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

Casi siempre están montados 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 acumula para entregas de trabajo, está provisto de - sistemas de seguridad que limitan la cantidad de aire comprimido y la presión máxima a que lo pueden almacenar. Fig. 1.5.

Se fabrican en diferentes capacidades, indicándose - éstas en P.C.M. (pies cúbicos por minuto) que nos permite - seleccionarlos en función del consumo que se requiera para la o las perforadoras que puedan alimentar.

Los compresores de uso común disponibles en el mercado y cuyas medidas los hacen manejables, se fabrican desde 75 - P.C.M. hasta 750 P.C.M.; su selección se hará en función de la demanda requerida para el equipo de barrenación.

#### 1.2.- 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 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 espaciamientos (E) menores de lo que teóricamente se --  
calculó, para obtener la fragmentación propuesta.

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 de piso del banco, esto garantiza el acabado y controla  
la voladura en el fondo del barreno.

### 1.3.- IMPACTO, AVANCE Y ROTACION

La mejor forma de aprovechar la energía de impacto, -  
es manteniendo la fuerza de avance en la forma más constante -  
posible cuidando de que ésta 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 carbonizadas de rosca tan-  
dem son la solución más recomendable.

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 detritus con el barrido de aire, 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 puede desarrollarse.

Las barras de perforación que se utilizan en trabajos de construcción pesada pueden ser integrales o de extensión. Las primeras tienen forjado en la misma barra el zanco (culata) y la punta de ataque, esta última siempre protegida con inserción de carburo de tungsteno (que forma lo que llamaríamos la broca).

Las barras de extensión, están roscadas en sus dos extremos en tal forma que permiten la unión entre culata y barra, entre barra; y entre barra y broca.

Las brocas como ya se dijo tienen forma de cruz, de "x" o de botones. Las de cruz o "x" están protegidas en sus filos, con inserciones de carburo de tungsteno que permite mayor duración y penetración por la resistencia del carburo de tungsteno. 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 semi-duras, es aconsejable el uso de las brocas tipo cruz y "x", considerándose más efectivas para rocas duras las brocas de botones, las cuales a su vez requieren de menor número de afiladas.

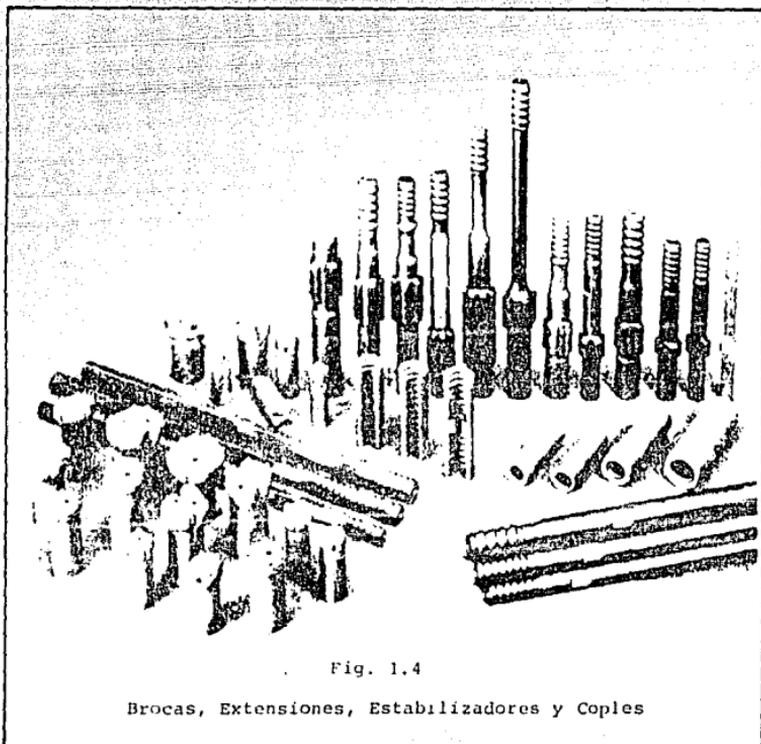
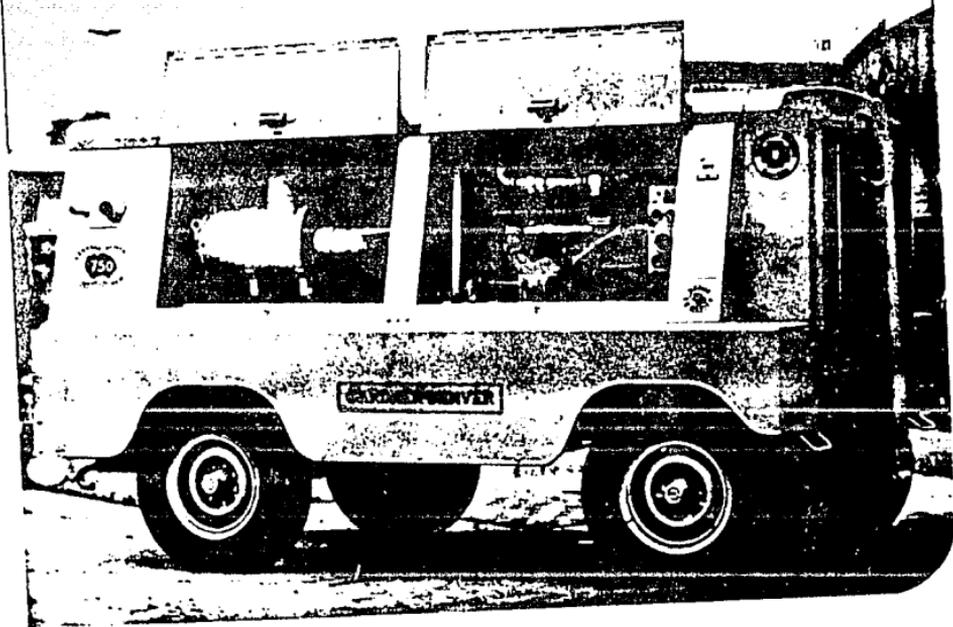


Fig. 1.4

Brocas, Extensiones, Estabilizadores y Copes

Fig. 1.5 Compresor para aire comprimido, motor diesel



## CAPITULO II

### EXPLOSIVOS; TIPOS Y PROPIEDADES

#### 2.1.- BOSQUEJO HISTORICO DEL USO DE LOS EXPLOSIVOS

La necesidad que tuvo el hombre de protegerse contra los elementos naturales y fieras, hizo que se refugiara en cuevas o cavernas naturales, dentro de éstas para hacer más amplio el lugar habitable, tuvo la necesidad de remover alguna roca de gran tamaño que por su mismo peso le era imposible moverla con su propio esfuerzo, por lo que con seguridad trató de reducirla a fragmentos que fuesen fácilmente removidos por sus manos, para fragmentar la roca utilizó el fuego, elemento por él ya conocido y así calentando la roca y enfriándola rápidamente lo gró que ésta se fisurara.

Posteriormente ya dentro de nuestra era, los romanos utilizaron el vinagre para disolver las calizas y lograr con ello así la construcción de acueductos subterráneos.

En el Siglo XIII, el viajero veneciano Marco Polo, según dice la historia, trajo de China en el año de 1271 la pólvora negra, que era utilizada en ese País en pirotecnia, así fue como en el Occidente se utilizó ésta para fines bélicos haciendo volar con el uso de ella: puentes, murallas, etc.,

posteriormente en el Siglo XV, un físico austriaco de nombre - Berthold Schwartz utilizó la pólvora negra en las armas de - fuego.

La pólvora fué utilizada en la ingeniería civil para hacer voladuras de rocas hasta el año de 1863 en que el físico sueco Alfredo Nobel patentó la dinamita, que por su fácil manejo y la facilidad de contenerla en cartuchos manejables, se usó para la construcción en ingeniería civil.

En las últimas décadas de este Siglo, se comenzó a - utilizar como explosivo una mezcla de nitrato de amonio con - aceite mineral, resultando como un dato muy curioso, que el - nitrato de amonio mezclado con agua sea fertilizante y mezclado con aceite sea explosivo.

Durante los últimos 15 años nuevos explosivos, los - hidrogeles y productos granulados de nitrato de amonio han sido perfeccionados. Estos dos desarrollos han apresurado cambios - dramáticos en la industria de los explosivos, una industria que en un tiempo dependió únicamente en la dinamita (anteriormente en la pólvora negra) para llevar a cabo el trabajo pesado que previamente se dejaba a los músculos de los hombros del hombre.

En 1980 se inició en México una etapa muy importante en el mercado de explosivos, ya que se dejó de producir en el

País, dinamitas a base de Nitroglicerina, para ser sustituidas por explosivos conocidos como hidrogeles.

## 2.2.- INTRODUCCION

Un explosivo es un compuesto o una mezcla de compuestos químicos que al contacto con el calor, la fricción o el impacto, experimenta una violenta transformación que produce calor y gases. Los gases producidos ejercen enormes presiones a temperaturas elevadas. El trabajo hecho por un explosivo depende de la cantidad de calor desprendida durante la explosión.

El término detonación indica una reacción muy rápida o casi instantánea y deflagración una reacción lenta (quemado - rápido). La detonación y la deflagración son las reacciones de los explosivos denominados de alta y baja potencia, respectivamente; los explosivos comerciales, exceptuando la pólvora negra, son explosivos de alta potencia.

## 2.3.- PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS

### a).- VELOCIDAD DE DETONACION

Esta es una medida de la rapidez con que viaja la onda de detonación a través de una columna de explosivos. La mayor parte de los fabricantes proporcionan la velocidad de

detonación de una columna de 3.17 cm (1.25 pulg) de diámetro - sin confinamiento. La velocidad de detonación de los explosivos comerciales varía de 1200 a 7000 m/seg .

b).- POTENCIA

El porcentaje en peso de nitroglicerina contenido en los explosivos se ha denominado tradicionalmente potencia.

El término potencia se empleó por primera vez cuando la dinamita era una mezcla de nitroglicerina y material inerte. Entonces, una dinamita de 60% de potencia en peso, era tres veces más potente que una de 20%. Ahora las dinamitas contienen además, otros ingredientes explosivos; en consecuencia, una dinamita de 60% de potencia en peso resulta sólo una y media veces más potente que una dinamita del 20%.

Es preciso señalar que el trabajo desarrollado por un explosivo está relacionado más directamente con su velocidad de detonación que con el porcentaje de sus ingredientes explosivos.

c).- DENSIDAD Y PESO VOLUMETRICO

La densidad y el peso volumétrico de una dinamita se expresa indirectamente con el número de cartuchos de 3.17 X -

20.3 cm (1.25 X 8 pulg) que contiene una caja de 22.7 kg (50 lb).

La densidad de los explosivos comerciales varía entre 0.6 y 1.7 que corresponde a un intervalo de 232 a 83 cartuchos por caja.

d).- PRESION DE DETONACION

La presión de detonación depende de la velocidad de detonación y de la densidad, es una medida de la presión de la onda de detonación. Esta propiedad no es utilizada para seleccionar un explosivo; sin embargo, la amplitud de la onda de esfuerzo producida por una explosión en roca, se relaciona con la presión de detonación. La relación aproximada entre la presión de detonación, la velocidad de detonación y la densidad, está dada por la ecuación siguiente:

$$P = 45.9 \times 10^{-7} \frac{DC^2}{(1 + 0.80 D)}$$

donde:

P presión de detonación, en Kg/cm<sup>2</sup>

D densidad, adimensional

C velocidad de detonación, en m/seg

e).- SENSIBILIDAD

Se denomina sensibilidad de un explosivo a su habilidad de propagarse de cartucho a cartucho bajo ciertas condiciones de prueba.

f).- SENSITIVIDAD

Esta propiedad es la medida de la facilidad de iniciación. Aunque las pruebas de caída y fricción permiten estimar la sensibilidad, estas pruebas se realizan más frecuentemente en los agentes explosivos que son relativamente insensitivos. Cualquier compuesto que pretenda emplearse en voladuras y que pueda ser iniciado, bajo ciertas condiciones prescritas, con un fulminante N° 8 es clasificado como un explosivo altamente sensitivo.

g).- RESISTENCIA AL AGUA

Como su nombre lo indica, es la propiedad que tienen los explosivos de no perder su eficiencia en presencia del agua.

h).- RESISTENCIA A LA CONGELACION

Esta propiedad es muy importante, ya que permite

efectuar voladuras en climas fríos sin la necesidad de utilizar el peligroso procedimiento de descongelar los explosivos.

i).- FLAMABILIDAD

Esta propiedad se refiere a la facilidad con la cual un explosivo o agente explosivo puede ser incendiado mediante flama o calor.

j).- EMANACIONES

Los explosivos al detonar producen vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno que no son tóxicos en el sentido ordinario del término. Además se generan otros gases venenosos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Los gases venenosos se llaman emanaciones.

2.4.- INGREDIENTES DE LOS EXPLOSIVOS

Los ingredientes de los explosivos pueden ser clasificados en bases, combustibles, portadores de oxígeno, antiácidos y absorbentes (Tabla 2.1).

Algunos de estos ingredientes desempeñan más de una función.

TABLA 2.1 Ingredientes de los explosivos

Ingredientes	Fórmula química	Función
Dinitrato glicol etileno	$C_2H_4(NO_2)_2$	Base: baja el punto de congelación
Nitrocelulosa	$(C_6H_7(NO_2)_2O_2)_n$	Base: agente gelatinizante
Nitroglicerina	$C_3H_5(NO_2)_3$	Base
Tetranitro-diglicerina	$C_6H_8N_4O_{11}$	Base: baja el punto de congelación
Nitroengrudo (Nitrostarch)	- - -	Base: explosivos <i>sin dónax de cabeza</i>
Nitrocompuestos orgánicos	- - -	Base: baja el punto de congelación
Trinitrotolueno (TNT)	$C_7H_5N_3O_6$	Base
Pólvora metálica	Al	Sensitivizador: usado en mezclas de alta densidad
Pólvora negra	$N_2NO_3 + C + S$	Base: tendencia a deflagrar
Tetranitrato de pentaeritritol (PETN)	$C_{12}H_{16}N_4O_{20}$	Base: fulminantes, cordón de tonante
Azida de plomo	$Pb(N_3)_2$	Base: empleado en fulminantes
Fulminato de mercurio	$Hg(ONC)_2$	Base: se empleaba en fulminantes
Nitrato de amonio	$NH_4NO_3$	Base: portador de oxígeno
Oxígeno líquido	$O_2$	Portador de oxígeno
Nitrato de sodio	$NaNO_3$	Portador de oxígeno
Nitrato de potasio	$KNO_3$	Portador de oxígeno
Carbón mineral	C	Combustible
Carbón vegetal	C	Combustible
Parafina	$C_n(H_{2n+2})$	Combustible
Azufre	S	Combustible
Combustóleo	$(CH_2)_x(CH_2)_n$	Combustible
Pulpa de madera	$(C_6H_{10}O_5)_n$	Combustible: absorbente
Negrohumo	C	Combustible
Tierra de diatomeas	$SiO_2$	Absorbente: previene el embarrado
Gis	$CaCO_3$	Antiácido
Carbonato de calcio	$CaCO_3$	Antiácido
Oxido de zinc	$ZnO$	Antiácido
Cloruro de sodio	$NaCl$	Reductor de flama

Las bases son sólidos o líquidos que, cuando sufren - la aplicación de calor o impacto suficientes, se descomponen en gases con importante desprendimiento de calor.

Los combustibles se combinan con el exceso de oxígeno, evitando la formación de óxidos de nitrógeno.

Los portadores de oxígeno tienen la función de completar la oxidación del carbono para prevenir la formación del monóxido de carbono.

Los antiácidos aportan estabilidad durante el almacenamiento y los absorbentes se emplean para absorber las bases líquidas.

La formación de óxidos de nitrógeno y del monóxido de carbono no sólo es indeseable porque constituyen gases venenosos, sino porque da lugar a menos calor y eficiencia que cuando se forman nitrógeno y dióxido de carbono.

## 2.5.- TIPOS DE EXPLOSIVOS

### 2.5.1.- POLVORA NEGRA

Las pólvoras negras son explosivos bajos, es decir, de reacción lenta. Su acción es más bien de empuje y de corte

y puede emplearse para producir desplazamiento controlado, por ejemplo, en excavaciones a cielo abierto para la extracción de piedra sólida para escolleras, piedra para edificios, bloques de granito para monumentos, etc. Su uso está prohibido en excavaciones subterráneas debido a que deflagran con una llama muy caliente.

Las pólvoras están compuestas de mezclas muy íntimas de azufre, carbón y un nitrato que puede ser de potasio o de sodio.

#### 2.5.2.- DINAMITAS

La dinamita se ha desempeñado admirablemente durante los últimos 100 años como soporte de la industria de los explosivos comerciales.

El principal defecto de la dinamita es su contenido de nitroglicerina que la hace peligrosa de fabricar, transportar y usar.

Como ya se ha mencionado, en México se han dejado de producir dinamitas a base de Nitroglicerina.

En las tablas 2.2 y 2.3 se resume la información sobre las propiedades y composición de los tipos de dinamitas

que se mencionan a continuación:

a) DINAMITA REGULAR DE NITROGLICERINA

Esta dinamita regular tiene una alta velocidad de detonación que implica una fuerte acción fragmentadora, su uso ha disminuido debido a su alto costo, su sensibilidad a la fricción y a los golpes y a su alta inflamabilidad. La dinamita (extra) de amonio ha reemplazado a la dinamita regular en la mayor -- parte de sus aplicaciones.

b) DINAMITA (EXTRA) DE AMONIO DE DENSIDAD ALTA

La dinamita de amonio (dinamita extra) se emplea comúnmente en cartuchos. La dinamita de amonio es similar a la dinamita regular excepto que parte de la nitroglicerina y del nitrato de sodio se reemplaza por nitrato de amonio.

La dinamita de amonio de densidad alta se fabrica a menudo con porcentajes de potencia de 20 a 60. Su velocidad de detonación es menor, sus emanaciones menos peligrosas, es menos densa y considerablemente menos sensitiva a la fricción y a los golpes que la dinamita pura. La dinamita extra de densidad alta es adecuada cuando la roca no es muy sana y cuando no hay mucha agua.

TABLA 2.2 Propiedades de las dinamitas \*

Potencia en peso %	Potencia en cartuchos %	Peso volumétrico g/cm <sup>3</sup>	Velocidad confinada m/s	Resistencia al agua	Emanaciones	N° de cartuchos por caja de 22.7 kg
Dinamita regular de nitroglicerina						
60	60	1.3	6000	alta	abundantes	106
50	50	1.4	5000	regular	abundantes	104
40	40	1.4	4000	regular	abundantes	100
30	30	1.4	3500	baja	abundantes	100
20	20	1.4	2700	baja	abundantes	100
Dinamita de amonio de densidad alta						
60	52	1.3	3800	regular	escasas	110
50	45	1.3	3500	regular	escasas	110
40	35	1.3	3200	regular	escasas	110
30	25	1.3	2700	regular	escasas	110
20	15	1.3	2400	regular	escasas	110
Dinamita de amonio de densidad baja. Serie de velocidad alta						
65	50	1.2	3300	regular	regulares	120
65	45	1.1	3100	regular	regulares	129
65	40	1.0	3050	regular	regulares	135
65	35	1.0	3030	regular	regulares	141
65	30	0.9	2600	baja	regulares	153
65	25	0.9	2700	baja	regulares	163
65	20	0.8	2500	baja	regulares	174
Dinamita de amonio de densidad baja. Serie de velocidad baja						
65	50	1.2	2450	regular	regulares	120
65	45	1.1	2350	baja	regulares	129
65	40	1.0	2300	baja	regulares	135
65	35	1.0	2200	baja	regulares	141
65	30	0.9	2100	baja	regulares	153
65	25	0.9	2000	baja	regulares	163
65	20	0.8	1900	baja	regulares	174

\* Los valores proporcionados son promedios de varias marcas de dinamitas.

TABLA 2.3 Composición de las dinamitas\*

Componente	Potencia en peso					
	20%	30%	40%	50%	60%	100%
Dinamita regular de nitroglicerina						
Nitroglicerina	20.2	29.0	39.0	49.0	56.8	---
Nitrato de sodio	59.3	53.3	45.5	34.4	22.6	---
Combustible carbonoso	15.4	13.7	13.8	14.6	18.2	---
Azufre	2.9	2.0	--	--	--	---
Antiácido	1.3	1.0	0.8	1.1	1.2	---
Humedad	0.9	1.0	0.9	0.9	1.2	---
Dinamita de amonio de densidad alta						
Nitroglicerina	12.0	12.6	16.5	16.7	22.5	---
Nitrato de amonio	57.3	46.2	37.5	25.1	15.2	---
Nitrato de sodio	11.8	25.1	31.4	43.1	50.3	---
Combustible carbonoso	10.2	8.8	9.2	10.0	8.6	---
Azufre	6.7	5.4	3.6	3.4	1.6	---
Antiácido	1.2	1.1	1.1	0.8	1.1	---
Humedad	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7	---

\* Porcentajes en peso (promedios de varias marcas de dinamitas)

c).- DINAMITA (EXTRA) DE AMONIO DE DENSIDAD BAJA

La dinamita de amonio de densidad baja tiene un porcentaje de potencia de aproximadamente 65 a granel y de 20 a 50 en cartuchos. Como todas las dinamitas extra, contiene una porción baja de nitroglicerina y una porción alta de nitrato de amonio.

Algunos fabricantes producen dos tipos de dinamita extra de densidad baja, uno de velocidad de detonación alta y -

otro de velocidad baja. Ambos tipos tienen velocidad y densidad menores que la dinamita extra de densidad alta.

El tipo de dinamita extra de velocidad de detonación baja es adecuado para voladuras en rocas blandas, como lutitas o cuando se desea obtener bloques grandes de 10 a 100 kg de peso.

#### 2.5.3.- GELATINAS

En la tabla 2.4 y 2.5 se presentan en forma resumida las propiedades e ingredientes de los diferentes tipos de gelatinas que se mencionan a continuación:

##### a).- GELATINA EXPLOSIVA

Esta gelatina es un explosivo con la apariencia del hule y se elabora mezclando nitroglicerina con nitrocelulosa. Para estabilizar la mezcla durante su almacenaje se le añade un antiácido.

La gelatina explosiva es de velocidad de detonación muy alta y tiene una resistencia al agua excelente, pero tiene la desventaja de emitir al detonar grandes volúmenes de gases nocivos. Es el explosivo comercial más potente.

b).- GELATINA REGULAR

La gelatina regular es el equivalente a la dinamita regular de las dinamitas y se elabora con potencia en peso de 20 a 90 por ciento en su presentación normal y de 30 a 80 por ciento en cartuchos. La potencia en cartuchos suele ser denominada por los fabricantes como el grado de la gelatina. La gelatina regular es un explosivo a prueba de agua.

c).- GELATINA DE AMONIO

La gelatina de amonio es comparable a la gelatina regular de la misma manera que la dinamita de amonio es comparable a la dinamita regular y fue desarrollada como un sustituto económico de la gelatina regular. La gelatina de amonio es comunmente elaborada en potencias del 30 al 80 por ciento, correspondiendo a potencias del 35 al 72 por ciento en cartuchos. Con relacion a la gelatina regular, la gelatina de amonio es de velocidad de detonación un poco menor, de emanaciones menos nocivas y menor resistencia al agua.

La "toval" es la gelatina extra más densa y más económica para voladuras difíciles en construcción y en canteras. La experiencia ha demostrado que esta gelatina puede reemplazar a explosivos de menor costo y dar resultados suficientemente buenos para compensar el pequeño costo adicional. Está

TABLA 2.4 Propiedades de las gelatinas

Potencia en peso %	Potencia en cartuchos %	Peso volumétrico g/cm <sup>3</sup>	Velocidad confinada m/s	Resistencia al agua	Emanaciones	N° de cartuchos por caja de 22.7 kg
Gelatina explosiva						
100	90	1.3	7500-8000	excelente	abundantes	110
Gelatina regular						
90	80	1.3	7000	excelente	abundantes	105
70	70	1.4	6400	excelente	abundantes	101
60	60	1.4	6100	excelente	escasas	98
50	55	1.5	5600	excelente	escasas	95
40	45	1.5	5000	excelente	escasas	92
30	35	1.6	4400	excelente	escasas	88
20	30	1.7	3400	excelente	escasas	85
Gelatina extra						
80	72	1.3	6100	excelente	escasas	106
70	67	1.4	5800	excelente	muy escasas	102
60	60	1.4	5300	excelente	muy escasas	100
50	52	1.5	5000	excelente	muy escasas	97
40	45	1.5	4900	excelente	muy escasas	92
30	35	1.6	4300	excelente	muy escasas	90
Semigelatina						
63	60	1.3	3700	muy alta	muy escasas	110
63	50	1.2	3700	muy alta	muy escasas	118
63	40	1.1	3500	alta	muy escasas	130
63	30	0.9	3200	regular	muy escasas	150

disponible comercialmente en cartuchos de todos los diámetros.

TABLA 2.5 Composición de las gelatinas\*

Componente	Potencia en peso					
	20%	30%	40%	50%	60%	100%

## Gelatina explosiva

Nitroglicerina	---	---	---	---	---	91.0
Nitrocelulosa	---	---	---	---	---	7.9
Antiácido	---	---	---	---	---	0.9
Humedad	---	---	---	---	---	0.2

## Gelatina regular

Nitroglicerina	20.2	25.4	32.0	40.1	49.6	---
Nitrato de sodio	60.3	56.4	51.8	45.6	38.9	---
Nitrocelulosa	0.4	0.5	0.7	0.8	1.2	---
Combustible carbonoso	8.5	9.4	11.2	10.0	8.3	---
Azufre	8.2	6.1	2.2	1.3	---	---
Antiácido	1.5	1.2	1.2	1.2	1.1	---
Humedad	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	---

## Gelatina extra

Nitroglicerina	---	22.9	26.2	29.9	35.3	---
Nitrocelulosa	---	0.3	0.4	0.4	0.7	---
Nitrato de sodio	---	54.9	49.6	43.0	33.5	---
Nitrato de amonio	---	4.2	8.0	13.0	20.1	---
Combustible carbonoso	---	8.3	8.0	8.0	7.9	---
Azufre	---	7.2	5.6	3.4	---	---
Antiácido	---	0.7	0.8	0.7	0.8	---
Humedad	---	1.5	1.4	1.6	1.7	---

\* Porcentajes en peso (promedios de varias marcas de dinamitas)

d). - SEMIGELATINAS

Las semigelatinas son comparables a las gelatinas de amonio como las dinamitas de amonio de baja densidad son comparables a las de densidad alta. Como las dinamitas extra de baja densidad, las semigelatinas tienen una potencia uniforme de 60 a 65 por ciento, que en su presentación en cartuchos varía dependiendo de la densidad y del tamaño de los granos de sus ingredientes. Sus propiedades están comprendidas entre las de la dinamita de amonio de alta densidad y la gelatina extra y posee una gran versatilidad. Puede reemplazar a la dinamita de amonio cuando se necesita un explosivo más resistente al agua. Las semigelatinas tienen una velocidad de detonación de 3200 a 3700 m/seg, que a diferencia de la mayoría de los explosivos no es influenciada seriamente por la falta de confinamiento. Su composición es similar a la de la gelatina de amonio, pero con menos nitroglicerina y nitrato de sodio y más nitrato de amonio.

2.5.4.- HIDROGELES (WATER GELS)

Los hidrogeles, forman una línea de explosivos con características superiores, en algunos conceptos, a las dinamitas. Se fabrican con una amplia variedad de energías, velocidades, sensibilidades y otras propiedades físicas.

Al igual que en otros explosivos, en la fabricación -

de los hidrogeles intervienen sensibilizadores, oxidantes y combustibles. Como sensibilizadores, se usan TNT, pólvora sin humo y aluminio entre otros.

Como oxidantes se utilizan los nitratos de sodio y de amonio y como combustibles; aluminio, gilsonita y aceites.

La diferencia principal entre éstos y las dinamitas - consiste en el sensibilizador que reemplaza a la nitroglicerina, que evita las molestias físicas causadas por ella, reduciendo - el riesgo de una detonación accidental por impacto, choque, - fuego, fricción, etc., creando con ésto un ambiente de trabajo seguro.

En resumen, estimamos que los hidrogeles son los explosivos más seguros disponibles en el mercado actualmente y - que además proporcionan los parámetros necesarios para un buen trabajo en donde se requiera usarlos.

La firma Du Pont los creó desde 1950 para barrenos de diámetro grande y después de múltiples estudios y pruebas, - logró un sensibilizador confiable con el cual garantizar la - detonación en barrenos pequeños hasta de 1" de diámetro. A este producto lo llamó "nitrato de monometilamina" (MMAN en la - jerga científica de Du Pont).

Con el sensibilizador, inició un exhaustivo programa de pruebas de campo y producción que dieron por resultado este explosivo, cuyas características principales son la eliminación total de la nitroglicerina, con lo cual proporciona una mayor seguridad en su fabricación y en su manejo, logrando a su vez propiedades físicas superiores que permiten un uso ilimitado en la industria de la construcción de obras de Ingeniería Civil.

Para garantizar la seguridad del explosivo, lo sujetaron a una serie de pruebas debidas a impacto, por lo cual es posible relacionar una serie de ventajas.

Entre las más importantes citaremos:

- a) Mayor control de la densidad del barreno (atacado).
- b) Mayor flexibilidad en la carga (manual o mecánico-neumático).
- c) Fragmentación excelente (fácil de calcular).
- d) Sin peligro de propagación barreno a barreno.
- e) Reducción de gases tóxicos.
- f) Eliminación de dolores de cabeza originados por la nitroglicerina.
- g) Excelente resistencia al agua.
- h) Densidad entre 0.8 g/cc y 1.6 g/cc.
- i) Energía entre 900 cal/gr y 1460 cal/gr.
- j) Presentación comercial en 7 diámetros, en bolsas y en

forma que facilita el vaciado en el bombeado.

k) Velocidades desde 3400 m/seg hasta 6700 m/seg.

Se recomiendan los Hidrogeles para las cargas de fondo en todos los diámetros y pueden ser usados con mayores ventajas que cualquier otro explosivo, en plasteos.

Según sus presentaciones, pueden dar potencias equivalentes a la dinamita extra 40% en diámetro (1" y 2"), superior a la dinamita 60% en diámetro de 2" a 3" y aún mayores cuando la usamos en diámetros de 4" a 8" cebados adecuadamente.

Sus densidades varían de 1.1 a 1.35 gr/cc, obteniendo se velocidades de 3800 a 5500 m/seg.

Es el explosivo comercial que se fabrica en mayores cantidades en el mercado actual, pudiendo encontrarse con cualquier distribuidor.

#### 2.5.4.I CONDICIONES DE CEBADO

En los diámetros menores (1" ó 3") es suficiente un fulminante ordinario No. 6 pudiendo lograr el mismo resultado con una vuelta y un nudo de cordón detonante de 50 granos. En los diámetros mayores (4" a 8") se recomienda usar cebos detonantes de alta presión.

### 2.5.5.- AGENTES EXPLOSIVOS

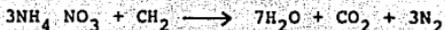
Los agentes explosivos son combinaciones de combustibles y oxidadores, que no son explosivos. Su principal característica es su relativa baja sensibilidad a sacudidas, golpes y fricción que hace de ellos productos de manejo y transporte bastante seguros. Debido a su insensibilidad es necesario emplear un iniciador de alta potencia para su detonación. Los agentes explosivos están compuestos de nitratos inorgánicos y carbonosos y pueden contener también sustancias adicionales no explosivas como el polvo de aluminio o el ferrosilicón para incrementar su densidad.

Los agentes explosivos tienen dos presentaciones: una seca y otra líquida. El agente explosivo seco compuesto de nitrato de amonio y combustóleo (ammonium nitrate-fuel oil, ANFO) ha reemplazado ampliamente a las dinamitas y gelatinas en excavaciones a cielo abierto. Los agentes explosivos líquidos, en forma de morteros y lechadas, se emplea también en lugar de dinamitas, gelatinas y otros agentes explosivos secos.

#### a).- AGENTES EXPLOSIVOS SECOS

El agente explosivo seco más utilizado es el denominado ANFO, constituido por una mezcla de nitrato de amonio granulado y combustóleo. La fórmula química de la detonación de

este producto es la siguiente:



El término  $\text{CH}_2$ , aunque no es la expresión precisa del combustóleo, es suficiente para caracterizar la reacción. El miembro derecho de la ecuación contiene solamente los gases deseables de la detonación; sin embargo, siempre se generan cantidades regulares de monóxido de carbono,  $\text{CO}$ , y óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}$ . Las proporciones en peso de los ingredientes de la ecuación son 94.5% de nitrato de amonio y 5.5% de combustóleo. En la práctica se acostumbra utilizar proporciones del 94% y del 6%, respectivamente, para asegurar una eficiente reacción química del nitrato.

El mezclado uniforme de los ingredientes es esencial para la generación de la fuerza explosiva completa. Algunos agentes explosivos son mezclados y suministrados en paquetes por el fabricante. Cuando se obtienen los ingredientes separados existen varios procedimientos para lograr un mezclado mecánico, pero no siempre es el más práctico. Uno de los procedimientos más comunes y prácticos, consiste en verter del 8 al 10% en peso de combustóleo en las bolsas abiertas de nitrato granulado. En media hora el nitrato absorbe aproximadamente la cantidad correcta de combustóleo.

El combustóleo puede también, ser vertido sobre el nitrato a medida que éste es introducido en la perforación. Para una absorción rápida y uniforme se recomienda añadir el combustóleo después de cada 25 a 50 Kg de nitrato.

Un encendido inadecuado, da lugar a una velocidad - lenta de detonación con el riesgo de que se apague y falle la - voladura. Para asegurar la propagación a través de la columna de explosivos se colocan reforzadores de detonación de veloci--dad alta, espaciados entre los explosivos.

La ventaja de la insensitividad de los agentes explo--sivos secos son su seguridad y facilidad para depositarlos a - granel en las perforaciones verticales. Esta forma de rellenar las perforaciones tiene además la ventaja, sobre la presenta--ción en cartuchos, de llenar el agujero totalmente, haciendo - más eficiente el uso del volumen de la perforación.

El nitrato de amonio es soluble en el agua. Por esta razón en barrenos llenos de agua se acostumbra bombear el agua e introducir una manga de plástico que se rellena con el agente explosivo. Cuando esta manga se rellena, particularmente cuando se rellena neumáticamente, debe tomarse mucho cuidado en - evitar la posibilidad de producir una descarga de electricidad estática.

El peso volumétrico del ANFO varía de 0.75 a 0.95, dependiendo de la densidad y del tamaño de sus granos. La tabla 2.6 muestra la variación de la velocidad de detonación y la concentración de carga del ANFO en función del diámetro de los barrenos. El relleno neumático da lugar a mayores velocidades de detonación y mayores concentraciones de carga, particularmente en perforaciones menores de 7.5 cm de diámetro; de hecho, el empleo de ANFO en diámetros pequeños no es recomendable si no se utiliza el método de relleno neumático.

TABLA 2.6 Velocidad de detonación y concentración de carga del ANFO

Diámetro del barreno, mm	Velocidad confinada m/s	Concentración de carga, kg/m
38	2 100 - 2 750	0.9 - 1.0
51	2 600 - 3 000	1.6 - 1.9
76	3 050 - 3 300	3.7 - 4.5
102	3 350 - 3 600	6.6 - 7.7
127	3 500 - 3 800	10.3 - 12.2
152	3 650 - 3 900	14.7 - 17.4
178	3 750 - 4 000	19.8 - 23.5
203	3 800 - 4 050	26.2 - 31.0
229	3 900 - 4 100	32.8 - 39.9
254	4 020 - 4 100	49.2 - 58.7

**b) AGENTES EXPLOSIVOS LIQUIDOS**

Los agentes explosivos líquidos son soluciones de -  
nitrato de amonio y de otros ingredientes no explosivos como -  
sensitivizadores y combustibles como carbón, azufre o aluminio.

Los agentes explosivos líquidos requieren iniciadores  
de velocidad de explosión alta para alcanzar velocidades de -  
detonación apropiadas; con frecuencia, requieren, además, refor-  
zadores de explosivos de alta velocidad espaciados a lo largo -  
de la perforación para asegurar una explosión completa. Su -  
velocidad de detonación (3500 a 5500 m/seg) no es tan dependien-  
te del diámetro de la carga como en los agentes explosivos -  
secos. Su densidad varía entre 1.1 a 1.6. La consistencia de  
estos productos varía de fluida a 38° C a rígida a temperaturas  
de congelación, aunque algunos conservan su fluidez a tempera-  
turas muy bajas. Los agentes explosivos líquidos tienen, - -  
además de la ventaja de su fácil introducción en las perforacio-  
nes, mayor velocidad de detonación y mayor densidad. Su costo  
mayor resulta compensado por su empleo en barrenos más espacia-  
dos y de menor diámetro. La adición de polvo de aluminio para  
aumentar su sensibilidad incrementa la energía y el calor - -  
desarrollados. Las soluciones que contienen aluminio han dado  
buenos resultados en voladuras en roca extremadamente dura. Los  
agentes líquidos y secos pueden emplearse alternados en la mis-  
ma perforación. La mayor proporción quedará constituida por el

agente seco y el líquido servirá de refuerzo. Otra forma de su empleo combinado consiste en colocar el agente líquido donde la fragmentación es más difícil.

#### 2.5.6.- OTROS EXPLOSIVOS

##### a).- TNT

El trinitrotolueno,  $C_7H_5N_3O_6$  (TNT), es un compuesto - sensible a fulminantes (no muy sensitivo) que tiene una resistencia al agua excelente. El TNT después de vaciado tiene una densidad de 1.56 y una velocidad de detonación con confinamiento del orden de 7000 m/seg. Se utiliza como dispositivo de - iniciación y de refuerzo para los agentes explosivos. Se acostumbra emplearlo en forma granular cuando se requiere un explosivo de densidad alta, buena resistencia al agua, que pueda - vaciarse con facilidad aún en perforaciones de diámetros menores de 2 cm. Una de las principales aplicaciones del TNT es la de sensitivizador de explosivos líquidos.

##### b).- PETN

El tetranitrato de pentaeritritol,  $C_5H_8N_4O_{12}$  (PETN) - tiene una densidad de 1.76 y velocidad de detonación con confinamiento de más de 7500 m/seg. El PETN se emplea como ingredien - te en dispositivos de iniciación en fulminantes y cuerdas -

detonantes.

c).- PENTOLITA

La pentolita es una mezcla en partes iguales de TNT y PETN. La pentolita después de vaciada en una perforación tiene una densidad de 1.65 y una velocidad de detonación confinada de 7200 a 7500 m/seg. La pentolita depositada a graner sirve como dispositivo de iniciación y refuerzo para los agentes explosivos.

d).- RDX

La ciclotrimetilenotrinitramina,  $C_3H_6N_6O_6$  (RDX) es, después de la nitroglicerina, la sustancia explosiva de más potencia. Cuando se le compacta hasta un peso volumétrico de  $1.70 \text{ t/m}^3$  alcanza velocidades de detonación con confinamiento del orden de 8000 m/seg. Es empleada como ingrediente base en algunas mezclas explosivas y también en dispositivos de iniciación.

e).- COMPUESTO B

El compuesto B es una mezcla de RDX, TNT y aproximadamente el uno por ciento de cera. El compuesto B vaciado en una perforación tiene una densidad de 1.65 y una velocidad de deto-

nación de 7500 m/seg. Se emplea como dispositivo de iniciación y refuerzo de los agentes explosivos.

### CAPITULO III

#### DISPOSITIVOS DE INICIACION Y SISTEMAS DE VOLADURAS

##### 3.1.- DISPOSITIVOS DE INICIACION

Unicamente se pueden lograr buenos resultados en cualquier operación de voladura cuando los dispositivos de iniciación usados para detonar la carga de explosivos se eligen y utilizan cuidadosamente.

Dado que todos los dispositivos de iniciación están hechos para explotar, deberán ser tratados con el mismo cuidado y precaución empleada para los altos explosivos.

Los dispositivos de iniciación caen dentro de dos categorías, dependiendo de su fuente de energía primaria: eléctrica y no-eléctrica.

##### 3.1.1.- DISPOSITIVOS DE INICIACION ELECTRICOS

###### a).- ESTOPINES DE INICIACION ELECTRICOS

El detonador más ampliamente utilizado es el estopín eléctrico. Con la energía eléctrica y el circuito de voladura adecuados, un gran número de estopines pueden ser iniciados -

desde una sola fuente de corriente en el lugar seguro a distancia del área de voladura.

El estopín eléctrico consta de dos alambritos con cubierta aislante conectados a un puente de filamento delgado en el interior de una cápsula metálica aislada eléctricamente. Al aplicar cierta cantidad de corriente a los alambritos, el puente emite calor y produce una chispa sobre una carga muy pequeña de explosivo sensible al calor. Esta chispa da lugar al disparo de una carga base constituida por un detonante de alta potencia como el PETN o la RDX. Algunos estopines eléctricos contienen las cargas de disparo y de iniciación. La explosión de la carga base es suficiente para iniciar un explosivo o una mecha.

Hay dos maneras de usar los estopines eléctricos - (fig 3.1); insertándolos directamente en los cartuchos de explosivos o unidos a una cuerda detonante o a una mecha.

Las ventajas de los estopines eléctricos incluyen: - seguridad en el manejo, disponibilidad de periodos de retardo y control preciso del instante de la explosión.

#### b).- ESTOPINES ELECTRICOS DE RETARDO

Los estopines son semejantes a los de iniciación. Se colocan entre los alambritos conectados al dispositivo de

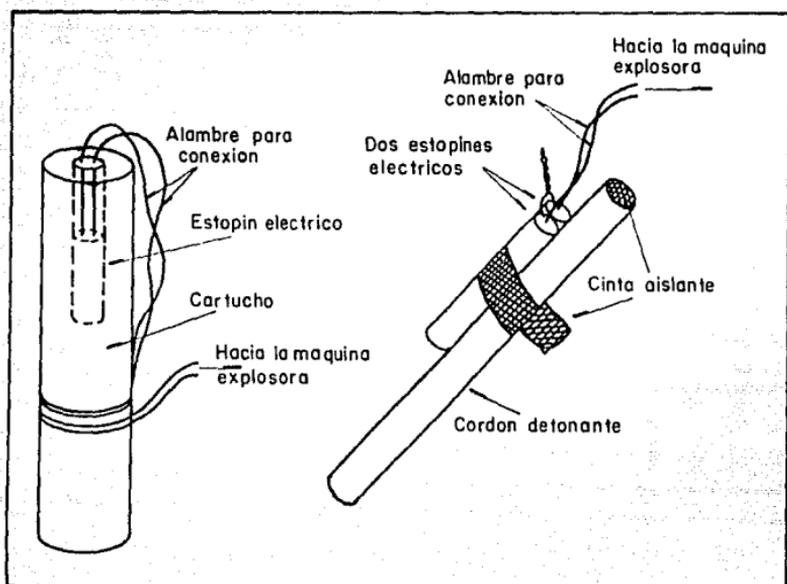


Fig 3.1 Forma de colocación de los estopines eléctricos.

iniciación. El elemento de retardo está calculado para que -  
 transcurra un determinado lapso entre la aplicación de la - -  
 corriente y la iniciación (fig 3.2). En la actualidad se fa-  
 brican dos tipos de retardos: cortos o de milisegundos, con in-  
 crementos de 25 y 50 milisegundos; y largos con incrementos de  
 medio segundo y de un segundo. Los retardos en milisegundos -  
 son adecuados cuando se requiere una fragmentación intensa con  
 vibraciones del terreno limitadas. Los retardos largos se usan  
 principalmente en excavaciones subterráneas para permitir la -

expansión de la roca fragmentada entre los periodos de retardo. Los retardos largos producen fragmentos más grandes que los de milisegundos.

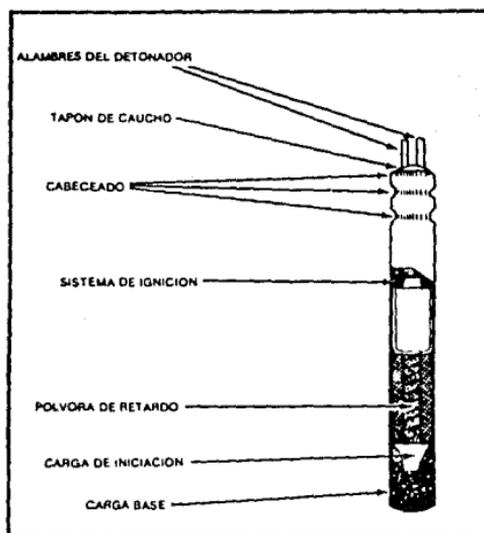


Fig 3.2 Esquema de un estopín eléctrico Du Pont

### 3.1.2.- DISPOSITIVOS DE INICIACION NO-ELECTRICOS

#### a).- CONECTORES DE RETARDO NO-ELECTRICOS

Estos conectores (Du Pont) son retardadores en milisegundos no-eléctricos. Se colocan entre la cuerda detonante en la superficie del terreno. Están constituidos por una cápsula de plástico que contiene el elemento retardador, que es un tubo de cobre pequeño, en su parte central. Cada uno de los extremos de la cápsula está hecho de tal forma que puede acoplarse a una línea de cordón detonante, cortándola, doblando sus extremos en "U" e insertándolos en cada extremo del conector y asegurándolos mediante dos cuñas dentadas pequeñas que entran a presión.

Deben protegerse de impactos como caídas de rocas u objetos pesados y mantenerse lejos del fuego, calor excesivo y chispas.

Se utilizan acoplados a la línea troncal entre barrenos o entre grupos de barrenos para lograr una voladura en secuencia.

Pueden adquirirse con intervalos de 5, 9, 17 y 25 milisegundos, los intervalos menores son útiles cuando se tienen barrenos de diámetro pequeño con espaciamiento reducido. Para

evitar fallas en las líneas de iniciación se recomienda un espaciamiento entre barrenos de cuando menos treinta centímetros - por cada milisegundo de retardo. Por esta razón estos conectores pueden utilizarse para espaciamientos de 2 a 10 metros o más con barrenos de diámetro que varían entre 10 y 45 cm.

#### b).- FULMINANTES Y MECHA DE SEGURIDAD

Los fulminantes se emplean conectados en el extremo de la mecha de seguridad. Los fulminantes constan de una carga pequeña de explosivo sensible al calor y una carga base de explosivo detonante como el PETN. La cápsula o casquillo metálico del fulminante tiene un espacio vacío para insertar la mecha (fig 3.3). La mecha tiene un corazón de pólvora negra -

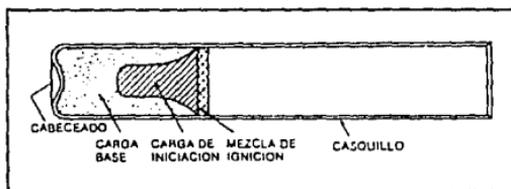


Fig 3.3 Esquema de un fulminante no eléctrico Du Pont

de nitrato de potasio con un forro textil a prueba de agua. Los tipos de mecha existentes varían tanto en flexibilidad como en resistencia al agua. En la mayor parte de las mechas la -

flama avanza a razón de 45 cm por minuto aunque hay algunas en las que este avance es de 60 cm por minuto. El manejo de este tipo de fulminantes es más peligroso que los estopines eléctricos debido a que la carga más sensitiva es la que queda expuesta. El manejo descuidado de la mecha, el grado de confinamiento y la presión atmosférica pueden cambiar la velocidad del encendido de la mecha. Por esta razón esta velocidad debe determinarse en el sitio de trabajo.

c).- CUERDAS DETONANTES

La cuerda detonante es redonda y flexible con núcleo central de alto explosivo. El explosivo más utilizado en el núcleo de la cuerda detonante es el PETN. Este explosivo posee una velocidad de detonación del orden de 6700 m/seg. La cubierta de la cuerda puede estar constituida por materiales textiles, impermeabilizantes y plásticos para proteger el núcleo contra los daños provocados durante su manejo, la exposición a temperaturas extremas, el contacto con agua, aceite y otros elementos; esta cubierta también debe ser resistente a la tensión y flexión.

La cuerda detonante es relativamente insensitiva y requiere de una cápsula fulminante Nº 6 para ser iniciada. Por tanto, es un elemento de iniciación seguro y confiable. Sin embargo, dado que su núcleo es un alto explosivo debe ser

manejada y almacenada con cuidado.

Las cuerdas detonantes tienen una aplicación extensa en trabajos bajo el agua, protegiendo sus extremos de la entrada de agua.

El núcleo de explosivos absorbe el agua lentamente y se vuelve insensitivo. Sin embargo, aunque esté húmeda, la cuerda detonará si se inicia en un extremo seco.

Las cuerdas producen la detonación de explosivos sensitivos y son muy útiles en voladuras de cargas múltiples con iniciadores para inducir la explosión de los agentes explosivos; sin embargo, no producen directamente el encendido de los agentes explosivos.

### 3.1.3.- INICIADORES Y REFORZADORES

Un iniciador es un cartucho de explosivos con fulminante o cuerda detonante para inducir la detonación de un agente explosivo. Estos cartuchos iniciadores o de cebado son necesarios cuando se emplean agentes explosivos. Los iniciadores se fabrican con dinamita de detonación elevada.

Los reforzadores son también cartuchos de iniciación, pero sin fulminante ni cuerda detonante. Se emplean solamente

para asegurar la propagación de la detonación a lo largo de una columna de explosivos.

### 3.2.- SISTEMAS DE DETONACION NO ELECTRICOS

#### 3.2.1.- DISPARO CON FULMINANTE Y MECHA

La mecha constituye un medio a través del cual la flama avanza a una velocidad relativamente uniforme para iniciar una carga sensible al calor a partir de un fulminante.

Este sistema puede emplearse sólo bajo la supervisión estricta de personal con experiencia y entrenamiento en el uso de explosivos. Puede aplicarse en voladuras en las que el retardo prolongado entre la detonación de barrenos aislados no crea problemas. Cuando se requiere la explosión instantánea de la carga, como en voladuras de precorte, este sistema resulta inadecuado porque los tiempos de retardo que se obtienen con la mecha no son precisos.

#### a).- INTRODUCCION DE LA MECHA EN EL FULMINANTE

La mecha debe introducirse con cuidado hasta que haga contacto con la carga del fulminante. Es absolutamente necesario que la pólvora del núcleo de la mecha quede en contacto con la carga del fulminante. Nunca debe girarse la mecha cuando -

está en su sitio o introducirse con fuerza o violencia. Debe verificarse que los extremos de la mecha no estén húmedos. En caso de haber estado expuestos al aire un tiempo muy prolongado deberán cortarse y desecharse un mínimo de tres centímetros de cada extremo. También debe comprobarse que los fulminantes estén limpios y no sacarse de la caja hasta que vayan a ser usados. La mecha debe ser cortada perpendicularmente (fig 3.4) e insertada en el fulminante inmediatamente después del corte.

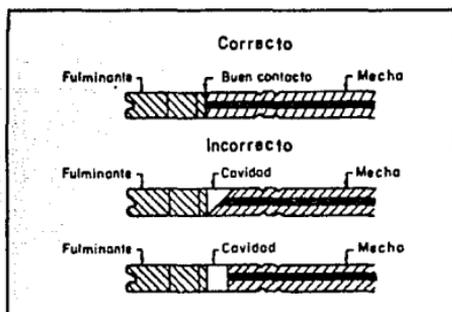


Fig 3.4 Mecha de seguridad y fulminante

Con la finalidad de fijar el fulminante a la mecha e impermeabilizar su extremo se hace una muesca con la misma herramienta con la que se corta la mecha (fig 3.5).

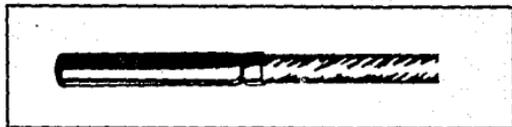


Fig 3.5 Fulminante asegurado a la mecha mediante una muesca

b).- CARTUCHO DE INICIACION O CEBO

El cartucho de iniciación consiste en un cartucho del explosivo que se está empleando dentro del cual se inserta un extremo de la mecha provisto del fulminante de la manera siguiente:

Se hace un agujero de 7 a 8 cm de longitud en el centro de uno de los extremos de un cartucho suficientemente largo que permita la inserción fácil del extremo de la mecha y con una profundidad tal que el fulminante quede aproximadamente al centro del cartucho.

Cuando la concentración de carga no es uniforme el cartucho de iniciación es más efectivo instalado con dirección hacia la zona más cargada del barreno y cerca de la boca de la perforación con el fulminante dirigido hacia el interior de la perforación. Cuando se trata de una voladura compuesta de una secuencia de cargas la posición más conveniente del cartucho -

con fulminante es el fondo del barreno para reducir el riesgo de dejar uno o más cartuchos sin explotar en el interior del barreno (fig 3.6).

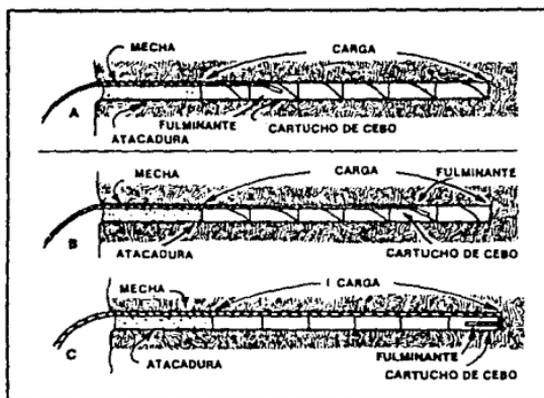


Fig 3.6 Colocación del cartucho de iniciación

El uso de la mecha con fulminante es común en barrenos de diámetro pequeño cargado con ANFO a granel. El extremo de la mecha provisto del fulminante se instala mediante el bastón de madera que sirve para el retacado a una distancia de 0.50 a 1.00 m del fondo de la perforación y se rellena posteriormente con el ANFO. Otra forma de colocación consiste en rellenar primero con ANFO un tramo de 0.50 a 1.00 m en el interior de la perforación, instalar el fulminante a esa profundidad y posteriormente rellenar la parte restante con ANFO.

c).- ENCENDIDO DE LA MECHA

El factor más importante del encendido de cargas independientes es el tiempo que debe disponer el personal para alcanzar un sitio seguro después de prender las mechas. Aunque se considera estándar una velocidad de quemado de 130 segundos por metro (46.15 cm/min), ningún fabricante garantiza esta velocidad en la práctica debido a las diversas condiciones a las que la mecha estará sujeta después de salir de la fábrica, incluyendo diferencias de altura, clima, almacenamiento, tipo de retacado y malos manejos. Bajo confinamiento, la velocidad de quemado puede incrementarse de 10 a 15%. Por lo anterior, es recomendable medir la velocidad de quemado de una muestra de cada rollo en el sitio de los trabajos.

Una medida de seguridad razonable para la voladura de cargas independientes consiste en emplear tramos de mecha con una longitud mínima de 1.50 m , que se quemarán aproximadamente en tres minutos.

Existen varios tipos de encendedores para mechas. Los cerillos no se recomiendan y nunca deben utilizarse antorchas o hisopos con gasolina o con otros derivados del petróleo, astillas de madera, rollos de papel o cigarrillos, porque son inseguros y lentos.

El núcleo de pólvora de la mecha se quema en el interior de su envoltura y la combustión del núcleo puede no ser visible después del chispazo inicial. Algunos tipos de mechas emiten humo a través de su forro a medida que se queman. La chispa que emite el extremo de la mecha en el momento de prender es de cerca de 5 cm de longitud, dura cuando menos un segundo y es seguida por desprendimiento de humo.

Entre los encendedores manuales se recomienda el empleo del de mecha de alambre caliente. Este dispositivo es similar en apariencia a una luz de bengala. Consiste en un alambre cubierto con un compuesto de ignición que se quema lentamente a una velocidad más o menos constante, desprendiendo un calor intenso. Este encendedor se activa con un cerillo y puede emplearse para prender la mecha poniendo en contacto la zona en combustión del encendedor con el extremo de la mecha.

Cuando las cargas son múltiples puede emplearse el sistema IGNITACORD. El IGNITACORD es un cordón de diámetro pequeño que se quema con una flama visible que es corta y muy caliente. El IGNITACORD tiene una velocidad de ignición bastante uniforme. Puede adquirirse en el mercado con una velocidad de quemado (rápida) de 10 a 16 segundos por metro, una (media) de 16 a 33 segundos por metro, que se utilizan cuando se tiene un gran número de barrenos o barrenos con espaciamientos grandes (más de 0.5 m) y otro con velocidad (lenta) de 52 a 66 -

segundos por metro que es más utilizado cuando los barrenos están cercanos.

Los conectores IGNITACORD son casquillos metálicos - que sirven para conectar la mecha al cordón IGNITACORD - - (fig 3.7). Contiene una carga pequeña de material combustible que prende con la flama del IGNITACORD y enciende a su vez a la mecha (fig 3.8).

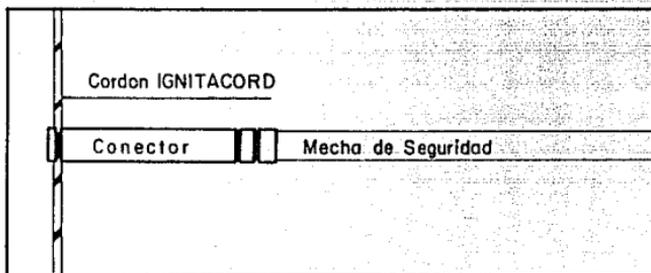


Fig 3.7 Conector entre mecha y Cordón IGNITACORD

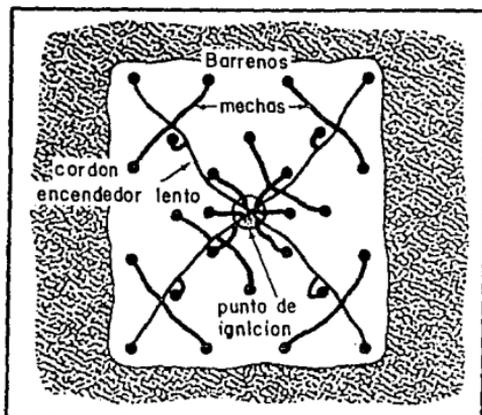


Fig 3.8 Ejemplo de anarre; entre IGNITACORD y mechas de seguridad

### 3.2.2.- INICIACION Y PERIODOS DE RETARDO CON CUERDA DETONANTE

#### a).- INICIACION CON CUERDA DETONANTE

La capacidad de una cuerda detonante para iniciar - otros explosivos depende en parte de la densidad del núcleo de PETN o del número de granos de PETN por unidad de longitud. Los cordones detonantes más ampliamente usados tienen 25 ó 50 granos de PETN por pie. Y tienen la energía de iniciación aproximada por lo menos igual a un fulminante del número 6 en cualquier punto a lo largo de su sendero de detonación, pudiendo -

iniciar productos sensibles al fulminante, se usan para:

- Detonar otro alto explosivo con el que entra en contacto.
- Transmitir una onda de detonación de cordón detonante a cordón detonante o a un detonador no eléctrico de retardo.

Los cordones detonantes son particularmente ideales para:

- Operadores quienes prefieren un sistema de voladura no eléctrico debido a que se pueden presentar corrientes extrañas potencialmente peligrosas.
- Voladuras de cargas múltiples sin retardo significativo entre las cargas (p.e., como se hace en voladura de precorte).

El cordón detonante es fácil de conectar en una voladura. La mayoría de los cordones detonantes detonan entre secciones empalmadas o unidas con seguridad mediante nudos apropiados, recomendados por los fabricantes.

Es importante que cada barreno tenga dos senderos por los cuales la detonación pueda alcanzarlo y amarres cruzados entre las líneas troncales a intervalos regulares lo suficientemente frecuentes para proporcionar una detonación positiva de la línea principal.

b).- CONECTORES MS

Estos conectores ofrecen el medio más conveniente para disparar voladuras con cordón detonante usando el método de retardos de intervalo corto sobre la superficie. Se acoplan en forma sencilla a la línea troncal entre los barrenos o los grupos de barrenos para dar una secuencia a la voladura en un orden predeterminado. Se fabrican con intervalos de retardo de 5, 9, 17 y 25 milisegundos. Las figuras 3.9, 3.10 y 3.11, muestran algunos trazos convencionales para voladuras de barrenos verticales de hilera sencilla e hilera múltiple con conectores MS.

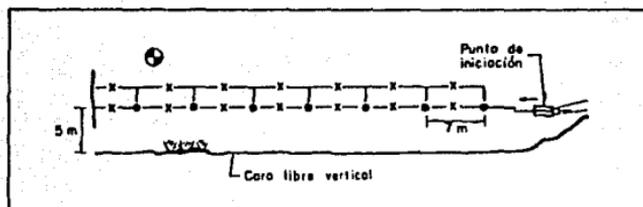


Fig 3.9 Voladura de una sola línea. Las x son conectores MS

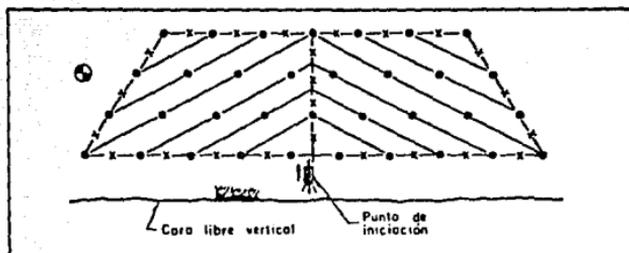


Fig 3.10 Voladura de varias líneas de barrenos disparada en secuencia e iniciada en el centro

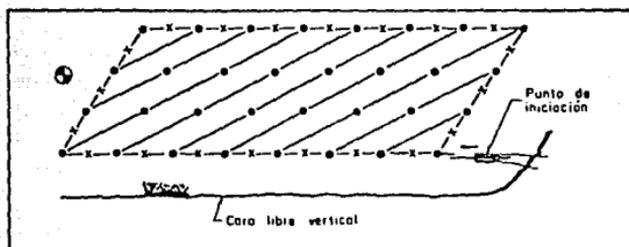


Fig 3.11 Voladura de varias líneas de barrenos disparada en secuencia e iniciada en un extremo

### 3.3.- SISTEMAS DE DETONACION ELECTRICOS

#### 3.3.1.- ELEMENTOS Y NORMAS GENERALES PARA INTEGRAR EL SISTEMA

Los sistemas eléctricos de detonación son circuitos -  
 que incluyen estopines eléctricos de iniciación y retardo que -  
 son activados por el paso de una corriente eléctrica de - -

intensidad suficiente.

El éxito de una voladura empleando un sistema eléctrico de detonación depende de la realización de las cuatro actividades siguientes:

- 1.- Selección y diseño adecuados del circuito de iniciación.
- 2.- Empleo de una fuente de energía compatible con el circuito seleccionado.
- 3.- Reconocimiento y eliminación de los riesgos de corrientes eléctricas extrañas.
- 4.- Balanceo del circuito, conexiones adecuadas y verificación completa del circuito.

La selección del circuito dependerá del número de estopines eléctricos a ser disparados y el tipo de operación. En general, un circuito de serie simple es usado en voladuras pequeñas consistentes de menos de 50 estopines eléctricos. Un circuito de series en paralelo es usado cuando un gran número de estopines eléctricos está implicado. Los circuitos paralelos se usan para simplificar el alambrado en algunas operaciones de tuneo y hundimiento de tiros que requieren trabajar con velocidad, permitiendo al responsable de la operación saber si todos los estopines están conectados adecuadamente a las líneas colectoras mediante una inspección visual.

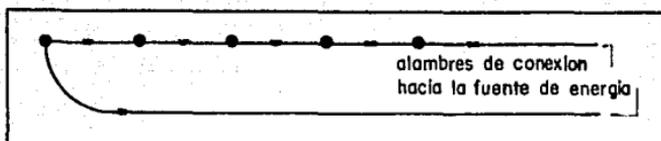


Fig 3.12 Circuito de serie simple

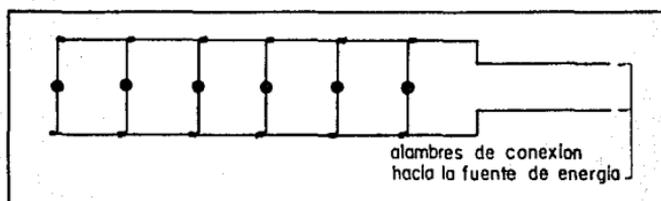


Fig 3.13 Circuito en paralelo

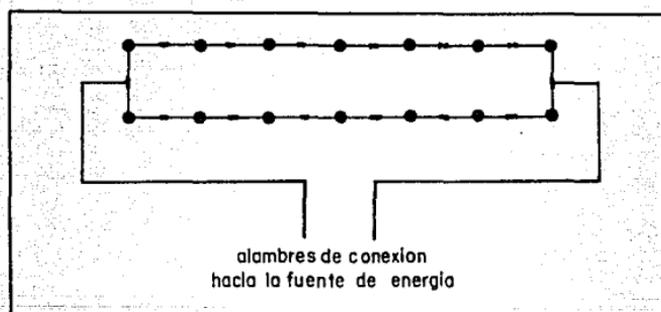


Fig 3.14 Circuito de series en paralelo

### 3.3.2.- REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE

El encendido simultáneo de un gran número de estopines eléctricos requiere de una corriente eléctrica de fuerza suficiente a fin de que llegue a todos los estopines en unos cuantos milisegundos.

### 3.3.3.- LINEAS GUIA Y LINEAS DE CONEXION

Las líneas guía o líneas de encendido son una parte esencial del circuito de voladura y deberán ser inspeccionadas, probadas y conservadas en buen estado para asegurar una voladura exitosa.

Se recomienda alambre de cobre de núcleo sólido, bien aislado de calibre 10 a calibre 14 para circuitos de serie y de serie en paralelo de tamaño normal.

Las líneas de conexión se forman con alambre de cobre número 16 a 20 con cubierta aislante y sirven para conexiones entre perforaciones y para conectar series individuales a las líneas guía.

### 3.3.4.- VERIFICACION DEL CIRCUITO

Un Multímetro, un Ohmetro o un Galvanómetro para -

voladuras pueden usarse para probar la continuidad y resistencia de los circuitos de voladura.

Para verificar el circuito es necesario calcular su resistencia teórica. La tabla 3.15 da la resistencia de los estopines eléctricos de Du Pont para alambre de cobre o hierro de varias longitudes. La tabla 3.16 da la resistencia por cada 1000 pies de alambre para diferentes tipos.

TABLA 3.15

Resistencia Nominal de los Estopines Eléctricos de Du Pont en Ohmios por Estopin					
Longitud del Alambre en Pies	Alambre de Hierro		Alambre de Cobre		Longitud del Alambre en Pies
	Estopines Instantáneos	Estopines de Retardo Tiempo	Estopines Instantáneos	Estopines de Retardo Tiempo	
4	1.26	1.16	2.10	2.00	4
6	1.34	1.24	2.59	2.49	6
7	—	—	2.84	—	7
8	1.42	1.32	3.09	2.99	8
9	—	—	3.34	—	9
10	1.50	1.40	3.59	3.49	10
12	1.58	1.48	4.09	3.99	12
14	1.67	1.57	4.58	4.48	14
16	1.75	1.65	5.08	4.98	16
20	1.91	1.81	6.00	5.98	20
24	2.07	1.97	—	—	24
30	2.31	2.21	—	—	30
40	2.15	2.06	—	—	40
50	2.42	2.32	—	—	50
60	2.69	2.59	—	—	60
80	2.71	2.61	—	—	80
100	3.11	3.01	—	—	100
120	3.51	3.41	—	—	120
150	4.11	4.01	—	—	150
200	5.12	5.02	—	—	200
250	6.12	6.02	—	—	250
300	7.13	7.03	—	—	300
400	9.13	9.03	—	—	400

\*A 68° Fahrenheit.

TABLA 3.16

Resistencia del Alambre de Cobre	
(AWG) CAA Calibre No.	Ohmios por 1,000 Pies
6	0.395
8	0.628
10	0.999
12	1.588
14	2.525
16	4.02
18	6.39
20	10.15
22	16.14

(AWG) CAA = Calibre de Alambre Americano      \*A 68° Fahrenheit

La resistencia de un circuito de una serie es igual a la resistencia de un estopín multiplicada por el número de estopines más la resistencia de las líneas guía y de conexión.

En un circuito de serie en paralelo, cada serie deberá ser balanceada eléctricamente en forma tal que cada serie tenga la misma lectura de resistencia en ohms.

En un circuito de series en paralelo balanceadas, la resistencia de una serie, dividida entre el número de series será igual a la resistencia total del circuito.

Para localizar una falla en el circuito con el galvanómetro o el óhmetro para voladuras, se procede como se muestra en la figura 3.17. Se conecta un extremo del circuito a la

terminal "A". Enseguida, se conecta otro alambre a la terminal "B". Entonces, con el extremo del cable que parte de la terminal "B" se toca una de las conexiones descubiertas de los estopines emplazados en alguno de los puntos intermedios del circuito. Si el instrumento da una lectura, el tramo de circuito, comprendido entre el punto probado y la terminal "A" está en buenas condiciones. De este modo, con el cable conectado a "B", deberán tocarse cada una de las conexiones hacia el extremo del circuito, hasta que el instrumento no registre ninguna lectura. En esta forma, se tendrá la certeza de que la falla estará entre los dos últimos puntos probados.

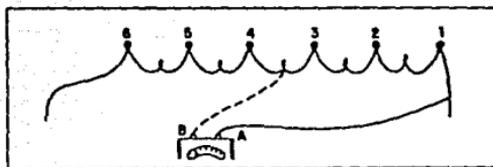


Fig 3.17 Método para detectar fallas en el circuito

#### 3.4.- VOLADURAS DE HILERAS MÚLTIPLES CON MICRO-RETARDO

##### 3.4.1.- PATRONES DE PERFORACION

Existen muchos patrones de barrenación pero los más frecuentes son el cuadrado, el rectangular y en tres bolillo -

(figs 3.18 a -3.20).

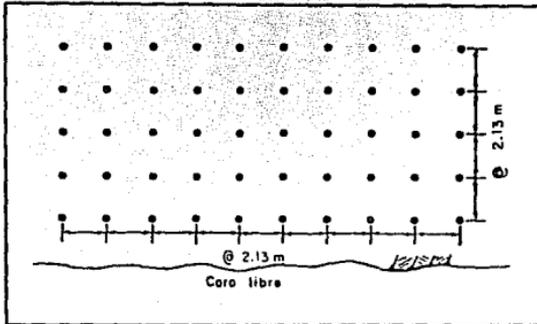


Fig 3.18 Patron de perforación cuadrado

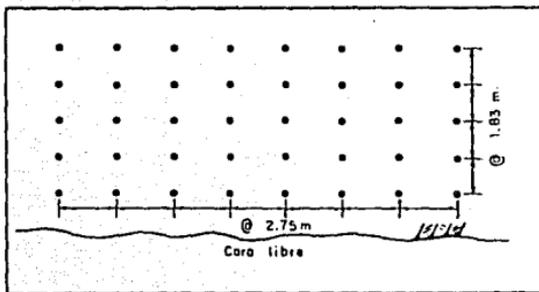


Fig 3.19 Patron de perforación rectangular

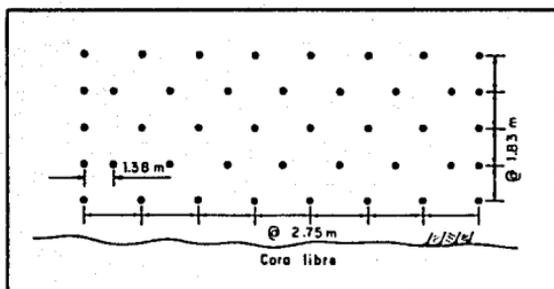


Fig 3.20 Patrón de perforación en tres bolillo

En cualquiera de los tres patrones de perforación las hileras de barrenos son paralelas al frente de explotación.

En el patrón en tres bolillo son a menudo necesarios barrenos adicionales en los extremos del banco para que las cargas queden uniformes.

#### 3.4.2.- DISTRIBUCION DE RETARDOS

En las siguientes figuras muestro algunas distribuciones de retardos con intervalos de 25 milisegundos. En ellas se indica el número de retardo y la dirección del movimiento de - las tronadas parciales.

Los periodos están distribuidos de manera que del -  
N<sup>o</sup> 1 al N<sup>o</sup> 8 el incremento es de 25 milisegundos; del N<sup>o</sup> 8 al -

Nº 15 de 50 milisegundos; y del Nº 16 al Nº 19 de 100 milisegundos (figs 3.21 a 3.25).

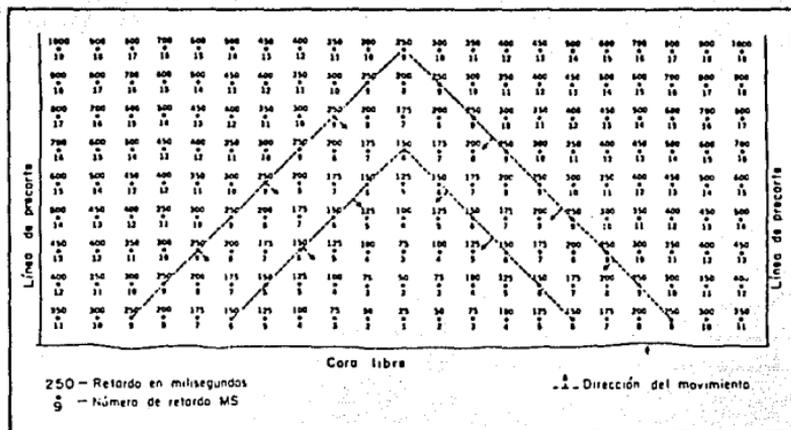


Fig 3.21 Distribución en "V" de nueve filas de veintidós barrenos cada una

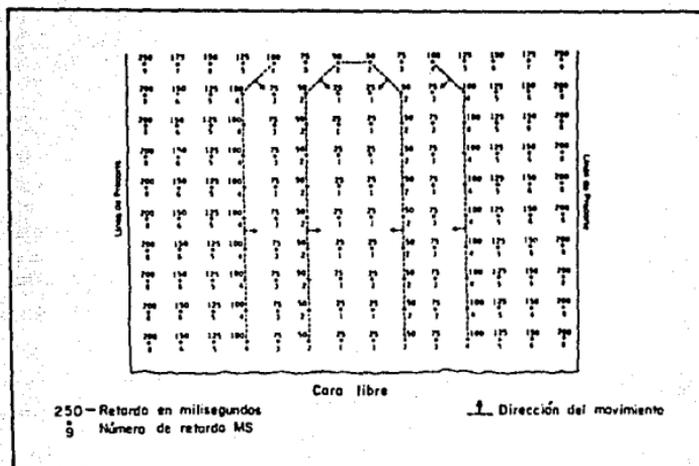


Fig 3.22 Distribución en canal

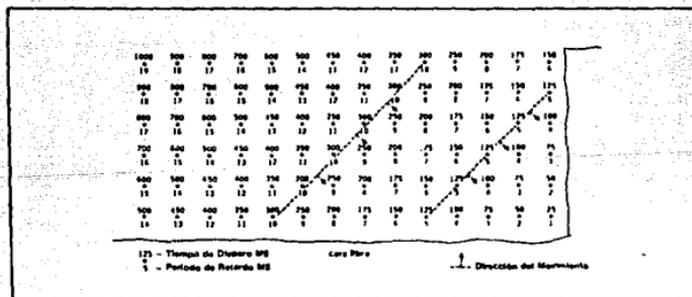


Fig 3.23 Distribución en escalera

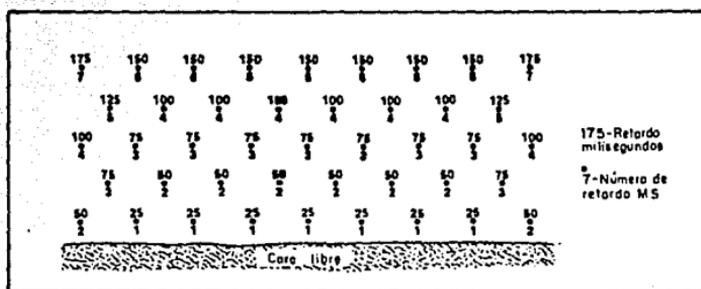


Fig 3.24 Distribución frontal

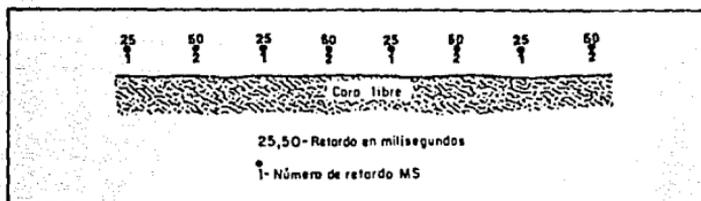


Fig 3.25 Primera fila de barrenos con períodos alternados

#### CAPITULO IV

#### USO DE LOS EXPLOSIVOS EN LA CONSTRUCCION DE ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS

Constantemente el Ingeniero Civil tiene la necesidad de efectuar el rompimiento de grandes masas de roca. Esta constante actividad que realiza se debe a lo imprescindible que es la roca en toda obra civil.

El uso de las rocas es frecuente dentro del campo de la construcción debido a las propiedades físicas y mecánicas - que las caracterizan.

En la construcción de estructuras de enrocamiento - tales como: rompeolas, escolleras, diques, espigones y tómbolos, se requieren rocas con características específicas como: densidad, durabilidad, tamaño y peso. Rocas que deberán extraerse - de canteras próximas a la obra portuaria, el procedimiento más económico es con el del uso de e x p l o s i v o s.

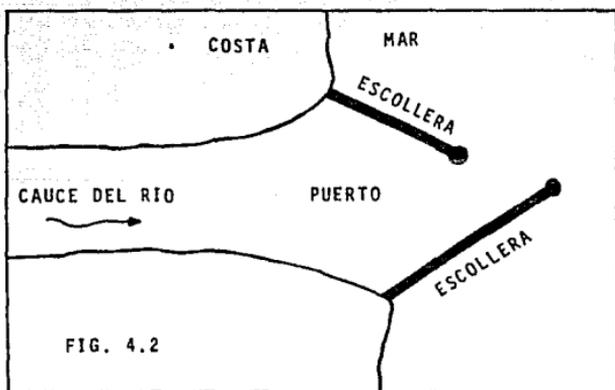
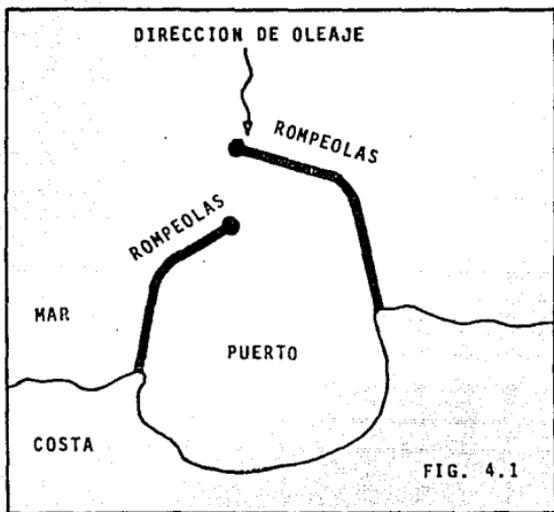
#### 4.1.- ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS

Un rompeolas es una estructura que sirve para reflejar y disipar la energía del oleaje evitando su incidencia sobre un área que se desea proteger.

Los rompeolas se construyen para crear puertos artificiales, haciendo seguras las maniobras y operaciones de las embarcaciones. A veces los rompeolas se construyen en el interior de grandes puertos para crear una zona de aguas tranquilas en donde se puedan realizar con facilidad las maniobras de carga y descarga de las embarcaciones, o para crear dársenas protegidas para el amarre de barcos pesqueros o de recreo.

A veces se construyen rompeolas aislados de la costa. Los conectados a la costa actúan como barreras contra el movimiento de materiales a lo largo de la playa causado por el oleaje, provocando azolve en un lado y erosión en el otro.

Una escollera es estructuralmente semejante a un rompeolas que se extiende dentro de un cuerpo de agua para dirigir y encauzar una corriente o flujo de marea, hacia un área determinada y evitar que el acarreo litoral azolve el canal. Las escolleras se localizan en la desembocadura de un río, boca de una laguna, boca de un estero o entrada a una bahía, para mantener y ayudar a profundizar el canal de navegación al provocar el arrastre de materiales hacia aguas más profundas. Las escolleras también protegen el canal de entrada contra oleajes y corrientes cruzadas. Por su localización particular el eje de las escolleras difícilmente puede ser perpendicular a la dirección del oleaje (fig 4.1 y 4.2).



ESCOLLERAS EN LA DESEMBOLCADURA DE UN RIO PARA EVITAR LA ENTRADA DE AZOLVE AL PUERTO

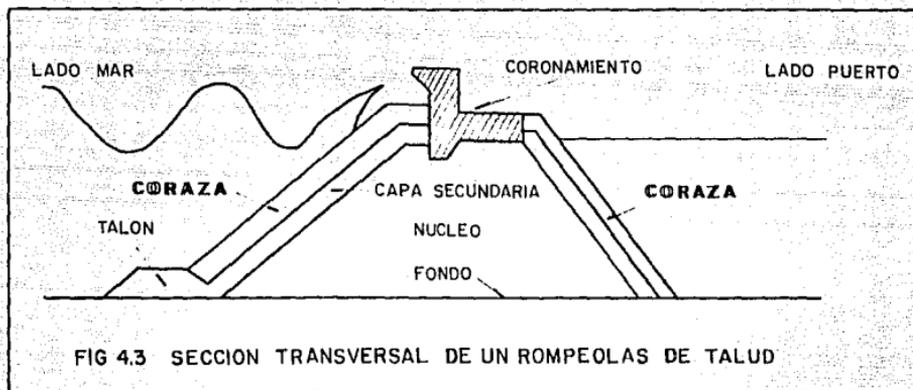
#### 4.1.1.- ROMPEOLAS DE TALUD

Las secciones transversales de forma trapezoidal de - estas estructuras se construyen con material pétreo como sigue:

Un núcleo de piedra de tamaños relativamente chicos - resultantes de la explotación de una cantera, colocada en forma masiva; una capa de piedra de tamaño intermedio y finalmente - una o dos capas de piedra grande colocada convenientemente. A esta última capa se le llama coraza y es la que resiste directa mente el ataque del oleaje, ver figura 4.3 . Cuando no se consigue piedra de los pesos necesarios, la coraza se forma con - elementos artificiales de concreto precolado como bloques, te-trápodos, tribarra, dom, dolos, etc. La característica princi-pal, en cuanto a funcionamiento, es que estas estructuras disi-pan la energía de la ola incidente provocando que la ola rompa en su talud causando sólo una reflexión parcial.

Aunque existen diferentes tipos de rompeolas, los de talud son los más numerosos en el mundo debido a:

- a) Con variación de la distancia de acarreo, siempre se consigue roca.
- b) Son relativamente fáciles de construir y reparar.
- c) Sólo sufren daños graduales a medida que son atacados por olas de mayor altura que las consideradas en el diseño.



M A T E R I A L

NUCLEO;	ELEMENTOS NATURALES
CAPA SECUNDARIA;	ELEMENTOS NATURALES O ARTIFICIALES DE CONCRETO
CORAZA;	ELEMENTOS NATURALES O ARTIFICIALES DE CONCRETO
TALON DE ATAQUE;	ELEMENTOS NATURALES O ARTIFICIALES DE CONCRETO
CORONAMIENTO;	CONCRETO COLADO "IN SITU" O PIEZAS PRECOLADAS

1977 JUN 20 10 55 AM  
 SALA DE LA BIBLIOTECA

Esta última consideración es de gran importancia, ya que generalmente no se dispone de toda la información necesaria para su diseño. Por otra parte al deteriorarse y quedar más tendidos los taludes, aumenta su estabilidad.

#### 4.1.2.- DIMENSIONAMIENTOS DE LOS ROMPEOLAS DE TALUD

Dos aspectos deben considerarse en el diseño de un rompeolas, y son: geometría y estabilidad de la sección transversal del rompeolas.

Esto nos conduce a considerar lo siguiente:

- a). Características del oleaje.
- b). Disponibilidad y características de los materiales de construcción.
- c). Procedimientos de construcción y equipo disponible.

Lo principal en el diseño de la sección de un rompeolas de talud es el cálculo de los pesos de los elementos naturales o artificiales que forman la coraza.

El diseñador deberá usar su buen juicio, para especificar el peso y forma de los bloques, la pendiente en que se debe tender la estructura, definir el método de construcción y anticiparse a predecir el porcentaje de formas y tamaños de

bloques que la cantera a explotar puede suministrar. Por ejemplo, en el caso de una coraza para un rompeolas, es poco significativo especificar roca de 20 ton y una pendiente de 1:2, -- (Vertical : Horizontal), si la disponibilidad de material con esta característica es mínima, mientras que para una pendiente de 1:3, el peso de los bloques se puede reducir al orden de las 10 ton, simplificando considerablemente la posibilidad que la cantera pueda suministrar bloques de este peso.

#### 4.2.- CONSTRUCCION DE ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS

La construcción de rompeolas y/o escolleras comprende las siguientes operaciones: obtención, transporte, elaboración y su utilización en la obra, de los materiales empleados.

##### 4.2.1.- MATERIALES

En la construcción de rompeolas y escolleras de talud, los materiales usados son los siguientes:

1. Fragmentos de roca de diferentes tamaños obtenidos por explotación de canteras.
2. Depósitos naturales de roca.
3. Elementos artificiales de concreto, tales como bloques, tetrápodos, dolos y otros.

#### 4.2.2.- OBTENCION DE MATERIALES

Los materiales naturales empleados en la construcción de rompeolas, fundamentalmente son: agregados para concreto y rocas que se obtienen de bancos. A los bancos de donde se obtiene la roca, se les llama pedreras.

En las pedreras, la roca se obtiene mediante el uso de explosivos y equipo diverso como son: compresores de aire y su equipo adicional, perforadoras, gruas, palas mecánicas, tractores, cargadores frontales, etc.

La explotación de una cantera para obtener los materiales de los pesos y proporciones requeridos, es un trabajo especializado. La longitud, separación y diámetro de los barrenos deberán ser tales, que las "tronadas" produzcan el mayor porcentaje de material utilizable, especificado.

Solamente se puede hacer una explotación correcta de una cantera, si se cuenta con el equipo apropiado para tronar, rezagar, manejar, clasificar y cargar la roca de acuerdo con los tamaños requeridos para la construcción de la obra.

#### c).- T R A N S P O R T E

Los medios de transporte de materiales utilizados en

la construcción de rompeolas de enrocamiento son por agua, por ferrocarril y por carretera, o la combinación de ellos. Cuando se utiliza el transporte por agua, se emplean chalanes y remolcadores o empujadores. Si es por ferrocarril, se emplean plataformas. Cuando es por carretera, se procura emplear los vehículos permitidos de mayor capacidad.

En cuanto al costo del transporte en orden creciente resulta: por vía marítima o fluvial, por ferrocarril y por carretera. En cuanto a la velocidad o rapidez el orden se invierte.

#### 4.2.4.- EJECUCION

El equipo empleado será en número, capacidad y de las características que aseguren que la obra se realice de acuerdo con el proyecto, las especificaciones y el programa de trabajo.

El equipo fundamental para colocar la piedra en la obra, son las gruas de la capacidad y alcance necesarios, para manejar la piedra de las distintas capas como lo indique el proyecto, las que podrán moverse sobre orugas, sobre vías de ferrocarril o montadas sobre chalfón.

Los chalanes llevan la piedra sobre su "cubierta" o dentro de sus compartimientos. Si la piedra va sobre "cubierta"

su descarga y colocación se hace con grua o Bulldozer que va en la misma "cubierta".

Si la piedra se lleva en los compartimientos del chalan, la descarga y colocación en su sitio se hace abriendo las compuertas de fondo.

#### 4.3.- BANCOS DE MATERIAL DE ENROCAMIENTO PARA ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS

Para el diseño de rompeolas y otras estructuras marinas, donde se utilizará roca natural como material de enrocamiento, no solamente será necesario realizar una investigación exhaustiva sobre el clima, oleaje y otras consideraciones marinas, sino que también, de la disponibilidad y cantidad necesarias de material para el proyecto.

Por otro lado será necesario realizar una evaluación económica sobre la producción y suministro a un sitio determinado, pero sin olvidar las características de densidad, durabilidad y tamaño individual de fragmentos, indispensables para estos fines.

#### 4.4.- ORIGEN Y CLASIFICACION DE ROCAS

Todos estamos familiarizados con la roca, el más co-

mún de los materiales de la tierra; y es bien sabido que la roca firme aflora a la superficie de la tierra, o yace bajo una delgada cubierta de suelo o de escombros sueltos.

Las rocas son el producto de una formación geológica, muy duras y resistentes, son compuestos formados por uno o varios minerales.

Se presentan en la naturaleza en forma de grandes bloques monolíticos, diferenciándose así de las piedras que son bloques individuales, masas o fragmentos que han sido extraídos de sus yacimientos naturales.

Para clasificar las rocas se cuenta con varios procedimientos pero el más importante es el que se refiere a su origen. De acuerdo con él, las rocas pueden ser: ígneas, sedimentarias o, metamórficas.

#### 4.4.1.- ROCAS IGNEAS

Las rocas ígneas, son aquellas que han sido formadas por la solidificación de un magma sobre o a cierta profundidad debajo de la superficie terrestre.

Los magmas son masas de roca fundida dentro de la corteza terrestre.

Se distinguen dos tipos de formaciones ígneas, las extrusivas y las intrusivas. Las primeras se forman a partir del magma que sale a la superficie libre y allí se extiende en capas más o menos regulares. Las formaciones intrusivas no llegan hasta la superficie. El magma en presión sale hasta la corteza terrestre, llenando las fisuras o bolsas que va encontrando, siguiendo formaciones de gran tamaño llamadas plutones.

#### 4.4.2.- ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias son rocas que han sido formadas por la consolidación de sedimentos.

Los sedimentos que darán origen a un tipo de roca sedimentaria están constituidos por partículas derivadas de la desintegración de rocas preexistentes.

En contraste al proceso de formación de las rocas ígneas, las rocas sedimentarias se forman a temperaturas y presiones que prevalecen en o cerca de la superficie terrestre.

Las características de las rocas sedimentarias dependen de factores tales como: fuente o fuentes de los sedimentos, el agente erosivo o transportador y la manera en que la roca se consolida. Posteriormente sus propiedades se modifican por los esfuerzos a que queda sometida, que la fracturan y la deforman

y por la influencia de fenómenos como son: el metamorfismo y el intemperismo.

Una característica estructural importante en la mayoría de las rocas sedimentarias, es la estratificación o disposición en capas. La estratificación de las rocas sedimentarias tiene una gran importancia en cuanto a las propiedades de la roca en conjunto, que interesan para su aprovechamiento.

#### 4.4.3.- ROCAS METAMORFICAS

Las rocas metamórficas son aquellas que han sufrido modificaciones a causa del proceso llamado metamorfismo.

El metamorfismo puede definirse en forma general, como cualquier cambio físico o químico en una roca. Sin embargo el término se restringe a cambios profundos que involucran una nueva cristalización o nueva textura en las rocas.

El metamorfismo en las rocas puede variar de ligero a extremadamente fuerte. Las rocas que muestran cambios poco profundos no se clasifican como metamórficas.

El fenómeno del metamorfismo es producido principalmente por altas temperaturas y por intensos esfuerzos. También

puede ser producido por el efecto de aguas termales, de gases, o de otros agentes de menor escala.

Las características generales de las rocas metamórficas, incluyen una estructura bandeada y una textura en la que se tiene un intercrecimiento y un entrelazamiento de los cristales.

Los tipos de roca que generalmente tienen aplicación en estado natural en la construcción de rompeolas, son los siguientes:

Rocas Igneas Intrusivas..... Granito

Diorita

Rocas Igneas Extrusivas..... Riolita

Andesita

Basalto

Toba

Brecha volcánica

Rocas Sedimentarias..... Calizas

Travertino

Arenisca

Conglomerado

Brecha

Rocas Metamórficas..... Gneis

#### 4.5.- EXPLORACION DE BANCOS

La secuencia a seguir durante una investigación para localizar el sitio más idóneo y desarrollar una cantera para - explorar material de enrocamiento, en particular para rompeolas y/o escolleras, podría ser la siguiente:

##### 4.5.1.- RECONOCIMIENTO

Esta fase preliminar de investigación deberá realizar se fácilmente por un geólogo. Será necesario, antes que nada, recabar la bibliografía existente de la región de estudio, - - mapas, fotografías aéreas, informes y conocimiento de proyectos históricos.

Con esta información, se podrán establecer las regiones con mayores posibilidades.

Una vez decidido que sitio presenta las mejores posibilidades, se realiza una visita de reconocimiento, tanto local como regional, de la zona en cuestión.

Una segunda etapa consistirá en llevar a cabo un levantamiento geológico y de esta forma establecer la calidad,

magnitud y potencialidad de los bancos de roca.

La cartografía deberá incluir los detalles siguientes:

- 1.- Tipo de litología, resistencia, tamaño de granos, cementación, densidad, porosidad, etc.
- 2.- Tipos de discontinuidades: número de familias, frecuencias, orientación, espaciamiento, continuidad y abertura, etc. En este caso, la frecuencia de las discontinuidades definirán en gran medida la potencialidad del tamaño de los bloques; la orientación definirá los frentes de explotación y la estabilidad de taludes.
- 3.- Grado de intemperismo. Se deberá definir el espesor y naturaleza del material de despalme. El espesor del despalme influye directamente sobre los costos de explotación y acarreo. Por otro lado, la profundidad del intemperismo afecta de manera sustancial el suministro de bloques grandes.
- 4.- Condiciones del nivel de agua. En las canteras, el nivel freático, la permeabilidad de las rocas y el drenaje natural afecta a las operaciones. Estos factores pueden llegar a afectar la vida útil de una determinada cantera, ya que el bombeo o el desvío, puede ser costoso.

5.- Acceso. La cantera deberá contar con un acceso adecuado entre éste y la construcción.

6.- Muestreo y pruebas de Campo y Laboratorio. Deberá realizarse un muestreo adecuado para que a su vez, las pruebas que se realicen sean representativas de las condiciones del sitio.

#### 4.5.2.- INVESTIGACIONES DETALLADAS

Basados en una información preliminar y reconocimiento de campo, se deberá realizar una investigación más profunda y detallada de los sitios con mejores perspectivas. Esta etapa de investigación deberá contemplar los siguientes proyectos de estudio:

1.- Programa de perforación. En base a la cartografía geológica, deberá realizarse un programa de perforaciones con recuperación continua de núcleos. De esta forma, será posible atestiguar la continuidad de las rocas adecuadas.

2.- Programa de Exploración Geofísica. Por medio de un estudio geofísico utilizando el método de refracción sísmica será posible determinar el espesor del material de despalme, el material intemperizado que cubre a la

roca de buena calidad y las características físicas de elasticidad de los materiales.

- 3.- Pruebas de Voladura. Aun con un conocimiento detallado con respecto al patrón de discontinuidades, es posible que los bloques de roca no se formen exclusivamente a lo largo de las juntas, ya que hasta cierto punto son dependientes del arreglo y carga de las voladuras. Frecuentemente, es difícil predecir con certeza el tamaño de los bloques de roca que una posible cantera pudiera suministrar, sin antes haber realizado pruebas de voladuras,

#### 4.6.- ACONDICIONAMIENTO DEL BANCO Y VIAS DE ACCESO

Dentro de los trabajos para la construcción de rompeolas, se deben contemplar las actividades correspondientes a la explotación de la pedrera. Dicha actividad comprende las actividades siguientes: desmonte, despirme, despate, barrenación, poblado de barrenos, tronada o voladura, amacice y apalancamiento (después de cada tronada) y manejo del material derrumbado para su clasificación y acopio, lo que incluye el retiro del desperdicio.

Además, en la construcción de una obra de enrocamiento, dependiendo de su magnitud y de las condiciones propias de

su ubicación. Algunas obras requieren la obtención del permiso para transitar por el camino y así llevar el material del banco a la obra y realizar los trabajos necesarios para mejorar las condiciones de dicho camino. Entendiéndose de antemano que de no existir éste, será necesario su construcción.

Si el caso lo amerita, se construirán ramales y espuelas de ferrocarril para el transporte del material. Las puntas de las vías deben llegar a los frentes de ataque debiéndose también contar con el patio de vías correspondiente. Lo anterior tiene que ser autorizado para su construcción y operación, por Ferrocarriles Nacionales de México.

Otro de los trabajos preliminares de suma importancia, es el transporte de la maquinaria de construcción al lugar de la obra, que incluye las maniobras de desmontaje, carga, descarga y montaje de las máquinas, que por su tamaño o peso no es posible acarrearlas en un solo viaje de trailer; requiriendo todo esto de un tiempo e inversión considerable.

Solamente después de que se hayan preparado el o los frentes de la pedrera, se puede comenzar la explotación para obtener los materiales en los tamaños requeridos. Lo anterior se logra por medio del despate, entendiéndose por éste, todos aquellos trabajos necesarios para derrumbar la roca por medio de voladuras hasta formar el frente o los frentes de ataque, --

sensiblemente verticales. Pero cuando el frente de la cantera es demasiado alto, se opta por dividir esa altura por medio de balcones.

No debe olvidarse, dentro de las actividades de acondicionamiento del banco, la construcción de los polvorines para almacenar y guardar explosivos. Estos polvorines deben cumplir con las disposiciones vigentes de seguridad, tanto por lo que hace a su ubicación como por lo que se refiere a los materiales que se utilicen en su construcción.

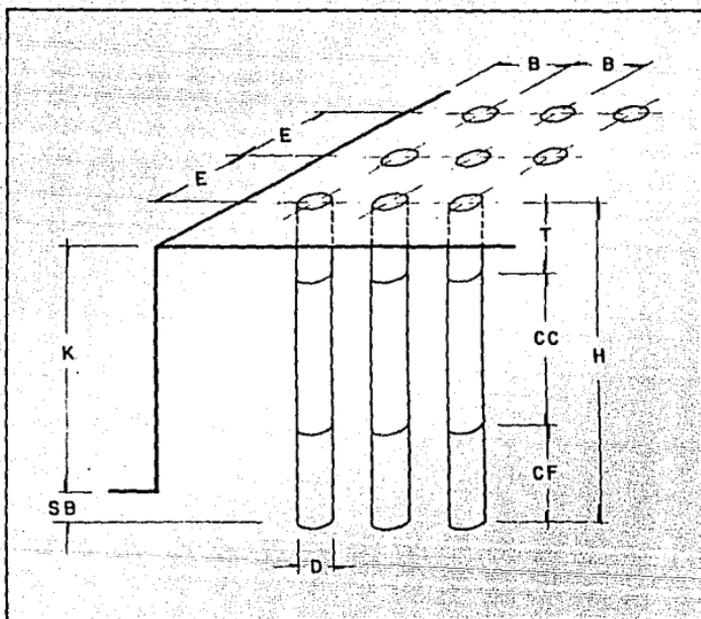
Además se deben habilitar patios, de superficie suficiente para realizar las maniobras de clasificación y carga de la piedra y para depositar los materiales de rezaga; así como - para almacenar los ejemplares pétreos de acuerdo con los requerimientos de la obra. Estos patios deben estar comunicados con la construcción por medio de un camino de acceso que, como se mencionó anteriormente, es uno de los trabajos previos a la explotación del banco.

Otra de las obras preliminares que deben realizarse con oportunidad, es la instalación de la báscula o básculas requeridas para registrar el peso del material útil aplicado al proyecto; éstas deben instalarse lo más cerca posible a la localización del mismo y en la ruta de los vehículos que transporten el material para los enrocamientos.

#### 4.7.- TECNICAS DE EXPLOTACION

##### 4.7.1.- GENERALIDADES

- a).- Esquema y Simbología empleada en las voladuras de bancos, con barrenos verticales.



B = Bordo; separación frontal (línea de menor resistencia)

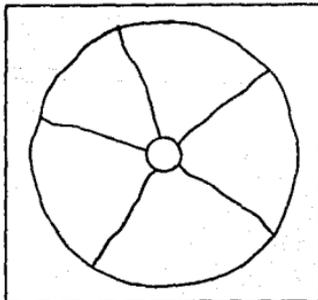
E = Espaciamiento entre barrenos

- H = Profundidad de los barrenos  
K = Altura del banco  
SB = Sub-Barrenación (perforación bajo el piso)  
CF = Carga de Fondo  
CC = Carga de Columna  
T = Taco (tapón)  
D = Diámetro efectivo del barreno

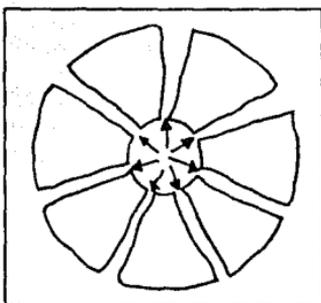
b).- Proceso destructivo del explosivo al ser detonado dentro de un barreno.

El proceso destructivo del explosivo se lleva a cabo en dos etapas a saber:

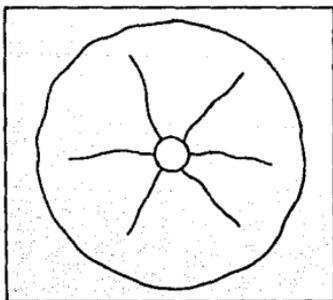
La primera: Consiste en un agrietamiento en forma radial al barreno producida por la onda de choque, siendo la longitud de las grietas función del tipo de explosivo, cantidad y características de la roca.



La segunda: Consiste en la expansión de los gases, -  
los cuales al introducirse en las grietas formadas -  
por la onda de choque, producen un efecto de cuña que  
tiende a separar las fracciones de roca.



Si la línea de grietas logran salir a la periferia, -  
se produce el efecto mencionado, pero si las grietas  
no llegan al exterior, los gases escapan por el pro-  
pio barreno sin efectuar ninguna acción exterior.



c).- Los ángulos naturales de fractura que cabe esperar como promedio en un caso general se indican en la figura 4.8 a y b, en los dos principales casos que hay que considerar: el primero con fondo libre, y el segundo con fondo encerrado.

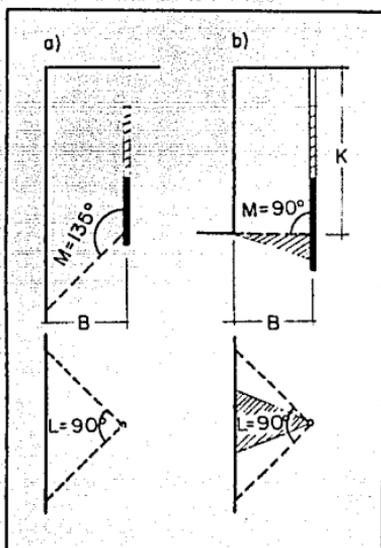


Fig 4.8 Ángulos naturales de rotura con cara libre;

a) fondo libre, b) fondo encerrado;

$K$ , altura del banco;  $B$ , bordo

En ambos casos el ángulo de fractura  $L$  será de unos

90° o más. Con fondo libre, el ángulo  $M$  en la parte inferior será de unos 135°. Si el fondo está encerrado, como en el caso de un banco ordinario, la rotura en el fondo debe continuar la otra superficie y el ángulo puede oscilar entre 90 y 135°, dependiendo de la carga y profundidad del barrenos.

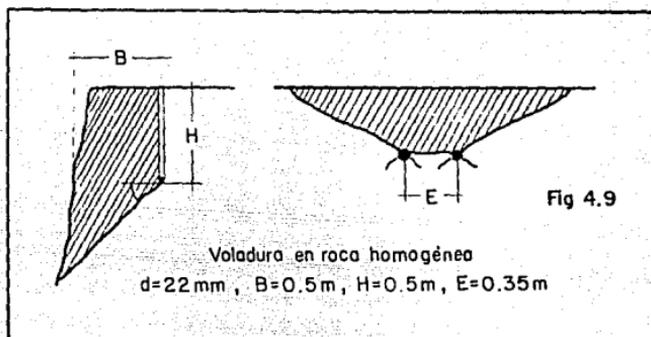
Si el cálculo de la carga es correcto, el ángulo del fondo será de 90°, pudiéndose encontrar ángulos más pequeños - solamente en circunstancias especiales y entonces únicamente se producen con menores ángulos de fractura, como se indica en la sección sombreada de la figura 4.8 - b.

La formación de grietas en las voladuras de una o más filas de barrenos dependerá grandemente de la relación entre el bordo y el espaciamiento y también de si la ignición tiene lugar simultáneamente o con un cierto retardo.

En una tronada, simultáneamente (fig 4.9) sale un bloque entero siguiendo los mismos ángulos característicos de rotura. El bloque no se fragmenta si la carga es dimensionada únicamente para la rotura y si la distancia entre los barrenos (espaciamiento) es menor que el bordo.

Esto no ocurre si el tiempo de detonación de las diferentes cargas varía algo, ya que en tal caso, cada barrenos debe arrancar individualmente su parte de bordo. Ello retrasa el -

lanzamiento, pero aumenta el desprendimiento del bordo. Esta es una de las principales razones de la obtención de una buena fragmentación con las voladuras de retardo corto.



d).- Ley de Concordancia o Conformidad

Cuando una carga (Q), situada encima de una roca homogénea, detona, presiona la zona bajo ella y trocea la roca alrededor formando un cráter de profundidad (d) y diámetro (L). Si se repite tal experimento aumentando uniformemente la carga Q, el cráter de acuerdo con Broberg, aumentará también en todas las direcciones en la misma proporción que la ampliación lineal de la carga, o sea:

$$\frac{Q_1}{L_1^3} = \frac{Q_2}{L_2^3}$$

Donde  $Q_1$  y  $Q_2$  son las cargas que corresponden a los diámetros  $L_1$  y  $L_2$  del cráter.

Esto quiere decir que si la longitud, anchura y altura de carga son aumentados en un cierto factor  $b$  (es decir, el volumen de la carga multiplicado por un factor  $b$ ), el diámetro y profundidad del cráter vendrá aumentando por el mismo factor  $b$ .

Una consecuencia de lo anterior es que la carga por  $m^3$  ( $q$ ) es constante para cada roca y explosivo sin importar el tamaño de la voladura.

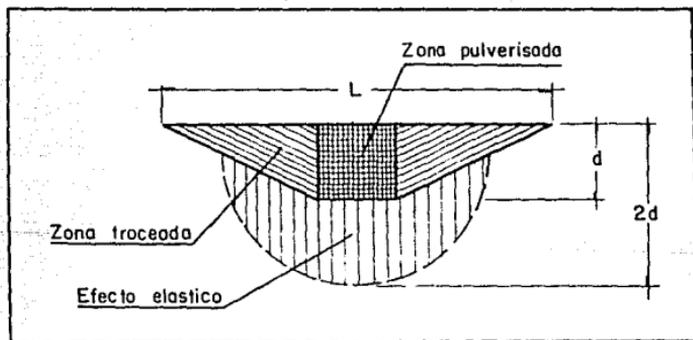


Fig 4.10 Efecto de las cargas extremas (según Broberg)

#### 4.7.2.- FACTORES QUE DETERMINAN LAS CARACTERISTICAS DE LA VOLADURA

En la construcción de rompeolas, es necesario obtener material de enrocamiento de diferentes pesos y volúmenes de acuerdo a los datos de proyecto. Los elementos que con frecuencia presentan un mayor grado de dificultad en relación con su obtención son los que corresponden a la coraza; ya que éstos, al ser de gran tamaño, están restringidos por las características geológicas de la pedrera y a la técnica de voladura empleada; por consiguiente, es recomendable que todas las voladuras tengan como objetivo la obtención de roca para coraza en primer término.

Los resultados obtenidos en las voladuras de roca, son una función de todas las variables que intervienen en ella, dichas variables, podemos dividir las en tres grupos de factores que son los que las generan, y son:

- A) Características del material por volar.
- B) Características del explosivo seleccionado.
- C) Características de las magnitudes geométricas calculadas.

Estas son de gran importancia para los cálculos de voladuras, ya que nos definen la carga explosiva en calidad y cantidad, para cualquier tipo de trabajo por desarrollar.

#### A).- CARACTERISTICAS DEL MATERIAL POR VOLAR

La geología del material por extraer es el factor más importante para determinar el diseño total de la voladura. Es por ello que los elementos de más consideración en la fracturación y el procedimiento de los cortes y flanqueos son: la cantidad y orientación de las estratificaciones, fisuras, fallas, deslizamientos y formación geológica de la roca por volar.

Cuando la estratificación consiste de vetas delgadas y horizontales, la roca generalmente puede quebrarse y ser fragmentada adecuadamente dando tamaños de bordos y espaciamentos relativamente largos de acuerdo al espesor de la veta y con un consumo bajo de explosivos. Por el contrario, si la formación es masiva con solo unas cuantas laminaciones, requerirá de bordos y espaciamentos bien planeados y un consumo correctamente calculado de explosivos.

En las siguientes figuras se presentan en forma general los posibles casos de posición de los estratos.

Cuando los estratos tienen un cierto grado de inclina

ción, generalmente es ventajoso desarrollar la cara de la cantera con un ángulo no menor de  $45^\circ$  y de preferencia  $90^\circ$ , con regpecto a la estratificación. Frecuentemente la dirección del desarrollo no es un factor controlable y la cara debe desarrollarse paralela a los estratos (fig - d). En este tipo de desarrollo los bordos y espaciamientos deben ser reducidos, y la barenación deberá ser en ángulo para que coincida con el de la laminación; lo cual debe considerarse muy seriamente.

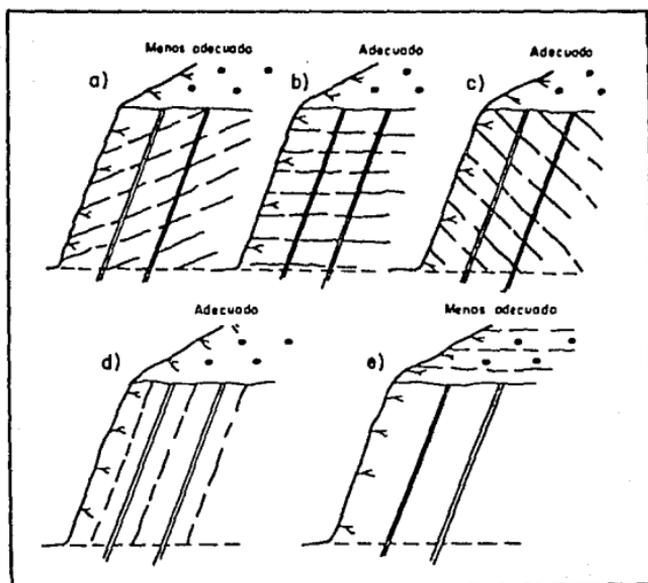


Fig 4.11 Frentes de explotación en medios estratificados

Se observa, por lo anterior, que las recomendaciones proporcionadas tienden a una mayor fracturación de la roca. Es por esto que para la obtención de elementos de roca de gran tamaño se debe considerar lo siguiente: la estratificación del banco debe presentar una formación masiva con solo unos cuantos planos de falla, la separación de los estratos deberá ser ligeramente mayor al tamaño de la roca que se espera extraer.

Los bordos y espaciamentos calculados serán relativamente grandes, con un consumo bajo de explosivos.

La fragmentación es importante en una voladura, ya que con ella obtenemos el producto del tamaño necesario para su aplicación en diversos trabajos, como son: la alimentación de equipos de trituración, cortes para caminos o vías de ferrocarril, obtención de roca para rompeolas, etc.

Ya que no es posible obtener la fragmentación en forma y tamaños matemáticos, siempre es importante hacer la voladura de la roca de acuerdo con las necesidades del proyecto.

El proceso de fragmentación de la roca ocurre en un tiempo relativamente corto ya que va desde 5 hasta 15 milisegundos. El proceso de movimiento, sin embargo, es completamente diferente. Mediciones en canteras han demostrado que la roca quebrada se mueve a una velocidad relativamente lenta de

50 a 100  $\frac{\text{pies}}{\text{seg}}$  (15.24 a 30.48 m/seg), mientras que la mayor parte del proceso de fragmentación se completa en unos cuantos milisegundos. A una velocidad de 15 a 30 m/seg, la roca quebrada se mueve solo de 15 cm a 30 cm en 10 milisegundos. Este tiempo largo de movimiento juega un papel significativo en el diseño de la voladura para obtener la fragmentación deseada.

Esta situación hace suponer que para obtener una menor fragmentación (roca de mayor tamaño), los disparos con retardo de milisegundo no son muy recomendables para este tipo de trabajos, optándose entonces por los disparos instantáneos y de ser posible, de una sola fila, ya que la fragmentación está en función además, de los siguientes factores:

- 1.- Condiciones de la roca (fisuras, estratos, fallas, etc.)
- 2.- Carga y barrenación específicas, calculada y diseñada.
- 3.- Características y propiedades del explosivo seleccionado.
- 4.- Distribución de la carga y dimensiones del taco.
- 5.- Diseño de la voladura.
- 6.- Altura del banco, número de filas por tronar y condiciones de límite de la voladura.

Para hacer un cálculo correcto de la carga necesaria para una voladura, se requiere conocer con la mayor exactitud la resistencia específica de la roca a ser tronada (S). Esta

resistencia está representada por una constante "c", referida a un explosivo de 40% de potencia o un hidrogel de 700 cal/gr , para que nos permita un margen de rotura satisfactorio.

De acuerdo con los datos obtenidos por Langefors, pue de utilizarse en la mayoría de las operaciones de voladuras, - una constante de roca  $c = 0.4 \text{ kg/m}^3$  , por lo que muchas veces no es necesario efectuar pruebas para obtener este valor.

Se estima que para rocas comunes en México, el valor de "c" oscila entre 0.2 y  $0.6 \text{ kg/m}^3$ .

Valores de la constante "c" para algunas rocas conocidas

TIPO DE ROCA	CONSTANTE DE LA ROCA (c)
ANTRACITA	0.36
ARENISCA	0.46
BASALTO	0.62
CALIZA	0.40
CALCITA	0.36
CARBON BITUMINOSO	0.30
CUARZO	0.62
DIAMANTE	0.86
DOLOMITA	0.44
ESQUISTOS	0.53
FELDESPATO	0.57

TIPO DE ROCA	CONSTANTE DE LA ROCA (c)
GNEIS	0.54
GRANITO	0.48
HORNSTENO	0.59
LUTITA	0.38
MAGNETITA	0.50
MARMAL	0.36
MICA	0.28
PIZARRA	0.38

Además de la fragmentación, se debe considerar la proyección del material a volar; ésto es, el movimiento que desarrolla la roca al ser lanzada por el explosivo y que se mide entre el centro de gravedad del prisma de roca volada y el centro de gravedad del montón producido por la voladura (fig 4.12).

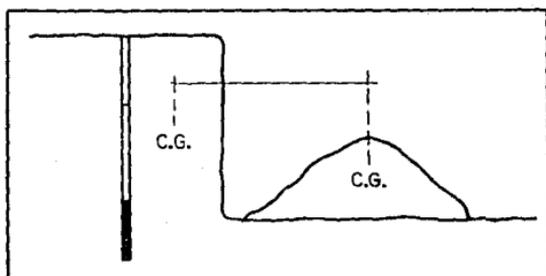


Fig 4.12

Esta proyección se puede controlar y se puede estimar de antemano, no así la proyección de algunos pequeños fragmentos que en muchos casos se deben a fugas de los gases del explosivo por las fisuras. Dichos fragmentos alcanzan de 5 hasta 10 veces la distancia de la masa principal.

Se puede reducir grandemente este lanzamiento, usando detonadores con retardo de milisegundos y con una secuencia de disparos que corresponda a las características mecánicas de la roca.

Por ejemplo, cargando con una cantidad menor de explosivos la fila del fondo o respaldo de la tronada y la fila del frente, para que estas dos masas de roca sean tronadas primero, obstruyendo el lanzamiento de las filas intermedias.

En la obtención de roca para coraza en la construcción de rompeolas, es necesario obtener una fragmentación mínima, aunque relativamente la proyección sea mucho menor. El método de voladura que nos proporciona estas características, es el que se inicia por ignición instantánea. El cálculo de la proyección debe efectuarse tomando como base la carga límite.

A continuación se indica la relación entre el exceso de carga y la distancia de lanzamiento en tronadas efectuadas con disparos instantáneos, en una sola fila de barrenos - -

paralelos al frente del banco, por lo que su fractura es libre.

Tabla 4.13

Exceso de Carga (%)	0%	35%	55%	70%	80%
Distancia de Lanzamiento de la masa principal de la roca en metros	0	7	12	14	22

Para los cálculos necesarios en la obtención de roca de gran tamaño, se debe considerar que la cantidad de explosivo está destinada sólo al desprendimiento de la roca, por lo que - el exceso de carga y la distancia de lanzamiento de la masa - principal del material volado debe ser igual a cero.

#### B.- CARACTERISTICAS DEL EXPLOSIVO SELECCIONADO

Las características que el explosivo debe tener para ser utilizado en la explotación de roca de gran tamaño, son las siguientes:

- 1.- Dado que los trabajos de explotación de bancos generalmente se realizan en condiciones secas, las características por resistencia al agua no se requieren, - pudiéndose utilizar agentes explosivos y excitadores

de baja densidad.

- 2.- La velocidad de detonación del explosivo, que es uno de los factores que actúan directamente en la fracturación de la roca, debe ser baja, alrededor de - - 2000 m/seg hasta 5000 m/seg en los excitadores y - menores en los agentes explosivos, y de 400 m/seg hasta 900 m/seg en las pólvoras, cuando éstas llegan a utilizarse. Las cantidades varían de acuerdo a la - dureza de la roca principalmente.
- 3.- La densidad necesaria fluctúa de  $0.8 \text{ gr/cm}^3$  en los - agentes explosivos, hasta  $1.35 \text{ gr/cm}^3$  en los explosivos, los cuales deben tener una energía de entre los 700 a 900 cal/gr .
- 4.- Estos no requieren de una alta sensibilidad ni es importante su emisión de gases, ya que los trabajos se realizan a cielo abierto.

C).- CARACTERISTICAS DE LAS MAGNITUDES GEOMETRICAS  
CALCULADAS

El cálculo de voladuras considera una serie de parámetros indispensables para el mejor aprovechamiento del explosivo y de los equipos de barrenación, dicho cálculo debe formar -

parte del proyecto general de la obra.

A continuación se mencionan las características de las magnitudes geométricas necesarias, así como sus respectivas fórmulas de cálculo.

#### CARGA DE FONDO

Es el peso de explosivos que contendrá la longitud del fondo del barreno y se calcula como una carga concentrada, ya que generalmente se coloca la mayor cantidad posible de explosivos en el fondo para poder arrancar con un diámetro determinado de barreno, el mayor volumen de roca.

La ecuación que define la carga de fondo de barrenos múltiples disparados instantáneamente cuando se da la relación óptima  $E/B = 1.3$ , es:

$$Q_f = (f/s) (1.1 E/B) (0.07 B^2 + S B^3)$$

Donde:

$Q_f$  = Carga de fondo en kg .

$f$  = Factor de constricción o confinamiento (en tronadas con barrenos verticales y de fondo confinado en el piso del banco, se consiera  $f = 1$ ).

$s$  = Potencia del explosivo (de 35% o su equivalente - en otro explosivo; 700 cal/gr ,  $s = 1$ ).

$E$  = Espaciamiento entre barrenos en m .

$B$  = Separación frontal de los barrenos, medida con - respecto al bordo libre del banco en m .

$S = c$  = Resistencia específica de la roca a ser tronada (comúnmente se emplea el valor de  $0.4 \text{ kg/m}^3$  , - siendo más aconsejable determinar este valor en - función de  $(c)$  ).

La siguiente ecuación proporciona la carga de fondo - para barrenos múltiples, pero solo cuando se sabe que la longitud de fondo es  $h_f = 1.3 B$  y  $(K)$  mayor que  $(2B)$ :

$$Q_f = (1.3 B) p (d_f / 32)^2$$

Donde:

$p$  = Grado de atacado del explosivo en  $\text{kg/dm}^3$  .

$d_f$  = Diámetro de fondo en mm .

De las fórmulas anteriores, se hace notar que la carga de fondo no es más que el producto entre la longitud de fondo y la carga de fondo por metro lineal, esto es:

$$Q_f = h_f (l_f)$$

Donde:

$h_f$  = Altura de fondo en m .

$l_f$  = Carga de fondo por metro lineal, en kg/m .

#### CARGA DE COLUMNA

Es la carga o peso del explosivo que se aloja sobre la carga de fondo y su cálculo para barrenos múltiples disparados instantáneamente cuando se da la relación óptima  $E/B = 1.3$  es:

$$Q_c = (f/s) (0.32 E/B) (K/B - 2) (0.07 B^2 + SB^3)$$

Donde:

$K$  = Altura del banco en m .

$Q_c$  = Carga de columna en kg .

Cuando se conoce la longitud de la columna y ( $K$ ) es mayor que ( $2B$ ), puede aplicarse la siguiente expresión:

$$Q_c = h_c p (d_f/32)^2$$

Donde:

$h_c$  = Altura de la columna en m .

$d_f$  = Diámetro de fondo en mm .

Como la carga de columna es el producto entre la longitud de columna y la carga de la misma por metro lineal se tiene:

$$Q_c = h_c (l_c)$$

Donde:

$h_c$  = Altura de columna en m .

$l_c$  = Carga de columna por metro lineal, en kg/m .

#### CARGA TOTAL DE BARRENO

Es la carga o peso de los explosivos que contendrá el barreno y se calcula, para barrenos múltiples con explosivos de la misma potencia en la columna y en el fondo, por medio de la siguiente expresión:

$$Q_t = (f/s) (E/B) (0.8 Q_{t_a})$$

$$Q_{t_a} = (K + 1.5B) 0.4 (0.07B + SB^2)$$

Donde:

$Q_t$  = Carga total del barreno en kg .

$Q_{t_a}$  = Carga total del barreno, para un barreno aislado en kg .

Una forma más simple de obtener la carga total, es por medio de la suma de las dos cargas que la componen.

$$Q_t = Q_f + Q_c$$

Esta fórmula puede utilizarse para barrenos cargados con diferentes explosivos en el fondo y en la columna, o bien, para barrenos cargados con un mismo explosivo.

#### CARGA DE FONDO Y DE COLUMNA POR METRO

Estas son las cargas o pesos de los explosivos que se logran depositar en un metro de longitud de fondo o en un metro de longitud de columna, respectivamente.

Para determinar la carga de explosivo por metro de fondo en barrenos múltiples tronados instantáneamente, se hace uso de la siguiente expresión:

$$l_f = (1.1/s) (0.07B + SB^2)$$

Donde:

S = c = Resistencia específica de la roca a ser tronada (comúnmente se emplea el valor de  $0.4 \text{ kg/m}^3$ ).

s = Potencia del explosivo (de 35% o su equivalente en otro explosivo;  $700 \text{ cal/gr}$ ,  $s = 1$ ).

Otra modalidad que proporciona resultados semejantes a la ecuación anterior, cuando (K) es mayor que (2B) y ( $h_f$ ) sea igual a (1.3 B), es la siguiente:

$$l_f = p (d_f/32)^2$$

Donde:

p = Grado de atacado del explosivo en  $\text{kg}/\text{dm}^3$  .

$d_f$  = Diámetro de fondo en mm .

La carga del explosivo por metro de columna, para barrenos múltiples disparados instantáneamente se obtienen por medio de las siguientes expresiones:

$$l_c = (0.4/s) (0.07B + SB^2)$$

pero si (K) es mayor a (2B) y  $h_f = 1.3 B$  ; se tiene:

$$l_c = p (dc/32)^2$$

Cuando un barreno vertical tiene su carga de fondo confinada en el piso del banco se recomienda que ésta, por metro de fondo, sea 2.7 veces mayor que la carga por metro de columna, o sea,  $l_f = 2.7 l_c$ ; en esta forma se logra una rotura en ángulo recto con relación al eje del barreno. Pero cuando el barreno vertical no tiene su carga de fondo confinada en el

piso del banco, la relación es  $l_f = 2.0 l_c$ .

El confinamiento del fondo está referido a una subprofundidad de (0.3 B). En este caso el factor de confinamiento - se considera  $f = 1$ , siendo la magnitud de la carga directamente proporcional a este factor.

#### SEPARACION FRONTAL MAXIMA (BORDO)

Dado que la separación frontal máxima de los barrenos está en función de la carga por metro en el fondo del barreno y de su altura, de la potencia relativa del explosivo, de la constante de la roca, del grado de fijación o confinamiento y del espaciamiento entre barrenos, la expresión que se utiliza para calcular dicho bordo es:

$$B_{\text{máx}} = ( (0.9 \text{ s/f S}) p (d/32)^2 - (0.07 \text{ B/S}) )^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

B = Bordo calculado en m .

p = Grado de atacado del explosivo en  $\text{kg/dm}^3$  .

S = Constante de la roca en  $\text{kg/m}^3$

f y s son adimensionales (confinamiento y potencia del explosivo).

$$(d/32)^2 = \text{mm}^2$$

Debe tenerse cierta incertidumbre al aceptar el máximo valor obtenido, ya que éste puede estar excedido a lo que en la realidad se necesita, y por consiguiente en la práctica, es recomendable reducir este valor procurando tener un índice de seguridad en dicha reducción.

#### DIAMETRO DE LOS BARRENOS

El diámetro de los barrenos no ejerce por sí mismo ninguna influencia en la cantidad de carga de fondo, necesaria para el arranque, obteniéndose en el caso de un mayor o menor diámetro, idéntica fuerza rompedora con la misma cantidad de explosivo, siempre que la altura de carga no exceda de (0.3B).

En forma semejante, puede esperarse que la fuerza rompedora permanezca inalterada en un taladro uniforme con una variación moderada en su diámetro, siempre que se conserve la concentración de carga por metro, pudiendo aplicarse esto mientras la densidad de la carga no descienda mucho por debajo de  $1 \text{ kg/dm}^3$  (2 kg/m en un barreno de 2 pulgadas de diámetro).

La cantidad de carga por metro en el fondo del barreno solo decide, en consecuencia, la magnitud del bordo que puede volarse.

Para una altura de banco de 10 m, se aconseja usar -

barrenación entre 60 y 80 mm . Para  $K = 20$  m ; entre 120 y -  
160 mm , para  $K$  menor que 6 m ; entre 36 y 48 mm , donde la mí-  
nima barrenación será de 30 mm para perforadoras de mano.

#### 4.7.3.- ALGUNAS CONSIDERACIONES PARA EL CALCULO DE LA VOLADURA

Las fórmulas escritas anteriormente proporcionan buenos resultados si se toman en cuenta además, las variaciones de algunos de los parámetros. Dichas variaciones son provocadas - principalmente por las características del material a volar, - del explosivo y de la roca que se desea obtener. A continuación se mencionan algunas de estas consideraciones:

- La distribución de la carga afecta el poder de la rotura, una carga de fondo alargada tendrá menos efecto que si estuviera concentrada en él.

Para alturas pequeñas de carga de fondo, el efecto de - rotura es doble que cuando está alargada, es decir, que el efecto es inversamente proporcional al tamaño de la carga.

- Dado que el aumentar la altura de la carga de fondo más allá de  $h_f = B$ , no incrementa el poder de la rotura, se opta por prolongar la perforación abajo de la profundi-

dad de proyecto; lográndose con esto un total rendimiento de la carga. A este incremento en la perforación se se denomina sub-barrenación (SB), recomendándose que ésta sea de  $SB = 0.3 B$ , obteniéndose una ganancia en el poder de rotura de hasta un 50%.

- La altura de la carga de columna está dada por la expresión:

$$h_c = (K + SB) - T - h_f$$

Pero sólo si se sabe que:  $h_f = 1.3 B$ ;  $T = B$ ;  $SB = 0.3 B$

Sustituyendo queda:

$$h_c = K + 0.3 B - B - 1.3 B$$

$$h_c = K + 0.3 B - 2.3 B$$

Por lo tanto:

$$h_c = K - 2 B \quad (\text{esta ecuación sólo es válida para un } K/B \text{ mayor que } 2 \text{ y un } h_f = 1.3 B)$$

- La fragmentación de la roca está en función directa con

el incremento de la altura del banco (K) en relación al bordo (B), siempre que  $(K/B)$  sea mayor que 2. Pero para obtener roca de gran tamaño, es necesario aumentar las dimensiones del bordo, sin afectar la altura del banco. En este caso, la relación  $(K/B)$  será menor o igual a 2, por lo que ahora  $(h_f)$  no puede ser igual a  $(1.3 B)$ , optándose entonces en proponer un valor  $(h_f)$ , donde  $0.35 B$  y  $1.35 B$ , son los valores mínimo y máximo que puede tomar  $(h_f)$ ; siempre que haya una sub-barrenación  $S_b = 0.3 B$  considerando a la vez que si  $(h_f)$  disminuye,  $(h_c)$  aumenta y por consiguiente la fragmentación es mayor; en forma contraria, si  $(h_f)$  aumenta,  $(h_c)$  disminuye y la fragmentación es menor. Estableciéndose entonces que  $(h_f)$  es inversamente proporcional a la fragmentación, pero sin que  $(h_f)$  sea mayor a  $(h_c)$ .

- Cuando los barrenos son profundos o largos, el bordo (B) y el espaciamiento (E) deberán dimensionarse en base a la carga de columna necesaria y no a la carga de fondo, lográndose con esto, incrementar (B) hasta un 50%.
- Teniendo un diámetro de barrenos constante se puede modificar el bordo con la ayuda del espaciamiento, cambiando la relación  $(K/B)$  esto puede lograrse alterando el espaciamiento de forma que  $(B/E)$  permanezca constante. Desde el punto de vista de la fragmentación, hay un límite en

la variación del espaciamiento que es cuando (E) tiene un valor mayor o igual a (1.3 B). Para valores considerablemente mayores la rotura es aceptable, pero desigual, en el caso de valores mucho más pequeños se obtiene una pared de roca más uniforme y una menor fragmentación (bordo mayor que espaciamiento), pero la proyección puede ser excesiva.

- Cuando es necesario obtener determinada fragmentación y determinado lanzamiento, necesitamos disponer de cierta carga en exceso, para la carga de columna.

En la tabla siguiente se proponen porcentajes prácticos del exceso de carga para la columna, cuando el barreno se encuentra cargado con carga sólida hasta un nivel (B = T) por debajo del nivel del terreno.

Tabla 4.14

K / B	2	3	4	5	6
EXCESO DE CARGA EN %	0	35	55	70	80

Es posible reducir estos excesos de carga aumentando el bordo, para que la relación K/B disminuya y disminuya también el porcentaje de exceso de carga. Si se to

ma esta alternativa hay que saber que al aumentar la separación frontal del barreno, debe aumentarse también la carga de fondo; podemos lograr esto con cualquiera de las siguientes opciones:

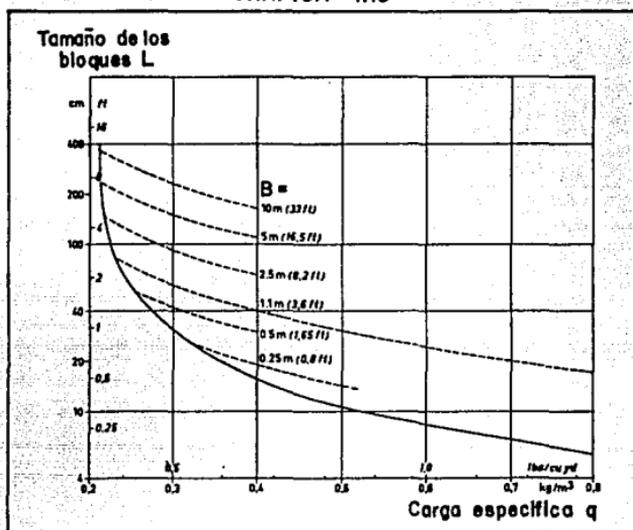
- a) Utilizando un explosivo más potente.
- b) Utilizando cartuchos de mayor densidad.
- c) Aumentando el grado de atacado del explosivo (práctica más común).

No sucede lo mismo en una fragmentación mínima, que es lo que se busca para obtener material de enrocamiento para rompeolas, donde al aumentar el bordo (B), la carga de fondo permanece constante y en algunos casos se reduce, dependiendo esto último del tipo de roca a volar.

- Para valores de bordo (B) entre 1 y 10 m , prácticamente la carga específica necesaria para una voladura con buena fragmentación es alrededor de  $400 \text{ gr/m}^3$  . Y para una voladura donde la premisa sea obtener roca de gran tamaño, la carga específica es de alrededor de  $200 \text{ gr/m}^3$  , suficiente solo para fracturar la roca.

La gráfica 4.15 proporciona la relación entre la longitud media de los bloques y la carga específica ( $\text{kg/m}^3$ ), para diversos valores de (B) en voladuras de hileras múltiples con micro-retardo y altura del banco  $K = 3 B$  .

GRAFICA 4.15



- La magnitud de la carga es directamente proporcional, -  
al factor de confinamiento (f).

En tronadas con barrenos verticales y de fondo confinado en el piso del banco, se considera  $f = 1$ .

La tabla 4.16 proporciona el factor de constricción para diferentes inclinaciones del barreno con respecto al plano de su base.

Nótese que dicho factor es inversamente proporcional al grado de inclinación de los barrenos.

Tabla 4.16

INCLINACION DEL BARRENO	PARA BARRENOS VERTICALES	3 a 1 (70°aprox)	2 a 1 (65°aprox)	FONDO LIBRE
Banqueo, una hilera de barrenos	1	0.9	0.85	0.75
Rebaje, una hilera de barrenos	0.8	0.7	0.65	0.6

Asimismo, el factor de constricción decrece con el incremento del bordo (B) ya que el peso propio de la roca incrementa relativamente la rotura por caída.

- De lo anterior se observa, que en los barrenos inclinados es posible aumentar el valor del bordo (B), y al hacerlo se reduce el número de metros lineales de barrenación por  $m^3$  de roca tronada. Por consiguiente, en el cálculo de la voladura se contempla por medio del factor de confinamiento (f), el grado de inclinación de los barrenos a volar.
- Dado que el grado de retacado (p), es la cantidad de carga en  $kg/cm^3$  del volumen nominal del barreno y que puede ser de 5 a 15% menor que el volumen real; este retacado es algunas veces mayor que la densidad verdadera

del explosivo en el barreno, por lo que se tiene la siguiente expresión:

$$I = p (d/36)^2$$

Donde:

I = Cantidad de carga por metro de barreno

d = Diámetro del barreno en mm

p = Grado de retacado

Sin embargo, generalmente se recomienda un retacado de 1 a 1.4 si se carga con atacador, y de 1.3 a 1.6 si se carga por medios neumáticos.

#### 4.7.4.- EJEMPLO

Se desea explotar un banco que suministre material de enrocamiento para la construcción de la Coraza de un rompeolas.

Los datos de proyecto para este tipo de rocas son los siguientes:

- a) Bloques macizos y homogéneos
- b) Rango de peso de 5 a 10. ton

Como el material de enrocamiento es una caliza con peso volumétrico de  $2.6 \text{ ton/m}^3$  tenemos:

- c) Rango de tamaño de 1.20 a 1.60 m
- d) Rango de volumen de 1.90 a  $3.80 \text{ m}^3$

Se trata de un banco con un frente libre, sensiblemente vertical, fondo confinado en el piso y altura de 11.00 m

El explosivo utilizado será de 700 cal/gr y el grado de retacado dentro del barreno de  $1.4 \text{ kg/dm}^3$ .

Por recomendación, se propone un diámetro de barrenos de 4" y una inclinación de los mismos de 33%.

## Resumen de Datos:

$K = 11.00$  m (altura del banco)

$S = 0.40$  kg/m<sup>3</sup> (resistencia específica de la caliza)

$s = 1.0$  (potencia del explosivo, 1.0 por ser de  
700 cal/gr)

$f = 0.9$  (factor de confinamiento, 0.9 por tener fondo -  
confinado e inclinación de los barrenos de 33%)

$p = 1.4$  kg/dm<sup>3</sup> (densidad del explosivo dentro del barre  
no)

$\phi = 4"$  (diámetro del barreno, 4" por recomendación).

## Solución:

Debido a que el tamaño de la roca que se desea obtener es de 1.60 m , la carga específica a utilizar será aquella que solo fracture el material, sin que ésta produzca lanzamiento alguno.

Esto es:

Si  $L = 1.60$  m ; implica que  $q = 0.20$  kg/m<sup>3</sup>

además si el lanzamiento es igual a cero; implica que el exceso de carga en la columna sea igual a cero.

Dadas estas condiciones se tiene que:

$$\frac{K}{B} = 2$$

Entonces:

$$B = \frac{k}{2} = \frac{11 \text{ m}}{2} = 5.5 \text{ m}$$

$$T = B = 5.5 \text{ m}$$

Como  $K = 2B$ ;  $h_f$  no puede ser igual a  $1.3 B$ , ya que no que daría espacio para alojar la carga de columna. Por otro lado  $h_f$  tiene que ser mayor o igual a  $h_c$  pero nunca menor a  $0.35 B$  teniendo siempre una sub-barrenación igual a  $0.3 B$ .

Por lo tanto:

$$SB = 0.3 B = 0.3 (5.5\text{m}) = 1.65 \text{ m} .$$

Si se propone que  $h_f = 0.9 B$

$$h_f = 0.90 (5.5\text{m}) = 4.95 \text{ m}$$

$$h_c = (K + SB) - (T + h_f) = (11 \text{ m} + 1.65 \text{ m}) - (5.5 \text{ m} + 4.95 \text{ m})$$

$$h_c = 2.2 \text{ m}$$

como  $K = 2B$ , las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$l_f = (1.1/s) (0.07B + SB^2)$$

$$l_f = (1.1/1.0) \cdot 0.07 (5.5m) + 0.4 \text{ kg/m}^3 (5.5m)^2 = 13.7 \text{ kg/m}$$

$$l_c = (0.4/s) (0.07B + SB^2)$$

$$l_c = (0.4/1.0) \cdot 0.07 (5.5m) + 0.4 \text{ kg/m}^3 (5.5m)^2 = 5.0 \text{ kg/m}$$

$$Q_f = l_f (h_f) \cdot f$$

$$Q_f = 13.7 \text{ kg/m} (4.95m) \cdot 0.9 = 61.0 \text{ kg}$$

$$Q_c = l_c (h_c) \cdot f$$

$$Q_c = 5.0 \text{ kg/m} (2.2m) \cdot 0.9 = 10.0 \text{ kg}$$

$$Q_t = Q_f + Q_c$$

$$Q_t = 61.0 \text{ kg} + 10.0 \text{ kg} = 71.0 \text{ kg}$$

Dado que para obtener roca de 1.60 m se necesita una carga específica  $q = 0.2 \text{ kg/m}^3$ ; tenemos:

$$q = \frac{Q_t}{EBK} ; E = \frac{Q_t}{qBK}$$

$$B = \frac{71.0 \text{ kg}}{0.2 \text{ kg/m}^3 (5.5m) (11.0m)} = 5.9 \text{ m} = 6.0 \text{ m}$$

Esta es la carga que suministra fragmentos de roca de 1.60 m aproximadamente.

Verifiquemos que el valor del bordo calculado no exceda el valor del bordo máximo recomendado.

$$B_{\text{máx}} = \left[ (0.9 S/f_s) p(d_f/32)^2 - 0.07 (B/S) \right]^{1/2}$$

$$B_{\text{máx}} = \left[ 0.9 \frac{1}{0.9 (0.4)} 1.4 \left( \frac{102}{32} \right)^2 - 0.07 (5.5/0.4) \right]^{1/2}$$

$$B_{\text{máx}} = 5.96 \text{ m} \approx 6.0 \text{ m}$$

$B_{\text{máx}} > B_{\text{calculado}}$  . es correcto

Si el cálculo que hemos desarrollado no proporcionara los resultados esperados en la práctica, se tendrá que proceder a realizar modificaciones en los parámetros que afecten dichos resultados. Para ello se hace necesario realizar algunas pruebas de voladura antes de determinar un diseño definitivo de la misma.

## CAPITULO V

TECNICAS DE VOLADURAS EMPLEADAS PARA EVITAR  
LA SOBRE-EXCAVACION

A través de los años se han buscado y ensayado muchas maneras para minimizar el sobrerrompimiento o sobreexcavación - más allá de la línea designada para las áreas de la excavación principal.

Por razones de seguridad, el rompimiento excesivo es inconveniente cuando produce taludes, bordos, frentes o pendientes inestables y es también inconveniente cuando la excavación excede la "línea de pega" pues esto implica concreto extra y los taludes fracturados requieren un mantenimiento costoso.

El éxito de estas técnicas, depende principalmente de la geología de la formación rocosa que se esté explotando. En roca dura y masiva estas técnicas de voladuras son generalmente exitosas.

Estas técnicas no son una panacea. Los taludes deben diseñarse de acuerdo con la naturaleza de la roca. Al utilizar cualquiera de los métodos descritos se recomienda efectuar pruebas conservadoras para determinar si el método puede aplicarse exitosamente y de ser así, establecer los espaciamientos óptimos entre barrenos.

Varias técnicas de voladuras se utilizan para reducir el sobrerrompimiento y tienen un objetivo en común: disminuir y distribuir mejor las cargas explosivas para reducir al mínimo los esfuerzos y la fractura de la roca más allá de la línea de excavación deseada.

Por muchos años la barrenación en línea fue la única técnica para controlar el sobrerrompimiento, a través de los años modificaciones a esta técnica han provocado la introducción de otros términos tales como: precorte, voladuras suaves, voladuras de escultura, voladuras amortiguadas y voladuras perimetrales.

Las técnicas de voladuras descritas en el párrafo anterior se agrupan en cuatro categorías: (1) barrenación en línea; (2) voladuras amortiguadas; (3) voladuras suaves; (4) pre-corte.

Algunas de las técnicas antes mencionadas tienen aplicación tanto en trabajos subterráneos como a cielo abierto.

A continuación se mencionará su aplicación de cada una de ellas en trabajos a cielo abierto, así como sus ventajas y limitaciones bajo varias condiciones.

## 5.1.- VOLADURA CON BARRENACION EN LINEA

### a).- PRINCIPIO

La voladura con barrenación en línea involucra una so la hilera de barrenos de diámetro pequeño, poco espaciados, sin carga y a lo largo de la línea misma de excavación. Esto proporciona un plano de menor resistencia hacia el cual la voladura primaria pueda romper. También origina que parte de las ondas de choque creadas por la voladura sean reflejadas, lo que reduce la trituración y las tensiones en la pared terminada.

### b).- APLICACION

Los agujeros de la barrenación en línea generalmente son de 1 1/2" a 3" de diámetro y se separan a 2 o 4 veces el diámetro del agujero a lo largo de la línea de excavación. Los barrenos mayores de 3" se usan poco con este sistema pues los altos costos de barrenación no pueden compensarse suficientemente con mayores espaciamentos.

La profundida de los barrenos depende de que tan perfectamente puedan mantenerse éstos. Para obtener buenos resultados, los barrenos deben quedar en el mismo plano. Cualquier desviación en ellos, al tratar de barrenar más profundamente tendrá un efecto desfavorable en los resultados. Para barrenos

de 2" a 3" de diámetro, las profundidades mayores de 9 metros son raramente satisfactorias.

Los barrenos de la voladura directamente adyacentes a los de la barrenación en línea, se cargan generalmente con menos explosivos y también más cortamente espaciados que los - - otros barrenos. La distancia entre los agujeros de la barrenación en línea y los más próximos (cargados), es usualmente del 50 al 75% del bordo normal. Práctica común es la de reducir los espaciamientos laterales entre barrenos adyacentes cargados, en el mismo orden con un 50% de reducción en la carga explosiva. Los explosivos deberán quedar bien distribuidos en el barreno, utilizando para ello divisiones y cordón detonante.

La barrenación en línea es la más indicada para formaciones homogéneas en donde los planos de estratificación, las fallas y las vetas son mínimas. Las irregularidades son planos naturales de debilidad que tienden a provocar el rompimiento a través de los barrenos en línea hasta llegar a la pared terminada. Por lo tanto, las formaciones sedimentarias con estratificación fina y las metamórficas foliadas no son adecuadas para la barrenación en línea para control del sobrerrompimiento, a menos que la barrenación pueda efectuarse perpendicularmente a la dirección de la formación. Esto, sin embargo, no es práctico en la mayoría de los trabajos de excavación.



ella se considera una separación media entre barrenos de 3 veces el diámetro.

Tabla 5.2

Rendimiento comparativo promedio de la barrenación en línea con diferentes diámetros de perforación

Diámetro del Barreno (pul)	Espaciamiento (pies)	Equipo Supuesto	Rendimiento Horario de Barrenación (m/hr)
4	1.00	PERFORADORA SOBREPISO	7.50
3 1/2	0.88		9.70
3	0.75		12.50
2 1/2	0.63		15.60
2	0.50	PERFORADORA DE PISO	7.00
1 3/4	0.44		9.00
1 1/2	0.38		12.00

c).- VENTAJAS

La barrenación en línea es aplicable en lugares donde aún cargas explosivas ligeras, en combinación con otras técnicas de voladuras empleadas para controlar la sobreexcavación, - pueden causar daño más allá del límite de la excavación.

Cuando se utiliza con otras técnicas de voladuras empleadas para controlar la sobreexcavación, la barrenación en línea entre barrenos cargados ocasiona fracturas que mejoran los resultados.

d).- LIMITACIONES

Algunas de sus desventajas son: los resultados que la barrenación en línea pueda dejar no siempre son predecibles, excepto con formaciones muy homogéneas.

Debido a que con el procedimiento descrito se requiere de barrenación muy cerrada, los costos de barrenación son altos.

5.2.- VOLADURAS AMORTIGUADAS

a).- PRINCIPIO

La voladura amortiguada, se originó en el Canadá hace varios años. Al igual que la barrenación en línea, la voladura amortiguada implica una sola hilera de agujeros a los largo de la plantilla de excavación.

Aunque esta voladura como se practicó originalmente involucraba barrenos de 4" a 6 1/2" de diámetro, también han

utilizado barrenos pequeños hasta de 2" y 3 1/2" de diámetro. Las cargas para las voladuras amortiguadas deben ser ligeras, - bien distribuidas, perfectamente taponadas o atacadas y se disparan después de que la excavación principal ha sido despejada. Al ser volado el bordo, el taco "amortigua" el sacudimiento - dirigido hacia la pared terminada, reduciendo así al mínimo la fractura y las tensiones en la pared terminada. Disparando los barrenos de amortiguamiento con un mínimo de retardo entre sí, la detonación tiende a cortar la pared de roca entre ellos dejando una superficie tersa y con un mínimo de rompimiento indeseado.

Obviamente, a mayor diámetro de barreno, se obtiene - un mayor efecto de amortiguamiento.

b).- APLICACION

En la voladura amortiguada, se desaloja el área principal de excavación dejando un mínimo de bordo frente a la - línea final de excavación. Los barrenos de amortiguamiento - pueden perforarse ya sea antes de la voladura primaria o justamente antes de remover el bordo final.

Trabajos a cielo abierto.- El bordo y espaciamiento - varían con el diámetro del barreno que se utilice. La relación del bordo a espaciamiento variará con las diferentes formaciones

pero el espaciamento deberá ser siempre menor que el ancho de la banqueta que se vaya a remover, para obtener así el máximo - corte entre barrenos.

La tabla 5.3 muestra una guía de patrones y cargas - para diferentes diámetros de barrenos.

Tabla 5.3

Cargas y patrones propuestos para voladuras amortiguadas

Diámetro del Barreno (pul)	Espaciamento (pies)	Bordo (pies)	Carga de Explosivos (lb/pie)
2 - 2 1/2	3	4	0.80 - 0.25
3 - 3 1/2	4	5	0.13 - 0.50
4 - 4 1/2	5	6	0.25 - 0.75
5 - 5 1/2	6	7	0.75 - 1.00
6 - 6 1/2	7	9	1.00 - 1.50

Con esta técnica, los barrenos se cargan con cartuchos enteros o fraccionados atados a líneas de cordón detonante a manera de rosario, usándose generalmente cartuchos de 1 1/2" de diámetro por 8" de largo y colocándose a 1 o 2 pies un cartucho del otro.

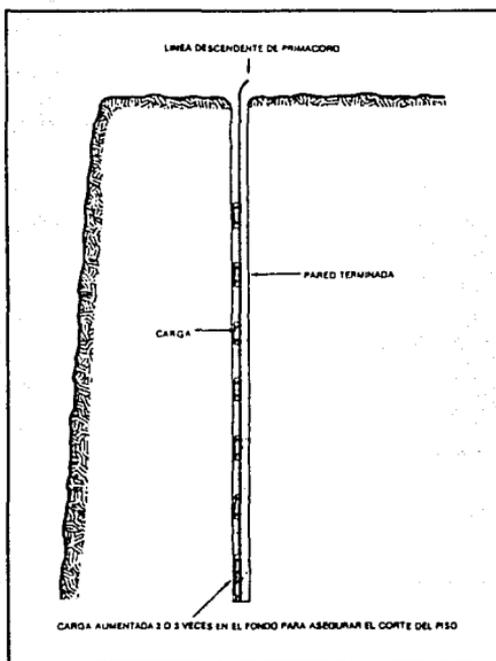
Para provocar el corte en el fondo del barreno, se -

utiliza una carga 2 o 3 veces mayor que la utilizada en la parte superior del barreno. Para efectos de un amortiguamiento máximo, las cargas deben colocarse dentro del barreno tan próximas como sea posible a la pared correspondiente al lado de la excavación. Para lograr esto, puede rellenarse la parte posterior del barreno, empleando arena, piedra triturada o grava. Los últimos 2 o 3 pies del barreno se atacan completamente y no se cargan. La cantidad de taco en la parte superior varía de acuerdo con la formación por volarse (Ver fig 5.4).

La voladura amortiguada puede practicarse por métodos de banqueo o perforando previamente los barrenos de amortiguamiento hasta la profundidad completa de la excavación. Cuando se trabaja por bancos, se deja usualmente un escalón mínimo de un pie por banco, ya que es imposible colocar la perforadora a ras con la pared del banco superior.

La profundidad mayor que puede volarse con éxito por este método, depende de la precisión del alineamiento de los barrenos. Con barrenos de diámetros mayores puede mantenerse un mejor alineamiento a mayores profundidades. Las desviaciones de más de 6" del plano de los barrenos dan generalmente malos resultados. Se han volado con éxito por amortiguamiento barrenos hasta de 90 pies de profundidad.

Fig 5.4 Distribución de la carga de explosivo, utilizada para Voladuras Amortiguadas y Precorte.



Cuando se realizan voladuras por amortiguamiento en áreas curvas o en esquinas, se requieren menores espaciamientos que cuando se vuela una sección recta. Pueden también utilizarse agujeros-guía con ventaja cuando se vuelan cargas no lineales. En esquinas a  $90^\circ$ , una combinación de varias técnicas de voladuras empleadas para controlar la sobreexcavación, darán mejores

resultados que la voladura amortiguada simple.

En formaciones sedimentarias nada consolidadas, en donde es difícil obtener una pared lisa, se recomienda intercalar agujeros-gufa sin cargar, entre los agujeros de amortiguamiento. Generalmente se emplean agujeros-gufa de pequeño diámetro para reducir los costos de barrenación.

En donde sólo la parte superior de la formación está intemperizada, los agujeros-gufa se perforan solamente hasta esa profundidad y no hasta la profundidad total de los barrenos de amortiguamiento. Este procedimiento es común en el primer banqueo, puesto que el sobrerrompimiento hacia atrás es más probable allí que en la parte no intemperizada del banqueo.

Se han obtenido resultados satisfactorios en formaciones homogéneas rellenando sólo los últimos 2 o 3 pies del barreno y no haciéndolo entre cargas. En este caso, el aire entre las cargas y la pared del barreno sirve como colchon amortiguador. Cuando no se utiliza taco entre las cargas, los gases formados por la explosión pueden encontrar una zona débil en la formación y fugarse antes de que se obtenga el efecto de corte deseado entre los barrenos. De igual manera, estos gases pueden encontrar superficies de debilidad atrás de la pared terminada y producir exceso de rompimiento. A menos que la formación sea muy homogénea y dura, se recomienda introducir el taco

completamente, entre y alrededor de las cargas individuales.

c).- VENTAJAS

Las voladuras amortiguadas ofrecen ciertas ventajas, tales como: mayores espaciamentos entre agujeros para reducir los costos de perforación.

Mejores resultados en formaciones no consolidadas.

Es posible aprovechar ventajosamente la información geológica obtenida al volar los cortes principales cuando se cargan los barrenos amortiguadores, resultando menos trabajo tentativo.

d).- LIMITACIONES

Hay ciertas limitaciones para las voladuras amortiguadas que deben tomarse en consideración. Entre éstas están: - la necesidad de retirar el área excavada antes de iniciar las voladuras amortiguadas.

A veces, el exceso de rompimiento originado por las voladuras primarias saca completo o parcialmente, el bordo por volarse por amortiguamiento; requiriéndose varios ajustes a las cargas de diferentes barrenos.

### 5.3.- VOLADURAS SUAVES

#### a).- PRINCIPIO Y APLICACION

Las voladuras suaves, se introdujeron en Suecia y es el método más ampliamente aceptado para controlar el sobrerrompimiento en frentes y rebajes bajo tierra. Las técnicas de voladuras suaves tienen aplicación tanto a cielo abierto como en trabajo subterráneo.

La aplicación de estas técnicas en trabajos a cielo abierto es prácticamente idéntico a las voladuras amortiguadas.

En las voladuras suaves los barrenos se perforan a lo largo de los límites de excavación, se cargan ligeramente con carga bien distribuida y se disparan después de que la excavación principal ha sido removida. Disparando instantáneamente o con un retardo mínimo entre los barrenos se obtiene una sección de corte de paredes tersas con un mínimo de sobrerrompimiento.

### 5.4.- PRECORTE

#### a).- PRINCIPIO

El precorte involucra una hilera sencilla de barrenos perforados a lo largo de la línea de excavación neta. Los

barrenos son generalmente del mismo diámetro (dos a cuatro pulgadas) todos cargados en la mayoría de los casos con explosivos de 7/8 a 1 pulgada de diámetro y disparados antes que cualquier área de voladura principal adyacente.

La teoría del precorte consiste en que cuando dos cargas se disparan simultáneamente en barrenos adyacentes, la colisión de las ondas de choque procedentes de los agujeros, coloca a la pared intermedia en tensión y origina grietas que forman el corte entre los barrenos (Ver Fig 5.5). Con cargas y espaciamientos adecuados, la zona fracturada entre barrenos se constituirá en una angosta franja cortada hacia la cual la voladura principal puede romper. El resultado es una pared lisa con poco o ningún rompimiento adicional.

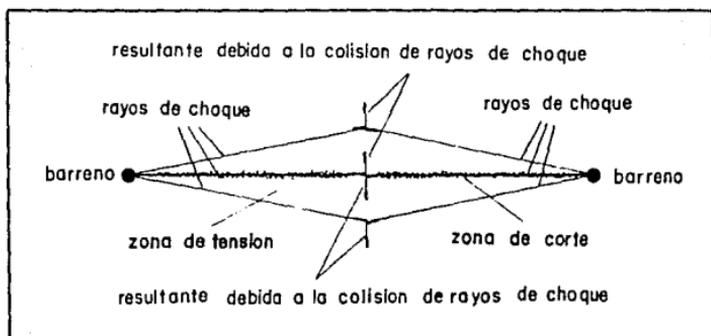


Fig 5.5 Teoría del Precorte

El plano prefracturado refleja parte de las ondas de choque procedentes de las voladuras principales inmediatamente posteriores e impide que sean transmitidas a la pared terminada, reduciéndose al mínimo la fracturación y la sobreexcavación. Esta reflexión de las ondas de choque de las voladuras principales también tienden a reducir la vibración.

#### b).- APLICACION

Trabajos a cielo abierto.- Los barrenos para precorte se cargan de manera similar a los barrenos para voladuras amortiguadas, esto es, se forman cargas "en rosario" de cartuchos enteros o parciales, espaciados a 1 o 2 pies centro a centro.

Como en las voladuras amortiguadas, los barrenos se disparan generalmente en forma simultánea, usando una línea troncal de cordón detonante. Si se disparan líneas demasiado largas se pueden retardar tramos empleando dispositivos de retardo MS.

En roca sin consolidación alguna, los resultados se mejorarán utilizando barrenos-gufa o de alivio, entre los barrenos cargados, provocando así el corte a lo largo del plano deseado. Aún en formaciones más duras, los barrenos-gufa colocados entre los cargados, dan mejor resultado que aumentando -

la carga explosiva por barreno.

Los espaciamientos promedio y las cargas por pie de barreno se dan en la tabla 5.6. Estas cargas son para condiciones de roca normales y pueden obtenerse utilizando cartuchos convencionales parciales o enteros, espaciados en "rosarios" de cordón detonante.

Tabla 5.6 Cargas y espaciamientos propuestos para precorte

Díámetro del Barreno (pul)	Espaciamiento (pies)	Carga de Explosivos (lb/pie)
1 1/2 - 1 3/4	1 - 1 1/2	0.80 - 0.25
2 - 2 1/2	1 1/2 - 2	0.80 - 0.25
3 - 3 1/2	1 1/2 - 3	0.13 - 0.50
4	2 - 4	0.25 - 0.75

Todos los barrenos cargados para precorte se taponan completamente, tanto alrededor como entre cargas, para evitar la fuga de gases hacia los estratos débiles y que se originen así malos resultados. Sin embargo, al igual que en las voladuras amortiguadas, se han obtenido buenos resultados en las formaciones homogéneas más sólidas, colocando el taco solamente en los últimos dos o tres pies del barreno. También es conveniente aumentar la carga en los primeros pies del barreno hasta

cerca de 2 o 3 veces la utilizada en la porción superior. -  
Esto provoca el corte en el fondo en donde es más difícil hacer  
lo.

Se recomienda colocar las cargas al tresbolillo en -  
barrenos adyacentes para obtener mejor distribución total de -  
carga.

La profundidad que puede precortarse de una sola vez,  
depende de la habilidad para mantener un buen alineamiento de -  
los barrenos. Las desviaciones mayores a 6" del plano deseado,  
darán resultados negativos. Generalmente la máxima profundidad  
que puede utilizarse para barrenos de 2 a 3 1/2" de diámetro  
sin una desviación significativa en el alineamiento es de 50 -  
pies (15 m).

El precorte puede realizarse simultáneamente a la vo-  
ladura primaria, retrasando con retardadores MS los barrenos de  
la primaria, de manera que los barrenos del precorte estallen -  
primero que los de la voladura principal.

En muchos casos, especialmente cuando se disparan cor-  
tes no lineales, el precorte en combinación con la barrenación  
en línea dará buenos resultados.

b).- VENTAJAS

El precorte ofrece las siguientes ventajas: aumento en el espaciamiento de los barrenos, reduciéndose así los costos de barrenación.

No es necesario regresar a volar taludes o paredes - después de la excavación primaria.

c).- LIMITACIONES

En el precorte es difícil determinar los resultados - hasta que la excavación de la voladura primaria ha llegado a la pared terminada. Dado que el precorte se efectúa antes de las voladuras primarias, no es posible sacar ventaja del conocimiento de las condiciones locales de la roca que se obtiene de los disparos primarios.

5.5.- COMBINACIONES

Como ya se ha mencionado, es conveniente a menudo, - especialmente en áreas sin consolidación, barrenar en línea - entre los barrenos de voladuras amortiguadas y de precorte para obtener buenos resultados. Es también frecuentemente ventajoso barrenar en línea o precortar esquinas en donde se emplea la -

voladura amortiguada (fig 5.7)

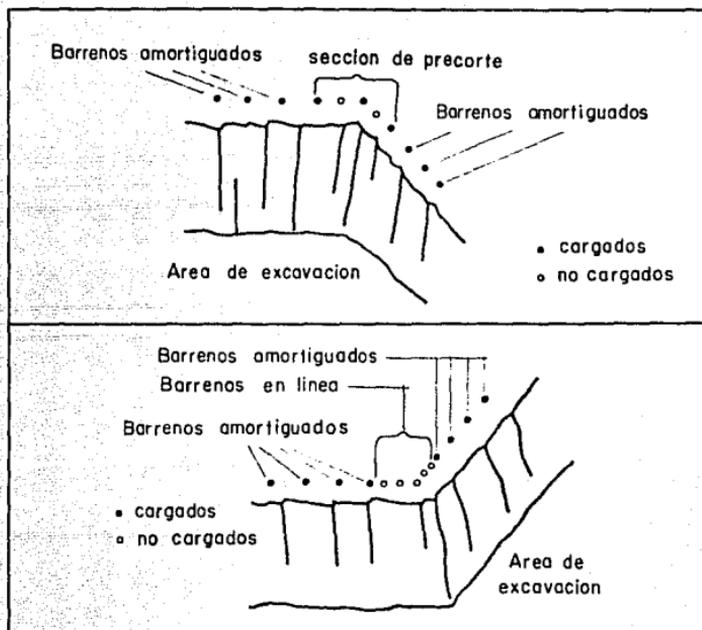


Fig 5.7 Combinación de Técnicas en Voladuras de Caras no lineales

## C O N C L U S I O N E S

Y

## R E C O M E N D A C I O N E S

Generalmente el tamaño de la roca que puede producir una cantera depende de la distribución de las distintas formaciones existentes, espaciamiento y abertura de las fracturas y estratos, resistencia y densidad de la roca.

En el caso de tener un banco de roca con estratificación y fracturas muy cerradas, éste nunca será capaz de producir bloques de roca de tamaños grandes, como los que se requieren para la coraza primaria de un rompeolas.

Cuando se requiere obtener bloques de gran tamaño para la construcción de rompeolas, escolleras, etc., la calidad de la roca es el factor dominante. Si la roca es homogénea, la obtención de los bloques grandes es más sencilla. Sin embargo son muchos los casos en que las rocas presentan condiciones estructurales complicadas; en la práctica las estructuras geológicas simples y homogéneas son poco frecuentes, en México no es común encontrar este tipo de formaciones, es rara la vez que se presentan.

Otro aspecto importante en el control de la fragmentación de la roca es el diseño de la voladura, que incluye; el

cálculo de la carga de explosivos y la determinación de las magnitudes geométricas, para ello, se pueden utilizar los conceptos y fórmulas que aparecen en el capítulo IV de este trabajo, tomando en cuenta que las constantes que intervienen en ellas, son un promedio obtenido a partir de múltiples pruebas de voladuras realizadas en todo el mundo.

Por lo anterior, es recomendable que siempre que se utilicen dichas fórmulas se tenga un amplio criterio, apoyado en:

- 1) El conocimiento de las leyes y principios del desprendimiento de las rocas.
- 2) La información precisa y suficiente de las características geológicas del banco.
- 3) La experiencia que se tenga en este tipo de actividad.

Lo anteriormente mencionado hace que la aplicación de los métodos para diseño de voladuras sea un arte, pues la precisión de los resultados obtenidos dependen de la habilidad personal de quien los aplica, al adecuarlos a problemas específicos de excavación.

A diferencia de la explotación de bancos de roca pa-

ra carreteras, presas de enrocamiento o producción de agregados; la problemática principal que se tiene en las obras marítimas, es la obtención de rocas grandes, denominadas generalmente como Coraza, por lo que una de las claves en la explotación de rocas para rompeolas y escolleras, es dedicarse exclusivamente a obtener Coraza, ya que la Capa Secundaria y el Núcleo se obtendrán en demasía.

Resumiendo la información proporcionada por el Ing. Alberto Pérez López con cargo de Superintendente General que desempeña en la compañía Ingeniería y Puertos, S.A. de C.V., podemos resumir lo siguiente:

"Generalmente en las voladuras realizadas por el Ing. Pérez L., orientadas a obtener Coraza, el porcentaje de rocas útiles (Coraza) ha sido entre el 10 y 15% del volumen total desprendido. En voladuras económicamente aceptables, empleando la técnica de la voladura amortiguada con la cual se han obtenido los mejores resultados en la práctica".

Por lo que se recomienda, llevar un registro sistemático y detallado de cada una de las operaciones de voladuras efectuadas para obtener rocas de grandes dimensiones y tonelaje; con la intención de poder encontrar técnicas que nos permitan mejorar los resultados obtenidos en la actualidad.

Mientras tanto; es necesario considerar en los costos de explotación, la magnitud real del volumen de material - que deberá explotarse para la construcción plena de la obra.

En el análisis de los costos de la excavación deben tomarse en cuenta los costos de la perforación, de los explosivos, de las operaciones de carga e iniciación de la voladura, del rezagado y de los trabajos de apertura del banco y vías de acceso.

Ningún método de análisis de costos puede aplicarse de igual manera a todas las condiciones, pero el campo de aplicación de un método es mayor cuanto mayor es el número de factores considerados en el problema.

Es importante que todo usuario de explosivos tenga presente la información que al respecto marcan los reglamentos de seguridad, pues el menor abuso o manejo equivocado de los explosivos puede ser fatal o causar serias lesiones a quienes tengan contacto directo con estos materiales.

Los explosivos por sí solos no causan accidentes. Los accidentes son causados por falta de cuidado o actos sin pensar de la gente que trabaja con ellos.

El personal designado para manejar materiales explo-

sivos deberá tener inteligencia, sentido común y estar entrenado en el uso de explosivos. La gente deberá saber qué cosa es segura y qué no lo es. En consecuencia, el grado de seguridad que se logre en cada situación de voladura depende de la habilidad de la gente y de la calidad de su entrenamiento al respecto.

Los reglamentos federales, estatales y a veces locales, regulan los muchos pasos involucrados en el transporte, almacenamiento y manejo de materiales explosivos. Están intencionados a minimizar los riesgos a que se expone el personal y asegurar que los explosivos se conserven estables y en condiciones de uso.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Ricci, Chacon, "Explosivos y Voladuras aplicados a las obras de ingeniería civil", Instituto técnico de ingeniería A. C., México, 1984.
- 2.- Langefors, H. y Kihlstrom, B., "Técnica moderna de voladura de rocas", Editorial URMO, S. A., España, 1976.
- 3.- Du Pont, S. A. de C. V., "Manual para el uso de explosivos", México, 1987.
- 4.- Comisión federal de electricidad, I. I. E., "Procedimientos de excavación", México, 1982.
- 5.- Facultad de ingeniería, División de educación continua, - Apuntes del curso "Voladura de rocas", México, 1979.
- 6.- Facultad de ingeniería, División de educación continua, - Apuntes del curso "Geología aplicada a la construcción", México, 1985.
- 7.- McCormark, George, Conferencia sobre "Voladuras eléctricas", Departamento de explosivos Du Pont, México, 1968.
- 8.- Osorio, Morales, Conferencia sobre "Rompeolas, escolleras, y espigones", Biblioteca de Puertos Mexicanos, México, 1988.
- 9.- D. Leet, y Sheldon, J., "Fundamentos de geología física", Editorial Limusa, México 1968.

- 10.- Benitez Esparza, y Bernal Velasco, "Apuntes de geología".  
Fac. de Ingeniería, U.N.A.M., México, 1982.